

# Grafito vs. Cobre

Autor: Jerry Mercer

## LA BÚSQUEDA CONTINÚA: ¿GRAFITO O COBRE?

Cuando se trata de determinar cuál es el mejor material de electrodo para utilizar en EDM, el debate entre el grafito y el cobre parece no tener fin y está lejos de tener una resolución. Muchos argumentan que el grafito es el mejor material de electrodo, mientras que otros defienden con firmeza que el cobre es mejor. Según la región geográfica, la respuesta suele ser la misma. En Norteamérica, el material de electrodo preferido pasó de ser el cobre al grafito. En Europa y Asia, algunos sostienen que el cobre es el material de preferencia, sin embargo, el uso del grafito en estas regiones está aumentando rápidamente. Sin dudas, como se muestra en el Gráfico 1, el grafito es el material predominante en los Estados Unidos ya que al menos el 95 % de los electrodos se produce a partir de este material. Los rápidos y constantes aumentos en el uso del grafito en Europa durante la última década muestran una proporción de material de electrodo de 75 % grafito y 25 % cobre. Asia sigue de cerca estas estimaciones con una proporción de 45 % grafito y 55 % cobre, aunque el uso del grafito está en ascenso continuo. Más del 70 % del mercado mundial prefiere los materiales de electrodo de grafito por encima del cobre, por lo que quizás la pregunta correcta no sea cuál es el mejor material de electrodo para EDM, sino qué es lo que está causando este cambio mundial en la industria. Para responder a esta incógnita, debemos identificar las diferencias entre los materiales.

Uso de electrodos de grafito

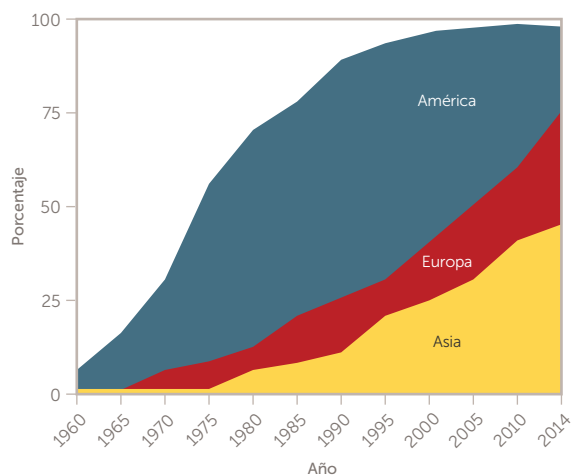


Gráfico 1. Uso proyectado del grafito en los mercados mundiales durante las últimas cinco décadas.

## FACTORES A CONSIDERAR PARA CADA MATERIAL DE ELECTRODO

### Variedad del material

El grafito se produce con una amplia gama de características de materiales para permitir que las propiedades de ese material de electrodo coincidan con la aplicación EDM. Las aplicaciones menos críticas con características de electrodo que contienen un radio grande, una tolerancia abierta o requisitos mínimos de EDM utilizan un electrodo con partículas grandes, menor resistencia y precio económico. Sin embargo, un electrodo para EDM detallado y de características críticas, tolerancia extrema y requisitos más estrictos utiliza un electrodo de grafito de mayor calidad a fin de satisfacer las necesidades de su aplicación. Por otro lado, los tipos de cobre disponibles en el mercado son pocos y por lo tanto, reducen la capacidad de combinar las características del material a la aplicación de EDM, lo que limita el rendimiento óptimo.

### Costo del electrodo

Cuando se considera el costo de los materiales, el concepto común es que el cobre es mucho más barato que el grafito. Esto puede ser cierto si solo se tiene en cuenta el costo del material y no el costo de mecanizar el electrodo. Además, esta afirmación suele hacerse después de comparar el precio del material de cobre con el precio de materiales de grafito más caros en el mercado. Con la amplia gama de materiales de grafito disponibles, es muy posible que algunos grados de EDM sean más económicos que el cobre. Incluso con los materiales de grafito más caros, los costos de mecanizado suelen compensar cualquier ahorro que se consiga con el cobre. Por ejemplo, un electrodo simple con un acabado esmerilado en la parte superior e inferior tendrá un costo de 4.68 dólares por pulgada cúbica solo en material de cobre, mientras que un grafito de calidad superior costará 6.80 dólares por pulgada cúbica, es decir, el cobre cuesta un 45 % más caro. Sin embargo, cuando se incluye el costo de mecanizar un electrodo detallado, todo cambió. En este caso, el electrodo de grafito costará menos del 20 % que el de cobre.

Así que, obviamente, existe algo en el mecanizado del cobre que aumenta significativamente el costo del electrodo. Debido a la característica "dúctil" del cobre, este material es a menudo gomoso, y los parámetros del mecanizado convencional, como la alimentación y la velocidad, deben modificarse para mecanizar con éxito este material. El resultado final son largos tiempos de mecanizado y mayores costos. El cobre-telurio es más fácil de mecanizar, pero esto puede poner en juego el rendimiento de la EDM. El grafito, en cambio, no es gomoso y puede mecanizarse de forma convencional con mucha facilidad y rapidez en comparación con el cobre.

### Detalle del electrodo

El cobre no tiene la capacidad de manejar la densidad de corriente tan eficazmente como el grafito; por lo tanto, las características de un electrodo de cobre deben ser similares en detalle. De hecho, el grafito funciona muy bien con una alta densidad de corriente, incluso con geometrías complejas. Por esta razón, los electrodos de grafito ofrecen la posibilidad de diseñar varios detalles mecanizados intrincados en el mismo electrodo. Así mismo, la cantidad de electrodos necesarios para realizar un trabajo puede reducirse considerablemente. La Figura 1 muestra los resultados de una fábrica que combinó varios detalles de electrodos en un electrodo de grafito en lugar de múltiples electrodos de cobre. Usando cobre, este trabajo en particular requirió más de 100 electrodos para completarse, mientras que el grafito necesitó menos de 30. Además, los electrodos de cobre requirieron trabajo manual para eliminar las esquirlas producto del proceso de mecanizado, mientras que los electrodos de grafito se fresaron lisos y no fue necesario eliminar ninguna esquirla.

### Rendimiento de la EDM

**Tasa de eliminación de material (MRR):** las propiedades termofísicas del material de electrodo determinan la capacidad para procesar la energía del corte por EDM y eliminar metal. Al generar una chispa, el pico de corriente se descarga solo después de que se rompa la separación entre el electrodo y la pieza de trabajo. En este punto, el electrodo emite electrones que chocan con las moléculas del fluido dieléctrico. Como resultado, el fluido se vaporiza y se forma un canal de energía que permite que se produzca la chispa. En el caso de los electrodos de cobre, el fenómeno de liberación de electrones, con la consiguiente formación de carbono en el hueco, solo se produce tras la fusión de su propio material. Por este motivo, los tiempos de encendido de los electrodos de cobre suelen ser mucho mayores que los de los electrodos de grafito. En cambio, un electrodo de grafito es capaz de emitir estos electrones a temperaturas mucho más bajas y el



Figura 1. Comparación de la cantidad de electrodos necesarios para un trabajo específico.

tiempo necesario para formar el canal de energía es considerablemente menor. Por lo tanto, el grafito inicia la chispa más rápidamente, lo que se traduce en tasas de eliminación de material significativamente mayores.

**Desgaste del electrodo (EW):** el desgaste del electrodo es una preocupación de todos los operadores de EDM, ya que un desgaste excesivo obliga a añadir electrodos o a cambiarlos más a menudo. El grafito es capaz de conseguir un desgaste del electrodo inferior al 1 % en relación con la profundidad de corte con parámetros de máquina mucho más agresivos que los electrodos de cobre. Esto significa que el alto amperaje y los largos tiempos de encendido de una condición de desbaste en realidad preservan el electrodo de grafito, mientras que el electrodo de cobre se erosiona con estos ajustes. Por otro lado, en las fases de acabado con amperaje y tiempos de encendido bajos, el electrodo de grafito tiene tendencia a desgastarse a mayor velocidad que el de cobre. No obstante, como el desgaste del electrodo se relaciona con la cantidad de material eliminado en el corte, el porcentaje de desgaste en la fase de acabado sigue siendo mínimo con un electrodo de grafito.

**Acabado superficial (SF):** no es necesario decir que los electrodos de cobre proporcionan acabados superficiales de excelente calidad. Con la sofisticación de la tecnología actual de EDM por inmersión, la diferencia de acabado superficial entre el grafito y el cobre se redujo considerablemente. Los electrodos de grafito de grano fino son ahora capaces de proporcionar acabados superficiales similares mucho más rápidamente que el cobre con un desgaste comparable del electrodo. Con la selección adecuada del material de electrodo y los parámetros de la máquina, el grafito es capaz de lograr acabados semejantes sin un aditivo en polvo y acabados iguales con este aditivo. Como se muestra en la Figura 2, se realizaron cortes de prueba de EDM de 0.260" (0.66 cm) x 0.510" (1.29 cm) en una pieza de prueba. Las dos cavidades de la derecha se mecanizaron a una profundidad de 0.100" (0.25 cm) con un acabado de 8 VDI. Aunque con el cobre aún se pueden conseguir acabados superficiales de mejor calidad, la necesidad de un acabado superficial por EDM inferior a este es poco frecuente, e incluso entonces suele conseguirse con algún tipo de operación de pulido posterior a la EDM.

## DETERMINAR EL COSTO REAL

¿A dónde nos lleva todo esto en nuestra búsqueda del “material de electrodo perfecto”? Aunque no existe en absoluto el material perfecto para todas las aplicaciones de EDM, si se tienen en cuenta los factores aquí expuestos, es posible que comprendamos mejor la razón por la que el grafito se está convirtiendo en el material preferido a escala mundial. Desgraciadamente, esto solo comprende una parte de la historia, ya que debe realizarse un cálculo del costo de propiedad para determinar el verdadero efecto de costo que tiene un material de electrodo en las operaciones de EDM. Para identificar el impacto monetario de los electrodos de grafito y cobre, se realizaron pruebas de grabado y se hizo un seguimiento del rendimiento. Con los resultados de estas pruebas, se identificó el costo real y se determinó el costo de propiedad.

## CASO DE PRUEBA

Los parámetros de estas pruebas consistían en electroerosionar detalles de electrodos idénticos hasta una profundidad de 1" (2.54 cm) utilizando dos electrodos (uno de desbaste y uno de acabado) y luego determinar si se necesitaban electrodos adicionales para completar el trabajo. Para estas pruebas, el detalle del electrodo no era crítico y se eligió una nervadura estándar por simplicidad. Cada nervadura medía 0.040" (0.10 cm) de grosor por 1.00" (2.54 cm) de ancho con un calado de 1°. Por razones de tiempo, se optó por un acabado superficial final de 20 VDI. Se sujetaron dos placas de prueba juntas con el detalle de la nervadura electroerosionada en la línea central. Esto permitió separar las placas y medir los resultados en las mitades correspondientes.

Los materiales de electrodo elegidos fueron un electrodo de grafito EDM-3 de la clasificación “Ultrafine” y un electrodo de cobre C110 “libre de oxígeno”. Con el fin de eliminar cualquier dispersión de datos, estas pruebas se realizaron con tres EDM por inmersión de marcas diferentes. Con ello se pretende normalizar el rendimiento de la EDM y ofrecer un resultado más completo utilizando la media de los resultados de las tres pruebas.

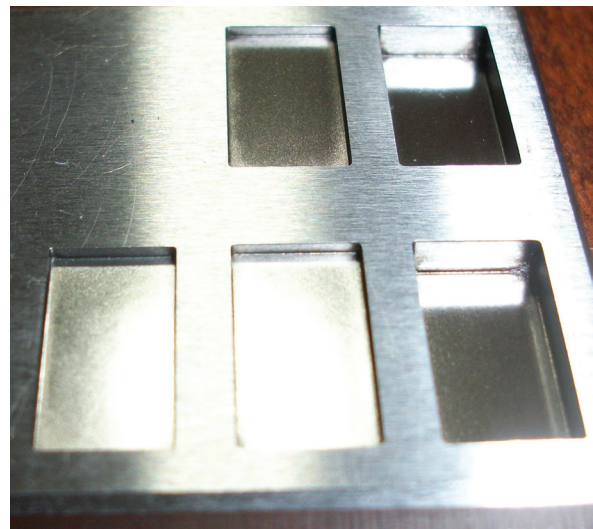


Figura 2. Acabado superficial de excelente calidad disponible con un material de electrodo de grafito adecuado y parámetros de máquina apropiados.

## Preparación de los electrodos

Se utilizaron electrodos comerciales con material y mecanizado estándar. Estas partes se imprimieron con tolerancias indicativas de las normas del sector. Los procedimientos de mecanizado se dejaron a criterio de la empresa que mecaniza los electrodos. Dado que el grado del material estaba específicamente identificado, no se permitieron sustituciones ni para los electrodos de grafito ni para los de cobre. Se eligieron electrodos con el costo más bajo para cada grado a fin de contar con la base de costo más económica a la hora de determinar la relación entre precio y rendimiento para estas pruebas.

## Programación de EDM

El programa de EDM para cada prueba se generó utilizando las tecnologías estándar para cada EDM por inmersión. Para el grafito se utilizó la técnica “grafito de alta calidad frente a acero”, mientras que para los electrodos metálicos se utilizó “cobre frente a acero”. Además, la función de control adaptativo se implementó en cada corte de prueba para simular una aplicación de EDM de la “fabricación real”. Dado que no se puede mecanizar ningún orificio de descarga en el electrodo, se utilizaron líneas de descarga externas con una presión de descarga de 3 a 5 psi. En ninguna de las pruebas intervino el operador, por ejemplo para “ajustar los parámetros de la máquina”.

## Recopilación de datos

Para determinar el impacto de estos tipos de electrodos en el proceso de EDM, se recopilaron datos de cada serie de pruebas. Esto incluye el costo del electrodo, el tiempo del proceso de EDM, la cantidad de desgaste final tanto para los electrodos de desbaste como para los de acabado, y el acabado superficial final conseguido.

**Costo del electrodo:** el costo del electrodo incluye el valor tanto del material como del mecanizado. De este modo, se obtiene un precio global del electrodo sin que un componente de su fabricación tenga un valor superior al otro.

**Tiempo de EDM:** el tiempo necesario para la prueba se tomó directamente del registro de tiempo de cada EDM por inmersión. Esta medida se recopila para cada paso del programa de EDM y se suma para determinar el tiempo total desde el principio hasta el final. Aunque el tiempo varía significativamente de una máquina a otra, el modelo de costo de propiedad tiene en cuenta la media de las tres pruebas de EDM.

**Desgaste del electrodo:** todos los electrodos se midieron antes y después de cada prueba para determinar la cantidad de desgaste durante el grabado. Esta medida se realizó con un medidor de altura independiente y se calculó para determinar el porcentaje de desgaste final en relación con la profundidad del corte de desbaste y acabado.

**Acabado superficial:** el acabado superficial se midió después de cada grabado utilizando un rugosímetro portátil. Las medidas del acabado superficial se realizaron en seis puntos de cada cavidad: tres en la parte superior, media e inferior de la cavidad y, con la pieza de trabajo girada 90 grados, otras tres mediciones desde la izquierda, el centro y la derecha. A continuación, las medidas se promedian para obtener el acabado final de la superficie grabada completa.

## RESULTADOS DE LA PRUEBA

### Costo del electrodo

Como ya se estableció, un electrodo de cobre puede ser más económico que uno de grafito si solo se tiene en cuenta el material en bruto. Sin embargo, cuando se tiene en cuenta el costo de mecanizado, el resultado cambia considerablemente.

Para esta prueba, el costo de cada electrodo de grafito EDM-3 fue de 15.50 dólares, mientras que los electrodos de cobre C110 costaron 95.00 dólares cada uno. La intención es utilizar solo dos electrodos para cada prueba, con un electrodo de desbaste y otro de acabado. Dos de los tres modelos de EDM utilizados en esta prueba generaron programas para dos electrodos. No obstante, el programa de grafito para un modelo de EDM exigía un electrodo de acabado adicional. En este caso, se utilizó un tercer electrodo de grafito para eliminar la intervención del operador y el margen de error. Esta prueba se utiliza para determinar la base del costo de los electrodos. Tanto el material de electrodo EDM-3 como el C110 se consideran materiales de electrodo de alta calidad en sus respectivas categorías. Por supuesto, estos costos podrían reducirse con un material de electrodo más económico y de menor calidad. Para determinar el valor, el costo total de los electrodos de grafito EDM-3 fue de 46.50 dólares y de 190.00 dólares para los electrodos de cobre sin oxígeno C110.

### Tiempo de EDM

Es muy interesante el hecho de que las tres marcas de EDM por inmersión utilizadas en este proyecto programaron los electrodos de cobre con tiempos de encendido mucho más altos que los electrodos de grafito. Esto refuerza la afirmación anterior de que los electrodos de cobre tardan más en romper la separación, lo que reduce la tasa de eliminación de material. Los electrodos de grafito completaron el grabado más rápidamente que los de cobre. En función del EDM utilizado, los electrodos EDM-3 completaron el grabado entre un 28 % y un 171 % más rápido que los electrodos de cobre. Teniendo en cuenta los tiempos medios de grabado de las tres pruebas, los electrodos de cobre completaron el grabado en 4 horas y 29 minutos, mientras que los EDM-3 tuvieron un tiempo medio de grabado de 1 hora y 54 minutos, es decir, un 136 % más rápido. Para proyectar el valor del proceso de EDM, el modelo de costo de propiedad utiliza una tarifa horaria de 55.00 dólares.



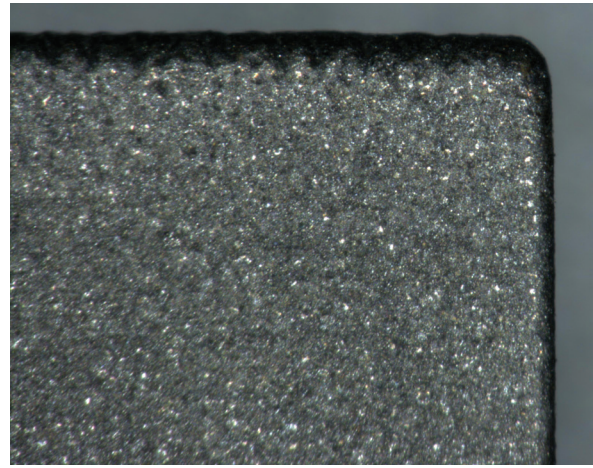
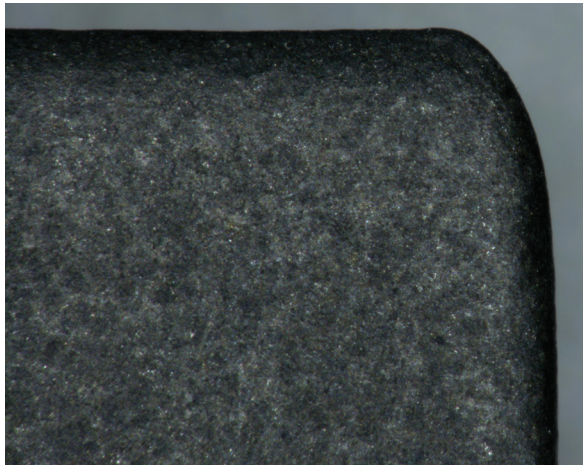


Figura 3. Electrodo de desbaste: grafito a la izquierda, cobre a la derecha.

### Desgaste del electrodo

Concluir qué material de electrodo obtuvo el menor desgaste de electrodo sería difícil, ya que ambos materiales rindieron bien en su categoría respectiva con la técnica de mecanizado utilizada. En el caso de los electrodos de desbaste, como puede verse en la Figura 3, el electrodo de grafito tenía un radio de esquina mayor que el electrodo de cobre, aunque su borde era mucho más liso. El borde rugoso del electrodo de desbaste de cobre hace que el electrodo de acabado trabaje mucho más para conseguir una profundidad de grabado limpia en la cavidad. En la operación de desbaste, el electrodo de cobre presenta un desgaste de los extremos ligeramente menor.

Sin embargo, ambos materiales alcanzaron porcentajes de desgaste comparables al detalle del electrodo y a los parámetros de la máquina. La Figura 4 muestra lo contrario con el electrodo de grafito, que redujo el desgaste de las esquinas y consiguió una cavidad más limpia. El desgaste de las esquinas del electrodo de cobre podría haberse mejorado agregando un tercer electrodo; sin embargo, esto habría aumentado aún más los costos de material y el tiempo de grabado. Sin tener en cuenta el desgaste de las esquinas, el electrodo de grafito tuvo un porcentaje de desgaste total (desbaste y acabado) del 2.75 %, mientras que el electrodo de cobre alcanzó un porcentaje de desgaste final del 0.42 %.

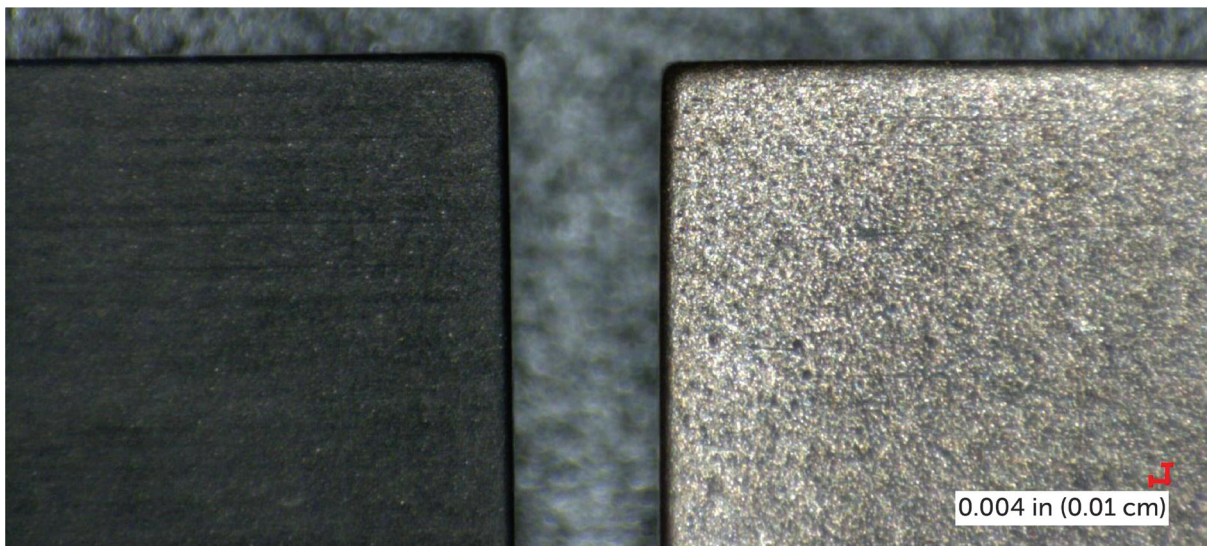


Figura 4. Electrodo de acabado: grafito a la izquierda, cobre a la derecha.

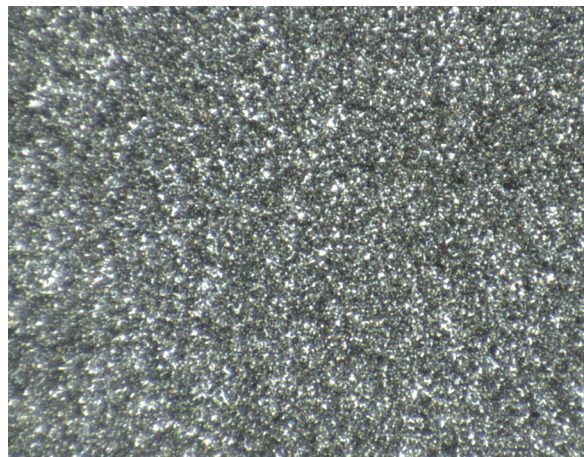
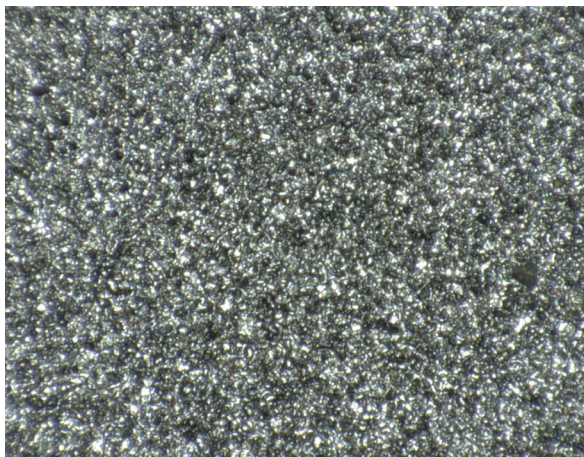


Figura 5. Acabado superficial en la cavidad: grafito a la izquierda, cobre a la derecha.

### Acabado superficial

En la Figura 5 se muestra una ampliación de 25x del acabado superficial de cada cavidad. Como era de esperar, al ser un material sólido sin porosidad, los electrodos de cobre consiguieron un acabado superficial en la cavidad de una calidad ligeramente mayor que el grafito. Sin embargo, ninguno de los dos materiales de electrodo cumplió con el requisito de acabado superficial de 20 VDI. Utilizando una media de seis puntos de medición, el grafito alcanzó un acabado de 24 VDI, mientras que el cobre obtuvo un acabado superficial de 22 VDI. Un proceso de pulido posterior es necesario para ambos electrodos a fin de que el acabado final de la superficie alcance los 20 VDI requeridos. Con una estimación de 15.00 dólares por pulgada cuadrada de superficie por punto VDI, la cavidad producida con los electrodos de grafito tendría un costo de pulido de 60.00 dólares, mientras que la cavidad producida con los electrodos de cobre tendría un costo de 30.00 dólares.

### MODELO DE COSTO

El modelo de costo de propiedad es útil para determinar el efecto monetario en un proceso de producción. La mayoría de las veces, en las operaciones de EDM solo se tiene en cuenta el costo de los materiales de los electrodos; sin embargo, el modelo también tiene en cuenta el costo de la EDM, cualquier pulido posterior necesario y el rendimiento disponible agregado en función de la tarifa de la fabricación.

Como se puede ver en el Gráfico 2, los costos asociados a cada tipo de electrodo se desglosan en función de los factores principales de la EDM. Este modelo desglosa los costos por categoría y calcula el "costo total efectivo" de toda la operación de EDM. Incluso agregando un electrodo de grafito adicional y un costo de pulido posterior ligeramente superior, el costo total de producción sin tener en cuenta el aumento del rendimiento muestra una diferencia clara y evidente. Los costos asociados a los electrodos de grafito EDM-3 ascendieron a 211.00 dólares, mientras que los costos asociados a los electrodos de cobre C110 ascendieron a 466.95 dólares, es decir, un aumento del 121 %. Si se tienen en cuenta los ingresos adicionales generados con la mejora del rendimiento, esto puede considerarse como crédito y reducir aún más los gastos de fabricación. Con este valor, el costo efectivo total de EDM-3 se reduce a 68.90 dólares, mientras que el costo de los electrodos de cobre C110 sigue siendo el mismo, 466.95 dólares. Al final, los costos de producción de los electrodos de cobre C110 son un 578 % superiores a los del grafito EDM-3.



## Comparación del costo entre el grafito y el cobre

		Grafito	Cobre	Varianza
Costo del electrodo	(Material y mecanizado)	46.50 dólares	190.00 dólares	+308 %
Tiempo de grabado de EDM	(Promedio/3 grabados)	1 h 54 min	4 h 29 min	135 %
Costo de grabado de EDM	(55.00 dólares por hora)	104.50 dólares	246.95 dólares	+136 %
Acabado superficial final (VDI)	(Promedio/6 ubicaciones)	24	22	-8 %
Costo de pulido de cavidad	(15.00 dólares/in <sup>2</sup> /VDI)	60.00 dólares	30.00 dólares	-50 %
Costo total de producción		211.00 dólares	466.95 dólares	+121 %
Mayor rendimiento Mayores ingresos	(55.00 dólares por hora de crédito al costo)	2 h 35 min (142.10 dólares)	N/A en dólares	N/A
Costo efectivo total		68.90 dólares	466.95 dólares	+578 %

Gráfico 2. Modelo de costo de propiedad que ilustra los costos efectivos totales de cada material.

### CONCLUSIÓN

Por supuesto, se pueden hacer muchas suposiciones sobre los métodos de prueba de este proyecto. Esto puede deberse a que no se utiliza la misma tecnología EDM, o la misma cantidad de electrodos, o que el detalle del electrodo no sea totalmente adecuado para un tipo de material. Con la infinidad de variables que podrían asociarse a estas pruebas, la intención era reducirlas al máximo y ofrecer los resultados finales. En este caso, le corresponde a usted realizar sus propias pruebas para determinar qué material proporcionará las operaciones más rentables.

Sin embargo, existe un hecho que no se puede negar. En esta industria no vendemos moldes. Vendemos tiempo y el tiempo es dinero. Con mucha frecuencia, solo se tiene en cuenta un factor del modelo de costos y las decisiones se basan en él. Para determinar por completo qué material de electrodo es mejor, grafito o cobre, se deben tener en cuenta todos los factores juntos a fin de determinar el costo efectivo total. La elección es suya.

### MANUAL TÉCNICO DE EDM

El *manual técnico de EDM* de Entegris ya está disponible en línea en [www.edmtechman.com](http://www.edmtechman.com) o como aplicación para dispositivos iOS o Android.



Dispositivo iOS



Dispositivo Android

#### PARA OBTENER MÁS INFORMACIÓN

Llame a su distribuidor local para saber lo que nuestras soluciones de grafito de calidad prémium pueden hacer por usted. Visite [poco.entegris.com/distributors](http://poco.entegris.com/distributors) para encontrar la ubicación más cercana.

#### TÉRMINOS Y CONDICIONES DE VENTA

Todas las compras están sujetas a los términos y condiciones de venta de Poco Graphite. Para ver e imprimir esta información, visite [poco.entegris.com/terms-and-conditions](http://poco.entegris.com/terms-and-conditions).



300 Old Greenwood Road  
Decatur, Texas 76234  
EE. UU.

Atención al cliente  
Tel. +1 940 627 2121  
Fax +1 940 393 8366

Entegris® y Entegris Rings Design® son marcas registradas de Entegris, Inc. y POCO®, y otros nombres de productos son marcas registradas de Poco Graphite, Inc. que figuran en [entegris.com/trademarks](http://entegris.com/trademarks). Todos los nombres de productos, logotipos y nombres de empresas de terceros son marcas comerciales o marcas registradas de sus respectivos propietarios. Su uso no implica ningún tipo de afiliación, patrocinio o aprobación por parte del propietario de la marca.

©2010-2020 Entegris, Inc. | Todos los derechos reservados. | 6207-10136TAN-0420-es