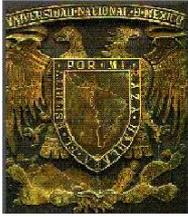


***FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN***



***DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA***



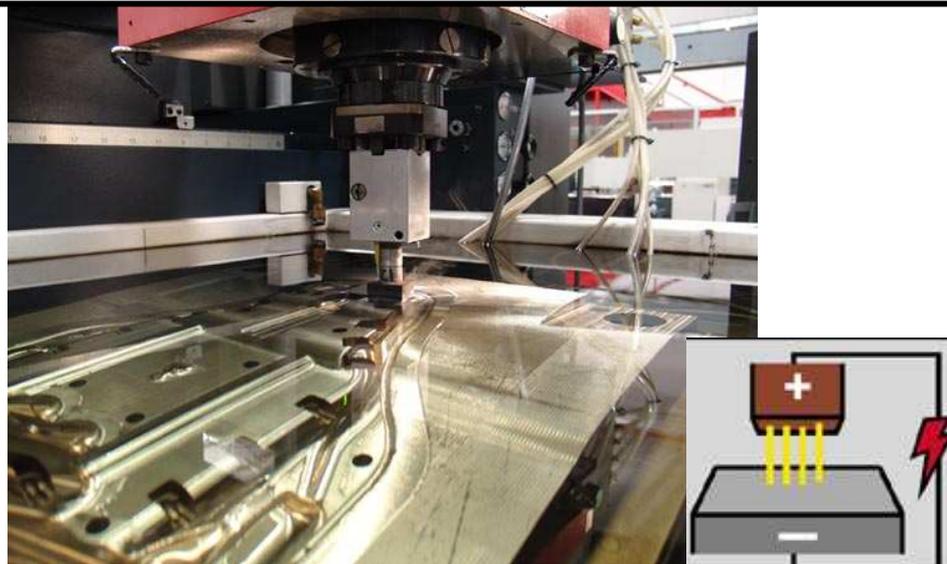
***LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE MATERIALES***

---

***LECTURAS DE INGENIERÍA 4:***

***ELECTROEROSIÓN***

---



***M. en I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.***

**CUAUTITLÁN IZCALLI 2007**

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la Ciencia y Tecnología actuales implican la generación y aplicación del conocimiento en muchas áreas y consecuentemente el estudiante de Ingeniería debe estar al tanto de los mismos, sin embargo, debido a la actualización poco frecuente de los programas y planes de estudio y más que nada por las limitaciones propias de semestres de apenas cuatro meses de actividades académicas, es difícil la actualización del estudiante en dichos conocimientos, además, dejar trabajos de investigación no funciona de la manera deseada, ya que en muchas ocasiones se descargan de Internet y se imprimen sin siquiera leerlos, de ese modo, surge la idea de crear una serie de apuntes de temas básicos para el ingeniero actual como son: el endurecimiento superficial del acero, las fundiciones de hierro, la tribología y el desgaste, la superplasticidad, los avances en la industria siderúrgica, etc.

En esta cuarta lectura se presenta el tema de electroerosión, un importante proceso de manufactura no convencional, muy utilizado actualmente en la fabricación de matrices y moldes.

Se espera que sea de utilidad e interés para los alumnos y personas interesadas en el tema.

ATTE.

Mtro. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.

## CAPÍTULO 1

### PRINCIPIOS DEL MAQUINADO POR ELECTROEROSIÓN

El maquinado por electroerosión o electrodescargas ha estado presente desde hace más de cuarenta y cinco años, en sus inicios, se le consideró como un método para maquinado de metales, que en poco tiempo convertiría en obsoletos, todos los procesos de maquinado anteriores. Sin embargo, el proceso de corte por descargas eléctricas tiene algunas limitantes por lo que no ha cumplido con las optimistas expectativas que se habían generado en sus inicios.

El maquinado por electroerosión se utiliza en varios campos de la producción, por ejemplo: el sistema de inyección de combustible en los motores de la industria aeronáutica ya que continuamente se requiere añadir perforaciones muy pequeñas y precisas para conservar las emisiones dentro de las normas ambientales, en la industria electrónica, de joyería, en el área médica y en general cualquier industria en la que se requiera el maquinado de formas muy intrincadas, pequeñas o de alta precisión. Sin embargo, el maquinado por electroerosión no ha logrado una aceptación total en aquellos campos en donde el maquinado convencional es todavía competitivo, principalmente cuando se requiere remover una gran cantidad de material y se puede cortar con herramientas convencionales (de acero rápido ó de carburo de tungsteno).

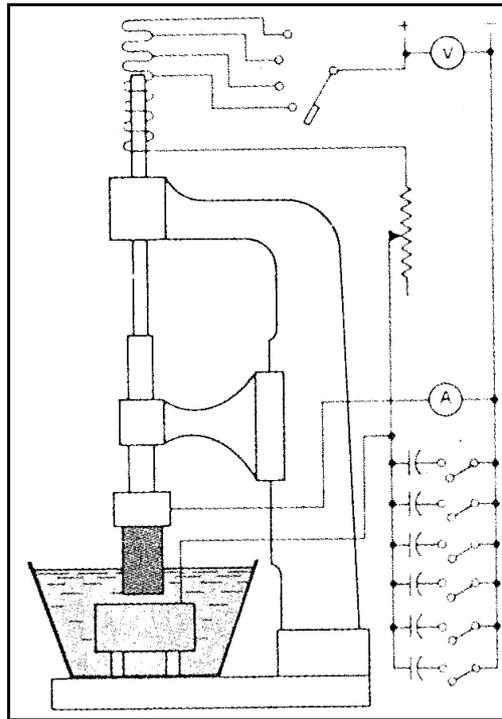
Debido a su fuerte relación con la electrónica el maquinado por electroerosión ha tenido también un desarrollo principalmente en el manejo del comportamiento del arco eléctrico lo que ha dado como resultado una mayor velocidad de remoción de material. Aunado a esto se han desarrollado una serie de accesorios que hacen el

proceso de mucho más versátil con lo que se acentúan las ventajas de este proceso sobre el maquinado convencional, de hecho, algunas operaciones que se realizan por electroerosión son virtualmente imposibles de realizar por otro método.

### **1.1 INICIOS DEL MAQUINADO POR ELECTROEROSIÓN**

El desarrollo de esta tecnología se inicia durante los años posteriores a la Segunda Guerra Mundial, los principales investigadores en este campo fueron dos científicos rusos B.R y N.I Lazarenko, en la entonces Unión Soviética, y es de hecho a ellos a quien se les atribuye la invención de la primera máquina que se puede considerar como apropiada para el maquinado por electroerosión ó electroerosionadora en 1944.

La máquina inventada por los Lazarenko utilizaba el mismo principio y tenía muchas similitudes a los desintegradores utilizados en los Estados Unidos desde 1942, es decir, usaban una fuente de poder de corriente directa y un baño de líquido dieléctrico. Sin embargo otra de las máquinas descritas en el artículo de los Lazarenko era muy diferente a las usadas hasta ese entonces, pues esta usaba un soporte para el electrodo que era controlado por un servomotor(Figura 1.1), lo cual permitía mantener a una distancia constante de trabajo al electrodo con respecto a la pieza de trabajo, además, el inicio e interrupción de la chispa estaban controlados por un circuito de resistencia capacitor y no por el movimiento del electrodo. Todas estas diferencias hicieron al proceso más eficiente y es de hecho sobre ese principio de funcionamiento sobre el cual se desarrollo la tecnología actual de la electroerosión de penetración.



*Figura 1.1. Inicio del maquinado por electro descarga*

Durante los cinco años posteriores a la revelación de los Lazarenko se desarrolló rápidamente el proceso de maquinado por electroerosión. La idea de usar corriente directa pulsante se adoptó de manera universal, algunos utilizaron el circuito resistencia capacitor, otros usaron una línea de corriente alterna rectificadas y algunos otros utilizaron un alternador manejado por un motor de alta frecuencia, pero todos aceptaron la idea de controlar la chispa desde la fuente de poder.

Las máquinas de aquellos entonces empezaron a parecerse más a las máquinas de ahora, es decir, la apariencia de una fresadora vertical con un motor servo-controlado para posicionar el electrodo sobre la pieza de trabajo que se encuentra sobre una mesa, que esta cubierta por una tina que se encuentra llena de líquido

dieléctrico y un sistema de recirculación y limpieza del dieléctrico para conservar sus propiedades en un nivel apropiado.

A pesar de las bajas velocidades de corte que se obtenían de estas máquinas en algunas aplicaciones eran de una utilidad extrema, por ejemplo, en un reporte emitido por General Motors se describía el ahorro que se tuvo en la reparación y modificación de unos troqueles en los que se utilizaron 48 horas de trabajo de una maquina de electroerosión con su respectivo operador, la compañía estimó que de no contar con la electroerosión habría sido necesario el repetir esas herramientas habiéndose requerido aproximadamente unas 4,200 horas de trabajo. Las ventajas del maquinado por electroerosión sobre el maquinado convencional son la precisión y repetibilidad del proceso, por ejemplo, se pueden maquinar orificios de un diámetro de 30 ó 40 milésimas de pulgada con una precisión de  $\pm 0.0002''$  teniendo además otra ventaja, que no se presentan virutas y/o deformaciones que sí se presentan con el maquinado convencional.

## 1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

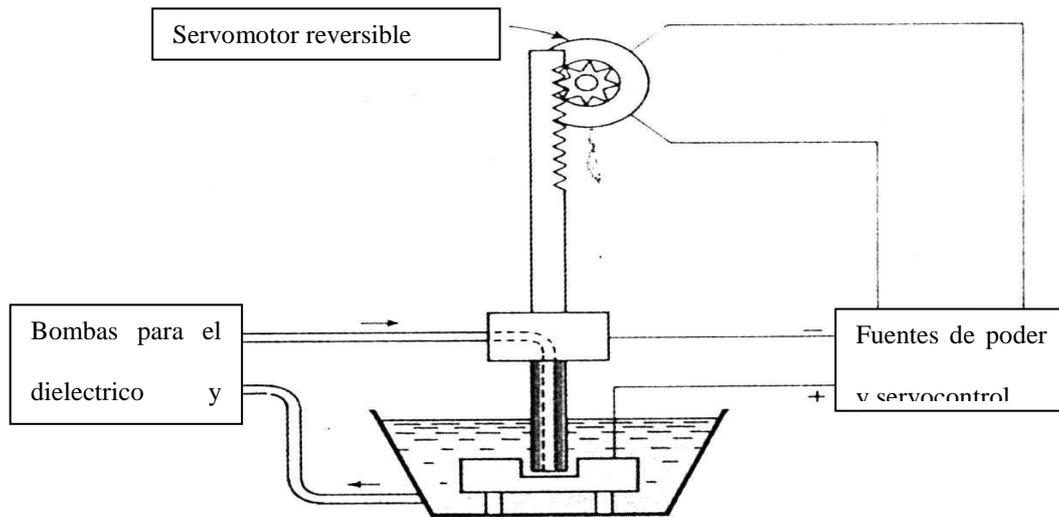
El proceso de maquinado por electroerosión puede ser muy simple o bastante complicado de entender, esto depende de que tanto se quiera saber lo que pasa en el momento del arco eléctrico y que tan a fondo se quiera llegar. Esencialmente este es un proceso de erosión en un material conductor de la electricidad mediante la producción de arcos eléctricos.

El cómo se produce por el arco eléctrico y realiza la erosión ha estado sujeto a diferentes y variadas teorías y una considerable cantidad de investigaciones, aún así, muchos investigadores admiten que algunos de los fenómenos que se dan en el arco eléctrico no han sido comprendidos y por lo tanto explicados completamente. Sin

embargo, lo que se sabe del fenómeno ha servido de base y como un apoyo sólido para los fabricantes de las máquinas de electroerosión y aunado a sus propios esfuerzos e investigaciones se han construido cada vez máquinas más confiables y totalmente predecibles, y por otra parte se ha buscado que su funcionamiento y operación así como su mantenimiento sea lo más fácil posible.

La siguiente explicación tiene por objeto exponer los antecedentes y las bases para saber como pueden afectar las variantes durante el proceso de maquinado por electroerosión y cuáles son las formas de controlarlas. Es importante mencionar sin embargo, que no es el objeto del presente trabajo profundizar en la teoría del principio del funcionamiento de la electroerosión por lo que la explicación que a continuación se expone es solamente un apoyo para soportar la parte experimental.

Los elementos básicos de cualquier sistema de electroerosión convencional o de corte por alambre son: el dieléctrico, electrodo, fuente de suministro de potencia o fuente de poder y un sistema de control (normalmente servo-controlado) para el movimiento del electrodo y que es el que determina cuando debe avanzar y cuando debe detenerse el electrodo de acuerdo a las condiciones de la zona de arco. La explicación se basará en una máquina de electroerosión vertical, la cual tiene un tanque de líquido dieléctrico, un filtro y una bomba para la recirculación y limpieza figura 1.2.



*Figura 1.2. Descripción del proceso.*

La pieza de trabajo es montada dentro del tanque, conectada a la terminal de la fuente de poder y cubierta con el líquido dieléctrico, usualmente un aceite ligero. El electrodo se aproxima en forma descendente hasta quedar a unas cuantas milésimas de pulgada de separación, entonces se pone en marcha la bomba del dieléctrico así como la fuente de poder y el servomotor. Durante todo el proceso de corte el electrodo es manejado por el servomotor y lo mantiene a una distancia constante, al menos de forma aproximada, de la pieza de trabajo.

La fuente de poder ha establecido una diferencia de potencial entre el electrodo y la pieza de trabajo, y cuando esta distancia es la correcta, permite apenas el paso del líquido dieléctrico provocando entonces un arco eléctrico y salta una chispa iniciándose el proceso de electroerosión. Si no se produce la chispa, el servomecanismo aproximará más al electrodo para un nuevo intento, si el electrodo

toca a la pieza de trabajo, se producirá un corto circuito y el servomotor alejará al electrodo y lo pondrá a la distancia adecuada.

El arco eléctrico tiene una duración de diezmilésimas y aun cienmilésimas de segundo, aunque se producen solo una chispa cada vez, cada una produce una pequeña erosión al fundir parte de la superficie de la pieza de trabajo y forma pequeños cráteres, el metal se solidifica en forma de pequeñas esferas que quedan suspendidas en el líquido y de no ser removidas afectaran la estabilidad del arco, por lo que es necesario eliminarlas y para eso se utiliza una bomba de succión y un filtro. Para poder guiar el líquido filtrado se usan mangueras y boquillas para lograr un mejor manejo, figura 1.2.

La erosión de la pieza se da cuando el electrodo va avanzando de posición hacia la pieza de trabajo aunque estos nunca deben tocarse. Normalmente la distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo es de algunas milésimas de pulgada dependiendo de los parámetros que se tengan en la fuente de poder, es decir, si se está realizando un maquinado de desbaste o uno de afinado, a esa distancia que se requiere mantener para la formación del arco se le llama sobrecorte (gap). Al final del maquinado por electroerosión la cavidad o hueco producido por el electrodo será más grande que el electrodo mismo, es decir tendrá la dimensión del electrodo más la del sobrecorte.

El electrodo es una parte esencial del proceso de maquinado, una vez conectado al circuito de trabajo sufre también cierto grado de desgaste, y es por esto, que la selección de los materiales a utilizar en el electrodo para cada tipo de pieza de

trabajo es de suma importancia para que el desgaste mayor se dé en donde se desea, es decir, en la pieza de trabajo. Los parámetros de corte juegan también un papel muy importante y su selección requiere del conocimiento del tipo de fuente de poder que se está utilizando.

Algunos investigadores descubrieron que cuando se invierte la polaridad de una fuente de poder de corriente directa y con un arreglo de electrodo-pieza de trabajo ya establecido, se podía también invertir la razón de desgaste entre ambos. Debido a esto, se desarrollaron fuentes de poder de corriente directa con la posibilidad de cambiar la polaridad dependiendo del tipo de material de la pieza de trabajo y del electrodo.

El circuito de desactivación de la chispa por medio de un circuito resistor-capacitor desarrollado por los Lazarenko, eliminó la necesidad del electrodo vibratorio, al menos para activar y desactivar la chispa. Como se mencionó anteriormente, se descubrió que se obtenía mayor velocidad de maquinado manteniendo la posición del electrodo constante con respecto a la pieza de trabajo y controlando la chispa desde la fuente de poder.

El siguiente paso importante en la electroerosión fue la combinación del circuito de activación y desactivación de la chispa mediante el circuito resistor-capacitor y el manejo del posicionamiento del electrodo mediante un mecanismo de servomotor. Con esta combinación se pudo responder al constante cambio de distancia de sobrecorte (gap) que se presenta durante el maquinado. La variación se presenta debido a las condiciones del líquido dieléctrico, calor acumulado, etc.

Durante el proceso de la generación de la chispa se produce un ciclo en donde se producen incrementos y decrementos de voltaje, producto del acercamiento y alejamiento del electrodo con la pieza de trabajo. Estas variaciones de voltaje son una manera indirecta de medir la distancia que existe entre el electrodo y la pieza de trabajo.

Los Lazarenko y algunos otros pioneros en la fabricación de máquinas de electroerosión utilizaron esta manera indirecta de medición para controlar el movimiento recíprocante del servomotor que controla la posición del electrodo. Un simple circuito establece el equilibrio representado por el voltaje cero en las terminales del servomotor cuando el voltaje de la chispa tiene el nivel correspondiente al gap. El incremento y decremento del voltaje de la chispa aparece como corriente de polaridades diferentes en las terminales del servomotor, cambiando el giro del motor en una dirección u otra. Los avances que se dieron posteriormente se enfocaron al principio electromecánico del proceso y se logró obtener un proceso más controlado, predecible y, por lo tanto, eficiente.

El desarrollo se ha llevado a cabo a pesar de no existir una explicación totalmente aceptada del fenómeno de la electroerosión. Las teorías de cómo la chispa erosiona a la pieza de trabajo (y al electrodo) no han sido completamente soportadas por una evidencia experimental, pero una teoría que propone que la acción erosiva es una compleja combinación de efectos térmicos y eléctricos, es la más aceptada.

Esta teoría llamada termoeléctrica desplazó a otras dos cuyos principios eran; en la teoría electromecánica que la erosión es el producto de la expulsión de partículas provenientes de la pieza de trabajo debido a un fuerte campo eléctrico y

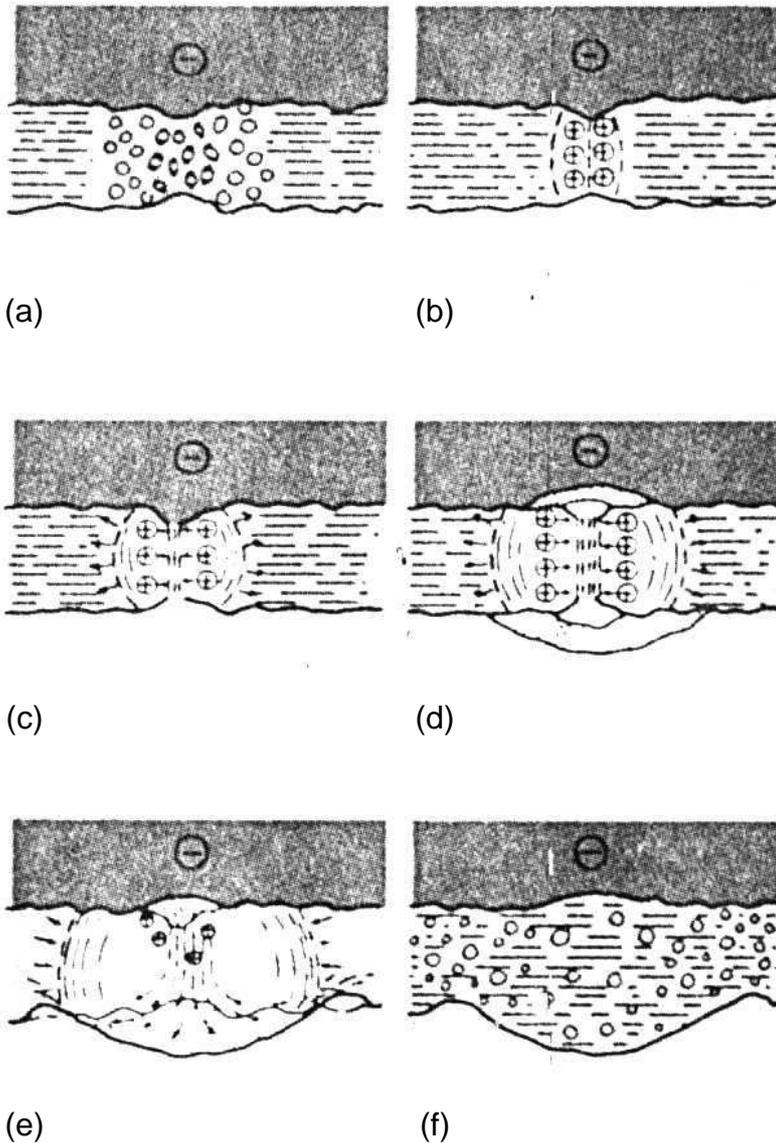
por otro lado, la segunda teoría expone que varios efectos de la descarga eléctrica generan “chorros de flamas” que funden el metal de la pieza de trabajo.

La teoría electromecánica asume que no existen efectos por el calor, y que la pieza de trabajo no se ve afectada en su microestructura y en sus propiedades. Estas aseveraciones son equivocadas, y esto se ha probado en la práctica. Las herramientas fabricadas por medio de electroerosión en algunas ocasiones se fracturan o se rompen sin una razón aparente. Esta situación empezó a aclararse a principios de los sesenta cuando con técnicas de investigación metalográficas combinadas con un buen poder de ampliación del microscopio, se logró observar la presencia de una pequeña capa de metal fundido y reendurecido en la superficie de la pieza de trabajo. Las pruebas mostraron que esta capa era usualmente más dura que el material base de la pieza y que presentaba una concentración de esfuerzos ligeramente mayor, esto reducía la resistencia a la fatiga de las partes y explicaba la presencia de fracturas en las piezas.

Sin duda alguno el calor es un fenómeno presente en la electroerosión, durante algún tiempo no se entendía de donde provenía el calor pero se daba por hecho, posteriormente se hicieron estimaciones de la temperatura generada en el arco y se calculó que podría llegar hasta decenas de miles de grados Celcius. Otra conclusión fue que la generación de calor variaba con el tiempo en que estaba activada la chispa y la frecuencia con la que se daba, es decir, como se desarrollaba el proceso de corte.

De acuerdo a la última teoría termoeléctrica, la descarga ocurre en varios pasos como se ilustra en la (Figura 1.3), primero, el estado de ionización mostrado en la (Figura 1.3(a)), la carga inducida en los dos electrodos por la fuente de poder,

genera un fuerte campo eléctrico, que es más fuerte mientras más se acercan hasta casi tocarse, y es ahí cuando la descarga tiene lugar. Iones y moléculas del líquido dieléctrico están polarizadas y orientadas entre estos dos picos formando un estrecho canal de baja resistencia, por el cual se inicia el flujo de corriente lo cuál abrirá el camino para el flujo de corriente principal.



**FIGURA 1.3** a) Electrodos por la fuente de poder, b) Corriente fluyendo entre los electrodos, c) La resistencia en el canal empieza a decrecer, d) Los iones atraídos magnéticamente comprimen el canal de corriente e incrementa la temperatura, e) Se colapsa el canal de ionizado, f) La trayectoria de expulsión deja marcas en el filo.

La ionización continúa en la siguiente etapa (Figura 1.3(b)) aún cuando la corriente continúa fluyendo entre los electrodos. En la (Figura 1.3 (c)), la resistencia en el canal empieza a decrecer mientras que se incrementa la corriente. En este punto el canal se ha ionizado por completo y consiste en plasma formado por iones positivos y electrones libres, mezclados con gas formado por la descomposición química del líquido dieléctrico, el vapor de metal es expelido por ambos electrodos.

La intensidad de corriente en esta etapa es muy alto quizá de  $10^7$  ó  $10^8$  A./s. La corriente alta produce un fuerte campo magnético en el canal, lo cual atrae los iones hacia el eje del canal de descarga. Los iones atraídos magnéticamente comprimen el canal de corriente e incrementan la temperatura hasta llegar a decenas de miles de grados Celsius, lo cual funde una porción de metal de la pieza de trabajo y la vaporiza (Figura 1.3 (d)). El vapor provee algo de la fuerza que expelle el metal fundido de la pieza de trabajo y ayuda además a que se colapse el canal ionizado (Figura 1.3(e)). Otro efecto, el impacto mecánico de la descarga en si, contribuye a su expulsión. La trayectoria de expulsión deja marcas en el filo de los cráteres como se muestra en la (Figura 1.3(f)).

En el último dibujo, se muestra el resultado de la descarga, un gran cráter en la pieza de trabajo y (lo inevitable) un cráter mucho más pequeño en el electrodo. En este caso pequeño y grande son relativos, sin embargo una medida típica para un diámetro de cráter en la pieza de trabajo sería de 100 micro pulgadas.

El ciclo está ahora completo, el metal fundido es removido de la superficie de los electrodos por el líquido dieléctrico formando pequeñas esferas que son expulsadas por el flujo del mismo.

Otros elementos del proceso de electroerosión que han sido analizados mediante la teoría termoelectrica incluyen, el poder de remoción de metal, absorción del calor del electrodo y del líquido dieléctrico, efectos de la duración del pulso y las características de la superficie electroerosionada.

Los experimentos mostraron que más del 90% de la energía de la chispa se utiliza en calentar la superficie del electrodo. La mayor parte de la energía que absorbe el electrodo funde parte de él pero no es expulsado el metal fundido ya que se enfría rápidamente por lo que permanece unido a la superficie.

La diferencia en la duración del pulso tiende a alterar el comportamiento eléctrico y mecánico en la remoción de material. Los experimentos también mostraron que pulsos más largos eran menos eficientes en términos de remoción de material para una cantidad de energía dada. Sin embargo, los pulsos más largos dan una velocidad de remoción de material mayor hasta ciertos niveles, se incrementa la rugosidad, aunque el desgaste del electrodo es menor.

## CAPÍTULO 2.

## LOS SEIS TIPOS BÁSICOS DE MÁQUINAS DE ELECTROEROSIÓN.

La figura 2.1 muestra en orden cronológico los avances que han tenido, en cuanto a diseño, las fuentes de poder usadas en electroerosión.

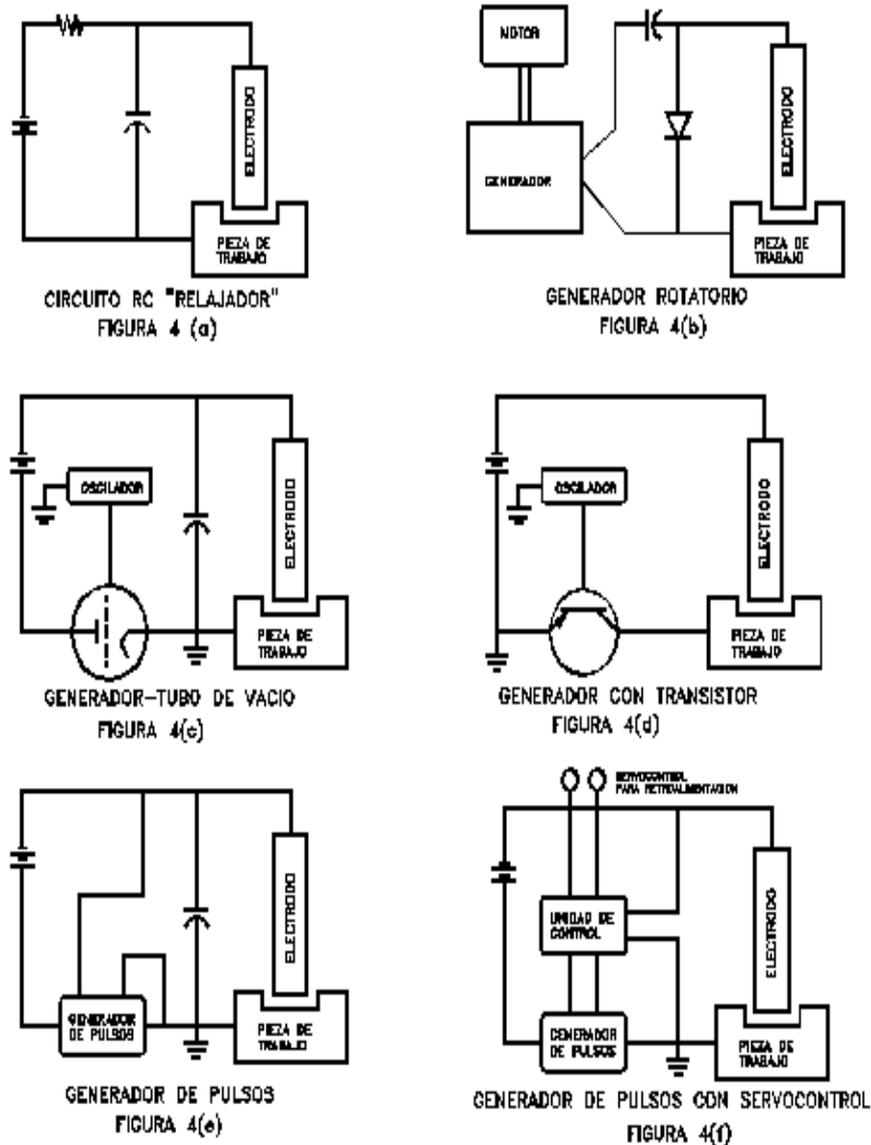


Figura 2.1. Seis tipos básicos de maquinado de electroerosión.

El circuito RC es con el que se inició la electroerosión, este es uno de los circuitos básicos en la electrónica, lo conocen como “relajador”, lo cual significa, que almacena energía durante un determinado tiempo y entonces se “relaja”, es decir, descarga la energía a través de la resistencia. En este caso, la carga es almacenada en el capacitor y posteriormente es descargada a través de la baja resistencia del canal ionizado. La pieza de trabajo y el electrodo forman en ese momento un capacitor por si mismas, conectadas en paralelo con el circuito capacitor, el cual es escogido para que rompa su resistencia dieléctrica primero, (Figura 2.1(a)). El valor del resistor, el cual determina la velocidad de carga, y la capacitancia en paralelo determinan la frecuencia de descarga del circuito.

El circuito RC es simple y controlable pero en cuanto a velocidad de corte es lento, esto es debido a que no puede manejar pulsos largos o de alto amperaje.

El generador de impulsos, un motor manejado con generador con salida de corriente directa rectificada, maneja pulsos largos y de alto amperaje, pero tiene la desventaja de que no puede dar acabados finos. (Figura 2.1(b)).

Se han usado los tubos de vacío en circuitos RC para incrementar la cantidad de energía que pueden manejar, esto a pesar de que los tubos de vacío no son totalmente compatibles con las características de voltaje y energía que se utiliza en la electroerosión y por lo tanto, no son muy efectivos cuando se usan para controlar el pulso directamente. La función principal de los tubos de vacío es desactivar intermitentemente la corriente, dejando al resistor y al capacitor determinar la energía de la chispa. (Figura 2.1(c)).

Cuando la “trayectoria” eléctrica entre el electrodo y pieza de trabajo se rompe, el capacitor tiene una oportunidad de recargarse. Los tubos permiten también

un control directo de la frecuencia por medio de un oscilador que activa y desactiva el tubo. Un inconveniente de los tubos de vacío es su baja capacidad de respuesta a los cambios de activación /desactivación, lo que produce una chispa inconsistente.

Los transistores son ideales para cambiar directamente el pulso a desactivado y activado, controlados por sistemas de retroalimentación (Figura 2.1(d) y más recientemente por otros dispositivos de control más sofisticados, son la base de todas las fuentes de poder modernas (Figura 2.1(e)). Cuando aparecieron los transistores de alto poder, a principios de los cincuenta, los fabricantes de las fuentes de poder tuvieron al fin a su alcance un elemento que les permitía utilizar un elemento para controlar el tiempo de activación y desactivación, el flujo de corriente pico y la iniciación de la chispa. Los transistores permitieron grandes flujos de corriente a bajos voltajes y permitieron utilizar un interruptor para cambiar la energía a desactivada y activada. Un oscilador de frecuencia variable puede ser usado para controlar la relación del cambio del transistor, como se hacía en los circuitos con tubos de vacío. Sin embargo, en los circuitos con transistores, la señal del oscilador controla no solamente la terminación del pulso, si no también el tiempo durante el cual el pulso es suministrado al electrodo y pieza de trabajo. (Figura 2.4(f)). Con este circuito el pulso generado puede ser totalmente controlado, el oscilador algunas veces puede estar en forma de dos circuitos independientes, y permiten por lo tanto el ajuste del tiempo de activado y desactivado en forma independiente.

## CAPÍTULO 3

## ACABADO SUPERFICIAL Y PROPIEDADES MECANICAS

La figura 3.1 muestra la naturaleza de una superficie electroerosionada. A diferencia de la mayoría de las superficies maquinadas, no presenta un patrón o marcas de la dirección de maquinado, su textura es regular (fina o gruesa) debido a que durante el proceso de corte se formaron pequeños cráteres en un acomodo muy regular puesto que la descarga eléctrica es bastante uniforme en toda la superficie.

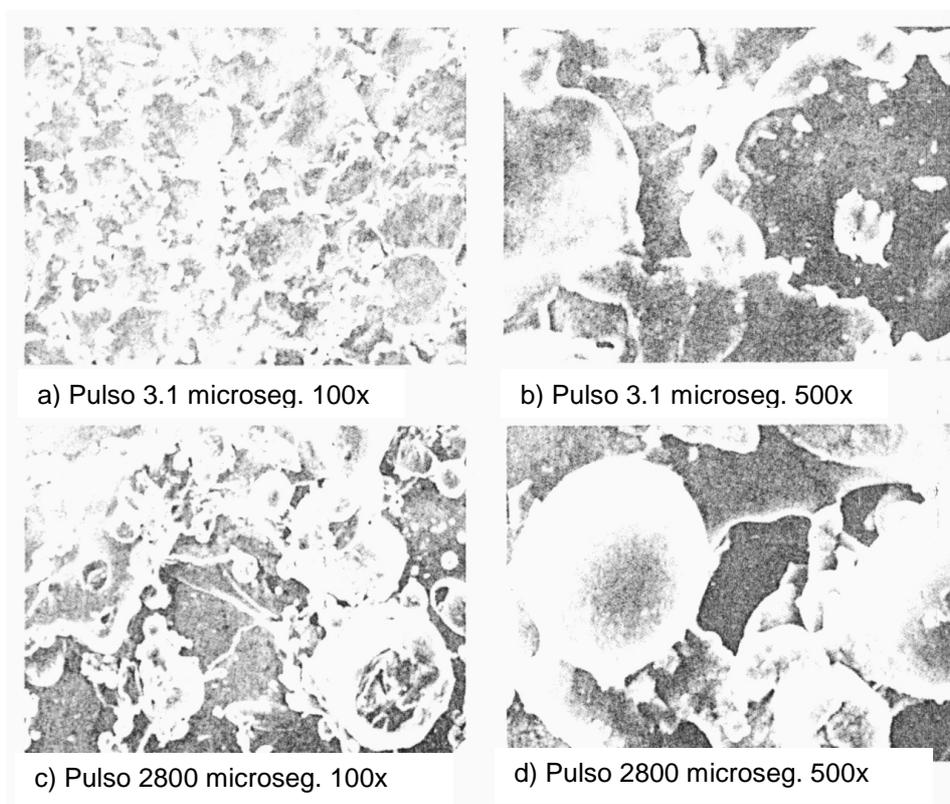


Figura 3.1. Acabado superficial y propiedades mecánicas.

El no tener una superficie con marcas direccionales ha probado ser una de las mayores ventajas del proceso de electroerosión sobre los métodos convencionales de corte, especialmente en la fabricación de punzones y matrices en troqueles, y en

corazones y cavidades en moldes. Las superficies electroerosionadas son más fáciles de pulir que las partes fresadas, taladradas, esmeriladas o torneadas.

Las fotografías tomadas con un microscopio electrónico de barrido (SEM) muestran la apariencia típica de una superficie electroerosionada, esto es, parecida a la piel de una persona atacada por viruela. Esto se debe a la formación de pequeños cráteres durante el proceso de corte, debido a las chispas producidas por el arco eléctrico.

Las cuatro fotos tomadas por el profesor asociado C.H. Kahang y A.H. Bekkala de la Universidad Tecnológica de Michigan muestran la microestructura de un acero A.I.S.I 4140 electroerosionado. En las figuras 3.1a y 3.1b se muestran el acabado de una superficie en donde el pulso duró 3.1 microsegundos, era un ciclo corto para dar un acabado. Las figuras 3.1c y 3.1d se muestra la superficie con un pulso de 2,800 microsegundos, un ciclo largo para un trabajo de desbaste. Ambas pruebas fueron realizadas en una máquina convencional con una corriente pico de 19 amperes. La figura 3.1a muestra la textura característica de una superficie electroerosionada, es decir, una distribución uniforme de cráteres traslapados y la presencia de esferas de metal sólido pero que fue fundido en el proceso. En la figura 3.1b amplificada 5 veces más, se aprecia con más claridad la presencia de los cráteres traslapados así como sus bordes, y además las múltiples capas de material fundido y vuelto a solidificar.

Las figuras 3.1b y 3.1c muestran el efecto de un pulso de mayor duración por más de 1000 veces, se aprecian esferas de material más grandes y fracturadas, cráteres más grandes y una capa de resolidificación más gruesa. Con una mayor amplificación se observa una serie de pequeñas fracturas.

Actualmente, las máquinas de electroerosión pueden dar acabados superficiales muy finos y en formas muy intrincadas, con la enorme ventaja de que el acabado será uniforme en toda la superficie sin importar la forma. Esta característica ha sido un punto de atención al que han puesto un especial empeño los fabricantes de máquinas de electroerosión.

Algunas de las industrias más beneficiadas con la electroerosión son: la aeronáutica y automotriz, la superficie no direccional de la electroerosión ha permitido una mejora notable en el comportamiento de los sistemas de control de flujo de combustible e inyección de mezclas en ambas industrias, pues las marcas de maquinado convencional afectaban considerablemente el control de la cantidad y dirección del flujo.

Como se mencionó anteriormente, toda la superficie expuesta al proceso de electroerosión es fundida y enfriada rápidamente. La capa resolidificada es por lo general más dura que el material base (generalmente 0.001 pulg.), sin embargo, en algunas ocasiones llega a ser más blanda, sobre todo cuando se usan fuertes descargas para lograr velocidades de remoción altas, esto se debe principalmente a que la masa del material fundido se enfría más lentamente al utilizarse mayor energía y por períodos más largos, lo que hace que permanezca caliente más tiempo y puede llegar a ser más blanda, dependiendo por supuesto, del tipo de material en cuestión.

Cuando la superficie es más dura o más blanda se producen esfuerzos internos que pueden reducir la resistencia mecánica de la parte terminada. Cuando se utilizan pulsos de alta energía pueden conducir a fracturas “grandes”, aunque en la mayoría de los casos, éstas sólo sean visibles al microscopio, generalmente se distribuyen en

toda la superficie y en algunas ocasiones generan un verdadero “laberinto” de fracturas microscópicas.

Las pruebas de fatiga realizadas a partes electro erosionadas mostraron que hay fracturas en todas las superficies, aún las que fueron maquinadas con voltajes bajos. Las fracturas en la mayoría de los casos son demasiado pequeñas para ser apreciadas a simple vista, sin embargo, su presencia se hace evidente en la dramática reducción de la resistencia a la fatiga, que en algunos casos llega a ser hasta de un 25%.

La capa adyacente a la capa de metal resolidificado, (usualmente de 0.001 de pulgada ó menos) conocida como capa afectada por el calor, también es calentada y enfriada, por lo que, contiene esfuerzos producto de esta variación de temperaturas tan brusca. Se supone que estos esfuerzos se concentran en los límites de grano, lo cual también reduce la resistencia a la fatiga.

Las pruebas hechas a partes electroerosionadas demuestran que el retirar la capa resolidificada se incrementa la resistencia a la fatiga en un 4.5% solamente, por otro lado, si se retira también la capa de la zona afectada por el calor, se puede recuperar hasta el 95% del valor original de la resistencia.

## ***CAPÍTULO 4***

### ***ELECTROEROSIÓN DE CORTE POR ALAMBRE***

Una máquina de corte por alambre es mucho más compleja que una máquina de penetración o vertical ya que requiere una serie de controles y dispositivos auxiliares para su funcionamiento. Primero, tiene un mecanismo de alimentación, en él se encuentra una bobina de alambre y una serie de poleas y guías que llevan al alambre a través de la máquina a la zona de corte, cuenta además con un sensor para interrumpir la descarga de energía cuando se rompe el alambre o se termina. Otro dispositivo necesario es un elemento de contacto para permitir el paso de corriente de la fuente de poder al alambre. En la zona de corte el alambre requiere de ser guiado de una manera muy precisa, por esto, se utilizan guías cuyas tolerancias dimensionales son muy cerradas y que son de material duro, generalmente de zafiro e incluso diamante. Un aspecto importante también es la tensión que debe mantener el alambre durante todo el proceso de corte, para ello un conjunto de dos motores y un mecanismo de freno se conjunta para lograr el objetivo de mantener la tensión figura 4.1

Cuenta con un sistema de posicionamiento en los ejes X, Y, esto se hace generalmente con una mesa que se desliza sobre guías con rodamientos de rodillos cónicos para un mejor control y precisión, esta debe ser mayor que las máquinas para rectificado, normalmente su precisión oscila entre una y dos diezmilésimas de pulgada.

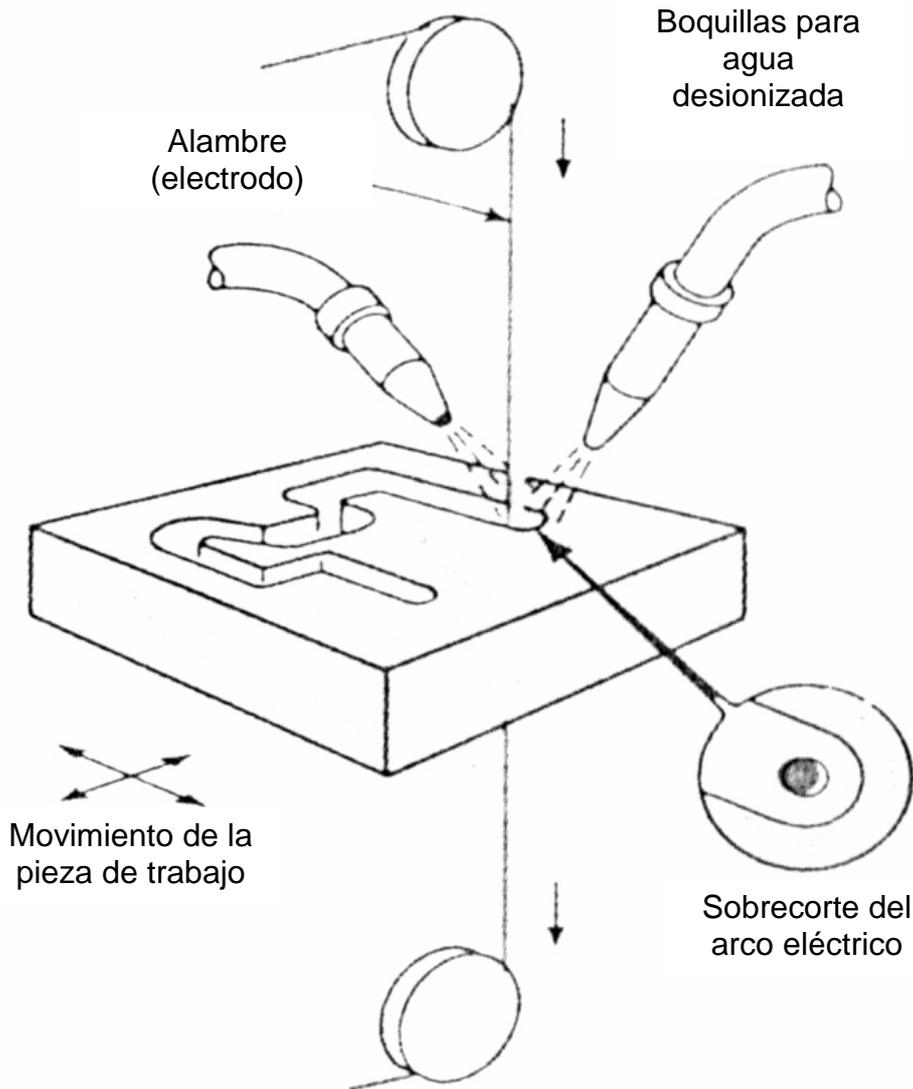
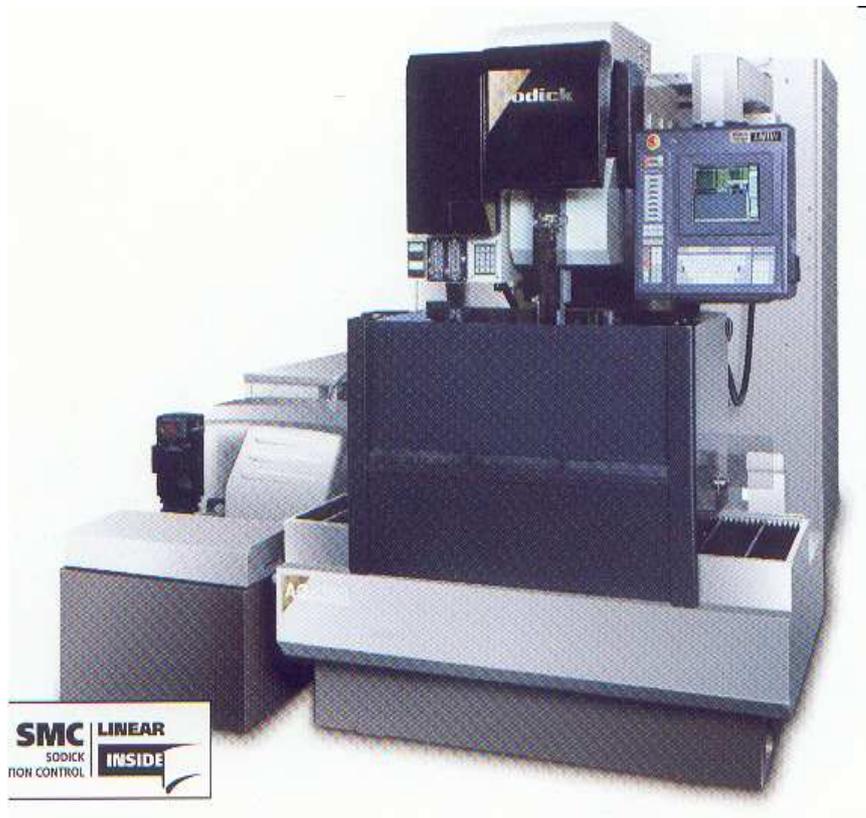


Figura 4.1. Electroerosión de corte por alambre.

Una de las ventajas de las máquinas de corte por alambre, es la posibilidad de ser movida por servomotores que a su vez pueden ser manejados por circuitos movidos mediante computadora, es decir cuentan con un Control Numérico por Computadora (CNC). El CNC ha dado al proceso de corte por alambre una versatilidad prácticamente insuperable. Es importante mencionar que actualmente, las máquinas de penetración también cuentan con movimientos controlados por

computadora, y aunque sus movimientos son para cambiar de posición a la pieza de trabajo con respecto al electrodo, su precisión es también bastante alta.

La sofisticación a la que se ha llegado en la actualidad, permite que algunas máquinas de electroerosión puedan tener ciclos de maquinado en los que no requieren la atención humana, es decir, pueden cambiar de posición, electrodo (en su caso), de programa e incluso de condiciones de trabajo automáticamente, aunque obviamente, esto tiene que ser programado de antemano por un operador figura 4.2.



**Figura 4.2. Máquina electroerosionadora de alambre.**

También en la programación, se tiene actualmente un auxiliar muy importante, son los sistemas de maquinado asistido por computadora CAM. Mediante estos sistemas, es posible programar trayectorias de corte, cambios de

posición, parámetros de corte y cuando se requiere, cambios de electrodo, de manera automática y muy fácilmente.

En todas las etapas de la evolución tecnológica, siempre se presentan obstáculos para su avance. En el rápido desarrollo de la electroerosión (EDM, Electrical Discharge Machining), el obstáculo más difícil de vencer ha sido el inherente a todas las superficies mecanizadas de metal en un medio líquido: la disociación de iones causada por la corriente eléctrica fluyendo a través de la solución conocida como electrólisis o, en lenguaje común, la herrumbre. Todo metal sometido a electroerosión es vulnerable a esta condición, desde los aceros básicos para herramientas, hasta las aleaciones más avanzadas y los materiales compuestos.

La electroerosión, como su nombre lo indica, crea una cierta cantidad de corrientes dispersas en el fluido dieléctrico. Literalmente hablando, en el instante en que una de estas corrientes interactúa con cualquier contaminante en la solución, comienza la degradación en la pieza de trabajo.

El titanio se vuelve azul por una acción causada, no por el calor como podría imaginarse, sino por la electrólisis. El aluminio sufre una oxidación anódica. Todos los materiales a base de hierro comienzan a oxidarse. Los materiales sinterizados como los carburos sufren una degradación superficial como resultado del debilitamiento de los enlaces de cobalto.

Estos problemas eran inherentes a la electroerosión en sus principios, y aún continuaban vigentes a comienzos de los noventa. En 1991 fue utilizado el primer circuito de compensación de suministro de potencia para obtener terminados finos en la superficie de los cortes.

Previamente se habían llevado a cabo cortes de desbaste con DC, para maximizar las velocidades y la cantidad de material removido. Luego se hicieron cortes finos o superficiales con diferentes parámetros, utilizando suministro de potencia AC con limitación de electrólisis, para afinar las medidas y muy a menudo para corregir el daño hecho a la pieza de trabajo durante el desbaste.

Un verdadero suministro de potencia antielectrólisis (AE) puede ser usado para desbaste o para corte superficial, de manera que minimiza la degradación superficial, la susceptibilidad de oxidación del material y la acción corrosiva, con los beneficios adicionales en precisión y en el tiempo total requerido para el terminado de las piezas.

Desde mediados de los ochenta, literalmente, todos los fabricantes de EDM ofrecen sus máquinas con el dispositivo de suministro de potencia para terminados, con varias posibilidades incluidas. Esta es la gran diferencia con los primeros días de promoción de las EDM, en los que la velocidad y sólo la velocidad era el objetivo.

## **CAPÍTULO 5**

### **¿QUÉ ES LA ELECTRÓLISIS?**

Para aplicaciones prácticas de EDM, la electrólisis es la producción de cambios químicos por el paso de corriente eléctrica a través de un electrólito, que consiste en un conductor eléctrico no metálico a través del cual la corriente es transportada por el movimiento de iones agitados.

En electroerosión de hilo, la energía dispersa en el fluido dieléctrico, producida por el mismo proceso de corte, interactúa con contaminantes en el fluido circulante dañando así la superficie de la pieza de trabajo.

El resultado principal de este proceso en todos los materiales es el aumento de la zona afectada por el calor en la superficie, denominada capa blanca. Dependiendo del material de la pieza que se esté cortando, los resultados visibles de su acción pueden variar.

El hilo portador de corriente EDM comúnmente descarga partícula al tiempo que produce la acción de corte sobre la pieza. Las corrientes dispersas, alguna vez inevitables, producen efectos de degradación superficial tales como:

- Coloración azul del titanio
- Debilitamiento en los enlaces de cobalto de los carburos.
- Oxidación anódica del aluminio
- Herrumbre en materiales ferrosos
- Eventual microagrietamiento de todos los materiales.

Este último efecto, ha eliminado el uso incremental de la electroerosión por hilo en aplicaciones médicas, aeroespaciales, aeronáuticas y militares, porque esta

condición puede producir piezas inseguras o inoperables de acuerdo con las especificaciones requeridas.

## **CAPÍTULO 6**

### ***HERRAMIENTAS BÁSICAS DEL PROCESO.***

La necesidad de mecanizar huecos, ranuras u otras formas que tengan pequeños radios, es algo muy común. Si usted concibe el electrodo de hilo como una especie de cortador de radio muy pequeño podrá imaginar su habilidad para cortar ese tipo de radios.

“Frecuentemente se utilizan diámetros de hilo de 0.004 o de 0.006, lo que nos permite cortar radios de 0.0035 hasta 0.0040 pulgadas sin realizar ningún esfuerzo especial para obtener estos resultados dentro de una base consistente. Aunque los diámetros de hilo más utilizados en la industria son de 0.010 y 0.012 pulgadas, la mayoría de las máquinas de hilo producidas hoy en día pueden fácilmente manejar hilos de diámetros mucho menores (trabajar con hilos de diámetros inferiores a 0.04 pulgadas requiere el uso de guías especiales suministradas por los diferentes fabricantes de máquinas.

El corte con electroerosión no produce presión significativa sobre la pieza de trabajo. Actualmente, debe prestarle atención al flujo de alta presión disponible en las máquinas de hilo de la actualidad. El flujo aumentado es una de las más importantes mejoras hechas en las electroerosionadoras de hilo, que contribuye a unas mas rápidas velocidades de corte, pero las altas presiones deben ser utilizadas con cuidado en piezas delicadas. En cualquier caso las presiones de flujo pueden ser controladas manual o automáticamente pro el control de la máquina.

**Este sistema de corte es utilizado para trabajos de alta precisión. Dependiendo de la aplicación deseada, se debe escoger el hilo apropiado para obtener un mayor rendimiento en el taller.**

**Desde su lanzamiento a finales de los años sesenta, el EDM constituyó una tecnología única y revolucionaria. Aunque parezca un proceso lento y relativamente restringido según las normas actuales, su uso se ha extendido aceleradamente, y han sido comprobadas su precisión y efectividad.**

**Originalmente, el proceso era bastante sencillo los materiales disponibles para fabricar hilo se reducían al cobre y el bronce, además de que eran pocos los proveedores.**

**Desde entonces, el electroerosionado por hilo ha sufrido un crecimiento asombroso en cuanto a aplicaciones, sofisticación y equipos, así como en las exigencias que se hacen sobre el hilo, herramienta básica del proceso.**

**En la actualidad, los usuarios exigen y necesitan un máximo de eficiencia y productividad, así como un funcionamiento previsible. Mayores ángulos de chaflán, piezas de trabajo más gruesas, enhebrado automático del hilo y periodos prolongados de operación sin supervisión directa, hacen de la selección del hilo un factor crucial para lograr una operación perfecta.**

**Las máquinas y los requisitos de cada trabajo varían mucho, lo cual hace que la selección del hilo adecuado se convierta en una tarea difícil. Por consiguiente, si se busca alcanzar óptimos resultados, es necesario probar con diferentes tipos de hilos. Aunque esta observación no pretende abarcarlo todo, sí debe constituir una guía útil en el momento de elegir el tipo indicado de hilo para cada trabajo.**

## **CAPITULO 7**

### **EL PROCESO DE ELECTROEROSIONADO POR CORTE DE HILO**

Para seleccionar y aplicar el hilo es fundamental comprender la forma como funciona su proceso de corte.

La pieza de trabajo y el hilo representan los terminales positivo y negativo en el circuito eléctrico DC, y siempre se encuentran separados por un espacio, que la máquina mantiene controlada en forma permanente. Esta hendidura se debe llenar siempre con un fluido dieléctrico, en este caso agua desionizada, la cual actúa a la vez como aislante y como agente refrigerante. De igual forma, se deshace de las partículas erosionadas sobrantes del área de trabajo mediante un desagüe.

El corte de la pieza de trabajo se hace por medio de una secuencia de pulsos eléctricos rápidos, generados miles de veces por segundo desde la fuente de potencia, formando una gran cantidad de chispas. En condiciones sumamente elevadas de calor y presión cada chispa forma un canal de ionización, en el cual fluyen las partículas entre el electrodo del hilo y la pieza de trabajo, lo cual produce vaporización en ciertas secciones localizadas.

Los desechos metálicos vaporizados que crea este proceso, tanto de la pieza metálica como del material del hilo, se enfrían en seguida y se desechan mediante el flujo de fluido dieléctrico a través de la hendidura.

A medida que la máquina hace avanzar al hilo a través de la pieza de trabajo, corta una ranura ligeramente mayor que el diámetro del hilo. Dado que éste también se ha desgastado en el transcurso del proceso, la máquina va reponiendo el hilo erosionado de modo continuo en la ranura.

El material ideal para el electrodo del hilo en este proceso debe cumplir con tres características importantes: alta conductividad eléctrica, suficiente resistencia mecánica y características óptimas de chispa y emparejado. Como se verá más adelante, no existen hilos perfectos que sobresalgan para todas las anteriores, y será preciso sacrificar ciertas cosas según los resultados y aplicaciones que se deseen. Los tres factores anteriores van íntimamente ligados e interrelacionados.

Un alto grado de conductividad es importante debido a que, por lo menos en teoría, esto implica que el hilo puede llevar una mayor cantidad de corriente, lo cual significa que se puede obtener una chispa más caliente y una mayor velocidad de corte.

La resistencia mecánica, que por lo regular se expresa como resistencia a la tracción en psi, necesita ser la suficiente como para mantener la rigidez del hilo, con una mínima vibración, bajo la tensión que le aplica el mecanismo de alimentación del hilo. Existen algunas limitantes de tipo práctico, dado que la alta dureza que a veces es propia de los hilos estirados en frío y de alta resistencia a la tracción, puede hacer que resulten hilos encocados o combados, que no se prestan para ángulos de chaflán pronunciados, ni para el enhebrado automático.

La capacidad del material del hilo para evitar la formación de chispas y el proceso de desagüe ha cobrado una creciente importancia ante la necesidad de mayor productividad y precisión. Es muy aconsejable que el hilo se desgaste, puesto que el material de hilo vaporizado ayuda a la formación de canales adicionales de ionización de chispas. Además, un grado más alto de vaporización en partículas microscópicas,

en lugar de su fusión, mejora considerablemente la eficiencia del proceso de desague, así como la estabilidad del corte, al suprimir la formación de arcos.

Estas características mejoran con hilos cuya superficie tenga un punto de fusión relativamente bajo y un alto grado nominal de presión de vapor. En efecto, estos factores son tan importantes que justifican sacrificar algún grado de conductividad y además mejoran la estabilidad del corte de manera considerable, lo cual incrementa la eficiencia.

### **7.1.¿CÓMO DISTINGUIR LOS TIPOS DE HILOS?**

Dados los adelantos tanto en las máquinas electroerosionadoras como en la fabricación de hilos, hoy en día se dispone de nuevos materiales para su fabricación. Cada tipo en particular cuenta con sus características distintivas, y los adelantos más recientes le brindan al usuario una gama de alternativas.

#### **7.1.1. EL HILO DE COBRE**

El cobre fue el material original que se utilizó en las primeras electroerosionadoras de hilo. Su grado de conductividad nominal es excelente, sin embargo, su baja resistencia a la tracción, alto punto de fusión y bajo grado de presión de vapor, limitan seriamente sus posibilidades. En la actualidad su empleo se reduce a máquinas de tecnologías con fuentes de energía originalmente diseñadas para hilo de cobre.

#### **7.1.2. EL HILO DE BRONCE.**

Cuando los primeros usuarios de EDM buscaron mejores rendimientos, el bronce fue la primera alternativa lógica para reemplazar al cobre El hilo de bronce

para EDM es una combinación de cobre y zinc, por lo regular en una aleación de 63-65% de Cu con 35-37% de Zn. El agregarle el zinc le proporciona una resistencia significativamente mayor a la tracción, lo cual compensa con creces la pérdida relativa de la conductividad.

En muy poco tiempo, el bronce se convirtió en el material más utilizado como electrodo de hilo para realizar múltiples aplicaciones. En la actualidad se comercializa en una amplia gama de durezas y resistencias a la tracción.

### **7.1.3. EL HILO RECUBIERTO**

Dado que es imposible elaborar eficientemente hilos de bronce sin cantidades considerables de zinc, el siguiente paso lógico consistía en desarrollar hilos recubiertos, llamados en ocasiones niquelados (plated). Estos por lo general tienen un núcleo de bronce o cobre, para efectos de conductividad y resistencia a la tracción, y llevan un recubrimiento electrolítico de zinc puro o disperso, con el fin de conferirle mejores características de formación de chispas y desgüe.

Originalmente se le conoció con el nombre de "hilo rápido" por su capacidad de cortar a velocidades de remoción más altas que las usuales.

En la actualidad los hilos recubiertos se encuentran disponibles en una amplia gama de materiales de núcleo, materiales de recubrimiento, profundidades de recubrimiento y resistencias a la tracción, adecuados a las diversas aplicaciones y requisitos de las máquinas.

Aunque su costo es superior al del bronce, los hilos recubiertos representan en la actualidad la mejor alternativa para lograr un óptimo desempeño general.

#### **7.1.4. LOS HILOS FINOS (MOLIBDENO Y TUNGSTENO)**

Los trabajos de alta precisión realizados por máquinas electroerosionadoras de hilo requieren de radios internos pequeños y, por lo tanto, necesitan hilos de diámetros entre 0,001" y 0,004". Los hilos de bronce y los recubiertos no son prácticos para estos tamaños, dada su capacidad de conducción de carga; en su lugar se utilizan hilos de molibdeno y tungsteno.

Sin embargo, debido a su limitada conductividad, altos puntos de fusión y bajo grado de tensión de vapor, no son adecuados para trabajos de mucho espesor y, por lo general, cortan lentamente.

#### **7.1.5. CÓMO ESCOGER EL TIPO CORRECTO DE HILO.**

Aunque ofrezcan soluciones para cada aplicación, a veces la amplia variedad de alternativas de hilos pueden ser confusas. De la aplicación dependerá la selección de las máquinas y del hilo. Para ello se deben tener en cuenta los factores que a continuación se describen:

#### **7.1.6. APLICACIÓN**

Tanto el espesor, las tolerancias finales y el terminado deseado de las piezas de trabajo (así como los cortes de refilado resultantes) como el tamaño de los radios, los ángulos de chaflán pronunciados (high taper angles) y el material de las piezas de trabajo, requieren de una atención especial en el momento de escoger el hilo más adecuado. Por ejemplo, aunque por lo general el hilo recubierto es superior al de bronce, sus ventajas se disminuyen al cortar materiales delgados (por lo regular de calibres menores de 3/8").

### **7.1.7. TIPO DE MÁQUINA**

Entre las diversas marcas de máquinas existen variaciones considerables en los conceptos de diseño, en la tensión y el manejo del hilo, en el diseño de la fuente de energía y en el enhebrado. Las recomendaciones del fabricante de la máquina referentes en particular a la resistencia a la tracción, deben constituir el punto de partida para determinar el tipo de hilos que se deben ensayar.

### **7.1.8. RENDIMIENTO**

Por razones económicas los usuarios deben obtener el máximo rendimiento de sus equipos. De ahí que la velocidad de corte se ha convertido en la pauta principal para la elección del hilo. No es raro encontrar que al cambiar hilos y realizar ajustes pequeños en las graduaciones de potencia, se produzcan mejoras en la velocidad de corte del orden de un 20% a un 40% adicional.

Es tan importante realizar más trabajo en menor tiempo, que muchos talleres cambian el hilo incluso en medio de un mismo trabajo; por ejemplo, la utilización de hilo de alto rendimiento para los cortes iniciales y quizás un hilo con un diámetro más pequeño para los radios restantes de menor tamaño.

El diámetro del hilo también debe ser un punto que debe tenerse presente cuando la velocidad de corte sea crucial. Dado que los hilos de diámetros menores no pueden cargar tanta corriente, para obtener una mayor velocidad se debe utilizar hilo de un diámetro mayor figura 2.8.



**FIGURA 2.8. Tipos de hilos para maquina erosionadora de alambre**

## BIBLIOGRAFÍA

1. Diseño de un dispositivo cortador de alambre para una máquina electroerosionadora. Oscar fuentes Robles. Tesis en proceso. FES-Cuautitlán
2. <http://www.xactedm.com/pages/edmtech.html>
3. <http://www.answers.com/topic/electrical-discharge-machining>