

# INVESTIGACIÓN SOBRE LA RELACIÓN ENTRE LA FORMA DEL ELECTRODO Y EL AMPERAJE EN LA MÁQUINA DE ELECTRO EROSIÓN POR PENETRACIÓN ARISTECH 650 CNC

Jose Ramón Martínez Ramírez, Alumno de Posgrado, Correspondencia: [jose.martinez@ciateq.mx](mailto:jose.martinez@ciateq.mx), [jose\\_martinez@selinc.com](mailto:jose_martinez@selinc.com)

**Agradecimientos:** Se agradece al laboratorio de construcción mecánica de CIATEQ, por las facilidades prestadas para realizar la experimentación con la máquina ARISTECH 650 CNC.

**Resumen:** En la presente investigación se realizaron pruebas físicas para determinar los cambios que ocurren al modificar el parámetro de amperaje y forma del electrodo en la máquina erosionadora, de los cuales se observaron se desprenden datos de utilidad tales como porcentaje de utilización, corte, Gap y la rugosidad, de los cuales se logró observar que la forma infiere directamente en los resultados.

## **Palabras clave:**

Inferencia del amperaje, forma del electrodo, medida final.

## **Introducción**

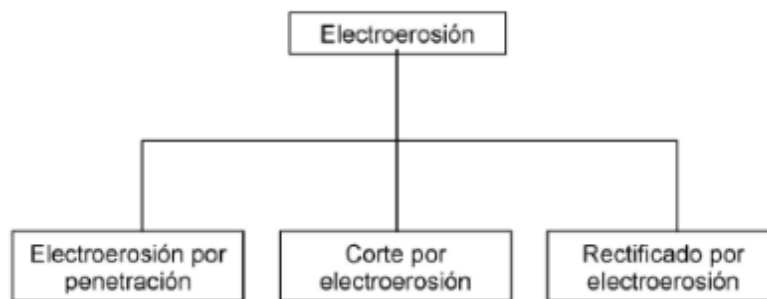
Si se hace pasar una corriente eléctrica continua a través de un material conductor de electricidad, un metal por ejemplo, el movimiento de los electrones libres, característico de la corriente eléctrica, no producirá ninguna modificación aparente del estado del metal. Si se aumenta la intensidad de la corriente o si se disminuye la sección de la barra o del hilo por los que pasa dicha corriente, se observará un calentamiento del metal que podría alcanzar incluso temperaturas de fusión y hasta de evaporación. Una de las características esenciales de esta acción de la corriente eléctrica es que actúa sobre todo el volumen del metal y no permite ninguna concentración preferencial de sus efectos en un lugar determinado de la masa metálica. Sin embargo, si se limita en el espacio y en el tiempo dicho fenómeno del calentamiento como consecuencia del paso de la corriente eléctrica por un material conductor, se puede producir el efecto de un impacto en el momento de su aplicación. Hay una analogía que se impone por sí misma: aplicando una presión mecánica uniformemente repartida sobre un bloque de mármol por ejemplo, al aumentar dicha presión se acabaría por romper el bloque. Ahora bien, por medio de un martillo y un cincel, se puede ir tallando el mármol y darle una forma, sin correr el riesgo de alterar su estructura interna o de afectar al resto del volumen.

Además, variando la energía de los impactos se puede variar el volumen unitario arrancado, pudiéndose así obtener superficies talladas con rugosidades diferentes. Transportando esta analogía al campo de la acción de la corriente eléctrica, es evidente que si se quiere utilizar dicha corriente como medio de mecanizado, esta deberá ser utilizada bajo forma de descargas muy breves y concentradas, para obtener una destrucción localizada del metal. Pero se plantea el problema de cómo obtener estos impulsos de corriente y cómo dirigirlos al punto preciso. Si bien teóricamente esta analogía parece simple y lógica, la posibilidad de su realización práctica no se presenta de una forma tan obvia y exige una búsqueda de soluciones esenciales que permitan conseguirlo.

## Fundamentos

Tipos de mecanizado por electroerosión

Según la forma del electrodo y según el movimiento relativo de éste con relación a la pieza, se pueden hacer varias subdivisiones dentro del concepto general de mecanizado por electroerosión.



### Electroerosión por penetración

Esta forma de electroerosión es la más universal. Se basa en el avance continuo, y servo controlado de un electrodo-herramienta que penetra en el electrodo-pieza en presencia de un líquido dieléctrico.

Según la forma del electrodo y según la profundidad que se dé a las formas erosionadas en la pieza, se podrán obtener tanto formas pasantes como formas ciegas de geometrías complicadas (Fig. 3.1).

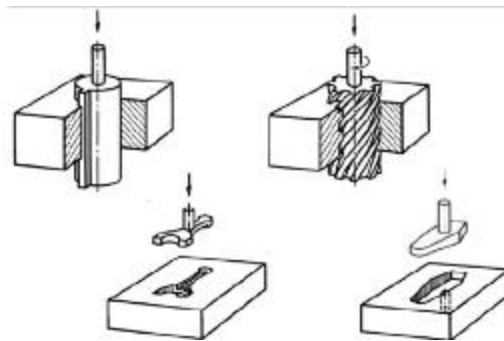


Figura 3.1 Electroerosión por penetración (VDI 3402).

### Corte por electroerosión por hilo

La diferencia básica entre el corte por electroerosión y la electroerosión por penetración es que la forma del electrodo no influye directamente en la forma de la pieza a obtener, ya que lo único que se pretende es realizar un corte en la pieza y no obtener una copia con la forma del electrodo (Fig. 3.2). Todo ello presupone, por tanto, que el costo del electrodo se reduzca considerablemente al tener una forma característica que lo hace muy asequible ya que se puede comprar en el mercado listo para la utilización.

En este tipo de electroerosión hay que destacar el caso en que el electrodo tiene forma de hilo (electroerosión por hilo) que representa la práctica totalidad de las aplicaciones.

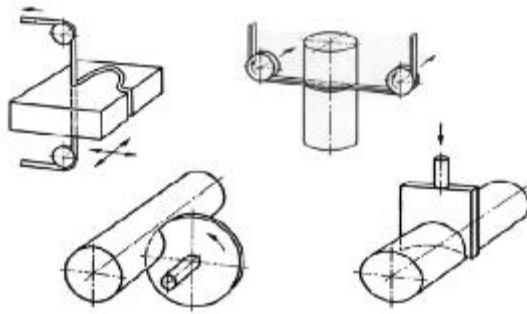


Figura. 3.2.- Corte por Electroerosión por corte de hilo (VDI 3402).

### Rectificado por electroerosión

En esta forma de electroerosión se da un movimiento de rotación del electrodo, con lo que el comportamiento se asemeja a una operación de rectificado convencional, pero el arranque de material se realiza mediante descargas eléctricas, sin contacto directo entre electrodo y pieza (Fig. 3.3). El campo de aplicación de este tipo de máquina es muy reducido.

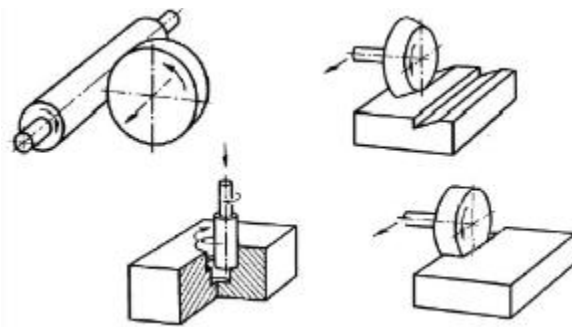


Fig. 3.3.- Rectificado por electroerosión (VDI 3402).

### Materiales para electrodos

Aunque al principio cualquier material conductor puede ser fabricado para fabricar electrodos, la experiencia demuestra que hay materiales más idóneos que otros, según el material de que esté constituida la pieza, el tipo de generador que se emplee y según los resultados que se

quieran obtener. Hay diversos materiales que dan buenos resultados como se expresará más adelante. Se debe tener en cuenta que en el costo de una matriz o molde realizados por electroerosión, el precio del electrodo puede representar el 55 ó 60% del precio total. Por ello, se han de elegir con mucho cuidado tanto los materiales como el método de fabricación de los electrodos.

#### Cobre electrolítico

Es tal vez el material más empleado en electroerosión para fabricar electrodos. Su pureza debe ser del 99,9%. Sus propiedades físicas son:

- a) Temperatura de fusión: 1.083 °C (baja).
- b) Resistividad eléctrica: 0,017  $\Omega$  mm<sup>2</sup>/m (muy buena).

En cuanto a sus propiedades mecánicas se puede decir que:

- a) No es fácilmente mecanizable.
- b) Tiene un coeficiente de dilatación lineal ( $16 \cdot 10^{-6} \text{°C}^{-1}$ ) que puede ser considerado alto con respecto al del grafito, pero suficiente para el empleo en electroerosión.
- c) Tiene alto peso específico (8.95 kg/dm<sup>3</sup>), por lo que no sirve para electrodos voluminosos.

#### Grafito

Es también uno de los materiales más empleados como material para los electrodos. En realidad no existe un solo grafito, sino muchos tipos de grafito que se utilizan en electroerosión. La naturaleza y propiedades de las materias primas y la granulometría de las mismas, así como la

técnica empleada en el proceso de fabricación, tienen gran influencia sobre las propiedades físicas y el rendimiento del grafito durante el proceso erosivo. Sus propiedades físicas son:

- Temperatura de sublimación: 3.600- 3.700° C, (alta).
- Resistividad eléctrica: 12-16 mm<sup>3</sup>/m (muy alta).

Se pueden observar dos puntos:

a. No se da un sólo valor para cada característica, pues éstas varían con el tipo o calidad del grafito.

b. Se da la temperatura de sublimación. Ello es debido a que el grafito no se funde, sino que se sublima, es decir, pasa del estado sólido directamente a vapor.

Sus propiedades mecánicas son:

a) Es muy fácilmente mecanizable.

b) Tienen un coeficiente de dilatación lineal de 3-4 10<sup>-6</sup> C. De 4 a 5 veces menos que el cobre.

c) El peso específico es bajo. De 1.75 a 1.85 kg/dm<sup>3</sup>, por lo que sirve para electrodos de gran volumen.

d) Tiene gran estabilidad dimensional.

La gran diferencia con el cobre, es que los electrodos de grafito sólo pueden ser obtenidos por mecanización en máquinas-herramienta, aunque con altas velocidades de mecanizado.

## **Desarrollo:**

### Introducción a la descarga eléctrica

En este caso se entiende como descarga eléctrica a la conversión de la energía eléctrica en energía térmica y es diferente de conversiones mecánicas. Los conceptos básicos se dan como sigue:

Proceso de descarga (Fig. 4.1)

1. Cuando el electrodo se aproxima a la pieza de trabajo, se forma un canal de ionización conductor entre los electrodos porque se forma un campo eléctrico en una distancia muy

corta y las chispas forman un arco que es una corriente eléctrica de alta densidad para impactar la pieza de trabajo.

2. La corriente eléctrica será muy caliente y la pieza de trabajo será fundida.
3. El calor hace que el aceite dieléctrico, durante el arco eléctrico, se evapore y se genere la presión sobre la pieza de trabajo fundida y el electrodo. Esta es una presión menor, pero para el espacio de la unidad, es grande.
4. El metal fundido se convierte entonces en partículas minúsculas de polvo en todo el aceite y la parte restante de la descarga se acumula en la pieza de trabajo y en el electrodo como el último punto de descarga.
5. Cuando estalla el metal fundido, los restos son removidos por el aceite mediante un barrio (cepillado, función que hace el aceite en movimiento), por otro lado el aceite se convierte en un medio refrigerante, en el espacio de descarga, que tuvo lugar hace un momento.

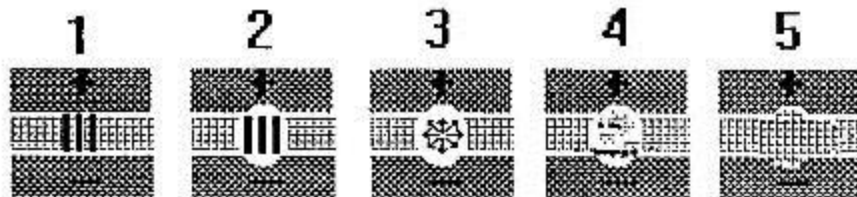


Figura 4.1, Proceso de electro-erosión.

Forma de la descarga:

Una descarga puede significar miles o decenas de miles de descargas eléctricas por segundo y el procesamiento de un gran número de pistas, que significaría construir las vías de descarga más rápido, asimismo entre más grande sea el ritmo y más grande la brecha, más gruesa se vuelve la superficie, es decir, incrementa su valor de rugosidad.

El ritmo de procesamiento y el tamaño de la corriente están en proporción correcta, con el ancho de pulso en un número fijo, cuanto mayor sea la corriente que pasa, más rápido será el ritmo. Esto hace que sea necesario el uso de corriente más baja en los agujeros finos y de pequeños espacios.

En caso de un ancho de pulso corto y uno largo, incluso si la descarga y el rango de parada son de la misma proporción, el ritmo de procesamiento iría más lento. En caso de ancho de pulso corto, la corriente de pico no ha alcanzado la corriente nominal. En caso de largo anchura del pulso, la corriente cae densidad, las caídas de presión de descarga y el metal fundido no se pueden quitar fácilmente y esto provocaría un deterioro en la superficie y la pieza de trabajo. La deformación se vuelve más gruesa y la eficiencia de procesamiento se vuelve menos práctico.

Principio de bajo consumo de electrodos:

Muchos son los factores que influyen en el consumo de electrodos, los que llevan la delantera son 2:

1. Bajo consumo por medio de la propiedad del material, es decir, entre más grande sea el resultado de la multiplicación de la velocidad de transmisión térmica y el punto de fusión, será menos el consumo.
2. El carbono como resultado de la transformación se convertiría en un revestimiento protector de la parte positiva, para un consumo mínimo de electrodo.

Deformación después del procesamiento:

Debido a que la pieza de trabajo se calienta y se enfría rápidamente en periodos muy cortos, esta puede sufrir una deformación térmica.

Aplicación de la descarga eléctrica

1. A diferencia de la de mecanizado convencional, la descarga eléctrica tiene lugar por medio de energía térmica, independientemente de la dureza, la flexibilidad de la pieza de trabajo, siempre y cuando se trata de un material conductor, que se puede convertir, especialmente en el caso de acero templado y tungsteno carbonatado.
2. El estrés producido por la descarga eléctrica es mínimo y la superficie esté libre de rebabas, por lo que es apto para placas delgadas y pequeños orificios.



3. El electrodo no tiene que girar durante el procesamiento, y esto es especialmente útil en formas irregulares.

### Experimentación:

Se fabricaron 3 sets de electrodos en material cobre C1100, con 3 formas básicas diferentes, Fig. 5.3 electrodo en forma circular, Fig. 5.4 electrodo en forma cuadrada, Fig. 5.5 electrodo en forma triangular. Se mantuvo el área transversal en la misma dimensión, es decir, 2500 mm<sup>2</sup>.

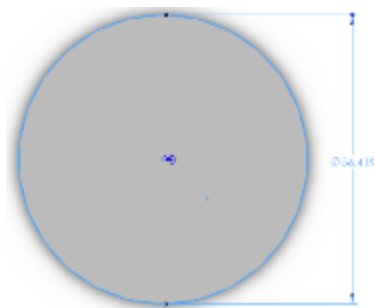


Figura 5.3 Electrodo en forma circular (ExA)

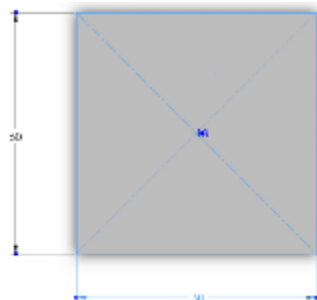


Figura 5.4 Electrodo en forma cuadrada (ExB)



Figura 5.5 Electrodo en forma triangular (ExC)

Se fabricaron 4 Sets de piezas base en la cual se mecanizo la figura del electrodo, el material utilizado fue un Acero S45C. Fig. 5.6.

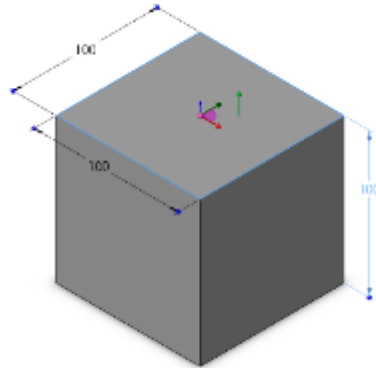


Figura 5.6, Pieza base a mecanizar

### Experimentación en máquina

Inicialmente se sacaron los pesos de cada uno de los electrodos dado los resultados que se muestran en la tabla I.

Tabla I.- Peso de cada uno de los electrodos fabricados

FORMA	E1	E2	E3
CUADRADO	E1A=1.120 Kg	E2A=1.091 Kg	E3A=1.105 kg
CIRCULAR	E1B=1.132 Kg	E2B=1.098 Kg	E3B=1.130 kg
TRIANGULAR	E1C=1.129 Kg	E2C=1.120 Kg	E3C=1.124 kg

Se realizó dimensionamiento de cada uno de los electrodos para obtener el área transversal de cada uno de ellos, los resultados se muestran en la tabla II.

Tabla II.- Área transversal de cada uno de los electrodos

FORMA	E1	E2	E3
CUADRADO	E1A=2497 mm <sup>2</sup>	E2A=2495 mm <sup>2</sup>	E3A=2503 mm <sup>2</sup>
CIRCULAR	E1B=2502 mm <sup>2</sup>	E2B=2493 mm <sup>2</sup>	E3B=2491 mm <sup>2</sup>
TRIANGULAR	E1C=2494mm <sup>2</sup>	E2C=2492mm <sup>2</sup>	E3C=2496 mm <sup>2</sup>

A continuación se realizó el montaje de cada uno de los electrodos en la máquina y se dio inicio al mecanizado con cada uno de los electrodos, de acuerdo al esquema mostrado en la Fig. 6.1.

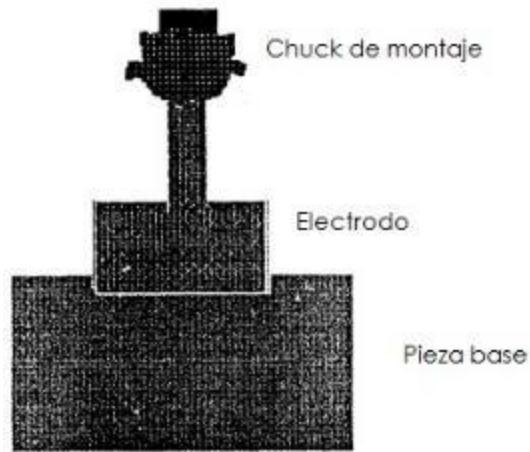


Figura 6.1 Esquema de montaje de electrodos y piezas

Los parámetros utilizados para cada uno de los electrodos para el mecanizado de las piezas fueron los mostrados en la tabla III.

Tabla III.- Parámetros de mecanizado

ELECTRODO	TON	TOF	LV	V	SVO	W-T	J-T	POL
	μs	μs	Amper	1~15	1~15	sec	mm	(+)
E1A	510	80	30	8	10	1.2	1.6	(+)
E2A	510	80	25	8	10	1.2	1.6	(+)
E3A	510	80	20	8	10	1.2	1.6	(+)
E1B	510	80	30	8	10	1.2	1.6	(+)
E2B	510	80	25	8	10	1.2	1.6	(+)
E3B	510	80	20	8	10	1.2	1.6	(+)
E1C	510	80	30	8	10	1.2	1.6	(+)
E2C	510	80	25	8	10	1.2	1.6	(+)
E3C	510	80	20	8	10	1.2	1.6	(+)

Se programó el mecanizado a una profundidad de corte de 20 mm para todos los casos, la variable que se modificó, fue el amperaje ya que se deseaba obtener el efecto sobre la medida final, el avance en mm<sup>3</sup> en el mecanizado, y la rugosidad, ya que estos parámetros son los más comúnmente controlados en el proceso de mecanizado, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla IV.

Tabla IV Resultados obtenidos de las pruebas físicas de mecanizado

ELECTRODO	LV	Corte	Gap	Ra
	Amper	mm <sup>3</sup> /10 min	mm	µm
E1A	30	1454.892	0.918	14.99
E2A	25	1393.8822	0.895	11.77
E3A	20	1427.1687	0.870	12.22
E1B	30	1291.04535	0.916	13.48
E2B	25	1275.2223	0.888	12.65
E3B	20	1347.79455	0.884	12.63
E1C	30	872.6037	0.754	10.49
E2C	25	660.59265	0.649	10.41
E3C	20	412.7709	0.611	8.84

### Conclusiones

Los electrodos tienen la misma área transversal, traduciéndolo a términos prácticos tienen la misma área de trabajo de corte, al comparar los resultados de las tres formas de electrodos y aplicando el mismo amperaje, se concluye que el área de trabajo no es significativa para la medida final, pero tipo de figura geométrica si impacta directamente, en nuestro experimento hay una variación de medida final de 0.164 mm.

Se registraron los valores de tasa de corte cada 10 minutos, y se determina que la figura cuadrada presenta un valor de corte óptimo comparado con las otras dos figuras.

Se infiere que las aristas de los electrodos se desgastan más rápidamente ya que existe una mayor concentración de energía y por observación se ve que hay una mayor descarga eléctrica en las aristas.

Todos los electrodos fueron programados para que la medida del mecanizado fuera 1 mm más grande a la nominal de cada figura, sin embargo, la figura triangular tuvo un menor desempeño en todos los casos probados. Puntualmente se determina que las figuras triangulares y redondas deben de ser compensadas para que logren alcanzar la medida objetivo.

## Bibliografía

- [1]. Electroerosión y mecanizado electroquímico, Autor Pere Molera Sola, Pag 25-29. ISBN 84-267-0744-0
- [2]. Camada, H., Daiki, H., Maehata, H.K., Hitachi Zosen Giho, 1986, vol. 47, no. 3/4, pp. 92–98.
- [3]. Hanreich, G., Mundleina, M., Hauser, H., Nicols, J., et al., Sensors and Actuators, 2001, vol. A 91, pp. 57–60.
- [4]. June-Ho, Young-Hag Koh, and Hyoun-Ee Kim, J. Am. Ceram. Soc., 1999, vol. 82, no. 11, pp. 3037–42.
- [5]. Hideyki Horisava, Noritoshi Akimoto, and Hioraki Ashizawa, Surface and Coating Technology, 1999, vol. 112, pp. 389–393. CrossRef
- [6]. Horisawa et al., Surface and Coating Technology, 1999, vol. 112, pp. 369–374. CrossRef
- [7]. Abdugarimov, E.T., Mirkarimov, A.M., and Zaripov, A.A., Uzbek J. Phys., 2003, vol. 5, no. 1, pp. 52–57.
- [8]. Popilov, L.Ya., Heating of metals in electrolyte, in Novoe v elektrofizicheskoi i elektrokhimicheskoi obrabotke metallov (News in Electrophysical and Electrochemical Processing of Metals), Moscow, 1968, pp. 124–147