

**INTRODUCCION**

**A LA**

**ELECTROEROSION**

# **1 HISTORIA DE LA ELECTROEROSION**

## **1.1 INTRODUCCION**

## **1.2 HISTORIA DE LA ELECTROEROSION**

# **2 LA ELECTROEROSION**

## **2.1 DEFINICION**

## **2.2 PRINCIPIOS DE MECANIZADO POR ELECTROEROSION**

## **2.3 EXPLICACION FISICA DEL FENOMENO DE LA EROSION POR CHISPA**

### **2.3.1 Análisis del desarrollo de la descarga eléctrica**

## **2.4 TIPOS DE MECANIZADO POR ELECTROEROSION**

### **2.4.1 Electroerosión por penetración**

### **2.4.2 Corte por electroerosión por hilo**

### **2.4.3 Rectificado por electroerosión**

# **3 TERMINOLOGIA DE LA ELECTROEROSION**

## **3.1 TERMINOLOGIA GENERAL**

## **3.2 TERMINOLOGIA ELECTRICA**

# **4 MAQUINAS Y GENERADORES**

## **4.1 PARTES DE UNA MAQUINA**

### **4.1.1 Sistema de ejes de una máquina de electroerosión**

### **4.1.2 Armazón**

### **4.1.3 El cabezal (máquinas de penetración)**

### **4.1.4 La mesa de trabajo**

### **4.1.5 Unidad de filtrado**

### **4.1.6 Control Numérico (CNC)**

## **4.2 EL GENERADOR**

### **4.2.1 Generadores de Relajación**

### **4.2.2 Generadores de impulsos transistorizados**

### **4.2.3 Tipos de generadores**

# **5 PARAMETROS DE LA ELECTROEROSION**

## **5.1 TIPOS DE IMPULSOS**

### **5.1.1 Impulso vacío.**

### **5.1.2 Impulso en cortocircuito.**

### **5.1.3 Arcos.**

**5.2 POTENCIA Y ENERGIA DE UN IMPULSO**  
**5.3 VALOR MEDIO DE INTENSIDAD Y TENSION**  
**5.4 RUGOSIDAD**

- 5.4.1 Rugosidad media y rugosidad total
- 5.4.2 Factores de los que depende la rugosidad
- 5.4.3 Medición de la rugosidad
- 5.4.4 Aspecto de las piezas mecanizadas por Electroerosión

**5.5 INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS ELECTRICOS.**

- 5.5.1 Influencia del tiempo de impulso
- 5.5.2 Influencia del nivel de intensidad
- 5.5.3 Influencia del nivel de intensidad

**6 LA LIMPIEZA**

- 6.1 DEFINICION
- 6.2 INFLUENCIA DE LA CONTAMINACION DEL GAP EN EL PROCESO DE ELECTROEROSION
- 6.3 FORMAS DE LIMPIEZA
  - 6.3.1 Limpieza por presión
  - 6.3.2 Limpieza por aspiración
  - 6.3.3 Limpieza por lanza lateral
  - 6.3.4 Limpieza con temporización
  - 6.3.5 Limpieza con presión intermitente

**7 EL LIQUIDO DIELECTRICO**

- 7.1 MISIONES DEL LIQUIDO DIELECTRICO
- 7.2 CARACTERISTICAS QUE DEBE DE REUNIR UN LIQUIDO DIELECTRICO PARA SER EMPLEADO EN ELECTROEROSION
- 7.3 TIPOS DE DIELECTRICOS UTILIZADOS
  - 7.3.1 Aceites
  - 7.3.2 Agua
- 7.4 FACTORES QUE AFECTAN AL MECANIZADO
  - 7.4.1 Temperatura del dieléctrico
  - 7.4.2 Grado de limpieza
  - 7.4.3 Presión de limpieza

**8 SISTEMAS DE FILTRADO EN ELECTROEROSION**

- 8.1 INTRODUCCION
- 8.2 EVOLUCION DEL CONCEPTO DE PRODUCTIVIDAD

### **8.3 TIPOS DE SISTEMAS DE FILTRADO**

**8.3.1 Unidades de filtrado mediante cartuchos**

**8.3.2 Unidades de filtrado mediante arandelas de papel**

**8.3.3 Unidades de filtrado de precapa (tierra de diatomeas)**

**8.3.4 Unidades de filtrado mediante polvo mineral**

### **8.4 CONCLUSIONES**

## **9 CARACTERISTICAS DE LAS SUPERFICIES MECANIZADAS POR ELECTROEROSION**

**9.1 ANALISIS METALOGRAFICO**

**9.2 ANALISIS DE DUREZAS**

**9.3 FISURAS**

**9.4 ELIMINACION DE LAS CAPAS SUPERFICIALES**

## **10 MATERIALES PARA ELECTRODOS**

**10.1 PROPIEDADES QUE DEBEN DE TENER LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA FABRICACION DE ELECTRODOS**

**10.2 CLASIFICACION DE LOS MATERIALES**

**10.3 COBRE ELECTROLITICO**

**10.3.1 Métodos de fabricación de electrodos de cobre**

**10.3.2 Comportamiento del cobre en Electroerosión**

**10.4 COBRE AL PLOMO**

**10.5 CUPROTUGSTENO**

**10.6 ALEACIONES DE ALUMINIO**

**10.7 LATON**

**10.8 ACERO**

**10.9 GRAFITO**

**10.9.1 Comportamiento del grafito ante el mecanizado**

**10.9.2 Comportamiento del grafito ante la electroerosión.  
Calidades**

**10.9.3 Cuprografitos**

# 1 HISTORIA DE LA ELECTROEROSION

## 1.1 INTRODUCCION

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 ó, si se disminuye la sección de la barra ó 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 ó 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.

## **1.2 HISTORIA DE LA ELECTROEROSION**

Desde que la electricidad comenzó a dar sus primeros pasos se observó el efecto destructivo producido por la chispa eléctrica al saltar entre dos contactos en el momento de su separación.

Este efecto incitó a numerosos científicos a profundizar en su investigación, con el fin de evitarlo, y ello, unido a una necesidad de la época de buscar un método nuevo de mecanizado diferente a los convencionales que utilizaban herramientas mecánicas, llevó a la idea de utilizar el citado efecto destructivo como método de reproducción de formas.

En 1943, en plena segunda guerra mundial, y dada la escasez de oro y cobre, los científicos soviéticos B.R. y N.I. LAZARENKO investigaban en la búsqueda de materiales que pudieran sustituirlos como contactos de potencia.

Los Lazarenko establecieron un plan de pruebas para comprobar la influencia de determinados parámetros en el desgaste de los contactos mediante descargas de condensadores.

Un joven científico de su equipo, B.N. Zolotykh, fue encargado de realizar tal tarea con los Lazarenko y fue quien publicó el 23 de Abril de 1943 el primer artículo sobre la electroerosión: "Sobre la inversión del efecto de la erosión eléctrica".

Si bien su mayor interés investigador era cómo minimizar el efecto de las descargas, se percataron de que bajo ciertas condiciones el desgaste se maximiza, lo que les llevó a pensar en utilizar esta técnica como una nueva tecnología para el arranque de material.

Para ello, pusieron a punto el primer circuito generador de descargas erosivas, también conocido como "circuito Lazarenko", y desde entonces se ha denominado con la palabra "ELECTROEROSION" a esta nueva técnica de mecanización de los metales.

La característica más importante de la electroerosión es la posibilidad de erosionar cualquier tipo de material conductor, independientemente de su dureza, ya que los factores que influyen en los resultados no son los puramente mecánicos como dureza, tenacidad, etc. sino los térmicos como conductividad térmica, temperatura de fusión, etc.

Junto a esta característica, hay que citar la capacidad de reproducir la forma del electrodo-herramienta, que en adelante serán llamado tan sólo "electrodo", lo cual supone una gran ventaja para el caso de piezas de formas complicadas.

Desde entonces, la historia de la electroerosión ha estado jalonada por una

serie de avances que, si bien, no suponían en sí mismos nada más que actualizaciones tecnológicas, por el contrario se han ido desvelando como avances fundamentales que han permitido que el campo de aplicaciones haya ido aumentando fuertemente.

De este modo, parece ser que no sería muy descabellado hablar de “revoluciones tecnológicas” o “grandes hitos tecnológicos” cuando se haga referencia a tales avances de la electroerosión.

Dentro de este contexto, habría que situar el primer gran hito en el origen mismo de la electroerosión, ya que supuso el poder mecanizar materiales duros como los aceros templados o los carburos de tungsteno.

Las primeras máquinas de electroerosión que aparecieron hacia los años 1948-1950, eran básicamente máquinas-herramienta convencionales, tales como taladros, etc. que habían sido transformadas parcialmente para las necesidades de la electroerosión, adaptándoles un generador, un tanque de trabajo, etc.





Fig. 1.1.- Primera máquina ONA de electroerosión (1956)

Pero fue a mediados de la década de los 50 cuando aparecieron en el mercado las primeras máquinas de electroerosión concebidas como tales, siendo alguna de sus aplicaciones iniciales la destrucción de brocas y machos rotos en piezas.

Los primeros generadores que existieron, denominados de relajación, producían un gran desgaste de los electrodos, del orden del 100% en volumen, pero esto no fue impedimento para que los sectores industriales se fijasen en la naciente tecnología.

Al igual que los avances de la electrónica tuvieron su influencia en otras áreas de la tecnología, el poder sustituir los generadores de relajación por los transistorizados, supuso para la electroerosión el segundo gran hito, cosa que ocurrió hacia inicios de los 60.

De hecho, la reducción de los índices de desgaste de los electrodos a niveles del 0'5% en volumen, consecuencia directa del uso de los generadores transistorizados, abrió las grandes puertas de la industria del molde, matricería, forja, etc.

El efecto en los índices de producción de máquinas de electroerosión fue inmediato, y la tecnología de la electroerosión se convirtió en un sistema de mecanizado fundamental frente a los hasta entonces existentes.

De este modo, desde entonces comenzó a extenderse el concepto de "métodos no convencionales" para referirse a la electroerosión frente a los "métodos convencionales" diferenciación que todavía hoy perdura.

Hasta esas épocas, la única electroerosión conocida era la penetración, y su aplicabilidad en el mercado era un hecho real y ampliamente aceptado.

Es entonces, hacia finales de los 60 y comienzos de los 70, cuando surge la idea de desarrollar la tecnología de las máquinas de electroerosión por hilo, hecho que debería ser considerado como el tercer gran hito de la electroerosión.

Si bien, este avance podría ser fijado en una fecha concreta, la evolución que ha afectado a las máquinas de electroerosión por hilo se ha prolongado a lo largo de dos décadas, y es hacia comienzos-mediados de la década de los 90, cuando se aprecia una identificación masiva entre los usuarios y la electroerosión por hilo, haciendo que los índices de producción de estas máquinas lleguen a igualar y hasta a superar a los de las máquinas de electroerosión por penetración.

Quizá uno de los factores de triunfo de la electroerosión por hilo frente a la penetración haya sido el que los usuarios la han aceptado de tal forma que, ya desde hace muchos años, conciben los moldes y utillajes pensando en que serán producidos por electroerosión por hilo, y los factores positivos de esta tecnología

han hecho el resto.

Si bien la electroerosión por hilo se ha desarrollado gracias a la evolución de la electrónica y, más concretamente, a los controles numéricos, estos desarrollos tecnológicos también han tenido su influencia en la electroerosión por penetración. En efecto, puede cifrarse en los inicios de la década de los 80 el comienzo del cuarto gran hito de la electroerosión que es el que liga a la tecnología de los CNC con la electroerosión por penetración.

Un factor importante para la electroerosión por penetración fue la aplicación de la función orbital, que consiste en desplazar a la pieza paralelamente a sí misma a lo largo de una circunferencia en cuyo centro se encuentra el electrodo, el cual o bien está quieto en su posición o bien está animado de un movimiento según el eje Z.

La gran ventaja de poder animar a la mesa de un movimiento orbital fue que con dicho movimiento se puede compensar la diferencia de medidas existentes entre los “gap” de desbaste y acabado, lo cual supone que con uno o dos electrodos es posible realizar la erosión completa, tanto en desbaste como en acabado.

Otra de las ventajas importantes en el método de trabajo al utilizar el dispositivo orbital, fue que el dimensionamiento de los electrodos ya no era tan crítico, ya que aún en desbaste se puede orbitar para llegar a una medida deseada.

El movimiento orbital supuso además un cambio fundamental en el proceso de la erosión en régimen de acabado, redujo en gran medida los tiempos de acabado y simplificó considerablemente la limpieza de la zona de trabajo.

Al igual que en la máquinas de hilo, la revolución tecnológica de los CNC en

las de penetración supone más un nuevo modo de trabajar que un avance puntual, y la evolución, que este avance ha supuesto en las máquinas de electroerosión por penetración, fue tan importante que al cabo de poco más de una década (a comienzos de los 90) prácticamente la totalidad de las máquinas producidas por los fabricantes de primera línea ya eran de control numérico.

Pero es más, la importancia radica en que no sólo es que las máquinas estén equipadas con CNC, sino que éste ha pasado a ser parte imprescindible del proceso de mecanizado. Este cuarto gran hito de la electroerosión ha permitido aparecer en el mercado un nuevo concepto de máquina, el centro de erosionado, que representa a la máquina totalmente automatizada, y equipada de sistemas de intercambio de electrodos y piezas para permitir largos periodos de trabajo en modo inatendido.

Si bien la aparición de nuevos avances tecnológicos, tales como el mecanizado a alta velocidad, a finales de la década de los noventa ha supuesto una clara competencia a la electroerosión en algunos campos de aplicación muy concretos, de lo que se podría deducir una reducción en su aplicación, sin embargo, la influencia no es tan clara y el debate entre el grado de competencia todavía seguirá, posiblemente, abierto durante la primera década del siglo XXI.

Pero, por otra parte, la evolución tecnológica ha aportado nuevos materiales, tales como los diamantes policristalinos, las cerámicas, los composites de matriz metálica, etc., cuyo mecanizado por electroerosión puede abrir nuevos e interesantes campos de aplicación.

Por último, no conviene olvidar la evidentemente previsible progresiva implantación, desde finales de los 90, de las microtecnologías, en las cuales la electroerosión jugará un papel de gran importancia.

## 2 LA ELECTROEROSION

### 2.1 DEFINICION

Se podría definir el proceso de electroerosión como el método de arranque de material por medio de descargas eléctricas controladas, que saltan, en un medio dieléctrico, entre un electrodo (herramienta de trabajo) y la pieza a mecanizar.

La duración de la chispa es muy corta, pues suele variar desde 1 ó 2 microsegundos a 2 milisegundos, según los regímenes de mecanizado, y va acompañada de un gran aumento de temperatura, que suele alcanzar hasta decenas de miles de grados centígrados.

Esto supone una concentración del efecto térmico en un volumen muy reducido de material, ya que la rapidez de la chispa no es favorable a la propagación del calor por conducción a través de todo el volumen de la pieza, dando como resultado la fusión e incluso evaporación de dicho volumen de material.

Al añadir a esto los efectos dinámicos de la propia descarga y del medio dieléctrico, se obtiene en la pieza un cráter de forma semiesférica, cuyo volumen depende de factores tan diversos como la energía y la duración de la descarga, la naturaleza del dieléctrico y, las propiedades físicas, la polaridad y la naturaleza del material del electrodo y de la pieza.

Experiencias prácticas han demostrado, desde los orígenes, que los efectos de la chispa cuando el dieléctrico es líquido (aceites) son mayores que cuando las descargas se producen en un medio gaseoso.

Este resultado es completamente lógico pues la descarga en un gas tiende a ramificarse ampliamente (Fig. 2.1) mientras que el líquido comprime la descarga impidiendo que se ramifique, concentrándose así su efecto sobre la pieza.

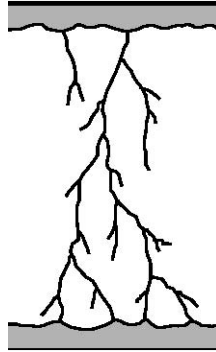


Fig. 2.1.- Descarga ramificada en un medio gaseoso.

También ha sido la práctica la que ha demostrado la importancia de que el medio que se encuentra entre el electrodo y la pieza sea dieléctrico, para que la descarga se produzca en forma de avalancha, dando lugar a efectos más rentables.

## 2.2 PRINCIPIOS DE MECANIZADO POR ELECTROEROSION

Este procedimiento de mecanizado se distingue principalmente por dos de sus propiedades.

- a) Dado que en este proceso el arranque de material no depende de las características mecánicas (dureza, etc.) del material a trabajar sino de sus características térmicas y eléctricas, hay que destacar su gran aptitud para mecanizar aceros, metales o aleaciones duras o refractarias, poco aptas para ser mecanizadas por procedimientos convencionales de arranque de viruta. Ello permite el mecanizado de los aceros templados y en general, de materiales de baja maquinabilidad siempre y cuando sean suficientemente

conductores.

- b) Otra propiedad fundamental es su gran aptitud para realizar formas complejas, tanto pasantes como ciegas. Fabricando por medios convencionales, u otros, el electrodo que suele ser de cobre o grafito normalmente, se puede realizar la pieza, adaptándose en el mecanizado de ésta a la forma de aquél.



Fig. 2.2.- Electrodo y pieza mecanizada.

### **2.3 EXPLICACION FISICA DEL FENOMENO DE LA EROSION POR CHISPA**

Como ya se ha indicado, el mecanizado por electroerosión se efectúa mediante el salto de descargas eléctricas entre dos electrodos sometidos a una determinada tensión eléctrica y sumergidos en un medio dieléctrico.

Los diversos fenómenos que entran en juego en el momento de la descarga

y el consiguiente arranque del material de la pieza son de gran complejidad ya que las circunstancias que concurren en su observación son muy críticas.

En efecto, el tiempo de duración varía, tal y como ya se ha indicado, entre microsegundos y milisegundos, y las distancias interelectrónicas son del orden de unas centésimas ó quizás alguna décima de milímetro.

Pero para poder comprender mejor el desarrollo de la descarga eléctrica, es preciso situarse en el nivel microscópico en que esto se produce.

Teniendo en cuenta el reducido espacio entre electrodo y pieza, las variaciones de cota de las superficies de los electrodos, debidas a la rugosidad natural de los materiales, representan variaciones de aproximación del orden de un 20% a un 40% respecto del plano medio de dichas superficies.

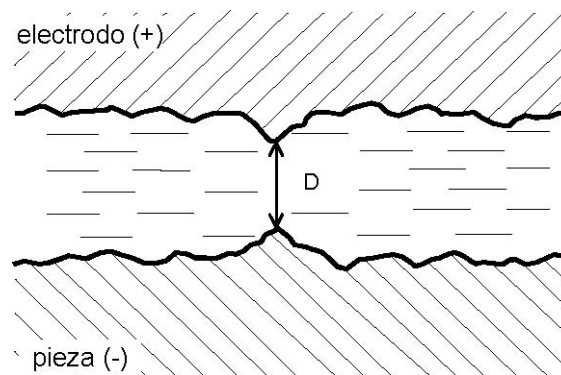


Fig. 2.3.- Lugar de máxima proximidad entre electrodo y pieza.

En este tiempo y, debido a la intensidad del campo eléctrico en los dos puntos de máxima proximidad entre electrodo y pieza (“D” en la Fig. 2.3), se llegará a un momento en que se supere la tensión de ruptura del dieléctrico que los separa, iniciándose la formación de un canal de elevada conductividad.



### 2.3.1 Análisis del desarrollo de la descarga eléctrica

La concentración e intensificación del campo eléctrico tiene como efecto la ionización del dieléctrico y la polarización de las partículas e iones (Fig. 2.4). Los iones son, por definición, partículas polarizadas.

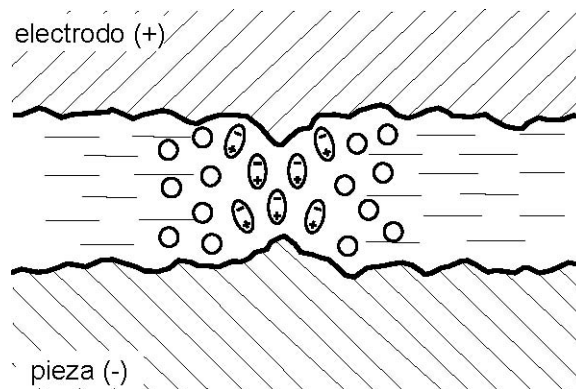


Fig. 2.4.- Ionización del dieléctrico.

De esta forma se da lugar a la formación del canal de la descarga, que queda rodeado por los iones positivos que comprimen y aíslan del medio circundante, reduciendo así su sección (Fig. 2.5).

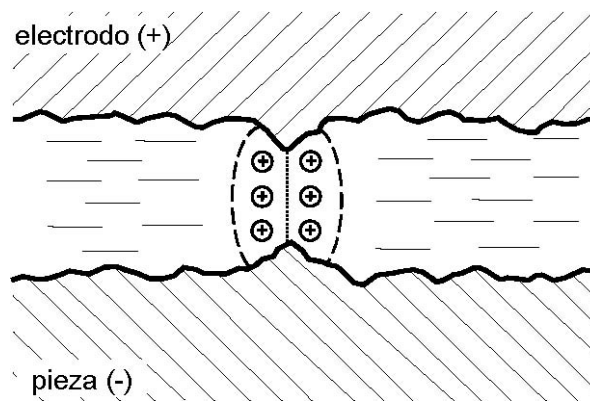


Fig. 2.5.- Iniciación del canal de descarga.

La brusca caída de la resistencia del canal permite que la corriente alcance valores elevados y su paso masivo origine un aumento de la ionización que, a su vez, crea un potente campo magnético que comprime aún más el canal de la descarga produciendo su calentamiento. (Fig. 2.6).

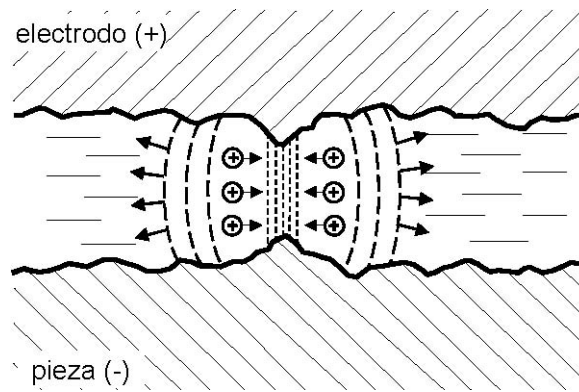


Fig. 2.6.- Paso masivo de la corriente por el canal de descarga.

La velocidad de aumento de la corriente se cifra en unos 10 a 100 millones de amperios por segundo, alcanzándose temperaturas del orden de hasta decenas de miles de grados en un tiempo de 2 a 4 microsegundos (Fig. 2.7).

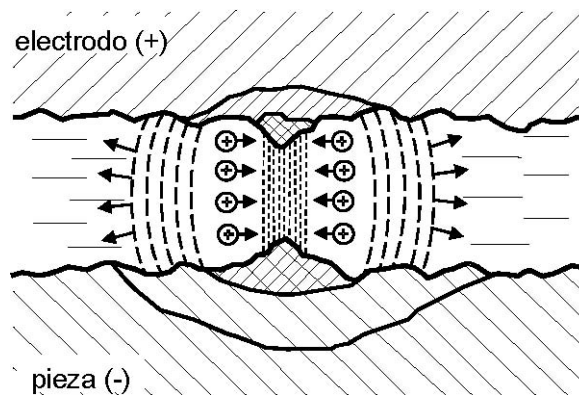


Fig. 2.7.- Efecto del paso masivo de la corriente por el canal de descarga.

El resultado de tan intensa acción térmica es la fusión, e incluso evaporación, de un reducido volumen de material tanto en pieza como electrodo. Incluso se generan residuos como consecuencia de la ruptura del dieléctrico (Fig.

2.8).

Mediante la utilización de cámaras fotográficas de alta velocidad se ha podido constatar la existencia de una burbuja de gas alrededor del canal, cuyo volumen es superior al de éste.

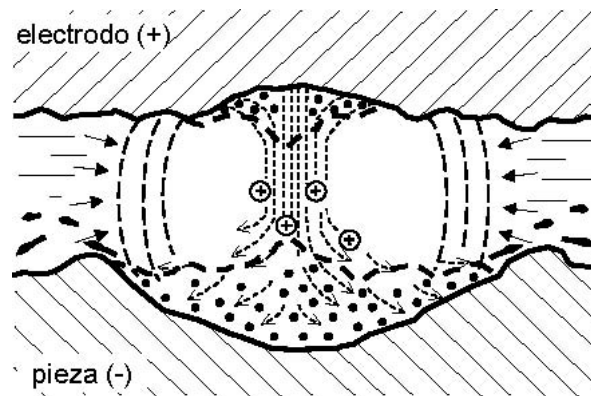


Fig. 2.8.- Arranque de material producido por la descarga.

Paralelamente a la acción térmica de la descarga hay que considerar su efecto dinámico, que produce la eyección a gran velocidad del material fundido y que, junto al efecto térmico confiere a los cráteres su forma peculiar.

Esta forma de los cráteres es análoga a la obtenida por el choque de un proyectil lanzado a gran velocidad (Fig. 2.9).

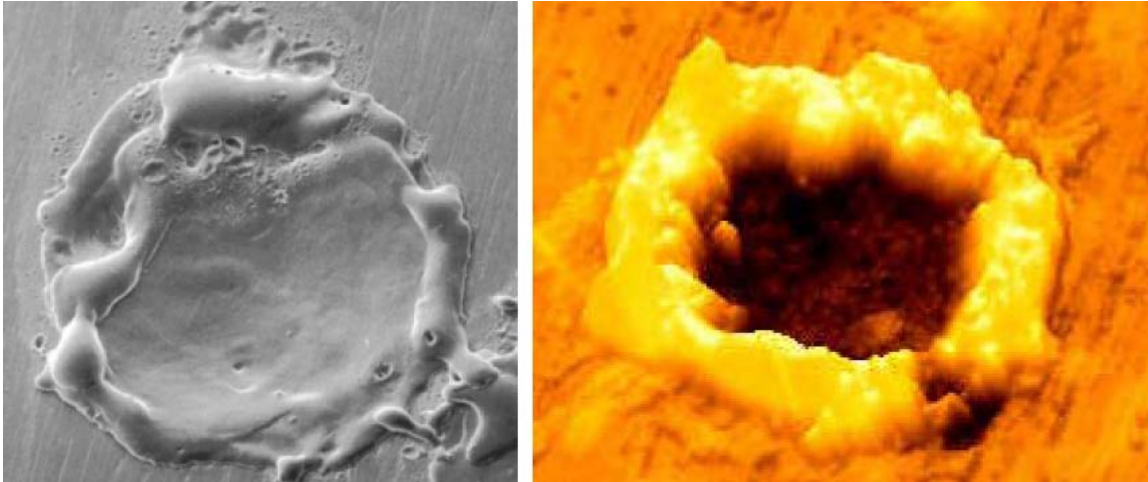


Fig. 2.9.- Fotografías de cráteres

Al final de la descarga, la presión del interior de la burbuja cae bruscamente, a consecuencia de lo cual se genera una depresión de manera que el dieléctrico arrastra los residuos existentes en el cráter recién formado, a la vez que enfría su superficie, impidiendo la conducción del calor hacia el interior del metal.

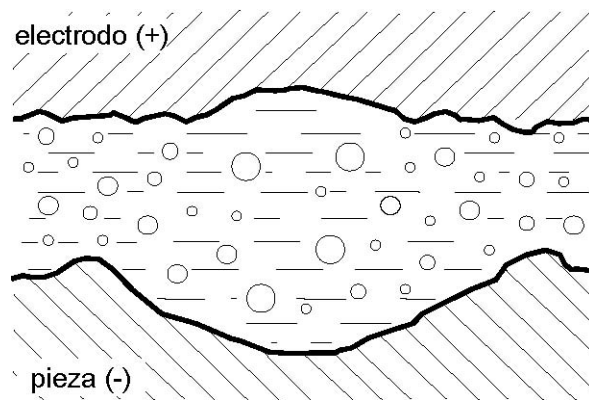


Fig. 2.10.- Estado final del cráter

Al agotarse por completo la energía de la descarga, el ciclo ha llegado a su fin.

El canal de conductividad eléctrica se cierra al desionizarse el dieléctrico y

recobrar de nuevo su rigidez dieléctrica, pudiendo así comenzar ya el ciclo correspondiente a la siguiente descarga, que se dará entre los dos puntos de máxima aproximación entre electrodo y pieza (Fig. 2.10).

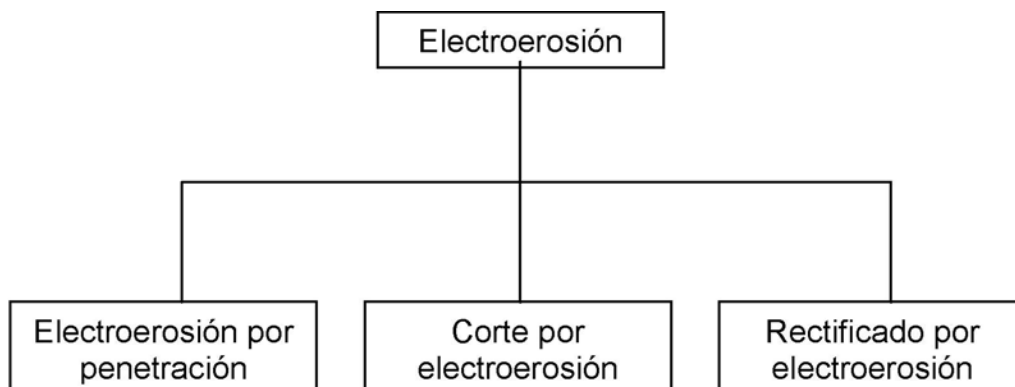
El tiempo de pausa entre cada dos descargas es fundamental para el correcto desarrollo del proceso. Si este tiempo no existiera o fuese insuficiente, la chispa se colapsaría, dando lugar a un arco.

La acumulación de residuos en la cavidad también puede llegar a producir este efecto.

Resumiendo, se puede decir que durante el proceso de electroerosión se va efectuando en la pieza un proceso de copiado, a nivel microscópico, de la forma del electrodo, lo que dará lugar a la obtención de un negativo exacto de éste, salvando claro está la longitud de las chispas ó distancia de chispeo, conocido como GAP, medida que habrá que tener en cuenta en el momento de la fabricación de los electrodos.

## 2.4 TIPOS DE MECANIZADO POR ELECTROEROSION

Distinguiendo 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.



### 2.4.1 Electroerosión por penetración

Esta forma de electroerosión es la más universal. Se basa en el avance continuo, y servocontrolado 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. 2.11).

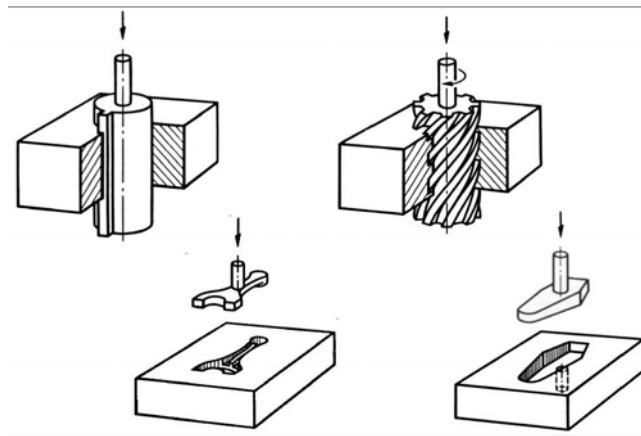


Fig. 2.11.- Electroerosión por penetración (VDI 3402).

El líquido dieléctrico utilizado en penetración hoy en día es aceite mineral especial para erosión, aunque se pueden encontrar ciertas máquinas que funcionan con agua u otros líquidos especiales.

### 2.4.2 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 el realizar un corte en la pieza y no obtener una copia con la forma del electrodo.

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.

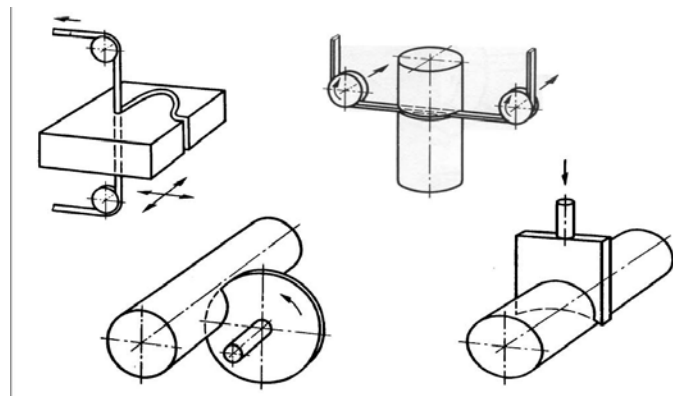


Fig. 2.12.- Corte por Electroerosión (VDI 3402).

En la electroerosión por hilo, un CNC controla el movimiento relativo entre el hilo y pieza.

El hilo es de diámetro pequeño, normalmente de 0,25 o 0,3 mm., aunque los diámetros pueden reducirse hasta valores de 0,025 mm. en aplicaciones de micromecánica.

En este tipo de electroerosión, el líquido dieléctrico habitualmente utilizado es el agua desionizada, aunque también existe alguna máquina que funciona con aceite.

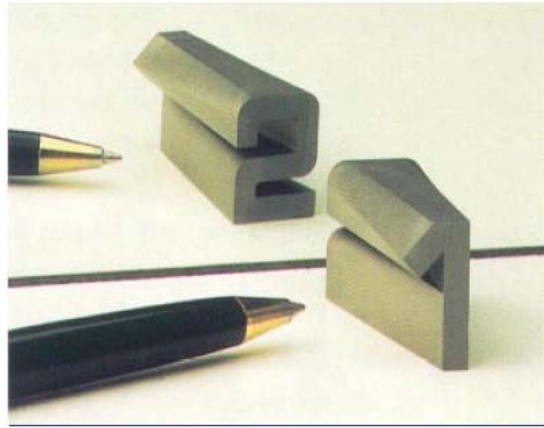
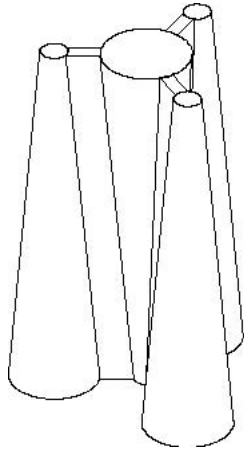


Fig. 2.13.- Ejemplos de corte cónico.

Debe tenerse en cuenta que la WEDM permite únicamente producir geometrías pasantes. Así mismo, es posible realizar el corte en vertical o en cónico por medio de un descentramiento, controlado por el CNC, de la guía superior con respecto a la guía inferior. De este modo se pueden realizar formas con cortes cónicos que pueden ser de gran complejidad (Fig. 2.13).

Las ventajas de la electroerosión por hilo se pueden resumir en: rapidez, ya que no es necesario mecanizar el electrodo, y la no influencia del desgaste del hilo sobre la precisión de las piezas, al estar el hilo animado de un movimiento de desplazamiento que permite que la zona ya desgastada vaya reponiéndose en modo continuo.

### **2.4.3 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. 2.14). El campo de aplicación de este tipo de máquina es muy reducido.



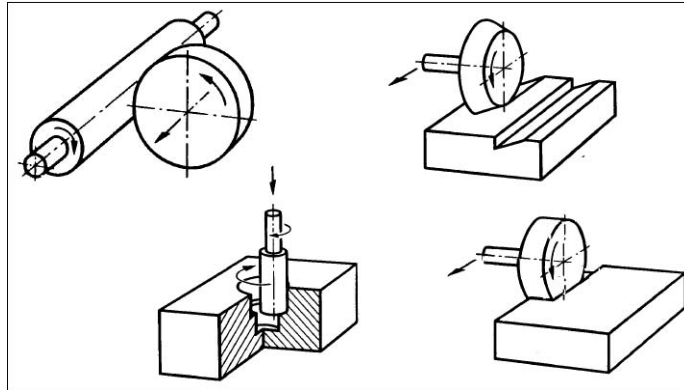


Fig. 2.14.- Rectificado por electroerosión (VDI 3402).

## TERMINOLOGIA DE LA ELECTROEROSION

En este capítulo se da la explicación sucinta sobre las palabras más corrientes empleadas a lo largo del libro. De este modo, el lector podrá familiarizarse con diversos conceptos que se utilizarán a lo largo del presente texto.

### 3.1 TERMINOLOGIA GENERAL

**Arco:** Sucesión de descargas eléctricas que se sitúan localizadamente en un punto. Tienen efecto destructor.

**Aspiración:** Succión del liquido dieléctrico a través de la pieza o electrodo.

**Cortocircuito:** Situación dada cuando existe contacto directo entre los dos electrodos (electrodo y pieza). No tiene efecto destructor pero sí negativo para el proceso.

**Cráter:** Cavidad realizada por cada uno de los impulsos sobre la superficie que se está mecanizando.

**Desgaste:** Se denomina desgaste volumétrico relativo ( $\theta_v$ ) a la relación entre el volumen de material arrancado del electrodo y el arrancado de la pieza. Se mide en tanto por 100.

$$\theta_v = \frac{\text{Volumen arrancado en el electrodo}}{\text{Volumen arrancado en la pieza}} \times 100$$

Se puede medir también el desgaste frontal, que es la zona desgastada del electrodo (Fig. 3.1).

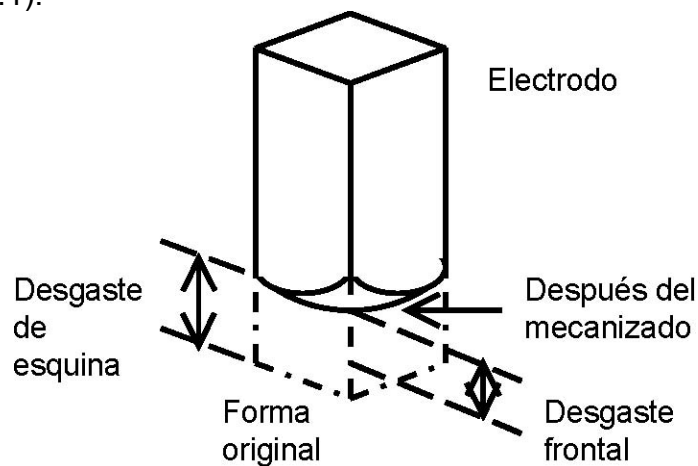


Fig. 3.1.- Desgaste de un electrodo.

**Desionización:** Retorno del líquido dieléctrico a la situación normal no conductora después de cada descarga eléctrica .

**Dieléctrico (Líquido):** Líquido no conductor de la electricidad que se utiliza en electroerosión; en él se sumergen la pieza y el electrodo durante el proceso de mecanizado.

**Electrodo:** Es la herramienta de trabajo que se utiliza en electroerosión.

**Estabilidad de funcionamiento:** Una máquina de electroerosión trabaja de forma estable cuando hay ausencia de cortocircuitos y de arcos.

**Estado de superficie:** El estado superficial en electroerosión no es direccional como en otros procesos, sino multidireccional. Dicho estado superficial se relaciona con la rugosidad media ( $R_a$ ) por medio del número de rugosidad ( $N_r$ ) VDI 3.402. Se cumple la relación:

$$N_r = 20 \cdot \log(10 \cdot R_a)$$

estando  $R_a$  expresado en  $\mu\text{m}$ .

**Gap:** Espacio entre electrodo y pieza en el cual se dan las descargas.

Se pueden distinguir:

- Gap frontal (Fig. 3.2): Cuando dicho espacio no es paralelo a la dirección del eje de penetración.
- Gap lateral (Fig. 3.2): Gap paralelo al eje de penetración. Es mayor el gap en este caso.

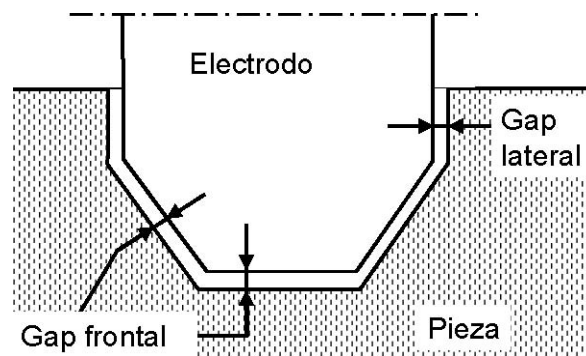


Fig. 3.2.- Gap frontal y Gap lateral

**Inyección del dieléctrico (Limpieza por):** Introducción de dieléctrico en el gap por inyección a una presión dada.

**Ionización:** Período anterior al paso de la descarga eléctrica durante el cual el líquido dieléctrico se convierte en conductor en un punto dado. Para ello se ha de aplicar tensión eléctrica a ambos electrodos.

**Limpieza:** Arrastre del dieléctrico que se encuentra contaminado dentro del gap, sustituyéndolo por otro limpio.

**Pieza:** Pieza que se mecaniza con el electrodo.

**Polaridad:** Polo al cual se ha unido el electrodo.

**Polución:** Grado de suciedad del dieléctrico del gap. Este contiene restos del craking del dieléctrico y del material erosionado.

**Presión del dieléctrico (Limpieza por):** Véase Inyección

**Presión del dieléctrico:** Unidades.- Fuerza por unidad de superficie que actúa sobre las paredes por las circula el dieléctrico. Sus unidades son :  $\text{kg/cm}^2$  y bar.

bar 1 : Decanewton  $1/\text{cm}^2$  :  $1\text{daN } 1/\text{cm}^2$ .

$1 \text{ kg/cm}^2$  : 0,981 bar ( $\approx 1$ ).

**Rendimiento:** Se define como la conjunción entre una buena velocidad de arranque de material y un desgaste lo más bajo posible. Para un buen rendimiento la primera condición es una buena estabilidad en el trabajo.

**Rigidez dieléctrica:** Unidades.- Se define "Rigidez dieléctrica de un dieléctrico" al campo eléctrico que es capaz de aguantar dicho dieléctrico sin ionizarse, es decir, sin volverse conductor. Se mide en kilovoltios/cm.

**Rugosidad:** Véase "Estado de superficie".

**Viscosidad:** La viscosidad de un fluido corresponde a la resistencia de rozamiento que ejerce el desplazamiento relativo de sus moléculas cuando se halla el fluido en movimiento.

Unidad: Stoke (St), centistoke (cSt).

### 3.2 TERMINOLOGIA ELECTRICA

**Descarga:** Paso de corriente a través de algún punto del gap, debida a un impulso de tensión.

- Descarga isoenergética.-Caso en el que se cumple que todas las descargas tienen la misma energía.
- Descarga isofrecuencial.-Caso en el que se cumple que la frecuencia de descargas es constante.

**Frecuencia de impulso ( $f_p$ ):** Número de impulsos que se dan en un segundo.

**Período ( $t_p$ ):** Tiempo que pasa desde el comienzo de un impulso hasta el comienzo del impulso siguiente (Fig. 3.3).

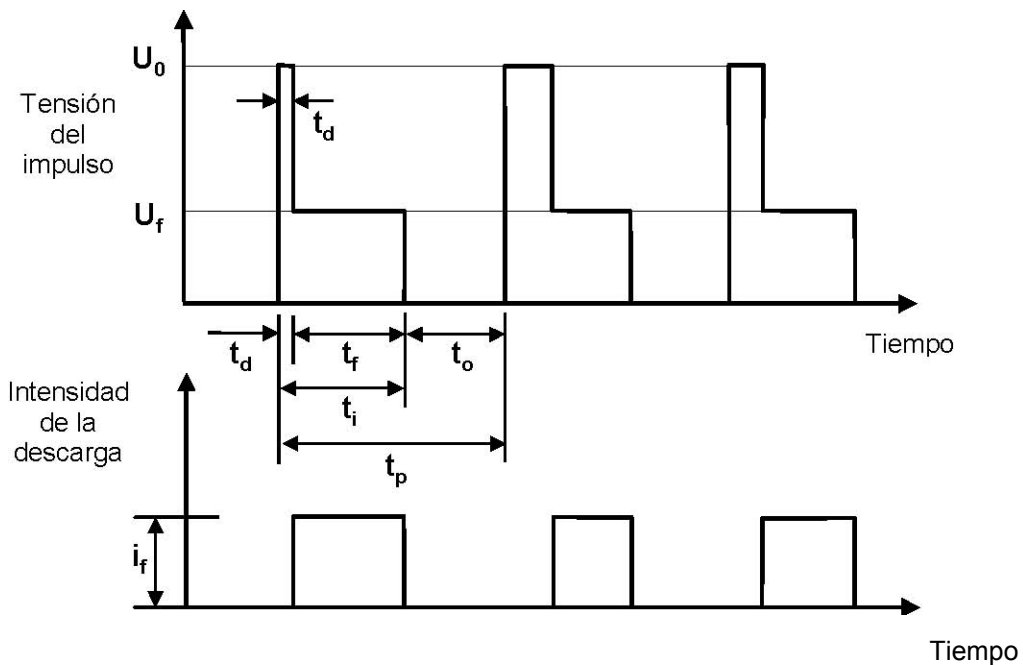


Fig. 3.3.-Terminología eléctrica (VDI 3402)

**Tensión de descarga ( $U_f$ ):** Tensión entre electrodo y pieza después de cebada la

descarga (Fig. 3.3)

**Tensión en vacío ( $U_0$ ):** Tensión entre electrodo y pieza antes de cebada la descarga, o tensión entre electrodos si no hay descarga (Fig. 3.3)

**Impulso de tensión:** Tensión aplicada a ambos electrodos durante un tiempo determinado.

**Impulso de intensidad:** Véase "Descarga".

**Intensidad media de corriente ( $I_{fm}$ ):** Valor medio de la corriente que circula por el gap durante el mecanizado. Es el valor leído en el amperímetro (Fig. 3.3).

**Intensidad de impulso ( $i_f$ ):** Intensidad que circula por el gap durante una descarga (Fig. 3.3).

**Tiempo de descarga ( $t_f$ ):** Tiempo durante el cual pasa la descarga hasta que eléctricamente se corta la corriente (Fig. 3.3).

**Tiempo de impulso ( $t_i$ ):** Tiempo que dura el impulso de erosión entre ambos electrodos (Fig.3.3).

**Tiempo de pausa ( $t_o$ ):** Intervalo de tiempo que transcurre entre el final de un impulso y el comienzo del siguiente (Fig. 3.3). Se verifica que:

$$t_p = t_i + t_o$$

**Tiempo de retraso de descarga o de ionización ( $t_d$ ):** Tiempo que transcurre entre la aplicación del impulso de tensión y el comienzo de descarga. Suele ser muy pequeño, del orden de 0,5 a 2  $\mu s$  (Fig. 3.3). Se cumple que:

$$t_i = t_d + t_f$$

NOTA: La nomenclatura aquí expuesta coincide con la de la Norma VDI 3402, titulada: “Mecanizado por electroerosión, Parte 1, Definiciones y terminología”. Junio 1980.

## **4 MAQUINAS Y GENERADORES**

Cuando aparecieron las primeras máquinas de electroerosión eran todas de penetración, pero la evolución tecnológica permitió que a finales de los setenta apareciesen las primeras máquinas de hilo, gracias al gran desarrollo que desde esas fechas ha experimentado la tecnología de los controles numéricos.

La diferencia fundamental que identifica a ambos tipos de máquina es que en las de penetración el electrodo tiene una forma tridimensional y en una operación de erosión con movimiento de un eje, consigue realizar en la pieza una cavidad tridimensional; en tanto que en las de hilo el electrodo tiene forma de un alambre que va cortando la pieza de acuerdo al programa de interpolación que va ejecutando el control numérico asociado.

Esta diferencia funcional hace que tanto la estructura de la máquina como el número de ejes e incluso el dieléctrico sean diferentes en ambas ramas de la tecnología de la electroerosión.

No obstante, los elementos básicos de ambos tipos de máquina son los mismos.

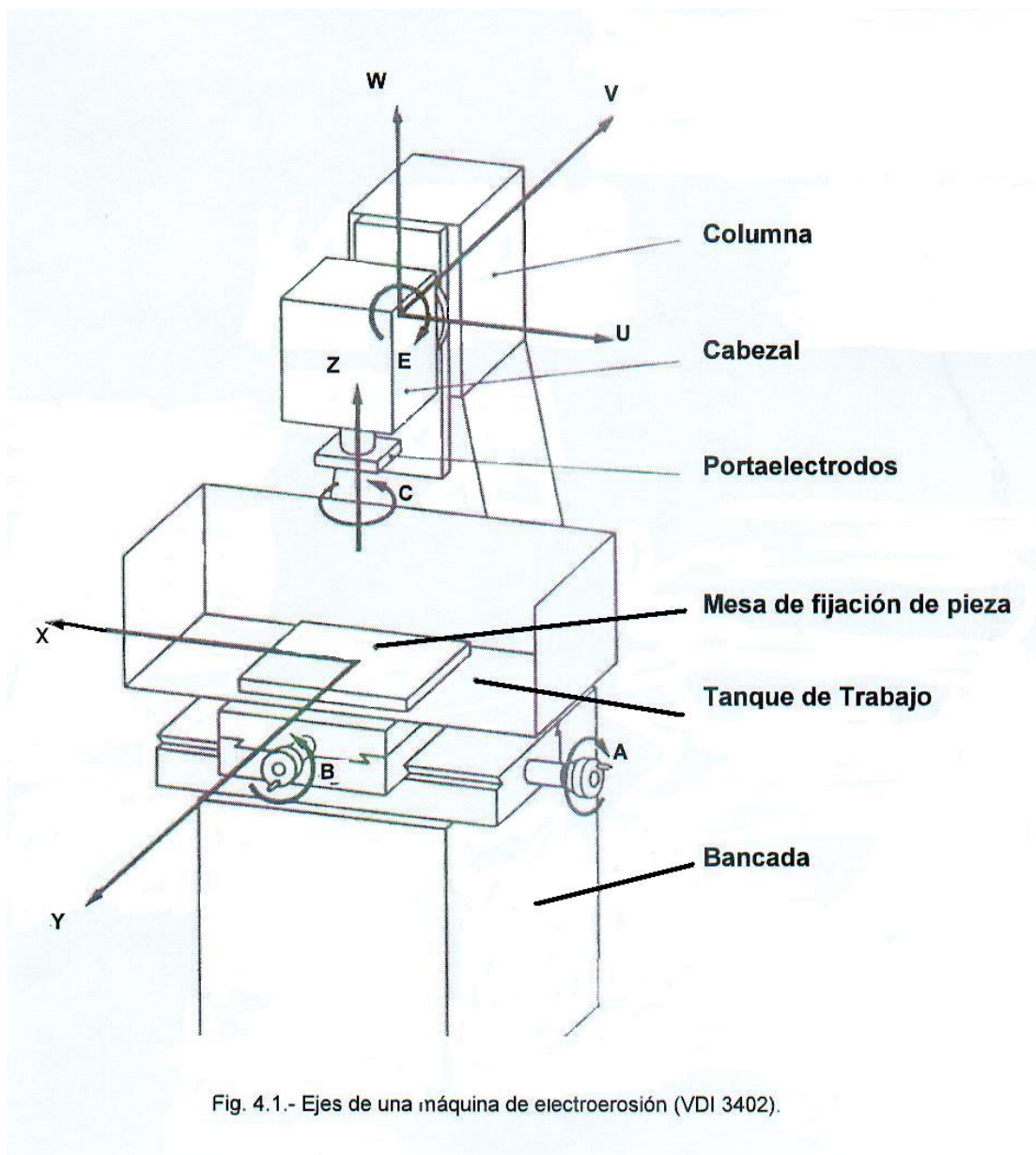
### **4.1 PARTES DE UNA MAQUINA**

Las partes fundamentales de una máquina de Electroerosión son las siguientes:

- Una bancada o armazón, que sirve de base para los demás elementos.
- La mesa de trabajo.
- La unidad de filtrado, con el sistema de circulación de dicho líquido, su filtrado, enfriamiento, etc.

- El generador de impulsos, que puede estar incorporado en la bancada, pero que generalmente se halla en un armario aparte, y se sitúa al lado de la máquina.
- Una unidad de CNC, que permite unos muy elevados niveles de automatización, aunque tales unidades pueden no estar incorporadas en todas las máquinas.

#### 4.1.1 Sistema de ejes de una máquina de electroerosión





Dados los diferentes conceptos constructivos de máquina que existen, además de las dos tipologías básicas de penetración e hilo, y de las numerosas variantes que pueden ser utilizadas para dar solución al amplio abanico de aplicaciones de la electroerosión, la asociación alemana VDI desarrolló la norma VDI 3402 en la que se definían los diferentes ejes de cualquier máquina de electroerosión.

#### **4.1.2 Armazón**

Constituye el esqueleto de la máquina. Aunque puede tener formas diversas ha de estar concebido para servir de base de sujeción a todos los elementos y dispositivos necesarios para el proceso de electroerosión, tales como los dedicados al accionamiento del sistema portaelectrodos, en las de penetración, al sistema de movimiento y guiado del hilo, en las de hilo, y a la mesa de trabajo con el tanque de dieléctrico por otra.

Además, estos dispositivos deben estar dispuestos de forma que sean fáciles las maniobras en ellos, tales como el cambio de electrodos o la puesta a punto de las piezas a mecanizar. En máquinas pequeñas, normalmente, en la construcción del armazón se adopta la forma de cuello de cisne.

La tendencia más moderna en máquinas de electroerosión es a separar el generador de los elementos mecánicos introduciendo aquél en un armario aparte. Esta tendencia está justificada por el gran número de variantes que se pueden dar en los generadores para alimentar una misma máquina, en el caso de la penetración, y en la conveniencia de alejar del cuerpo de la máquina de cualquier fuente de calor que pudiese producir distorsiones mecánicas.

### **4.1.3 El cabezal (máquinas de penetración)**

El cabezal de una máquina de electroerosión es un elemento esencial de la misma, ya que lleva consigo todo el complejo sistema de mecanizado automático.

Su parte principal es el servosistema de control que actúa sobre el portaelectrodos asegurando un desplazamiento vertical del electrodo, siempre sobre el mismo eje. La rigidez de estos elementos ha de ser muy cuidada.

El servosistema de control es el encargado de mantener el gap constante. En el proceso de electroerosión se van desgastando ambos electrodos, lo cual daría como consecuencia su separación en el momento en que el gap se hubiera agrandado. La velocidad de arranque de material y el desgaste dependen de la intensidad de la descarga y del tiempo de impulso.

Según sean las dimensiones del electrodo, ambos polos tenderán a separarse en un tiempo más o menos corto. Por ello el servosistema de control ha de tener gran velocidad de respuesta para acercar el electrodo a la pieza y un avance muy preciso.

Asimismo hay casos en los que el electrodo y la pieza entran en contacto directamente, produciéndose un cortocircuito. En este caso el servosistema de control debe de separarlos automáticamente con gran rapidez.

Este movimiento automático se realiza aprovechando la relación que existe entre la tensión media entre electrodos y su distancia. Toda variación de esta distancia se traduce automáticamente en una variación y en el mismo sentido de dicha tensión. Midiendo con la ayuda de un dispositivo apropiado la desviación de dicha tensión como señal de error, es posible regular automáticamente el avance y mantener constante la distancia entre electrodos.

En el caso de cortocircuitos, una de las causas que los provoca es un avance excesivamente rápido del electrodo y otra es el exceso de partículas en el gap. Por ello el servosistema de control debe de regular el avance con una respuesta muy rápida y precisa.

Asimismo el cabezal comporta una serie de órganos que sirven para parar la máquina automáticamente al final del trabajo y para la lectura de la posición del electrodo.

#### **4.1.4 La mesa de trabajo**

La mesa de trabajo es la unidad en la que se fija la pieza para su mecanización.

Según sea el concepto constructivo de la máquina, el sistema de coordenadas que permite los desplazamientos relativos entre la pieza y el electrodo puede hacer que sea éste o bien la mesa el elemento móvil.

Las máquinas de Electroerosión se pueden considerar como semipunteadoras, lo que indica que la precisión del recorrido del portaelectrodos es de algunas micras en el total de su carrera y la precisión de desplazamiento relativo entre la mesa y el electrodo es del orden de 0,01 mm. en carreras de unos 350 mm.

Envolviendo a la mesa de trabajo se halla el tanque de trabajo, que se llena de líquido dieléctrico, y es donde se efectúa el mecanizado. El volumen de dicho tanque depende del tamaño de la pieza y de la potencia del generador.

#### **4.1.5 Unidad de filtrado**

Esta unidad es la encargada de extraer del líquido dieléctrico los residuos del material arrancado durante el proceso de electroerosión.

Además de los elementos necesarios para la función de filtración, esta unidad incluye los dispositivos necesarios para asegurar el envío del líquido hacia el tanque de trabajo y poder ejecutar los diferentes tipos de limpieza de la zona de trabajo.

#### **4.1.6 Control Numérico (CNC)**

La evolución tecnológica de la electrónica ha permitido que desde comienzos de la década de los ochenta comenzase la incorporación de los controles numéricos a las máquinas de electroerosión.

De este modo, en el plazo de veinte años, la práctica totalidad de las máquinas de electroerosión ya iban equipadas con unidades CNC, que permitían la realización de una muy variada gama de funciones, las cuales, en conjunción con la programabilidad de los regímenes de potencia de los generadores, el control del estado del proceso y los sistemas automáticos de intercambio de electrodos y piezas, han supuesto, desde entonces, un muy elevado grado de automatización y la posibilidad de trabajar en modo inatendido durante largos períodos de tiempo.

### **4.2 EL GENERADOR**

El generador es uno de los elementos fundamentales de la máquina de electroerosión. Con el paso del tiempo se han ido desarrollando diversos tipos. Principalmente se pueden distinguir dos grandes grupos:

- Generadores de relajación.
- Generadores de impulsos transistorizados.

La tensión de mantenimiento de las descargas cebadas es característica de cada pareja de metales electrodo-pieza y es independiente de la corriente de la descarga.

Así pues, el generador que proporciona los impulsos o descargas erosivas tiene como fundamento el proporcionar la tensión necesaria para el cebado o encendido de la descarga así como para su mantenimiento.

Además, tiene que limitar la corriente de las descargas así como imponer su duración en el tiempo y la frecuencia de sucesión de las descargas.

#### **4.2.1 Generadores de Relajación**

Inicialmente, el primer circuito generador de descargas eléctricas para la electroerosión, fue el denominado “Circuito Lazarenko” que recibe el nombre por los investigadores que lo desarrollaron.

El circuito Lazarenko es de gran simplicidad y su elemento más característico es un condensador que es alimentado por medio de una fuente de corriente a través de una resistencia (Fig. 4.2).

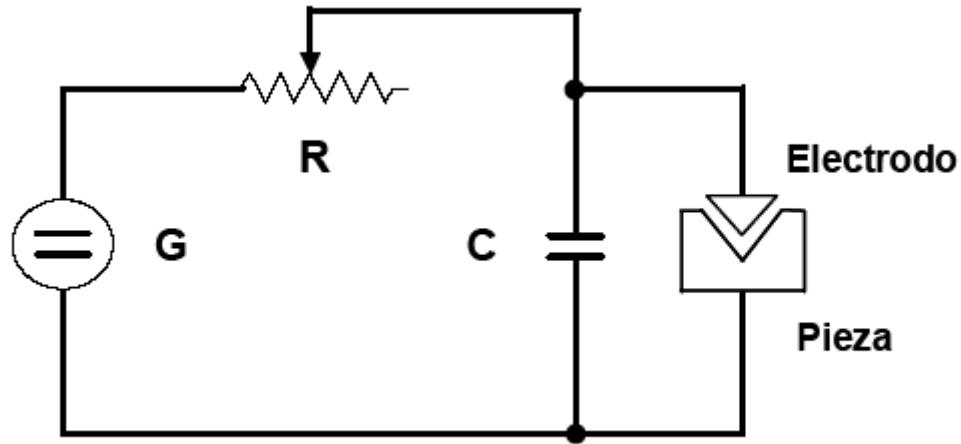


Fig. 4.2.-Generador Lazarenko (circuito)

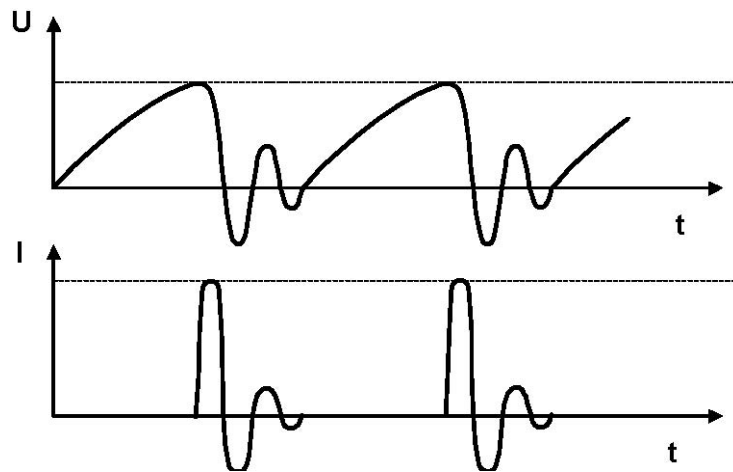


Fig. 4.3.-Generador Lazarenko (descargas)

El condensador está conectado en paralelo al electrodo y la pieza, de forma que cuando la tensión en bornes del condensador supere a la tensión de disrupción del dieléctrico, situado entre electrodo y pieza, éste se ionizará y la energía almacenada en el condensador se descargará bruscamente por el canal de descarga abierto en el dieléctrico, en la zona de erosión.

Pero este circuito tiene un inconveniente y es que el circuito de descarga del condensador actúa como un circuito oscilante al comportarse el cable de dicho

circuito como un autoinducción (Fig. 4.3).

Debido a esta oscilación, se produce una inversión periódica de la tensión y la corriente hasta que la energía acumulada en el condensador se haya agotado.

Está claro que la duración de la descarga vendrá impuesta por el período de oscilación, con lo que es evidente que la energía, la corriente y la duración de la descarga están ligadas y no pueden ser independientemente variadas.

Además, dicha oscilación produce una inversión periódica de la polaridad durante la descarga, lo cual impone una limitación en la elección de los materiales de los electrodos, al tener que soportar alternativamente las dos polaridades.

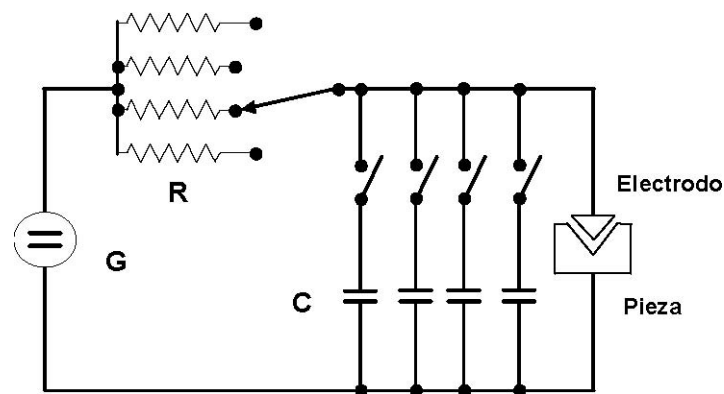


Fig. 4.4.-Generador Lazarenko (circuito real).

Aunque se haya hablado de una resistencia y un condensador, estos generadores van equipados por sendas baterías (Fig. 4.4) de resistencias y condensadores que permiten una relativamente extensa gama de frecuencias de descarga.

Para poder aumentar las frecuencias de trabajo, se evolucionó añadiendo una bobina de autoinducción tras la resistencia (Fig. 4.5) con lo cual el período de carga del condensador era inferior.

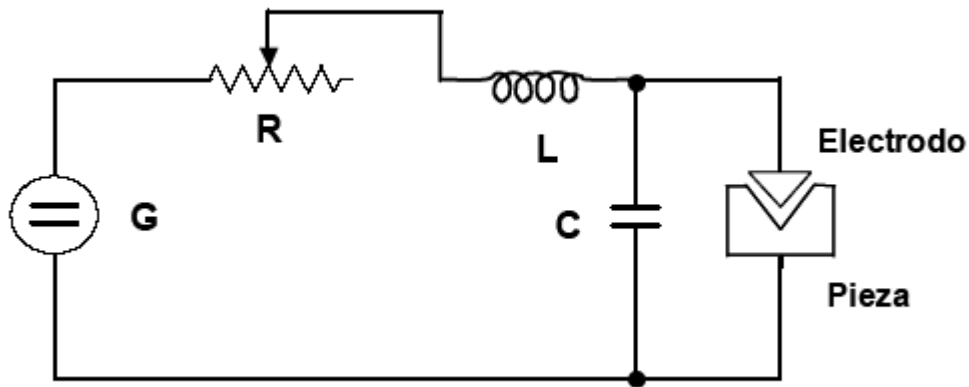


Fig. 4.5.-Generador de relajación RCL (circuito)

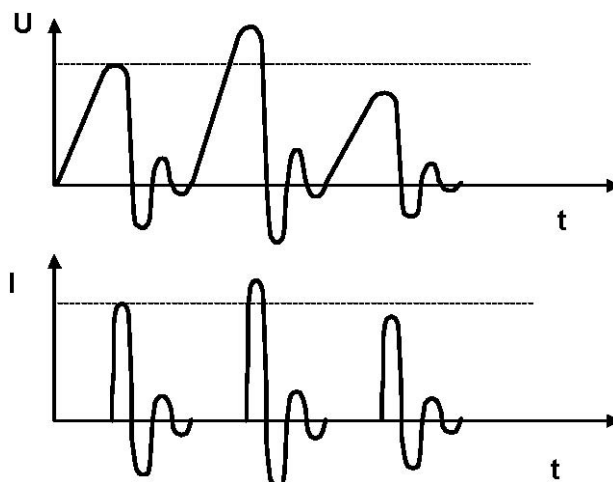


Fig. 4.6.-Generador de relajación RCL (descargas).

Pero esto traía consigo otro problema y es que parte de la energía del condensador pasaba a la autoinducción, con lo cual la tensión en bornes del condensador variaba continuamente y, en consecuencia, variaba la energía de las descargas, que es proporcional al cuadrado de la tensión (Fig. 4.6).

Además, la variación de la energía de las descargas suponía grandes diferencias en el estado de rugosidad de las piezas obtenidas y las variaciones de tensión suponían, a su vez, continuas variaciones del gap.



Para evitar estos problemas se conectó en paralelo a la resistencia y a la bobina, un diodo (Fig. 4.7) destinado a cortar las crestas de la tensión de carga a partir de un determinado valor, lo cual permitía una constancia del gap y de la rugosidad (Fig. 4.8).

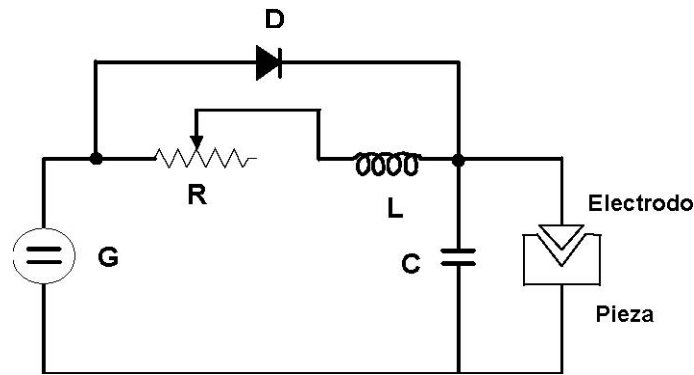


Fig. 4.7.-Generador de relajación RCLD (circuito)

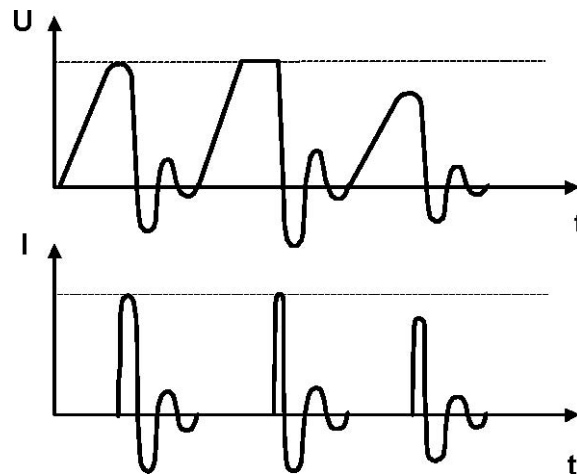


Fig. 4.8.-Generador de relajación RCLD (descargas)

Así pues, los circuitos de relajación presentan como ventajas la simplicidad, la robustez y un campo relativamente extenso de energías de descarga.

Como inconvenientes hay que citar el elevado desgaste que afecta a los electrodos, la interdependencia de parámetros como la corriente de la descarga, su duración y su energía, y la limitación que implica para la elección de los

materiales de los electrodos.

Hoy en día, todavía se emplea este tipo de generadores en campos como el de superacabado y el de algunos micromecanizados que exigen muy bajas energías y elevadas frecuencias.

Pero intentando aumentar la capacidad de arranque, se llegó a una limitación pues era preciso aumentar la corriente de la descarga, y a partir de un cierto valor desaparece el fenómeno de relajación, y se produce un arco continuo pues el canal no se desioniza y al no apagarse la descarga, toda la energía de la fuente alimenta directamente al arco.

Esto llevó a la idea de interrumpir exteriormente la corriente de carga, justo tras la descarga, para poder asegurar una eficaz desionización del canal.

#### **4.2.2 Generadores de impulsos transistorizados**

Todo lo expuesto anteriormente llevó a la idea de pulsar la corriente de descarga.

Por ello se pensó en los generadores de impulsos impuestos y es en 1959 cuando se presenta en París el primer generador de impulsos transistorizado, en el cual las variables como son el tiempo de impulso ( $t_i$ ), tiempo de pausa ( $t_o$ ) y la intensidad del impulso ( $i_r$ ) pueden ser variados independientemente unos de otros.

No se entrará aquí en el estudio de los circuitos electrónicos que los componen, pues no es objeto del presente texto.

Pero se ha de saber claramente que estos generadores toman corriente de la red normal alterna, trifásica a 220 ó 380 V, y la salida es un tren de impulsos

consecutivos, en los que se pueden variar independientemente las variables antes mencionadas. Dicha salida se aplica directamente a los electrodos (Fig. 4.9).

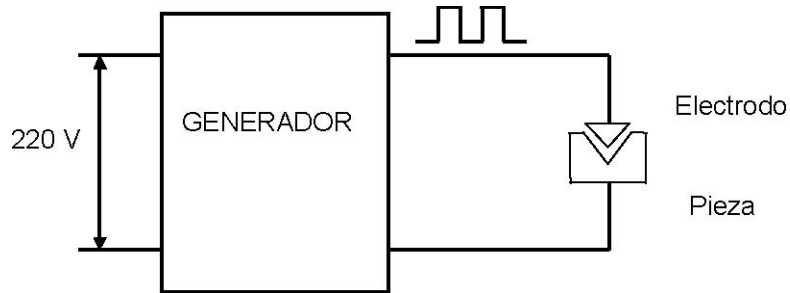


Fig. 4.9.-Función conceptual de un generador.

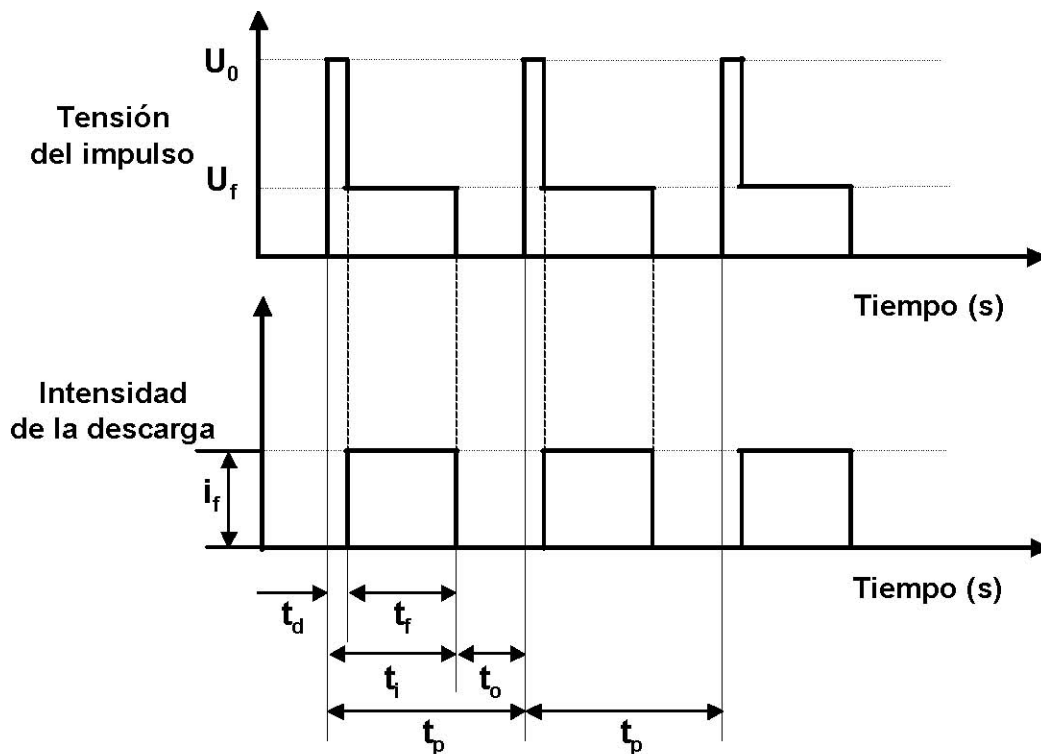


Fig. 4.10. Conceptos fundamentales de las descargas.

La Fig. 4.10 muestra un impulso de tensión y otro de intensidad en un proceso normal. Entre los dos polos (electrodo y pieza) se establece una tensión

( $U_0$ ) llamada tensión de vacío. Durante un tiempo muy corto ( $t_d$ ), llamado tiempo de encendido, que oscila entre 0,5 y 2  $\mu$ s, se inicia la descarga a través del líquido dieléctrico.

Entonces la tensión entre los polos baja mucho, hasta un valor  $U_f$ , llamado tensión de descarga. Se crea entonces el impulso de intensidad que es de forma rectangular y de duración  $t_f$ .

En estos generadores, el electrodo es uno de los polos (normalmente el ánodo) y la pieza el otro.

#### **4.2.3 Tipos de generadores**

Los generadores transistorizados que se encuentran en el mercado pueden ser divididos en dos grupos genéricos:

- Generadores isoenergéticos.
- Generadores isofrecuenciales.

##### **4.2.3.1 Generadores isoenergéticos.**

Su funcionamiento se basa en la obtención de impulsos de energía constante tras el total encendido de la descarga (Fig. 4.11).

Presentan como característica principal la constancia de la rugosidad, derivada de la igualdad de la energía de los impulsos.

Como inconveniente tiene que al producirse las descargas tras el encendido, sin importar el tiempo que se emplee en conseguirlo, las pausas entre cada dos impulsos pueden llegar a ser muy grandes, lo cual provoca, según la dependencia de principio, desgastes superiores del electrodo.

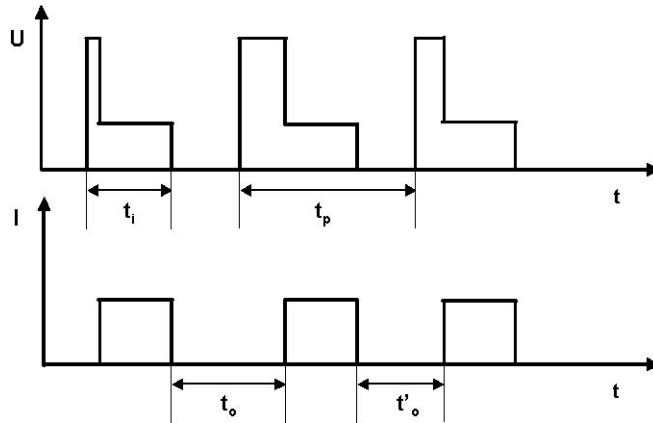


Fig. 4.11.-Generador isoenergético

Además, al aumentar el tiempo de duración de las pausas disminuye la frecuencia, con lo cual disminuye ligeramente la capacidad de arranque.

#### 4.2.3.2 Generadores isofrecuenciales.

Estos generadores se caracterizan por mantener una frecuencia constante de chispeo, sin que la duración de las pausas vaya influenciada por el retardo del encendido de las descargas.

##### a) Generadores isofrecuenciales de baja tensión de encendido.

Como generador isofrecuencial que es, presenta como característica principal la constancia de la frecuencia de chispeo (Fig.4.12).

Como inconvenientes presenta que todo retardo en el encendido de la descarga, supone una pérdida de energía, con lo que algunas descargas serán de menor potencia con lo cual no habrá constancia en la rugosidad de la pieza.

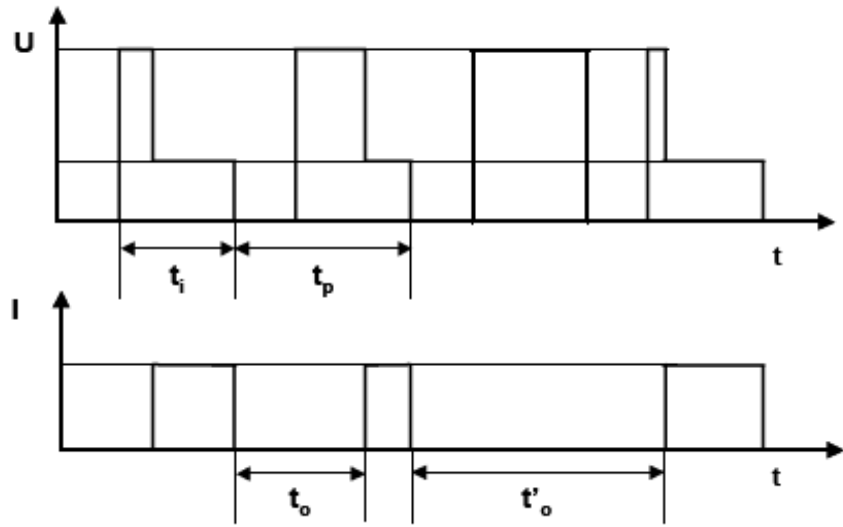


Fig. 4.12.-Generador isofrecuencial de baja tensión de encendido.

b) Generadores isofrecuenciales de alta tensión de encendido.

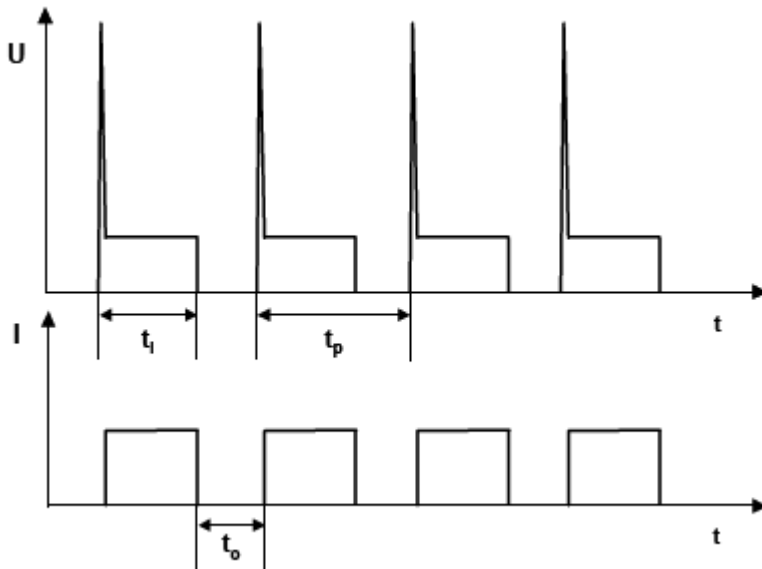


Fig. 4.13.-Generador isofrecuencial de alta tensión de encendido.

Se les puede situar a medio camino de los dos casos anteriores pues goza

de las características de los isofrecuenciales, y además, gracias a la alta tensión de encendido, éste será más rápido, con lo que se aproxima al trabajo de tipo isoenergético, y dada la alta tensión de encendido, el gap es mayor, lo cual facilita el sistema de arrastre de las partículas erosionadas (Fig.4.13).

## **5 PARAMETROS DE LA ELECTROEROSION**

Vistos ya los diferentes tipos de generadores y la forma normal de los impulsos, a continuación se verán los diferentes tipos de impulsos y la influencia de las variables eléctricas en el arranque, en el desgaste y en la rugosidad.

### **5.1 TIPOS DE IMPULSOS**

Los impulsos ya mencionados son, como se ha indicado, los impulsos erosivos normales. Son los que dan un rendimiento mayor. Pero se pueden dar circunstancias que los hagan variar, y se pueden dar las siguientes:

#### **5.1.1 Impulso vacío.**

Puede ocurrir que el gap sea demasiado grande, porque el servo no lo ha mantenido constante y se produce un impulso en el cual no hay descarga eléctrica (Fig.5.1).

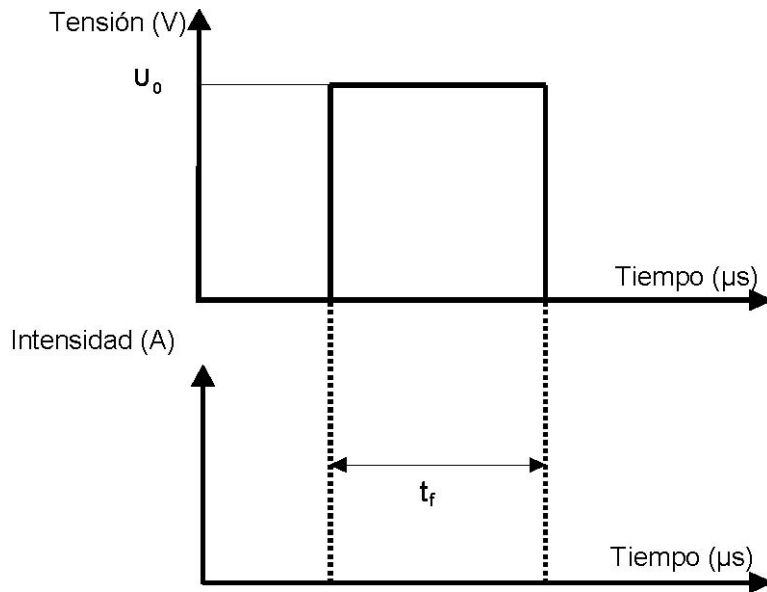


Fig. 5.1.-Impulso vacío.

Evidentemente este tipo de impulso no es erosivo. Y si se dan muchos impulsos de este tipo baja el rendimiento de la máquina.

### 5.1.2 Impulso en cortocircuito.

Otras veces ocurre que los electrodos se ponen en contacto, bien directamente o bien por medio de partículas procedentes de la erosión, que tocan a ambos electrodos. Entonces la tensión entre ambos electrodos se anula. (Fig. 5.2).



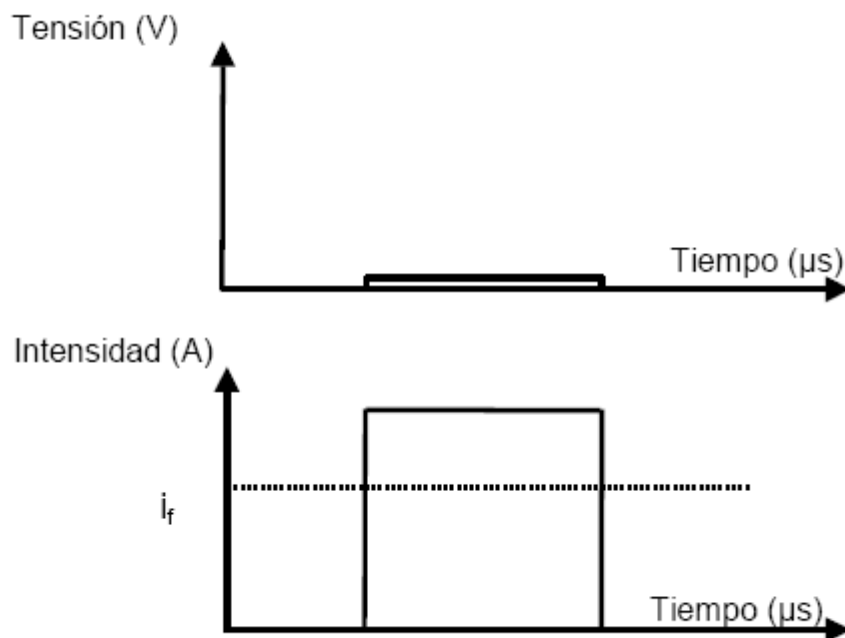


Fig.5.2.-Impulso en cortocircuito

### 5.1.3 Arcos.

Otras veces ocurre que el gap se hace demasiado pequeño, sin llegar a tocarse los electrodos. Entonces si la tensión de descarga ( $U_f$ ) es menor de 20 V, se forman arcos voltaicos, en los que la intensidad no es controlable.

De todo lo expuesto anteriormente se deduce que la función del servo sistema de control es fundamental. El servo sistema de control tiene como misión mantener el gap en una distancia tal que la tensión de descarga quede fijada en un valor óptimo que está en función del tipo de máquina y del material del electrodo y la pieza.

Si no se produce descarga (impulso vacío) el servo sistema de control debe reaccionar rápidamente acercando los electrodos; si, por el contrario, se producen cortocircuitos o arcos voltaicos el servo sistema de control debe reaccionar

rápidamente alejando los electrodos.

## 5.2 POTENCIA Y ENERGIA DE UN IMPULSO

La energía de los impulsos durante el proceso de electroerosión depende de los parámetros eléctricos elegidos. Sin embargo, dado que durante la erosión existen una multitud de factores que influyen en el proceso y hacen que éstos disten mucho de ser óptimos, el cálculo de la energía de los mismos no resulta tan inmediato como podría derivarse de las leyes básicas de la Física.

A pesar de ello, a título totalmente teórico y con el fin de facilitar la comprensión de los conceptos, se incluye a continuación un estudio sobre la potencia y energía de los impulsos.

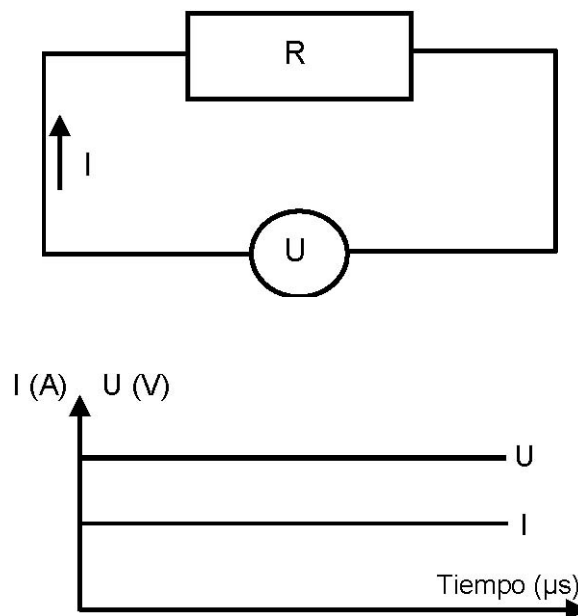


Fig. 5.3.- Tensión y corriente continuas aplicadas a una resistencia.

Como se sabe por la Física, la potencia desarrollada por una corriente continua al paso por una resistencia, ver Fig. 5.3; viene dada por:

$$P = R \cdot I^2 = U^2/R = D \cdot I$$

donde:

U: Tensión aplicada medida en voltios (V)

I: Intensidad que pasa por la resistencia R medida en amperios (A).

R: Resistencia medida en ohmios ( $\Omega$ ).

P: Potencia medida en vatios (w).

Asimismo si esta corriente pasa durante un cierto tiempo, se desarrolla una energía dada por:

$$W = P \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t = U^2 \cdot t/R = U \cdot I \cdot t$$

Donde:

W: Energía desarrollada en julios (J).

t: Tiempo (s).

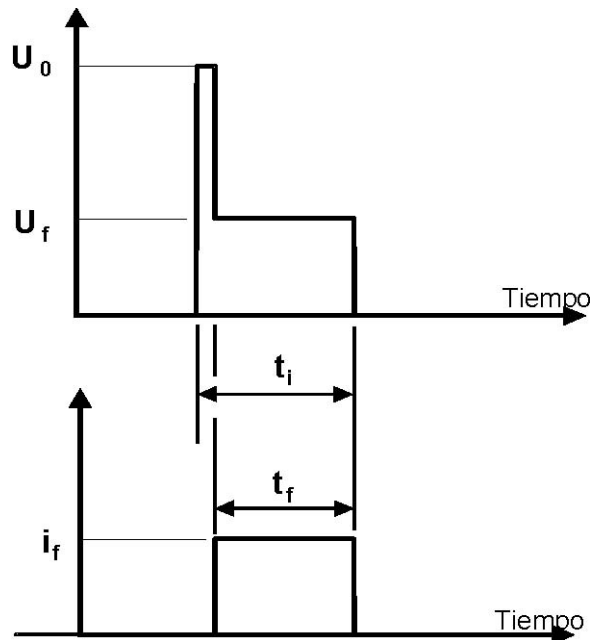


Fig. 5.4.- Potencia y energía de un impulso.

Una descarga de duración  $t_f$ , es como una corriente continua de valor  $i_f$  con

una tensión  $U_f$  que es la tensión de descarga. En la Fig. 5.4 se puede ver lo que esto significa.

Dadas las características de los generadores de alta tensión de encendido se puede suponer  $t_f \approx t_j$

Un impulso es como una corriente continua que dura  $t_f$  ( $\mu s$ ). La potencia de dicha corriente será:

$$P = U_f \cdot I_f$$

La energía de un impulso es:

$$W = U_f \cdot I_f \cdot t_f = P \cdot t_f$$

Como se ve, la energía de los impulsos es una función directa de su potencia.

Es importante tener esto en cuenta ya que como, se verá, la cantidad arrancada de material en la unidad de tiempo depende de la energía del impulso. Asimismo, también la rugosidad obtenida depende de la energía del impulso. Cuanto mayor es dicha energía la rugosidad es mayor.

### **5.3 VALOR MEDIO DE INTENSIDAD Y TENSION**

Hasta ahora se ha hablado de valores reales y concretos de intensidad y de tensión que se dan en los trenes de impulsos. Sin embargo, se suelen mencionar otros conceptos que son los que marcan los aparatos de medida ubicados en el generador y que son los valores medios.

Se sabe que en el paso de una corriente continua de valor  $I$ , la carga eléctrica ( $Q$ ) que se mueve desde un tiempo  $t_1$  hasta un tiempo  $t_2$  es:

$$Q = I \cdot (t_2 - t_1)$$

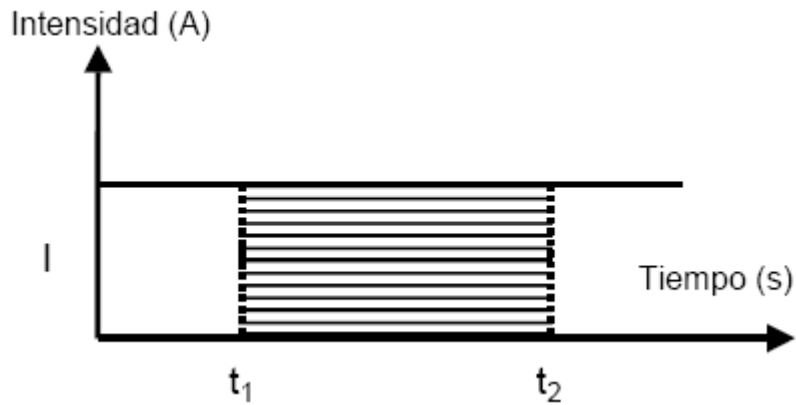


Fig. 5.5.-Corriente continua.

Es decir, el área rayada en la Fig. 5.5 representa la carga eléctrica movida.

Suponiendo ahora un tren de impulsos de intensidad en el caso de la electroerosión se tiene, ver Fig. 5.6, lo siguiente:

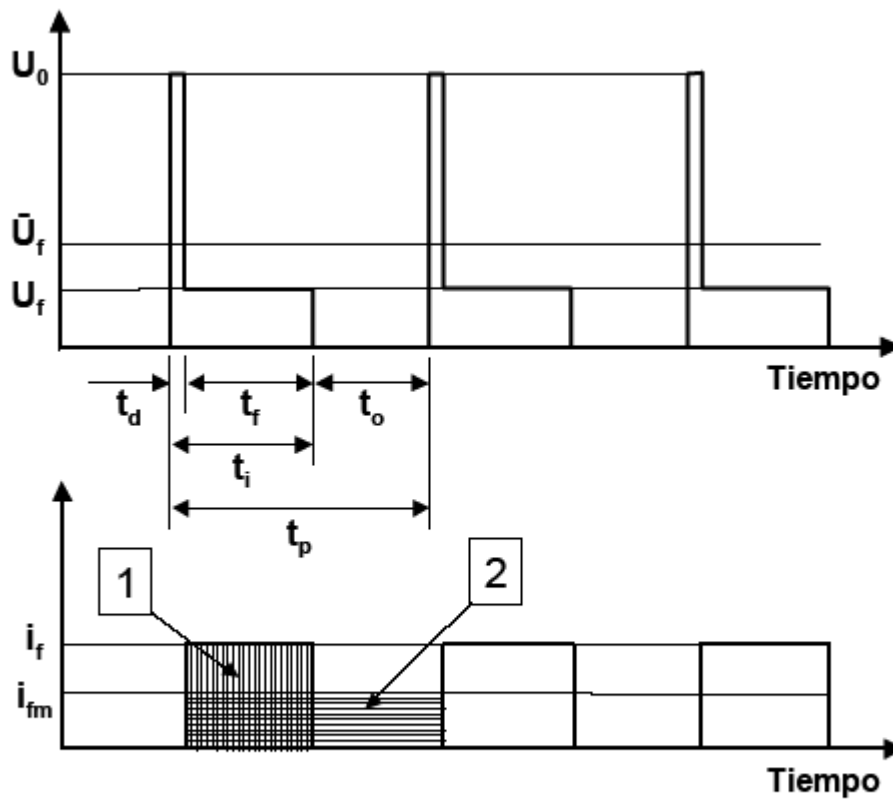


Fig. 5.6.- Valor medio de la tensión y la intensidad.

Durante un tiempo  $t_f$  pasa una corriente  $i_f$ , luego durante el tiempo de pausa ( $t_o$ ) no pasa corriente por al gap ni tampoco pasa corriente durante el tiempo de retraso del encendido ( $t_d$ ).

Por tanto en un período ( $t_p$ ) la cantidad de carga eléctrica (Q) que se mueve vendrá dada por área contenida en el impulso de intensidad, y será:

$$Q = i_f \cdot t_f$$

Suponiendo que todos los impulsos son iguales, se define la intensidad media como una intensidad de corriente que fuese continua, de valor  $i_{fm}$ , y que

durante un período moviese la misma cantidad de carga que en un impulso de intensidad  $i_f$ .

Es decir:

- Cantidad de carga del impulso en un período  $Q = i_f \cdot t_f$  (área marcada 1, rayado vertical).
- Cantidad de carga de la corriente continua en un período  $Q = I_{fm} \cdot t_p$  (área marcada 2, rayado horizontal).

Se le llama valor medio o intensidad media ( $I_{fm}$ ) de una corriente pulsada a aquel valor con el que se cumple que las cargas recorridas por ambas corrientes, impulso rectangular (corriente pulsada) y corriente continua, son iguales (áreas iguales).

$$I_f \cdot t_f = I_{fm} \cdot t_p$$

El valor medio de la intensidad será:

$$I_{fm} = I_f \cdot t_f / t_p$$

Para calcular la tensión media de trabajo se utiliza el mismo procedimiento. Igualar el área del impulso con el área de la tensión media ( $\bar{U}_f$ ), durante un período  $t_p$ .

Área del impulso:  $U_f \cdot t_f + U_o \cdot t_d$

Área tensión media:  $\bar{U}_f \cdot t_p$

Si se igualan:  $\bar{U}_f \cdot t_p = U_f \cdot t_f + U_o \cdot t_d$

Y por tanto la tensión media de trabajo será:

$$U_f = \frac{U_f \cdot t_f + U_o \cdot t_d}{t_p}$$

Todo lo definido anteriormente sería válido si todos los impulsos fuesen iguales y normales. Sin embargo los cortocircuitos, impulsos vacíos y arcos modifican estas cantidades medias. Por ello, en ciertos momentos del proceso, se pueden dar oscilaciones en los aparatos de medida.

Se pueden tener intensidades medias iguales con muy diferentes tipos de impulsos (ver Fig. 5.7). En el caso 1) la intensidad de impulso es alta, y en el caso 2) es baja. Aunque en ambos casos el tiempo de impulso sea igual, en el caso 1) el tiempo de pausa es muy grande, siendo, por el contrario, pequeño en el caso 2). El resultado presenta una intensidad media igual para ambos casos.

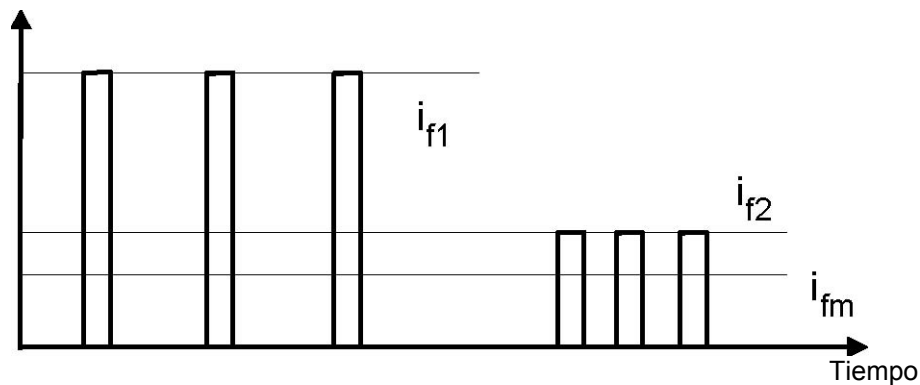


Fig. 5.7.- Intensidad media con diferentes tipos de impulsos.

## 5.4 RUGOSIDAD

Como ya se ha indicado, este concepto varía en el proceso con respecto al obtenido en mecanizados convencionales. Mientras que en éstos la rugosidad es direccional, en electroerosión es multidireccional.

### 5.4.1 Rugosidad media y rugosidad total

Si se realiza el corte de una pieza mecanizada por un plano perpendicular a



la superficie se obtiene un perfil real tal como el de la Fig. 5.8.

Tomando una longitud de referencia se definen sobre la Fig.5.8 los valores de rugosidad media ( $R_a$ ) y rugosidad máxima ( $R_t$  o  $R_{max}$ ). Dicha longitud de referencia es diferente según la magnitud de la rugosidad que se vaya a medir, y viene establecida en Normas. Ambas se miden en  $\mu m$ .

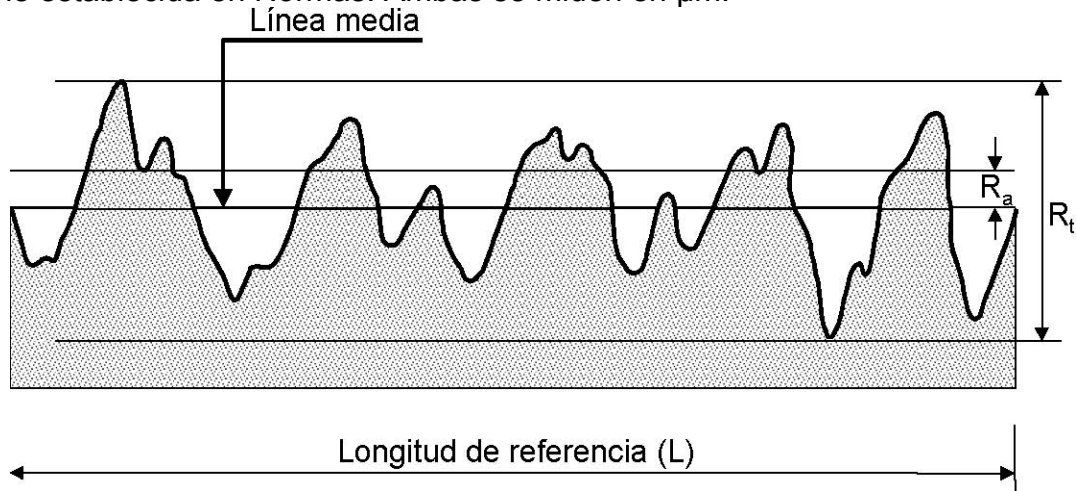


Fig. 5.8.- Perfil real de una pieza mecanizada

#### 5.4.1.1 Rugosidad media ( $R_a$ )

El valor  $R_a$  (rugosidad media) de una superficie se define como el valor medio aritmético de las distancias de los puntos del perfil real en relación con la línea media, o más simplemente como el valor medio de las diferencias hacia arriba y hacia abajo de la línea media a lo largo de una longitud de referencia preestablecida.

Dicho de otro modo, de acuerdo con las Fig. 5.8 y 5.9, se cumple:

- Línea media

$$\text{Superficie } \Sigma (A_1+A_2+\dots+A_6) = \text{Superficie } \Sigma (B_1+B_2+\dots+B_8)$$

- Rugosidad

$$R_a \cdot L = \text{Superficie } \Sigma (A_1+ A_2+\dots+ A_6 + B_1+ B_2+\dots+B_8)$$

Ra: Suma de áreas por encima de la línea media más la suma de áreas por debajo de la línea media, dividido por L.

Es decir, la rugosidad Ra es el valor medio de las superficies Ai y Bi en la longitud de referencia (L)

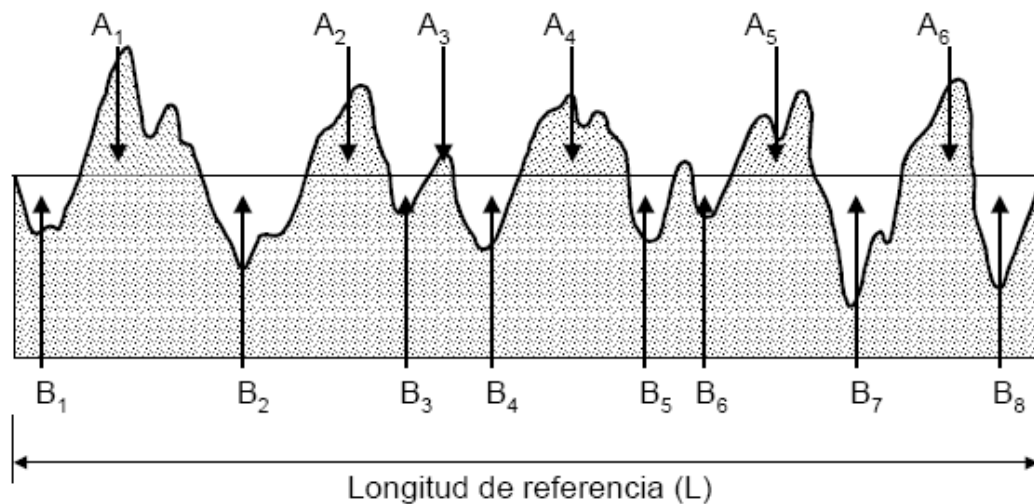


Fig. 5.9.- Perfil de una pieza

#### 5.4.1.2 Rugosidad máxima (Rt o R<sub>máx</sub>).

El valor de la rugosidad máxima (Rt o R<sub>máx</sub>) se define como la distancia entre dos líneas paralelas a la línea media y que tocan al perfil por los puntos más alto y más bajo, dentro de la longitud de referencia, ver Fig. 5.9.

#### **5.4.2 Factores de los que depende la rugosidad**

En electroerosión, la rugosidad obtenida en un mecanizado depende

principalmente de tres factores:

- Tiempo de impulso
- Nivel de intensidad
- Pareja de materiales de electrodo y pieza

Observando las tablas y gráficas de las tecnologías de erosión se puede observar:

a) La rugosidad aumenta al aumentar el tiempo de impulso. Esto es lógico ya que aunque la intensidad de la descarga sea la misma, al aumentar el tiempo sube la energía del impulso, con lo que se forman cráteres de mayor tamaño, lo cual hace aumentar la rugosidad.

b) La rugosidad aumenta conforme el nivel de intensidad sea mayor.

La causa es la misma que en el caso anterior. Al aumentar la intensidad aumenta también la energía del impulso, dando superficies más rugosas.

c) El tipo de los materiales del electrodo y la pieza, tiene también una influencia en la rugosidad obtenida para un mismo régimen.

Por ejemplo, la rugosidad es mayor cuando se erosiona acero con electrodo de grafito, que cuando se erosiona el mismo acero con electrodo de cobre. Sin embargo, si se erosiona cobre con cobre, la rugosidad es menor que en los casos anteriores. Todo ello está muy unido a la capacidad de arranque de material. Si el arranque es grande la rugosidad también lo será.

#### **5.4.3 Medición de la rugosidad**

La rugosidad de las piezas mecanizadas por electroerosión se puede medir de dos formas:

- Por medición directa con un rugosímetro.
- Por comparación con una regla patrón conocida como “Rugotest” (Fig 5.10)



Fig. 5.10.- Foto de un “Rugotest”

Lo normal es medirla visualmente de la segunda forma citada. Pero se han de conocer claramente los conceptos que se exponen a continuación.

La norma VDI 3402 elige para los valores de  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ) normalizados, la serie de Renard o de Números Normales R20 (ISO/TC19) que siguen una progresión geométrica de razón 1,12 y que comienza por  $R_a = 0,1\mu\text{m}$ .

Asimismo la Norma VDI 3402 asigna a cada rugosidad aritmética media ( $R_a$ ) una “Clase” o Número de Rugosidad” (Nr). Dicho número se halla relacionado con  $R_a$  o CLA por la fórmula siguiente:

$$\text{Nr} = 20 \cdot \log (10 \cdot R_a)$$

Estando  $R_a$  expresado en  $\mu\text{m}$ .

A continuación se presenta una tabla que expresa la correspondencia entre el Número de Rugosidad (Nr) y la Rugosidad ( $R_a$ ).

Nr	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Nr	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Nr	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Nr	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
0	0,1	*12	0,4	*24	1,6	*36	6,3
1	0,112	13	0,45	25	1,8	37	7

2	0,126	14	0,5	26	2	38	8
3	0,14	*15	0,56	*27	2,2	*39	9
4	0,16	16	0,63	28	2,5	40	10
5	0,18	17	0,7	29	2,8	41	11,2
6	0,2	*18	0,8	*30	3,2	*42	12,6
7	0,22	19	0,9	31	3,5	43	14
8	0,25	20	1	32	4	44	16
9	0,28	*21	1,12	*33	4,5	*45	18
10	0,32	22	1,26	34	5		
11	0,35	23	1,4	35	5,6		

\* Figuran en la regla patrón "Rugotest".

Tabla 5.1.- Correspondencia entre Nr y Ra

En este proceso, cuando se habla de la rugosidad, al igual que ocurre con el gap, se ha de distinguir entre la rugosidad frontal y la rugosidad lateral, entendiéndose como rugosidad frontal a la rugosidad que se da en la superficie perpendicular a la dirección de avance del electrodo, y rugosidad lateral a la correspondiente a las superficies paralelas a la dirección del avance del electrodo (Fig.5.11).

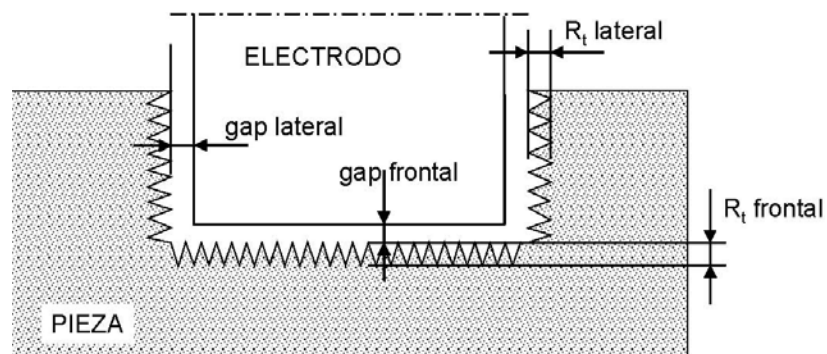


Fig. 5.11.- Rugosidad frontal y lateral.

La rugosidad frontal es siempre mayor que la lateral. Las tablas de

Tecnología dan solamente la rugosidad lateral, lo cual, cuando se trata de la mecanización de agujeros ciegos, se ha de tener presente. Normalmente la rugosidad frontal suele ser del orden de 1 Nr mayor que la lateral.

#### **5.4.4 Aspecto de las piezas mecanizadas por Electroerosión**

El tipo de rugosidad multidireccional que se da en este proceso da a las piezas mecanizadas un aspecto mate, a veces desagradable al operario acostumbrado al aspecto brillante de las piezas mecanizadas por procedimientos convencionales.

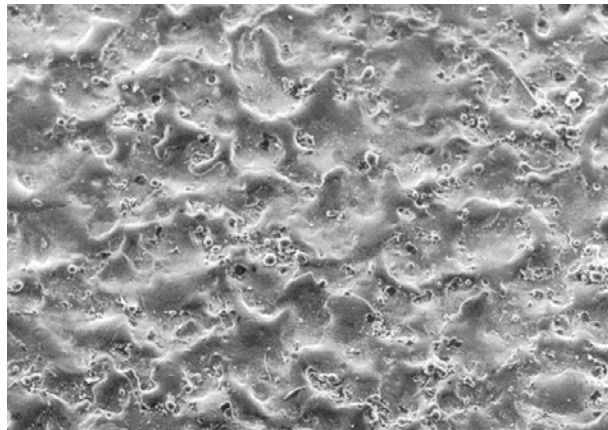


Fig. 5.12.- Foto de la rugosidad de una superficie erosionada

Ocurre con frecuencia que a simple vista las piezas parecen, debido a su aspecto, más rugosas de lo que en realidad son, por lo que es conveniente al menos al principio compararlas con el Rugotest-patrón.

#### **5.5 INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS ELECTRICOS.**

### 5.5.1 Influencia del tiempo de impulso

Las tablas tecnológicas suelen relacionar el arranque de material ( $V_w$ ), el desgaste volumétrico relativo ( $\theta_v$ ) y la rugosidad ( $Nr$  VDI) con los tiempos de impulso ( $t_i$ ).

De las tablas tecnológicas se puede deducir lo siguiente:

- a) El arranque de material crece al crecer el tiempo de impulso hasta que llega a un máximo a partir del cual decrece.
- b) Para tiempos de impulso cortos (posiciones de puntos bajos de  $t_i$ ), los desgastes son grandes y disminuyen al aumentar el tiempo de impulso hasta llegar a valores muy pequeños.
- c) Tanto el gap como la rugosidad aumentan al aumentar el tiempo de impulso.

### 5.5.2 Influencia del nivel de intensidad

Asimismo, si se mantienen constantes los tiempos de impulso ( $t_i$ ) y de pausa ( $t_o$ ) y se varía el nivel de intensidad (Fig. 5.13) de los datos de las tablas se pueden obtener las conclusiones siguientes:

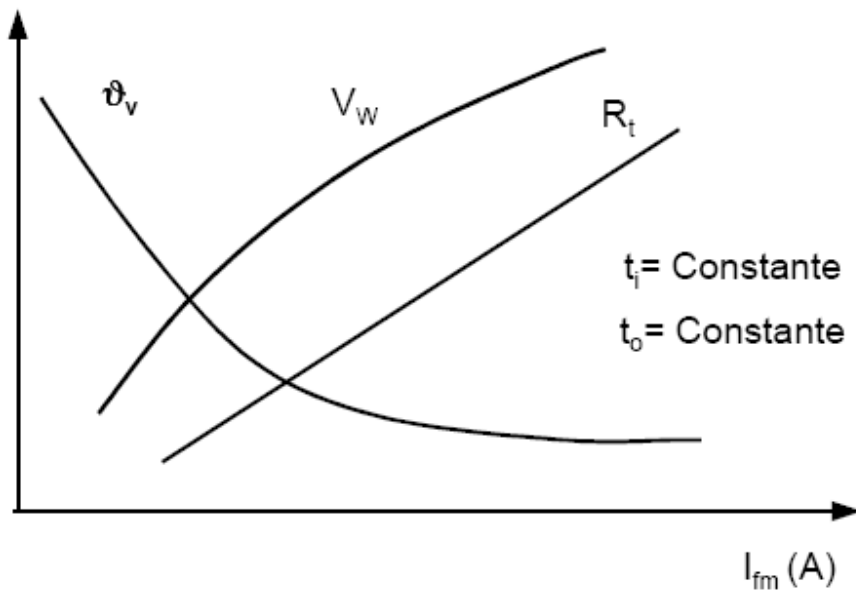


Fig. 5.13.-Variación de parámetros en función de la intensidad

- a) El arranque de material y la rugosidad obtenida crecen cuando se aumenta el nivel de intensidad.
- b) El desgaste volumétrico relativo disminuye.

### 5.5.3 Influencia del nivel de intensidad

Cuando se mantienen constantes todos los parámetros y se hace variar el tiempo de pausa ocurre lo que se relaciona a continuación (Fig. 5.14):



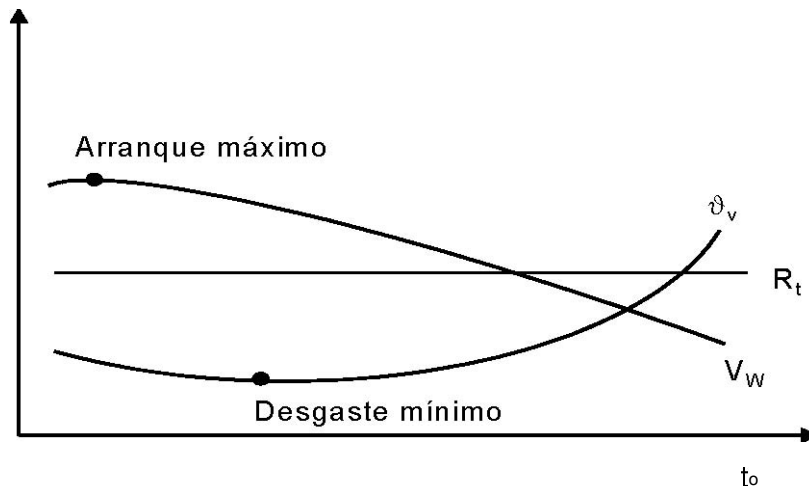


Fig. 5.14.-Variación de parámetros en función del tiempo de pausa

- a) Si el tiempo de pausa es grande el arranque de material disminuye, debido a que se darán menos impulsos en cada unidad de tiempo. Si  $t_o$  es demasiado pequeño también  $V_w$  disminuye pues no se da tiempo a efectuar una buena limpieza y se dan muchos cortocircuitos. Como resultado existe un punto de máximo arranque, y el tiempo de pausa en el que se da este punto depende de la pareja de materiales a erosionar.
- b) Si el tiempo de pausa es grande el arranque de material disminuye, debido a que se darán menos impulsos en cada unidad de tiempo. Si  $t_o$  es demasiado pequeño también  $V_w$  disminuye pues no se da tiempo a efectuar una buena limpieza y se dan muchos cortocircuitos. Como resultado existe un punto de máximo arranque, y el tiempo de pausa en el que se da este punto depende de la pareja de materiales a erosionar.
- c) Tanto el gap como la rugosidad total no varían al variar  $t_o$ ; es debido a que la energía de los impulsos es la misma aunque se varíe  $t_o$ .

Se puede decir aproximadamente que impulsos que tengan la misma área (la cual es proporcional a la energía del impulso), dan valores de gap y rugosidad igual. Y que cuanto mayor es dicha área, mayores son el gap y la rugosidad.

## 6 LA LIMPIEZA

### 6.1 DEFINICION

Se define como limpieza a la circulación del líquido dieléctrico entre el electrodo y la pieza que se está mecanizando. Dicho espacio es muy pequeño y ha sido definido como “gap”.

La limpieza es muy importante en este procedimiento de mecanizado, ya que de ella depende en gran parte el rendimiento. Si la limpieza es buena se obtiene poco desgaste en el electrodo y buena capacidad de arranque de material. Si por el contrario no se dan buenas condiciones de limpieza subirá el desgaste y disminuirá el arranque de material, dándose por tanto un mal rendimiento de la operación. Sólo con gran experiencia se consigue determinar la forma de limpieza en cada caso.

La misión de la limpieza es limpiar el gap de las impurezas que se producen durante la erosión. Dichas impurezas son:

- Gases que provienen de la disociación del dieléctrico.
- Partículas de carbón que provienen del craking del dieléctrico.
- Partículas procedentes de la erosión, que han sido arrancadas de ambos electrodos

Debido a las altísimas temperaturas que se dan en los puntos donde se producen las descargas eléctricas, el líquido dieléctrico sufre un proceso de craking, es decir de descomposición. Ello hace que desprendan burbujas de gas y partículas de carbón.

Las partículas de carbón son en general muy finas y de muy poco peso específico. Ello hace que se queden en suspensión y no sean fácilmente

arrastradas por el dieléctrico.

Las burbujas de gas, en general, son evacuadas por el gap. Pero una concentración de gas excesiva hace que no se puedan formar bien las descargas, perdiéndose rendimiento.

En cuanto a las partículas arrancadas del electrodo y pieza, es decir, lo que se podría considerar como la viruta de la electroerosión, pueden ser de diferentes formas, según los materiales que componen dichos electrodos. Según esta característica aparecen en varias formas y tamaños, como son bolas macizas, formas tetraédricas y otras (Ver Fig. 6.1).

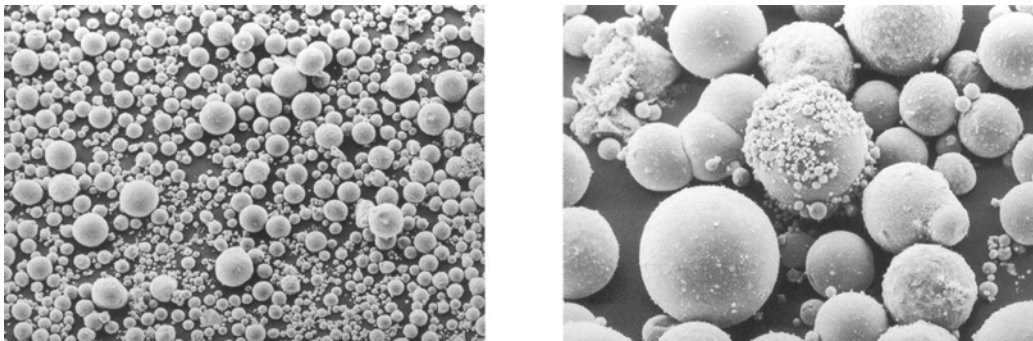


Fig. 6.1.-Fotografías de residuos de erosión

En general el acero suele dar bolas grandes, bien huecas o macizas, el aluminio formas espumosas y grandes, el cobre suele aparecer en formas pequeñas y el grafito y metal duro en forma de polvo fino.

A veces aparecen (se puede observar mirando al microscopio), trozos de material de ambos electrodos mezclados en una misma partícula.

## **6.2 INFLUENCIA DE LA CONTAMINACION DEL GAP EN EL PROCESO DE ELECTROEROSION**

Una pregunta que se puede de plantear es si es mejor un gap con mucha contaminación, con poca o con el dieléctrico puro.

Al principio del mecanizado el líquido dieléctrico se puede considerar puro, ya que acaba de ser filtrado. Por ello está totalmente exento de las partículas mencionadas en el apartado exterior.

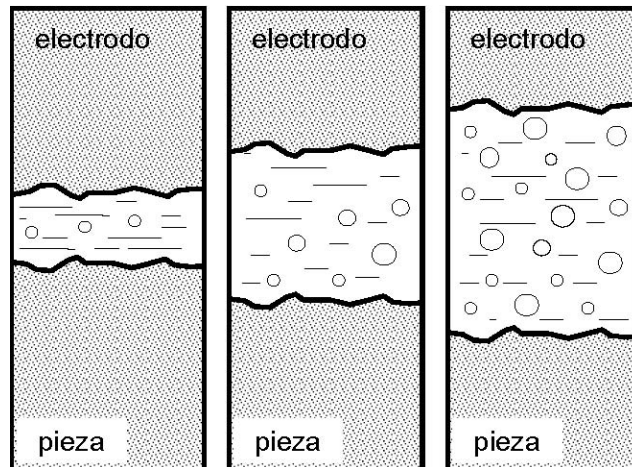


Fig. 6.2.- Grado de contaminación y dimensión del gap

Se sabe que la resistencia que opone un dieléctrico puro al paso de la corriente eléctrica es mayor que la que opone un dieléctrico con cierta cantidad de partículas. Por ello en los primeros impulsos, el tiempo de retraso del encendido ( $t_d$ ) es grande. Una vez que el dieléctrico está polucionado este tiempo disminuye haciendo la descarga más fácil. Además de esto cuando hay contaminación el gap aumenta (Fig.6.2). Esto facilita la regulación al disponer de un espacio mayor para ello.

Sin embargo si la contaminación es muy grande la resistencia del dieléctrico disminuye mucho y pueden pasar los fenómenos siguientes:

- a) La excesiva cantidad de gases puede dar lugar a que no se forme bien el canal de descarga, y que en lugar de ser cilíndrico se ramifique, perdiéndose

rendimiento.

- b) Pueden darse que parte de la energía se utilice en volver a fundir las partículas ya arrancadas, perdiéndose rendimiento.
- c) Un exceso de contaminación puede dar lugar a que se formen arcos y cortocircuitos que dañen al electrodo y a la pieza.

Por ello este exceso de gases y partículas debe ser eliminado del gap por medio de la limpieza, o sea por la circulación del líquido dieléctrico a través de él.

La limpieza es por tanto tan importante como los parámetros eléctricos (nivel de intensidad, tiempos de impulso y pausa, etc.), en cuanto se refiere a la obtención de un buen rendimiento. No debe ser ni excesivamente fuerte ni excesivamente débil, ya que para obtener un buen rendimiento es preciso que el gap se halle algo contaminado.

### **6.3 FORMAS DE LIMPIEZA**

Todas la máquinas de electroerosión se hallan equipadas para realizar la limpieza por los procedimientos que a continuación se indican:

#### **6.3.1 Limpieza por presión**

Este método consiste (Fig. 6.3 y 6.4) en introducir el dieléctrico en el gap bien a través de la pieza o del electrodo.

La Fig. 6.3 muestra el caso de limpieza por presión a través de la pieza; ésta se coloca sobre un vaso soporte, al cual llega el tubo que está conectado al mando de presión.

El vaso se llena de líquido que sale hacia el gap, espacio entre el electrodo y la

pieza, por medio de un orificio que se ha practicado con anterioridad en la pieza. Se ha de tener cuidado de que dicho taladro sea realizado con anterioridad al temple en el caso de que la pieza que se ha de erosionar sea de acero templado.

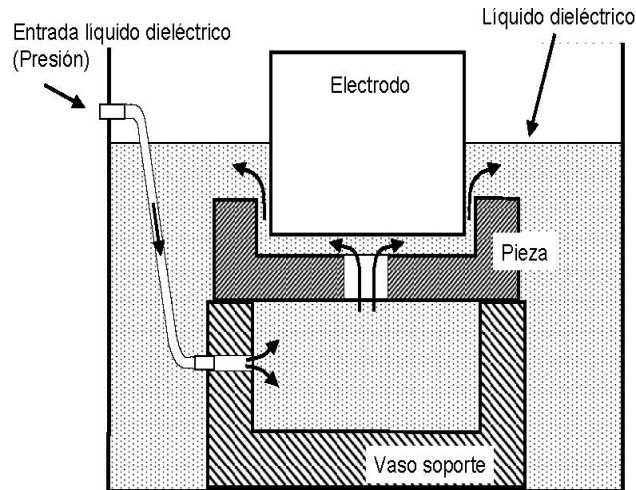


Fig. 6.3.-Limpieza por presión a través de la pieza

La limpieza por presión a través del electrodo se muestra en la Fig. 6.4.

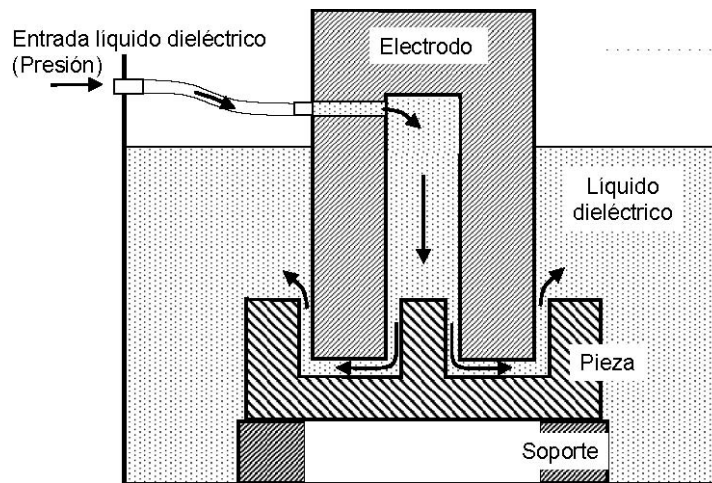


Fig. 6.4.-Limpieza por presión a través del electrodo

En este caso el líquido es inyectado por un agujero practicado por el electrodo.

La limpieza por presión da como resultado agujeros ligeramente cónicos

(Fig. 6.5 y 6.6) cuando se realizan agujeros con un electrodo de sección constante. Esta conicidad es debida a un efecto de electroerosión, que se puede llamar secundaria, en el gap lateral, a pesar de que como ya se ha dicho, el gap lateral es mayor que el frontal.

Esta erosión secundaria es debida a que el paso de las partículas por el gap lateral, crea a veces condiciones idóneas para que se den descargas laterales, lo cual por un lado constituye una pérdida de rendimiento, ya que tales descargas, que se debieran de dar frontalmente, no se dan así, sino lateralmente.

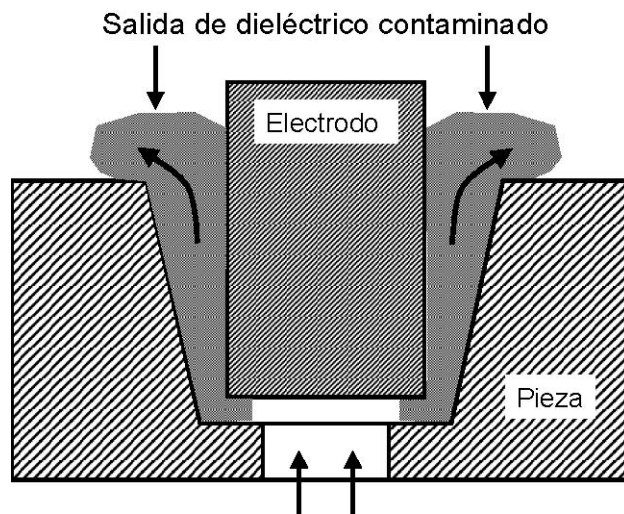


Fig. 6.5.-Conicidad en un caso de limpieza por presión a través de la pieza

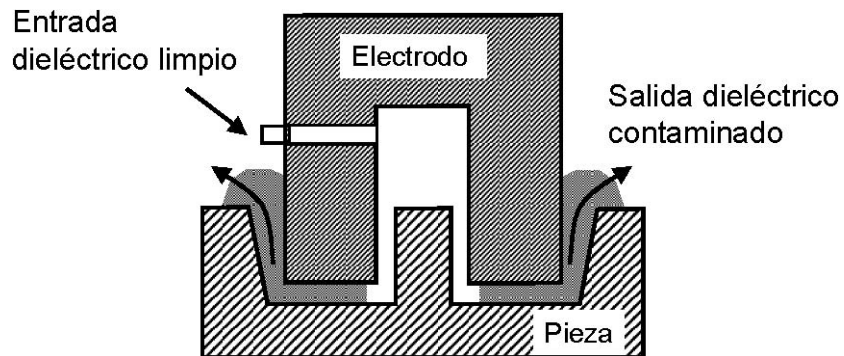


Fig. 6.6.-Conicidad en un caso de limpieza por presión a través del electrodo

Este modo de limpieza puede ser utilizado, y de hecho se utiliza, en el mecanizado de matrices para troqueles, en las cuales se busca intencionadamente una determinada conicidad. Se ha de tener en cuenta entonces que la matriz se ha de disponer para erosionar en el sentido inverso al de su montaje en el troquel, con el fin de obtener la conicidad en el buen sentido.

En el caso de limpieza por presión a través del electrodo se va formando un cilindro que es parte de la pieza que se está erosionando. Si el agujero a realizar es totalmente pasante, cuando el electrodo llega al final, dicho cilindro puede moverse tocando las paredes del electrodo y produciendo un cortocircuito permanente. Por ello se ha de parar el proceso, con el fin de arrancar el cilindro, y después terminar el proceso. El movimiento orbital puede ayudar a reducir este problema.

### 6.3.2 Limpieza por aspiración

Este procedimiento consiste en succionar dieléctrico, desde el tanque de trabajo, a través de la pieza por el vaso soporte, o bien a través del electrodo (Fig. 6.7 y 6.8).

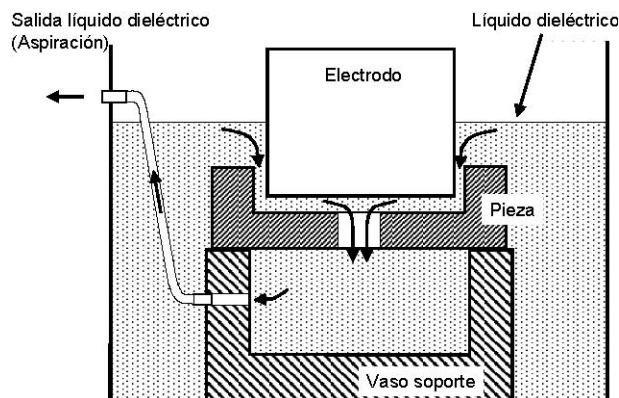


Fig. 6.7.-Limpieza por aspiración con vaso a través de la pieza



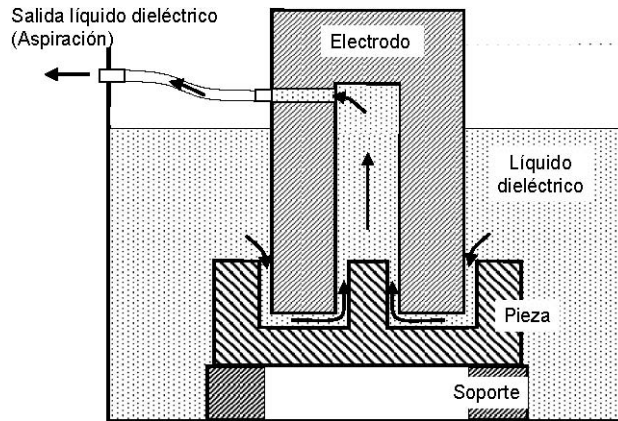


Fig. 6.8.-Limpieza por aspiración a través del electrodo

Este procedimiento de limpieza suele dar, en general, cuando la aspiración se realiza por el electrodo, mejores resultados que si se realiza por la pieza, en lo referente a capacidad de arranque.

Por otro lado la técnica de limpieza por aspiración, sea por electrodo o por la pieza, permite evitar (Fig. 6.9 y 6.10) la erosión lateral secundaria, no formándose por lo tanto la conicidad que ocurre en el método de presión. En el caso de limpieza por aspiración a través del electrodo, dicha conicidad se forma en el cilindro interior.

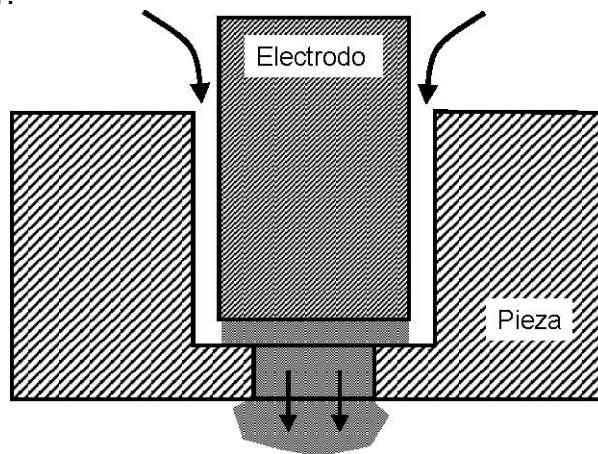


Fig. 6.9.-Conicidad con limpieza por aspiración a través de la pieza

La depresión de la aspiración no puede llegar a valores altos como en la presión. Se puede llegar solamente a unos 0,8 kg/cm<sup>2</sup>, lo cual a veces no da un

buen rendimiento.

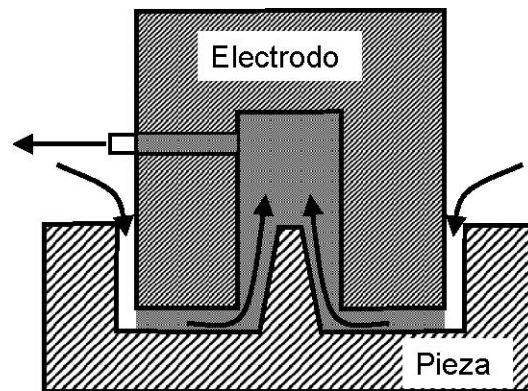


Fig. 6.10.- Conicidad con limpieza por aspiración a través del electrodo

### 6.3.3 Limpieza por lanza lateral

Algunas veces no se pueden realizar orificios ni en la pieza, ni en el electrodo por los cuales se pueda introducir el líquido dieléctrico hasta el gap con el fin de efectuar la limpieza.

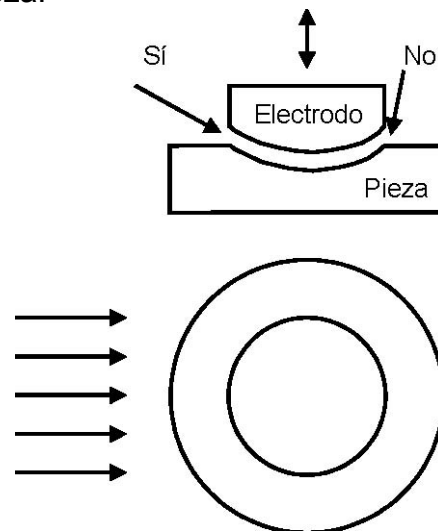


Fig. 6.11.-Limpieza con lanza lateral

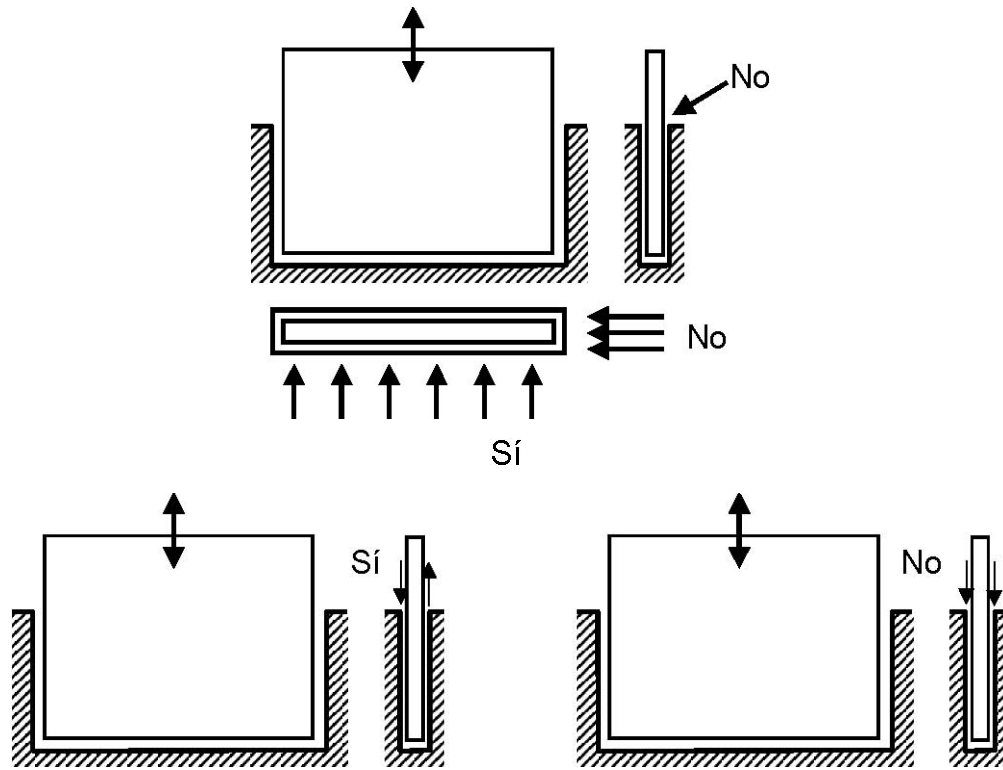


Fig. 6.12.-Limpieza de ranuras

Este es el caso de útiles de prensa para forjar, medallas, cubiertos, etc. (Fig. 6.11) y el caso de ranuras profundas y estrechas muy empleadas en la industria del plástico y juguetería (Fig. 6.12).

En la Fig. 6.12 se advierte que la lanza, que envía el dieléctrico a presión, ha de dirigirse con un ángulo determinado, tomando las precauciones siguientes:

- a) El ángulo de entrada de la lanza ha de coincidir en todo lo posible con la entrada del gap lateral. Si no ocurre así (Fig. 6.11) se forman turbulencias a la entrada del gap, y es muy poca la cantidad de dieléctrico que entra en él, no desarrollándose en este caso una limpieza eficaz. Si el dieléctrico está bien dirigido, la cantidad de dieléctrico que entra en el gap será máxima.

Incluso en el caso de matrices de prensa para forja, se han de mecanizar accesos especiales para la entrada del dieléctrico.

- b) La dirección de la lanza es muy importante en el caso de ranuras estrechas

y profundas (Fig. 6.12). Teniendo en cuenta que el líquido dieléctrico ha de mojar bien toda la superficie, si la dirección no es la buena, además de no entrar el dieléctrico en el gap, y dado el poco espesor del electrodo, éste puede llegar a doblarse, corriendo el riesgo de tener continuas vibraciones en el electrodo, e incluso gran número de cortocircuitos.

- c) En el caso de ranuras, en particular, y en todos casos, en general, el líquido debe ser introducido por la cara mayor, y lo más repartido posible por dicha cara, con el fin de mojar toda la superficie, y llegar más fácilmente hasta el fondo.
- d) En ningún caso debe introducirse el líquido dieléctrico por dos lados opuestos (Fig. 6.12), ya que entonces ambas corrientes de dieléctrico quedarían anuladas.
- e) Este método de limpieza debe utilizarse siempre combinado con el temporizador, de forma que se eleve el electrodo temporalmente, permitiendo la entrada de líquido dieléctrico limpio en el gap.

#### **6.3.4 Limpieza con temporización**

El temporizador es un dispositivo que controla el tiempo de erosión, con objeto de retirar brevemente el electrodo del lugar de trabajo, aumentar el volumen del gap, y poder retirar así más fácilmente los residuos de la erosión.

Esta es una forma de trabajar sin utilizar ni el sistema de presión ni el sistema de aspiración (o en ocasiones, combinado con cualquiera de ellos). De esta forma no hay que practicar agujeros en el electrodo o en la pieza (Fig. 6.13).

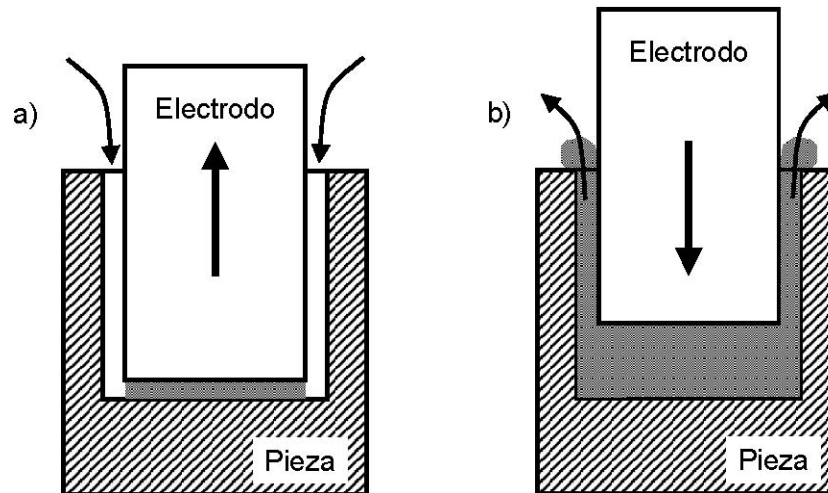


Fig. 6.13.-Limpieza por temporización.

En principio la pieza se halla introducida en el tanque de trabajo lleno de dieléctrico. Durante un tiempo determinado se ejecuta el proceso de erosión, contaminándose el dieléctrico. Al subir el electrodo el volumen del gap aumenta, creándose un vacío que se rellena con el dieléctrico limpio, el cual se mezcla con el líquido contaminado que se halla en el interior

Al bajar otra vez el electrodo disminuye el volumen del gap, obligando a salir al exterior la mayor parte del líquido, el cual arrastra las partículas contaminantes.

Esta forma de limpieza se utiliza en el mecanizado de agujeros profundos, permitiendo la erosión en dichos casos, sin circulación forzada de dieléctrico. Si durante la salida del dieléctrico por el gap, no hay tensión entre electrodos, este método no da lugar a conicidad laterales

El sistema de limpieza con temporizador permite programar tanto el tiempo de retroceso del electrodo como el de avance del electrodo y, por tanto, la duración de la erosión entre cada dos retrocesos del electrodo.

En principio la duración de ambos tiempos depende del trabajo a realizar. Pero como idea general, el tiempo de trabajo erosionado debe de ser lo más largo

posible y el de retroceso lo menor posible.

Existe un caso especial de temporización, la temporización sincronizada, que consiste en efectuar la limpieza de la zona de trabajo sólo durante el movimiento de retroceso del electrodo. Así, la erosión se efectúa sin limpieza, con lo que no existirían las limitaciones que una difícil limpieza pudiese ocasionar.

### 6.3.5 Limpieza con presión intermitente

Consiste en una alimentación no continua de fluido dieléctrico hacia el gap. Con ello se obtienen desgastes menores en zonas críticas como son las salidas y entradas del dieléctrico en orificios y en los cambios bruscos de succión.

El desgaste suele ser más fuerte en la zona del canal de limpieza, con presión continua que con presión intermitente. Este hecho se explica porque para cierto grado de impureza del líquido el desgaste es más regular y débil. Por ello lo que se hace es renovar el líquido del gap periódicamente.

La presión intermitente puede llegar a evitar un segundo electrodo de desbaste.

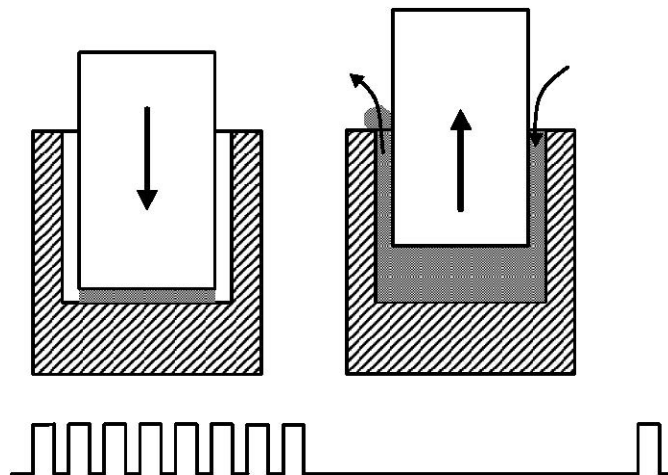


Fig. 6.14.- Limpieza con presión intermitente.

## **7 EL LIQUIDO DIELECTRICO**

### **7.1 MISIONES DEL LIQUIDO DIELECTRICO**

Si las descargas eléctricas se diesen en un gas o en aire el efecto erosivo sería muy pequeño, ya que la descarga se ramificaría, perdiéndose todo su efecto.

La misión del líquido dieléctrico, que se introduce a presión en el gap, es concentrar la descarga en un punto. Con ello se logra una capacidad de erosión muy superior a la que se daría si entre ambos electrodos hubiese un gas o aire.

Otra misión del dieléctrico, y tal vez la principal, es la actuar como dieléctrico, es decir, como aislante entre los dos electrodos. La principal característica eléctrica de un aislante es su rigidez dieléctrica. Al ir aumentándola tensión entre el electrodo y pieza, llega un momento en que el líquido se ioniza ligeramente permitiendo el paso de una pequeña corriente eléctrica. Esto a su vez hace aumentar la ionización, con lo que la resistencia eléctrica del líquido eléctrico baja bruscamente. Entonces se da descarga en forma de avalancha, que caracteriza a las descargas erosivas.

Una vez terminado el impulso, el líquido debe de desionizarse, y la siguiente descarga podrá darse en el punto en que el campo eléctrico entre electrodo y pieza sea capaz de volver a ionizarlo y de formar el canal a través del cual se dará la siguiente descarga, ocurriendo así un reparto al azar de las descargas sobre la superficie a erosionar.

Además el líquido cumple otras dos misiones importantes, que son:

El arrastre de las partículas ya erosionadas de la zona de trabajo, mediante un procedimiento de limpieza adecuado (ver Capítulo 6), para evitar problemas de estabilidad en el proceso.

Refrigerar el electrodo y la pieza, ya que debido al efecto térmico de las descargas, tienen tendencia a calentarse durante el mecanizado.

## **7.2 CARACTERISTICAS QUE DEBE DE REUNIR UN LIQUIDO DIELECTRICO PARA SER EMPLEADO EN ELECTROEROSION**

Estas características deben de ser las siguientes:

- a) Tener la suficiente rigidez dieléctrica para soportar los campos eléctricos que crean las tensiones que se aplican a ambos electrodos (oscilan entre 60 y 300 voltios), que están separados en un gap que oscila entre 10 y 2500 micras, no permitiendo el paso de la corriente si no es forma de descarga.
- b) Deben tener baja viscosidad y baja tensión superficial, o sea que moje bien, a fin de penetrar con facilidad hasta el último rincón del gap y reconstruir allí las condiciones normales de aislamiento. Además debe de poder pasar por espacios menores a 5 micras para poder efectuar el arrastre de los residuos de la erosión.
- c) Deben de ser químicamente neutros, nunca ácidos, con el fin de no atacar al electrodo y pieza, ni a las partes de la máquina con las que se ha de poner en contacto.
- d) Dada la gran superficie de contacto entre el líquido y el aire, su volatilidad debe de ser baja, para evitar pérdidas.
- e) El punto de inflamación debe de ser lo suficientemente alto para evitar el peligro de incendio, siempre y cuando se hayan observado las normales medidas de seguridad.
- f) No debe de desprender vapores nocivos con olor especialmente desagradable, ni tampoco debe de producir irritaciones en la piel, ni tener ningún otro riesgo.
- g) Debe tener las características térmicas adecuadas para poder enfriar las



superficies erosionadas y evitar posibles variaciones dimensionales que originan las altas temperaturas locales que se dan en ambos electrodos.

- h) Deben de presentar una mínima formación de lodos (residuos de cracking) en las peores condiciones de mecanizado.
- i) Deben de conservar sus propiedades en todas las condiciones de mecanizado, es decir, que sean mínimamente sensibles a las variaciones de temperatura, a los restos de la erosión y los productos de descomposición resultantes de la acción de las descargas.
- j) Su precio no debe de ser excesivo y la obtención en el mercado debe de ser fácil.

Entre las características enumeradas, hay algunas que ejercen una acción muy importante sobre el rendimiento en el mecanizado. De ellas la más importante, tal vez, es la desionización del dieléctrico. Este debe de desionizarse lo más rápidamente posible y volver a su estado inicial para que se puedan dar más descargas. Si la desionización es rápida la velocidad de arranque de material aumenta mucho, mientras el desgaste relativo se reduce considerablemente.

### **7.3 TIPOS DE DIELECTRICOS UTILIZADOS**

Los líquidos que mejor cumplen con las características antes mencionadas son los hidrocarburos, aunque existen ciertas diferencias entre los aceites y el petróleo.

#### **7.3.1 Aceites**

Los aceites que mejor se comportan en este proceso son los minerales, ya que su temperatura de inflamación es alta, oscilando entre 120 y 150° C, lo cual supone una gran seguridad contra incendios.

La viscosidad del aceite es elevada, variando entre 6 y 29 cts., lo cual, junto a la característica antes mencionada (punto de inflamación alto), los hace aconsejables para trabajos de desbaste. En este tipo de trabajos el gap es grande y por ello no suele haber problemas en la circulación del dieléctrico por el gap. Sin embargo no es válido para trabajos de acabado donde el gap es muy pequeño, y debido a su alta viscosidad, el aceite no puede circular por él.

### **7.3.2 Agua**

El agua se utiliza como dieléctrico sólo en algunas ocasiones, como micromecanizados y en general para máquinas de corte por hilo. Debe de estar totalmente desmineralizada.

## **7.4 FACTORES QUE AFECTAN AL MECANIZADO**

Además de todo lo ya citado, hay otros factores que afectan al mecanizado, como son:

- Temperatura del dieléctrico
- Grado de limpieza
- Presión de limpieza

### **7.4.1 Temperatura del dieléctrico**

En los aceites, al aumentar su temperatura, aumenta también el rendimiento del mecanizado (ver Fig. 7.1), hasta un cierto punto, a partir del cual vuelve a disminuir. Ello se atribuye a que al aumentar la temperatura baja la viscosidad del aceite (se hace más líquido), y por ello la limpieza es mejor.

A partir de ese punto vuelve a disminuir el rendimiento debido a que se crea un excesivo desprendimiento de gases, lo cual contrarresta el efecto anterior dando lugar a inestabilidades, que disminuyen el rendimiento.

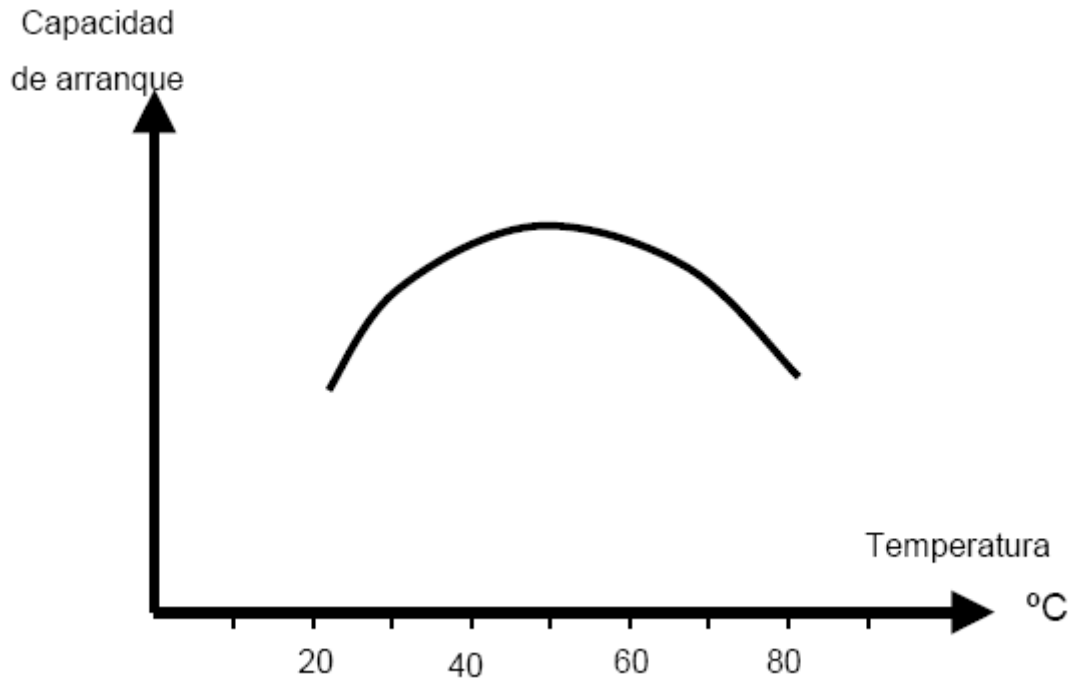


Fig. 7.1.- Influencia de la temperatura del dieléctrico en el rendimiento del mecanizado.

#### 7.4.2 Grado de limpieza

El grado de suciedad del dieléctrico influye menos en el caso de descargas con intensidades altas, pues en este caso el gap es mayor y la limpieza más fácil.

#### 7.4.3 Presión de limpieza

Como ya se ha indicado en el Capítulo 6, dedicado a la limpieza, ésta es una de las operaciones más importantes del proceso de electroerosión. Lógicamente la presión a que se inyecta el fluido influye en el rendimiento del proceso.

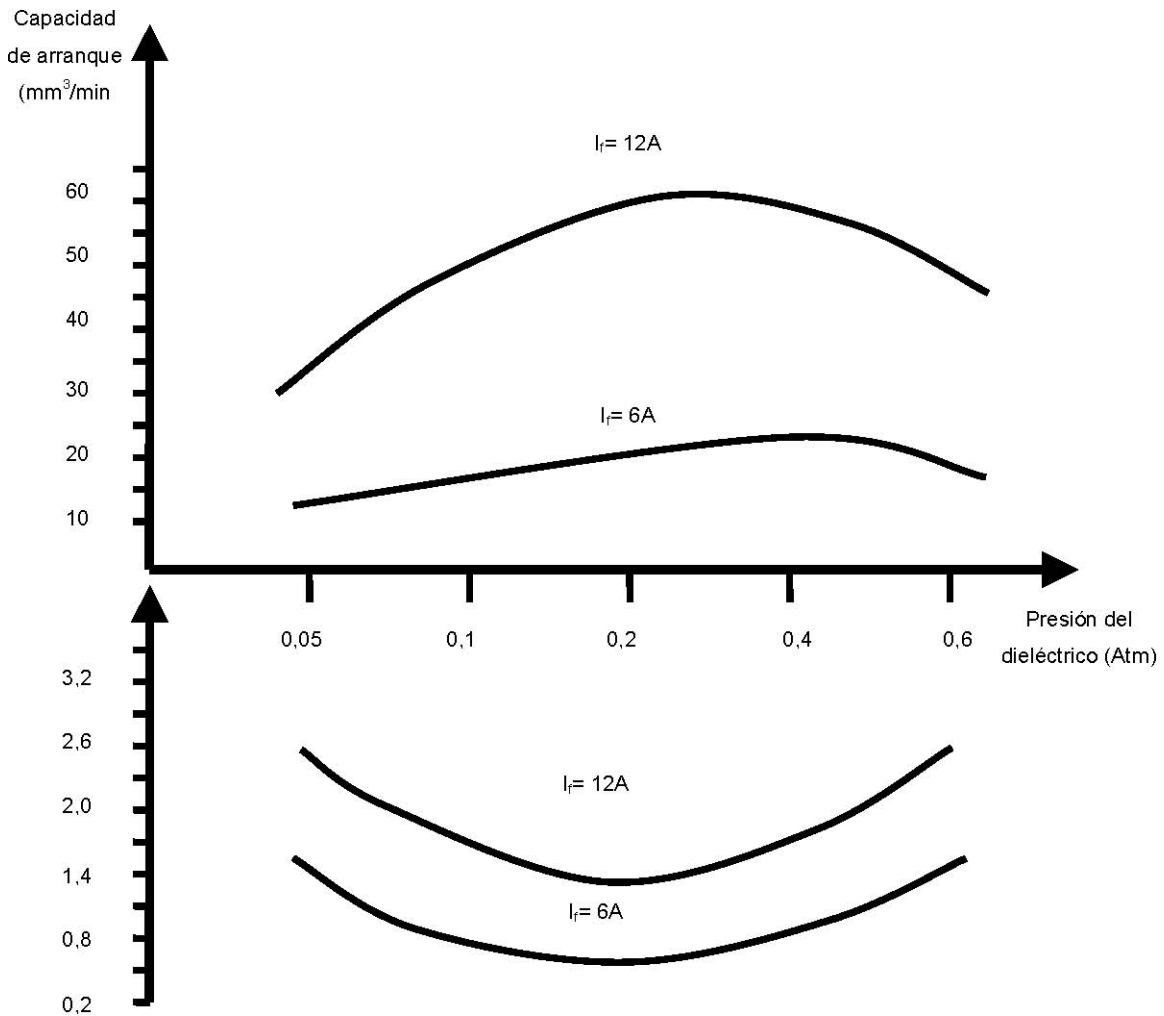


Fig. 7.2.- Influencia de la presión del dieléctrico en el rendimiento del mecanizado y el desgaste.

En la Fig. 7.2 se aprecia la influencia de la presión del fluido sobre el arranque y el desgaste relativo del electrodo.

En ella se ve cómo si la presión es excesivamente baja el arranque de material disminuye y el desgaste aumenta. Ello es debido a que se acumula con muy baja presión mucha suciedad en el dieléctrico y se dan cortocircuitos. En el caso de que la presión sea excesivamente alta también se da una pérdida de rendimiento. Es debido a que en un dieléctrico excesivamente limpio el gap disminuye y también se dan cortocircuitos.

## 8 SISTEMAS DE FILTRADO EN ELECTROEROSION

### 8.1 INTRODUCCION

Desde el comienzo de la puesta a punto de la electroerosión como sistema de mecanizado, durante el final de la década de los 40 y la primera mitad de los 50, se vio que el proceso de arranque del metal de una pieza por acción de una descarga eléctrica tan sólo era posible si ésta se producía en un medio dieléctrico líquido.

El efecto que la descarga eléctrica producía era considerablemente mayor si la descarga se realizaba en un medio que hiciese que ésta fuese en forma de avalancha, por ello era preciso que fuese un medio dieléctrico, y además el hecho de que el dieléctrico fuese líquido concentraba la descarga impidiendo que ésta se ramificase, tal y como ocurría en medios dieléctricos gaseosos.

Por todas estas experiencias llevadas a cabo antes de la aplicación industrial de la electroerosión, siempre ha sido una característica fundamental en esta tecnología la necesidad de un medio dieléctrico líquido en el que estuviesen sumergidos tanto el electrodo como la pieza a mecanizar.

Además de la función propia que como elemento dieléctrico desarrolla, el líquido dieléctrico sirve para realizar otra función muy importante y que es la de evacuar los residuos de la erosión que no son otros que el material arrancado a la pieza y el perdido por el electrodo.

Múltiples experiencias demuestran que la presencia de los residuos de erosión en suspensión en el líquido dieléctrico dan lugar a diversos efectos de índole negativa como pueden ser por ejemplo:

- Una disminución de la capacidad de arranque.

- Una mayor propensión a la generación de arcos voltaicos.
- Una mucho mayor probabilidad de generación de descargas parásitas que puedan dañar a la precisión de la pieza.

Para evitar todos estos efectos negativos se hace necesario un sistemas que permita la circulación del líquido dieléctrico por el área de trabajo para favorecer la evacuación de los residuos de la erosión, y sobre todo una unidad de filtrado que permita la separación de tales residuos del líquido dieléctrico.

Así pues la unidad de filtrado del líquido dieléctrico es una parte tan fundamental en una instalación de electroerosión, como lo puedan ser el tanque de trabajo, la mesa de coordenadas, el cabezal o el propio generador.

## **8.2 EVOLUCION DEL CONCEPTO DE PRODUCTIVIDAD**

El concepto de "productividad" en la tecnología de la electroerosión por penetración estuvo ligado en los comienzos de la aplicación industrial de la electroerosión a la evolución tecnológica de los generadores.

En efecto, en los orígenes los generadores eran del tipo denominado como "de relajación" y su característica fundamental era el gran desgaste que producía en los electrodos.

Posteriormente, fueron sustituidos por los generadores transistorizados que ya aportaban como novedad una drástica reducción de los desgastes hasta prácticamente los niveles actuales, y si bien se puede hablar de diferentes evoluciones entre los generadores transistorizados, también es verdad que los resultados obtenidos en cuanto a "productividad" se refiere no han sido muy grandes.

Por todo ello, se puede decir que en la práctica, hacia mediados de la década de los 70 se interrumpió una evolución progresiva en la mejora de los

valores "productivos" que se podrían definir básicamente por la capacidad de arranque de material y por el desgaste del electrodo.

En efecto, hasta mediados de la década de los 70 la característica fundamental para valorar una máquina de electroerosión era la capacidad de arranque medida en milímetros cúbicos por minuto o lo que es lo mismo, cuánto tiempo tardaba en realizar un trabajo concreto.

Sin embargo, la realidad era que la pérdida de tiempo en la puesta a punto de los electrodos en la máquina, teniendo en cuenta que había que trabajar con electrodos de desbaste y acabado, tenía una importancia muy superior al valor intrínseco de la "capacidad de arranque" medida en milímetros cúbicos por segundo, por lo cual la mentalidad del concepto "productividad" cambió la unidad de tiempo hacia valores mayores, tal y como la jornada o el día en lugar del segundo.

Es decir, que no se miraba tanto al tiempo requerido para la realización de una pieza sino el número de piezas que una máquina podía hacer por día, con lo que el concepto "productividad" integraba también los tiempos empleados en el intercambio de electrodos y preparación de los trabajos.

Ante esta inquietud del mercado, o quizás creando esta inquietud en el mercado surgen, a mediados de la década de los 70, los sistemas de accesorios como un elemento que permite reducir a un mínimo los tiempos de intercambio de los electrodos e incrementar de forma substancial la productividad de las máquinas.

La importancia en la reducción de tiempos muertos es tal que incluso el concepto de "productividad" vuelve a evolucionar y se comienza a hablar de "capacidad de arranque por unidad de tiempo (día) y por operario". Es decir que el elevado grado de automatización, la larga duración de los trabajos y una adecuada planificación del trabajo permiten a un sólo operario hacer trabajar y

controlar simultáneamente a más de una máquina.

Es también en la segunda mitad de la década de los 70 cuando surge con fuerza una idea antigua, pero que no había sido aceptada por el mercado, y que permitía una importante reducción de costos en la fabricación de los electrodos y una gran mejora de las condiciones de trabajo en los regímenes de acabado. Esta idea no es otra que la función orbital y que, sobre todo, en la década de los 80 abre las puertas de la electroerosión a la tecnología del control numérico.

La evolución en los últimos 10 años es clara y ampliamente conocida, y en ella, la influencia del CNC es total, haciendo variar una vez más el concepto de "productividad" dado que el trabajo totalmente autónomo de las máquinas es una circunstancia normal, gracias a la utilización de sistemas programables intercambiadores de electrodos y/o piezas.

Incluso el término "productividad" se ha visto afectado en el apartado correspondiente a la fabricación de electrodos ya que la utilización de sistemas de control numérico y de elementos intercambiadores de electrodos ha permitido el simplificar de una forma muy importante la producción de éstos.

De hecho, hasta la implantación de las funciones orbitales, los electrodos de desbaste y acabado eran iguales en su forma salvo una pequeña diferencia en sus dimensiones debida a la diferencia de GAP existente entre sus respectivos regímenes.

Con la función orbital, ya se podían empezar a fabricar los electrodos de desbaste y acabado con las mismas dimensiones e incluso, dependiendo del tipo de trabajo a desarrollar, era posible el utilizar un sólo electrodo para ambos procesos al encargarse la función orbital de compensar las medidas del electrodo durante la mecanización en régimen de acabado.

La fabricación de electrodos de formas complicadas pudo así mismo ser simplificada hasta un máximo con el uso de los generadores programables y los



cambiadores automáticos de electrodos, ya que se podían descomponer las formas de aquellos en una serie de electrodos de formas simples, y por tanto sencillas y baratas de producir, con los que posteriormente se podría obtener la forma deseada por compleja que fuese, en una labor mucho más sencilla.

También se habla cada vez más de la implementación de máquinas de electroerosión en entornos CIM (COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURING) o en sistemas flexibles de fabricación.

Pero si bien todo esto es posible bajo el punto de vista de los generadores, CNC's, intercambio de electrodos y de piezas, etc., sin embargo queda un parámetro muy importante en cuanto a que limita de una u otra forma el grado de autonomía de las máquinas y lo hace depender, de un modo más o menos directo, del operario de la máquina.

Este parámetro es el tiempo que la unidad de filtrado puede trabajar sin necesidad de ser a su vez limpiada, o cuando menos atendida en labor de mantenimiento.

Para poder cuantificar la influencia de las unidades de filtrado en el grado de autonomía de las máquinas de electroerosión habrá que analizar en detalle el modo de trabajo y el tipo de servidumbre que cada uno de los diferentes tipos de sistemas de filtrado actuales precisa.

### **8.3 TIPOS DE SISTEMAS DE FILTRADO**

Actualmente se puede hablar de la existencia de prácticamente sólo tres sistemas de filtrado que equipan el total de las máquinas de electroerosión instaladas en el mercado tanto en su modalidad de penetración como de hilo.

A estos sistemas se les puede añadir uno nuevo, del cual se hablará un poco más adelante, y que aporta unos resultados muy interesantes en cuanto a

operatoria y con una calidad de filtración exactamente igual a los otros.

### 8.3.1 Unidades de filtrado mediante cartuchos

Estas unidades filtran el líquido dieléctrico por el simple método de hacerlo pasar a través de un cartucho de papel filtrante que retiene los residuos de la erosión, obteniendo una buena calidad de filtrado.

Los cartuchos están contruidos mediante un papel especial (Fig. 8.1) dispuesto en una forma ondulada para poder concentrar en un volumen reducido el máximo de superficie filtrante, ya que la vida o duración activa de este tipo de filtros va directamente ligada a la superficie filtrante.

Por el centro del cartucho pasa un tubo perforado con el fin de recoger el líquido limpio y poder ser canalizado al punto deseado.

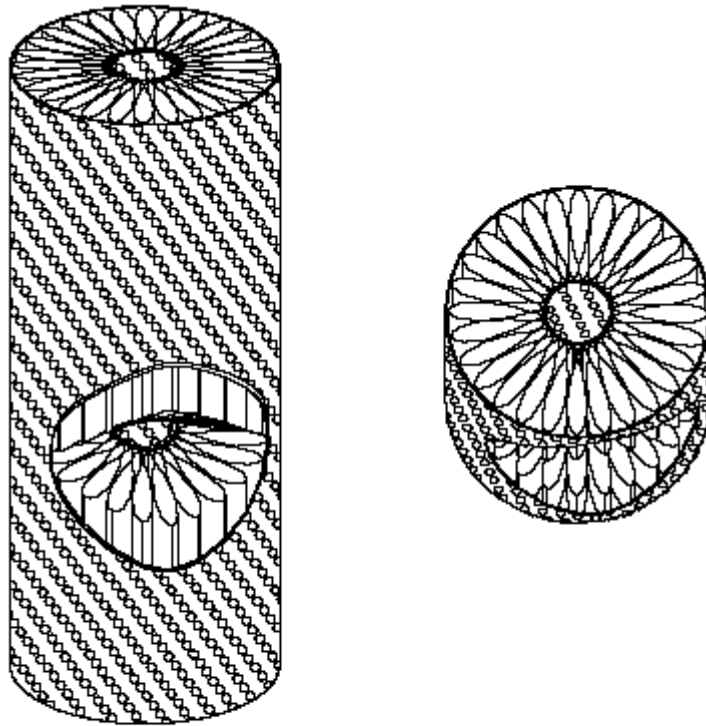


Fig. 8.1.- Filtro de cartuchos

Estos cartuchos suelen ir dispuestos en unas botellas metálicas a las cuales llega el líquido dieléctrico sucio impulsado por una bomba, forzando esta presión el paso del líquido a través del papel y su posterior salida del cartucho hacia el depósito de líquido limpio, si lo hubiera, o hacia la zona de erosión en el tanque de trabajo.

Estas unidades de filtrado están siendo utilizadas tanto para filtrar aceites en las máquinas de electroerosión por penetración como para filtrar agua en las máquinas de electroerosión por hilo, y el número de cartuchos utilizado dependerá directamente de la cantidad de residuos de erosión que la máquina genere y del tiempo que se desee que la unidad de filtrado pueda trabajar sin necesidad de reemplazar los cartuchos.

Estos cartuchos, a medida que van filtrando los residuos de la erosión, van perdiendo gradualmente la capacidad de filtración y el paso del dieléctrico por el cartucho es cada vez más difícil, haciendo que se produzca un descenso en la cantidad de líquido filtrado con el riesgo de ocasionar alguna dificultad al trabajo de erosión.

La vida normal de estos sistemas suele ser de unas 200 a 300 horas de trabajo estando esta cifra muy influenciada por el tipo de trabajo desarrollado, ya que como es evidente, la generación de residuos de erosión es mucho mayor en un régimen de desbaste que en uno de acabado.

Al final de la vida normal de los cartuchos es preciso parar la máquina para proceder a su sustitución por otros nuevos, labor ésta desagradable por la suciedad de los residuos de erosión empapados en dieléctrico, que hace que muchas veces los operarios intenten prolongar al máximo la utilización con una clara influencia negativa en el trabajo de erosión.

Una vez extraídos los cartuchos vendrá una nueva dificultad, planteada por las normativas de protección del medio ambiente, para su desecho. De todas formas esta problemática afecta a todos los sistemas de filtrado ya que siempre

existirán unos residuos de erosión empapados en el aceite dieléctrico.

Por último y para terminar con este sistema de filtrado, también hay que citar otro tipo de cartuchos en los cuales, si bien todo lo dicho hasta ahora es válido, el sistema de movimiento del líquido es diferente.

En efecto, estos cartuchos reciben el líquido dieléctrico por el tubo metálico perforado dispuesto en su interior y lo filtran hacia afuera, lo cual hace que todos los residuos permanezcan en su interior y la labor de sustitución sea algo menos desagradable.

### 8.3.2 Unidades de filtrado mediante arandelas de papel

Estas unidades se caracterizan por la existencia de una serie de elementos filtrantes que están formados por un elevado número de arandelas de papel dispuestas en un tubo metálico perforado y que se encuentran comprimidas mediante un muelle situado en el interior de dicho tubo (Fig. 8.2).

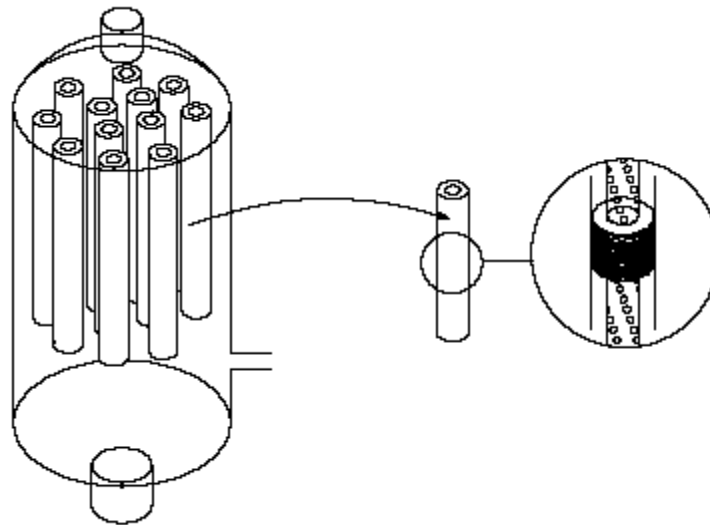


Fig. 8.2.- Construcción interna del filtro de arandelas de papel.

El número de elementos filtrantes será mayor o menor en función directa de la potencia máxima del generador.

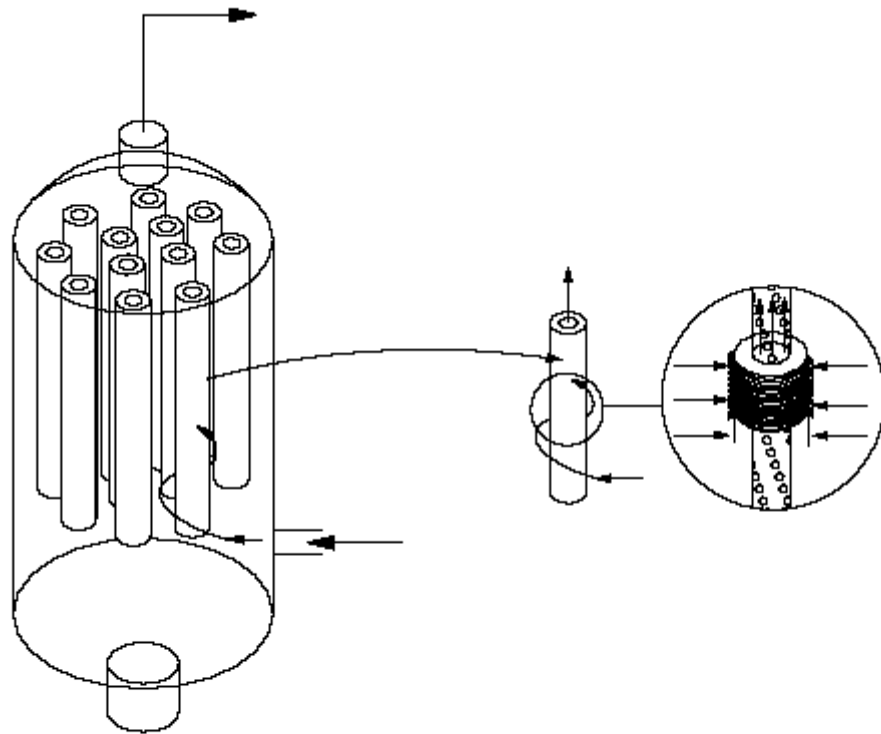


Fig. 8.3.- Principio de funcionamiento del filtro de arandelas de papel.

Durante el trabajo normal del filtro, el dieléctrico sucio llega por el exterior de los elementos filtrantes (Fig. 8.3) y la presión de la bomba le hace pasar por entre las arandelas de papel que retienen las suciedad gracias a la fuerza de unión que el muelle les proporciona, permitiendo que el líquido que llegue al tubo central esté limpio y pueda ser utilizado en el trabajo de erosión.

El tiempo que estos elementos filtrantes pueden aguantar en trabajo es reducido, pero la gran característica de este sistema de filtrado es que los elementos pueden ser limpiados de forma que se puedan restablecer las condiciones iniciales de trabajo.

Según recomendaciones del fabricante, cada 8 horas conviene limpiar los elementos filtrantes, aunque esta cifra podría variar de acuerdo con la cantidad de residuos generados y por tanto, según el tipo de régimen de generador utilizado.

De todas formas, 8 horas es una jornada laboral y nada cuesta al final de la jornada laboral el utilizar 5 minutos en efectuar la limpieza del filtro, ya que esta labor no requiere más tiempo.

La primera precaución es la de efectuar esta limpieza cada 8 horas y, al terminar la operación de limpieza, asegurarse de llenar de líquido dieléctrico la bombona que contiene los elementos filtrantes, ya que si el papel de éstos se seca, se perdería el poder filtrante del sistema y se podría hablar de la muerte del sistema.

La otra precaución es cuidar que el aire que efectuará la limpieza a contra corriente deberá estar perfectamente seco, ya que el agua es el otro factor que puede hacer inservible el sistema.

De este último dato se puede deducir que este sistema de filtrado tan sólo sirve para las máquinas de electroerosión de penetración, ya que sólo puede filtrar aceites y no agua.

Este sistema de filtrado podría ser susceptible de automatizarse de forma que la limpieza del filtro pudiera efectuarse sin la necesidad de la presencia del operador.

El desecho de los residuos en este tipo de filtro implica tan sólo a los propios residuos y no añade ningún elemento ajeno como podría ser el cartucho en el caso anterior.

### **8.3.3 Unidades de filtrado de precapa (tierra de diatomeas)**

El sistema de filtrado en este tipo de unidades es totalmente diferente a los anteriormente analizados ya que el medio filtrante, la tierra de diatomeas, se mezclará con el líquido a filtrar en una operación previa de preparación del sistema.

La unidad de filtrado está compuesta por una bombona que contiene unos elementos tubulares (Fig. 8.5) fijados en un disco y en cuya parte superior hay un pistón que golpeará al disco durante la labor de extracción de los residuos de erosión, como se verá más adelante.

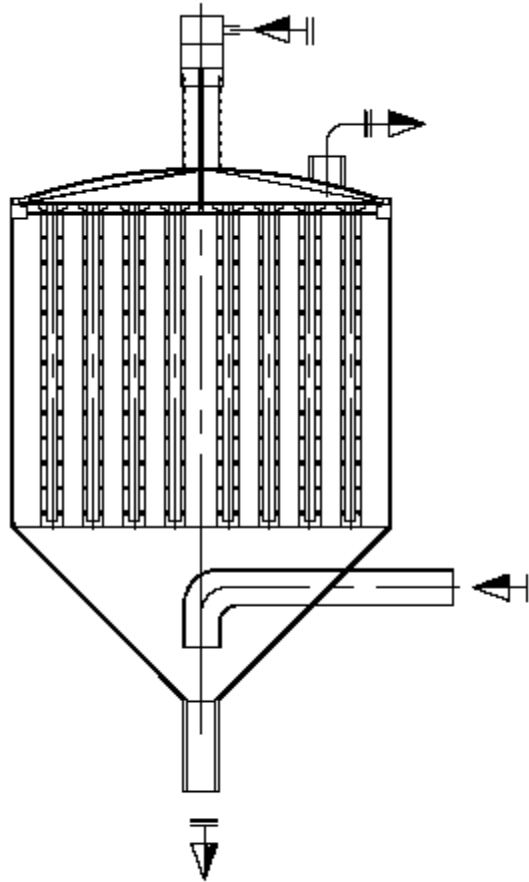


Fig. 8.5.- Sistema de filtración por tierras de diatomeas.

Cada elemento tubular consiste en un muelle (Fig. 8.6A) con una cubierta exterior de malla metálica y se caracteriza por una gran flexibilidad.

Los espacios que deja la malla metálica, si bien no son lo suficientemente pequeños como para retener las partículas que componen los residuos de erosión, sí lo son como para no dejar pasar el fino polvo que constituye la tierra de diatomeas disuelta en el líquido dieléctrico.

El principio de funcionamiento de este tipo de sistema de filtrado consiste en hacer circular el líquido dieléctrico conteniendo la tierra de diatomeas a través de los tubos del depósito de filtrado cuya malla metálica impide el paso de la tierra de diatomeas (Fig. 8.6B) formándose de este modo una capa alrededor de los elementos tubulares.

Esta capa de tierra de diatomeas tiene la característica de no permitir el paso de los residuos de erosión (Fig. 8.6C), con lo cual el conjunto se comporta como una efectiva unidad de filtrado.

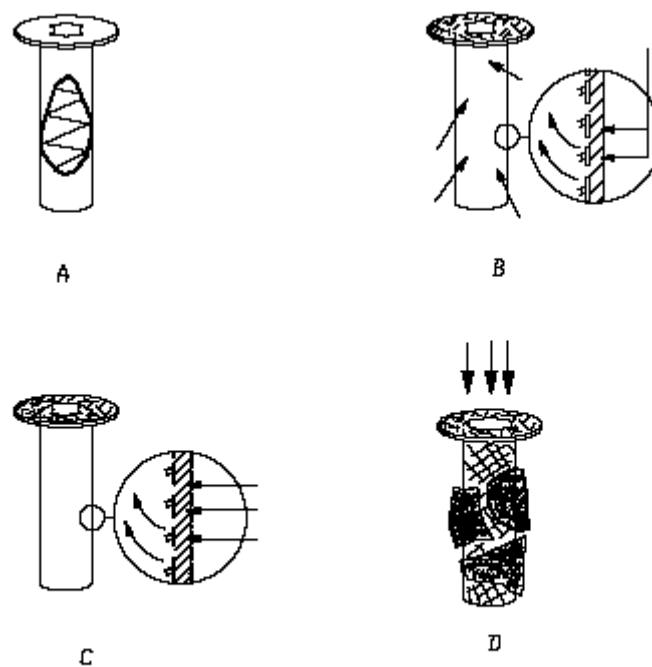


Fig. 8.6.- Funcionamiento del filtro de precapa.

La acumulación de los residuos de erosión en la capa filtrante de tierra de diatomeas hará precisa una limpieza del sistema en un tiempo determinado. Esta función se lleva a cabo mediante el pistón de la parte superior de la bombona que al golpear al disco que soporta los tubos metálicos hará que estos, gracias a su flexibilidad, hagan caer la capa de tierra de diatomeas mezclada con los residuos de erosión (Fig. 8.6D).

Para volver a iniciar el ciclo de trabajo habrá que añadir tierra de diatomeas



al líquido dieléctrico para poder volver a preparar la capa filtrante sobre los elementos tubulares metálicos.

Este tipo de filtro se caracteriza por su gran capacidad de absorción de residuos, lo que le hace ser muy utilizado en máquinas de gran capacidad de arranque o en sistemas centralizados de filtración.

La cantidad de tierra de diatomeas utilizada cada vez es reducida, no suele superar los 3 Kg. y además es de destacar el reducido costo de la tierra de diatomeas.

La evacuación de los residuos es similar al caso anterior, aunque en este caso los residuos propios de la erosión estarán mezclados con la tierra de diatomeas.

Este sistema de filtrado se utiliza tanto para aceite como para agua, y aunque las aplicaciones desarrolladas para agua difieren en la forma, el principio de funcionamiento es siempre el mismo.

De todos modos, las tendencias de respeto a la seguridad laboral y al medioambiente han impuesto la no utilización de las tierras de diatomeas, dado su carácter contaminante, lo cual ha llevado a la aparición de otros productos sustitutivos de las tierras de diatomeas.

#### **8.3.4 Unidades de filtrado mediante polvo mineral**

Este tipo de sistema, desarrollado y patentado por ONA destaca por su gran capacidad de ser automatizado, lo que le hace idóneo para las nuevas aplicaciones en trabajos totalmente automáticos.

El principio de funcionamiento es muy sencillo, y se basa en un depósito lleno con el polvo mineral al cual entra por su parte superior el líquido sucio y, tras dejar los residuos en el polvo mineral, sale por la parte inferior el líquido limpio

para su posterior utilización en la máquina de electroerosión (Fig. 8.7).

Al saturarse la capacidad filtrante, hecho detectado por un presostato, bien manualmente o bien automáticamente se lava el polvo mineral a contra corriente con líquido dieléctrico limpio de modo que por la parte superior de la bombona salgan todos los residuos acumulados hacia un depósito de decantación.

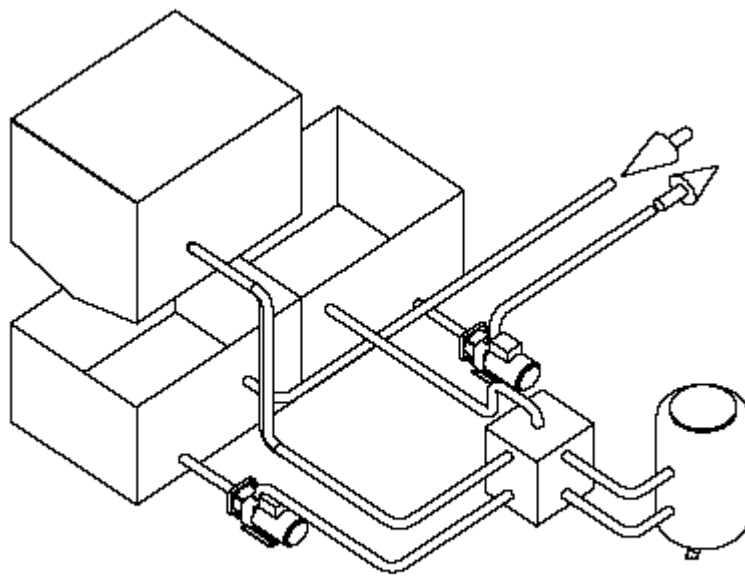


Fig. 8.7.- Filtro de polvo mineral.

Desde este depósito de decantación se podrá recuperar el líquido empleado en el lavado y tras su filtrado, volver a ser utilizado en el trabajo normal mientras que los residuos permanecen en tal depósito en espera de que sean extraídos para su desecho, labor que puede efectuarse tan sólo una vez al mes y sin que haya que parar la máquina para ello.

Tres circunstancias caracterizan a este tipo de filtro, y son:

- a) La primera es que al lavar a contra corriente el polvo mineral que contiene

los residuos, tan sólo se extraen los residuos y no el polvo, con lo que al no perderse el elemento filtrante la vida de este filtro no tiene fin.

- b) La segunda característica, y tan importante como la anterior, es que la operación de lavado a contra corriente dura tan sólo unos 5 minutos, y que tal operación puede efectuarse durante el normal trabajo de la máquina.

De este modo, el tiempo transcurrido entre lavado y lavado no tiene ninguna importancia y, lo que es aún más importante, el operador de la máquina no tiene por qué saber cuándo se efectúa el lavado, y su labor de mantenimiento en el filtro se reduce a vaciar del depósito de decantación los residuos acumulados tras algunas semanas de trabajo.

- a) La tercera característica es que el elemento filtrante es válido tanto para algunos aceites utilizados en las máquinas de electroerosión por penetración como para el agua utilizada en las máquinas de electroerosión por hilo.

La problemática de evacuación y desecho de los residuos de erosión es la misma que en el caso del sistema de filtrado mediante discos de papel.

#### **8.4 CONCLUSIONES**

Como se ha visto, si prosigue la tendencia actual de automatización máxima e integración en sistemas CIM, es de esperar algún tipo de evolución en los sistemas de filtrado de forma que las labores propias de mantenimiento no puedan afectar al normal trabajo de las máquinas.

Además el factor ecológico y toda la servidumbre que el desecho de los productos inutilizables que generan las unidades de filtrado serán argumentos decisivos para la utilización de unos u otros sistemas por los diferentes fabricantes de máquinas de electroerosión.

## 9 CARACTERISTICAS DE LAS SUPERFICIES MECANIZADAS POR ELECTROEROSION

Como ya se ha explicado, en electroerosión cada impulso produce una descarga eléctrica en una zona ionizada del gap, creándose un arco eléctrico entre ambos electrodos. Las variables que influyen en cada descarga son dos principalmente: Intensidad y tiempo de impulso, los cuales definen la energía de cada descarga.

Esta energía se reparte de forma no determinada entre los electrodos, transformándose en calor, llegándose, en la zona de la descarga en ambos electrodos, a temperaturas altísimas (se sabe que se pueden sobrepasar los 10.000 °C), mayores que las temperaturas de fusión de ambos materiales.

Debido a la corta duración de las descargas (de 2 a 2.000  $\mu$ s), su acción térmica es muy localizada, lo cual hace que el calor no se transfiera, por conducción, hacia las capas más internas de metal.

Debido a la naturaleza del proceso, las características de las superficies mecanizadas por electroerosión son diferentes a las obtenidas en los mecanizados convencionales, principalmente en dos aspectos:

- El primero se refiere a la rugosidad obtenida, que como ya se ha dicho no es unidireccional como en los procesos convencionales (torneado, fresado, etc. ) sino multidireccional.
- En segundo lugar, las altas temperaturas que se dan hacen que en las capas superficiales de las piezas aparezcan transformaciones metalúrgicas, tensiones internas y en algún caso, incluso, microfisuras superficiales. En realidad al mecanizar los materiales por medio de los sistemas convencionales también aparecen daños en las superficies mecanizadas.

En todo caso, al mecanizar por electroerosión, los cambios estructurales que aparecen dependen de la pareja de materiales electrodo/pieza que se estén utilizando, pudiéndose llegar el caso, en función de diversos factores, en que no se presenten tales cambios estructurales.

Estos cambios de estructura han sido objeto de muchos estudios, y en algunas aplicaciones como la aeronáutica, deben tomarse precauciones a fin de reducir sus consecuencias.

Por el contrario, se ha comprobado que algunos útiles mecanizados y acabados por electroerosión, tienen una vida más larga que los mecanizados por otros procedimientos.

## 9.1 ANALISIS METALOGRAFICO

La Fig. 9.1 muestra la sección de una superficie normal mecanizada por EDM, en la que se pueden apreciar las modificaciones estructurales más habituales que se presentan como consecuencia del proceso.

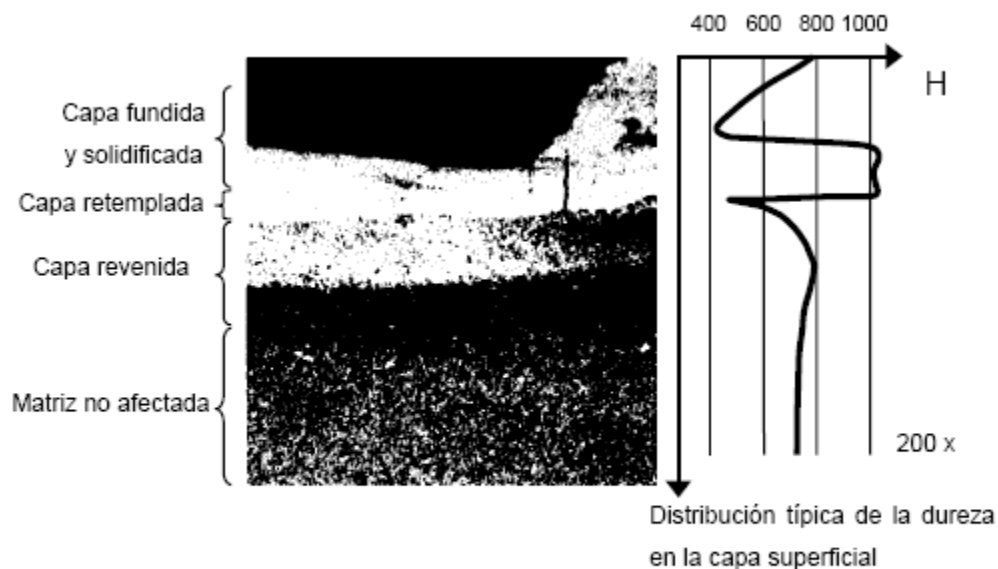


Fig. 9.1.- Sección de una superficie mecanizada por EDM

Se denomina "zona térmicamente afectada" a la zona de la pieza que se encuentra entre su superficie exterior y la matriz (material base). En esta zona afectada pueden distinguirse las siguientes capas:

a) Capa fundida y solidificada

La capa fundida y solidificada (martensita no templada) producida durante el proceso EDM se conoce también como "capa blanca" puesto que, en general, durante la preparación metalográfica no sufre el ataque químico. Es una capa solidificada rápidamente, en donde se han formado cristales largos en forma de columna, directamente de la superficie de metal durante la solidificación.

Una fractura producida en estas capa sigue invariablemente la dirección de los cristales. En un primer corte llevado a cabo en condiciones normales, el espesor de esta capa puede variar aproximadamente entre 15 y 50  $\mu\text{m}$  dependiendo de diferentes factores, entre los cuales se encuentra el material de pieza.

b) Capa retemplada

En la capa retemplada, la temperatura ha aumentado por encima del nivel de austenización (temple) y ha formado martensita. Esta martensita es dura y frágil.

c) Capa revenida

En la capa revenida el acero no ha sido calentado en un grado tal como para alcanzar la temperatura de temple y lo único que se ha producido es un nuevo efecto de revenido. El efecto disminuye naturalmente hacia el núcleo del material, tal y como muestra la curva de dureza de la Fig. 9.1.

La capa delgada de austenita no aparece más que en los procesos de desbaste con altos valores de intensidad, por encima de los 30 A, o en procesos

de desbaste de menor intensidad, como puedan ser a 18 A, pero con tiempos de impulso por encima de los 200  $\mu\text{s}$ .

El espesor de las diferentes capas varía en función de la energía del impulso, es decir, del producto de la intensidad del impulso por el tiempo de duración de éste. Por ejemplo, para una pareja de materiales como el cobre (+) y el acero F521 (-) aparecen los siguientes valores, medidos en  $\mu\text{m}$ , en la capa blanca:

TIEMPO DE IMPULSO	Nivel de intensidad		
	3 A	18 A	40A
20 $\mu\text{s}$	1,5	5	12
100 $\mu\text{s}$	7	20	45
200 $\mu\text{s}$	10	25	50

La Fig. 9.2 muestra el espesor de las diversas capas en función del tiempo de impulso para el caso de 18 A. de intensidad en una pareja de materiales cobre-acero.

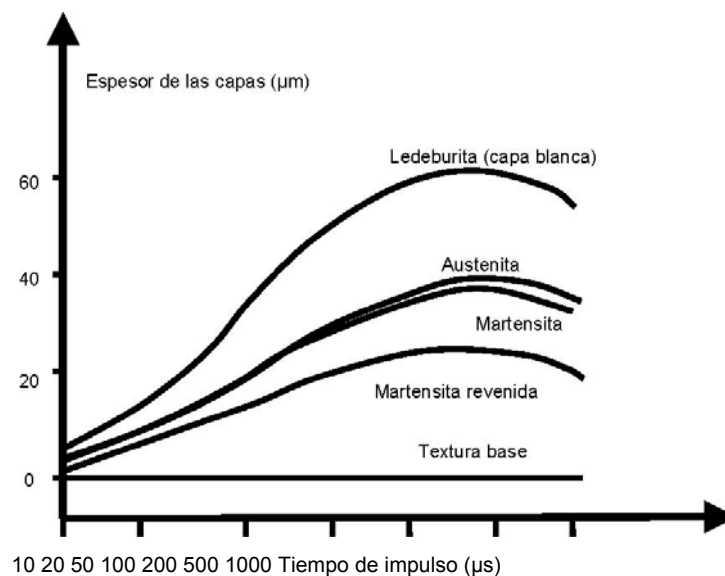


Fig. 9.2.- Espesor de las capas en función del tiempo de impulso

## 9.2 ANALISIS DE DUREZAS

La Fig. 9.3 muestra un estudio de las durezas de las diferentes capas que corroboran lo dicho anteriormente. Se trata del mismo caso expuesto en la Fig. 9.1.

También se debe observar que en caso de que no aparezca la austenita, la curva iría por la línea de puntos.

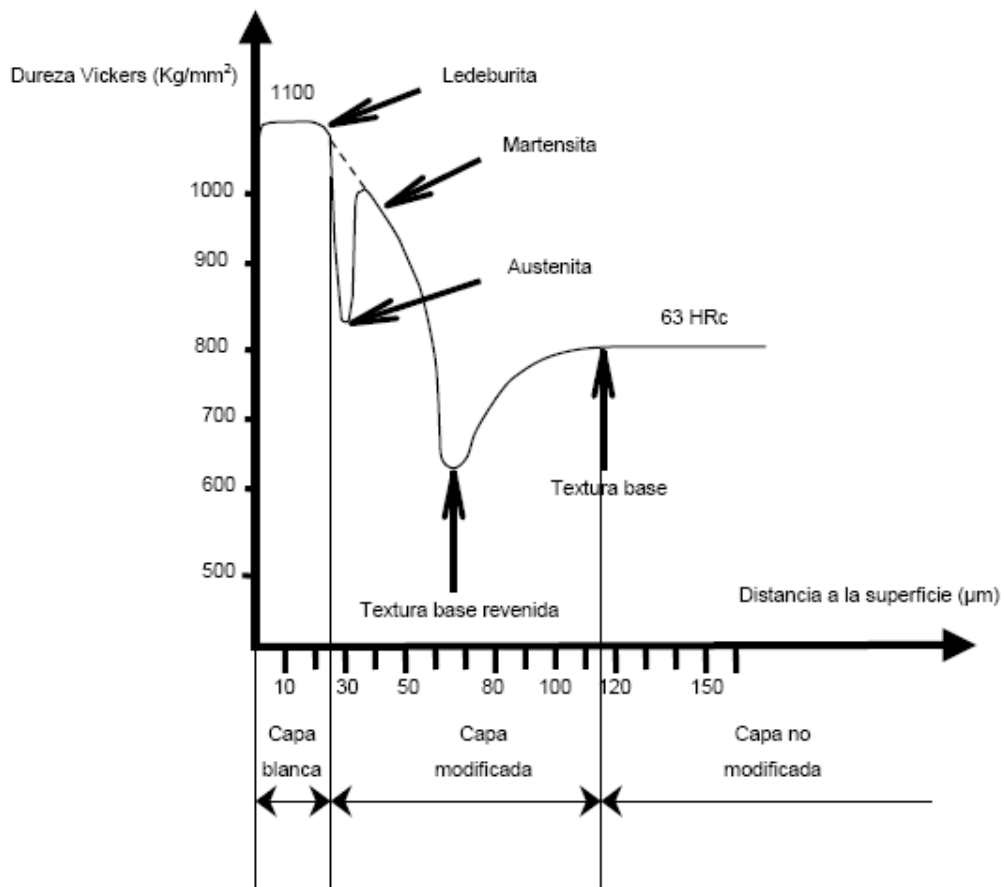


Fig. 9.3.- Variación de la dureza en las capas superficiales

## 9.3 FISURAS

En los procesos fuertes de desbaste, más de 40 A, y en los de



semiacabado, 18 A, con tiempos altos de impulso, superiores a 10  $\mu$ s, aparecen fisuras que van hacia el interior de la pieza y que tienen una profundidad de alrededor del doble de la suma de las capas modificadas.

Para paliar esta dificultad es suficiente con la diferencia que marcan las tablas tecnológicas entre las operaciones de desbaste y acabado.

Si el acero está sin templar, no aparecen grietas en ningún caso. En este caso, además, la capa blanca es más uniforme y no aparecen el resto de las capas.

#### **9.4 ELIMINACION DE LAS CAPAS SUPERFICIALES**

En los pocos casos en que sea preciso eliminar principalmente la capa blanca y todas las modificaciones metalúrgicas superficiales basta con:

- Dejar entre desbaste y acabado una franja suficiente para eliminar totalmente la capa dejada por el régimen de desbaste.
- Pulir la pieza después de la operación de acabado.

### **10 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 principalmente según los resultados que se quieran obtener.

Hay diversos materiales que dan buenos resultados como se verá más adelante. Y se ha de tener en cuenta que en el coste 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 cuidado tanto los materiales como el método de fabricación de los electrodos.

## **10.1 PROPIEDADES QUE DEBEN DE TENER LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA FABRICACION DE ELECTRODOS**

El problema principal de los electrodos es su desgaste. Como ya se ha dicho la erosión se da en ambos polos (electrodo y pieza) pero existe una gran diferencia entre lo que se desgasta uno y otro polo. Por ello se define la erosión en el electrodo como desgaste y se mide porcentualmente con respecto a la erosión de la pieza. Es aconsejable siempre que este desgaste sea mínimo. Y para ello el material debe de tener las siguientes propiedades físicas:

- Alto punto de fusión.

El material del electrodo se desgastará menos cuanto más alto sea su punto de fusión. Dado que este proceso es de tipo térmico, se alcanza en cada impulso, en puntos muy locales, altas temperaturas, que funden pequeñas partículas de ambos electrodos y que luego son arrastrados por el líquido dieléctrico. Es lógico pensar que cuanto más alto sea el punto de fusión del material del electrodo, menos cantidad de él se fundirá y por tanto se desgastará menos.

- Buena conductividad térmica

Los materiales de los electrodos han de ser buenos conductores del calor, o lo que es lo mismo de la electricidad. Deben de tener buena conductividad térmica o baja resistividad eléctrica.

Como el calor se da muy locamente y en tiempos muy cortos, una buena conductividad hará que el calor, que la descarga ha concentrado en un punto, se difunda rápidamente por el resto del electrodo. De esta forma no se eleva tanto la temperatura y por tanto se fundirá menos cantidad de electrodo.

Las dos propiedades citadas definen la aptitud de un material para ser

empleado como electrodo en este proceso

Otro aspecto a tener en cuenta son las propiedades mecánicas de estos materiales, que a continuación se citan:

- a) Deben de ser fácilmente mecanizables, ya que muy a menudo son contruidos por métodos convencionales (torneado, fresado, etc.). Esta propiedad se tendrá muy en cuenta cuando se vaya a elegir el material del electrodo.
- b) Deben de tener su coeficiente de dilatación lo más pequeño posible. Dado que los electrodos se calientan durante el proceso, si el material tuviera un alto coeficiente de dilatación, aumentarían las medidas del electrodo, con lo cual aumentarían automáticamente las dimensiones de la pieza.
- c) Los materiales para electrodos deben de tener bajo peso específico, ya que a veces el volumen del electrodo a emplear es grande.
- d) Deben de tener estos materiales buena estabilidad dimensional. Algunos materiales, debido a los tratamientos y procesos físicos que sufren hasta su salida al mercado en formas diversas, quedan afectados de tensiones internas. Estas tensiones se liberan normalmente al calentar dichos materiales, y ello trae consigo normalmente cambios en sus dimensiones, que en el proceso de electroerosión son perjudiciales, ya que el cambio de forma en el electrodo trae consigo automáticamente el mismo cambio en la pieza.

La elección final del material del electrodo se realizará teniendo en cuenta las propiedades físicas y mecánicas. Relacionadas con estas propiedades se encuentran otros factores como la forma a realizar, el número de electrodos a mecanizar, dimensiones del electrodo, etc., intervendrán en la elección. Será importante también el precio y la facilidad de adquisición en el mercado.

## 10.2 CLASIFICACION DE LOS MATERIALES

Dichos materiales se pueden dividir en dos grupos principales:

- Materiales metálicos
- Materiales no metálicos

Entre los primeros se encuentran los siguientes:

- Cobre electrolítico.
- Cobre al plomo.
- Cuprotungstenos.
- Aluminio y aleaciones.
- Latón.
- Acero.
- Cuprografitos.

En el segundo grupo se puede considerar al grafito y todas sus variedades.

## 10.3 COBRE ELECTROLITICO

Es tal vez el material más empleado en electroerosión para fabricar electrodos. Su pureza debe ser del 99,9 por 100. Sus propiedades físicas son:

- Temperatura de fusión: 1.083 °C (baja).
- Resistividad eléctrica:  $0,017 \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$  (muy buena).

En cuanto a sus propiedades mecánicas se puede decir que :

- No es fácilmente mecanizable.
- Tiene un coeficiente de dilatación lineal ( $16 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ ) que puede ser considerado alto con respecto al del grafito, pero suficiente para el empleo en electroerosión.
- Tiene alto peso específico ( $8,95 \text{ Kg/dm}^3$ ), por lo que no sirve para electrodos voluminosos.

### **10.3.1 Métodos de fabricación de electrodos de cobre**

El cobre electrolítico se emplea como material de fabricación de electrodos, además de las propiedades citadas, porque se presta a muchas alternativas de fabricación. Dichos electrodos se pueden fabricar por deformación en frío y caliente, por extrusión, por fundición, por procedimientos químicos como lo es la galvanoplastia, por medio de procedimientos (con arranque de viruta) y por ataque con ácido.

En el caso de deformación por prensa, se pueden dar los casos de deformación en frío o caliente, pero se ha de disponer de moldes apropiados para realizar las operaciones.

La mayor pega de estos casos suele estar en las tensiones interiores que quedan en el electrodo debido al proceso de deformación. Por ello se ha de recocer el electrodo. Por este procedimiento se obtienen electrodos con tolerancias bastante estrechas.

Por procedimientos de extrusión se obtienen electrodos de perfil constante y de formas muy diversas.

En muchos casos se puede fabricar el electrodo por medio de máquinas-herramienta convencionales. En torneado, planeado y fresado es importante la lubricación a base de taladrina o aceite. El rectificado es difícil, pero se consigue con abrasivo de Carborundum y alta velocidad de la muela abrasiva.

#### **10.3.1.1 Reducción de los electrodos de cobre de ácido**

Es un procedimiento económico de obtención de electrodos de desbaste a partir de los electrodos de acabado. El método consiste en introducir en una solución de ácido nítrico diluido y a cierta temperatura, la parte del electrodo que se quiera reducir de dimensiones.

Cuanto más concentrada es la solución, más rápidamente se produce el ataque, sobre todo en aristas y ángulos vivos en los cuales el ataque se acentúa más. No obstante este inconveniente no tiene importancia en los electrodos de desbaste. Si hubiese que tratar con ácido los electrodos de afinado debe de hacerse con soluciones muy diluidas.

El ácido nítrico utilizado normalmente suele ser del 65% de concentración y se mezcla con agua con proporciones aproximadamente iguales. La velocidad de ataque de esta solución a unos 40 °C de temperatura, da una reducción diametral de aproximadamente 5 centésimas en un minuto.

### **10.3.2 Comportamiento del cobre en Electroerosión**

De las tablas y gráficos de tecnología se pueden extraer las conclusiones siguientes:

En condiciones de trabajo normales se llega a desgastes volumétricos inferiores al 0,5%, en operaciones con intensidades menores a 80 A.

Para intensidades de unos 18 A, se llegan a conseguir también desgastes inferiores al 0,5%, pero a costa de una disminución de la capacidad de arranque.

En intensidades de acabado, los desgastes son mayores, situándose entre el 1 y el 5%.

En cuanto a los procesos de desbaste los arranques no son tan altos como en el caso del grafito, pero sin embargo las rugosidades son mucho más bajas en los procesos de acabado. Por ello a veces este material se quedará prácticamente como único elegible en el caso que se necesite una rugosidad baja de acabado.

Además este material no es caro y se adquiere en el mercado bajo muchas formas diferentes.

El ácido nítrico es muy peligroso y por ello se han de tener las precauciones

siguientes:

- a) En la preparación de la solución no se debe de verter nunca el ácido sobre el agua, sino al revés.
- b) Se debe de evitar de respirar los vapores emanados de la reacción.
- c) Si el ácido o vapor de nítrico mancha la piel de una persona, se ha de lavar la piel con agua muy abundante durante al menos 20 minutos.
- d) Se deben de llevar gafas protectoras y guantes.

Con respecto a las máquinas se han de tomar los cuidados siguientes:

- a) Realizar la reducción lejos de la máquina para que los vapores de ácido no le dañen.
- b) Como se ha de medir continuamente, se ha de tomar la precaución de lavar con cuidado el electrodo con el fin de no estropear los instrumentos de medida.

#### **10.4 COBRE AL PLOMO**

La aleación de cobre con una pequeña cantidad de plomo, cromo o telurio (1-2%), tiene como finalidad mejorar mucho la maquinabilidad del cobre. No obstante baja el rendimiento, subiendo el desgaste y bajando el arranque. Se puede reducir por ácido.

#### **10.5 CUPROTUGSTENO**

Es un material muy interesante para la realización de piezas de gran

precisión, empleándose en la erosión de microorificios en la industria de aviación, y en general en aquellos casos en que se han de hacer orificios profundos.

Existen tres calidades más utilizadas:

- El tungsteno–cobre con 75-25 por 100 respectivamente.
- El cobre-tungsteno, con gran proporción de cobre.
- El tungsteno-plata, con pequeña proporción de plata.

Las ventajas más destacables son:

- a. Rendimiento (alta relación arranque/desgaste), (ver tablas).
- b. Estabilidad dimensional.
- c. Solidez.
- d. Muy bajo desgaste (ver tablas).
- e. Posibilidad de fabricación de electrodos por procedimientos galvánicos.
- f. Es apto para erosionar piezas con acabados muy finos (ver tablas)

Sus inconvenientes son:

- a) Precio muy elevado
- b) Peso específico elevado (15-20 Kg/dm<sup>3</sup>).
- c) Dimensiones muy reducidas de material en el mercado.
- d) No pueden ser fabricados por estampación.

## **10.6 ALEACIONES DE ALUMINIO**

Se utilizan solamente en casos de electrodos muy grandes que se han de fabricar por fundición. Da como resultado superficies muy rugosas, grandes desgastes y pequeños arranques.



## 10.7 LATON

No se utiliza apenas. Tiene muy buena maquinabilidad, pero da muy bajos rendimientos; altos desgastes y bajos arranques de material.

## 10.8 ACERO

Se utiliza solamente en casos límite. Observando las tablas de Tecnología y comparando con el caso de cobre se llega a las conclusiones siguientes:

- Bajo rendimiento (relación arranque / desgaste).
- Altos desgastes.
- Rugosidades muy altas

Además tiene un alto peso específico (7,8 Kg/dm<sup>3</sup>) y muy poca estabilidad dimensional.

## 10.9 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  $\Omega$  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  $3-4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ . 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.

### **10.9.1 Comportamiento del grafito ante el mecanizado**

Se ha tener mucha precaución, dado el carácter frágil del grafito, con la presión de sujeción en las máquinas. Se ha de procurar que dicha presión se reparta lo más posible por la superficie que se sujeta. Las recomendaciones dicen que el empleo del plato universal con tres mordazas tan sólo es aceptable para piezas que tengan un espesor de pared superior al décimo del diámetro y un grosor mínimo de 10 mm.

El grafito se puede mecanizar con tolerancias muy estrechas con herramientas de acero rápido. Por lo general es mecanizado en seco, aunque puede ser beneficioso el lubricado con el mismo líquido que se vaya a utilizar en el proceso de electroerosión.

La viruta de grafito es polvo, por lo que es necesario utilizar dispositivos de aspiración, a fin de asegurar un máximo de limpieza. Este polvo es muy erosivo

por lo que se ha de limpiar bien las guías de las máquinas en los días que se trabaje, ya que si no puede llegar a desgastarlas con el tiempo. Además con el aceite de las guías en polvo de grafito llega a formar una pasta que se va endureciendo, lo cual hace perder precisión en el trabajo.

Sin embargo una gran ventaja es la de poder fabricar grandes y complicados electrodos para moldes con fresado copiado, con fresas de acero rápido. En este caso las velocidades de corte suelen ser más bajas, con el fin de que el desgaste de las fresas sea mínimo y por tanto la reproducción más perfecta. En este caso la velocidad de corte suele ser de 10 a 15 m/min para herramienta de acero rápido. Y además es preferible trabajarlo en húmedo con el mismo líquido dieléctrico que se vaya a utilizar en el proceso de electroerosión.

#### **10.9.2 Comportamiento del grafito ante la electroerosión. Calidades**

Ya se ha indicado que según sea el tipo o calidad del grafito, será su comportamiento en el proceso. Y su calidad depende del tamaño de grano y de compacidad, lo cual a su vez depende del proceso de fabricación.

Normalmente la densidad del grafito se va incrementando a medida que disminuye el tamaño de las partículas que lo componen. El tamaño de las partículas oscila entre 10 y 40  $\mu\text{m}$ .

El grafito denso y el grano fino es el que menos desgaste tiene y por tanto el que mayor reproduce las formas. Cuanto menor es la densidad del grafito mayor es su capacidad corrosiva. Y cuanto más fino sea el grano el acabado superficial es mejor.

En general, las casas comerciales ofrecen gamas de tipos de grafito lo suficientemente extensas como para poder realizar una buena elección de la calidad necesaria. Pero no cabe duda de que esta cualidad se puede convertir en un inconveniente, en el caso de que no se pueda disponer de datos referentes a las diversas calidades.

Cara a la electroerosión además presenta las siguientes cualidades:

- a) No se puede utilizar con generadores de Relajación sino solamente con generadores de impulsos.
- b) La polaridad del grafito normalmente es positiva si el desgaste ha de ser pequeño. En casos en que éste pueda ser grande como pueda ser el caso de agujeros pasantes, y no importe el gasto de grafito la polaridad puede ser negativa, con gran velocidad de arranque, pero también con gran desgaste.
- c) Con grafito el riesgo de descargas anormales, principalmente cortocircuitos es mayor que con electrodos metálicos; por lo que se ha de cuidar más la limpieza.
- d) La rugosidad mínima que se puede alcanzar con el grafito es del orden de Nr: 27-30, es decir que este material da piezas más rugosas que el cobre. Por ello no sirve como material de electrodo si se quiere obtener superficies muy finas.
- e) Por último se puede decir que su precio no es muy alto, aunque es más caro que el cobre. Además es fácil de adquirir en el mercado, bajo diversas formas.

### **10.9.3 Cuprografitos**

Una impregnación con polvo de cobre que se introduce en los poros del grafito suele ser ventajosa, ya que se mejora la resistividad eléctrica y se obtienen electrodos menos frágiles que el grafito. Por lo demás, se mantienen aproximadamente las características del grafito en el proceso.