

Consideraciones de diseño para el rectificado electroquímico. Además de las consideraciones de diseño ya listadas para el maquinado electroquímico, el rectificado electroquímico requiere dos más:

- El diseño debe evitar radios internos agudos.
- Si una superficie ha de ser plana, debe ser más angosta que el ancho de la piedra abrasiva.

27.5 Electroerosión

El principio de la *electroerosión* o *maquinado por descarga eléctrica* (EDM, por sus siglas en inglés), también llamado *electrodescarga* o *maquinado por chispas*, se basa en la erosión de metales por medio de chispas de descargas eléctricas. Recuerde que cuando dos conductores de corriente se tocan se produce un arco eléctrico. Al examinar de cerca el punto de contacto entre los dos conductores, se observará que una porción pequeña de metal ha quedado erosionada, lo que deja un pequeño cráter en la superficie. Aunque este fenómeno se ha conocido desde el descubrimiento de la electricidad, sólo hasta antes de la década de 1940 se desarrolló un proceso de maquinado con base en ese principio; el EDM se ha convertido en una de las tecnologías de producción más importantes y de mayor uso en la manufactura.

Principio de operación. El sistema básico del maquinado por descarga eléctrica consiste en una herramienta de forma (*electrodo*) y la pieza de trabajo conectada a una fuente de corriente directa y situada en un fluido dieléctrico (un no conductor de electricidad), como se aprecia en la figura 27.11a. Cuando la diferencia de potencial entre la herramienta y la pieza de trabajo es suficientemente alta, se rompe la resistencia del dieléctrico y se descarga una chispa momentánea a través del fluido, lo que remueve una cantidad muy pequeña de metal de la superficie de la pieza de trabajo. La descarga del condensador se repite de manera continua a razón de entre 200 y 500 kHz, con voltajes en el rango general de 50 a 380 V y corrientes de 0.1 a 500 A. El volumen de material removido por descarga es común que esté en el rango de 10^{-6} a 10^{-4} mm³ (10^{-10} a 10^{-8} pulg³).

El proceso de EDM puede usarse en cualquier material que sea conductor de electricidad. Dos propiedades importantes, que determinan el volumen del metal removido por descarga, son el punto de fusión y el calor latente de fusión del material de la pieza de trabajo. A medida que estas cantidades se incrementan, disminuye la tasa de material removido. La tasa de remoción de material se estima con la fórmula empírica siguiente:

$$\text{MRR} = 4 \times 10^4 I T_w^{-1.23}, \quad (27.2)$$

donde la MRR está expresada en mm³/min, I es la corriente en amperes y T_w es el punto de fusión de la pieza de trabajo en °C.

La pieza de trabajo se fija dentro del tanque que contiene el fluido dieléctrico y sus movimientos se efectúan con sistemas de control numérico. El espacio entre la herramienta y la pieza de trabajo (*sobrecorte*) es crítico; de este modo, el avance de la herramienta hacia abajo está controlado por un servomecanismo, el cual mantiene en forma automática un espacio constante. Por lo general, la frecuencia de la descarga o la energía por descarga, el voltaje y la corriente, se hacen variar para controlar la tasa de remoción. La tasa y rugosidad de la superficie producida aumentan con el incremento de la densidad de corriente y con la disminución de la frecuencia de las chispas.

Fluidos dieléctricos. Las funciones del fluido dieléctrico son:

1. Actuar como un aislante hasta que el potencial es suficientemente alto.
2. Brindar un medio de enfriamiento.
3. Actuar como un medio de flujo y retirar los residuos del espacio.

Las máquinas de maquinado por descarga eléctrica están equipadas con una bomba y sistema de filtrado para el fluido dieléctrico. Los fluidos dieléctricos más comunes son aceites minerales, aunque en aplicaciones especiales también se emplean keroseno y agua

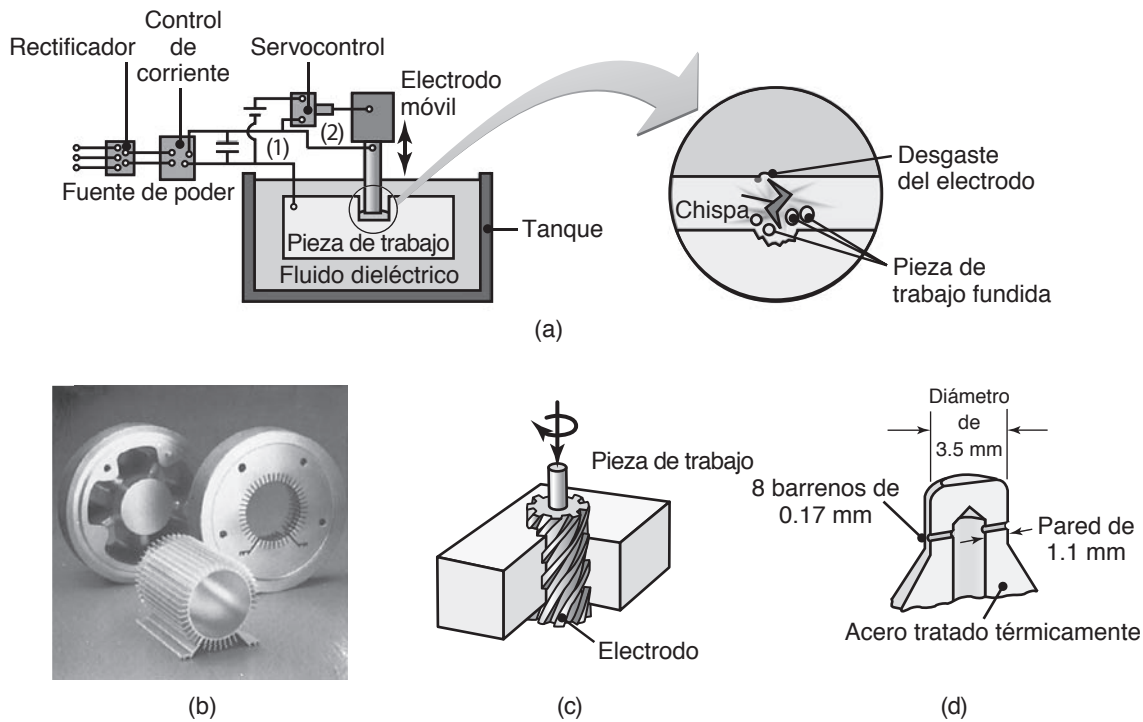


FIGURA 27.11 (a) Ilustración esquemática del proceso de maquinado por descarga eléctrica; éste es uno de los más utilizados, en particular para aplicaciones de tallado de dados. (b) Ejemplos de cavidades producidas por EDM con el uso de electrodos con forma; las dos partes redondas (atrás) son el conjunto de dados usados en la extrusión de la pieza de aluminio que se muestra en el frente (vea también la figura 15.9b). (c) Cavidad espiral producida por EDM con el empleo de un electrodo que gira con lentitud parecido a un tornillo con rosca. (d) Barrenos en una boquilla para inyección de combustible manufacturada con EDM; el material es acero tratado térmicamente. Fuente: (b) Cortesía de AGIE USA, Ltd.

destilada o sin iones. Aunque son más caros, también existen fluidos de baja viscosidad y claros que hacen más fácil la limpieza.

Electrodos. Los electrodos para el EDM suelen estar hechos de grafito, aunque también se emplean latón, cobre o aleaciones de cobre-tungsteno. Las herramientas reciben su forma por formado, fundición, metalurgia de polvos o técnicas de maquinado CNC. Los electrodos conductores de tungsteno son tan pequeños que tienen un diámetro de 0.1 mm (0.005 pulg) y se utilizan para producir barrenos, con razones de profundidad a diámetro de hasta 400:1, que es mucho mayor que la que se obtiene con métodos convencionales (vea la tabla 23.10).

En el maquinado por descarga eléctrica las chispas también erosionan al electrodo, lo que cambia su geometría y perjudica la forma producida y su exactitud dimensional. La *razón de desgaste* se define como la razón del volumen del material removido de la pieza de trabajo al volumen del desgaste de la herramienta; está en un rango alrededor de 3:1 para electrodos metálicos y hasta de 100:1 para electrodos de grafito. Se ha demostrado que el desgaste de la herramienta se relaciona con los puntos de fusión de los materiales involucrados: cuanto más alto sea el punto de fusión del electrodo, más baja será la tasa de desgaste. En consecuencia, los electrodos de grafito tienen la mayor resistencia al desgaste; asimismo, a mayor intensidad de corriente, mayor desgaste. El desgaste de la herramienta se puede minimizar al invertir la polaridad y emplear herramientas de cobre, en un proceso llamado **EDM sin desgaste**. Debe tenerse cuidado en el control del proceso; es posible que el material de la pieza de trabajo recubra el electrodo y cambie su forma.

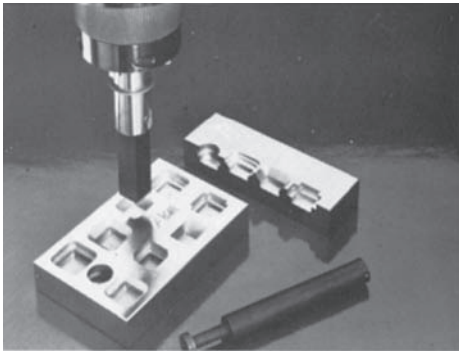


FIGURA 27.12 Cavidades escalonadas producidas con un electrodo cuadrado con el proceso de EDM. La pieza de trabajo se mueve en las dos principales direcciones horizontales, su movimiento está sincronizado con el movimiento hacia abajo del electrodo para producir las cavidades; también se muestra un electrodo redondo capaz de producir cavidades esféricas o elípticas. Fuente: Cortesía de AGIE USA, Ltd.

Capacidades del proceso. El maquinado por descarga eléctrica tiene numerosas aplicaciones, por ejemplo dados para forja, extrusión, dados para fundición, moldeo por inyección y componentes de grandes láminas metálicas de la carrocería de automóviles (producidas en centros de maquinado de dados, de control numérico). Otras aplicaciones incluyen el maquinado de barrenos de pequeño diámetro pero profundos, que usan un conductor de tungsteno como electrodo; ranuras angostas en ciertas partes; conductos de refrigeración en los álabes de turbina hechos con superaleaciones y varias formas intrincadas (vea las figuras 27.11b y c). Pueden producirse cavidades escalonadas simplemente controlando los movimientos relativos de la pieza de trabajo en relación con el electrodo (figura 27.12).

Maquinado con arco azul. Una variación del maquinado por descarga eléctrica es el proceso con *arco azul* desarrollado para hacer cortes rugosos en materiales difíciles de maquinar, en especial superaleaciones de níquel. La geometría de los discos de álabes (o *blisks*) que se usan en los motores de avión es un reto para el maquinado; el proceso de arco azul remueve la mayor parte del material para lograr la forma básica, que después se termina por medio de maquinarla en una fresa CNC convencional. El arco azul usa un electrodo y una descarga eléctrica para maquinar y remover el material, pero agrega un fluido a alta presión que retira las virutas de la zona de corte. Se ha demostrado que este método reduce

hasta 30% el consumo de energía en comparación con el fresado, además disminuye de días a horas el ciclo de tiempo para producir los discos con aspas. Existen variantes del maquinado con arco azul para el torneado y el rectificado.

Debido a la superficie fundida y vuelta a solidificar (refundido) que se desarrolla, grandes tasas de material removido producen una superficie con acabado muy rugoso, con mala integridad y propiedades de fatiga deficientes. Los cortes de acabado se hacen entonces a tasas de remoción lentas, o bien la capa del refundido se retira posteriormente por operaciones de acabado. También se ha demostrado que el acabado de la superficie mejora si se hace *oscilar* el electrodo con un movimiento planetario, con amplitudes de 10 a 100 μm .

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 modo que los electrodos requeridos reciban su forma sin grandes costos.
- Deben evitarse las ranuras profundas y las aberturas angostas.
- Para lograr una producción rentable, el acabado que se especifique para la superficie no debe ser demasiado fino.
- Con el fin de lograr una tasa de producción elevada, el grueso de la remoción de material debe realizarse con procesos convencionales (llamado *corte de desbaste*).

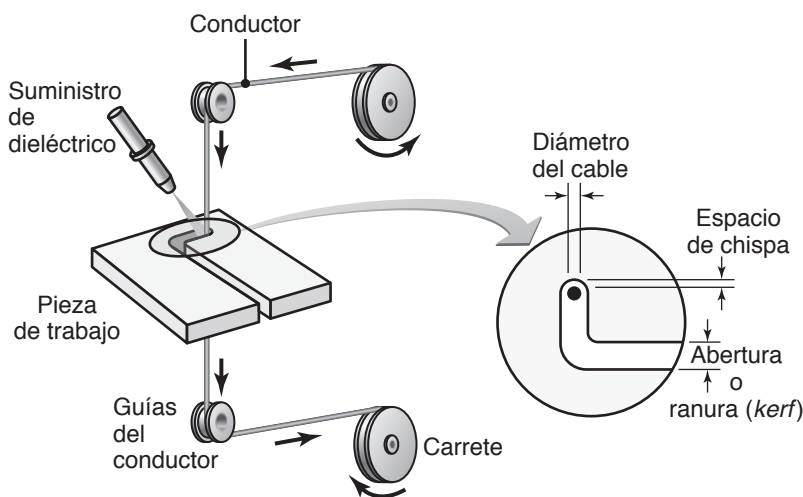


FIGURA 27.13 Ilustración esquemática del proceso EDM; pueden realizarse hasta 50 horas de maquinado con un carrete de conductor, el cual luego se recicla o desecha.

27.5.1 Maquinado por descarga eléctrica con alambre

Una variación del EDM es el *EDM con alambre*, o *electroerosión de hilo* (figura 27.13). Este proceso es parecido al corte de contorno que se hace con una sierra de cinta (ilustrado en la figura 24.28), en el cual un cable que se

mueve con lentitud recorre una trayectoria prescrita y corta la pieza de trabajo. La figura 27.14a muestra una placa gruesa que se corta con este proceso, en una máquina semejante a la de la figura 27.14b. De esta manera es posible cortar placas de un grosor de hasta 300 mm (12 pulg) y punzones, herramientas y dados hechos de metales duros, así como componentes intrincados para la industria electrónica.

El alambre se mueve a una velocidad constante en el rango de 0.15 a 9 m/min (6 a 360 pulg/min), y durante el corte se mantiene un espacio constante (*abertura* o *kerf*). Por lo general, la velocidad de corte se da con respecto al área de la sección transversal cortada por unidad de tiempo. Ejemplos comunes son 32 000 mm²/h (50 pulg²/h) para un acero D2 de 50 mm (2 pulg) de grueso para herramienta, y 80 000 mm²/h (125 pulg²/h) para aluminio de 150 mm (6 pulg) de grueso. Estas tasas de remoción indican una velocidad de corte lineal de 32 000/50 = 640 mm/h = 10.7 mm/min, y 80 000/150 = 533 mm/h = 8.9 mm/min, respectivamente.

El alambre suele estar hecho de latón, cobre, tungsteno o molibdeno; también se usan alambres con recubrimientos de zinc o latón, recubrimientos múltiples y núcleos de acero. El diámetro del alambre por lo general es de alrededor de 0.30 mm (0.012 pulg) para cortes de desbaste y de 0.20 mm (0.008 pulg) para cortes de acabado. El alambre debe tener una conductividad eléctrica elevada y resistencia a la tensión, ya que es común que alcance 60% de su resistencia a la tensión. Por lo general se usa una sola vez y es relativamente barato en comparación con el tipo de operación que realiza.

Los centros de maquinado de EDM con alambre cortador de ejes múltiples son capaces de producir formas tridimensionales y están equipados con herramientas como las siguientes:

- Controles por computadora, para dirigir la trayectoria de corte del alambre (figura 27.14b) y su ángulo con respecto al plano de la pieza de trabajo.
- Cabezas múltiples para cortar dos partes al mismo tiempo.
- Características como controles para prevenir la ruptura del alambre.
- Propiedades como enrollado automático en caso de ruptura del alambre.
- Estrategias de maquinado programado, con el fin de optimizar la operación.

Las máquinas de dos ejes controladas por computadora tienen la capacidad de producir formas cilíndricas, de manera parecida a una operación de torneado o rectificado cilíndrico. Las máquinas modernas de maquinado por descarga eléctrica con alambre permiten controlar el avance y tomar los extremos del alambre para cruzar de manera independiente en dos direcciones principales, de modo que también pueden manufacturarse partes con ahusamientos.

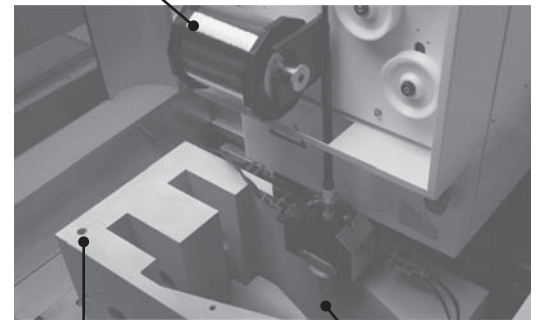
27.5.2 Rectificado por electroerosión

En el *rectificado por electroerosión* (EDG, por sus siglas en inglés), la piedra abrasiva está hecha de grafito o latón y no contiene abrasivos. El material se remueve de la superficie de la pieza de trabajo por medio de descargas de chispas entre ésta y la piedra. Este proceso se utiliza sobre todo para rectificar herramientas y dados de carburo, pero también puede emplearse con partes frágiles como agujas quirúrgicas, tubos de pared delgada y estructuras tipo panel.

El material es removido por acción química, con las descargas eléctricas de la piedra de grafito que rompen la película de óxido de la pieza de trabajo, y ésta se lava con el flujo del electrolito. La tasa de remoción de material se estima con la ecuación

$$MRR = KI, \quad (27.3)$$

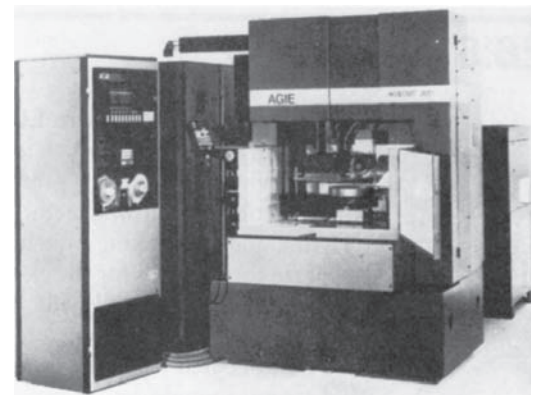
Carrete de alambre



Pieza de trabajo

Alambre

(a)



(b)

FIGURA 27.14 (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.

donde la MRR está expresada en mm^3/min , I es la corriente en amperes y K es un factor del material de la pieza de trabajo expresado en $\text{mm}^3/\text{A}\cdot\text{min}$. Por ejemplo, $K = 4$ para carburo de tungsteno y $K = 16$ para acero.

En el **aserrado EDM** se utiliza un arreglo similar a una banda o cierra circular (pero sin dientes), con el mismo circuito eléctrico que para el EDM. Se pueden hacer cortes angostos con tasas elevadas de remoción de metal. Debido a que las fuerzas de corte se pueden obviar, el proceso también se puede utilizar en componentes delgados y esbeltos.

Es posible combinar el proceso de rectificado por electroerosión con rectificado electroquímico. El proceso recibe el nombre de **rectificado por descarga electroquímica** (ECDG, por sus siglas en inglés) y usa una piedra de grafito, una descarga intermitente de la chispa, de corriente alterna o un pulso de corriente directa, produce la remoción del material. El ECDC también es común que use un electrolito de mucha conductividad en lugar de un fluido dieléctrico y emplea voltajes menores. Este proceso es más rápido que el EDG, pero su consumo de energía es más alto.

27.6 Maquinado con rayo láser

En el *maquinado con rayo láser* (LBM, por sus siglas en inglés), la fuente de energía es un **láser** (acrónimo de *luz amplificada por emisión estimulada de radiación*) que enfoca energía óptica sobre la superficie de la pieza de trabajo (figura 27.15a). La fuente de energía de alta densidad y muy concentrada funde el metal y evapora porciones de la pieza de trabajo en una forma controlada. Este proceso, que no requiere un vacío, se utiliza para maquinar varios materiales metálicos y no metálicos.

En las operaciones de manufactura se emplean varios tipos de láseres (tabla 27.2):

1. CO_2 (*onda en pulsos o continua*).
2. Nd:YAG (neodimio: itrio-aluminio-granate).
3. Nd: vidrio, rubí.
4. Diodo.
5. Excímero [de las palabras *excitado* y *dímero*, que se entiende como dos meros (como en polímero), o dos moléculas de la misma composición química (dos átomos o moléculas unidos a sus electrones en un solo nivel excitado de energía)].

En el maquinado con rayo láser dos parámetros importantes son lo *reflejante* y la *conductividad térmica* de la superficie de la pieza de trabajo, así como su calor específico y

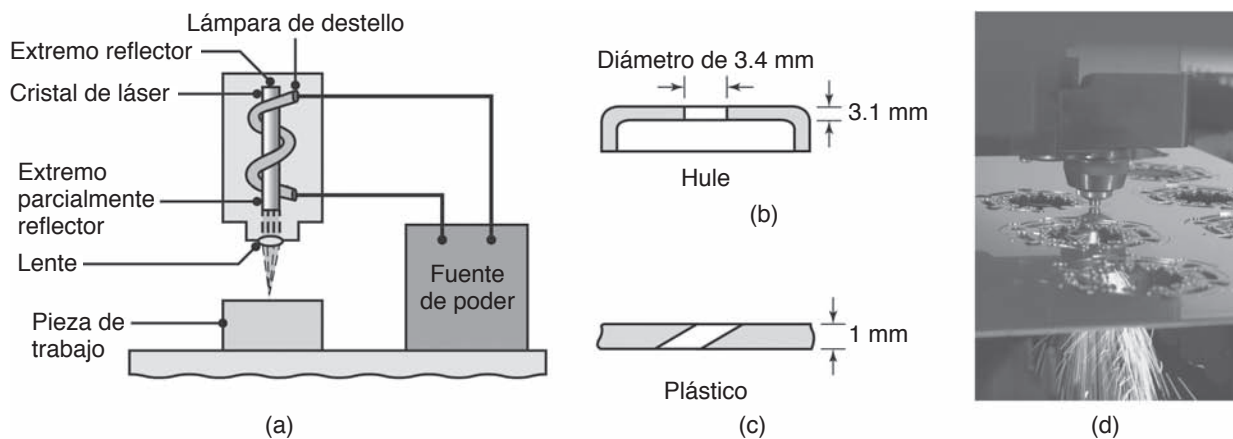


FIGURA 27.15 (a) Ilustración esquemática del proceso de maquinado con rayo láser. (b) y (c) ejemplos de perforaciones producidas en partes no metálicas con LBM. (d) Corte de una placa metálica con rayo láser. Fuente: (d) Cortesía de Rofin-Sinar, Inc.