



GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

2014 / 2015

*CARACTERIZACIÓN DEL DESGASTE DE ELECTRODOS DE
GRAFITO EN ELECTREROSIÓN POR PENETRACIÓN*

DOCUMENTO 3: MEMORIA

DATOS DE LA ALUMNA O DEL ALUMNO

NOMBRE: IGNACIO

APELLIDOS: MARGÜELLO JUARISTI

FDO.:

FECHA:10/09/2015

DATOS DEL DIRECTOR O DE LA DIRECTORA

NOMBRE: BORJA

APELLIDOS: IZQUIERDO ARAMBURU

DEPARTAMENTO: INGENIERÍA MECÁNICA

FDO.:

FECHA:10/09/2015

3.1 INDICE

3.2. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	4
3.2.1. TÉRMINOS BÁSICOS ELECTROEROSIÓN.....	4
3.2.1.1. TERMINOLOGÍA GENERAL.....	4
3.2.1.2. TERMINOLOGÍA ELÉCTRICA.....	7
3.2.2. TERMINOLOGÍA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS	8
3.2.3 TERMINOLOGÍA PERFILÓMETRO CONFOCAL.....	9
3.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	10
3.3.1 INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL ESTUDIO	10
3.3.2 OBJETIVOS QUE SE PERSIGUEN	12
3.4. ANTECEDENTES	13
3.4.1 INTRODUCCIÓN.....	13
3.4.2 INTRODUCCIÓN A LA ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN. 13	
3.4.3 DESGASTE DE ELECTRODOS EN ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN	15
3.4.2 ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE	16
3.5 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS	28
3.5.1 INTRODUCCIÓN.....	28
3.5.2 ALTERNATIVAS PARA LAS EROSIONES CON ELECTRODOS CON FORMA DE CUÑA A 60°	29
3.5.2.1 ALTERNATIVAS PARA LA MEDICIÓN DE ELECTRODOS	29
3.5.2.2 ALTERNATIVAS PARA LA MEDICIÓN DE LAS CAVIDADES ..	33
3.5.4 ALTERNATIVAS PARA LAS EROSIONES CON ELECTRODOS PARA BLISK.....	37
3.6 SOLUCIÓN ADOPTADA.....	40
3.6.1 MARCO TEÓRICO	40
3.6.1.1 INTRODUCCIÓN.....	40
3.6.1.2 ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN Y ELECTROEROSIÓN POR HILO	41
3.6.1.3 MATERIALES DE PIEZA MÁS HABITUALES	47
3.6.1.4 LIMITACIONES DEL PROCESO	49
3.6.1.5 ANÁLISIS DEL MECANISMO DE ARRANQUE	50
3.6.1.5.1 EXPLIACIÓN FÍSICA DEL PROCESO: FASES DE DESCARGA.....	50

3.6.1.5.2 PARÁMETROS DE EROSIÓN.....	55
3.6.1.5.2 INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE EROSIÓN SOBRE LA EFICIENCIA DEL PROCESO.....	60
3.6.1.5.3 IMPULSOS ISOENERGÉTICOS.....	64
3.6.1.5.4 SISTEMA DE CONTROL DE AVANCE DE ELECTRODO...	65
3.6.1.5.5 TECNOLOGÍAS DE EROSIÓN.....	66
3.6.1.6 TECNOLOGÍA DE EROSIÓN POR PENETRACIÓN	66
3.6.1.6.1 ASPECTOS FUNDAMENTALES	66
3.6.1.7 MATERIALES PARA ELECTRODOS	69
3.6.1.7.1 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE MATERIAL DE ELECTRODO	69
3.6.1.7.2 COBRE.....	72
3.6.1.7.3 CUPROTUNGSTENO.....	73
3.6.1.7.4 PLATA-TUNGSTENO.....	73
3.6.1.7.5 ALUMINIO	74
3.6.1.7.6 GRAFITOS.....	74
3.6.1.8 ACEITES DIELECTRICOS	78
3.6.1.8.1 CARACTERÍSTICAS DE UN FLUIDO PARA ELECTROEROSIÓN.....	78
3.6.1.8.2 TIPOS DE ACEITES PARA ELECTROEROSIÓN	79
3.6.1.9 UTILLAJES Y ACCESORIOS PARA ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN	80
3.6.2 MARCO METODOLÓGICO	82
3.6.2.1 ENSAYOS CON ELECTRODOS CON FORMA DE CUÑA A 60°... ..	82
3.6.2.3 ENSAYOS CON ELECTRODOS PARA BLISK.....	108
3.6.2.3 ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES	136
3.6.2.4 ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES DE LOS ELECTRODOS CON FORMA DE CUÑA A 60°	137
3.6.2.5 ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES DE LOS ENSAYOS CON ELECTRODOS PARA BLISK.....	145
3.7 RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	156
3.7.1 INTRODUCCIÓN.....	156
3.7.2 RESULTADOS DE LAS EROSIONES REALIZADAS CON ELECTRODOS CON FORMA DE CUÑA A 60°.....	156

3.7.3 RESULTADOS DE LAS EROSIONES REALIZADAS CON ELECTRODOS PARA BLISK.....	166
3.7.4 CONCLUSIONES.....	178
3.7.4.1 CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS CON ELECTRODOS CON FORMA DE CUÑA A 60°	178
3.7.4.2 CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS CON ELECTRODOS PARA BLISK.....	179
3.8 VALORACIONES GENERALES Y LÍNEAS FUTURAS	180
3.8.2 LÍNEAS FUTURAS Y PROPUESTA TÉCNICA.....	181

3.2. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

3.2.1. TÉRMINOS BÁSICOS ELECTROEROSIÓN

3.2.1.1. TERMINOLOGÍA GENERAL

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

Aspiración: Succión del líquido 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 (θ_v) a la relación entre el volumen de material arrancado del electrodo y el arrancado de la pieza. Se mide en Se mide en tanto por 100.

$$\theta_v = \frac{VOLUMEN\ ARRANCADO\ DE\ ELECTRODO}{VOLUMEN\ ARRANCADO\ DE\ LA\ PIEZA} \times 100$$

Se puede medir también el desgaste frontal, que es la zona desgastada del electrodo Fig. 1 .

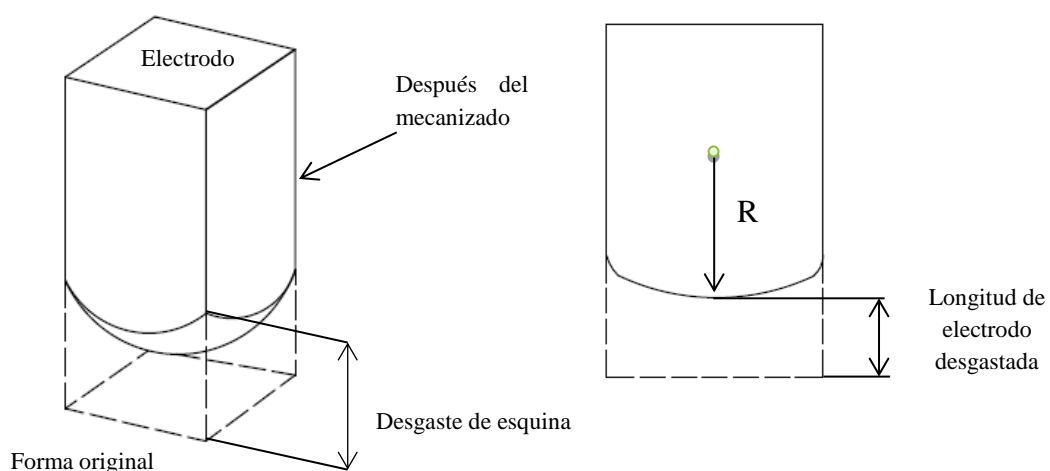


Fig. 1 Algunos de los factores a analizar en el desgaste de electrodos

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 (Ra) por medio del número de rugosidad (Nr) VDI 3.402. Se cumple la relación (estando Ra expresado en μm): :

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

Gap: Espacio entre electrodo y pieza en el cual se dan las descargas Fig. 2, Fig. 3. Se pueden distinguir:

- Gap frontal Fig. 2: Cuando dicho espacio no es paralelo a la dirección del eje de penetración.
- Gap lateral Fig. 2 : Gap paralelo al eje de penetración. Es mayor el gap en este caso.

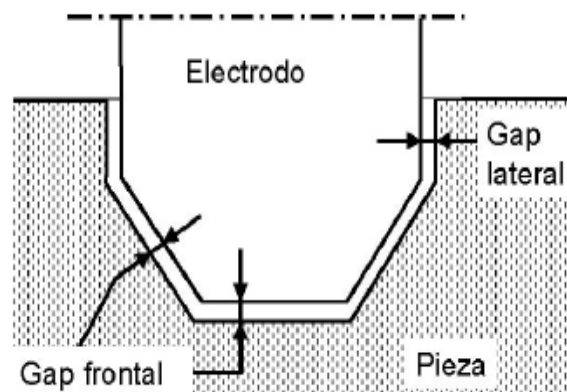


Fig. 2 Gap lateral y frontal en electroerosión por penetración

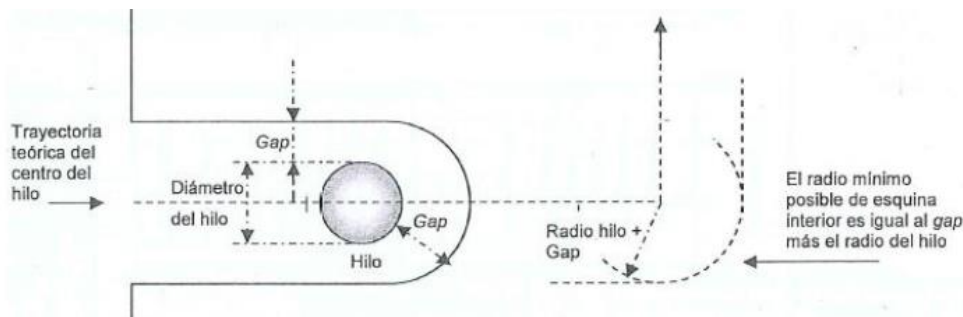


Fig. 3 Gap en electroerosión por hilo.

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.

Offset: Se trata de una representación de una geometría desplazando todos sus puntos a una distancia dada.

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 que circula el dieléctrico. Sus unidades son: kg/cm² y bar.

bar 1 : Decanewton 1/cm²: 1daN 1/cm².

1 kg/cm²: 0,981 bar (≈ 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: 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.

3.2.1.2. TERMINOLOGÍA ELÉCTRICA

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. 4*.

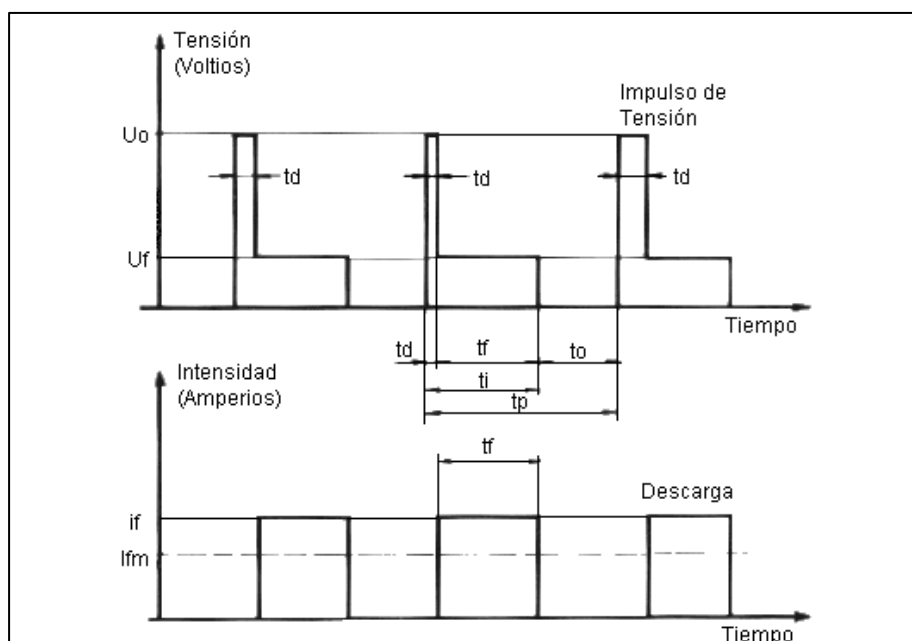


Fig. 4 Terminología eléctrica (VDI 3402).

Tensión de descarga (U_f): Tensión entre electrodo y pieza después de cebada la descarga *Fig. 4*.

Tensión en vacío (U_o): Tensión entre electrodo y pieza antes de ser cebada la descarga, o tensión entre electrodos si no hay descarga *Fig. 4*.

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. 4*.

Intensidad de impulso (i_f): Intensidad que circula por el gap durante una descarga *Fig. 4*.

Tiempo de descarga (t_f): Tiempo durante el cual pasa la descarga hasta que eléctricamente se corta la corriente *Fig. 4*.

Tiempo de impulso (t_i): Tiempo que dura el impulso de erosión entre ambos electrodos *Fig. 4*.

Tiempo de pausa (t_o): Intervalo de tiempo que transcurre entre el final de un impulso y el comienzo del siguiente *Fig. 4*. 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 μs *Fig. 4*. 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.

3.2.2. TERMINOLOGÍA DE MEDICIÓN POR COORDENADAS

Alineación: La alineación se realiza sobre la pieza fijada previo paso a la medición, y consiste en definir el sistema de referencia idóneo de la pieza mediante sus características representativas.

Bestfit: Método mediante el cual el Software de medición por coordenadas es capaz de calcular (relacionando las coordenadas reales con las teóricas) las traslaciones y los

giros necesarios para generar el sistema de referencia más acertado. El programa realiza iteraciones de cálculo hasta que la desviación estándar de los errores sea mínima.

Desviación: diferencia entre las coordenadas teóricas y reales de un punto palpado.

MMC (Maquina de medir por coordenadas): Se trata de un instrumento que de medida absoluta de precisión capaz de determinar la dimensión, forma, posición y “actitud” (perpendicularidad, planicidad, etc.) de un objeto midiendo la posición de distintos puntos de su propia superficie.

Palpador: Se trata del elemento de la MMC, formado por un cabezal y una terminación esférica, que entra en contacto (palpa) con la superficie de la pieza con el fin de medir su desviación (ver Fig. 5).

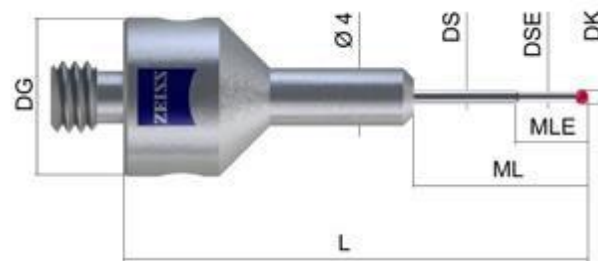


Fig. 5 Palpador de Zeiss.

3.2.3 TERMINOLOGÍA PERFILÓMETRO CONFOCAL

Objetivo: Lente situada cerca de la preparación. Amplía la imagen de ésta determinando la cantidad de aumentos con la que queremos observar.

Stitching: Es el proceso por el cual se combinan múltiples imágenes para producir una imagen panorámica o una imagen de alta resolución, normalmente mediante un programa de ordenador.

Overlapping: Porcentaje cada una de las mediciones que se superpondrá a las colindantes en un stitching.

Topografía: La topografía de alta definición mediante Láser Escáner es un método de recogida de datos en 3D (de una superficie o de un objeto) de manera sistemática, automatizada, en tiempos muy cortos y sin mantener contacto directo con el punto a tomar.

Zscan: Rango de medición en el eje Z de la topografía.

3.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

3.3.1 INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL ESTUDIO

La electroerosión es un método de mecanizado de materiales, que se enmarca dentro de los procesos de mecanizado no convencionales. La electroerosión se basa en el proceso de arranque de material mediante descargas eléctricas controladas las cuales se dan en un medio dieléctrico. El estudio que aquí se describe se encuadra dentro del proceso de electroerosión por penetración.

En electroerosión por penetración la herramienta empleada para el mecanizado de los materiales es denominada electrodo, siendo los materiales de electrodo más comunes el grafito y el cobre. El material de electrodo empleado para el estudio que aquí se describe es el grafito.

Las cavidades generadas por electroerosión por penetración están directamente relacionadas con la geometría del electrodo empleado para su mecanizado, puesto que la geometría de la cavidad representará el negativo correspondiente al electrodo en la pieza *Fig. 6*.

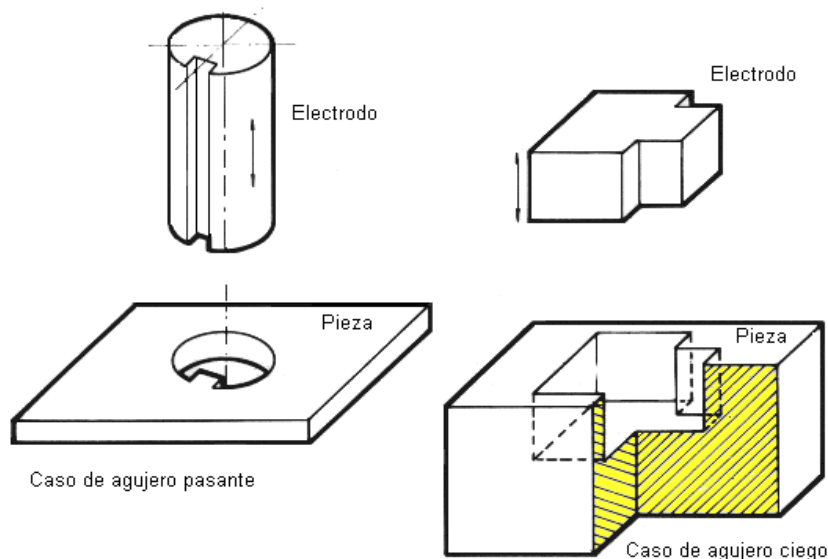


Fig. 6 Representación de las cavidades generadas mediante electroerosión por penetración

A su vez, la geometría final de la cavidad quedará directamente relacionada por otro parámetro importante en el proceso de electroerosión por penetración, el gap. El gap, o longitud de chispa es la distancia entre electrodo y pieza a la cual se generarán descargas eléctricas entre ambas, y consecuentemente se produzca la erosión Del material. Cabe mencionar que las chispas son generadas en dirección perpendicular al electrodo.

Por lo tanto, y teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, la geometría de la cavidad quedará definida por la geometría del electrodo y la longitud del gap a lo largo del perfil del mismo.

El proceso de mecanizado de materiales mediante electroerosión por penetración, conlleva a su vez un desgaste de electrodo, siendo la tasa de desgaste del electrodo menor que la tasa de material erosionado.

Teniendo en cuenta que la geometría de la cavidad está directamente relacionada con la geometría final del electrodo al finalizar la erosión, el conocimiento de la geometría final del electrodo adquiere una gran importancia para poder definir con mayor exactitud la cavidad generada en la erosión. Para ello es necesario el conocimiento del desgaste del electrodo durante el proceso de electroerosión.

En relación con la exactitud de las cavidades, actualmente la longitud del gap a lo largo del perfil del electrodo se considera constante. Teniendo en cuenta dicha premisa, el conocimiento del desgaste del electrodo garantizaría un conocimiento preciso de la geometría final de la cavidad tras la erosión, puesto que la cavidad quedaría definida realizando un offset de la geometría final del electrodo a una distancia igual al gap. Dicha premisa queda puesta en duda en la bibliografía consultada, y una distribución del gap variable a lo largo del perfil del electrodo supondría una influencia directa en las cavidades finales mecanizadas mediante electroerosión por penetración.

En relación con la bibliografía consultada, se carece actualmente de una metodología fiable de medición e interpretación de los resultados, pudiendo encontrar constantes evoluciones en las metodologías planteadas en dichas publicaciones.

Por lo tanto, el conocimiento del desgaste de los electrodos, así como la distribución del gap a lo largo del perfil de los mismos, garantizaría una mayor exactitud en la predicción de las geometrías de las cavidades generadas mediante electroerosión por penetración.

Con el objetivo de garantizar un conocimiento del desgaste de los electrodos durante el proceso de electroerosión así como del análisis del gap a lo largo del perfil de los mismos, se ha diseñado una metodología de medición y análisis de los factores anteriormente comentados. La metodología diseñada ha sido probada mediante la realización de dos baterías de ensayo empleando dos geometrías de electrodo distintas y realizando erosiones a distintas profundidades.

Por lo tanto el objeto del presente estudio es el de diseñar una metodología de medición tanto del desgaste de los electrodos como del análisis del gap a lo largo del perfil de los mismos, pudiendo de tal manera optimizar tanto el empleo de los electrodos como las cavidades generadas mediante su uso. Así como el estudio tanto del desgaste de los

electrodos como del gap, pudiendo de tal manera optimizar la precisión del proceso de electroerosión por penetración, permitiendo la implantación futura de un modelo predictivo tanto del desgaste de los electrodos como de las cavidades erosionadas.

3.3.2 OBJETIVOS QUE SE PERSIGUEN

El objetivo final del estudio es el de **diseñar una metodología de medición precisa tanto del desgaste de los electrodos como del gap** que solvante la problemática actual existente en la medición tanto del desgaste de los electrodo como en la interpretación del gap a lo largo del perfil de los mismos. A su vez, se persigue el **conocimiento de la evolución del desgaste de los electrodos y del gap en función de la profundidad de erosión** y los parámetros de erosión empleados.

Teniendo en cuenta las complejas geometrías de los electrodos empleadas actualmente en la industria, las cuales implican un coste de fabricación de electrodos que en diversos casos puede llegar a suponer hasta un 70 % del coste total de fabricación de la pieza. **El entendimiento del proceso del desgaste de los electrodos durante la erosión y su caracterización, así como un conocimiento preciso de la distribución del gap a lo largo del perfil del electrodo, garantizará una mayor optimización en el diseño de los electrodos y de las secuencias de erosión**, lo que a su vez se traducirá en la optimización de recursos a nivel industrial en los sectores que empleen la electroerosión como proceso de mecanizado para sus productos.

A su vez, la interpretación de los resultados obtenidos mediante el empleo de la metodología de medición diseñada, permitirá la obtención de información sobre el proceso de desgaste de electrodo.

La información obtenida mediante las pruebas experimentales, nos permitirá a su vez el conocimiento sobre los parámetros necesarios para definir el desgaste, así como la cuantificación de la influencia que tienen sobre el mismo tanto el régimen de erosión como la geometría del electrodo.

Resumen de objetivos

-Definir una metodología de medición tanto del desgaste de los electrodos como del valor del gap a lo largo del perfil de los mismos.

-Estudiar la evolución del desgaste de electrodos y de la distribución del gap para diversas profundidades de erosión.

-Estudiar tanto la influencia de la geometría como de los parámetros de erosión en el desgaste de los electrodos y el gap resultante.

3.4. ANTECEDENTES

3.4.1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto se realiza en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao (ETSIB), siendo la ciudad en la que se ubica, la capital industrial del País Vasco. Concretamente, se ha llevado a cabo en el taller mecánico, que se encuadra en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la UPV/EHU, perteneciente al grupo de Fabricación de Alto Rendimiento. Este grupo está compuesto por varios profesores doctores y otros profesores en curso de realización de la Tesis Doctoral, personal investigador realizando su Tesis Doctoral y alumnos de segundo ciclo colaboradores; todos ellos cuentan a su vez, con el apoyo del resto de profesores de otras áreas del Departamento. El taller mecánico dispone, además, de una sala de metrología donde poder analizar los resultados de cada ensayo realizado.

El proyecto forma parte de una Tesis Doctoral de una duración aproximada de 3 a 4 años en el ámbito de la Electroerosión y es parte de un trabajo de investigación para la empresa “ONA ELECTROEROSIÓN S.A.”.

3.4.2 INTRODUCCIÓN A LA ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN

La electroerosión es un proceso no convencional de mecanizado basado en la generación de descargas eléctricas controladas entre dos elementos conductores en presencia de un líquido denominado fluido dieléctrico. Uno de los elementos constituye el útil de arranque, conocido genéricamente como electrodo, el otro elemento es la pieza, o material a conformar, siendo ambos necesariamente conductores de electricidad.

Cada una de las descargas produce el arranque de una cierta cantidad de material, tanto de la pieza a mecanizar como del electrodo. El arranque de material de la pieza es el fin u objetivo del proceso, mientras que el arranque de material en el electrodo es considerado como desgaste, y debe, por tanto, ser minimizado.

El proceso de arranque de material, es fundamentalmente una combinación de fenómenos térmicos y mecánicos. La temperatura alcanzada por cada descarga, produce la vaporización del material de la pieza el cual es arrastrado en forma de carbonilla fuera de la zona de erosión por el dieléctrico circulante *Fig. 7*.

Otra de las funciones principales del fluido dieléctrico, es la de aislar de manera controlada el electrodo y la pieza, permitiendo el paso de una corriente eléctrica entre ambos, en forma de avalancha a intervalos definidos. Dichos intervalos son muy cortos, del orden de microsegundos, por lo que aunque la cantidad de material erosionado por unidad de descarga es muy pequeña, pese a ello el volumen total erosionado al cabo de cierto tiempo resulta apreciable.

Debido a la importancia del fluido dieléctrico en el proceso de electroerosión, debe entenderse bien su papel en dicho proceso.

Los fluidos empleados en electroerosión, agua desionizada en el caso de corte por hilo y aceite en el caso de erosión por penetración no son conductores de electricidad en condiciones normales. En el caso del agua, se toma directamente de la red general, y se desioniza, es decir se reduce su conductividad haciéndola pasar por un lecho de resinas. Bajo las condiciones impuestas por las máquinas de electroerosión, dichos fluidos se vuelven conductores localmente y durante un intervalo de tiempo limitado, durante el cual se produce la descarga. Tras finalizar dicha descarga se recuperan las propiedades aislantes quedando la zona de erosión preparada para una nueva descarga.

La geometría del electrodo determina directamente la geometría final alcanzada tras la erosión. Durante el proceso de erosión, no existe contacto físico entre electrodo y pieza, sino que entre ambos se establece una distancia denominada con el nombre de *gap*. El *gap*, es el espacio entre el electrodo y la pieza en el cual se producen las descargas, dicho espacio queda ocupado por el fluido dieléctrico de manera que es a través del mismo como se establecen las descargas.

Si el *gap* no existiera se producirían situaciones de cortocircuito y el mecanizado resultaría degradado. A su vez, si el *gap* tuviese una dimensión superior a la necesaria, no sería posible establecer una sucesión estable de descargas.

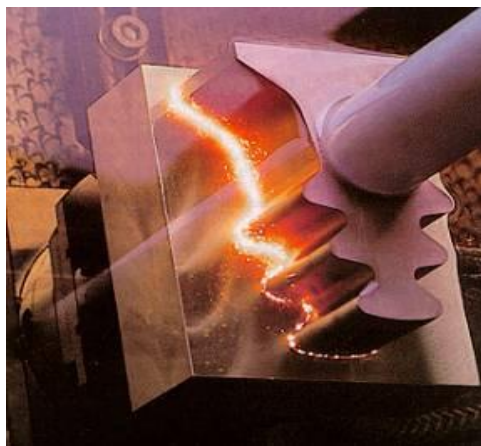


Fig. 7 Erosión de una cavidad para la instalación de las palas de una turbina en un motor a reacción

Como consecuencia, el *gap* constituye un parámetro fundamental del proceso de electroerosión, no solo porque determina las condiciones de descarga, sino porque su dimensión, que puede ir desde una micras hasta las centésimas, debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar el electrodo, debido a que la geometría final de la cavidad erosionada quedará determinada directamente por la geometría del electrodo y la distancia del *gap*.

3.4.3 DESGASTE DE ELECTRODOS EN ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN

La electroerosión por penetración es un proceso de mecanizado de alto rendimiento el cual se caracteriza por su gran precisión y los acabados superficiales que se pueden obtener mediante su empleo. Puesto que los requisitos impuestos por los usuarios de dicha tecnología son cada vez más exigentes, y las tolerancias dimensionales requeridas en las piezas mecanizadas mediante electroerosión por penetración son cada vez más pequeñas, se requiere un mayor conocimiento de los factores que afectan al proceso de mecanizado de piezas mediante electroerosión por penetración.

En relación con el objeto del presente estudio, la pérdida de precisión en el mecanizado de materiales en el proceso de electroerosión por penetración es debida al desconocimiento del desgaste de los electrodos, así como de la dimensión del gap a lo largo del perfil de los mismos. Siendo dichos factores los que mayor relevancia tienen a la hora de definir la cavidad final generada mediante éste proceso de mecanizado de materiales *Fig. 8*.

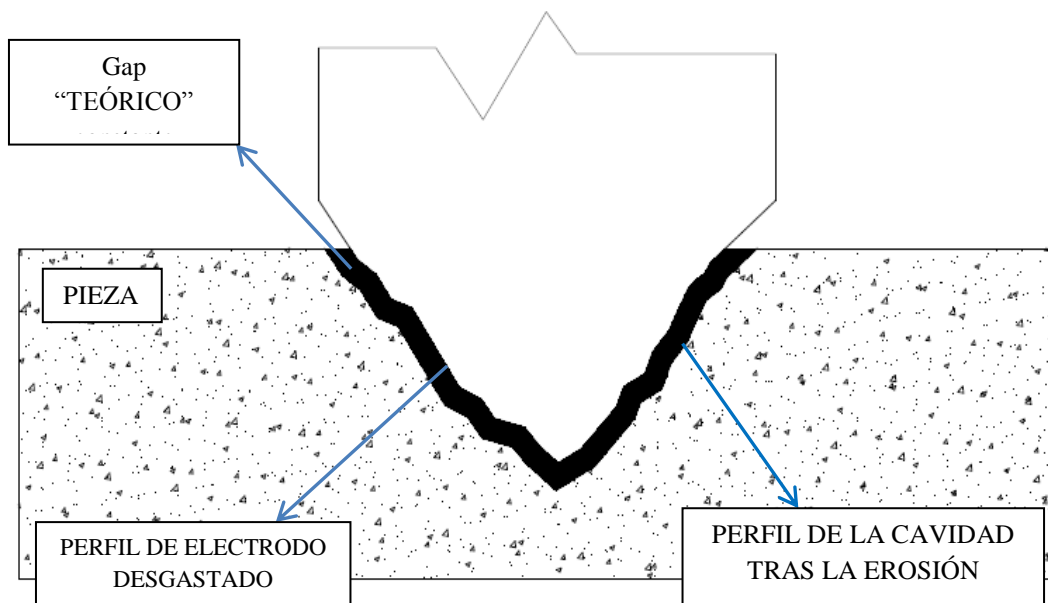


Fig. 8 Representación de los factores principales para la definición de la cavidad final

El desgaste del electrodo es producido debido a que cada descarga, además de erosionar el material, produce un desgaste en el electrodo, conocido mediante las siglas TWR (*Tool wear rate*).

3.4.2 ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE

En el proceso de electroerosión por penetración, la precisión reside en la geometría del electrodo y el control o conocimiento del GAP. Es conocido que la distribución del GAP a lo largo de la superficie de descarga no es uniforme y que la tendencia a la curvatura de las esquinas debido al desgaste es mayor que la de las zonas planas, lo que conlleva a un desgaste irregular a lo largo del perfil del electrodo.

En base a estudios y publicaciones previas, se puede observar el intento de caracterizar el desgaste de los electrodos en electroerosión por penetración, siendo actualmente desconocida la manera en la que la geometría del electrodo afecta al desgaste del mismo.

Es por lo tanto necesario y de interés científico el estudio de la incidencia de la geometría del electrodo en el desgaste y la distribución del GAP a lo largo del electrodo para la implantación futura de un método mediante el cual pueda ser predicho el desgaste de los electrodos.

Naotake Mohri et al [Mohri, 1995], Para el análisis del desgaste sufrido por los electrodos durante el proceso de electroerosión plantearon unos ensayos muy erosivos empleando electrodos de cobre en forma de barra cilíndrica para poder observar de manera más clara el fenómeno del desgaste.

Se enfocó el proceso de desgaste de electrodos desde dos puntos de vista distintos para poder observar la evolución en el desgaste de los electrodos, estudiando tanto el estado transitorio como el estado estacionario.

Para poder analizar el desgaste de los electrodos de cobre con forma de barra, se estudió la evolución temporal del desgaste tanto de la esquina del electrodo como de la zona plana del mismo *Fig. 9*. Analizando los resultados se comprobó que el radio de esquina del electrodo aumentaba hasta un valor de cientos de micras tras 106 minutos de erosión.

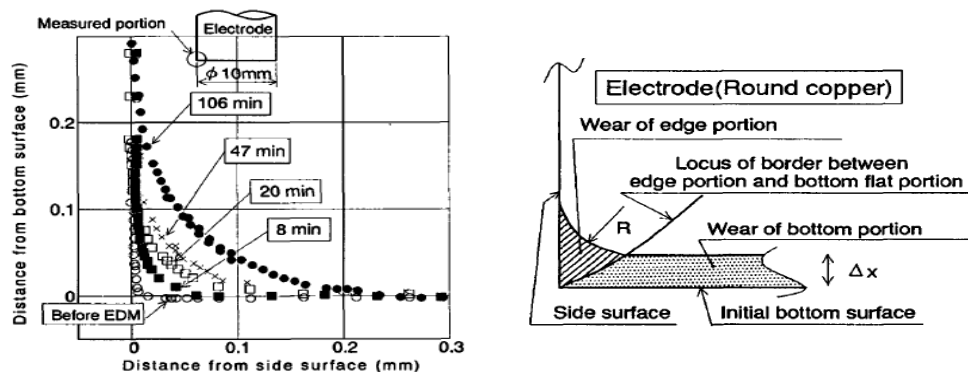


Fig. 9 Izda.) Representación de la evolución en el desgaste de la esquina del electrodo. Dcha.) Representación gráfica de las zonas en las que se dividió el desgaste del electrodo

A su vez se demostró que la tasa de desgaste de las esquinas del electrodo a comienzo de la erosión (<10min.) es mayor que la tasa de desgaste en la zona plana del mismo, y que posteriormente decrece a un valor menor que el de a tasa total de desgaste. Esto quiere decir que en la zona plana del electrodo se produce un recrecido longitudinal en las primeras fases de la erosión, y por lo tanto el valor del desgaste del electrodo en dicha zona negativo Fig. 10.

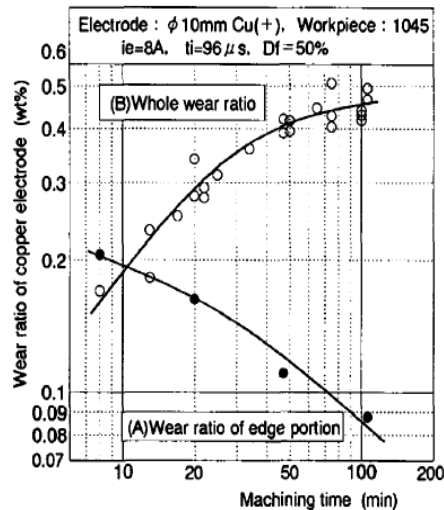


Fig. 10 Resultados de la tasa total de desgaste de electrodo y de la tasa de desgaste de esquina

Young Hun “et al” [Hun, 2007] .Teniendo como fin el estudio de la predicción geométrica del taladrado mediante electroerosión, propusieron el empleo de un electrodo cilíndrico con el fin de generar un modelo capaz de predecir tanto las dimensiones de la cavidad final mecanizada como del electrodo.

Puesto que la exactitud del proceso de electroerosión está limitada por el desgaste de electrodo, el cual es un fenómeno inherente al proceso de electroerosión. Propusieron una relación entre la tasa de desgaste de electrodo y las propiedades térmicas del electrodo y de la pieza.

Para una mayor predicción de las geometrías, fueron considerados el movimiento de la herramienta, la dimensión del gap, la frecuencia de descarga, la dimensión del cráter producido por cada descarga, y el ratio de desgaste de herramienta como parámetros principales.

Para el estudio geométrico tanto de la herramienta como de la pieza, se subdividió en cuadrantes tanto de electrodo como de pieza para analizar el desgaste en ambas durante el proceso de electroerosión *Fig. 11*. Dicha subdivisión se empleó para poder verificar de manera más sencilla y visual la tasa de desgaste del electrodo en función de la tasa de erosión de material, en este caso, la cantidad de cuadrantes eliminados del electrodo en comparación de la cantidad de cuadrantes eliminados de la pieza durante el proceso de electroerosión.

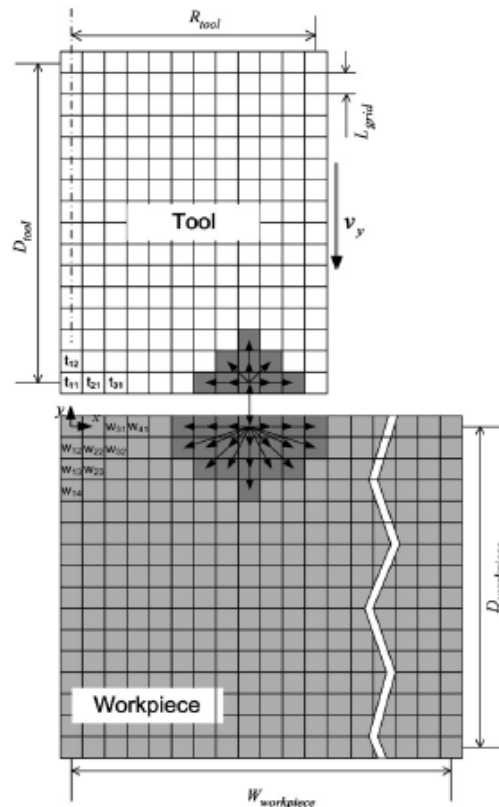


Fig. 11 Representación 2D de la subdivisión en cuadrantes tanto del electrodo como de la pieza para el estudio del desgaste

El modelo se basó en la localización de las descargas teniendo en cuenta que las descargas se producirían en aquellos puntos en las que la distancia entre electrodo y pieza era la menor, siempre y cuando dicha distancia fuese menor que el gap.

Para verificar el modelo de simulación, los resultados obtenidos por el modelo fueron comparados con los resultados experimentales obtenidos. La comparación de dichos resultados demostró que los resultados obtenidos mediante el modelo de predicción concuerdan con los resultados experimentales con un error del 13% *Fig. 12*

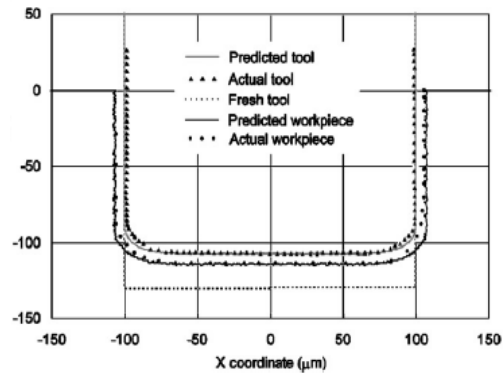


Fig. 12 Representación del modelo de predicción desarrollado

El modelo desarrollado puede emplearse para realizar la compensación geométrica de la herramienta para la fabricación de un agujero ciego. Para dicho propósito se ha introducido un esquema de compensación basado en el modelo desarrollado, a su vez queda demostrado que el esquema queda aplicado de manera satisfactoria en el la micro electroerosión de cavidades.

M. S Sohani et al [Sohani, 2009]. Debido a la problemática existente en el desconocimiento de la manera en que se ven afectados diversos factores del proceso de electroerosión en función de la geometría del electrodo. Publicaron un estudio sobre el efecto de diversas geometrías de electrodo en el proceso de electroerosión por penetración,

Dicho estudio presenta la aplicación de la metodología de superficies (RSM) para la investigación de geometrías de electrodo cuadrada, triangular, rectangular, cuadrada y circular junto con otros parámetros de erosión como corriente de descarga, tiempo de impulso, tiempo de pausa, y área de herramienta.

Los modelos matemáticos basados en (RSM) de tasa de material erosionado fueron desarrollados empleando los datos obtenidos a través del diseño compuesto central.

Se comprobó la variación de los resultados reales en comparación con los resultados teóricos para verificar la inexactitud de los modelos previamente desarrollados. Adicionalmente, se realizaron pruebas de confirmación para verificar la efectividad de dichos modelos.

La investigación reveló que la geometría que se adecuaba mejor para la erosión de grandes cantidades de material mientras que ofrecía una gran resistencia al desgaste era la herramienta de sección circular, seguida por la triangular, la rectangular y la cuadrada *Fig. 13*.

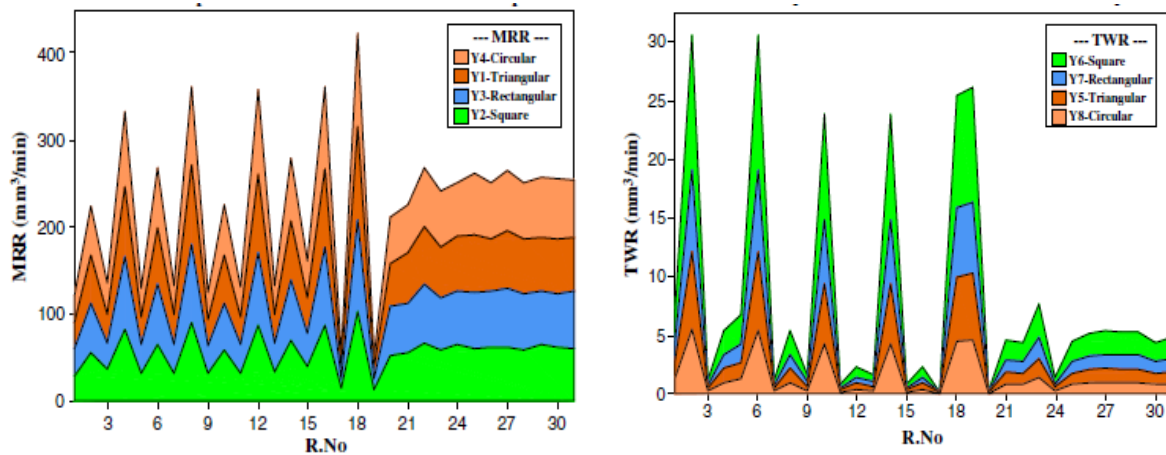


Fig. 13. Izda.) Gráfica con la comparación de la tasa de material erosionado por cada geometría. Dcha.) Gráfica con la comparación de la tasa de desgaste de electrodo en cada geometría.

A su vez, se observó que la interacción entre la corriente de descarga y el tiempo de impulso es muy significativa en la cantidad de material erosionado y el desgaste del electrodo, mientras que los principales factores como son el tiempo de pausa y el área del electrodo son estadísticamente significantes en cuanto a la cantidad de material erosionado y el desgaste de electrodo Fig. 14.

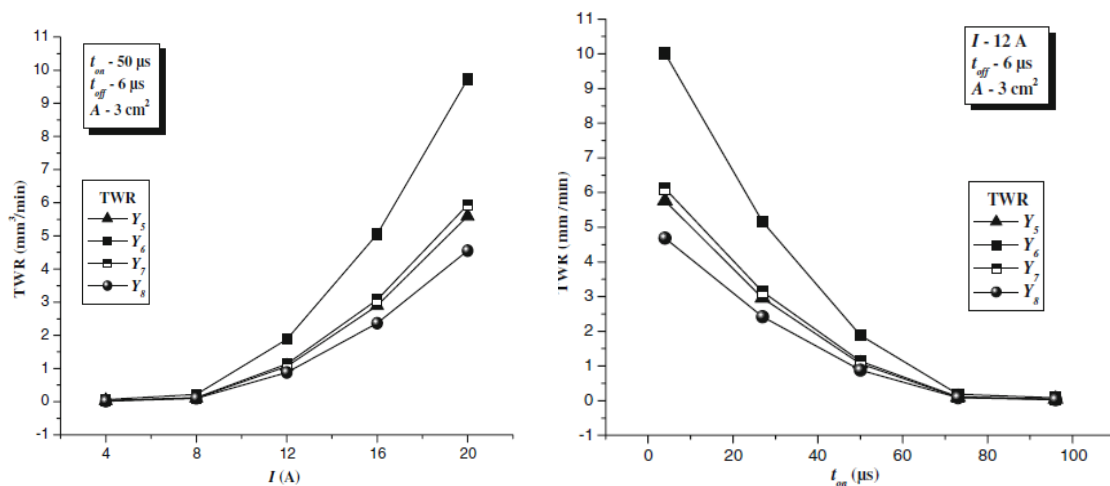


Fig. 14 Efecto de: Izda.) Intensidad de descarga, Dcha.) Tiempo de impulso, en el desgaste de electrodo para diversas geometrías

Mu-Tian Yan et al [Yan, 2010] . Publicaron una investigación innovadora sobre un proceso multicorte para planeado, y un nuevo método de compensación de desgaste de electrodo basado en una representación tridimensional del mecanizado por micro electroerosión.

El software de visualización de imágenes permitió la medición del desgaste frontal y de esquina del electrodo para su compensación. Los experimentos mostraron que el desgaste de las esquinas es linealmente proporcional a la profundidad de erosión bajo unas condiciones de erosión predeterminadas *Fig. 15*

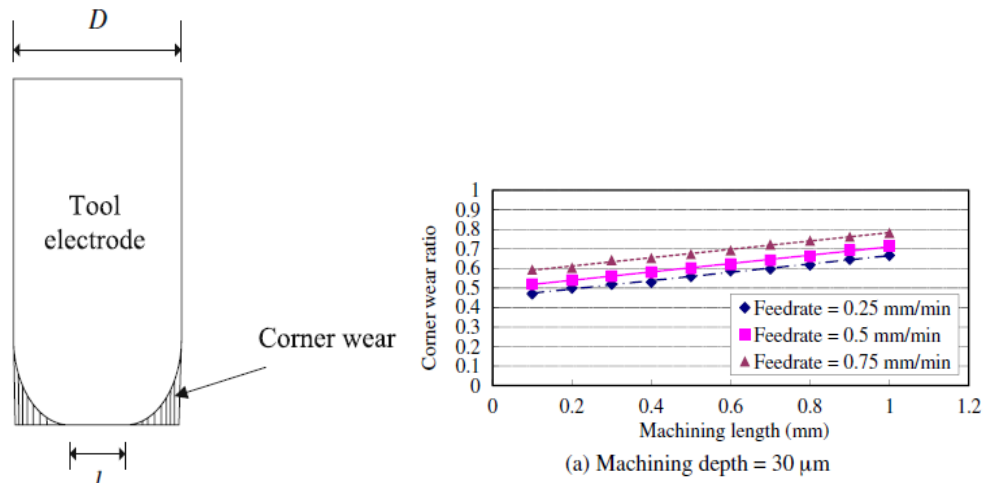


Fig. 15 Izda.) Representación del desgaste de esquina del electrodo. Dcha.) Proporcionalidad lineal del desgaste de la esquinas.

La compensación del desgaste del electrodo se realizó mediante la superposición de las trayectorias del mismo durante el proceso de planeado. La compensación debida al desgaste frontal del electrodo pudo ser compensada introduciendo directamente en el eje Z la distancia correspondiente al desgaste frontal del electrodo.

La compensación debida al desgaste de las esquinas del electrodo pudo ejecutarse realizando una superposición de las trayectorias del electrodo durante el proceso de planeado, pudiendo de tal manera conseguir un mecanizado preciso empleando un mismo electrodo.

Los resultados experimentales no solo indican que el modelo de multicorte para planeado propuesto y el modelo de compensación de desgaste de electrodo pueden optimizar significativamente la precisión del proceso y reducir el tiempo de mecanizado del proceso, también demuestran que los errores dimensionales en X-Y pueden controlarse con un error de aproximadamente 10 μm.

Masanori Kunieda et al [Kunieda, 1999] .Dado que actualmente las geometrías mecanizadas mediante electroerosión por penetración son cada vez más complejas, se publicó un estudio en el que intentaron crear un modelo mediante el cual pudiesen resolver el problema inverso en electroerosión por penetración, esto es, el conocimiento

de geometría de electrodo necesaria para generar una cavidad con una geometría requerida.

En el método de la simulación inversa desarrollado, se ha empleado el mismo algoritmo que para la simulación directa. La pieza a erosionar, es alimentada a través del electrodo en la dirección opuesta a la simulación directa, y los valores de las profundidades de las capas erosionadas del electrodo y la pieza por unidad de descarga son las inversas de la simulación directa, esto es, en vez de estudiar la cavidad formada por un electrodo se estudia el electrodo requerido para una generar dicha cavidad.

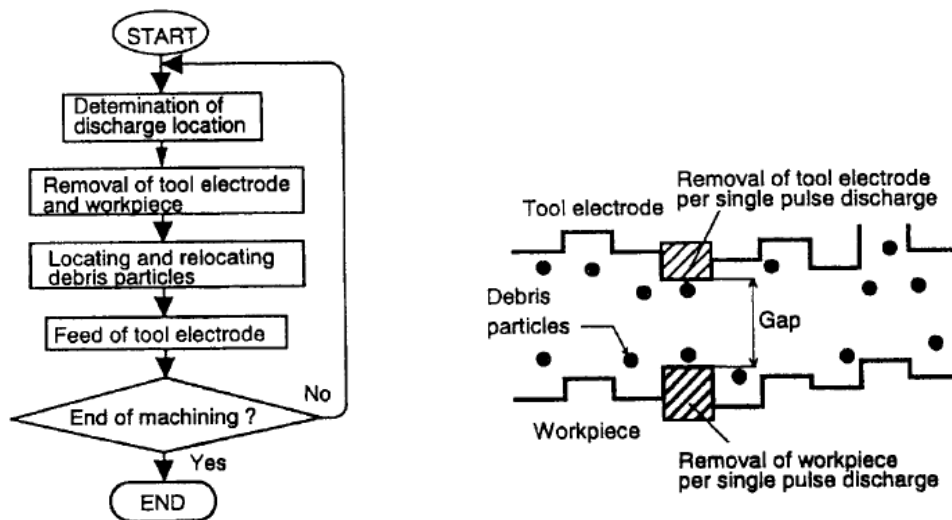


Fig. 16 Izda.) Diagrama del algoritmo empleado para el modelizado del proceso.
Dcha.) Imagen representativa del proceso.

El algoritmo empleado para el estudio es una simple repetición de un procedimiento compuesto por Fig. 16 .1) Determinar la siguiente localización de la descarga. 2) Material eliminado de la pieza y el electrodo. 3) Distribuir las partículas residuales. 4) Alimentar el electrodo.

Se concluyó que un modelo de simulación resuelve el problema inverso que plantea la electroerosión por penetración, teniendo en cuenta la cantidad de factores tenidos en cuenta a la hora de emplear el algoritmo.

Masanori Kunieda "et al" [Kunieda, 2012]. Teniendo en cuenta el método de simulación inversa desarrollado anteriormente, publicaron un método mediante el cual se podían obtener electrodos con la forma precisa para mecanizar una cavidad predeterminada mediante electroerosión por penetración, teniendo en cuenta el desgaste sufrido por el electrodo durante el mecanizado.

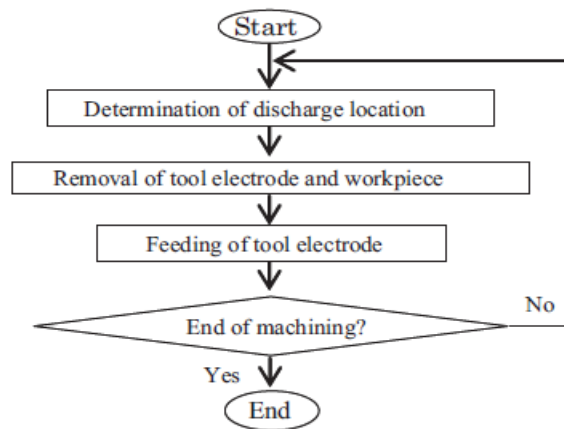


Fig. 17 Algoritmo de localización de descargas

En la simulación inversa se comienza empleando un electrodo con la misma geometría de la cavidad deseada aplicándole el algoritmo de localización de descargas Fig. 17, el cual nos indicará la localización del punto donde el electrodo y la pieza se encuentren a la menor distancia, todo ello teniendo en cuenta el desgaste del electrodo durante el proceso de electroerosión.

Para compensar el error debido a la curvatura de los electrodos, tanto los volúmenes de material erosionado en la pieza, como el desgastado en el electrodo fueron divididos y multiplicados por unidad de área de la pieza en contacto con unidad de área de electrodo respectivamente.

Los resultados experimentales mostraron que las geometrías de las cavidades conseguidas mediante electrodos diseñados con la simulación inversa Fig. 18 eran muy similares a las requeridas desde un principio. Obteniendo la medida final de la cavidad aplicando un offset del electrodo desgastado a una distancia igual al gap.

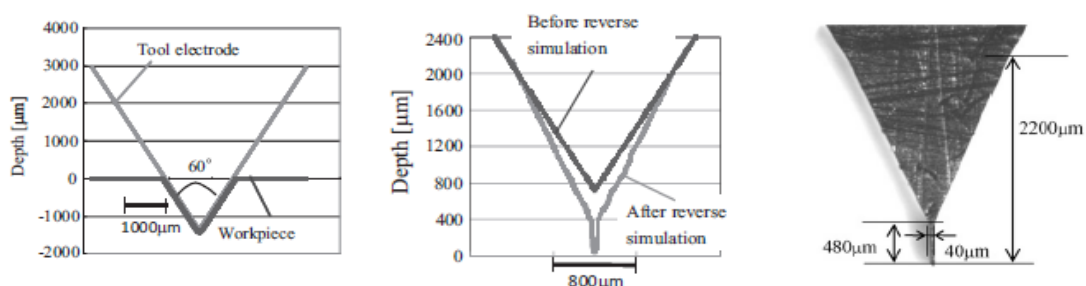


Fig. 18 Proceso de simulación inversa. Izda.) Electrodo mediante offset de la cavidad. Centro.) Diseño del electrodo mediante simulación inversa. Dcha.) Electrodo fabricado con simulación inversa.

Kenji Morimoto et al [Morimoto, 2009]. Teniendo en cuenta las carencias de los modelos de simulación previos, publicaron un estudio sobre la mejora del modelo de simulación basándose en la localización de las descargas.

El nuevo modelo de simulación repite consecutivamente el proceso de *Fig. 19*, localizar la situación de la descarga, desgaste de electrodo, la generación y emplazamiento de los residuos generados durante la descarga, y alimentado de electrodo.

El conocimiento de la localización de las descargas proporciona un mayor conocimiento del desgaste del electrodo, pudiendo de tal manera saber con seguridad en que zona del electrodo se producirá el desgaste en cada fase de la erosión.

El emplazamiento donde la descarga tenga el menor tiempo de demora calculado estadísticamente, asumiendo que se aplica una distribución exponencial, es el emplazamiento donde se produce la descarga. El avance del electrodo también se basa en el tiempo de demora de la descarga como control de avance.

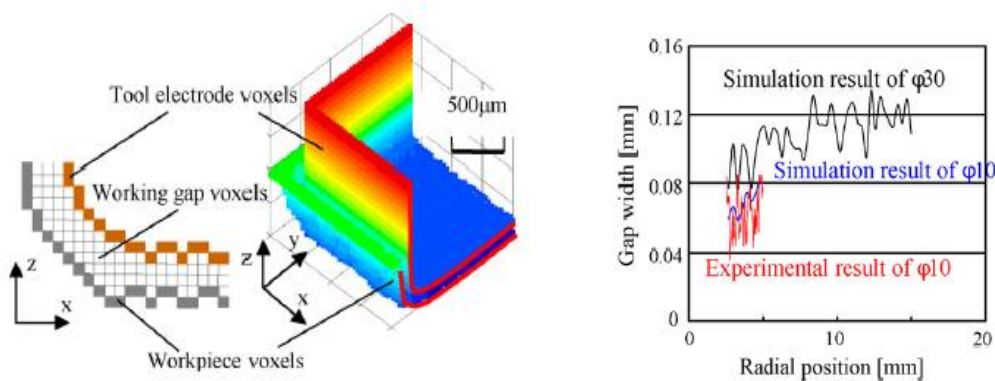


Fig. 19 Izda.) Representación 3D del proceso de simulación, Dcha.) Comparación de los resultados de las simulaciones con resultados experimentales.

Las geometrías de electrodo y la amplitud de la distribución del gap simuladas *Fig. 19* para diversas superficies confirmaron los resultados experimentales obtenidos en los ensayos.

Segon Heo et al [Heo, 2009]. Teniendo como fin un mayor control del proceso de fresado mediante EDM, publicaron un estudio introduciendo un algoritmo con mapeo en el eje Z, mediante el cual pudieron representar de forma más fiable y precisa las geometrías generadas y la evolución del desgaste de la herramienta durante el proceso.

El proceso está modelado geométrica y matemáticamente. Para verificar el rendimiento del simulador, se mecanizó una geometría cuadrada y se comparó el resultado real con el resultado obtenido mediante la simulación.

La simulación se basó en el efecto producido por cada una de las descargas individualmente, esto es, el cráter producido por cada una de ellas, siendo la suma del efecto de cada una de las descargas la cavidad resultante.

El simulador se puede emplear para generar trayectorias compensando el desgaste del electrodo así como para predecir el desgaste del mismo. De esta manera se podrán conseguir geometrías con una mayor precisión y a su vez la optimización del empleo de los electrodos.

La simulación a su vez, nos proporcionará geometrías finales del electrodo tras el mecanizado de la pieza, siendo los resultados obtenidos mediante las simulaciones muy próximas a los obtenidos experimentalmente *Fig. 20*.

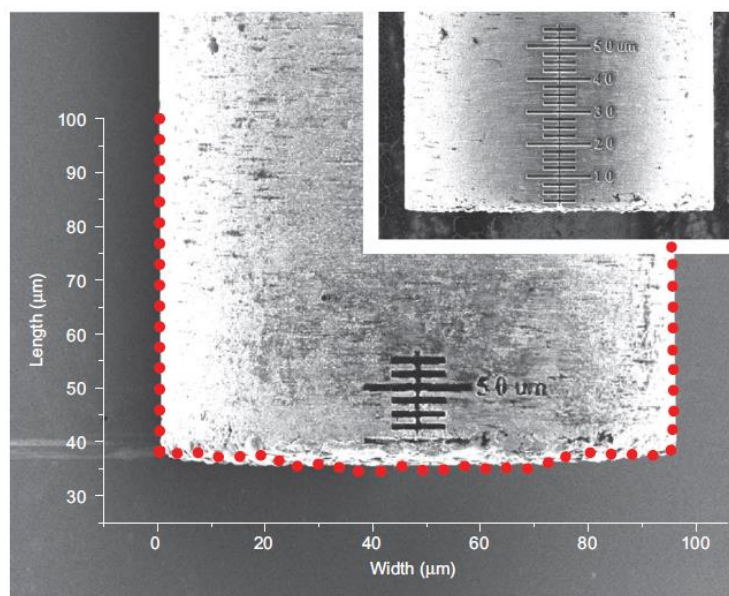


Fig. 20 Comparación de los resultados de la geometría final de electrodo obtenidos mediante la simulación, con los resultados obtenidos experimentalmente

Teniendo en cuenta los estudios mencionados anteriormente, debido a la carencia de un modelo fiable de desgaste de electrodos, se concluyó que es necesaria la realización del estudio para caracterizar de manera más precisa el desgaste de electrodos de grafito en electroerosión por penetración.

A su vez se llegó a la conclusión de la necesidad del diseño de una metodología fiable de medición de los parámetros que afectan al proceso de electroerosión por penetración y al desgaste de electrodos para poder llegar a unos resultados fiables.

En el caso de los electrodos de grafito, el desgaste de los electrodos es debido al desprendimiento de los granos que forman el grafito debido a las descargas. Es por ello que el tamaño de grano del grafito empleado para los electrodos es de gran importancia, debido a que un mayor tamaño de grano implicaría el desprendimiento de granos

mayores por cada descarga, produciendo a su vez un desgaste con mayor irregularidad a lo largo del perfil del electrodo.

Existen diversos factores a analizar en el desgaste de los electrodos, tales como el desgaste frontal (longitud de electrodo desgastada), desgaste lateral y radio de punta del electrodo tras la erosión *Fig. 21*

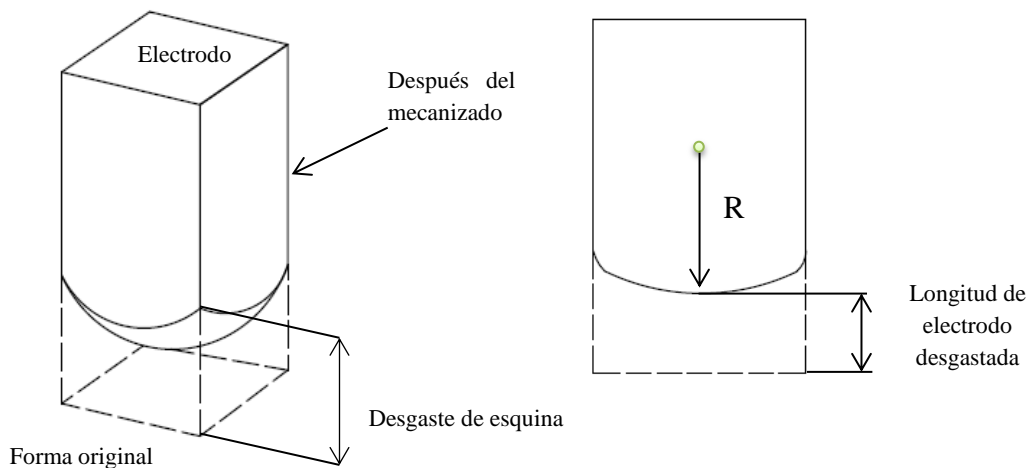


Fig. 21 Algunos de los factores a analizar en el desgaste de electrodos

A su vez, dicho desgaste varía en función de la tecnología empleada para la realización de la erosión.

Las tecnologías de erosión quedan definidas mediante el VDI, siendo el VDI el estado de la superficie tras la erosión. 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 (*estando R_a expresado en μm*): :

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

La tecnología de erosión a emplear es un aspecto crítico y a su vez contradictorio a la hora de definir el desgaste del electrodo. Dicha contradicción es debida a que pese a que las menores rugosidades o mejores acabados superficiales son obtenidos mediante tecnologías menos erosivas y por lo tanto generando una menor tasa de desgaste en el electrodo.

Dichas tecnologías a su vez estarán directamente relacionadas con un mayor tiempo de erosión y por lo tanto una mayor cantidad de descargas generadas, que en ciertos casos se traduce en un desgaste de electrodo mucho mayor.

Es por ello que en muchas ocasiones se opte por el empleo de tecnologías muy erosivas, las cuales incidirán en un menor tiempo de erosión, y por lo tanto en un menor desgaste final de electrodo. Pudiendo posteriormente emplear estrategias de mejora de acabado denominadas orbitales, mediante los cuales se consiguen acabados de muy baja rugosidad, pudiendo de tal manera optimizar el tiempo de mecanizado de la cavidad.

Resumiendo, tal y como se ha comentado previamente, el objetivo principal que se persigue es el de diseñar una metodología de medición y análisis del desgaste de los electrodos y el gap a lo largo del perfil de los mismos, al igual que analizar los factores que influyen de mayor manera en el desgaste, pudiendo de tal manera caracterizar el desgaste de los electrodos y optimizar las cavidades generadas mediante el empleo de los mismos.

3.5 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

3.5.1 INTRODUCCIÓN

Tal y como se ha comentado anteriormente, el objetivo del estudio del presente estudio es el de diseñar una metodología de medición que garantice una exactitud de los resultados y una repetitibilidad de la misma para posteriormente analizar el desgaste de los electrodos de grafito y la dimensión del gap a lo largo del perfil del electrodo en electroerosión por penetración.

Puesto que para conocer el desgaste de los electrodos y la dimensión del gap a lo largo del perfil del electrodo de manera precisa, se ha de analizar dicho desgaste para diversas profundidades de erosión y conociendo que las primeras etapas de una erosión (*pequeñas profundidades*) tienen una gran relevancia en cuanto al desgaste de los electrodos. La metodología de medición y análisis ha de ser de la máxima precisión posible para garantizar la validez de las mediciones, y a su vez garantizar la interpretación de los resultados posterior.

Tal y como se explicará de manera detallada en el apartada (3.6.1 *Marco metodológico*), los ensayos y su metodología de medición y análisis de las mediciones correspondientes han sido divididas en dos sub apartados en función de la geometría de electrodo empleada para la realización de las erosiones.

Por lo tanto se pueden plantear diversas alternativas de medición, pudiendo dividir las en dos grandes grupos en función de la geometría de electrodo empleada para las erosiones.

1-Alternativas para las erosiones con electrodos con forma de cuña a 60°.

2-Alternativas para las erosiones con electrodos para Bliisk.

Todas las alternativas planteadas y explicadas a continuación fueron probadas durante el proceso de diseño de la metodología, siendo descartadas posteriormente por diversos motivos, los cuales se explicarán de igual manera.

Cabe mencionar que el descarte de algunas de las alternativas que serán explicadas a continuación no se fundamenta en su carencia de valía, sino en ciertas desventajas en comparación con la solución final adoptada para desempeñar su función.

3.5.2 ALTERNATIVAS PARA LAS EROSIONES CON ELECTRODOS CON FORMA DE CUÑA A 60°

A continuación se explicarán detalladamente las alternativas probadas tanto para la medición de los electrodos como de las cavidades erosionadas con electrodos con forma de cuña a 60°.

3.5.2.1 ALTERNATIVAS PARA LA MEDICIÓN DE ELECTRODOS

Proyector de perfiles Mitutoyo PJ-H3000

Se trata de un proyector de perfiles Mitutoyo PJ-H3000 *Fig. 22* que se encuentra en la sala de Metrología del taller Mecánico de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Bilbao.



Fig. 22 Proyector de perfiles Mitutoyo PJ-H3000

El proyector de perfiles o comúnmente denominado comparador óptico es una herramienta de metrología que aplica los principios ópticos para la medición e inspección de piezas y componentes.

El componente a medir se dispone en la mesa del proyector, el cual nos representara por pantalla la silueta del mismo aumentada tantas veces como el objetivo que dispongamos nos permita. A continuación, empleando el display con el que cuenta el proyector de perfiles, podremos realizar las mediciones que deseemos, tanto obtener distintos puntos del perfil, medir radios, distancias, inclinaciones etc.

El proyector de perfiles con el que cuenta la sala de metrología anteriormente mencionada en la que se realizaron las mediciones, cuenta con 3 tipos de aumentos (X10, X50 Y X200).

En cuanto a la medición de electrodos mediante el proyector de perfiles, se realizaron pruebas de medición de los mismos siguiendo el siguiente procedimiento:

1- Disposición del electrodo instalado en el portaelectrodos en la mesa del proyector de perfiles y alineación del mismo: Tomando como referencia las caras verticales del electrodo con forma de cuña a 60° se procedió a alinear el electrodo para obtener mediciones lo más exactas posibles.

2- Disposición del origen de coordenadas y obtención del perfil característico del electrodo: Se situó el origen de coordenadas en una de las caras superiores del portaelectrodos para disponer de un punto fijo el cual se fuese a mantener en la misma localización tras la erosión.

A continuación se tomaron a mano del orden de 100 coordenadas correspondientes al perfil del electrodo para poder representar el electrodo de la manera más fiable posible.

Dicho procedimiento de medición se comparó con los resultados obtenidos de la medición de dicho perfil en el perfilómetro confocal Leica DCM3D y se analizaron los factores favorables y desfavorables de las mediciones obtenidas y el procedimiento de medición *Tabla 1*.

A favor	En contra
Facilidad en el manejo del proyector de perfiles.	Incertidumbre de las mediciones muy alta ($10\mu\text{m}$).
Disposición sencilla del origen de coordenadas de las mediciones.	Interpretación de las mediciones variable en función de la persona que las realiza.
Seguridad en la manipulación de la herramienta (<i>muy difícil colisionar con el objetivo</i>).	Tiempo de obtención de las mediciones (<i>10 minutos para alinear y medir 100 puntos aprox.</i>). Frente a 3 minutos por medición empleando el Leica DCM 3D (<i>1200 puntos</i>).
	Los puntos obtenidos han de pasarse a formato.txt manualmente uno a uno. Lo que implica un mayor tiempo de obtención de las mediciones

Tabla 1 Puntos a favor y en contra de las mediciones empleando el proyector de perfiles

Finalmente, y teniendo en cuenta los puntos a favor y en contra mencionados anteriormente, se descartó el empleo del proyector de perfiles para la medición de los electrodos debido a la gran cantidad de tiempo necesario para la obtención de una cantidad de puntos muy inferior a los obtenidos mediante el empleo del perfilómetro confocal. Al igual que la necesidad de pasar los puntos a mano a un archivo.txt para su posterior interpretación.

De la misma manera, para la obtención de los tres perfiles característicos del electrodo sería necesario el rebanado del mismo por dichas secciones con lo cual el tiempo de medición se ampliaría en varias horas, siendo dicha pérdida de tiempo inaceptable.

Microscopio óptico Nikon

Se trata de un microscopio óptico Nikon *Fig. 23* el cual se encuentra en la sala de Metrología del taller Mecánico de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Bilbao. Dicho microscopio tiene como característica la disposición de una cámara digital mediante la cual se pueden obtener imágenes de las mediciones para posteriores análisis.



Fig. 23 Microscopio óptico Nikon

Un microscopio óptico es un microscopio basado en lentes ópticos. También se le conoce como microscopio de luz, (que utiliza luz o "fotones") o microscopio de campo claro.

La resolución de los microscopios ópticos está restringida por un fenómeno llamado difracción que, dependiendo de la apertura numérica (AN o A_N) del sistema óptico y la longitud de onda de la luz utilizada (λ), establece un límite definido (d) a la resolución óptica. Suponiendo que las aberraciones ópticas fueran despreciables, la resolución sería:

$$\delta = \frac{\lambda}{2 * A_N}$$

Normalmente, se supone una λ de 550 nm, correspondiente a la luz verde. Si el medio es el aire, la A_N práctica máxima es de 0,95, y en el caso de aceite de hasta 1,5. Ello implica que incluso el mejor microscopio óptico está limitado a una resolución de unos 0,2 micrómetros.

La obtención de las mediciones del electrodo se realizó siguiendo el siguiente procedimiento:

1- Obtención de la microfotografía del perfil del electrodo: Seleccionando un aumento predeterminado que permitiese una visión correcta del electrodo se obtuvo una microfotografía del mismo empleando la cámara digital de la que dispone el microscopio.

2-Obtención de la microfotografía de la cala: Empleando una cala de dimensiones ya determinadas y empleando el mismo aumento que el empleado para la microfotografía del electrodo se obtuvo una microfotografía de la cala.

3-Interpretación de las dimensiones de la cala y adecuación a las dimensiones del electrodo: Empleando el software Siemens NX se importaron tanto la imagen de la cala como la del electrodo. A continuación se procedió a la medición de la dimensión de la cala en la imagen la proporción con la dimensión real de la misma.

Posteriormente y empleando la proporción obtenida de las mediciones de la cala, se aplicó a la imagen del electrodo obteniendo de tal manera la imagen con las dimensiones reales del electrodo.

4-Obtención del perfil característico del electrodo: Teniendo la microfotografía del electrodo con las dimensiones reales ya aplicadas se procederá a obtener el perfil característico del mismo mediante el comando “*studio spline*” tal y como se explica en el apartado (3.6.1 Marco metodológico). De tal manera obtendremos el perfil característico del electrodo.

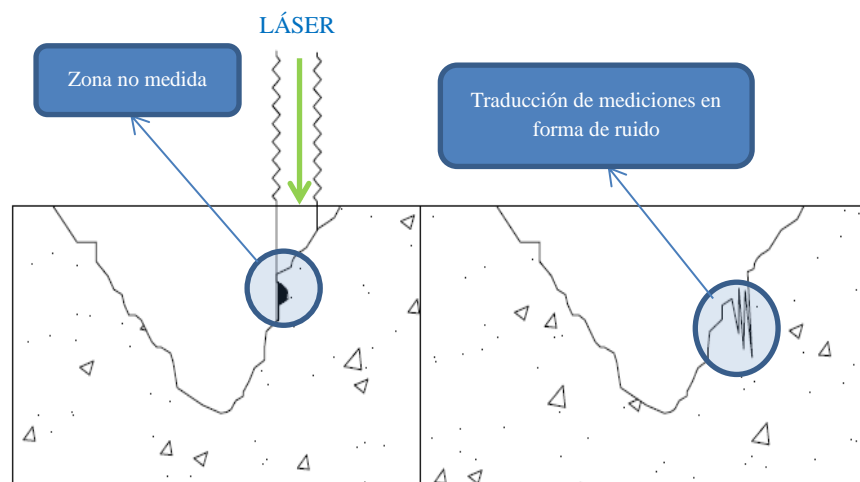
Una vez obtenida las mediciones se analizaron los puntos a favor y en contra de dicho procedimiento de medición en comparación con las mediciones obtenidas en el Leica DCM 3D.

Pero teniendo en cuenta que únicamente el error arrastrado debido a la cantidad de pasos requeridos para las mediciones del perfil y por lo tanto la poca fiabilidad de las mediciones resultantes, sumando a la necesidad de un rebanado de los electrodos para la medición de las tres secciones a estudio, se descartó la aplicación de dicho procedimiento.

3.5.2.2 ALTERNATIVAS PARA LA MEDICIÓN DE LAS CAVIDADES

Leica DCM 3D

Teniendo en cuenta los resultados satisfactorios obtenidos en la medición de los electrodos tal y como se explica detalladamente en el apartado (*Marco metodológico 3.6.2*) empleando el perfilómetro Leica DCM 3D. Se realizó la medición de una cavidad para verificar la exactitud de dicho procedimiento en la medición de cavidades.



*Fig. 24. Izda.) Representación del proceso de medición del LEICA DCM3D.
Dcha.) Representación del perfil con ruido tras la medición*

Puesto que la problemática de medición del perfilómetro en la medición de cavidades reside en la existencia de sombras proyectadas debido al haz de luz láser del perfilómetro *Fig. 24* y en los brillos correspondientes a la superficie a medir. A su vez las mediciones en cavidades resultan erróneas debido a la dificultad de medición en las zonas más profundas de las mismas.

Al medir las cavidades mediante el perfilómetro se verificó que las mediciones resultaban en cavidades aproximadamente $130\mu\text{m}$ menores que la realidad *Fig. 25*, quedando dichas mediciones invalidadas por su carencia de precisión.

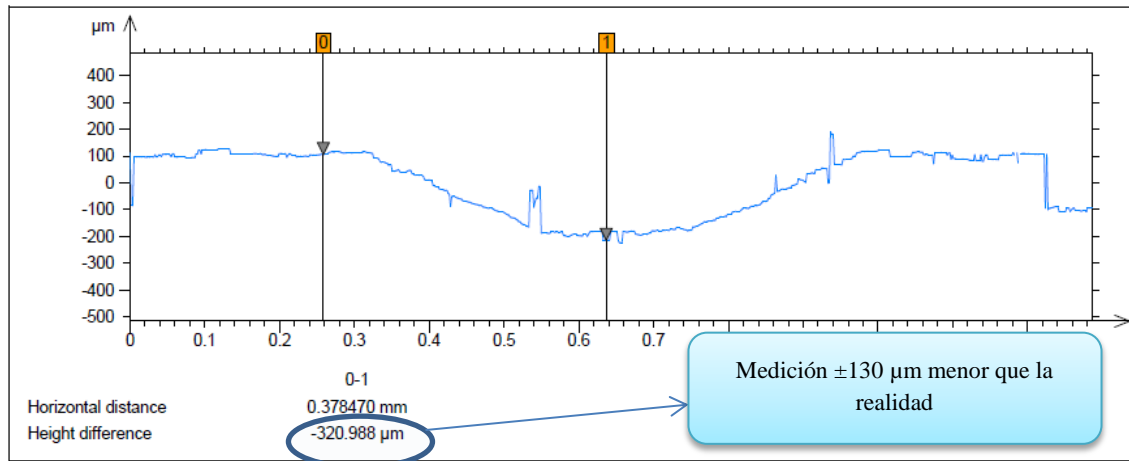


Fig. 25 Error de medición en una cavidad de profundidad real de $0,45\text{mm}$

Proyector de perfiles Mitutoyo PJ-H3000

Se probó la medición de las cavidades empleando el proyector de perfiles Mitutoyo PJ-H3000 empleando el mismo procedimiento descrito anteriormente para las mediciones de los electrodos.

Finalmente se descartó el empleo de dicha herramienta de medición debido al tiempo requerido para la consecución de los pasos necesarios para la medición final de las cavidades.

Empleo de resinas de metacrilato de metilo para la obtención del positivo la cavidad y su posterior medición empleando el perfilómetro confocal Leica DCM 3D

El metacrilato de metilo es un compuesto químico de fórmula $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$. A temperatura ambiente se presenta como un líquido incoloro de aspecto similar al agua, tóxico e inflamable. Es conocido principalmente por ser el monómero utilizado para producir polimetilmetacrilato (PMMA).

Se empleó metacrilato de metilo para la obtención del positivo de la cavidad tras la erosión, para posteriormente medirla empleando el perfilómetro confocal. La precisión de dicho producto es de $1\mu\text{m}$ y su empleo sencillo.

Para la preparación de la cavidad se realizó una “cuna” empleando un material plástico de manera que la mezcla se depositase de manera homogénea por toda la cavidad y a su vez dispusiésemos de una base firme para posteriormente poder situar la cavidad para su medición.

A continuación se preparó la mezcla compuesta por un tercio de líquido y dos tercios de polvo de metilmetacrilato hasta obtener una densidad lo suficientemente aceptable como para que representase fielmente la cavidad *Fig. 26*.

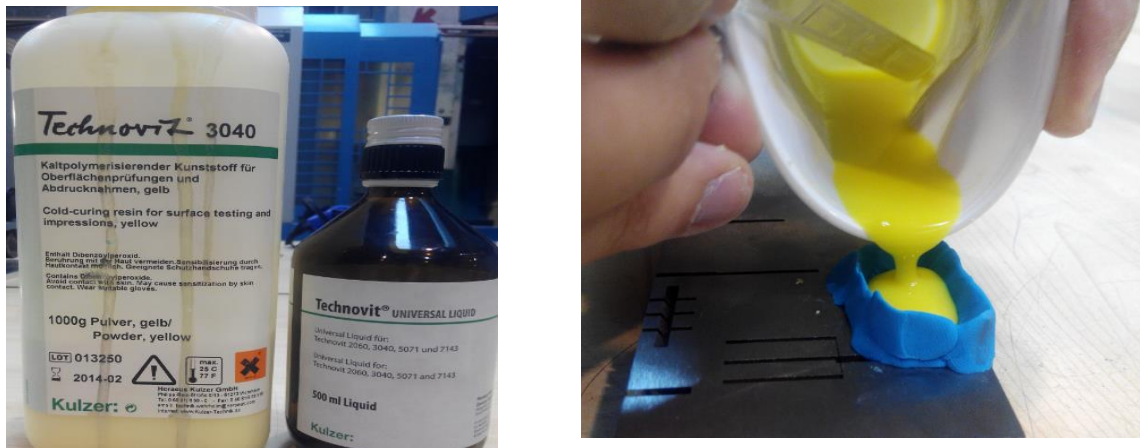


Fig. 26 Izda.) Componentes necesarios para la mezcla. Dcha.) Aplicación de la mezcla en la cavidad

Se dejó reposar la mezcla durante dos horas y posteriormente se produjo a la extracción de la cavidad *Fig. 27*. Una vez obtenida la cavidad, se procedió a realizar las mediciones en el perfilómetro Leica DCM3D, obteniendo mediciones erróneas *Fig. 28*.

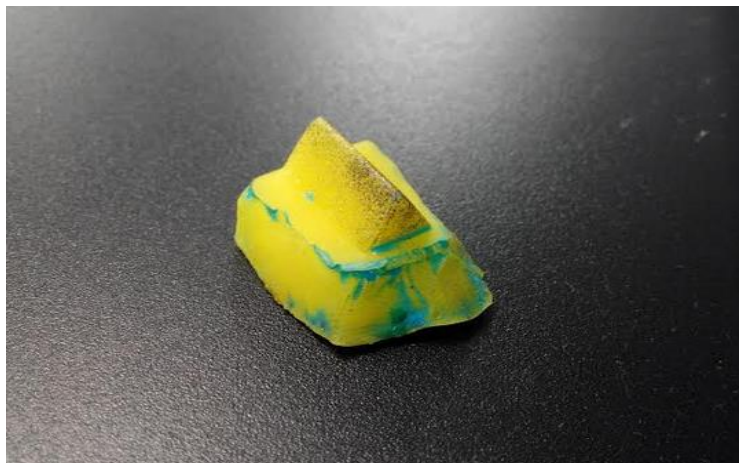


Fig. 27 Resultado final de la cavidad

Las mediciones erróneas en éste caso fueron debidas a la refracción del haz de luz láser proveniente del perfilómetro debido a los brillos existentes en la superficie de la cavidad por la resina *Fig. 28*.

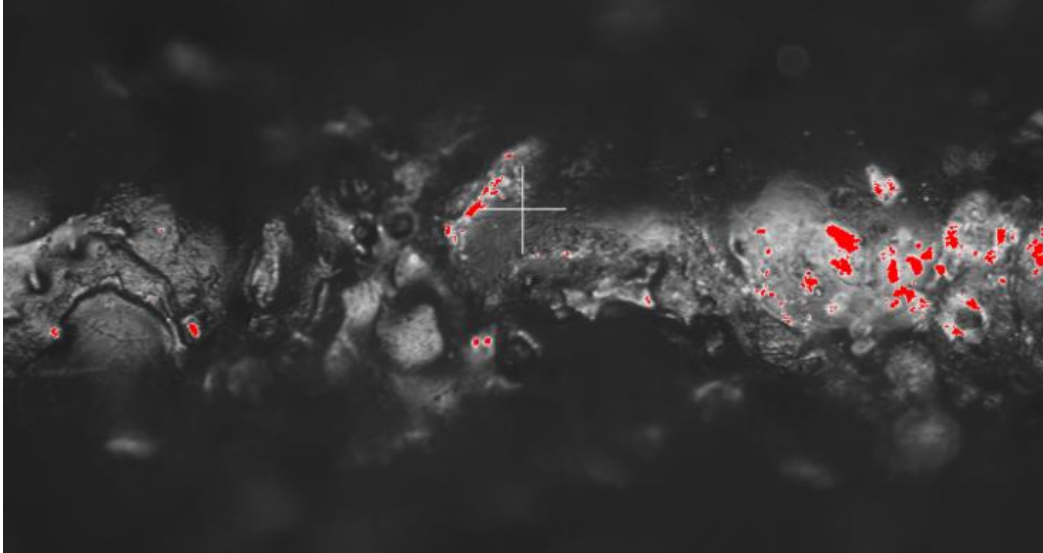


Fig. 28 Brillos en la superficie de la cavidad durante la medición

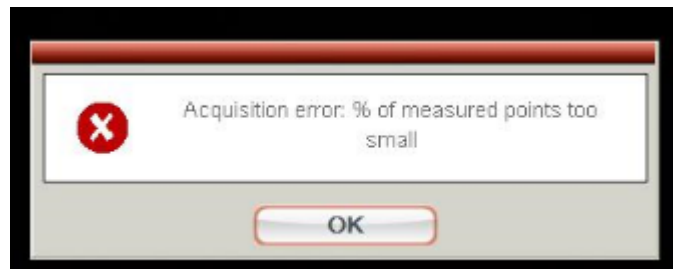


Fig. 29 Error de medición

Empleo de resinas de metacrilato de metilo para la medición de un perfil del electrodo mediante el microscopio óptico Nikon

Debido a la imposibilidad de medir el positivo de la cavidad obtenido mediante el empleo de resinas en el perfilómetro confocal. Se procedió a rebanar la cavidad y medirla empleando el microscopio óptico Nikon.

Puesto que se trata de un material no conductor, el rebanado preciso de la cavidad empleando el corte por hilo es imposible, y debido a sus pequeñas dimensiones, la única manera de realizar la rebanada fue empleando una simple sierra de mano.

El empleo de la sierra para el rebanado supone una completa pérdida de perpendicularidad a la hora de rebanar las resinas, lo que pese al aceptable resultado obtenido a simple vista *Fig. 30*, la realidad fue la de un rebanado completamente impreciso y consecuentemente inválido para las mediciones.

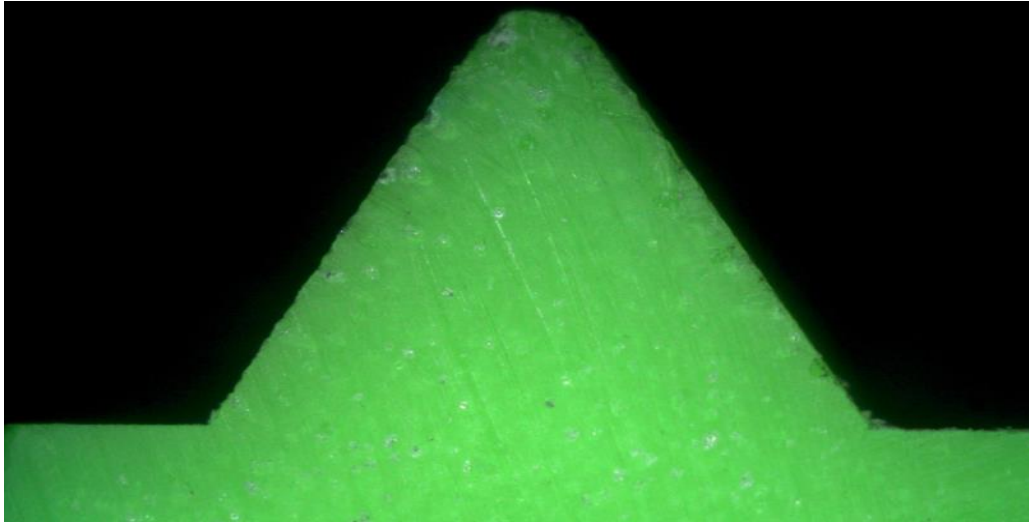


Fig. 30 Visualización de la rebanada empleando el microscopio óptico Nikon

3.5.4 ALTERNATIVAS PARA LAS EROSIONES CON ELECTRODOS PARA BLISK

A continuación se explicarán detalladamente las alternativas probadas tanto para la medición de los electrodos como de las cavidades erosionadas con electrodos para Blisk

3.5.2.1 ALTERNATIVAS PARA LA MEDICIÓN DE ELECTRODOS

Debido la compleja geometría de los electrodos para Blisk *Fig. 31*, y teniendo en cuenta las mediciones descartadas para los electrodos con forma de cuña a 60° , se descartó directamente el empleo del microscopio Nikon para la medición de los electrodos por los inconvenientes mencionados anteriormente.

A su vez, y teniendo en cuenta el funcionamiento del perfilómetro confocal Leica DCM 3D, se descartó su uso por su incapacidad para realizar las mediciones requeridas para éste tipo de electrodos.

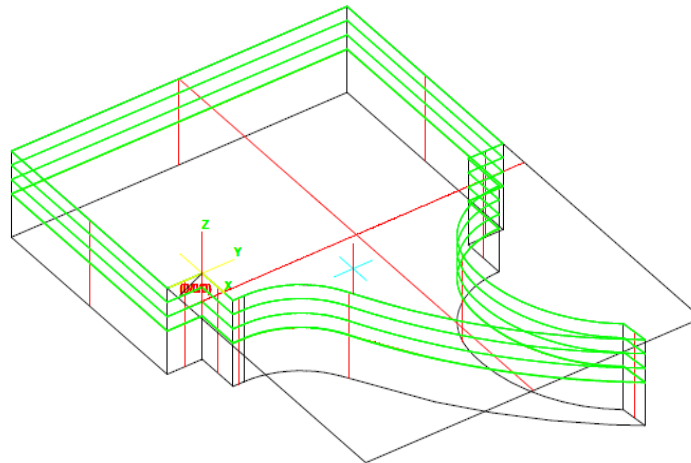


Fig. 31 Representación del electrodo, la disposición del origen de coordenadas y las secciones a medir (verde)

Es por ello que la única alternativa realista aparte de la finalmente empleada (*Medidor por coordenadas Zeiss MC-850*) es la del empleo del proyector de perfiles para la medición de los electrodos.

La metodología de medición es la misma que la mencionada anteriormente para los electrodos con forma de cuña a 60°. El tiempo empleado para la medición de los perfiles mediante el proyector de perfiles es algo mayor que el requerido por la máquina de medir por coordenadas.

La problemática de las mediciones de dichos electrodos mediante este procedimiento radica en la necesidad del rebanado del electrodo para la medición de cada uno de los perfiles, aumentando el tiempo final de medición en el orden de 4 horas.

A su vez, la incertidumbre de las mediciones obtenidas mediante el empleo del proyector de perfiles (10 μ m) es mayor que las mediciones obtenidas mediante el medidor por coordenadas, lo que sumado a o anteriormente explicado, descarta directamente el empleo del proyector de perfiles como herramienta a emplear para la medición de los electrodos.

3.5.2.2 ALTERNATIVAS PARA LA MEDICIÓN DE LAS CAVIDADES

Debido al mayor tamaño de las cavidades erosionadas mediante el uso de estos electrodos, en comparación con las cavidades erosionadas con los electrodos con forma de cuña y teniendo en cuenta las pruebas realizadas anteriormente para las cavidades erosionadas empleando dichos electrodos, se descartó el empleo del proyector de perfiles para la medición de las cavidades.

A su vez, la compleja geometría de las mediciones conlleva la incapacidad del empleo de resinas para la representación de la cavidad y su posterior medición.

Por lo tanto la única alternativa real para la medición de las cavidades es:

Empleo del perfilómetro confocal para la obtención de una microfotografía mediante la opción Stitching

Debido a las dimensiones de las cavidades, y teniendo en cuenta el rebanado realizado en las mismas para su posterior interpretación. Se optó por la realización de una microfotografía mediante el empleo de la opción de la que dispone el perfilómetro Leica DCM 3D “Stitching”.

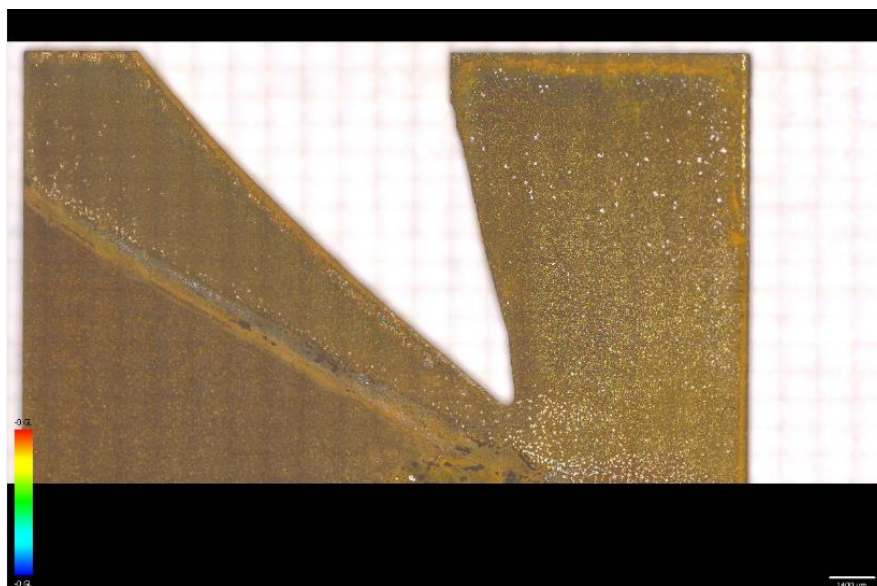


Fig. 32 Microfotografía obtenida empleando la opción Stitching

Tal y como se explica en el apartado (3.2 Terminología), el Stitching es la obtención de una microfotografía de dimensiones mayores que las que se pueden obtener mediante una única microfotografía. La microfotografía final será el resultado del solapamiento de n microfotografías generando una única Fig. 32.

Se analizaron las mediciones obtenidas y se comprobó que las dimensiones de la microfotografía final obtenidas mediante Stitching no eran correctas. El error obtenido en las microfotografías era debido a que para la obtención de la microfotografía final era necesario un Stitching de 200 microfotografías. La medición y solapamiento de un número tan grande de imágenes incidía en un error de alrededor de 200 μm en las dimensiones finales de la imagen.

Debido al error final de las mediciones se descartó el empleo de dicho procedimiento para la medición de las cavidades

3.6 SOLUCIÓN ADOPTADA

3.6.1 MARCO TEÓRICO

3.6.1.1 INTRODUCCIÓN

La electroerosión es un proceso no convencional de mecanizado basado en la generación de descargas eléctricas controladas entre dos elementos conductores en presencia de un líquido denominado fluido dieléctrico. Uno de los elementos constituye el útil de arranque, conocido genéricamente como electrodo, el otro elemento es la pieza, o material a conformar, siendo ambos necesariamente conductores de electricidad.

Cada una de las descargas produce el arranque de una cierta cantidad de material, tanto de la pieza a mecanizar como del electrodo. El arranque de material de la pieza es el fin u objetivo del proceso, mientras que el arranque de material en el electrodo es considerado como desgaste, y debe, por tanto, ser minimizado.

El proceso de arranque de material, es fundamentalmente una combinación de fenómenos térmicos y mecánicos. La temperatura alcanzada por cada descarga, produce la vaporización del material de la pieza el cual es arrastrado en forma de carbonilla fuera de la zona de erosión por el dieléctrico circulante.

Otra de las funciones principales del fluido dieléctrico, es la de aislar de manera controlada el electrodo y la pieza, permitiendo el paso de una corriente eléctrica entre ambos, en forma de avalancha a intervalos definidos. Dichos intervalos son muy cortos, del orden de microsegundos, por lo que aunque la cantidad de material erosionado por unidad de descarga es muy pequeña, pese a ello el volumen total erosionado al cabo de cierto tiempo resulta apreciable.

Debido a la importancia del fluido dieléctrico en el proceso de electroerosión, debe de entenderse bien su papel en dicho proceso.

Los fluidos empleados en electroerosión, agua desionizada en el caso de corte por hilo y aceite en el caso de erosión por penetración no son conductores de electricidad en condiciones normales. En el caso del agua, se toma directamente de la red general, y se desioniza, es decir se reduce su conductividad haciéndola pasar por un lecho de resinas. Bajo las condiciones impuestas por las máquinas de electroerosión, dichos fluidos se vuelven conductores localmente y durante un intervalo de tiempo limitado, durante el cual se produce la descarga. Tras finalizar dicha descarga se recuperan las propiedades aislantes quedando la zona de erosión preparada para una nueva descarga.

La geometría del electrodo determinada directamente la geometría final alcanzada tras la erosión. Durante el proceso de erosión, no existe contacto físico entre electrodo y

pieza, sino que entre ambos se establece una distancia denominada con el nombre de *gap*. El *gap*, es el espacio entre el electrodo y la pieza en el cual se producen las descargas, dicho espacio queda ocupado por el fluido dieléctrico de manera que es a través del mismo como se establecen las descargas *Fig. 33*.

Si el *gap* no existiera se producirían situaciones de cortocircuito y el mecanizado resultaría degradado. A su vez, si el *gap* tuviese una dimensión superior a la necesaria, no sería posible establecer una sucesión estable de descargas.

Como consecuencia, el *gap* constituye un parámetro fundamental del proceso de electroerosión, no solo porque determina las condiciones de descarga, sino porque su dimensión, que puede ir desde una micras hasta las centésimas, debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar el electrodo, debido a que la geometría final de la cavidad erosionada quedará determinada directamente por la geometría del electrodo y la distancia del *gap*.

3.6.1.2 ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN Y ELECTROEROSIÓN POR HILO

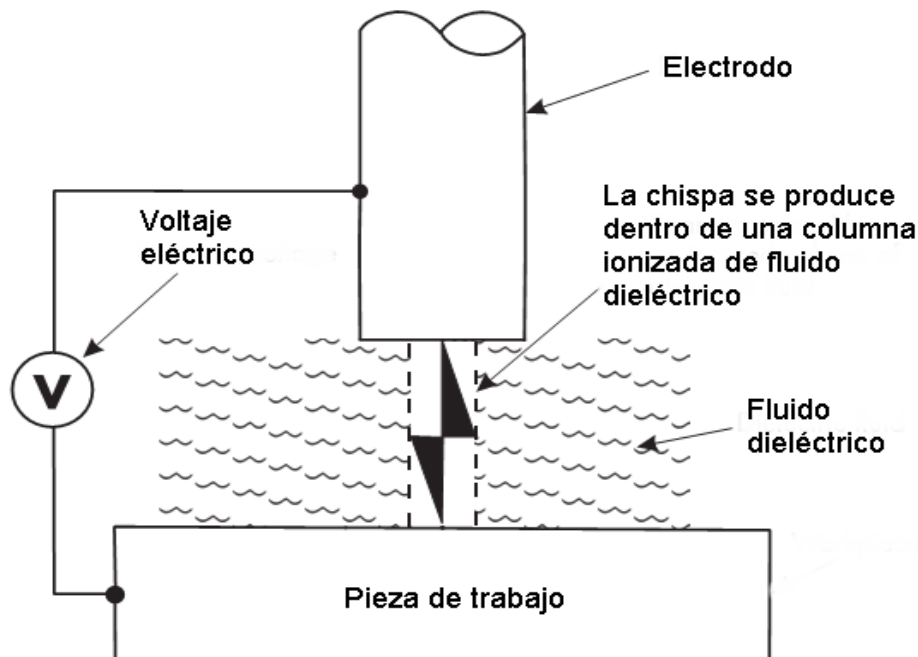


Fig. 33 Representación esquemática del proceso de electroerosión

Actualmente, existen dos variantes a las que ha dado lugar el mecanizado de materiales mediante descargas eléctricas, la electroerosión por penetración y la electroerosión por hilo.

Durante varias décadas el término electroerosión se utilizó para la descripción del mecanizado de materiales mediante descargas eléctricas controladas entre un electrodo de geometría predeterminada y la pieza y aún hoy en muchos ámbitos se identifica así, reservando el término corte por hilo para la electroerosión por hilo.

Electroerosión por penetración (Sinking Electrical Discharge Machining, SEDM)

En el momento de su aparición la tecnología SEDM revolucionó el mundo de la fabricación de utillajes. Hasta ese momento no era posible generar geometrías complejas dentro de tolerancias sobre piezas de elevada dureza, principalmente el aceros de herramientas con tratamientos térmicos, por lo que la fabricación de consistía en mecanizar el acero previo a su tratamiento térmico.

Una vez tratada la pieza y debido a las dilataciones producidas debido a al tratamiento térmico el ajuste para conseguir las tolerancias finales pasaba a ser una tarea artesanal la cual consumía una gran cantidad de tiempo de mano de obra y por lo tanto sobrecostos innecesarios, elevando el costo final de la pieza o herramienta y alargando los plazos de entrega.

La electroerosión permitió por primera vez el mecanizado de geometrías complejas sobre piezas tratadas térmicamente, independientemente de la dureza alcanzada en dicho tratamiento. La electroerosión por penetración permite mecanizar piezas con dureza por encima de 60 HRC debido a que las características mecánicas de la pieza no influyen en el proceso.

Le electroerosión por penetración actualmente está implantada en diversos sectores industriales, cada uno de ellos presentando diversos requisitos de pieza en cuanto a acabado superficial y tolerancias dimensionales. Una correcta selección de electrodo, de fluido dieléctrico y de los parámetros de operación permite al proceso de SEDM el cumplimiento de dichos requisitos. La siguiente tabla muestra algunas aplicaciones típicas de ésta tecnología junto a los requisitos de la pieza *Tabla 2, Fig. 34*.

<i>Sector</i>	<i>Tipo de acero</i>	<i>Dureza</i>	<i>Rugosidad</i>	<i>Tolerancias</i>
Forja	F-1252	42-60 HRC	5-10 μm	0,2 mm
Inyección de plásticos	F-5318	42-50 HRC	1 μm	0,01 mm
Inyección de aluminio	F5318	50-55 HRC	1-2 μm	0,05MM

Tabla 2 Empleo industrial del mecanizado de materiales empleando electroerosión por penetración



Fig. 34 Fig. Molde de inyección de plástico fabricado por SEDM.

A la vista de lo expuesto, resulta muy claro que la fabricación del electrodo es un punto crítico en el proceso de erosión por penetración. Las dimensiones finales de la cavidad serán las mismas que las del electrodo incrementadas en la dimensión del gap. Por lo tanto cualquier error en la fabricación del electrodo quedará directamente plasmado en la cavidad. En lo que se refiere al acabado superficial, pese a que lo que influye directamente es el parámetro VDI empleado para la erosión, también depende del pulido del electrodo y de su calidad. Desde el punto de vista económico, la fabricación del electrodo tiene un peso importante puesto que implica la generación de los programas de CAM, la selección adecuada de la herramienta y condiciones de corte y el uso de centros de mecanizado adecuados, especialmente cuando el material del electrodo como en el estudio realizado, es el problemático grafito Fig. 35.

Si a todo esto se le añade el desconocimiento actual del desgaste de los electrodos, los costes de mecanizado se multiplican debido a que en función de la erosión a realizar, se utilizan una cantidad de electrodos superior a la que se podría emplear si se tuviese el conocimiento del desgaste de los electrodos.

Actualmente existen diferentes alternativas para materiales de electrodo, siendo las dos opciones más habituales el grafito en sus diferentes calidades, y el cobre electrolítico. Los criterios de selección de un material de electrodo son la capacidad de arranque requerida en el proceso de erosión, el acabado superficial de la pieza, la dificultad de mecanizado del electrodo, y el coste de fabricación del mismo. El dieléctrico juega un papel primordial en el proceso de electroerosión, sus propiedades y criterios de selección serán analizados posteriormente.

Como en toda operación de mecanizado de materiales, los conceptos de desbaste y acabado tienen plena vigencia en el proceso de electroerosión por penetración. Las

condiciones de arranque de material en cuanto a parámetros eléctricos, tipo de electrodo e incluso el tipo de dieléctrico difieren de las condiciones destinadas a obtener tolerancias precisas y un acabado superficial fino. A estas ideas debe añadirse un tercer criterio de gran importancia en la operación y en el cual se centrará el estudio, el desgaste del electrodo.



Fig. 35 Electrodo de grafito y la cavidad generada mediante su uso

Es habitual encontrar diferentes recomendaciones en cuanto a parámetros de erosión para reducir el desgaste del electrodo, pero son únicamente recomendaciones dado que la manera en la que se desgasta el electrodo durante la erosión es desconocida y teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado es necesario su conocimiento para alcanzar mayor precisión en el proceso de electroerosión por penetración y para la reducción de costos de mecanizado mediante éste proceso.

A modo orientativo y pese a que las cifras dependen de una multitud de factores aparte de los ya mencionados, resulta realista hablar de capacidades de arranque máxima en torno a $1500-2000 \text{ mm}^3/\text{min}$, mecanizando acero templado. Si el objetivo es conseguir el mínimo acabado superficial, se pueden alcanzar rugosidades del orden de $0,4 \mu\text{m Ra}$ en acero, aunque si se aplican estrategias especiales implicando movimiento orbital de electrodo y tiempos de trabajo muy largos pueden obtenerse acabados inferiores del orden del pulido ($0,1 \mu\text{m Ra}$) en áreas pequeñas y determinados aceros.

Electroerosión por hilo (Wire electrical discharge Machining, WEDM)

Aunque su aparición industrial ha sido mucho más reciente, el corte por electroerosión por hilo ha alcanzado gran popularidad en muy poco tiempo, siendo hoy en día una tecnología plenamente consolidada y con un mercado en expansión.

Pese a que el fundamento físico del proceso es el mismo que en el caso de la electroerosión por penetración, es decir, el arranque es producido por la aplicación de

descargas controladas entre electrodo y pieza, su configuración y los campos de aplicación están bien diferenciados.

En el caso de la electroerosión por hilo, el electrodo es un hilo de material conductor, el cual genera una geometría pasante en la pieza en función de la trayectoria recorrida *Fig. 36*.

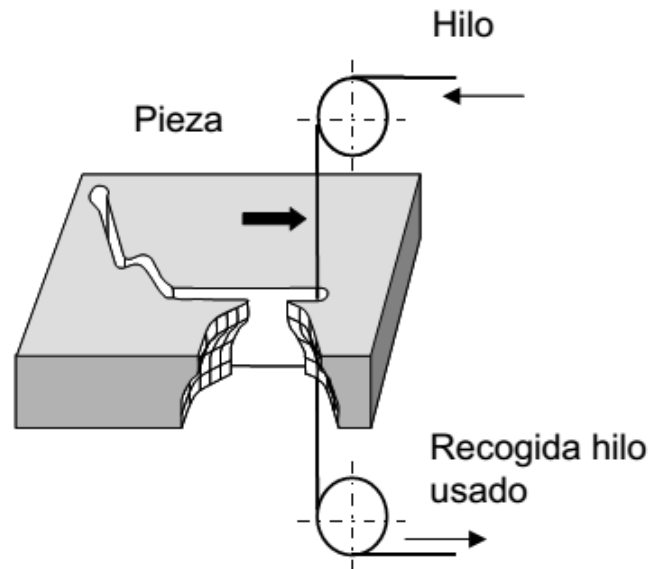


Fig. 36 Representación esquemática del proceso de electroerosión por hilo

A diferencia de en la electroerosión por penetración, no es requerida una forma específica de electrodo, por lo tanto el coste de fabricación de electrodo desaparece y su desgaste salvo en casos específicos como el corte de grandes espesores, no es tenido en cuenta.

En la *Fig. 36*, se puede observar esquemáticamente el proceso de electroerosión por hilo. Tal y como se puede apreciar, existe un movimiento relativo entre electrodo y pieza. Dicho movimiento es el responsable de la geometría que se genera. En función de la configuración de la máquina, el movimiento puede ser de la mesa (pieza), o del hilo. El proceso de electroerosión por hilo no permite la realización de cavidades ciegas. Al igual que en la electroerosión por penetración, existe un gap entre hilo y pieza, cuya influencia sobre las dimensiones finales ha de tenerse en cuenta.

Las aplicaciones del proceso, se centran en el campo de la fabricación de utillajes en aceros tratados. De nuevo, el proceso proporciona la posibilidad de mecanizar materiales tras ser tratados térmicamente. De ese modo, troqueles de corte y doblado, insertos para moldes, etc. Son componentes clásicos fabricados por esta tecnología.

Sin embargo en los últimos años otros sectores están mostrando interés en el proceso, especialmente en la industria aeronáutica y los fabricantes de útiles en materiales extra-duros, como puede ser el diamante policristalino.

La tendencia actual es considerar el corte por hilo como un proceso de alta precisión. En éste sentido los fabricantes están haciendo continuos esfuerzos por reducir las tolerancias y los acabados superficiales finales.

Una de las características más significativas de la electroerosión por hilo es la capacidad de realizar cortes mediante el desplazamiento relativo de las boquillas superiores e inferiores consiguiendo un tipo de corte denominado corte cónico. La potencialidad de esta variable queda definida si se consideran los ángulos de salida que presentan la mayor parte de los útiles de conformado.

La eficiencia del proceso de electroerosión por hilo viene determinada por la conjunción de una serie de factores de los cuales los más importantes son el tipo de hilo, el dieléctrico y los parámetros eléctricos. Otros parámetros a tener en cuenta son, los sistemas de fijación empleados para las piezas, la automatización del proceso o la tecnología de corte empleada.

En lo referido al electrodo, tal y como se ha comentado se trata de un hilo metálico de diámetro normalmente inferior a 0,3mm. Existen diferentes alternativas de material de hilo en función de la aplicación.

Para evitar la rotura debido a los efectos térmicos inducidos por las continuas descargas y al efecto mecánico de la tensión a la que está sometido el hilo, el hilo es renovado de forma continua durante el proceso de electroerosión. El hilo ya empleado para el corte se recoge a la salida y no puede ser reutilizado.

El dieléctrico juega un papel fundamental en el proceso de electroerosión. En la mayor parte de las máquinas de hilo el dieléctrico es agua desionizada.

El dieléctrico puede tomar parte en el proceso ya sea cubriendo totalmente la pieza a mecanizar y por lo tanto manteniendo el proceso de electroerosión por hilo sumergido, o siendo aplicado a presión sobre la zona de corte.

El dieléctrico tiene diversas funciones dentro del proceso de electroerosión, el control de la descarga, eliminación del material arrancado de la zona de erosión y a refrigeración de hilo con el objetivo de reducir el riesgo a la rotura del mismo.

Cabe mencionar que en el caso de la electroerosión por hilo se manejan conceptos de desbaste y acabado, pese a que la terminología es algo diferente.

Se denomina primer corte al corte con parámetros muy energéticos destinados a arrancar material en gran cantidad. Tras el primer corte, si los requisitos que ha de cumplir la pieza no son alcanzados, el hilo realiza la misma trayectoria que la empleada en el primer corte pero con parámetros de corte diferentes pudiendo mejorar la rugosidad y el acabado alcanzado previamente por el primer corte. Cada uno de los

ciclos de corte realizado tras el primer corte son conocidos como repasos. Dependiendo de la exigencia de la pieza a mecanizar, se han llegado a desarrollar tecnologías con hasta 6 repasos consecutivos, pese a ello lo más común es hablar del primer corte y uno, corte y dos, o corte y tres repasos.

De modo general, y pese a la cantidad de factores que afectan directamente al proceso de electroerosión por hilo, en la actualidad pueden situarse las máximas velocidades de corte por debajo de los $500\text{mm}^2/\text{min}$ en acero de herramientas. El espesor máximo de pieza que puede ser cortado en máquinas convencionales ronda los 600mm pese a que hay máquinas especiales que son capaces de realizar cortes con espesores mayores, y un valor realista de la mejor rugosidad alcanzable estaría alrededor de los $0,3\ \mu\text{m Ra}$.

3.6.1.3 MATERIALES DE PIEZA MÁS HABITUALES

De manera general, puede decirse que cualquier material con una resistividad eléctrica por debajo de los $100\ \Omega\cdot\text{cm}$ es susceptible de ser mecanizado mediante electroerosión. Se trata de un umbral de resistividad lo suficientemente alto como para que todos los materiales metálicos y algunos no metálicos puedan ser procesados mediante ésta técnica. Sin embargo, la utilización económica del proceso solo está justificada cuando la maquinabilidad del material sea baja. Es por ello que el uso de la electroerosión se centra fundamentalmente en los siguientes grupos de materiales: acero de herramientas, aleaciones aeronáuticas y materiales extra duros.

Acero de herramientas

Por ser habitualmente empleados en nuestro entorno, se darán algunos ejemplos de aceros de herramientas mecanizados mediante electroerosión, aunque por supuesto hay mucho más casos.

UNE F-5211 / AISI D2 / ISO 160 CrMoV12 (denominación comercial *Sverker 21*, de *Uddeholm*). Se trata de un acero de herramientas de trabajo en frío, con alto contenido de carbono y cromo aleado con molibdeno y vanadio, caracterizado por una alta resistencia al desgaste, alta resistencia a la compresión, alta dureza superficial después del temple, buenas propiedades de temple profundo, excelente estabilidad en el temple y buena resistencia al revenido. Este acero se recomienda para la fabricación de herramientas que deban tener una resistencia muy alta al desgaste, combinada con una tenacidad moderada. Además se utiliza para cortar materiales gruesos y duros, y en herramientas de dar forma expuestas a esfuerzos de flexión y cargas de impacto. Sus aplicaciones más comunes son cizallas, herramientas de embutición profunda, herramientas de corte de alto rendimiento, herramientas de extrusión, moldes de plástico, instrumentos de medida, etc.

UNE F5318 / AISI H13 / ISO 40CrMoV5 (denominación comercial *Orvar Supreme*, de *Uddeholm*). Se trata de un acero de alta tenacidad y resistencia en caliente, buena

conductividad térmica y es insensible a la formación de grietas por calor. Este acero puede ser nitrurado y también es apto para temple al vacío. Presenta un 0,39% de carbono y 5,1% de cromo, aleado con molibdeno y vanadio. Entre sus aplicaciones más comunes se encuentran casquillos de fundición inyectada, cuchillas para cortar en caliente, fabricación de cuerpos huecos y cámara hueca, herramientas de extrusión en caliente, herramientas para fundición inyectada, insertos de estampa, etc.

UNE F-528 bonificado / ISO 55NiCrMoV7. Es un acero clásico de trabajo en caliente, con 0,56% de carbono, con contenido en cromo y níquel y aleado con molibdeno y vanadio. Sus aplicaciones más comunes incluyen estampas y matrices de forja de todo tipo, matrices de conformado, punzones de extrusión, portamatrices, anillos y placas de sujeción, cuchillas de corte en caliente y moldes para la inyección de plástico.

Superaleaciones

Las aleaciones de níquel, cromo y otros compuestos duros se utilizan de manera amplia en la industria aeronáutica debido a su alta tensión última y su dureza a alta temperatura. Probablemente entre estas aleaciones una de las más populares sea el Inconel 718 que se presenta con diferentes tratamientos térmicos. Este tipo de materiales se utiliza principalmente en la producción de componentes para aviación que deben trabajar a temperaturas por encima de 500°C, por ejemplo álabes y hélices de compresores, discos, ejes, carcasas y anillos, etc.

Sin embargo la combinación de propiedades tales como una baja conductividad térmica, alta resistencia a la deformación plástica, tendencia al endurecimiento mecánico y una alta afinidad química con los materiales de herramienta provocan que el mecanizado de Inconel 718 sea extremadamente difícil, ya que las propiedades anteriormente citadas resultan en temperaturas de corte elevadas, tensiones en las piezas y una delgada capa adherida en el interfaz herramienta pieza durante el mecanizado. En concreto, las aleaciones base níquel poseen una baja conductividad térmica y una gran tendencia a la abrasión ya soldarse principalmente sobre la cara de desprendimiento de la herramienta de corte.

A esto hay que añadir que estas aleaciones tienen un significativo endurecimiento mecánico durante la deformación plástica del corte debido a su matriz austenítica.

Estas dificultades obligan al usuario a utilizar parámetros de corte excesivamente conservadores, con los elevados tiempos de mecanizado y costes asociados que esto implica.

Por todo ello, la electroerosión resulta una alternativa de interés para la industria aeronáutica. Probablemente las mayores retenciones se encuentran en los estrictos controles de integridad superficial que han de superar los componentes aeronáuticos con el fin de asegurar su resistencia a la fatiga termo mecánica. Debe tenerse en cuenta que

la naturaleza térmica de la electroerosión puede afectar a dicha integridad. Sin embargo, tanto fabricantes de máquinas como usuarios de la tecnología se están esforzando por desarrollar tecnologías tanto de hilo como de penetración que minimicen dichos daños. Las capacidades de arranque dependen de la composición química de la aleación concreta de que se trate. En el caso de Inconel, debido a su elevado contenido en hierro, las velocidades son cercanas a las del acero común tanto en hilo como en penetración.

Materiales extra duros

En éste grupo se engloban materiales avanzados de extrema dureza como pueden ser ciertas cerámicas y materiales compactos como el diamante policristalino (PCD). En general, la conductividad eléctrica de estos materiales es bastante reducido en comparación con la de los materiales metálicos y es por ello que en muchos casos o pueden ser mecanizados por electroerosión. Este es el caso de una cerámica como la alúmina (Al_2O_3), muy utilizada.

Sin embargo en otros casos la resistividad eléctrica está por debajo del umbral de los 100 Ω .cm previamente mencionado. Es el caso del carburo de silicio (SiC) y el carburo de boro (B_4C) entre otros. Debe tenerse en cuenta que bien por su extrema dureza y fragilidad, o bien por su carácter altamente abrasivo, estos materiales no pueden ser mecanizados por métodos convencionales por lo que debe recurrirse a técnicas no convencionales. En este contexto la electroerosión se convierte en una alternativa viable frente a otras técnicas de mecanizado.

3.6.1.4 LIMITACIONES DEL PROCESO

Pese a todos los aspectos positivos mencionados previamente, la electroerosión también presenta ciertas limitaciones a la hora de evaluar su uso como método de mecanizado.

En primer lugar, la aplicación de la electroerosión queda limitada a materiales de baja resistividad eléctrica por debajo de 100 Ω .cm. Por supuesto, dicha afirmación descarta la posibilidad de mecanizar materiales plásticos, madera, la mayor parte de las cerámicas, etc. Pese a ello, la industria de los utillajes emplea hoy por hoy acero tratados, que son el principal objeto del proceso.

El usuario debe entender que la electroerosión no compite en tasa de arranque con los procesos convencionales de mecanizado. Como la mayor parte de procesos no convencionales, la electroerosión se caracteriza por tener bajas tasas de arranque y un elevado consumo energético. La competencia del proceso radica en la no dependencia de las propiedades mecánicas del material de la pieza y en su elevada precisión.

Por último, es conveniente comentar que muchas aplicaciones están basadas directamente en el conocimiento de operarios experimentados, o bien requieren la realización de un conjunto de pruebas previas.

Ejemplos de esta situación son el diseño del electrodos para SEDM, tanto en lo que se refiere a tener en cuenta gap como a la selección del método de aporte de dieléctrico, o la necesidad de realizar pruebas previas para establecer con exactitud el gap en corte por hilo en ciertas situaciones.

3.6.1.5 ANÁLISIS DEL MECANISMO DE ARRANQUE

La optimización del proceso de electroerosión, tanto por penetración como por hilo, exige un conocimiento profundo de los parámetros que los gobiernan. En general quien se acerca por primera vez a esta tecnología se encuentra con diferencias conceptuales muy importantes con respecto a los procesos de arranque de viruta clásicos.

A continuación se explicarán los distintos mecanismos que gobiernan el arranque en el proceso de electroerosión, los cuales permiten comprender la influencia de los parámetros del proceso sobre la capacidad de arranque, la rugosidad y el desgaste de electrodo.

3.6.1.5.1 EXPLIACIÓN FÍSICA DEL PROCESO: FASES DE DESCARGA

A diferencia de los procesos convencionales de mecanizado en los que el mecanismo de arranque es de naturaleza fundamentalmente mecánica, implicando fenómenos de cizalladura o fenómenos abrasivos en la mayor parte de los casos, en el caso de la electroerosión el arranque es debido a la presencia de descargas eléctricas controladas. Como consecuencia se produce una combinación de fenómenos térmicos, mecánicos e incluso electroquímicos según algunos autores.

Pese a que aún no existe ninguna teoría definitiva sobre el modo de arranque, los distintos autores si están de acuerdo a la hora de identificar las etapas presentes en el desarrollo de la descarga, cada una de las cuales tiene una duración del orden de micro o milisegundos. La comprensión de estas etapas es de importancia crítica puesto que en las mismas intervienen parámetros eléctricos del proceso programables por el usuario en el control de la máquina y que definen aspectos finales de la pieza erosionada, tales como la capacidad de arranque, la rugosidad final de la pieza o el desgaste del electrodo.

Las etapas que se describen a continuación corresponden a la evolución del campo eléctrico en el gap, a su vez gobernado por la tensión, la intensidad y la resistencia eléctrica en el canal de descarga. En este apartado se explicarán en detalle los fenómenos que ocurren en dicho canal para, a continuación, analizar la evolución de dichas variables.

Etapa 1 (Fig. 37): Se establece una diferencia de potencial entre electrodo y pieza creando un campo eléctrico que alcanza su mayor intensidad en el punto de menor resistencia, que puede darse bien, donde el gap toma menor valor debido a la presencia de rugosidades locales tanto en electrodo como en pieza, o bien donde la resistividad del fluido es mínima debido a efectos locales tales como la presencia de partículas conductoras pudiendo ser estas pertenecientes tanto al electrodo como a la pieza que se está mecanizando. En dicho punto comienza a establecerse el canal de descarga.

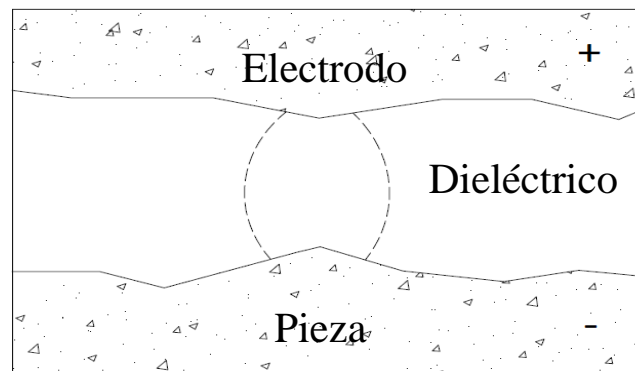


Fig. 37 Primera fase de la ionización e inicio de la ruptura del dieléctrico

Etapa 2 (Fig. 38): Como consecuencia de la aplicación del campo eléctrico comienza la ionización en el canal de descarga de las moléculas del dieléctricos las cuales son inicialmente neutras, lo cual trae como consecuencia la pérdida de resistencia del fluido en ese punto. Este fenómeno es progresivo, de manera que en el instante representado en la figura, aunque la resistencia en el canal ha disminuido, aún no es lo suficientemente baja como para que salte la chispa.

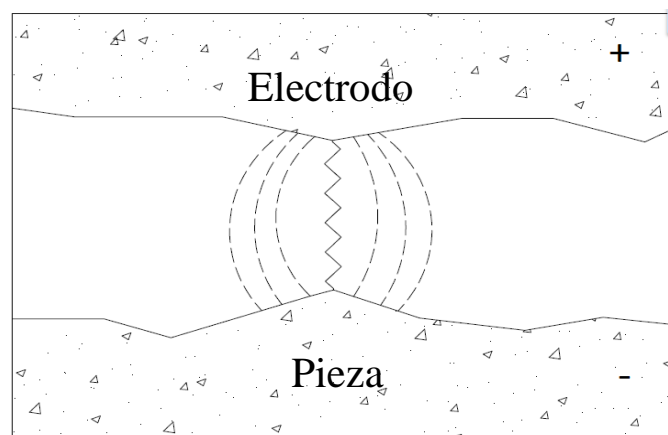


Fig. 38 Segunda fase de la ionización e inicio de la ruptura del dieléctrico.

Etapa 3 (Fig. 39): En esta etapa la resistencia eléctrica en el canal cae lo suficiente como para que comience la descarga. Se inicia el paso de corriente acompañado por una caída en la diferencia de potencial.

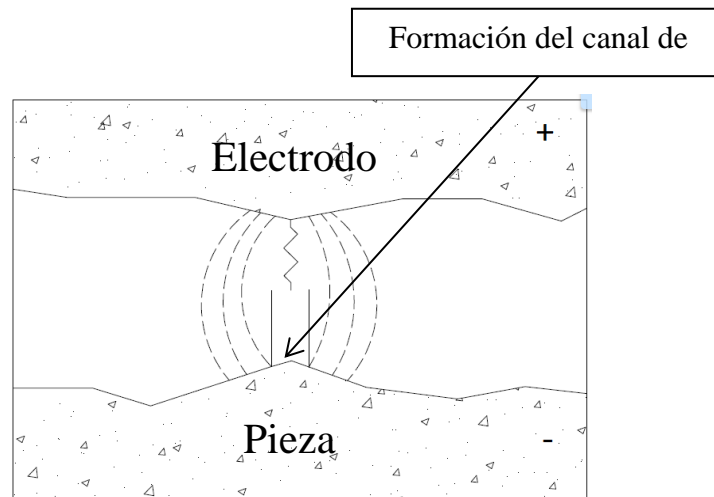


Fig. 39 Tercera fase de la ionización e inicio de la ruptura del dieléctrico.

Etapa 4 (Fig. 40) : Cae el voltaje, crece la intensidad y la energía térmica asociada a la chispa sublima o evapora todo lo que se encuentra a su paso, material de pieza, material de electrodo y fluido dieléctrico. Aunque no se pueden dar valores exactos, diversos autores sitúan la temperatura instantánea en el punto de aplicación de la chispa entre los 8000 y los 12000K. Como consecuencia el canal de descarga queda envuelto en una burbuja de gases. Da comienzo el arranque de material tanto en la pieza como en el electrodo aunque aún no ha alcanzado su máximo.

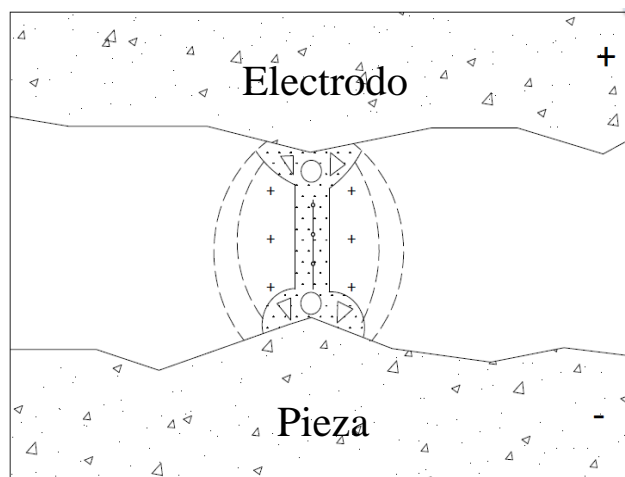


Fig. 40 Fase de comienzo de la descarga

Etapa 5 (Fig. 41): La tensión y la intensidad comienzan a estabilizarse mientras se produce un importante aumento de la temperatura y de la presión de la burbuja de gases que se ha creado, efectos que favorecen el paso directo a estado vapor de material sólido (sublimación) y el arranque mecánico de partículas sólidas tanto de la pieza como del electrodo.

También ocurre la fusión localizada de material en aquellas zonas donde las temperaturas no son lo suficientemente altas como para provocar la sublimación, aunque este fenómeno no asegura el arranque puesto que el material fundido puede resolidificarse sobre la pieza. Los fenómenos de arranque térmico y mecánico del material progresan hacia su máximo

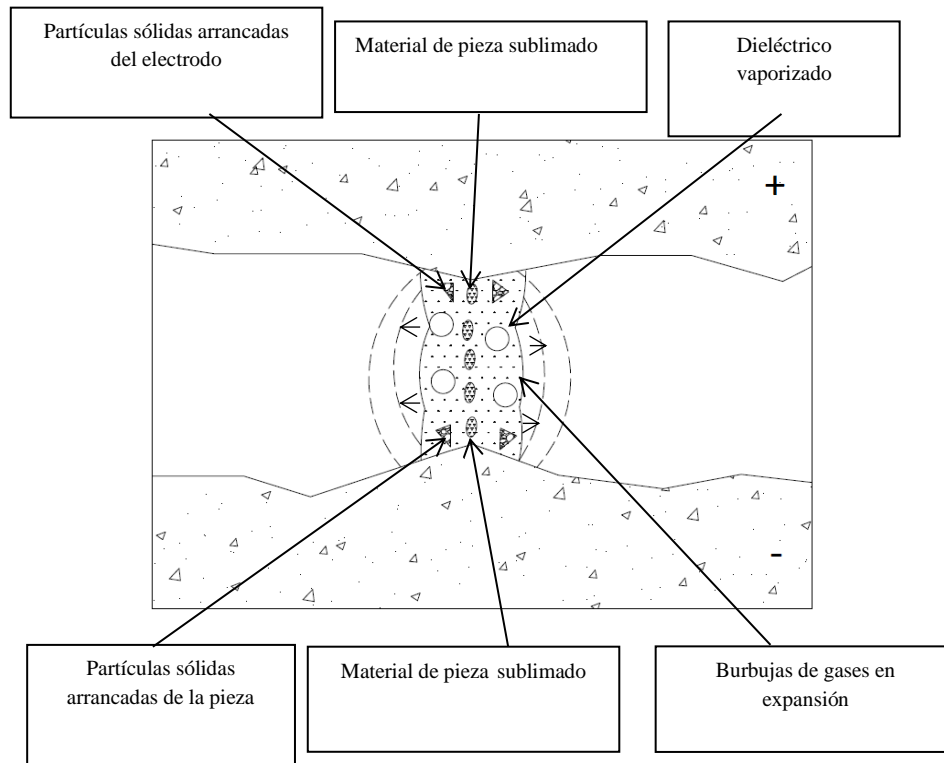


Fig. 41 Progresión de los fenómenos de arranque térmico y mecánico

Etapa 6 (Fig. 42): La intensidad de corriente y la diferencia de potencial se mantienen constantes durante la descarga. El arranque de material alcanza su máximo coincidiendo con la máxima expansión de burbuja de gases. En el instante programado por el usuario de la máquina se desconecta el generador con lo que tanto la tensión como la intensidad caen a cero. Al desaparecer la chispa cesa la generación de calor. El metal evaporado se solidifica rápidamente en el fluido dieléctrico de los alrededores que se encuentra relativamente frío. La descarga eléctrica tiene como consecuencia la formación de un cráter sobre la superficie de la pieza.

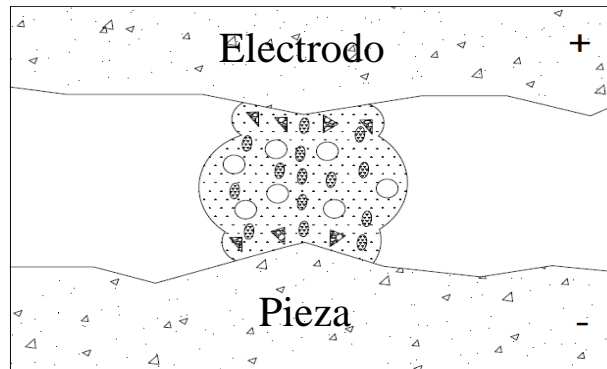


Fig. 42 Fase de expansión del canal

Etapa 7 (Fig. 43): La caída de la temperatura provocada por el cese de la corriente eléctrica provoca el colapso de la burbuja de gases. En su lugar se crea un vacío que da paso a dieléctrico renovado de las proximidades.

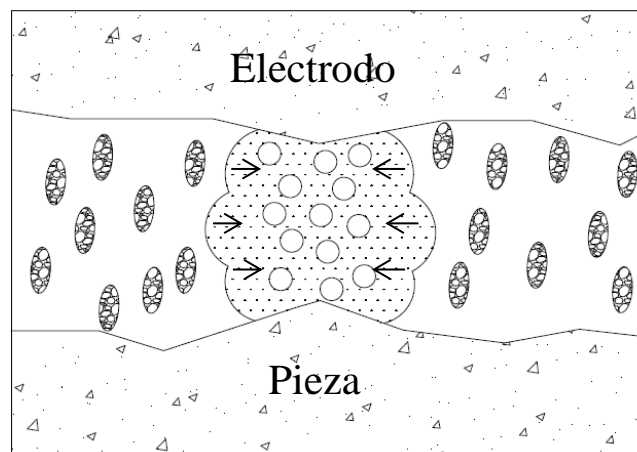


Fig. 43 Fase de colapso de burbuja

Etapa 8 (Fig. 44): El nuevo dieléctrico limpia la zona de residuos y sigue reduciendo su temperatura. El período entre el final de una chispa y el comienzo de la siguiente se conoce como tiempo de pausa y es programable por el usuario. Este periodo proporciona las condiciones necesarias para la siguiente descarga. En la definición de este tiempo debe alcanzarse un compromiso, debiendo ser suficiente para conseguir una buena limpieza y para regenerar el dieléctrico, de lo contrario puede producirse arco voltaico. Esta situación provoca una descarga descontrolada y continua cuyo efecto es dañar al electrodo y a la pieza.

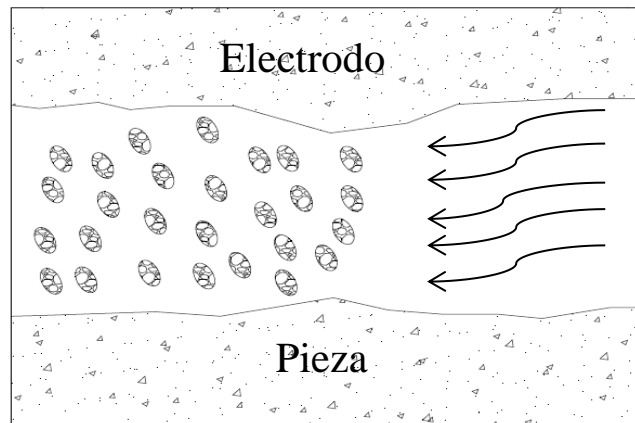


Fig. 44 Fase de arranque de material

Dicho ciclo se repite miles e incluso cientos de miles de veces por segundo. El resultado es la erosión de la pieza a mecanizar en forma de pequeños cráteres distribuidos sobre su superficie. Tal y como se puede apreciar, son los parámetros eléctricos los que definen la tasa de arranque, rugosidad, y el desgaste del electrodo.

3.6.1.5.2 PARÁMETROS DE EROSIÓN

Las condiciones del campo eléctrico responsable de la ionización del canal de descarga y por lo tanto de la chispa y del fenómeno de arranque, vienen determinadas por la evolución a lo largo del tiempo de tres variables fundamentales: diferencia de potencial entre electrodo y pieza, intensidad y conductividad del canal.

Los parámetros de erosión, que deberá programar el usuario, en la máquina para cumplir los requisitos del componente a erosionar, guardan relación directa con las tres variables mencionadas previamente. La nomenclatura empleada se corresponde a la norma alemana VDI 3402 “Mecanizado por electroerosión, parte 1: definiciones y terminología”, de Junio de 1980.

Las gráficas mostradas en la Fig. 45 muestran la evolución de la tensión y la intensidad durante un ciclo. Se trata de una representación idealizada de la descarga, puesto que los registros reales tomados sobre la máquina presentan una variabilidad mucho más acusada, con diferentes tipos de pulsos de distinta eficiencia. A pesar de ello esta representación resulta de gran utilidad para entender el fenómeno.

Si se analiza la curva de tensión se observa que inicialmente se alcanza un valor máximo de la misma U_o conocida como tensión de vacío. Dicho valor es programable por el usuario y se define como la diferencia de potencial que permite introducir la ionización del dieléctrico. Durante un cierto tiempo t_d , tiempo de ionización, la tensión se mantiene en dicho valor pero no hay paso de corriente, esto es, la intensidad es cero.

Se trata del intervalo de tiempo durante el cual disminuye la resistencia eléctrica en el canal de descarga y finaliza cuando comienza el paso de corriente, Depende del estado del dieléctrico en el gap y, por lo tanto, no es programable por el usuario.

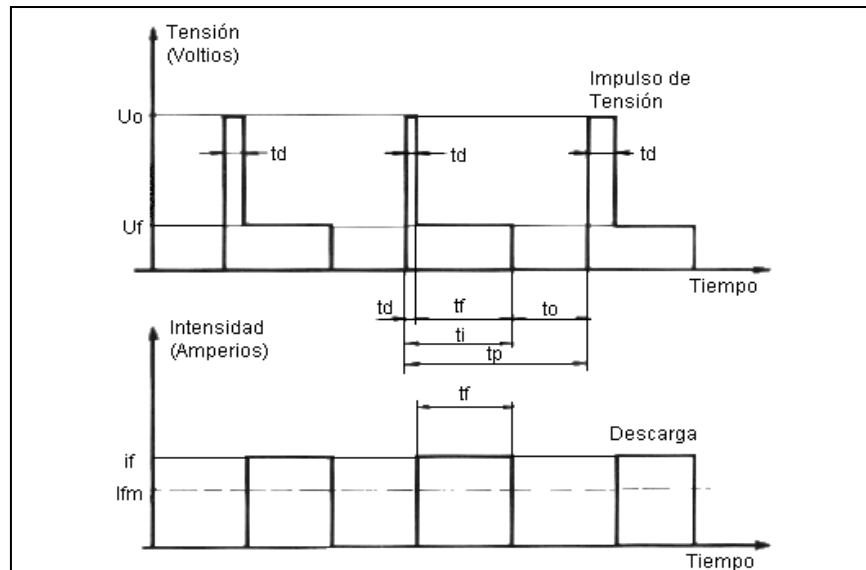


Fig. 45 Curvas de tensión e intensidad durante la descarga

La intensidad de la fuente de alimentación que proporciona la tensión en vacío U_0 suele ser muy baja, normalmente inferior a 5-7 A, ya que su misión se reduce a la ionización del gap. A su vez en el tiempo en el que se produce el arranque de material se dispone de mucha más intensidad (da 1-5 A hasta por encima de 200 A en regímenes de grandes desbastes), alimentada a una tensión conocida como tensión de trabajo, mucho inferior a la tensión de trabajo, muy inferior a U_0 .

Cuando la resistencia del dieléctrico en el canal cae por debajo de cierto valor, se produce la descarga, la cual puede identificarse por una caída brusca de tensión y un aumento de la intensidad. La intensidad alcanza su valor máximo i_f , y tensión se estabiliza, lo que ocurre cuando la resistencia eléctrica del canal también se ha estabilizado, en un valor que depende del material del electrodo, del material de la pieza y del tipo de dieléctrico. La intensidad circula durante un cierto tiempo t_f conocido como *tiempo de descarga*.

Los valores de tensión e intensidad programables comentados anteriormente son valores pico. Sin embargo un usuario experimentado de la máquina puede evaluar la estabilidad de la operación atendiendo a los valores marcados por el voltímetro y el amperímetro analógicos presentes habitualmente en el armario de la máquina. No está de más recordar que los dispositivos analógicos llevan a cabo la integración de los valores a lo largo de un cierto periodo de tiempo, por lo que la lectura de los mismos corresponde a los valores medios de la tensión y la intensidad de la operación. Dichos valores aparecen en la figura 5 respectivamente como U_f e i_{fm} .

El resto de parámetros que aparecen en la figura son derivados de los anteriores. Así, el *tiempo de pulso* t_i , programable por el usuario, es igual a la suma de los tiempos de ionización (t_d) y de descarga (t_r). El *tiempo de pausa* t_o es el tiempo, programable por el usuario que permite al dieléctrico recuperar las condiciones necesarias para la siguiente descarga. El *tiempo de ciclo* t_p incluye el tiempo de pulso y el tiempo de pausa.

Aunque lo explicado hasta ahora sirve para entender los parámetros de la erosión, estas curvas no son más que un patrón idealizado de como suceden las descargas reales. En primer lugar, la forma de las descargas depende del tipo de generador con el que esté equipada la máquina.

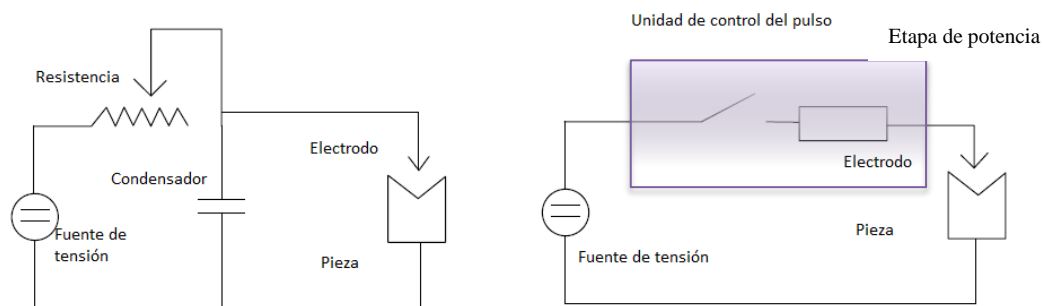


Fig. 46 Izq.) Esquema básico de un generador de relajación .Dcha.) Generador transistorizado.

Los diferentes tipos de generadores existentes en la actualidad se pueden clasificar en dos grandes familias: de relajación y transistorizados.

En la Fig. 46 se muestran los esquemas básicos que permiten comprender el funcionamiento de estas dos familias.

A continuación se explicará de forma simplificada y empleando un generador de relajación como ejemplo, el funcionamiento del mismo y como son generadas las descargas.

Partiendo de un generador de relajación como el descrito en la Fig. 47, el potenciómetro representado en realidad no representa físicamente un potenciómetro, sino que representa la resistencia ofrecida por el fluido dieléctrico en función de la posición del electrodo con respecto de la pieza, la cual es variable, por lo tanto puede modelizarse como si trabajase como un potenciómetro.

Partiendo de la base de que el electrodo y la pieza están separados por una distancia “d”, tal y como se muestra en la (Fig. 47 izquierda), a mayor distancia “d” mayor será la resistencia ofrecida por el dieléctrico debido a que no estará a una distancia

suficientemente pequeña como para que la intensidad pueda circular entre el electrodo y la pieza (*representado en la figura derecha mediante un Switch OFF*), por lo tanto el circuito no quedará cerrado y el condensador se continuará cargando hasta igualar el valor de la fuente de tensión, incapacitando de tal manera la generación de descargas y en definitiva la erosión.

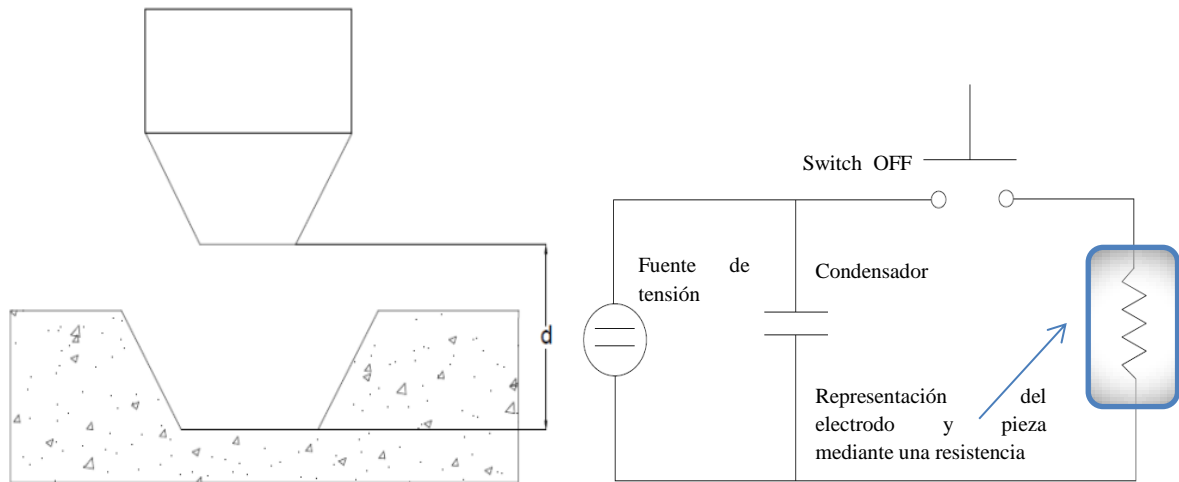


Fig. 47 Posición entre el electrodo y la pieza en la que el dieléctrico ejerce la función de interruptor abierto, manteniendo el condensador cargándose

En cambio, cuando la distancia “d” sea lo suficientemente pequeña *Fig. 48* como para ionizar el dieléctrico que se encuentra entre el electrodo y la pieza (*representado en la Fig. 48 mediante un Switch ON*) tal y como se explicó en las fases de descarga. El circuito se cerrará, permitiendo que el condensador descargue toda la energía almacenada previamente. Dicho efecto permitirá la circulación de la intensidad, y como consecuencia directa la generación de descargas y en definitiva la erosión de la pieza.

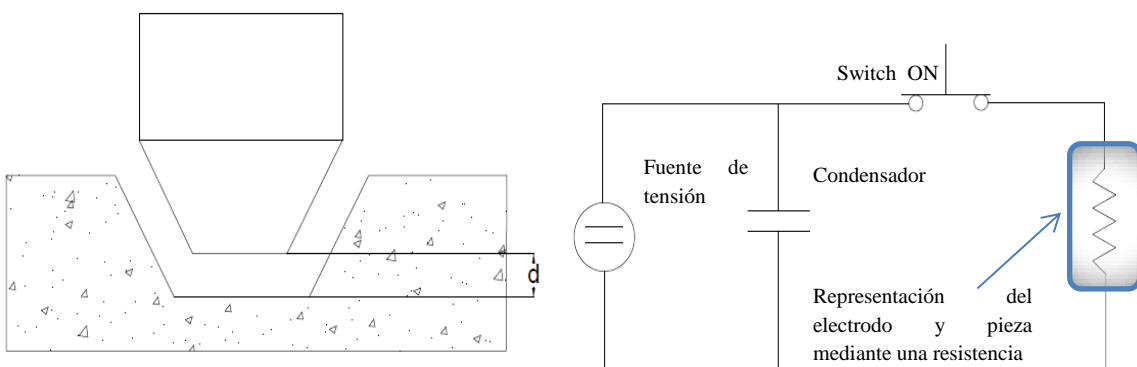


Fig. 48 Posición entre el electrodo y la pieza en la que el dieléctrico ejerce la función de interruptor cerrado permitiendo la descarga del condensador

Durante la erosión puede darse una situación extrema conocida como cortocircuito. En ella el gap se anula, produciéndose contacto entre electrodo y pieza. Se trata de una situación anómala que debe evitarse, en la que la tensión se hace cero y la intensidad crece pudiendo provocar daños e el electrodo y un arranque irregular de la pieza.

Las máquinas actuales están equipadas para reaccionar ante este tipo de situaciones de manera que cuando se detecte un cortocircuito los servoaccionamientos de la máquina separan físicamente el electrodo y la pieza, lo que permite restablecer en el gap las condiciones favorables para la siguiente descarga.

Generadores transistorizados

Al llegar los años setenta empiezan a aparecer los transistores llamados de “potencia”. Eran elementos activos capaces de controlar intensidades del orden de 5Amp. Todo un record.

Con ellos comienzan a construirse los generadores transistorizados. Las intensidades requeridas para el proceso de electroerosión obligaban al empleo de un gran número de transistores trabajando en paralelo. En la *Fig. 49* se muestra el esquema básico de un generador transistorizado.

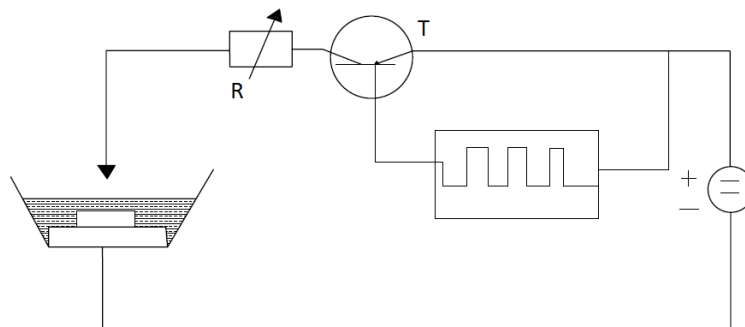


Fig. 49 Esquema básico de un generador transistorizado

Actualmente, la mayor parte de los generadores de las máquinas más modernas tanto de hilo como de penetración son generadores transistorizados. Como se puede observar dicho circuito carece de un acumulador de energía. Los impulsos se obtienen a base de interrumpir la corriente de trabajo de forma periódica. El elemento que lleva a cabo dicha función es el transistor denominado como T, el cual actúa como un interruptor estático.

En el electrodo se aplican impulsos procedentes de un circuito multivibrador, en el cual es posible tanto variar la frecuencia como los tiempos de impulso y los de impulso mediante combinaciones de distintas constantes de tiempo. La variación de intensidad se efectúa conectando más o menos etapas en paralelo.

Las ventajas más sobresalientes de dichos generadores son:

- 1-Posibilidad de poder una gran variedad de materiales para la fabricación de electrodos, tales como el grafito, cobre, aluminio, etc.
- 2-Una gran capacidad de arranque de material.
- 3-Un muy bajo desgaste de electrodos, gracias a la capacidad de adecuar los parámetros para las erosiones requeridas.
- 4-Una flexibilidad máxima, al poder variar independientemente cada uno de los parámetros básicos (tiempo de impulso, pausa, etc.).
- 5-La posibilidad de trabajar con ambas polaridades según el tipo de material empleado como electrodo y pieza.

3.6.1.5.2 INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE EROSIÓN SOBRE LA EFICIENCIA DEL PROCESO

El contenido energético de cada descarga, y su frecuencia, determinan la cantidad de material de pieza y de electrodo eliminados durante el proceso. Dado que dicha energía se controla a través de parámetros de erosión, la correcta selección de los mismos permite al usuario optimizar la capacidad de arranque de la operación, su acabado superficial o bien minimizar el desgaste del electrodo.

A primera vista, la energía de cada chispa viene gobernada por la tensión y la intensidad, de manera que es de esperar que un aumento en cualquiera de los dos se traduzca en un mayor tamaño de cráter generado por la descarga. En la práctica, el usuario no tiene la capacidad de variar la tensión de descarga, por lo que, si se mantienen constantes el resto de parámetros de operación el aumento de la intensidad se traduce en una mayor capacidad de arranque, un peor acabado superficial y un mayor desgaste, en términos absolutos, del electrodo.

Sin embargo lo dicho hasta ahora resulta insuficiente para comprender en profundidad el proceso de electroerosión. Tan importante como los conceptos de capacidad de arranque, rugosidad o desgaste es el concepto de estabilidad del proceso. Un proceso errático afecta directamente a la eficiencia, de manera que por mucho que se aumente la energía de la chispa puede ser que no se mejore la capacidad de arranque si el proceso es inestable. De la misma manera, reducir al mínimo la tensión de vacío y la intensidad es necesario, pero no suficiente para obtener un buen acabado superficial.

En el concepto de estabilidad intervienen muchos factores. Algunos de ellos son operacionales como, por ejemplo, el hacer llegar en buenas condiciones el dieléctrico a

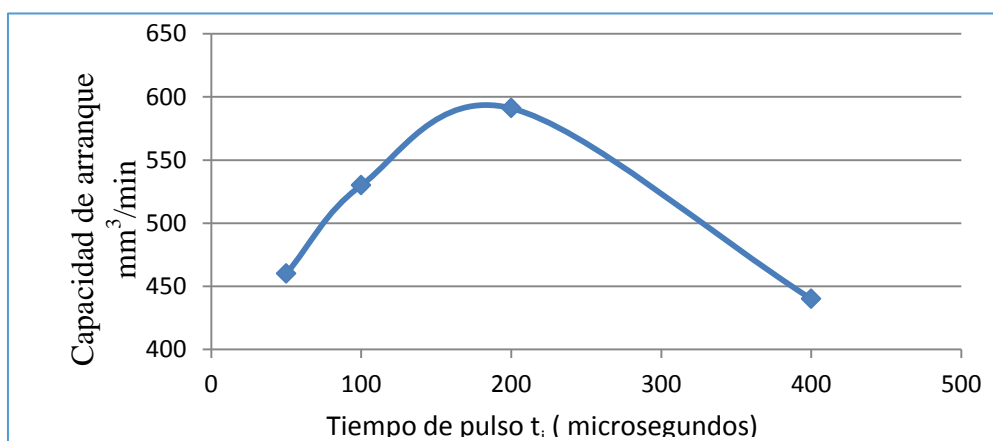
la zona de erosión, y otros son parámetros de erosión. Entre estos últimos cabe destacar el tiempo de pulso t_i , el tiempo de pausa t_o y la polaridad.

Como se ha comentado, todo el arranque se produce durante el mayor tiempo de descarga t_f en relación al tiempo de pausa, durante el cual no hay erosión, mayor capacidad de arranque debe esperarse en la operación.

La consecuencia lógica sería que si se desea aumentar la capacidad de arranque debe aumentarse el tiempo de descarga y reducirse al mínimo el tiempo de pausa. Sin embargo, esta reducción tiene un límite marcado por la estabilidad del proceso. Si no se da tiempo suficiente a recuperar las condiciones del dieléctrico se producirán arcos voltaicos.

Por otra parte, el aumento del tiempo de descarga está también condicionado por otro fenómeno. La utilización de pulsos cortos hace que la concentración de energía sea demasiado grande. Dicho de otro modo, con menos energía también hubiera sido posible llevar a cabo la sublimación del material de la pieza, lo que significa que parte de la energía se ha utilizado de forma poco eficiente. A su vez, pulsos de gran duración tienen como consecuencia que una parte importante de la energía se pierde por conducción a través del material de la pieza. Por lo tanto debe obtenerse una duración de pulso óptima para cada nivel de energía del mismo.

La *Gráfica 1* ilustra este hecho. Se trata de una visualización de las capacidades de arranque en función del tiempo de pulso obtenidas en la electroerosión por penetración de Inconel 718 con electrodo de grafito. Se observa que la máxima capacidad de arranque ($591 \text{ mm}^3/\text{min}$) se da para un tiempo de pulso t_i $200 \mu\text{s}$. El tiempo de pausa t_o es de $20 \mu\text{s}$.



Gráfica 1 Capacidad de arranque en función del tiempo de pulso en la erosión por penetración de Inconel 718 con electrodo de grafito

Pese a que será objeto de estudio posteriormente, cabe mencionar que la capacidad de arranque depende en gran manera del material de electrodo empleado, de la naturaleza del dieléctrico o el modo de limpieza.

La polaridad, es decir, que lado del gap es positivo y cual es negativo, influye de manera crítica en el proceso. Esta influencia se manifiesta fundamentalmente sobre la capacidad de arranque, el desgaste de electrodo y la estabilidad de la operación. Las máquinas de penetración permiten al usuario elegir la polaridad adecuada. Como se explica a continuación, la polaridad negativa, esto es, el electrodo negativo, permite obtener capacidades de arranque superiores hasta en un 50% a la polaridad positiva, aunque con desgastes de electrodo inadmisibles cuando se precisa de un cierto control de tolerancias. Por eso, aunque las capacidades de arranque sean algo menores, en la mayor parte de las aplicaciones se suele recurrir a la polaridad positiva. La polaridad negativa se reserva para ciertas operaciones como, por ejemplo, el vaciado de grandes cavidades o la realización de agujeros pasantes con electrodos de grafito de bajo costo de fabricación, esto es, cuando se emplean electrodos de fácil fabricación en el cual su costo y por lo tanto el empleo de varios electrodos para realizar una misma cavidad no supone un problema.

En el caso de las máquinas de hilo, la renovación continua del mismo minimiza los efectos negativos del desgaste. Por ello, se hace primar la velocidad de corte y eso explica que la polaridad sea negativa y no programable.

Además de la influencia ya comentada de la polaridad, el desgaste del electrodo se ve directamente afectado por el contenido energético de la chispa y por el tiempo de pulso, resulta lógico pensar que a mayor intensidad se deben esperar mayores desgastes.

La relación del desgaste con el tiempo de pulso t_i es menos evidente. Con electrodo positivo, que como se ha comentado anteriormente es la opción más frecuente en electroerosión por penetración, la chispa va del electrodo a la pieza. Prácticamente toda la energía se concentra en la pieza provocando la mayor parte del arranque, lo que explica los menores desgastes provocados por esta polaridad. Sin embargo, al “abandonar” el electrodo para dirigirse a la pieza, la chispa arranca una pequeña cantidad de material de electrodo, que según la mayor parte de los autores no depende del tiempo que dura la chispa sino con su contenido energético.

De esta manera y tras los estudios realizados hasta ahora por diversos autores, para una energía dada es el número de chispas por unidad de tiempo es el que controla el desgaste a el que está sometido el electrodo.

Se puede discutir la influencia del tiempo de pausa t_0 en el desgaste. Evidentemente, al bajar el tiempo de pausa se producirán más chispas y deberá esperarse un mayor desgaste. Sin embargo dicha argumentación no parece válida, puesto que como se ha

comentado anteriormente el criterio a la hora de seleccionar el tiempo de pausa es el de lograr una máxima capacidad de arranque manteniendo la estabilidad del proceso.

El desgaste de electrodos en electroerosión por penetración actualmente, y pese a ser un apartado de la electroerosión con grandes vacíos de conocimiento se suele medir con la siguiente expresión.

$$\text{Desgaste (\%)} = 100 \cdot (\text{Vol. Electrodo desgastado} / \text{Vol. pieza erosionada})$$

Dicha fórmula permite dar valores al desgaste volumétrico por unidad de volumen desgastada de una manera generalizada, pero tal y como se explicará en el estudio realizado, el desgaste de electrodos ha de caracterizarse de manera más detallada para tener un conocimiento real del desgaste de los electrodos, más allá de la cantidad de electrodo aproximado que se pierde por unidad de volumen erosionada.

Pese a que entre los usuarios del proceso dicha interpretación está muy extendida, y tal y como se ha comentado en el párrafo anterior, no hace referencia a valores absolutos y mucho menos a valores y localizaciones concretas.

Por lo que se refiere a la influencia de los parámetros de erosión sobre el acabado superficial, ya se ha mencionado a que el tamaño de los cráteres generados por las chispas depende de la energía de las mismas. Por lo tanto a mayores intensidades de corriente estarán asociadas a mayores cráteres y a peores acabados superficiales. A mayor tiempo de pulso, mayor será el tamaño de cráter generado y en consecuencia, peor rugosidad. Es por ello, que los regímenes de acabado se asocian a pequeños tiempo de pulso y bajas intensidades.

Para analizar este apartado se ha incluido una tabla-resumen en la que refleja la tendencia de la capacidad de arranque, el desgaste y la rugosidad superficial el modificar los principales parámetros de erosión. Queda patente que la optimización de una operación implica la actuación conjunta sobre los distintos parámetros, por lo que al resumir cabe la posibilidad de perder información.

De este modo no se ha incluido en la tabla la influencia del tiempo de pausa t_0 , como se ha dicho, en la práctica éste se mantiene en el valor mínimo posible que asegure la estabilidad del proceso, por lo que no tiene sentido aumentarlo. Tampoco se ha incluido la tensión de trabajo al no ser un valor programable. A pesar de ello, la *Tabla 3* facilita la comprensión del texto.

Parámetro	Capacidad de arranque	Desgaste de electrodo	Rugosidad superficial	¿Puede ser programable?
t_i ↑	(Hasta un máximo) ↑	↓	↑	-Sí (Generador transistorizado) -Indirectamente (Generador de relajación)
i_i ↑	↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑	-Sí (Indirectamente en el generador de relajación)
Polaridad	(Neg.) ↑ (Pos.) ↓	(Neg.) ↑ (Pos.) ↓	-	Sí

Tabla 3 Resumen de la influencia de los parámetros de erosión

3.6.1.5.3 IMPULSOS ISOENERGÉTICOS

Cabe mencionar que la máquina empleada para los ensayos genera impulsos isoenergéticos (de igual energía). En ellos el tiempo real de duración de la descarga se empieza a contar a partir del instante de iniciación de la corriente, del impulso de corriente, con lo cual es siempre el mismo. Ello naturalmente es a expensas de la variación de la frecuencia de repetición, dado que el tiempo de ionización es totalmente aleatorio.

Con este procedimiento se obtienen superficies con una rugosidad muy uniforme Fig. 50, ya que todos los cráteres tienen la misma profundidad.

Como hemos visto uno de los factores que influyen en el tiempo de ionización es la tensión de alimentación. Sobre este factor es posible intervenir, aumentando la tensión entre electrodo y pieza. Con ello el porcentaje de retrasos en el tiempo de encendido disminuye evidentemente, pero aquí tenemos una limitación.

Si fuéramos aumentando la tensión progresivamente cada vez a valores más elevados, llegaría un momento en el que la precisión de reproducción se iría degradando ya que el juego entre electrodo y pieza sería cada vez mayor. Hay que buscar pues una solución de compromiso que satisfaga ambos requisitos.

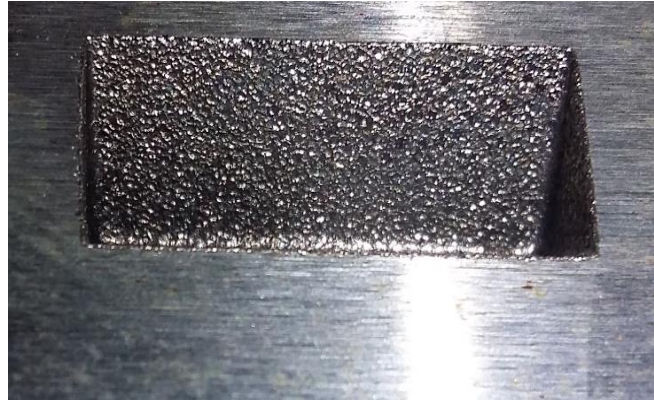


Fig. 50 Pared de una cavidad realizada con máquina equipada con generador isoenergético

3.6.1.5.4 SISTEMA DE CONTROL DE AVANCE DE ELECTRODO

A diferencia de en una máquina herramienta de arranque de viruta, unos de los parámetros que se observan en una máquina de electroerosión es que entre los parámetros programables no se encuentra el avance del electrodo. A cambio, aparece una variable programable denominada servo. En realidad este parámetro regula la sensibilidad del servosistema encargado del avance del electrodo.

El servo es el encargado de mantener constante el gap entre electrodo y pieza. Un gap constante asegura una erosión estable, con chispas sensiblemente constantes a lo largo del mecanizado y por lo tanto una rugosidad y una capacidad de arranque uniformes durante la operación. Tal y como se ha mostrado en los apartados anteriores esta sería una situación ideal la cual no se corresponde con la realidad, ya que la variabilidad de las descargas es muy acusada. En este punto interviene el sistema de control servo manteniendo, en lo posible, constante la distancia entre electrodo y pieza, sino de manera instantánea, si a lo largo de un cierto intervalo de tiempo.

Se han ensayado diferentes medios para el control del gap, pero hoy por hoy el más extendido con diferencia es el control de la diferencia de potencial entre electrodo y pieza. Dicho control se realiza de la siguiente manera: el valor de la tensión media a lo largo de un cierto periodo de tiempo se compara con un valor referencia programable por el usuario y que hemos denominado servo. Si la tensión media es superior a dicho valor significa que el electrodo está más lejos de la pieza de lo esperado. En este caso, el comparador electrónico envía una señal al accionamiento de avance del electrodo para que se acerque a la pieza, de manera que recupere el tamaño de gap deseado. Si el proceso fuera perfectamente estable, a medida que se va realizando la erosión de la pieza esta actuación permitiría el avance continuo del electrodo.

Pueden darse situaciones de demasiada cercanía entre electrodo y pieza o incluso situaciones de cortocircuito. En estos casos el gap es menor del deseado, y la tensión media cae por debajo referenciada. En esta situación el comparador envía una señal al

accionamiento del electrodo para que se aleje de la pieza recuperando la dimensión del gap esperada.

Retrocesos continuos del electrodo durante el mecanizado son muestra de un proceso que está discurriendo con problemas.

A su vez, la actuación del servo está ligada a otros factores además de la estabilidad del proceso. Valores bajos del servo están relacionados con mayores capacidades de arranque a riesgo de que el proceso sea más inestable por ser la limpieza del canal más complicada. El servo también está relacionado con la tensión de ionización ya que es ella la que gobierna la intensidad de campo para un cierto tamaño de gap.

3.6.1.5.5 TECNOLOGÍAS DE EROSIÓN

Los fabricantes de máquinas de electroerosión proporcionan con sus máquinas un conjunto de datos correspondientes a los parámetros de proceso que permiten optimizar una cierta operación. Este conjunto de datos puede encontrarse bien en forma de tablas o bien en forma de gráficos, pero en todos los casos se trata de las variables que debe programar el usuario para obtener determinadas capacidades de arranque, desgastes de electrodo o acabados superficiales usando la máquina en cuestión.

Estos datos son más amplios día a día. Los departamentos de investigación de las empresas disponen de expertos que se dedican a optimizar los parámetros de erosión para nuevos materiales o que ajustan los valores para mejorar las tolerancias dimensionales.

A pesar de ello, los usuarios han de saber que dichos datos corresponden normalmente a situaciones ideales de utilización, y que los resultados obtenidos por la máquina sean distintos a los planteados idealmente. Es por ello que es de vital importancia una buena puesta a punto de la máquina para aprovechar al máximo sus posibilidades.

3.6.1.6 TECNOLOGÍA DE EROSIÓN POR PENETRACIÓN

A continuación se analizarán los conceptos fundamentales de la tecnología de electroerosión por penetración (Sinking Electrical Discharge machining, SEDM).

3.6.1.6.1 ASPECTOS FUNDAMENTALES

Tal y como se expuso anteriormente a modo de introducción, el proceso de electroerosión por penetración permite generar cavidades en función de la geometría del electrodo empleado en materiales conductores independientemente de sus propiedades mecánicas, fundamentalmente dureza o abrasividad. Cronológicamente ésta tecnología apareció antes de la electroerosión por hilo, ya que para su aplicación no es estrictamente necesario el disponer de control numérico, aunque hoy en día todas las máquinas lo llevan incorporado.

Las primeras máquinas comerciales aparecieron en los años 50, y en su momento supusieron una auténtica revolución, ya que permitían el mecanizado de superficies de geometría compleja en materiales tratados térmicamente, fundamentalmente aceros para moldes y estampas.

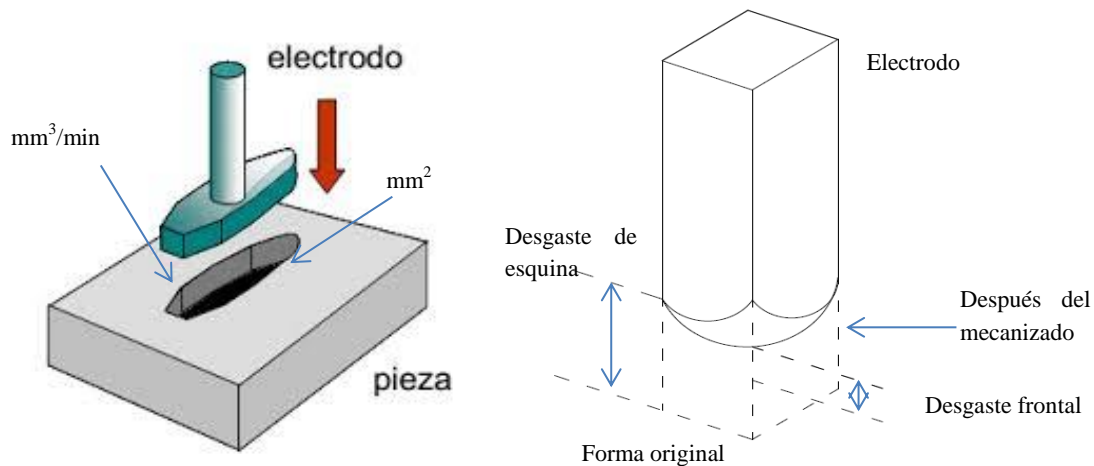


Fig. 51 Izq.) Avance de electrodo y definición de capacidad de arranque. Dcha.)
Definición de desgaste: Desgaste frontal y de esquina

Durante casi medio siglo la electroerosión no ha tenido competencia en la fabricación de útiles de forja, estampación a inyección tanto de plásticos como de metales ligeros. Sin embargo, su papel predominante en la industria del utillaje se ha puesto en cuestión en la década de los 90 con la entrada en escena del fresado de alta velocidad, que ha permitido abordar el mecanizado de aceros de alta dureza mediante arranque de viruta con herramientas de geometría definida, reduciendo drásticamente los tiempos de mecanizado frente a EDM.

La electroerosión por penetración exige disponer un electrodo de forma que reproduzca el negativo de la cavidad que se desea generar. El diseño del electrodo no es una réplica exacta de la cavidad, ya que debe tener en cuenta las dimensiones del gap además de los posibles conductos de alimentación de dieléctrico a la zona de erosión. La Fig. 51 muestra de manera esquemática la generación de una cavidad con electrodo de forma y el concepto de capacidad de arranque, que se define como el volumen de material de pieza erosionado por unidad de tiempo. Se trata por tanto de una medida de la velocidad del proceso, que habitualmente se expresa en mm^3/min . La morfología del desgaste del electrodo aparece también en la misma figura, pudiéndose apreciar como el mayor desgaste se concentra en las aristas vivas del electrodo.

Cuando se trata de definir el objetivo de una cierta operación de erosión, se recurre a uno de los siguientes criterios: máxima capacidad de arranque, mínima rugosidad y mínimo desgaste de electrodo, es por ello que el conocimiento del desgaste del electrodo es necesario para poder realizar erosiones más precisas pudiendo de tal

manera ajustar mejor las tolerancias necesarias de fabricación. Esto quiere decir que el usuario establece los parámetros de la operación en función de si busca de la máxima velocidad de erosión, el mejor acabado superficial, o la mínima pérdida de material de electrodo y lo hace en sentido más amplio de la palabra, es decir, no solo parámetros eléctricos, sino también material de electrodo, fluido dieléctrico, modo de limpieza, etc.

Los criterios mencionados no son independientes entre sí, o dicho de otra forma, los regímenes más energéticos están asociados a peores calidades superficiales y viceversa, un excelente acabado superficial va asociado a una baja capacidad de arranque. Por otra parte, regímenes muy energéticos y de alta frecuencia da como resultado elevados desgastes. Es por ello frecuente en las máquinas de electroerosión definir los distintos regímenes de trabajo en función del acabado superficial resultante en la pieza. Es práctica habitual entre los usuarios del proceso expresar el acabado utilizando el número de rugosidad definido por la norma alemana VI 3.402 Fig. 52 La siguiente expresión relaciona dicho número con la rugosidad media en Ra (en micras).

$$VDI = 20 * \text{Log} (10 * Ra)$$



Fig. 52 Placa de referencias de rugosidades en función de distintos VDI

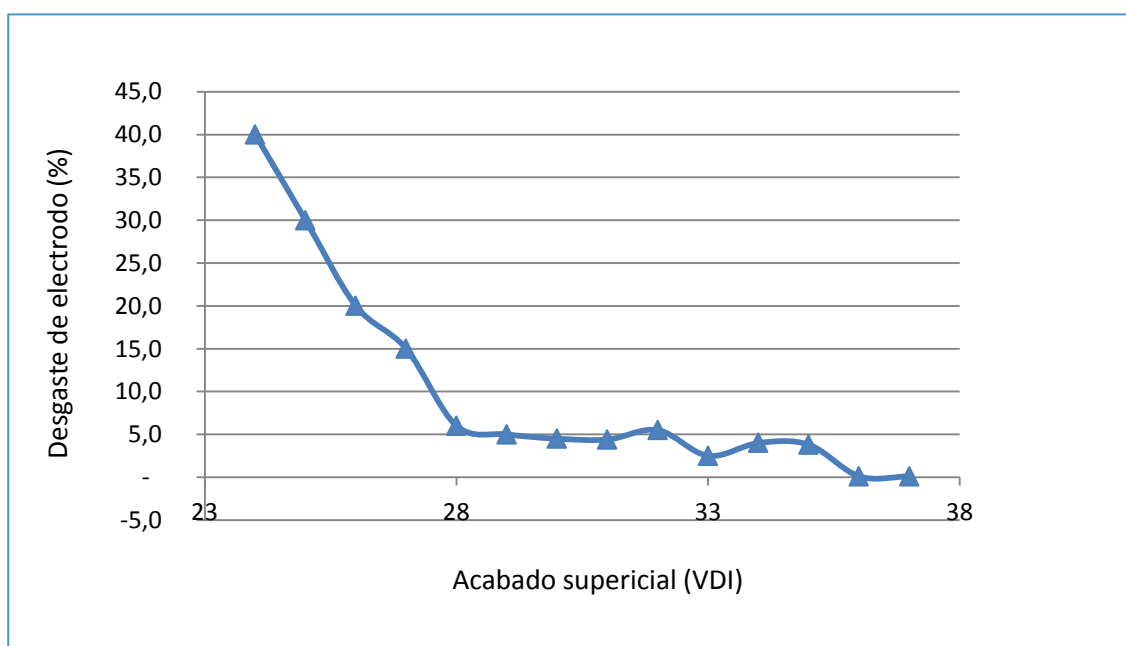
Como ya se comentó anteriormente, resulta habitual medir el desgaste como el cociente entre el volumen de material de electrodo gastado y el volumen de material de pieza erosionado, expresado en tanto por ciento, es decir.

$$\text{Desgaste (\%)} = 100 * (\text{Vol. Electrodo gastado} / \text{Vol. Pieza erosionada})$$

En ocasiones también se miden el desgaste frontal y del desgaste de esquina en valores absolutos. Por lo que se refiere a la anterior expresión, ya se ha comentado el hecho de que los valores que proporciona son relativos y no han de tomarse como valores absolutos en ningún caso puesto que están medidos con respecto a la cantidad de material de pieza erosionado. Por ello los valores del desgaste parecen ser mucho

mayores cuando se arranca poco material. En la realidad el valor absoluto del desgaste sí que crece al disminuir el tiempo de pulso, aunque no en la medida indicada en la anterior expresión. De hecho pueden llegar a alcanzarse situaciones de desgaste cero, que corresponden a desgastes inferiores al 0,5% utilizando el grado de grafito adecuado y altos tiempos de pulso, aunque se trata de una situación poco corriente y se carece del conocimiento preciso para conseguir dicho fenómeno.

Con objeto de ilustrar el efecto comentado, en la *Gráfica 2* se muestra la evolución del desgaste en una operación de herramientas F5318 empleando grafito fino, empleando parámetro de máquinas correspondientes al mínimo desgaste.



Gráfica 2 Relación entre desgaste de electrodo y acabado superficial (expresado mediante número VDI.)

3.6.1.7 MATERIALES PARA ELECTRODOS

3.6.1.7.1 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE MATERIAL DE ELECTRODO

A la hora de seleccionar el material de electrodo más adecuado para una cierta aplicación deben considerarse una serie de factores que convertirán a un cierto material en la opción más adecuada para la erosión requerida. Se pueden resumir en 5 puntos clave, o criterios que han de considerarse en la elección, pese a que estos son los factores más cuantificables. Existen otras consideraciones más subjetivas que en la práctica industrial pueden empujar al usuario hacia una u otra opción, como por ejemplo, la experiencia previa del propio usuario.

En este apartado se analizarán únicamente los que pueden considerarse como criterios objetivos los cuales pueden resumirse en 5 puntos.

- a) Capacidad de arranque.
- b) Resistencia al desgaste.
- c) Acabado superficial.
- d) Maquinabilidad.
- e) Coste final de electrodo.

a) La maximación de la capacidad de arranque se consigue mediante la adecuada combinación de los parámetros eléctricos de la máquina, del dieléctrico y del modo de limpieza y, por supuesto del material de electrodo. Centrándonos en este último aspecto, conseguir la máxima capacidad de arranque para por concentrar al máximo la energía de la descarga sobre la pieza. Dicho de otro modo, deben reducirse cuanto sea posible las pérdidas de energía a través del electrodo.

Así, la conductividad térmica y la temperatura de fusión del material del electrodo pasan a ser aspectos de máxima importancia. Una conductividad térmica baja resulta beneficiosa, puesto que reduce la energía conducida a través del electrodo, concentrando dicha energía en la zona de descarga y maximizando el arranque. Para poder soportar el aumento de la temperatura debido a dicha concentración sin deteriorarse, el punto de fusión del material del electrodo ha de ser elevado.

b) El desgaste debe analizarse también a partir de la combinación de parámetros de erosión y material de electrodo. Se ha comentado anteriormente la influencia de los parámetros de erosión sobre el desgaste por lo que se tratará a continuación el papel del electrodo en éste fenómeno. Evidentemente la temperatura de fusión es una propiedad fundamental. Cuanto menor sea la temperatura de fusión, para una cierta concentración de energía en la zona de erosión mayor será la cantidad de material de electrodo perdida, pero no es el único factor.

La naturaleza del material del electrodo, y más concretamente su densidad, también está directamente relacionada con los mecanismos de desgaste. Por ejemplo, en condiciones de acabado, un grafito de grano medio tiende a perder dichos granos lo que resulta en un mayor desgaste y como consecuencia en una mayor inestabilidad del proceso, especialmente si debido al tamaño de esos granos no es posible limpiar adecuadamente el canal de descarga.

c) El acabado superficial final de la pieza erosionada es otro de los aspectos a tener en cuenta. La cavidad erosionada resulta ser el “negativo” del electrodo empleado para la erosión, tanto en geometría (añadiendo el gap), como en rugosidad. Esto quiere decir que el electrodo imprime su rugosidad en la pieza y que, por lo tanto, la mínima rugosidad que pueda obtenerse en la fabricación del electrodo influirá directamente en la rugosidad mínima que puede obtenerse en la pieza. Además, tal y como se ha explicado anteriormente, debe tenerse en cuenta que las operaciones de acabado se caracterizan por elevados desgastes de electrodo, pero dicho desgaste no está asociado a

las altas temperaturas alcanzadas durante la operación puesto que los parámetros de acabado son poco energéticos, por lo que en esta situación más que a la temperatura de fusión del material debería atenderse a su densidad.

En principio y continuando esta idea, cabría pensar que las rugosidades capaces de obtenerse empleando el grafito como material de electrodo son peores que las que se pueden obtener empleando el cobre como material de electrodo, pese a que los nuevos grados de grafito con ciertas operaciones de movimiento ponen en duda dicha afirmación.

d) La maquinabilidad del material de electrodo es otro de los aspectos de interés. Tan importante es la facilidad de obtener tolerancias ajustadas a un cierto material como la ausencia de problemas operativos durante la operación de mecanizado.

En el caso del grafito la capacidad de obtener cortes sin rebaba, que luego deba eliminarse en costosas operaciones de acabado, es un punto a favor. Sin embargo, también en el caso del grafito el material arrancado en forma de polvo, el cual resulta muy abrasivo, puede depositarse en elementos sensibles del centro de mecanizado, especialmente en las guías, y conllevar a un deterioro de su funcionamiento y reducción de su vida útil.

f) Pese a que en ocasiones el usuario tiende a fijarse en el coste del material bruto, la variable a considerar debería de ser la del coste total de electrodo incluyendo los costes de mecanizado. En este coste el peso del coste del material de partida suele ser algo secundario especialmente en electrodos de pequeño tamaño. Es cierto que muchos usuarios de electrodo metálico de cobre se ven sorprendidos por los precios de las mejores calidades de grafito, que pueden llegar a ser hasta 5 veces más caras que el cobre. Sin embargo, es justo reconocer que las calidades más caras se reservan solo para ciertas aplicaciones, mientras que las calidades más corrientes presentan precios más cercanos al cobre.

Tras los apartados explicados anteriormente se puede concluir que el coste de fabricación de electrodos es un punto crítico a la hora de mecanizar piezas. Es por ello que la optimización en el empleo de electrodos es clave para considerar la electroerosión como un proceso de mecanizado viable para la industria actual. Dicha optimización podrá ser llevada a cabo cuando el desgaste de los electrodos sea caracterizado de manera más exacta que la que se dispone actualmente.

Siendo los electrodos de grafito y de cobre los más empleados en la industria, existen otros tipos de materiales utilizados para los electrodos. A continuación se explicarán los materiales de electrodo empleados actualmente en electroerosión por penetración. Profundizando mayormente en los electrodos de cobre y especialmente los electrodos de grafito.

3.6.1.7.2 COBRE

Inicialmente el único material de electrodo que se empleaba en electroerosión era el latón, que resultaba barato y fácil de conseguir a pesar de presentar desgastes muy elevados.

Pronto el latón fue sustituido por el cobre, que ofrece mayor conductividad eléctrica y desgastes considerablemente menores. Durante décadas el cobre ha sido empleado de forma extensiva para la mayor parte de las aplicaciones, aunque en los últimos años os usuarios parecen inclinarse hacia el empleo de electrodo de grafito tras haberse resuelto gran parte de las dificultades operativas que limitaban su operación.

Probablemente las mayores limitaciones del cobre se encuentran en su bajo punto de fusión (1082° C) y su elevada conductividad térmica, factores estos que imitan su capacidad de arranque. Esto hace que la erosión de aceros de herramientas, eligiendo el grado adecuado de grafito se consigan capacidades de arranque considerablemente superiores a las que se consiguen con electrodos de cobre.

Por otra parte, el cobre presenta un coeficiente de dilatación lineal ($1,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) que puede considerarse elevado si es comparado con el grafito, lo que puede afectar a la precisión de la operación especialmente si el trabajo es de larga duración y no se disponen de sistemas refrigerantes para el líquido dieléctrico.

El cobre presenta un alto peso específico ($8,95 \text{ kg/dm}^3$). Este aspecto limita la fabricación de los electrodos voluminosos, puesto que su peso sería demasiado elevado. Por ello para grandes electrodos se recurre al grafito.

En lo que se refiere al acabado superficial final del componente erosionado, hay que decir que de modo general el cobre permite alcanzar mejores rugosidades gracias a su estructura densa. Sin embargo, es justo reconocer que los modernos grados de grafito disponibles en el mercado y el desarrollo de las estrategias de erosión orbital han permitido obtener con grafito rugosidades adecuadas a las aplicaciones más exigentes.

El mecanizado de cobre con tolerancias muy ajustadas resulta complicado. El cobre tiende a dejar rebabas y a sufrir deformaciones durante el arranque, por lo que es difícil conseguir una buena precisión. El rectificado tampoco resulta una operación sencilla. Una alternativa es el corte por hilo de electrodos, que permite conseguir electrodos precisos a elevadas velocidades de corte. Otra alternativa es emplear cobre al que se le ha añadido telurio en una proporción 0,5 al 1%, material conocido como Telco. El mecanizado de este material es mucho más sencillo, no presentado ningún tipo de rebabas, aunque sufre una cierta merma en las propiedades erosivas frente al cobre puro.

En el mercado existen alternativas de materiales metálicos para electroerosión, aunque se trata de soluciones puntuales para problemas concretos y no de materiales de uso extensivo.

3.6.1.7.3 CUPROTUNGSTENO

El cuprotungsteno empleado para la fabricación de electrodos para electroerosión por penetración puede obtenerse de dos formas distintas.

El más corriente está compuesto de una mezcla de cobre y tungsteno con un contenido de este último comprendido entre el 60 y el 80 por ciento y se fabrica por impregnación de cobre, del tungsteno obtenido por sinterización. El cuprotungsteno con mayor contenido de cobre se obtiene premezclando polvos de ambos metales y luego sinterizando la mezcla en hornos una vez prensada la misma a alta presión.

La principal ventaja del cuprotungsteno para la fabricación de electrodos reside en el bajo desgaste sufrido por el mismo. Sus propiedades derivan de la combinación de alto punto de fusión del tungsteno con la alta conductividad del cobre. Sin embargo tiene como desventaja, que la capacidad de arranque de material no es tan elevada como sería de desear.

En el caso de cuprotungstenos con un contenido del 60 al 80% el desgaste es prácticamente independiente del contenido en tungsteno y equivale prácticamente el desgaste que tendría si el electrodo estuviese compuesto de tungsteno puro. Sin embargo el arranque de material es prácticamente el doble en aquellas composiciones que contienen un 80% de tungsteno con respecto a aquellas que contienen un 60%.

La facilidad de mecanizado de dichos electrodos varía en sentido inverso al contenido en tungsteno. Debido al elevado precio del tungsteno este tipo de electrodos se emplean casi con exclusividad para el mecanizado de metal duro, o bien en aquellos casos en los que el desgaste es un factor primordial a evitar.

3.6.1.7.4 PLATA-TUNGSTENO

Se trata de una variable del caso anterior con un contenido del 80% en tungsteno, con el fin de obtener un mínimo desgaste. Los electrodos fabricados con plata-tungsteno sufren mayor desgaste que los de cobre tungsteno pero como contrapartida, con ellos el arranque de material es prácticamente el doble.

Cabe mencionar que si es cuprotungsteno es de por sí un material caro, la variedad en base plata lo es aún más. Tanto en uno como en otro caso hay dos consideraciones a tener en cuenta a la hora de decidir el uso de tales materiales:

- 1) Que el grano de polvo empleado para su fabricación sea pequeño para conferirle una mayor homogeneidad.
- 2) Que el material proceda de firmas de garantía que empleen polvo de tungsteno virgen y no procedente del reciclado.

3.6.1.7.5 ALUMINIO

Este metal se emplea como electrodos principalmente en procesos de desbaste de grandes cavidades ya que resulta más económico que el cobre, aunque su desgaste es mayor y el estado de la superficie dejado es más deficiente.

3.6.1.7.6 GRAFITOS

Los grafitos empezaron a encontrar aplicación para la fabricación de electrodos, a partir del momento en que aparecieron los generadores de impulsos en los que las máquinas con circuitos de relajación no resultaban aptas. La introducción del grafito como material de electrodo permitió aumentar considerablemente las capacidades de arranque frente a los valores que se obtenían con el cobre, reduciendo los desgastes principalmente en las operaciones del desbaste en las que se ponen en juego elevadas energías de descarga y bajas frecuencias de chispeo. En operaciones de acabado, sin embargo, en las que se dan altas frecuencias de descarga, el desgaste del grafito es superior al del cobre. También se alcanzan elevados desgastes en el caso de operaciones de arranque masivo con polaridad negativa, aunque en estos casos la prioridad es la capacidad de arranque sin prestar atención a la pérdida de material de electrodo.

El grafito es un producto sinterizado obtenido a partir de partículas de grafito en forma hexagonal cuyo tamaño determina el campo de aplicación. Como se comentará posteriormente, existen en el mercado grafitos con tamaño de partícula que van desde debajo de $1\mu\text{m}$ hasta las $20\mu\text{m}$ aproximadamente. Independientemente del tamaño de partícula, el grafito presenta mucha mayor estabilidad que el cobre frente a las altas temperaturas.

Propiedades térmicas

Según el grado de grafitación varía la conductividad calorífica y esta disminuye a medida que la temperatura aumenta.

En cambio la capacidad calorífica aumenta con la temperatura. Ello se explica por la rigidez de los planos de hexágonos a los cuales corresponden altas frecuencias cuánticas y que por lo tanto se excitan a partir de temperaturas elevadas.

El coeficiente de dilatación depende del grado de grafitación y viene determinado por los planos hexagonales en los que es más importante en la dirección perpendicular a los mismos. El grafito presenta una gran resistencia al choque térmico y en condiciones

normales se sublima sin pasar por la fusión a una temperatura entre 3600 y 3700 °C, siendo su coeficiente de dilatación 5 veces inferior al del cobre. Su peso específico es bajo (1,75 – 1,85 kg/dm³), lo que lo hace adecuado para la producción de electrodos de gran tamaño

Propiedades mecánicas

El grafito es muy blando y más o menos poroso, es untuoso y presenta un brillo submetálico. Es infusible e insoluble y posee una buena conductividad eléctrica.

La resistencia mecánica es función de las uniones entre las capas cristalinas, cualquiera que sea el grado de grafitación. De ello resulta una ausencia de deformación plástica a la temperatura ambiente, mientras que a medida que aumenta la temperatura también lo hace la resistencia mecánica, hasta llegar a los 2500°C.

Los valores normales de ruptura a flexión oscilan entre 100 y 600 kg/cm². El módulo de elasticidad es cercano a los 900 kg/mm² y las temperaturas normales no presentan dilataciones apreciables, solo a partir de 2500° C.

Además de estas ventajas, la facilidad del mecanizado del grafito frente a los problemas comentados para el cobre, supone un aspecto crucial. El grafito se mecaniza en máquinas de alta velocidad con herramientas de metal duro tanto de plaquitas como enterizas, aunque se ha de tener especial cuidado en su manipulación debido a su fragilidad.

El máximo detalle que se puede obtener es función del tamaño de su partícula. Intentar apurar detalles sin tener en cuenta este factor resulta en largas operaciones de mecanizado que terminan en la rotura o astillación del electrodo. Cuando es preciso obtener radios de acuerdo muy pequeños y buena precisión debe recurrirse a calidades de grafito de muy pequeño tamaño de partícula.

Debe tenerse en cuenta que el mecanizado sólo puede llevarse a cabo en máquinas especialmente preparadas para ello. El motivo es que el corte no genera virutas, sino un polvo de color oscuro que puede ser tóxico para el personal cercano a la máquina y que además debido a su carácter muy abrasivo puede dañar las guías de la máquina e incluso afectar al equipo eléctrico.

Por ello, las máquinas para mecanizado de grafito están equipadas con sistemas de extracción de aire de la zona de mecanizado y con protecciones especiales para las guías y para los sistemas que puedan verse afectados.

Existen diferentes calidades de grafitos en el mercado en función del tamaño de partícula. A continuación se describirán las propiedades y principales aplicaciones de cada uno de ellos. Debe tenerse en cuenta que las diferencias de precio entre unos y

otros es muy importante, pudiendo llegar a ser los grafitos más finos hasta 5 veces más caros que los grados más groseros.

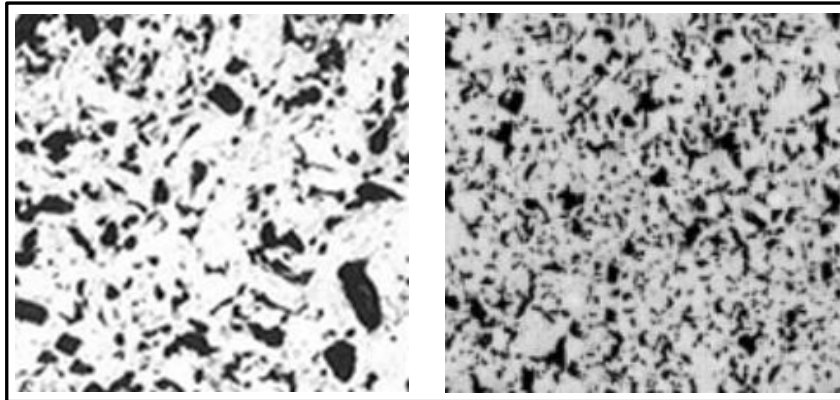


Fig. 53 . Microfotografías de electrodos de grafito. Izq.) Grafito Poco EDM 100 con tamaño medio de partícula de 20 µm. Dcha.) Grafito superfino Poco EDM 200 con tamaño medio de partícula de 10 µm.

Por su generalidad de aplicación y su bajo coste, los grafitos finos como el mostrado en la figura izquierda, con tamaño medio de partícula entre 15 y 20 µm se han convertido en la mejor opción en operaciones de erosión de desbaste, desde las aplicaciones en la que el único requisito es la capacidad de arranque, en las que se usan los tamaños de grano más grandes, hasta aquellas en las que manteniendo una alta capacidad de arranque, se desea preservar, en cierta medida, el desgaste de electrodo.

Se pueden mencionar como ejemplos la erosión de grandes cavidades de moldes, estampas para forja o grandes útiles de extrusión o fundición, casos en los que no se buscan detalles finos ni radios de acuerdo muy pequeños. La calidad *Poco EDM 100 Fig. 53* es un ejemplo industrial de este tipo de grafito.

Cuando simultáneamente el grado de detalle requerido es algo mayor, la rugosidad empieza a ser un requisito, aunque no en grados de acabado excepcionales, y el desgaste del electrodo debe ser reducido, a costa de un incremento pequeño en el coste, la mejor opción son los grafitos superfinos. La *Fig. 53*, derecha, muestra el tipo de grafito *Poco EDM 200*, con tamaño medio de partícula de 10 µm. Entre las aplicaciones de esta calidad se encuentran estampas de forja y útiles de fundición en coquilla con un grado de detalle superior. Los grandes utillajes de moldeo por soplado también se adecuan a esta calidad de grafito.

Dentro de la categoría de grafitos ultra finos, con tamaño medio de partícula inferior a 5 µm, existe una amplia variedad de opciones en función de su resistencia mecánica. Los grados más caros dentro de esta calidad corresponden a los de mayor resistencia y están destinados a la erosión de detalles con acabados superficiales muy finos, como por

ejemplo, los que aparecen en moldes de inyección de plásticos, manteniendo capacidades de arranque y desgastes de electrodo aceptables.

En el extremo inferior de la gama y con un coste menor se encuentran los grados de menor resistencia mecánica, destinados a operaciones de desbaste que pretenden alcanzar ya un cierto grado de detalle; son característicos de la mayor parte de utillajes de conformado y moldeo. Entre ambos extremos se sitúan calidades intermedias que ofrecen al usuario la posibilidad de ajustar al máximo el grado de grafito a su aplicación concreta.

Cabe mencionar que la rugosidad final alcanzada en la pieza no dependerá únicamente del grafito empleado para el electrodo, sino que la combinación del material de electrodo y los parámetros de erosión empleados durante la erosión serán los que definirán la rugosidad final alcanzada en la pieza.

La gama más alta la alcanzan los grafitos con tamaño medio de partícula por debajo de $1\ \mu\text{m}$. La Fig. 54, izquierda muestra la calidad industrial Poco AF5. Estos se caracterizan por una muy elevada resistencia mecánica ($1200\ \text{kg}/\text{cm}^2$) y su uso proporciona excelentes acabados superficiales manteniendo una alta capacidad de arranque y una buena resistencia al desgaste. Su coste únicamente justifica su utilización en aplicaciones especiales, como por ejemplo aquellas que requieran el uso de electrodos muy frágiles por su geometría o acabados superficiales de muy alta calidad.

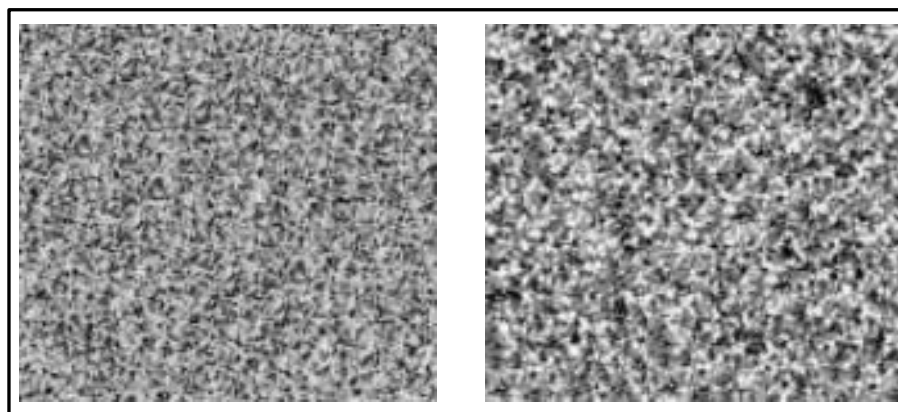


Fig. 54 Microfotografía de electrodos de grafito. Izq.) Grafito Poco AF5 con tamaño medio de partícula inferior a $1\ \mu\text{m}$. Dcha.) Grafito Poco C3 infiltrado con cobre.

Además de las calidades de grafito puro mencionadas, para ciertas aplicaciones se ha extendido el uso del grafito infiltrado con cobre. La Fig. 54, derecha, presenta la calidad industrial Poco C3. Estas calidades se suministran en tamaño medio de partícula desde 5 hasta $10\ \mu\text{m}$ y son adecuados para situaciones de erosión complicadas como, por ejemplo, materiales aeronáuticos, metal duro y situaciones en las que la limpieza del

gap sea complicada. En este caso, también las calidades de menor tamaño de partícula están asociadas a una mejor reproducción de detalles y acabados superficiales más finos. El alto coste de este material lo reserva solo para aplicaciones concretas.

3.6.1.8 ACEITES DIELECTRICOS

3.6.1.8.1 CARACTERÍSTICAS DE UN FLUIDO PARA ELECTROEROSIÓN

El fluido dieléctrico juega un papel fundamental en cualquier operación de electroerosión. Los fabricantes y los usuarios de estas máquinas reconocen la importancia de emplear un dieléctrico de buenas características que sea suministrado de forma conveniente y que sea adecuadamente filtrado.

De manera general, las características que se buscan en un buen fluido dieléctrico son las siguientes: buen aislamiento eléctrico, reducción al mínimo de la superficie de descarga, refrigeración de electrodo y pieza, buena acción de lavado de los residuos de la erosión, buena capacidad de filtración, alta velocidad de ionización y desionización y, finalmente, tener una viscosidad adecuada. Además de estas características, que pueden considerarse fundamentales, al fluido se le exigen también otros aspectos tales como ser inodoro e incoloro, no poseer hidrocarburos aromáticos y tener baja tendencia a la evaporación, para evitar provocar demasiados humos. En los siguientes párrafos se analizarán en detalle estos aspectos.

La función primera de un fluido dieléctrico es procurar el aislamiento entre electrodo y pieza de manera que salta la chispa cuando la distancia entre ambos sea mínima. Un gap mínimo permite aumentar el rendimiento de la erosión provocada por la energía de la descarga, así como mejorar la precisión dimensional de la pieza erosionada. El valor óptimo del gap, a igualdad de tensión de descarga, depende de la resistencia eléctrica del fluido, la cual varía en función de la presencia de burbujas de gas y de la contaminación producida por los residuos sólidos de la erosión. En otras palabras, la aparición de canales de descarga no controlados depende, hasta cierto punto, de la eficiencia del filtrado.

El gap que se establece en el proceso de erosión representa un compromiso entre dos factores diferentes: por un lado, una capacidad aislante elevada permite trabajar con un gap más estrecho, con lo que se consiguen altos niveles de precisión de corte; por el contrario, una distancia demasiado reducida entre electrodo y pieza provoca un aumento en el desgaste del electrodo y una reducción en la capacidad de arranque. Por tanto, la resistividad eléctrica es un factor crítico en la actuación de estos fluidos.

Otra de las funciones del fluido dieléctrico es mantener el canal de descarga tan reducido como sea posible con el objeto de concentrar la energía y la temperatura en una zona localizada, lo que permite obtener el mejor rendimiento de erosión por cada descarga. A medida que el canal de descarga se vuelve conductor por efecto de la

ionización, la viscosidad del fluido tiende a reducir la difusión del vapor y del gas. Cuanto mayor sea la viscosidad, mayor será la concentración de la energía y la profundidad de los cráteres, que se encuentran concentrados en una zona relativamente localizada. Por lo tanto, la viscosidad del fluido es la característica físico-química que gobierna el diámetro del canal de ionización para un mismo amperaje.

El fluido dieléctrico también lleva a cabo una función de refrigeración de la pieza y de electrodo para evitar fenómenos de sobrecalentamiento. En el curso de la descarga toda la energía se convierte en calor, que será el responsable de la fusión y/o evaporización del material e la pieza. Una cantidad inapropiada de dieléctrico puede en la zona de erosión puede ser causa de un sobrecalentamiento de la pieza (pudiendo comprometer su precisión) y de producción de gas y vapor en elevadas cantidades.

La capacidad de ionización y desionización rápida permite reducir los intervalos entre descargas. Ya se han comentado las ventajas que esto comporta, desde un aumento de la eficiencia del proceso hasta una mejora del acabado superficial de la pieza erosionada. La formación del canal de descarga durante la emisión de iones depende de la resistividad del fluido dieléctrico, que en el caso de los aceites se encuentra entorno a los $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$. La resistividad del fluido se ve fuertemente influida por el grado de contaminación del mismo. De este modo, tanto la eficiencia del sistema de filtrado como la propia capacidad de filtración del fluido influyen en su capacidad de ionización.

3.6.1.8.2 TIPOS DE ACEITES PARA ELECTROEROSIÓN

Tal y como se comentó anteriormente, y de manera general, dos son los grupos de compuestos que se emplean como dieléctricos en operaciones de electroerosión: los aceites minerales y el agua desionizada. En realidad el uso de esta última queda restringido a operaciones de corte por hilo y a algunos casos muy concretos de electroerosión por penetración, como ciertas operaciones de micromecanizado, por ejemplo, el taladrado por electroerosión de agujeros de muy reducido diámetro.

Entre el amplio espectro de compuestos de hidrocarburos existentes, solamente un número limitado de los mismos posee las características adecuadas para ser utilizado en operaciones de erosión, teniendo en cuenta que aquellos con un punto de inflamación inferior a 70°C no son inflamables; y que los que tienen una viscosidad superior a 8cSt a 20°C son demasiado viscosos como para permitir un desplazamiento suficiente en la zona del gap, especialmente cuando se han de erosionar cavidades profundas. De hecho, de entre los fluidos utilizados, los más viscosos presentan valores límite de $5,5 \text{ cSt}$ a 20°C .

Esta segunda condición exige un compromiso a la hora de seleccionar el fluido dieléctrico puesto que como ya se ha dicho, la viscosidad es la que gobierna la

superficie de descarga (en realidad, la anchura del canal de descarga), y en ocasiones puede interesar que las descargas estén localizadas en una pequeña superficie.

3.6.1.9 UTILLAJES Y ACCESORIOS PARA ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN

La estandarización de los utillajes juega un papel importante en el proceso de electroerosión por penetración. Así como en el caso de hilo los sistemas de utillaje están principalmente dirigidos al montaje y manipulación de pieza, en el caso de la erosión por penetración la gestión adecuada de los electrodos resulta crítica, tanto para la realización de las erosiones como para las mediciones correspondientes durante el proceso.

La optimización de la gestión de los electrodos se consigue mediante el empleo de utillajes estándar que aseguran la repititibilidad en el posicionamiento de hasta $2\ \mu\text{m}$, lo cual es especialmente importante debido a que se carece de un modelo de desgaste de electrodos lo que implica el empleo de varios electrodos para una misma erosión, con lo que la repititibilidad del proceso resulta indispensable. Este tipo de utillaje se conecta directamente al eje Z de la máquina de electroerosión, manteniendo el sistema de referencia elegido. La figura muestra el sistema de amarre de electrodos mediante portaelectrodos. Tal y como se observa en la figura debe utilizarse una varilla porta electrodos, la cual va templada y rectificada en el extremo correspondiente al cabezal de la máquina mientras que el otro extremo no va templado para poder utilizar uniones atornilladas, soldadura, etc. para el correcto amarre del electrodo.



Fig. 55 Sistemas de portaelectrodos. Izq.) Sistema de portaelectrodos para electrodo cilíndrico de cobre. Dcha.) Sistema de portaelectrodos para electrodo de grafito de sección cuadrada.

El útil portaelectrodos permite la posibilidad de limpieza por presión a través del electrodo o de conexión de limpieza lateral. Sin embargo, en ocasiones es preciso disponer la conexión de limpieza en el propio electrodo, tal y como muestra la *Fig. 55*.

En este caso se utilizan las mangueras de dieléctrico que se encuentran dispuestas en la propia máquina. En el caso de emplear uniones atornilladas, esta debe estar diseñada para acomodar dicha conexión y asegurar la distribución eficiente del dieléctrico.

Debe tenerse en cuenta que el electrodo se mecaniza en máquinas de control numérico y su control dimensional se realiza en máquinas de medir por coordenadas, perfilómetros confocales, etc. Por este motivo resulta de especial importancia mantener las referencias a la hora del montaje del electrodo en la máquina de electroerosión. Este aspecto se convierte aún en más importante en el empleo de electrodos parciales o en el caso de que se requieran mediciones del electrodo tras la erosión o cuando la erosión se lleva a cabo sobre la superficie de pieza previamente fresada, como ocurre en la actualidad en muchas aplicaciones.

En este contexto, los útiles portaelectrodos aportan una ventaja añadida, puesto que pueden llevarse de una máquina a otra sin perder las referencias. Así, sobre el propio útil en primer lugar se mecaniza el electrodo en el centro de mecanizado, a continuación y sin perder el cero pieza se puede llevar a la máquina de medir por coordenadas en la que se ejecutará automáticamente el programa de medida, y por último, el electrodo, cuyas mediciones ya han sido aceptadas, puede montarse con la máxima repetitividad en el cabezal de la máquina de electroerosión.

Pese a las facilidades que ofrece el portaelectrodos a la hora de la situación de los electrodos a la hora de su medición, pueden darse casos en los que sea necesaria la fabricación de útiles específicos para alinear los electrodos para su correcta medición. Puesto que se trabaja con errores del orden de micras, el más mínimo movimiento del electrodo a la hora de su medición provocaría la desvirtuación de los resultados obtenidos.

3.6.2 MARCO METODOLÓGICO

Introducción

La electroerosión por penetración es un proceso de mecanizado de alta precisión empleado en diversos sectores de la industria los cuales escogen el empleo de la electroerosión cuando requieren de muy altas precisiones en el acabado y las geometrías de las piezas a mecanizar.

Es por lo tanto que el desgaste de los electrodos durante la erosión por muy pequeño que resulte, ha de ser conocido, y en nuestro caso el ser medido de manera exacta.

Debido a la precisión del proceso requerida, la metodología empleada durante los ensayos ha de ser perfectamente replicable y garantizar de la misma manera una gran fiabilidad a la hora de realizar las mediciones. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, se procederá a explicar de manera detallada la metodología empleada a la hora de realizar los ensayos.

Los ensayos realizados se dividen en dos grandes grupos. Los ensayos realizados para cuñas de 60° y los ensayos realizados en Blisk. Debido a que son ensayos diferentes y con geometrías diferentes, la metodología de realización de los mismos y de medición y análisis de los resultados es de la misma manera, distinta. Es por ello que se explicarán por separado.

3.6.2.1 ENSAYOS CON ELECTRODOS CON FORMA DE CUÑA A 60°

Introducción

El estudio de geometrías de electrodo con forma de cuña es de gran interés debido a su actual aplicación en el mecanizado de componentes aeroespaciales. A su vez ésta geometría nos permite el análisis del efecto de la acumulación de calor en la punta del electrodo teniendo en cuenta que las esquinas de los electrodos tienden a sufrir un mayor desgaste durante el proceso de electroerosión, así como el estudio de la influencia de diversos parámetros en función de distintas profundidades de erosión.

En la actualidad se encuentra ampliamente extendida la premisa de que el gap en electroerosión por penetración es constante a lo largo de todo el perfil del electrodo. Dicha premisa queda en entredicho debido a la carencia de publicaciones relacionadas con su estudio, es por ello que gran parte del estudio se centrará en su análisis.

Un correcto conocimiento de la dimensión del gap a lo largo del perfil del electrodo nos proporcionará la capacidad de mejorar la precisión del proceso de mecanizado y sentará a su vez unas bases sólidas para futuros estudios de dicho proceso de mecanizado

Diseño del electrodo y estrategias de erosión

Para el diseño del electrodo se tuvo en cuenta los requerimientos geométricos del mismo para posteriores mediciones y análisis. Teniendo en cuenta que el ensayo de mayor profundidad de erosión sería a 4 mm se minimizó el tamaño de la cuña hasta los 8 mm de longitud dado que dicha longitud sería suficiente para la realización de todas las erosiones.

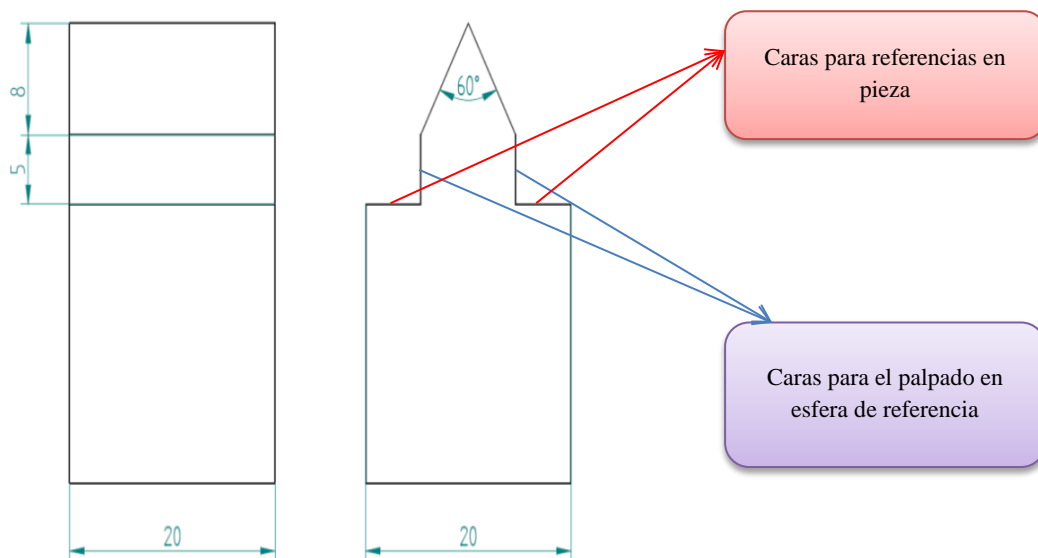


Fig. 56. Diseño final de electrodo

Partiendo de barras de grafito de sección cuadrada (20x20) se diseñó el electrodo de tal manera que dispusiésemos de dos caras planas con las que se pudiese realizar contactos en la pieza para poder situar los ceros de la erosión con mayor facilidad, a su vez se diseñaron dos caras paralelas para poder realizar contactos en la esfera de referencia y poder centrar el electrodo en el eje X respecto a la esfera para poder realizar mediciones las cuales serán explicadas en posteriores apartados *Fig. 109*.

El programa de corte de la pieza estará compuesto por interpolaciones lineales y será diseñado en el software de simulación de la empresa *ONA ELECTROEROSIÓN*. La interpretación de las trayectorias de corte en el programa de simulación estarán dadas por abreviaturas las cuales serán traducidas automáticamente al formato CNC tradicional por la propia máquina de corte por hilo *Fig. 57*.

En cuanto a las estrategias de erosión, puesto que las erosiones se realizarán mediante interpolaciones lineales negativas en el eje Z, se seleccionaron 4 tipos de ensayos a realizar para poder caracterizar así el desgaste en las primeras etapas de erosión de la

pieza, las cuales son las más dañinas para los electrodos. Se realizarán erosiones a (0.5, 1, 2 y 4) mm de profundidad.

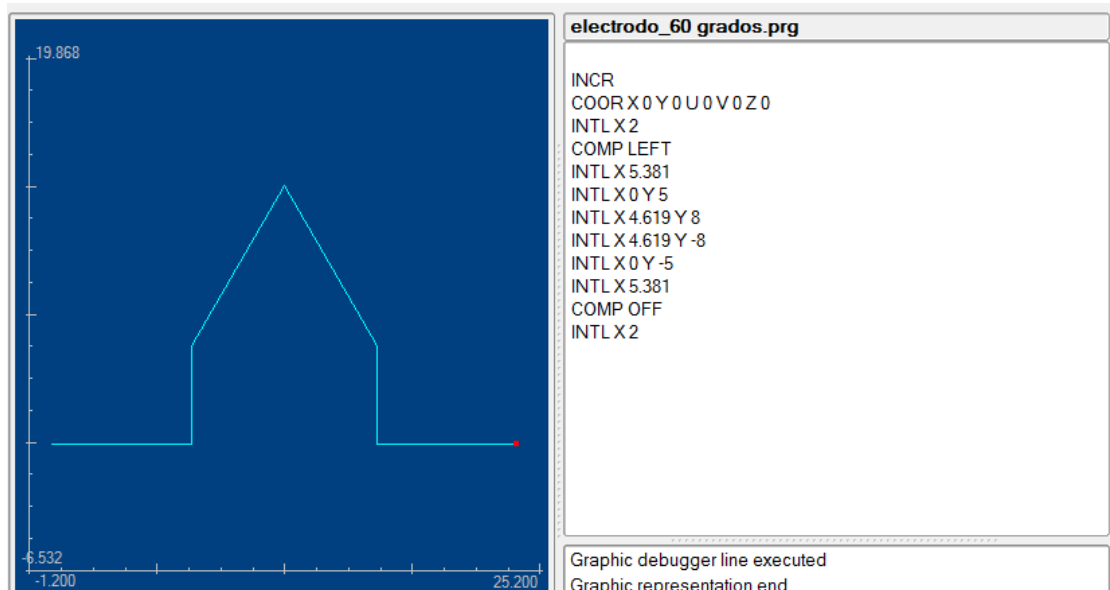


Fig. 57. Programa de corte de la geometría final de electrodo y representación gráfica de las trayectorias del mismo

Puesta a punto y protocolo de verificación de la máquina de WEDM

Como paso previo a cualquier ensayo, se procederá a la puesta a punto tanto de la máquina de corte por hilo como la máquina de electroerosión por penetración, así como de la correcta alineación de los utillajes empleados para la realización de los ensayos.

Protocolo de verificación de la Máquina de WEDM: Para la correcta puesta a punto de la máquina de corte por hilo se verificarán los siguientes parámetros.

1. Búsqueda de ceros máquina: Empleando el mando y en modo manual seleccionaremos la opción búsqueda de ceros. La búsqueda de los ceros en cada eje se realizará manteniendo pulsado dicho eje, tras lo cual la máquina buscará los ceros automáticamente, el orden de búsqueda de ceros máquina será el siguiente (X, Y, Z, U, V). Se ha de tener en cuenta la disposición de las piezas a cortar en la máquina para evitar colisiones durante la búsqueda de ceros.
2. Cálculo de verticalidad del hilo: Empleando la anilla de verticalidad se dispondrá el hilo en ella para que a continuación seleccionando la opción de verticalidad, se ejecuten automáticamente los ciclos de verticalidad en la anilla hasta obtener una tolerancia de verticalidad aceptable (0.01mm). La correcta verticalidad del hilo es un parámetro clave para garantizar unos cortes precisos.

3. Alineación del Chuck de posicionamiento : Puesto que el Chuck de posicionamiento nos garantiza una perfecta alineación en el plano XY debido a que tiene dicha cara de apoyo perfectamente rectificada, procederemos a su alineación en el plano XZ empleando un reloj comparador. La alineación se realizará ajustando los tornillos mediante los que está sujeto a la mesa hasta que obtengamos una alineación perfecta del Chuck.
4. Protocolo de verificación de la máquina de electroerosión por penetración: Para la correcta puesta a punto de la máquina de electroerosión por penetración se verificarán los siguientes parámetros.
5. Búsqueda de ceros máquina: Se procederá a la búsqueda de los ceros máquina de la máquina de electroerosión por penetración de la misma manera que se realizó para la máquina de corte por hilo.
6. Alineación de la mesa magnética: Se alineará la mesa magnética de la máquina de electroerosión por penetración empleando un reloj comparador. Se alineará en los ejes X e Y ajustando si fuese necesario los tornillos empleados para su sujeción. La correcta alineación de la mesa magnética es esencial para que a su vez la pieza a erosionar quede perfectamente alineada y se puedan realizar erosiones de manera precisa.

Fabricación de electrodos

Siendo la fabricación de electrodos una parte crítica para la correcta realización de los ensayos, se diseñó un protocolo a seguir para garantizar la repetitibilidad de los ensayos, dicho protocolo consta de las siguientes etapas a seguir en el orden indicado

Fase	Descripción
1	Selección y amarre de la barra de grafito POCO EDM 200 (20X20X300)
2	Alineación de la barra primaria
3	Diseño del programa y corte de la barra primaria
4	Instalación de la barra cortada en el portaelectrodos
5	Corte de la geometría de electrodo

Tabla 4. Protocolo de fabricación de electrodos

Los electrodos serán fabricados en la máquina de corte por hilo ONA NX3. Partiendo de barras de grafito POCO EDM200 *Tabla 4* de sección cuadrada (20X20X300) y de caras rectificadas.

1. Selección y amarre de la barra de grafito POCO EDM 200 (20X20X300): Se seleccionará una de las barras tal y como las disponemos de fábrica *Tabla 5*, las cuales denominaremos “barras primarias” y empleando un amarre que constará de dos tornillos y una pieza dispuestos tal y como se muestra en la *Fig. 58* se fijará la barra de manera contundente pero sin ejercer una presión excesiva para no dañar el grafito.

Tamaño medio de grano (μm)	10
Resistencia a compresión(kg/cm^2)	620
Resistencia a compresión (kg/cm^2)	1,100
Dureza (shore)	64
Resistividad eléctrica ($\mu\text{Ohm}\cdot\text{m}$)	12

Tabla 5. Propiedades del grafito POCO EDM 200

2. Alineación de la barra primaria : Al igual que al posicionar el Chuck, se alineará la barra correctamente en el plano XY empleando un reloj comparador puesto que al tener sus caras rectificadas de fábrica, la alineación en el plano ZY será perfecta.

3. Diseño del programa y corte de la barra primaria: Disponiendo de la barra ya alineada, se realizará un programa con el que se realizarán cortes transversales cada 60mm para poder de tal manera disponer de 5 barras de longitud 50mm. Dichos cortes se realizarán para trabajar con electrodos con geometrías más manejables y para poder “reafilear” el electrodo tras cada erosión, esto es, el volver a cortar un electrodo en la misma barra empleada para el anterior, dicho procedimiento se ha seleccionado para ahorrar material y aprovechar la alineación realizada en la misma barra para dos electrodos.

4. Instalación de la barra cortada en el portaelectrodos: Una vez se hayan realizado los cortes y se disponga de barras más pequeñas de 60mm de longitud, seleccionaremos una de ellas y la situaremos en el portaelectrodos apoyada en una de sus caras y sujeta mediante dos tornillos tal y como se muestra en la *Fig. 58*.

5. Corte de la geometría de electrodo: Procederemos a situar el portaelectrodos con la barra de grafito ya colocada en el Chuck *Fig. 58* el cual estará previamente alineado. Una vez esté todo colocado correctamente, cargaremos el programa de corte de la geometría de electrodo, el cual estará previamente diseñado, y realizaremos los

contactos necesarios para situar los ceros en la pieza de tal manera que coincidan con los ceros previamente definidos a la hora de diseñar el programa de corte.

A continuación procederemos a cargar la tecnología de corte requerida para el grafito e iniciaremos el corte. Una vez finalice el corte de la geometría del electrodo, desinstalaremos el portaelectrodos del Chuck con cuidado para no desalinearlo.

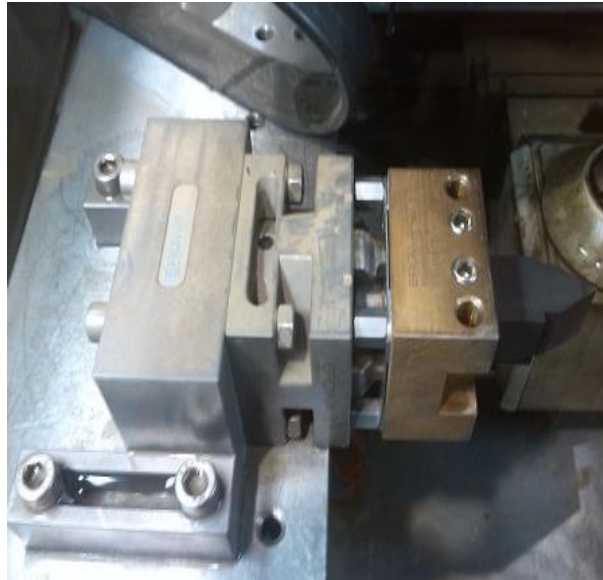


Fig. 58 Disposición del portaelectrodos en el Chuck de posicionamiento para el corte de la geometría del electrodo

En el caso de que la barra en la que se corte el nuevo electrodo haya sido empleada previamente para la realizar una erosión, el procedimiento es más sencillo, ya que únicamente tendremos que situar el portaelectrodos con el electrodo “usado” en el Chuck tras haberlo alineado y “reafilarlo”.

El reafilado consiste en el corte de la geometría de electrodo en un electrodo ya empleado *Fig. 59* para realizar una erosión. Con lo cual aprovecharemos un electrodo usado evitando de tal manera desperdiciar material y ahorrándonos una importante cantidad de tiempo el no tener que repetir los pasos 1, 2, 3 ,4 del protocolo.

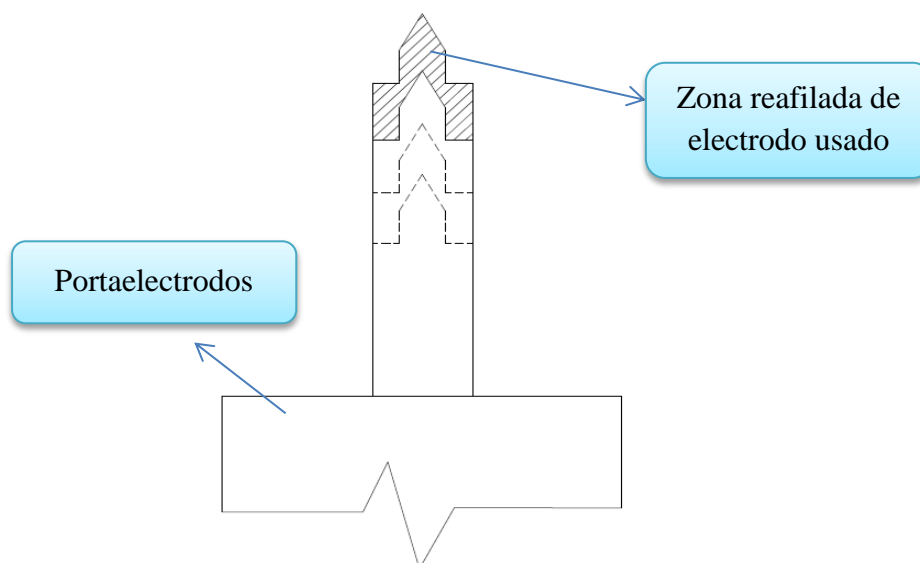


Fig. 59 Representación del proceso de reafilado de electrodos

Medición de electrodos nuevos

Una vez se disponga del electrodo ya cortado, se procederá a su medición. Para la medición del electrodo antes y después de las erosiones se empleará el perfilómetro confocal LEICA DCM 3D. Dicho perfilómetro tiene como característica la precisión que se puede alcanzar con sus mediciones y la cantidad de puntos que nos proporciona por medición siendo la incertidumbre de sus mediciones de $1\mu\text{m}$.

El protocolo de medición de electrodos nuevos diseñado nos garantiza la repetitibilidad de las mediciones y la posibilidad de la medición posterior del electrodo gastado en las mismas zonas que el electrodo nuevo, posibilitándonos los análisis posteriores. Dicho protocolo consta de las siguientes fases *Tabla 6*:

Fase	Descripción	Software
1	Posicionamiento del portaelectrodos en el utillaje de posicionamiento y alineación del electrodo	-
2	Selección del tipo de medición y sus parámetros	Leicascan
3	Obtención de las topografías	Leicascan
4	Obtención de los perfiles característicos de cada topografía	Leicamaps
5	Análisis de los perfiles	Leicamaps

Tabla 6. Protocolo de medición del electrodo nuevo y análisis de los resultados

1. Posicionamiento del portaelectrodos en el utillaje de posicionamiento y alineación del electrodo: Empleando el utillaje fabricado para garantizar la correcta horizontalidad del electrodo durante las mediciones, y a su vez, para poder garantizar la repititibilidad del proceso de medición durante las posteriores etapas de las que constan los ensayos, posicionaremos el electrodo en el utillaje.

A continuación alinearemos el electrodo de tal manera que quede completamente recto a la hora de realizar las mediciones. Dicha alineación se realizará recorriendo la punta del electrodo empleando los controles del perfilómetro y ajustándolo tantas veces como fuese necesario hasta garantizar su correcta posición.

2. Selección del tipo de medición y sus parámetros: Puesto que el perfilómetro LEICA DCM3D nos proporciona un gran abanico de posibilidades de medición, seleccionaremos el tipo de medición y los parámetros que emplearemos para las mediciones. A continuación se muestra una tabla en la que quedan representadas los diferentes métodos de medición empleados para cada una de las erosiones programadas y los parámetros seleccionados en cada una *Tabla 7*.

Profundidad de erosion	Tipo de medición	Objetivo empleado	Velocidad	Z Scan	Threshold	Luz
0.5mm	Surface; Topography	10X	X 1	900 μ m Simetry	0	Azul
1mm	Surface; Topography	10X	X 2	1400 Simetry	0	Azul
2mm	Surface; topography (stitching)	10X	X2	1504 Simetry	0	Azul
4mm	Surface; topography (stitching)	10X	X2	1504 Simetry	0	Azul

Tabla 7 Metodología de medición de electrodo empleada para cada profundidad de erosión

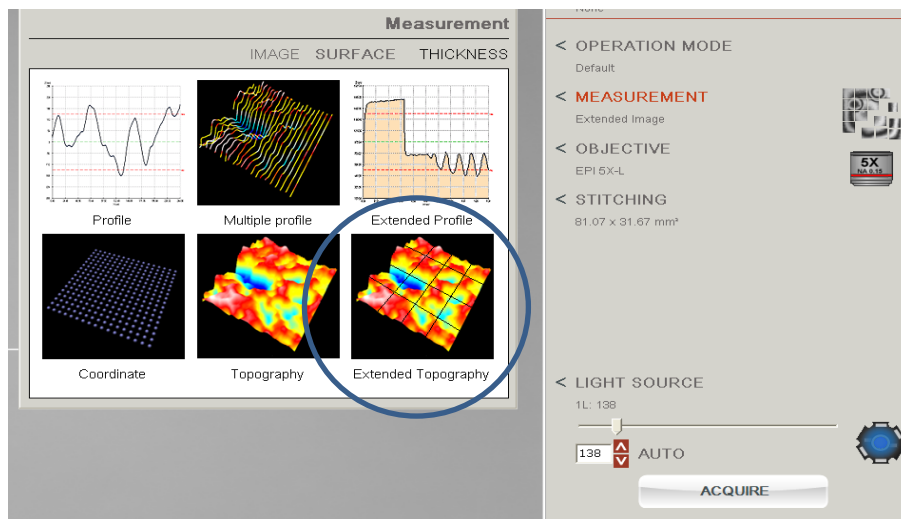


Fig. 60. Ejemplo de pantalla de selección del tipo de medición

La estrategia de medición empleada para los electrodos nuevos es la denominada (*Extended topography*) Fig. 60 la cual nos permite la medición de diversas topografías uniéndolas a posteriori en una única. Dicho procedimiento nos permite abarcar mayor longitud de medición pudiendo de tal manera caracterizar de mejor manera la geometría del electrodo.

A su vez, son varios los parámetros de la (*Extended topography*) los que pueden ser variados, concretamente en el apartado de STITCHING Fig. 61:

-La variación de las columnas y las filas empleadas para la topografía nos permitirá variar el área final que podremos medir.

-El valor del *Overlapping Area* nos permitirá modificar cuanto se superpondrán cada una de las topografías de las que constará el Stitching total.

-El valor de *Resolution* nos permitirá variar la resolución total de la topografía final.

Una vez seleccionado los parámetros de STITCHING requeridos para la medición procederemos a seleccionar la profundidad de medición de la topografía y la velocidad de medición, esto es, cada cuantos planos realizará la medición.

Para la realización de las mediciones y tal y como se muestra en *Tabla 7* emplearemos el tipo de escaneado en *Z Symmetric* Fig. 62, el cual tomando como referencia un punto nos proporcionará un barrido vertical a una distancia (Z,-Z) siendo la suma final de los dos barridos, tanto el positivo como el negativo, el rango final de medición que obtendremos en la topografía final. A su vez se seleccionará la longitud de medición total.

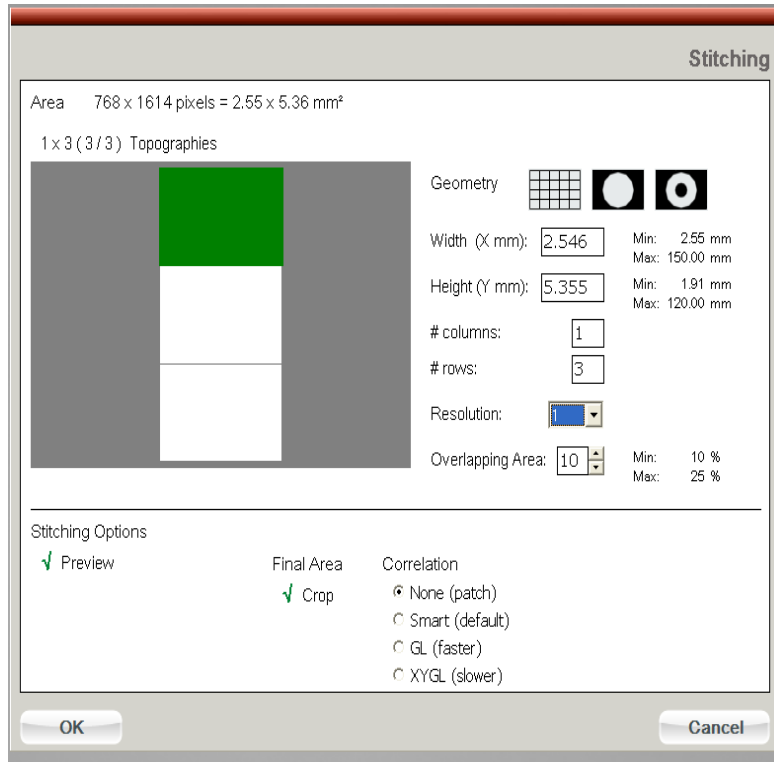


Fig. 61. Ventana de modificación de parámetros de STITCHING

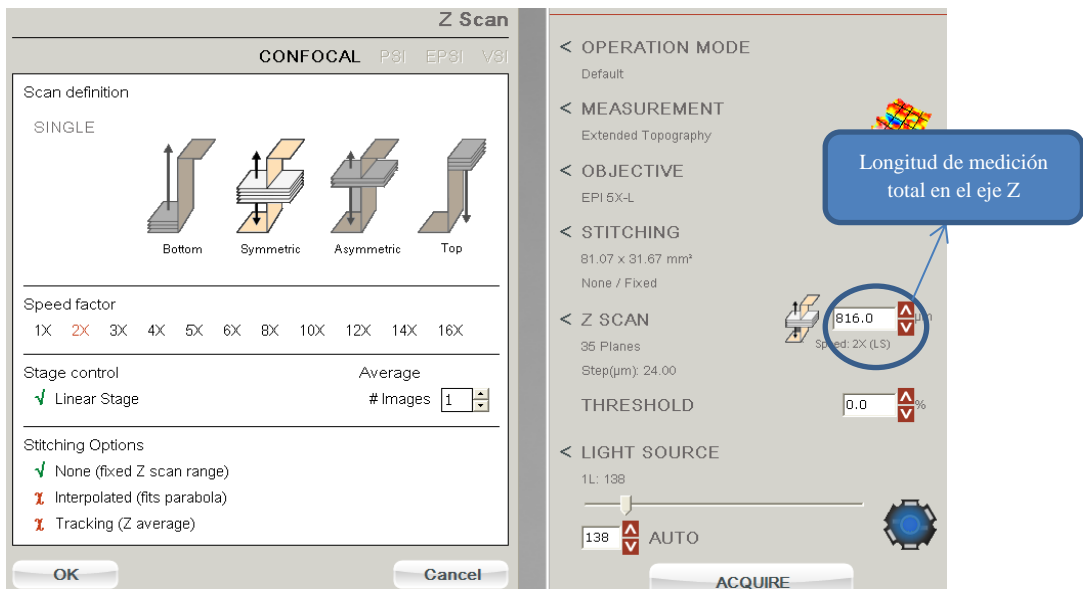


Fig. 62 Ventana de selección de los parámetros requeridos para la medición en el eje Z

Finalmente, como paso previo a la medición del electrodo, procederemos a seleccionar el tipo de luz que emplearemos para la medición. Tras realizar diversas pruebas, se obtuvo la conclusión de que las mediciones realizadas con luz azul proporcionaban resultados más satisfactorios. Por lo tanto todas las mediciones serán realizadas con la luz azul.

1. Obtención de las topografías: Tras seleccionar los parámetros requeridos para la medición, procederemos a pulsar el botón AUTO, el cual nos regulará automáticamente la luz azul con la que realizaremos las mediciones para que se realicen de manera óptima.

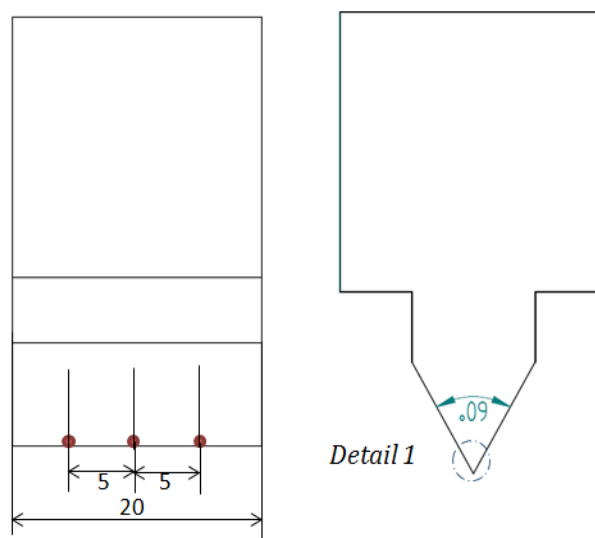


Fig. 63. Representación de las tres zonas de medida del electrodo

Las mediciones propuestas en el electrodo se realizarán en tres perfiles del mismo, una estará situada en el centro del electrodo, y las otras dos estarán dispuestas a 5 mm del centro *Fig. 63* pudiendo de tal manera comparar dichas mediciones antes y después de la erosión.

Una vez realizada la medición *Fig. 64* procederemos a guardar la misma en un archivo.plu el cual es el formato necesario para poder analizar los perfiles posteriormente mediante el software LEICMAPS. Dicho procedimiento se llevará a cabo sucesivamente para los tres puntos señalados anteriormente.

2. Análisis de los perfiles: Tras obtener las mediciones de los tres puntos del electrodo mencionadas anteriormente procederemos a abrir el programa LEICMAPS. Tal y como se mencionó previamente se procederá a abrir el archivo.plu y analizaremos diversos parámetros de las medidas.

Debido a que únicamente tendremos el perfil del electrodo nuevo, solo analizaremos el diámetro de punta del electrodo de cada uno de los tres perfiles y comprobaremos la correcta alineación de las tres medidas realizando una superposición de las mismas.

El protocolo de análisis de los electrodos nuevos se esquematizará a continuación en la *Tabla 8*:

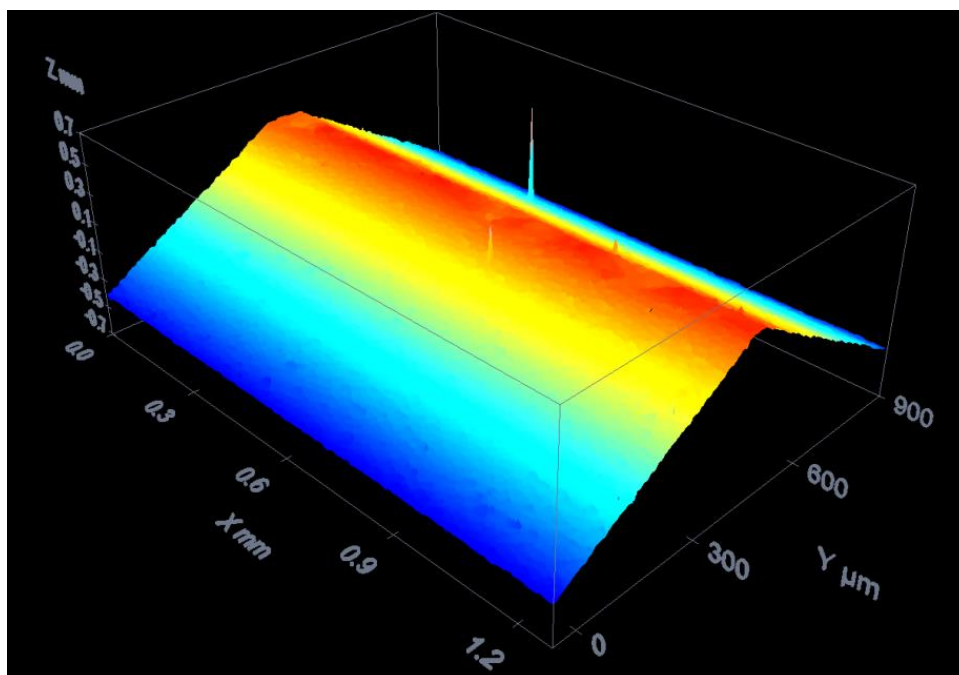


Fig. 64 Representación en 3D de un perfil medido del electrodo nuevo mediante el software LEICASCAN

<i>Paso</i>	<i>Descripción</i>
1	Abrir el archivo.plu
2	Extraer un perfil representativo de la topografía
3	Análisis del diámetro de punta del electrodo
4	Superposición de los tres perfiles para comprobar las mediciones

Tabla 8 .Protocolo de análisis de los perfiles de electrodo nuevo medidos mediante el LEICA DCM3D

Las tres primeras etapas del protocolo se repetirán para los tres perfiles representativos del electrodo y finalmente se procederá a realizar el último paso como comprobación de las tres mediciones.

1. Abrir el archivo.plu: Se abrirá el archivo.plu correspondiente a la topografía del punto medido en el software LEICAMAPS.

2. Extraer un perfil representativo de la topografía: Empleando la herramienta del LEICAMAPS “Profile extraction” Fig. 65 recorreremos la topografía hasta encontrar un perfil del electrodo que consideremos representativo de la medición Fig. 66.

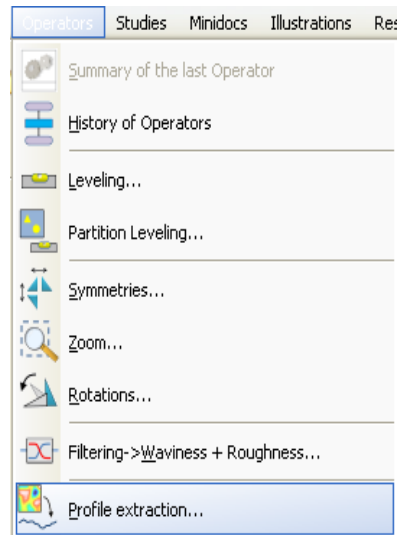


Fig. 65. Herramienta del software LEICAMAPS para obtener los perfiles representativos de las mediciones

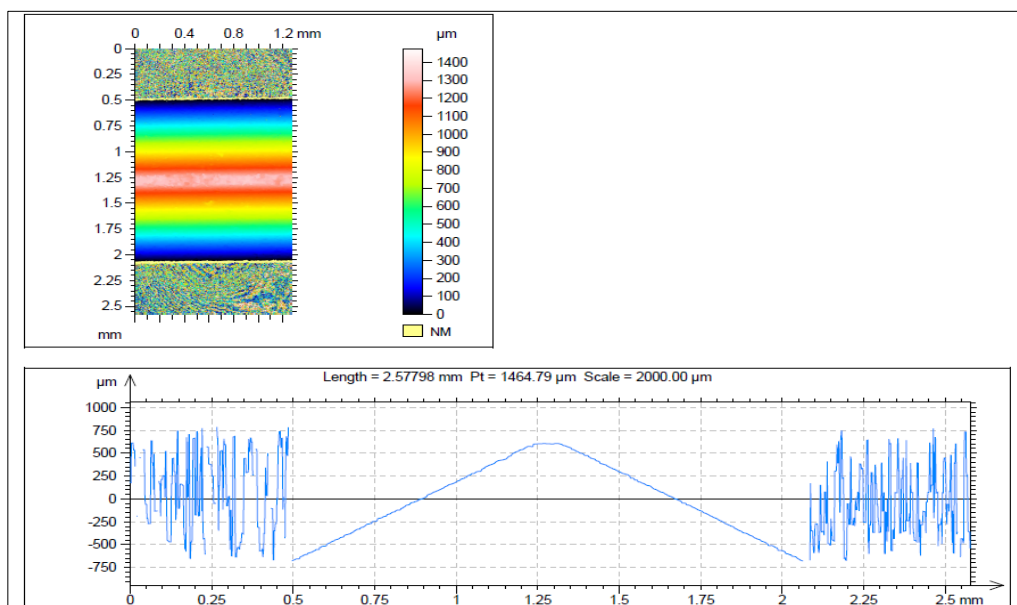


Fig. 66 Vista superior de la topografía de uno de los puntos a medir del electrodo y su perfil representativo

3. Análisis del diámetro de punta del electrodo : Tras la obtención del perfil representativo de la topografía, seleccionándola y empleando una herramienta del

software LEICAMAPS llamada (“Countour Anlaysia”) procederemos a medir al radio de punta del electrodo nuevo Fig. 67 .

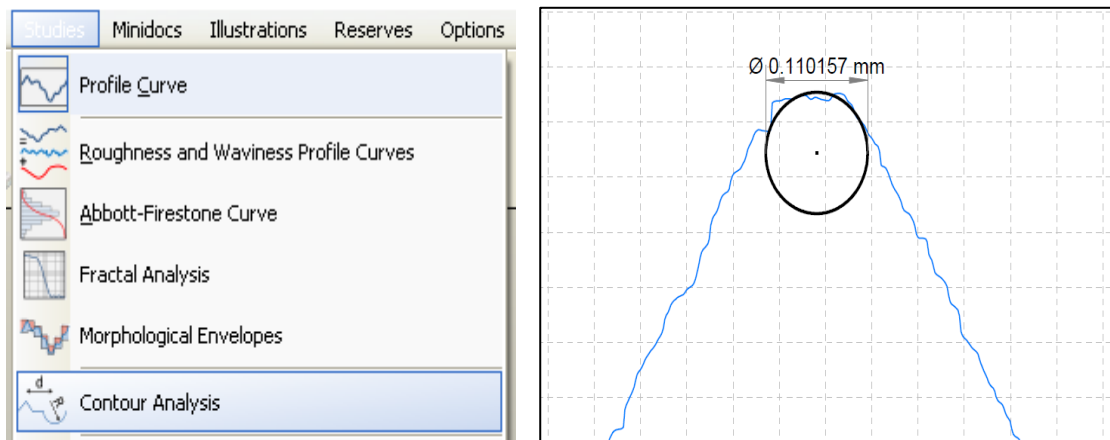


Fig. 67. Izda.) Ventana de la herramienta de “Contour Analysis”. Dcha.) Representación de la medición del radio de punta de un electrodo

4. Superposición de los tres perfiles para comprobar las mediciones: Como paso final del protocolo de medición de electrodos nuevos, se procederá a la superposición de los perfiles representativos obtenidos en el paso anterior. Dicha superposición se realizará mediante la función “*profile subtraction*” y su representación gráfica.

La comprobación de las mediciones es de vital importancia dado que si su alineación no fuese correcta, las medidas posteriores del electrodo gastado y el análisis del desgaste quedarían desvirtuados.

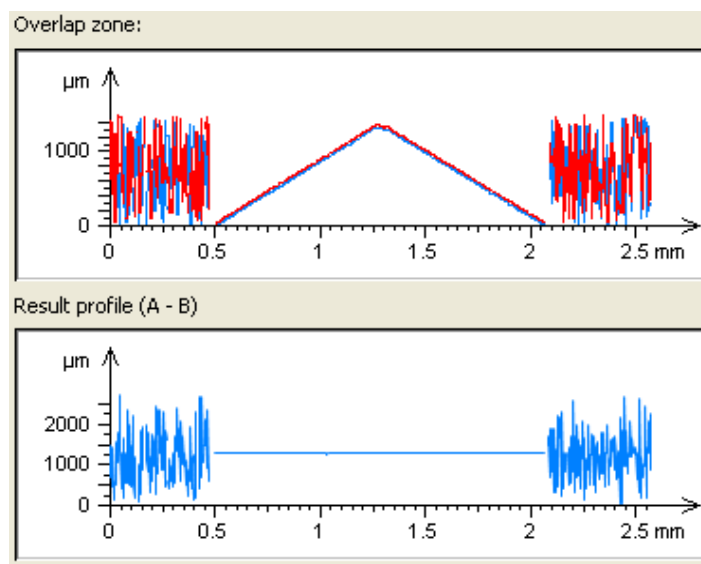


Fig. 68. Imagen de la superposición de perfiles como comprobación final

Como se observa en la *Fig. 68* el resultado de la superposición de ambos perfiles es una línea recta, eso significa que ambos perfiles se superponen perfectamente.

Rectificado de la pieza

Previo a cualquier erosión se preparará la pieza para poder realizar la erosión en condiciones idóneas. Para ello se procederá al rectificado de la pieza. El rectificado se llevará a cabo tanto en la cara a erosionar como en la cara donde se apoyará la pieza sobre la mesa magnética para garantizar su total planicidad.

Para el rectificado, se limpiará la mesa magnética donde se situará la pieza. A continuación procederemos al diamantado de la muela para garantizar un rectificado preciso. Se realizarán tantas pasadas como se crea conveniente para garantizar que la superficie a erosionar se encuentre en perfectas condiciones. Tras rectificar la pieza, para evitar el contacto del agua y la taladrina con el dieléctrico de la máquina de electroerosión limpiaremos adecuadamente la pieza y finalmente la secaremos con aire comprimido.

Erosión de la pieza

Una vez realizadas las mediciones correspondientes del electrodo nuevo, sin mover el utillaje para la fijación del portaelectrodos a la hora de realizar las mediciones en el perfilómetro LEICA DCM3D, llevaremos el electrodo en su portaelectrodos correspondiente a la máquina de electroerosión por penetración ONA CS300. Para la realización de las erosiones se diseñó un protocolo de ejecución para garantizar la repetitibilidad del proceso. A continuación se mostrarán las fases del protocolo Tabla 9 y la explicación de las mismas.

<i>Fase</i>	<i>Descripción</i>
1	Instalación del electrodo en la máquina de erosión
2	Palpado de los tres perfiles representativos en la esfera de referencia
3	Disposición de la pieza a erosionar y alineado de la misma
4	Realización de ceros para la erosión
5	Introducción de la tecnología de erosión
6	Introducción del programa de erosión
7	Erosión y control del tiempo
8	Palpado en la esfera de referencia tras la erosión

Tabla 9. Protocolo de erosión

1. Instalación del electrodo en la máquina de erosión: Se instalará el electrodo en la máquina de electroerosión por penetración de tal manera que la punta del electrodo quede paralela a la disposición del eje Y de la máquina.
2. Palpado de los tres perfiles representativos en la esfera de referencia: Para el palpado del electrodo previo a la erosión se seguirán los siguientes pasos.
 - 2.1 Se harán contactos en el electrodo, en sus dos caras paralelas en el eje X, y se llevará al punto medio de ambos contactos.
 - 2.2 Se harán contactos en el electrodo, en dos de sus caras paralelas en el eje Y, y se llevará al punto medio de los dos contacto. Tras este último paso tendremos el electrodo perfectamente centrado con respecto de la esfera de referencia.
 - 2.3 Teniendo el electrodo centrado respecto de la esfera de referencia realizaremos contactos en los puntos señalados en la *Fig. 63* y anotaremos las coordenadas máquina correspondientes a cada contacto *Fig. 69*.



Fig. 69. Mediciones en máquina empleando la esfera de referencia

3. Disposición de la pieza a erosionar y alineado de la misma: Tras instalar el electrodo en la máquina dispondremos la pieza a erosionar en la mesa magnética y la alinearemos con un reloj comparador, dicha alineación ha de ser lo más precisa posible dado que se requerirán unas erosiones perfectamente paralelas a una de las caras de la pieza para posteriormente poder rebanar la cavidad con exactitud.

4. Realización de ceros para la erosión: En el caso de ser la primera de una serie de erosiones previas a un rebano de las cavidades, para situar la erosión en el emplazamiento de la pieza deseado se procederá a realizar un contacto en el lugar deseado de la pieza y se procederá a apuntar las coordenadas máquina donde se dispondrá la erosión. Si la erosión a realizar no fuese la primera de una serie de erosiones, se procederá a llevar el electrodo a las coordenadas marcada por la erosión previa y se desplazará paralelamente el electrodo para la realización de la erosión. Dicho procedimiento se llevará a cabo para poder (si es necesario) rebano varias cavidades consecutivas. Tras realizar el contacto ha de tenerse en cuenta a la hora de introducir la profundidad de erosión que automáticamente el electrodo se desplazará 1mm con respecto de la superficie a erosionar.

5. Introducción de la tecnología de erosión: Tras tener situada la pieza en el emplazamiento requerido procederemos a introducir la tecnología que será empleada en la erosión *Tabla 10*.

Corriente de descarga, I (A)	14
Corriente pico de descarga, IP (A)	21
Voltaje, U_0 (V)	160
Tiempo de pulso, t_{on} (μ s)	200
Tiempo de pausa, t_{off} (μ s)	25
Voltaje del servo, S (V)	20
Fluido dieléctrico	EDM fluid GR2

Tabla 10 Parámetros EDM para un VDI38 en máquina de electroerosión por penetración ONA CS300

6. Introducción del programa de erosión: En el caso de los electrodos con forma de cuña a 60° los programas de erosión serán EMDI, esto es, que solo constarán de una orden, dado que la erosión tendrá una única trayectoria en $-Z$. Se tendrá en cuenta a la hora de introducir la orden el milímetro extra que se desplazará el electrodo tras el contacto.

7. Erosión y control del tiempo: En el momento de comenzar la erosión se apuntará la hora a la que comienza. Posteriormente durante la erosión se mantendrá un control sobre la calidad de las descargas, observando periódicamente el display con el que cuenta la máquina ONA CS300 *Fig. 70*.

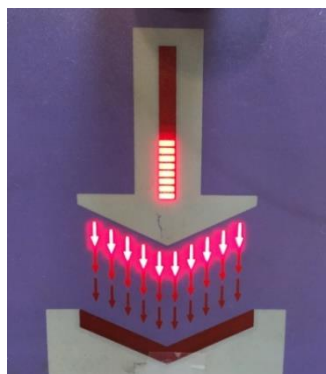


Fig. 70. Display de control calidad de descargas de la máquina de electroerosión por penetración ONA CS300.

8. Palpado en la esfera de referencia tras la erosión: Una vez finalizada la erosión se procederá a realizar contactos en los tres puntos de la punta del electrodo tal y como se realizó para el electrodo nuevo antes de realizar la erosión, dicho procedimiento de palpado en la esfera de referencia queda descrito en los puntos 2.1, 2.2, 2.4.

Tras realizar el palpado de los tres puntos mencionados y habiendo apuntado las coordenadas máquina de los mismos, se procederá a realizar la resta entre las coordenadas de cada punto antes de la erosión y las coordenadas de los puntos tras la erosión, pudiendo de tal manera obtener la longitud de electrodo desgastada durante la erosión en dichos puntos.

Medición de electrodos tras le erosión

Una vez finalizada la medición en la esfera de referencia, desinstalaremos el electrodo de la máquina de penetración y procederemos a limpiarlo con acetona. La acetona será aplicada suavemente y con un paño con el fin de eliminar el ruido en las mediciones posteriores en el perfilómetro. Tras limpiar el electrodo procederemos a llevar a cabo el protocolo de medición de electrodo tras la erosión tal y como se muestra en la *Tabla 11* a continuación.

<i>Etapa</i>	<i>Descripción</i>	<i>Software</i>
1	Posicionamiento del portaelectrodos en el utillaje de posicionamiento y alineación del electrodo	-
2	Medición del electrodo en los tres puntos	Leicascan
3	Obtención de los perfiles característicos de cada medición	Leicamaps
4	Superposición de perfiles como comprobación	Leicamaps
5	Obtención de los radios de punta de electrodo	Leicamaps
6	Obtención del área desgastada de cada electrodo	Leicamaps

Tabla 11. Protocolo de medición de electrodos tras la erosión

1. Posicionamiento del portaelectrodos en el utillaje de posicionamiento y alineación del electrodo : Se procederá a situar el portaelectrodos en el utillaje de posicionamiento al igual que se hizo para las mediciones en el LEICA DCM3D para los electrodos previo a la erosión.

De igual manera se alineará la punta del electrodo para garantizar a horizontalidad del mismo, cabe mencionar que la disposición del electrodo respecto del perfilómetro será la misma debido a que el utillaje de posicionamiento permanecerá inmóvil durante el proceso intermedio entre mediciones esto es, la erosión.

2. Obtención de las topografías en los tres puntos: Al igual que se realizó para los electrodos antes de la erosión, se procederá a realizar las topografías en los tres mismos puntos que para el electrodo nuevo.

Se emplearán los mismos parámetros de medición que para el electrodo antes de la erosión, esto es debido a que para que posteriormente puedan ser comparados los perfiles representativos de antes y después de la erosión, las topografías de las que se obtienen dichos perfiles han de estar medidas con los mismos parámetros.

Cabe mencionar que en las medidas de los electrodos tras la erosión, nos encontraremos con más ruido que en las mediciones previas a la erosión *Fig. 71*, esto es debido a que el perfilómetro LEICA DCM3D funciona con luz láser.

La luz láser de la que dispone el perfilómetro incide de manera vertical sobre la superficie a medir, *Fig. 71*, dicha característica no influye negativamente al realizar las mediciones del electrodo nuevo debido a que la superficie a medir será perfectamente lisa y podrá ser medida perfectamente.

El problema de las mediciones se encuentra al medir el electrodo tras la erosión. Debido a que el electrodo no se desgasta de manera homogénea, sino que son los granos de grafito los que se desprenden al realizar la erosión, puede darse la situación de que la geometría final del electrodo contenga zonas a las cuales no pueda incidir la luz láser del perfilómetro, y por lo tanto el perfilómetro no reciba información sobre el punto en cuestión.

Como consecuencia, las zonas en las que el perfilómetro no sea capaz de incidir de manera precisa, nos devolverá como resultado ruido, el cual podrá ser eliminado en posteriores etapas en las que interpretaremos los resultados.

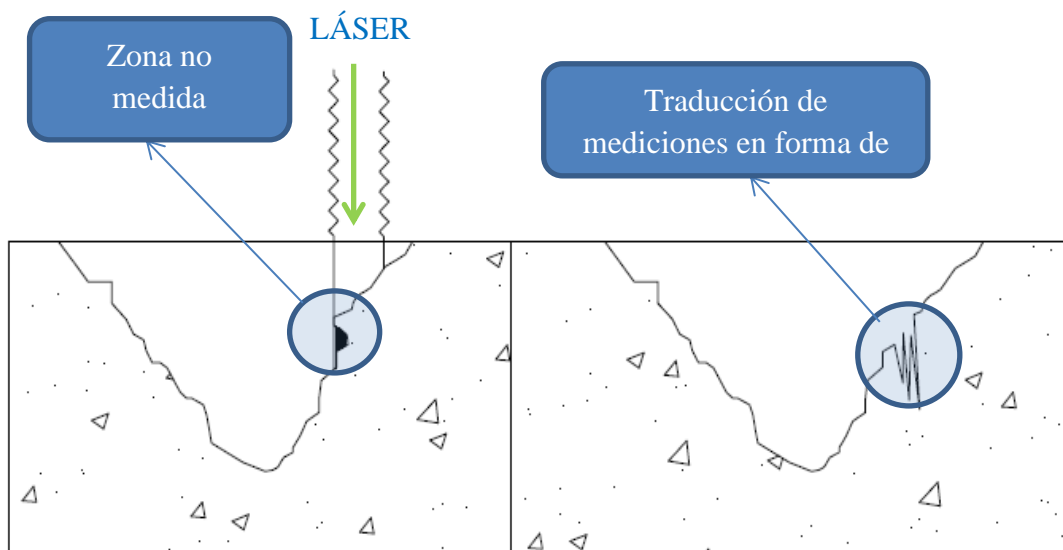


Fig. 71. Izda.) Representación del proceso de medición del LEICA DCM3D.
Dcha.) Representación del perfil con ruido tras la medición

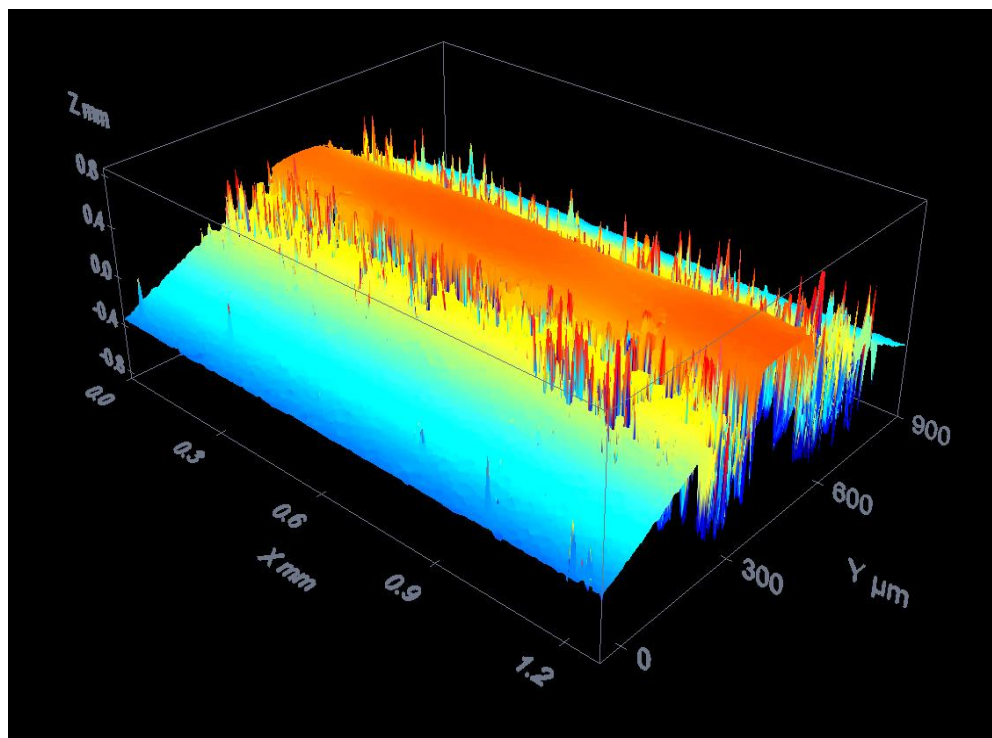


Fig. 72. Representación en 3D de un perfil de electrodo tras la erosión

- 3.Obtención de los perfiles característicos de cada medición: Para la obtención de perfiles representativos de cada uno de los tres puntos de electrodo de los cuales se ha obtenido la topografía, se seguirá el mismo procedimiento descrito para la obtención de perfiles representativos en las mediciones de electrodos antes de la erosión. Cabe mencionar que en el caso de las topografías de los electrodos tras la erosión se tratará de obtener los perfiles representativos con menor cantidad de ruido como sea posible dado que posteriormente nos facilitará el análisis posterior de los resultados.
- 4.Superposición de perfiles como comprobación: Al igual que en las mediciones realizadas en los electrodos previas a la erosión, se realizará una comprobación de los perfiles característicos obtenidos de cada una de las tres topografías *Fig. 68* con el fin de verificar la horizontalidad de las mediciones.
- 5.Obtención de los radios de punta de electrodo: Tras comprobar que las mediciones han sido correctas se procederá a obtener el radio de punta de cada uno de los tres perfiles característicos obtenidos previamente. El procedimiento de medición de los radios de punta será el mismo que el descrito para los electrodos antes de la erosión.
- 6.Obtención del área desgastada de cada electrodo: Como etapa final del protocolo de medición de electrodos tras la erosión, se procederá a medir el área desgastada de cada uno de los puntos en los que se haya realizado la topografía.

Tras la consecución de las etapas posteriores, tendremos un total de seis perfiles característicos agrupados dos a dos, esto es, por cada uno de los tres puntos del electrodo en el que se han realizado las mediciones tendremos un perfil previo a la erosión y un perfil tras la erosión. Empleando el software Leicamaps agruparemos los perfiles dos a dos para disponer de una manera ordenada los resultados y procederemos a seguir los siguientes pasos.

6.1 Agrupación de la vistas superiores de las topografías de antes y después de la erosión (*la vista superior saldrá por defecto al abrir el archivo.plu en el software leicamaps*). Así como de los perfiles característicos de cada una de las topografías.

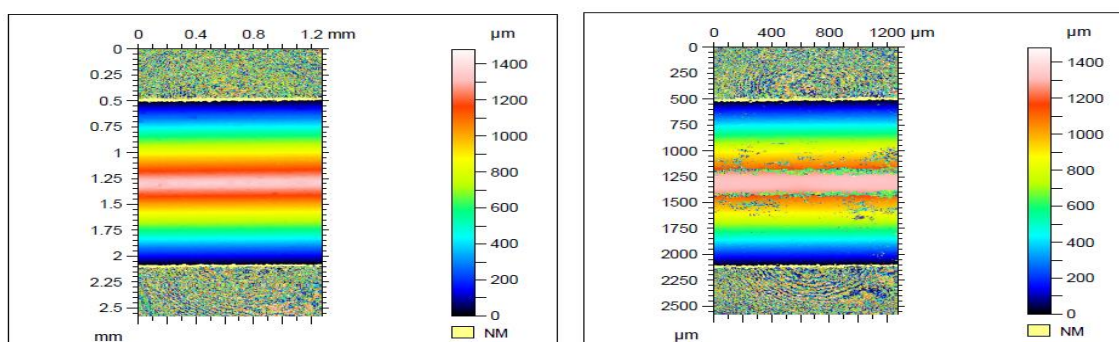


Fig. 73. Vistas superiores de las topografías de un mismo punto. Izda.) Antes de la erosión. Dcha.) Después de la erosión

6.2 Para la medición del área desgastada, emplearemos la herramienta del software Leicamaps denominada “*Profile subtraction*” la cual es empleada a su vez en etapas previas como herramienta de comprobación de las mediciones Fig. 74, Fig. 75.

En el caso de la medición del área, dicha herramienta nos proporcionará un gráfico con el área resultante de la sustracción del perfil del electrodo tras la erosión, del perfil del electrodo previo a la erosión.

Teniendo la representación gráfica del área resultante de la sustracción, procederemos a calcular el valor numérico de la misma. Para ello emplearemos una herramienta que nos ofrece el leicamaps la cual se llama “*Surface of a Hole/Peak*”. A su vez la misma herramienta nos permitirá medir el área de diversas maneras, de las cuales, nosotros seleccionaremos la opción “*Between the bars*”.

La opción de medición “*Between the bars*” nos permitirá acotar la geometría de la cual deseemos conocer el área Fig. 76.

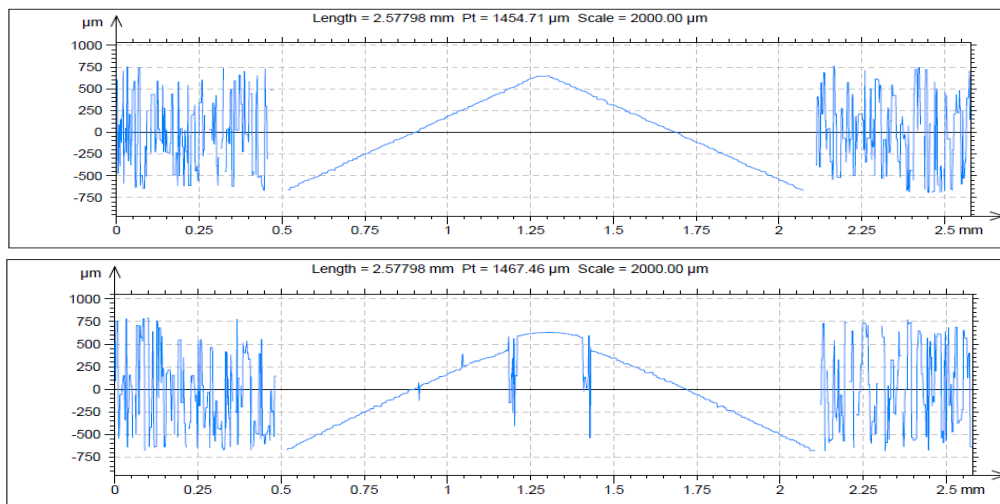


Fig. 75. Perfiles característicos de un mismo punto de medición antes y después de la erosión

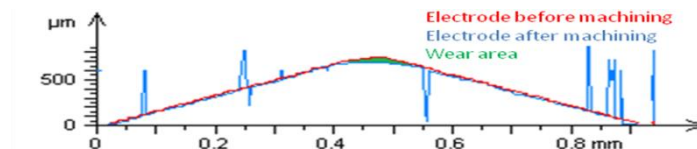


Fig. 74. Resultado de la superposición de los perfiles de electrodo y representación de la zona desgastada.

Una vez finalizado protocolo de medición del electrodo tras la erosión, procederemos a guardar el archivo.pdf de la hoja de análisis que nos quedará como resultado en el Leicamaps. El guardado del archivo.pdf nos servirá como referencia rápida a los resultados obtenidos en cada una de las mediciones, facilitándonos su interpretación.

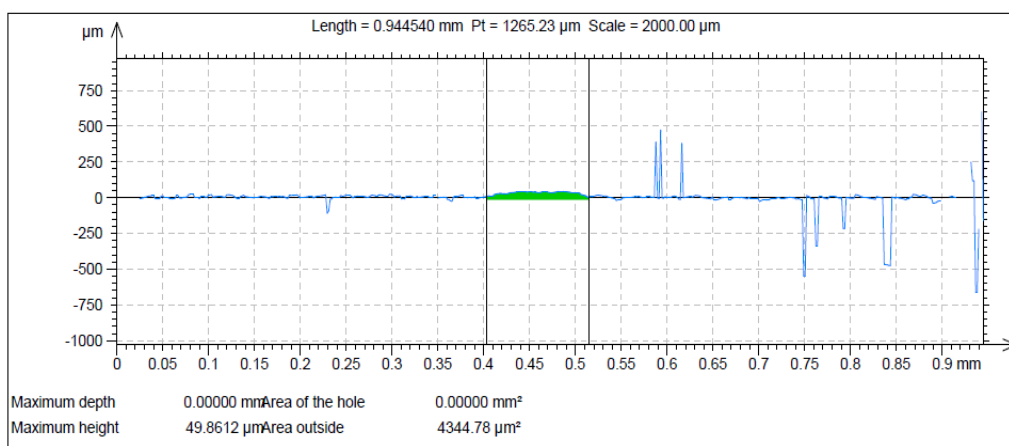


Fig. 76. Representación del cálculo del valor numérico del área desgastada empleando la estrategia de medición "Profile subtraction" → "Surface of a hole peak" → "Between the bars"

Rebanado de cavidades

Una vez finalizado el análisis del electrodo, se procederá al análisis de la cavidad generada tras la erosión. Al igual que al analizar el electrodo, se realizará el análisis de las tres secciones de la cavidad correspondientes a las 3 secciones de electrodo analizadas previamente. Para el rebanado de cavidades se diseñó un protocolo a seguir, explicado a continuación *Tabla 12*. Para el corte de las rebanadas se empleará la máquina de corte por hilo ONA PRIMA E250.

<i>Etapas</i>	<i>Descripción</i>
1	Amarre y alineación de la pieza
2	Diseño del programa de corte de rebanadas
3	Corte de las rebanadas

Tabla 12. Protocolo de corte de rebanadas de la cavidad

1. Amarre y alineación de la pieza: Se procederá a amarrar la pieza empleando el mismo sistema que para el amarre de las barras primarias. A continuación alinearemos la pieza empleando un reloj comparador. La alineación de la pieza a de ser lo más exacta posible dado que un rebanado de la cavidad con la pieza mal alineada provocaría rebanadas no perpendiculares a la erosión.

2. Diseño del programa de corte de las rebanadas: Para el diseño del programa de rebanado se tendrán en cuenta tanto la longitud de la erosión *aprox. 20mm*, como la distancia entre las rebanadas, la cual será de *5mm*.

A su vez, mediremos con un calibre la distancia desde la arista de la pieza hasta el final de la erosión y añadiremos una pequeña distancia (*2 o 3 mm*) para que en posteriores mediciones de la rebanada, dicha distancia pueda ser empleada como referencia.

Tras tener acotadas las distancias requeridas para el diseño del programa, procederemos a realizar el programa de corte empleando como punto de origen el coordenadas el señalado como $(0,0)$, dicho punto tendrá como $(X=0)$, la distancia en el eje X en la que la cavidad comienza, y como $(Y=0)$ la distancia L citada anteriormente *Fig. 77*.

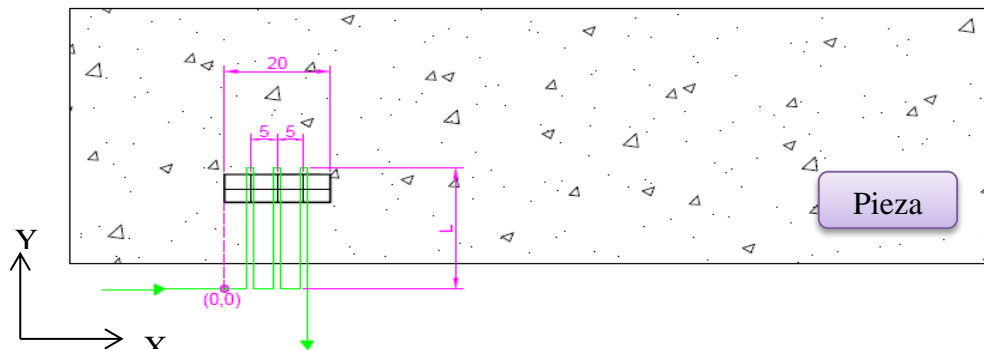


Fig. 77. Representación gráfica de la trayectoria de un programa de rebanado de cavidades y sus parámetros principales

3. Corte de las rebanadas: Tras introducir el programa seleccionaremos la tecnología de corte requerida para el acero F-114 realizaremos el corte de las rebanadas *Fig. 78*.



Fig. 78. Imagen representativa de la pieza tras el rebanado de la cavidad

Medición de las cavidades

Para la medición de las cavidades emplearemos el perfilómetro LEICA DCM3D. Para ello, emplearemos una herramienta del software LEICASCAN. A continuación se explicará el tipo de medición y a su vez el protocolo a seguir para la correcta medición de las cavidades *Tabla 13*.

<i>Etapa</i>	<i>Descripción</i>	<i>Programa</i>
1	Disposición de la cavidad para la medición	-
2	Selección del tipo de medición y sus parámetros	-
3	Medición y guardado de la imagen	Leicascan

Tabla 13. Protocolo de medición de cavidades mediante el perfilómetro LEICA DCM3D

1. Disposición de la cavidad para la medición: Para la preparación de la cavidad para la medición se ha de tener en cuenta que para que el perfil de la cavidad sea perfectamente visible, se ha de disponer un fondo de color blanco para que el contraste entre el color del acero F-114 y el fondo nos facilite la interpretación posterior de las imágenes.

Para conseguir una correcta horizontalidad de la cavidad emplearemos una pieza de metacrilato. A su vez para conseguir el contraste deseado situaremos un folio blanco encima de la pieza de metacrilato y situaremos la cavidad sobre el mismo.

Posteriormente se procederá a fijar la cavidad al folio empleando celo, la fijación de la cavidad es necesaria debido a que el movimiento de la mesa del perfilómetro a la hora de realizar las mediciones nos podría mover la cavidad, resultando en imágenes incorrectas y desenfocadas.

2. Selección del tipo de medición y sus parámetros: Las mediciones de la cavidad se realizarán mediante el software Leicascan. Para ello se empleará el tipo de medición “*extended image*” *Fig. 79*, mediante la cual podremos juntar el número de imágenes que necesitemos para abarcar el área de medición requerida.

3. Los parámetros de medición a seleccionar se pueden observar en la *Fig. 79* y los finalmente empleados para cada cavidad en función de la profundidad de erosión quedan representados en la *Tabla 7*.

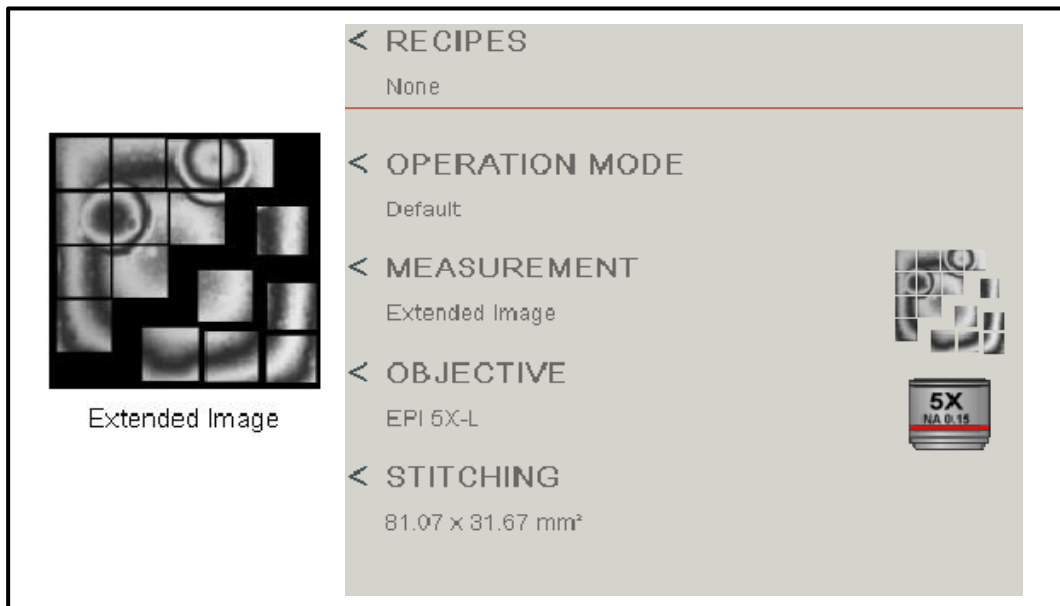


Fig. 79. Tipo de medición empleada y parámetros seleccionables en la misma

Erosión [mm]	Tipo de medida	Objective	Área	Luz
0.5	Image; Extended Image	20X	2.26 X 0.088 mm ²	Blue
1	Image; Extended Image	10X	3.447 X 1.769 mm ²	Blue
2	Image; Extended Image	10X	4.525 X 2.581 mm ²	Blue
4	Image; Extended Image	10X	8.882 X 5.843 mm ²	Blue

Tabla 14 Parámetros de las mediciones empleados para las mediciones de las cavidades en función de la profundidad de erosión

Cabe mencionar que el tamaño final del “*stitching*” realizado, el cual nos saldrá automáticamente en la ventana de “*stitching*” cuando vayamos a modificar sus parámetros, ha de ser apuntado debido a que sin las dimensiones reales de la foto que hemos sacado sería imposible realizar el estudio posterior de la cavidad y del electrodo.

Una vez obtenida cada imagen, se procederá a su guardado. Debido al hecho de que para los análisis posteriores en el software SIEMENS NX se requerirá una imagen en formato.tiff, se necesitarán dos pasos para transformar la imagen a dicho formato.

El primero paso consistirá en emplear el propio programa Leicascan para guardar la imagen en formato.jpg. A continuación se abrirá la imagen.jpg en el software Paint, el cual nos permitirá guardar la imagen en cualquier formato que deseemos, que en nuestro caso será el formato.tiff.

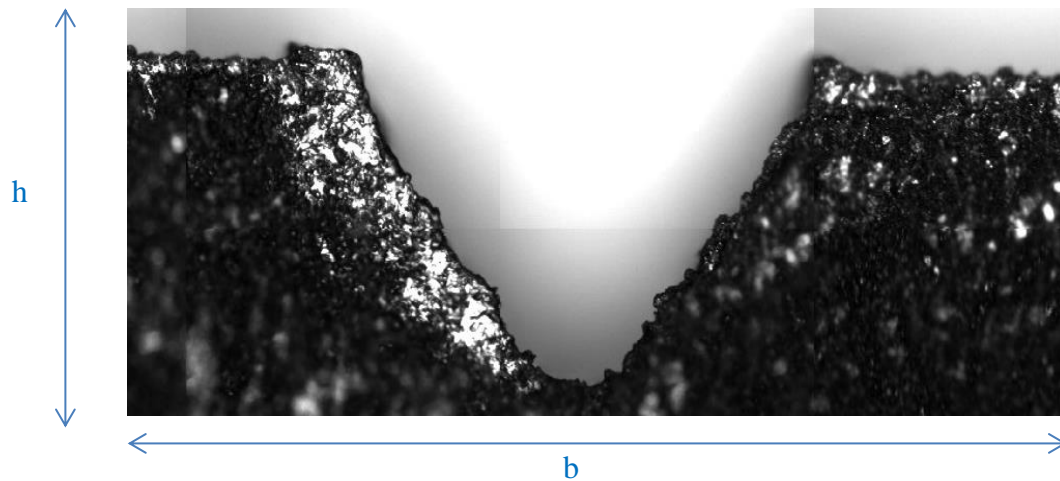


Fig. 80 Imagen de una cavidad obtenida empleando el perfilómetro LEICA DCM3D

3.6.2.3 ENSAYOS CON ELECTRODOS PARA BLISK

Introducción

Una vez realizadas las erosiones con las cuñas a 60° se propuso la realización de erosiones con electrodos con geometrías finales de fabricación, esto es, que tengan una geometría específica para un fin concreto. Para ello se diseñó una geometría de electrodo empleada en la fabricación de Blisk mediante electroerosión por penetración.

El estudio del desgaste de electrodos empleados para la fabricación de Blisk tiene una gran relevancia debido a la gran dificultad de mecanizado de los mismos y de su gran valor añadido.

Diseño del electrodo y estrategias de erosión

Tal y como se ha mencionado previamente, siendo el fin del electrodo el ser empleado para la fabricación de Blisk, se decidió el empleo de una geometría de electrodo ya empleada en una investigación del grupo de electroerosión del taller de fabricación de alto rendimiento de la UPV/EHU.

Las dimensiones del electrodo primario eran inferiores a las requeridas para nuestros ensayos y por lo tanto se diseñó un electrodo del doble de tamaño del original.

Para el diseño del programa de corte, se empleó el software de edición de la empresa de fabricación de las máquinas ONA ELECTROEROSIÓN *Fig. 81*.

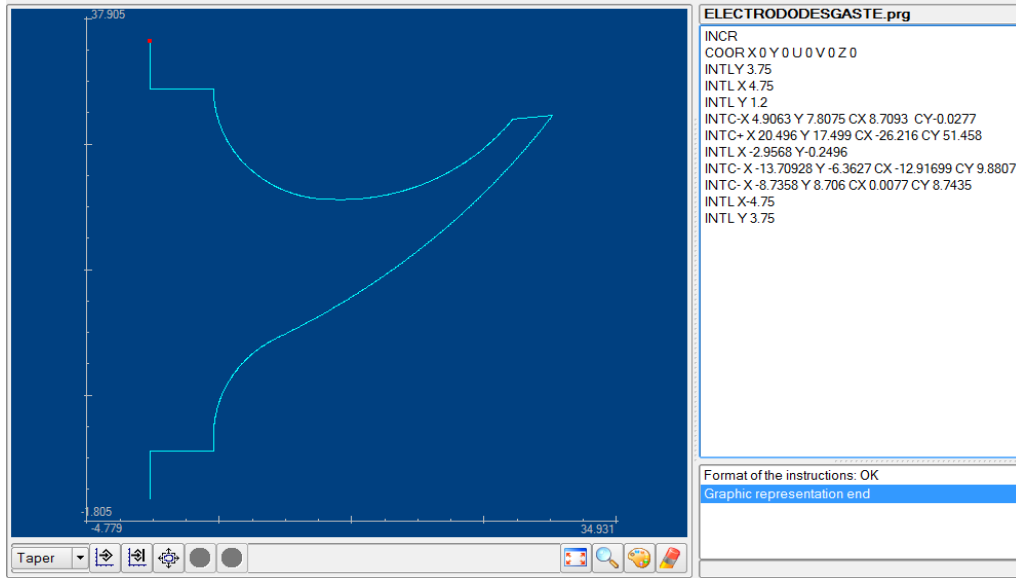


Fig. 81. Imagen del diseño de las trayectorias de corte del electrodo mediante el software de ONA ELECTROEROSIÓN

Una particularidad del software de diseño de trayectorias de corte, es la de que nos facilita la interpretación del control numérico a introducir dándonos abreviaturas de las órdenes. A su vez, la máquina de electroerosión interpretará las órdenes para traducirlas a formato CNC tradicional, de esta manera el programa de corte para la geometría del electrodo será *Tabla 15*:

<i>Programa del software de ONA</i>	<i>Programa CNC</i>
INCR	N0001 G92 X0 Y0 U0 V0 Z0
COOR X0 Y0 U0 V0 Z0	N002 G91
INTLY 3.75	N003 G39 X-90 TRAYECTORIAS EXTRA
INTL X 4.75	N004 G42
INTL Y 1.2	N005 G01 Y5
INTC-X 4.9063 Y 7.8075 CX 8.7093 CY-0.0277	N006 G01 Y3.75
INTC+ X 20.496 Y 17.499 CX -26.216 CY 51.458	N007 G01 X 4.75
INTL X -2.9568 Y-0.2496	N008 G01 Y 1.2
INTC- X -13.70928 Y -6.3627 CX -12.91699 CY 9.8807	N009 G02 X4.9063 Y7.8075 I8.7093 J-0.0277
INTC- X -8.7358 Y 8.706 CX 0.0077 CY 8.7435	N0010 G03 X20.496 Y17.499 I-26.216 J51.458
INTL X-4.75	N0011 G01 X-2.9568 Y-0.2496
INTL Y 3.75	N0012 G02 X-13.70928 Y-6.3627 I-12.91699 J9.8807
	N0013 G02 X-8.7358 Y8.706 I0.0077 J8.7435
	N0014 G01 X-4.75
	N0015 G01 Y3.75
	N0016 G01 Y2
	N0017 G01 Y30 TRAYECTORIAS EXTRA
	N0018 G01 Y2

Tabla 15. Izda.) Programa obtenido mediante el software de ONA. Dcha.) Interpretación CNC del programa de corte

Para las trayectorias de erosión se analizaron dos estrategias denominadas *OPTION 1* Y *OPTION 2* las cuales se explicarán a continuación.

-OPTION1: Para esta estrategia de erosión se diseñaron cuatro ensayos en función de la profundidad de erosión en el eje Z. Teniendo en cuenta la profundidad final de erosión la cual la denominaremos como $Z_{TOT.}$, tendremos cuatro ensayos a las siguientes profundidades a los cuales llamaremos (*STEP1, STEP2, STEP3,STEP4*) Fig. 82.A su vez, teniendo en cuenta que la trayectoria de erosión del electrodo no es recta sino que será una consecución de interpolaciones lineales en X y en Z, cada uno de los *Steps* tendrá una coordenada final en Z y otra en X, siendo la combinación de ellas el punto final de erosión en cada *Step*, teniendo como referencia los ceros realizados para cada erosión *Tabla 16*.

<i>Estrategia de erosión</i>	<i>Coordenada final en X (mm)</i>	<i>Coordenada final en Z (mm)</i>
STEP1	0.7478	6.1045
STEP2	2.4974	12.2009
STEP3	5.4192	18.8054
STEP4	9.621	24.9019

Tabla 16. Coordenadas finales de erosión para cada uno de los ensayos

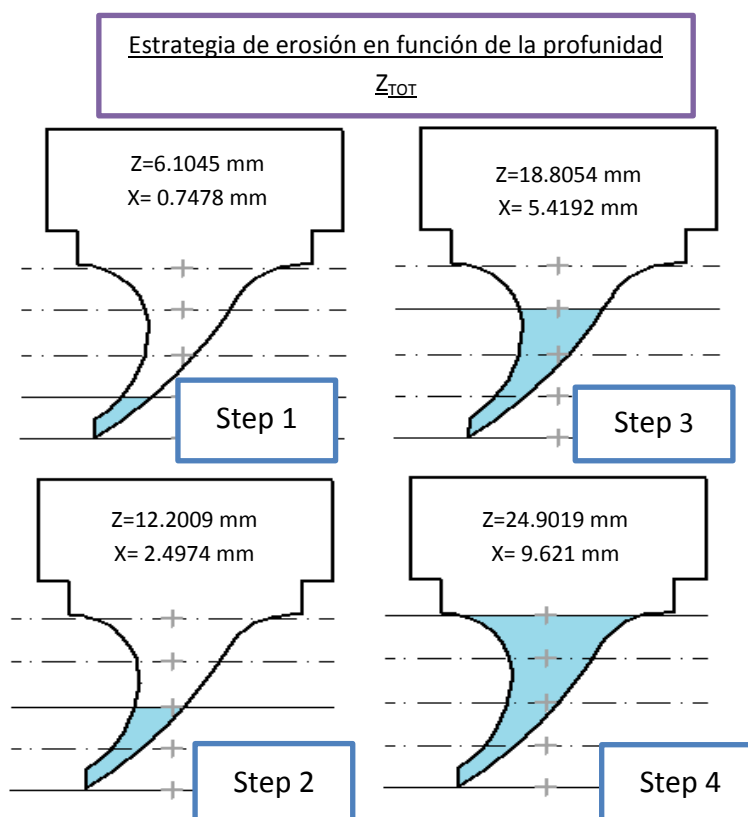


Fig. 82. Representación de los ensayos en función de la profundidad de erosión (OPTION1)

OPTION 2: Una vez realizadas los ensayos para las estrategias de erosión citadas anteriormente en *OPTION 1*, se analizaron los resultados y se optó por modificar las estrategias de erosión.

Esto es debido a que la cantidad de material erosionado por el STEP 1 era mucho menor que el erosionado por el STEP 2 y de igual manera sucedía con el STEP 2 en comparación con el STEP 3. Las nuevas estrategias de erosión se analizaron desde un punto de vista distinto al de la profundidad de erosión empleado para las estrategias de *OPTION 1*. En este caso se optó por analizar el volumen total erosionado por el STEP 4, *Fig. 83*.

Tras observar las trayectorias del electrodo durante toda la erosión las cuales fueron simuladas empleando el software SIEMENS NX, se optó por dividir el volumen total erosionado en tres STEPS más uno extra el cual será igual que el STEP 3 más dos interpolaciones lineales extra en el eje X.

De igual manera que para el *OPTION 1*, cada uno de los STEPS tendrá una coordenada final en Z y otra en X tomando como referencia el cero de la erosión *Tabla 17*. Tener el conocimiento exacto de los ceros de la erosión y sus coordenadas finales nos permitirá análisis posteriores de la erosión y de la cavidad.

<i>Estrategia de erosión</i>	<i>Coordenada final en X (mm)</i>	<i>Coordenada final en Z (mm)</i>
STEP1	2.316	11.693
STEP2	5.705	19.313
STEP3	9.621	24.902
STEP4	9.621	24.902

Tabla 17. Coordenadas finales de erosión para cada uno de los ensayos

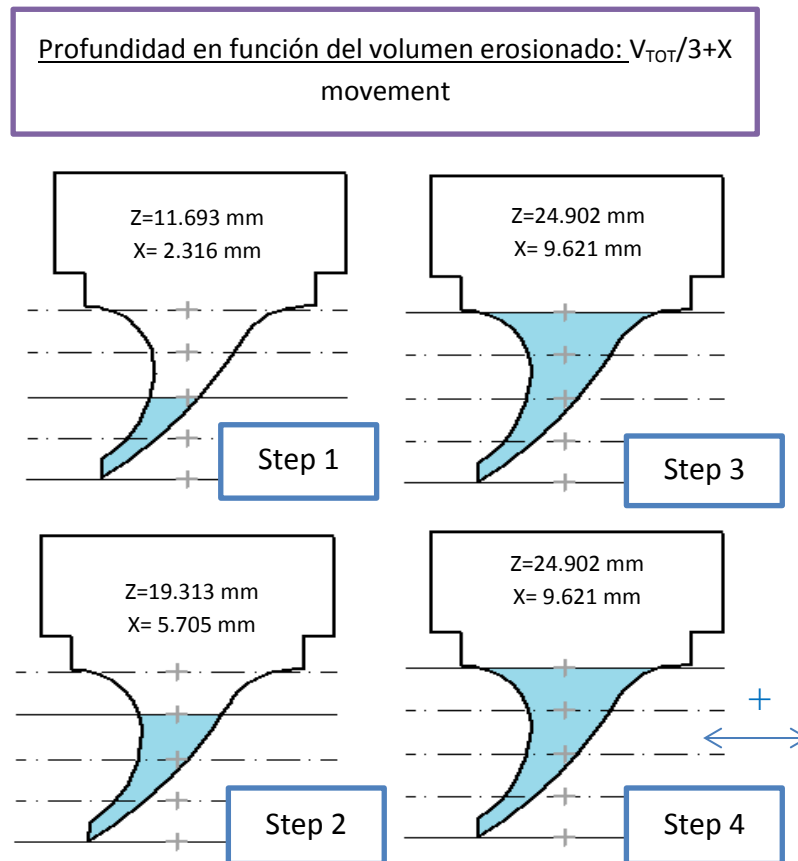


Fig. 83. Representación de los ensayos en función del volumen total erosionado más el ensayo con la interpolación extra (OPTION 2)

Puesta a punto de la máquina y de los utillajes para el corte

Para una correcta realización de los ensayos es esencial una correcta preparación de las máquinas y de los utillajes que vayan a ser empleados durante el transcurso de los mismos. Por ello se llevarán a cabo los protocolos de verificación tanto de la máquina de WEDM como de la máquina de electroerosión por penetración.

Protocolo de verificación de la Máquina de WEDM: Para la correcta puesta a punto de la máquina de corte por hilo se verificarán los siguientes parámetros.

1. Búsqueda de ceros máquina: Empleando el mando y en modo manual seleccionaremos la opción búsqueda de ceros. La búsqueda de los ceros en cada eje se realizará manteniendo pulsado dicho eje, tras lo cual la máquina buscará los ceros automáticamente, el orden de búsqueda de ceros máquina será el siguiente (X, Y, Z, U, V). Se ha de tener en cuenta la disposición de las piezas a cortar en la máquina para evitar colisiones durante la búsqueda de ceros.

2. Cálculo de verticalidad del hilo: Empleando la anilla de verticalidad se dispondrá el hilo en ella para que a continuación seleccionando la opción de verticalidad, se ejecuten automáticamente los ciclos de verticalidad en la anilla hasta obtener una tolerancia de verticalidad aceptable (0.01mm). La correcta verticalidad del hilo es un parámetro clave para garantizar unos cortes precisos.

3. Alineación del Chuck de posicionamiento : Puesto que el Chuck de posicionamiento nos garantiza una perfecta alineación en el plano XY debido a que tiene dicha cara de apoyo perfectamente rectificada, procederemos a su alineación en el plano XZ empleando un reloj comparador. La alineación se realizará ajustando los tornillos mediante los que está sujeto a la mesa hasta que obtengamos una alineación perfecta del Chuck.

Protocolo de verificación de la máquina de electroerosión por penetración: Para la correcta puesta a punto de la máquina de electroerosión por penetración se verificarán los siguientes parámetros.

1. Búsqueda de ceros máquina: Se procederá a la búsqueda de los ceros máquina de la máquina de electroerosión por penetración de la misma manera que se realizó para a máquina de corte por hilo.

2. Alineación de la mesa magnética: Se alineará la mesa magnética de la máquina de electroerosión por penetración empleando un reloj comparador. Se alineará en los ejes X e Y ajustando si fuese necesario los tornillos empleados para su sujeción. La correcta alineación de la mesa magnética es esencial para que a su vez la pieza a erosionar quede perfectamente alineada y se puedan realizar erosiones de manera precisa.

Fabricación de electrodos

Los electrodos serán fabricados empleando la máquina de corte por hilo ONA PRIMA E250. Como material de partida para la fabricación de los electrodos se empleará grafito POCO EDM200 de sección cuadrada (50X50) mm. Para la fabricación de los electrodos se precisarán dos etapas de fabricación con sus respectivos protocolos a seguir para un resultado satisfactorio *Tabla 18*.

<i>Etapa 1</i>	<i>Descripción</i>
1.1	Amarre y alineación de la barra primaria
1.2	Realización de ceros en la barra
1.3	Corte de la rebanada
<i>Etapa2</i>	<i>Descripción</i>
2.1	Instalación de la rebanada en el portaelectrodos
2.2	Instalación del portaelectrodos en el Chuck y alineación del mismo
2.3	Introducción del programa y tecnología de corte
2.4	Corte de la geometría de electrodo

Tabla 18. Etapas y protocolos de fabricación de los electrodos

- 1.1 Amarre y alineación de la barra primaria: Se amarrará la barra primaria a la mesa de la máquina de corte por hilo y a continuación procederemos a su alineación empleando un reloj comparador.
- 1.2 Realización de ceros en la barra: Se realizará un contacto en el extremo de la barra y desde dicho punto y teniendo en cuenta la distancia correspondiente a la compensación del hilo se desplazará el hilo una distancia $(7,1 + \text{compensación})$ mm. para de tal manera, disponer de una rebanada de 7,1 mm al finalizar el corte.
- 1.3 Corte de la rebanada: Se introducirá la tecnología requerida para un grafito de 50 mm de espesor, el programa de corte (*que será una interpolación lineal*) y se procederá al corte de la rebanada.
- 2.1 Instalación de la rebanada en el portaelectrodos: Se instalará la rebanada en el portaelectrodos amarrándola firmemente pero sin aplicar fuerza excesiva para evitar fracturas en el grafito.
- 2.2 Instalación del portaelectrodos en el Chuck y alineación del mismo: Se instalará el portaelectrodos en el Chuck y se comprobará su alineación en el eje Y empleando un reloj comparador.
- 2.3 Introducción del programa y tecnología de corte: Se introducirá el programa de corte diseñado previamente y la tecnología requerida para el grafito de 7.1mm de espesor.
- 2.4 Corte de la geometría de electrodo.

Medición de electrodos nuevos

Una vez dispongamos de un electrodo cortado, procederemos a realizar un análisis del mismo. Para ello nos valdremos de dos máquinas, un proyector de perfiles MITUTOYO PJ-H3000 y de un medidor por coordenadas ZEISS MC-850. El protocolo de medición de los electrodos se dividirá en las mediciones realizadas con el proyector de perfiles y las mediciones realizadas con el medidor por coordenadas.

1. Mediciones con el proyector de perfiles MITUTOYO PJ-H3000

En primer lugar emplearemos el proyector de perfiles MITUTOYO PJ-H3000. Situaremos el portaelectrodos de tal manera que la parte superior del mismo quede horizontal y empleando como referencia el portaelectrodos lo alinearemos para garantizar su horizontalidad. De igual manera, tomando de referencia el porta electrodos, mediremos la distancia entre la parte superior del electrodo y dicha referencia (*se trata de medir la "altura de electrodo"*) Fig. 84 la cual emplearemos para posteriormente empleando la misma referencia, medir el electrodo tras la erosión y de esa manera poder conocer la longitud de electrodo perdida durante la erosión. Cabe mencionar que la incertidumbre de las mediciones obtenidas por el proyector de perfiles se encuentra alrededor de las $10\mu\text{m}$.

Dado que el electrodo nuevo tendrá una superficie superior completamente horizontal, nos bastará con medir la distancia una vez, y la tomaremos como uniforme para todo el perfil superior del electrodo.

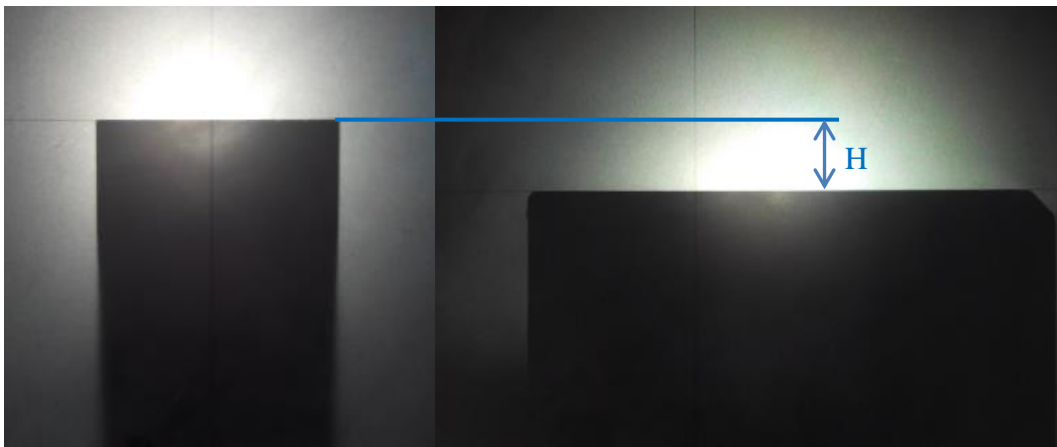


Fig. 84. Altura desde la parte superior del electrodo al portaelectrodos

2. Mediciones con el medidor por coordenadas ZEISS MC-850.

Para las mediciones de los electrodos en el medidor por coordenadas ZEISS MC-850, se diseñó una estrategia de medición que consistiría en el análisis de tres perfiles representativos del electrodo partiendo de la mitad del mismo.

La medición del electrodo en el medidor por coordenadas nos proporcionará una cantidad n de coordenadas tomando como referencia un origen de coordenadas determinado. Siendo n la cantidad de puntos que obtendremos por cada medición.

Tomando como referencia el origen (0, 0,0) situado en la cara superior del electrodo, tal y como se muestra en la Fig. 85 se realizará la medición del electrodo en aquellas secciones situadas a una distancia *Tabla 19*:

Perfil	Distancia respecto de (Z=0) mm
A	-3.55
B	-2.35
C	-1.15

Tabla 19. Distancia de cada uno de los perfiles respecto de Z

Conociendo las profundidades finales de cada uno de los cuatro programas de erosión, se programará una medición para cada perfil en cada *Step*. Esto se realizará para la optimización del proceso de medición y para la mejor representación de los perfiles del electrodo en función de la erosión realizada, de esta manera los programas de medición serán los siguientes *Tabla 20*.

Programa de erosión	Secciones	Nomenclatura
Step1	A	A_1.sec
	B	B_1.sec
	C	C_1.sec
Step2	A	A_2.sec
	B	B_2.sec
	C	C_2.sec
Step3, Step4	A	A_3.sec, A_4.sec
	B	B_3.sec, B_4.sec
	C	C_3.sec, C_4.sec

Tabla 20. Programas de medición para cada uno de los ensayos

Tal y como se puede observar en la (tabla.) para las erosiones realizadas con los *Step3*, y *Step4* se emplearán los mismos programas de medición, esto es debido a que ambos programas erosión alcanzan la misma profundidad, teniendo el *Step4* una movimiento extra en el eje X.

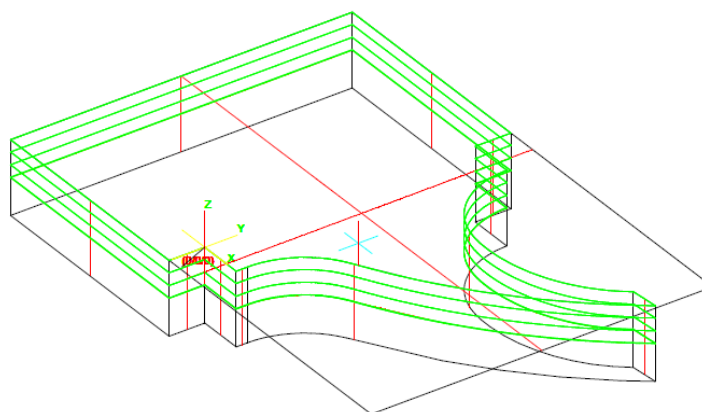


Fig. 85. Representación del electrodo, la disposición del origen de coordenadas y las secciones a medir (verde)

El proceso de medición de los electrodos se realizará empleando dos softwares distintos (*Calypso*, *Holos*), siendo el software *Calypso* el empleado para la preparación de la máquina y ajuste de las tolerancias de medición y el *Holos* el empleado para la programación de las mediciones e interpretaciones posteriores de diversos resultados de medición. A continuación se explicará el protocolo de medición de los electrodos nuevos y el software empleado para cada etapa.

Cabe mencionar que para el procesado de los resultados numéricos de las mediciones se empleará un programa diseñado exclusivamente para nuestros ensayos. A su vez se empleará el software SIEMENS NX para la comprobación de las mediciones *Tabla 21*.

<i>Etapa</i>	<i>Descripción</i>	<i>Software</i>
1	Calibrado del palpador de referencia	Calypso
2	Calibrado del palpador a emplear	Calypso
3	Introducción del CAD diseñado y selección de las secciones a medir	Holos
4	Diseño de los programas de medición	Holos
5	Instalación y fijación del electrodo a la mesa	-
6	Alineación del electrodo	Holos
7	Medición de las secciones	Holos
8	Representación gráfica de la desviación en las mediciones	Holos
9	Obtención de los resultados numéricos de las mediciones y su procesado	Holos, ZEISS.c
10	Comprobación de los resultados.	SIEMENS NX

Tabla 21. Protocolo de medición de electrodos antes de la erosión y programas empleados durante el mismo

1. Calibrado del palpador de referencia: Como paso previo a calibrar el palpador que emplearemos para las mediciones procederemos a calibrar el palpador de referencia. La correcta calibración de dicho palpador nos permitirá la optimización en el calibrado del palpador que emplearemos en las mediciones.

Dado que los palpadores son componentes muy frágiles y evitar su manipulación se procederá a su cambio de forma automática, para ello emplearemos la opción de cambio automático de palpadores. La acción de cambio automático de palpadores se ejecutará automáticamente seleccionando en el entorno de trabajo del software calypso la opción *cambio automático de palpadores* Fig. 86.

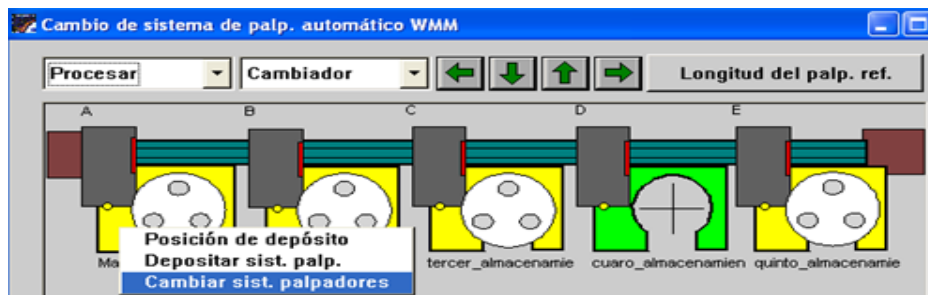


Fig. 86. Cambio automático de palpadores en el software Calypso

Una vez esté instalado el palpador de referencia, se procederá a seleccionar la posición de la esfera de referencia que en nuestro caso será la posición 3. Dicha posición identifica la situación de la esfera de referencia con respecto de la mesa de la máquina. A continuación realizaremos el calibrado del palpador de referencia. Se repetirá el proceso de calibrado hasta obtener una desviación de las mediciones aceptable ($S \approx 0.0010\text{mm}$) Fig. 87.

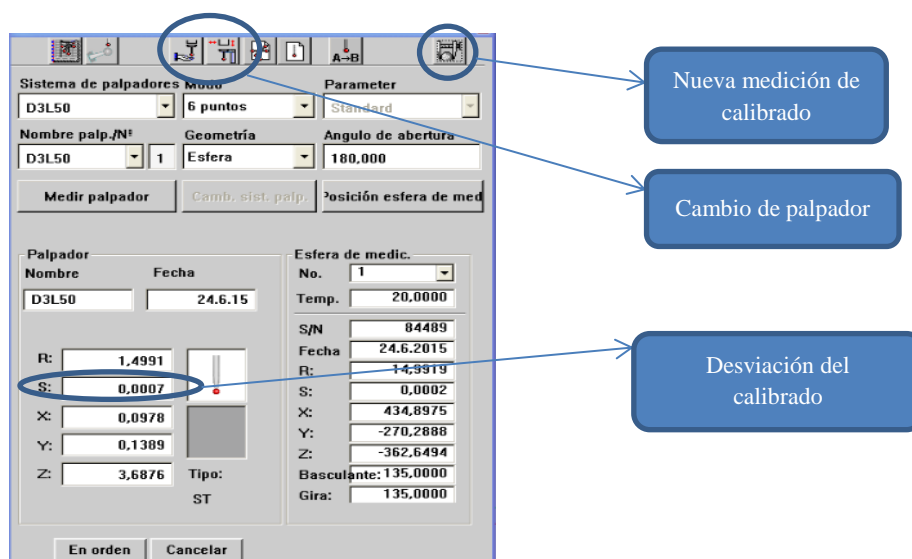
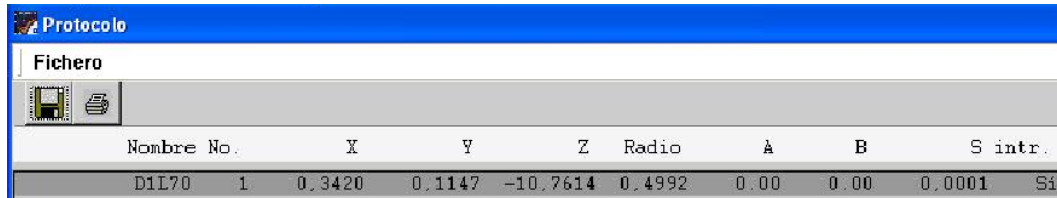


Fig. 87 Opciones de calibrado del software Calypso

2. Calibrado del palpador a emplear: Una vez finalizado el calibrado del palpador de referencia, procederemos a realizar el cambio automático de palpador tal y como se muestra en la Fig. 89 y seleccionaremos el palpador que emplearemos para nuestras mediciones. Tras tener instalado el palpador procederemos a realizar un nuevo calibrado en la esfera de referencia. Tras finalizar el calibrado nos saldrá una ventana indicándonos las mediciones obtenidas en el mismo Fig. 88.



Nombre	No.	X	Y	Z	Radio	A	B	S intr.	
D1E70	1	0.3420	0.1147	-10.7614	0.4992	0.00	0.00	0.0001	Si

Fig. 88 Protocolo de calibrado del Calypso

Se repetirá el protocolo de calibrado hasta que obtengamos un valor de la desviación de la mediciones aceptable.

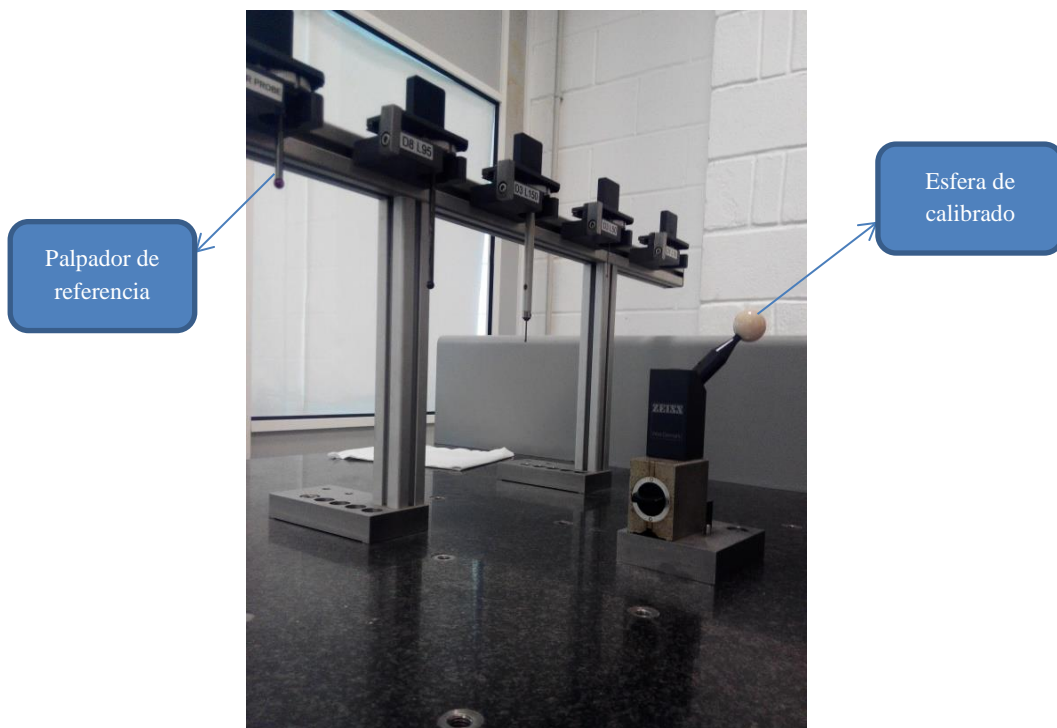


Fig. 89 Disposición de los palpadores y de la esfera de calibrado en la máquina de medir por coordenadas ZEISS MC850

3. Introducción del CAD diseñado y selección de las secciones a medir: Se introducirá el CAD del electrodo el cual deberá de estar guardado en un archivo.IGES. a continuación abriremos la ventana Model intersection y generaremos las secciones a medir del electrodo *Tabla 19*.

4. Diseño de los programas de medición: Teniendo en cuenta los programas de medición planteados en la *Tabla 20* procederemos al diseño de cada uno de ellos. Empleando la opción *model intersection* seleccionaremos la sección para la que diseñaremos el programa e introduciremos paso por paso los puntos que mediremos para cada parte de la geometría del electrodo *Fig. 90*. Cabe mencionar que solo se diseñarán los programas de medición una vez, y luego podrán ser empleados para todas las erosiones.

Teniendo en cuenta la profundidad que alcanzaremos en cada erosión, consecuentemente mediremos aquellas zonas del electrodo que vayan a participar en el proceso de erosión, esto es, no mediremos el electrodo entero si posteriormente va a ser empleado para una erosión *Step1*, sino que mediremos el electrodo un poco más allá de la zona que vaya a erosionar. Esto nos reducirá el tiempo de medida, y a su vez podremos tener una densidad mayor de puntos en la zona de desgaste de electrodo.

Para las erosiones de *Step3* y *Step4* en las que el electrodo vaya a ser empleado en su totalidad para la erosión, acumularemos mayor densidad de puntos de medición en la zona de la punta del electrodo, esto es debido a que será la zona con mayor desgaste.

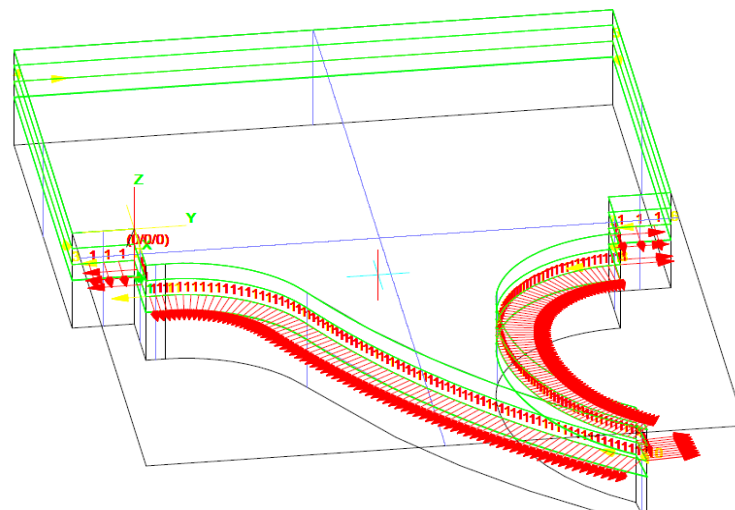


Fig. 90 .Programa de medición para Step3 o Step4 (dirección y ubicación de cada medición representada por flechas rojas)

5. Instalación y fijación del electrodo a la mesa: El electrodo será fijado a la mesa apoyado en una de las caras del portaelectrodos, emplearemos un material plástico de fijación. Situaremos la punta del electrodo en nuestra dirección para facilitar la visión del electrodo a la hora de realizar el palpado manual del mismo para su alineación.

6. Alineación del electrodo: Una vez fijado el electrodo a la mesa se procederá a su alineación. La alineación del electrodo servirá para indicar al medidor por coordenadas la situación del electrodo con respecto de la mesa. Para ello se seleccionarán nueve puntos característicos mediante los cuales podamos representar espacialmente la situación del electrodo. Dichos contactos se realizarán en una primera instancia de forma manual empleando los Joystick *Fig. 91* de los que dispone la máquina

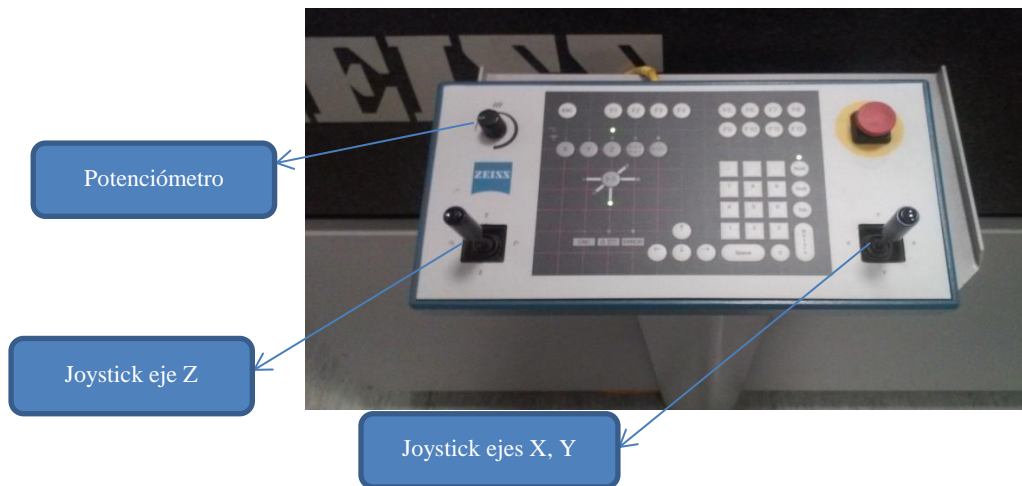


Fig. 91. Controles de la máquina de medir por coordenadas ZEISS MC850

Los contactos se realizarán tal y como se muestran en la Fig. 92:

- Los señalados en amarillo se realizarán en la dirección del eje X.
- Los señalados en negro se realizarán en la dirección del eje Y.
- Los señalados en blanco se realizarán en la dirección del eje Z.

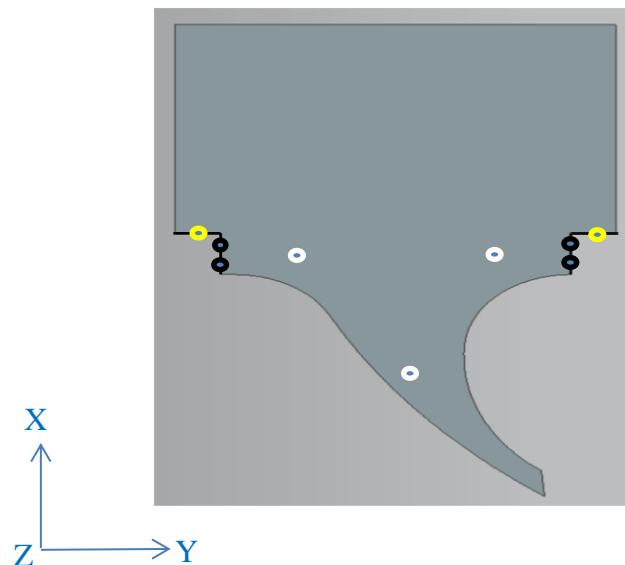


Fig. 92 Disposición de los contactos necesarios para la alineación del electrodo

A continuación se procederá a que la máquina realice los mismos contactos que previamente se han realizado manualmente, de manera automática. Tras lo cual obtendremos unos valores de desviación total de la pieza.

Empleando la herramienta de la que dispone el software Holo denominada *3D Best Fit* el propio software ajustará de manera automática los valores obtenidos mediante la alineación automática a nuestra pieza, obteniendo a su vez un valor de desviación que irá disminuyendo a medida que realicemos consecutivamente la herramienta *3D Best Fit*. Cuando observemos que el valor de la desviación total se mantenga constante habremos alcanzado la alineación óptima de nuestro electrodo.

7. Medición de las secciones: Seleccionaremos el programa de medición que deseemos implementar y procederemos a la medición de la sección del electrodo.

8. Representación gráfica de la desviación en las mediciones: Una vez finalizada la medición del electrodo nuevo, procederemos a obtener una representación gráfica los valores de la desviación de todas las mediciones.

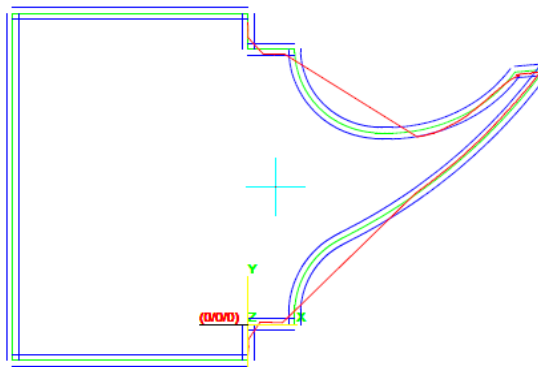


Fig. 93 Representación gráfica de la desviación de las mediciones para un STEP

9. Obtención de los resultados numéricos de las mediciones y su procesado: La obtención de los datos numéricos de la medición se realizará en la ventana Evaluation → Measuring Output. El problema reside en que el archivo.txt que obtendremos nos dará una gran cantidad de valores de las mediciones, de las cuales nosotros únicamente deseamos conocer los valores reales de las coordenadas X, Y, Z separadas de una tabulación para poder interpretarlas automáticamente en el software SIEMENS NX Fig. 94.

Para ello se programó en lenguaje C un software que nos permitiese procesar los resultados numéricos obtenidos directamente por el software Holo para que nos devolviese únicamente las coordenadas X, Y, Z de cada medición, siendo el valor de Z la distancia de cada sección al origen de coordenadas mencionado anteriormente.

El software programado denominado ZEISS.txt nos pedirá un archivo.txt que ha de estar localizado en la misma carpeta que el archivo.exe del programa Fig. 95, y nos procesará el archivo.txt original devolviéndonos un archivo con las coordenadas requeridas del mismo Fig. 96 .Cabe mencionar que se realizó un programa para cada una de las secciones, por ello se procesará el archivo original de cada sección en su programa ZEISS.C correspondiente.

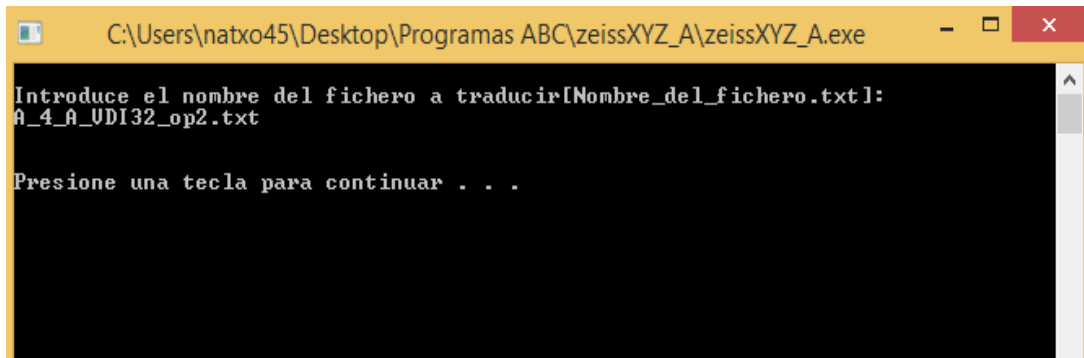


Fig. 95 Ventana de trabajo del programa ZEISS.C

```

                                HOLON measuring record

W-name       :   electrodo_desgaste_2
Part no.     :
Job no.      :
Supplier/customer:
Operat.     :
Remark      :
Date        :   17/06/2015

=====

Upper tolerance : 0.0400 mm
Lower tolerance : -0.0400 mm

=====

Pt.      X Act   Y Act   Z Act  Ex   Ey   Ez   Distance
         X Nom   Y Nom   Z Nom
=====
Segment evaluation  A_4_A_VDI32_op2.sec
  1    0.0059  -2.8766  -3.5292  0.0059  0.0000  0.0000  0.0059
        -0.0000  -2.8766  -3.5292
-----
  2    0.0056  -2.1113  -3.5283  0.0056  0.0000  0.0000  0.0056
        -0.0000  -2.1113  -3.5283
-----
  3    0.0062  -1.3077  -3.5283  0.0062  0.0000  0.0000  0.0062
        -0.0000  -1.3077  -3.5283
-----
  4    1.2501   0.0015  -3.5282  0.0000  0.0015  0.0000  -0.0015
        1.2501   0.0000  -3.5282
    
```

Fig. 94. Datos de la primera página de un archivo.txt obtenido mediante el software Holos

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
0.005900		-2.876600		-3.550000
0.005600		-2.111300		-3.550000
0.006200		-1.307700		-3.550000
1.250100		0.001500		-3.550000

Coordenada X

Coordenada Y

Coordenada Z

Fig. 96 Primeros cuatro puntos procesados del archivo.txt mostrado en la Fig. 94

10.Comprobación de los resultados: Una vez procesados las mediciones, se comprobarán las mismas en el software SIEMENS NX. Las coordenadas de las mediciones quedarán representadas en el software, pudiendo realizar una inspección visual rápida de las mismas Fig. 97.

Se trata de una etapa crítica de la medición, dado que si las mediciones fuesen erróneas y no se comprobasen, los resultados posteriores obtenidos tras la erosión serían inservibles puesto que no podríamos calcular el desgaste del electrodo.

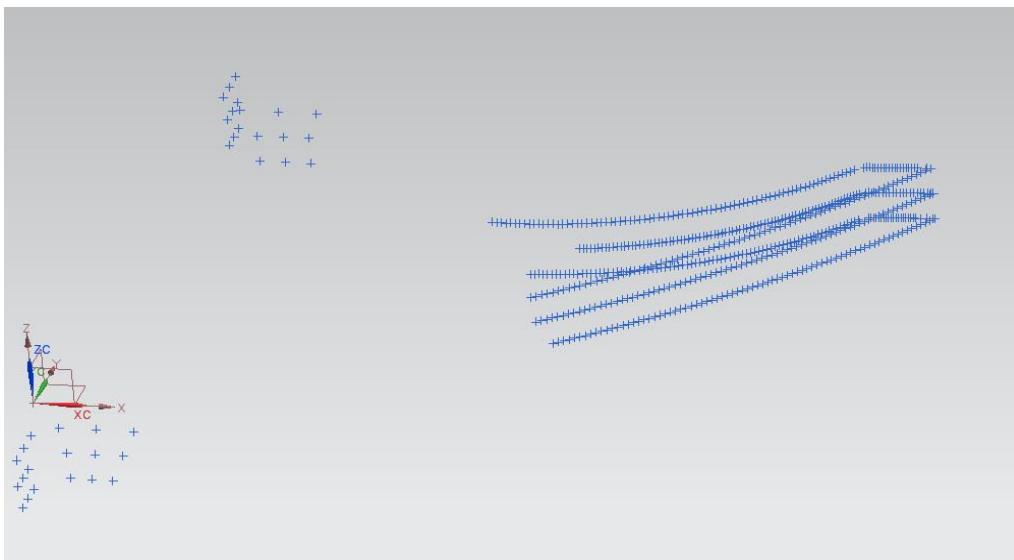


Fig. 97 Comprobación de las mediciones para un STEP 2

Rectificado de la pieza

Al igual que en las erosiones con cuñas a 60° se procederá a rectificar la pieza como paso previo a las erosiones. En el caso de los ensayos para Blisk se realizarán varias erosiones en la pieza antes de rebajar las cavidades, por lo tanto, solo se rectificará la pieza en el caso de que se hallan terminado todas las erosiones en la misma, esto es debido a que el rectificado de la pieza nos invalidaría las dimensiones de la cavidad si no han sido medidas.

En el caso de ser necesario un rectificado de la pieza, se procederá a ello siguiendo el mismo procedimiento que para los ensayos a 60°, en este caso, debido a que se empleará un tocho de acero F-114 de sección cuadrada pero con las aristas redondeadas, rectificaremos todas sus caras para facilitar los contactos.

Erosión de la pieza

Una vez medido el electrodo nuevo y teniendo la pieza rectificada procederemos a seguir el protocolo diseñado para la correcta realización de las erosiones.

<i>Etapa</i>	<i>Descripción</i>
1	Alineación de la pieza en la mesa magnética
2	Instalación del electrodo en la máquina de electroerosión por penetración
3	Contactos en la pieza para situar la erosión
4	Selección de la tecnología de erosión
5	Introducción del programa de erosión
6	Desinstalación del electrodo de la máquina

1. Alineación de la pieza en la mesa magnética: Se situará la pieza ya rectificada en la mesa magnética de la que dispone la máquina de electroerosión por penetración, y se alinearán tanto sus caras laterales como la superior. La alineación se realizará empleando un reloj comparador Mitutoyo de rango 0.01mm Fig. 98.

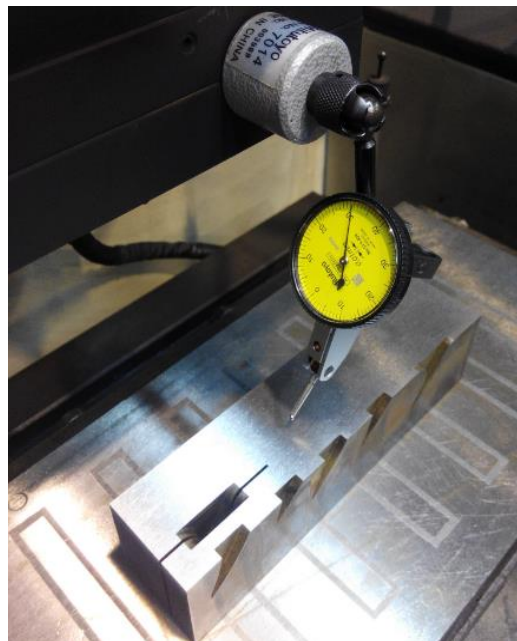


Fig. 98 Alineación de la pieza empleando un reloj comparador

2. Instalación del electrodo en la máquina de electroerosión por penetración: Se instalará el electrodo en la máquina de electroerosión por penetración teniendo en cuenta la orientación del mismo para una correcta erosión.

3.Contactos en la pieza para situar la erosión: Empleando las caras perpendiculares del electrodo, se realizarán contactos en la pieza de tal manera que podamos referenciar mediante las coordenadas máquina el emplazamiento exacto de la erosión en el eje Y, *Fig. 99.*

Tras tener la coordenada Y del emplazamiento de la erosión, se procederá a situar el electrodo en la coordenada del eje X donde se vaya a realizar la erosión. Una vez tengamos el emplazamiento deseado en el eje X procederemos a realizar un contacto en la dirección del eje Z con la punta del electrodo, tras lo cual el electrodo se desplazará 1mm con respecto de la superficie a erosionar.

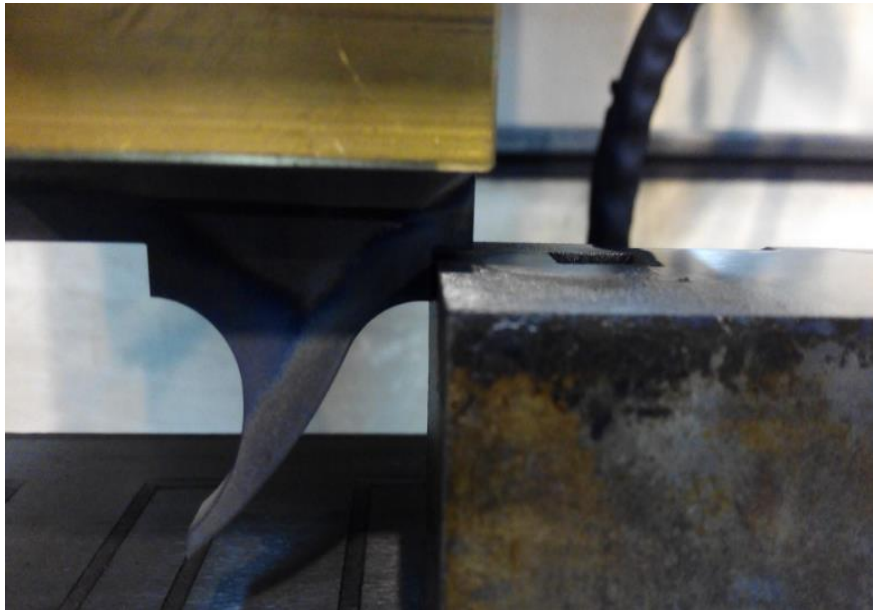


Fig. 99 Contactos en la pieza a erosionar para situar la coordenada en el eje Y de la erosión

Una vez finalizados los contactos apuntaremos las coordenadas máquina en las que se encuentra emplazado el electrodo. Es de vital importancia apuntar las coordenadas de la erosión dado que se realizarán baterías de erosiones de cuatro en cuatro en la misma coordenada Y de la pieza, esto es, una tras otra.

Esto es debido a que para el posterior rebanado de las cavidades, el tener situadas las erosiones en línea nos permitirá rebanarlas todas a la vez ahorrándonos una gran cantidad de tiempo y pudiendo precisar de una manera más eficiente la sección de rebanado.

4.Selección de la tecnología de erosión: Se seleccionará la tecnología de erosión requerida para el ensayo a realizar, a continuación se muestran las diferentes tecnologías de erosión empleadas para los diferentes ensayos (*Tabla 22, Tabla 23, Tabla 24, Tabla 25*).

Corriente descarga I(A)	4
Voltaje U_0 (V)	200
Tiempo de pulso , t_{on} (μ s)	50
Tiempo de pausa, t_{off} (μ s)	6.4
Voltaje del servo, S (V)	30
Fluido dieléctrico	EDM fluid GR2

Tabla 22 Tecnología de erosión para un VDI 28

Corriente descarga I(A)	7
Voltaje U_0 (V)	160
Tiempo de pulso , t_{on} (μ s)	25
Tiempo de pausa, t_{off} (μ s)	5
Voltaje del servo, S (V)	30
Fluido dieléctrico	EDM fluid GR2

Tabla 23 Tecnología de erosión para un VDI 32

Corriente descarga I(A)	7
Voltaje U_0 (V)	160
Tiempo de pulso , t_{on} (μ s)	100
Tiempo de pausa, t_{off} (μ s)	13
Voltaje del servo, S (V)	30
Fluido dieléctrico	EDM fluid GR2

Tabla 24 Tecnología de erosión para un VDI 36

Corriente descarga I(A)	9
Voltaje U_0 (V)	120
Tiempo de pulso , t_{on} (μ s)	200
Tiempo de pausa, t_{off} (μ s)	25
Voltaje del servo, S (V)	20
Fluido dieléctrico	EDM fluid GR2

Tabla 25 Tecnología de erosión para un VDI 39

5.Introducción del programa de erosión: Tal y como se ha comentado previamente, dispondremos de cuatro programas de erosión los cuales corresponden a los Step1, Step2, Step3 y Step4. Por lo tanto introduciremos el programa de erosión correspondiente a la erosión a realizar Fig. 100.

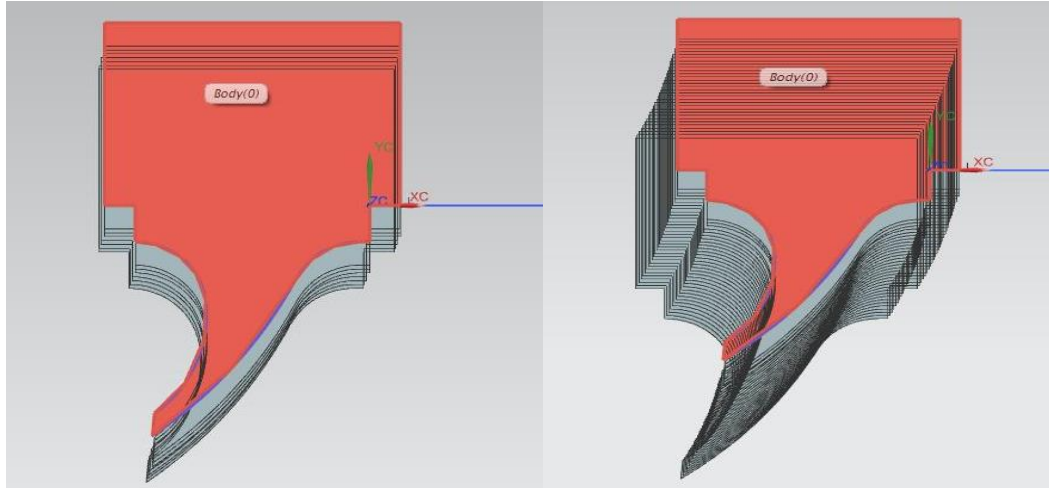


Fig. 100 Representación de la trayectoria del electrodo durante la erosión.
Ejemplo: Izda.) Step1. Dcha.) Step2.

6.Desinstalación del electrodo de la máquina: Se procederá a desinstalar el electrodo de la máquina de electroerosión por penetración.

Medición de electrodos tras la erosión

Las mediciones de los electrodos tras la erosiones dividen en dos grupos, las mediciones realizadas con el proyector de perfiles y las realizadas con el medidor por coordenadas.

1. Mediciones con el proyector de perfiles MITUTOYO PJ-H3000

Longitud de electrodo desgastada: Para ello emplearemos el proyector de perfiles MITUTOYO PJ -H3000. Utilizando la misma metodología empleada para medir la longitud del electrodo nuevo, en este caso mediremos la longitud desde el portaelectrodos (*el cual lo utilizaremos de referencia*) a diversos puntos de la punta del electrodo.

Tomando como centro de coordenadas el centro de la punta del electrodo, mediremos aquellos puntos del perfil de la punta de los mismos, situados a las siguientes distancias de la referencia *Tabla 26*:

<i>Punto</i>	<i>Distancia en el eje x del (0,0) mm</i>
1	0
2	1,2
3	-1.2
4	2.4
5	-2.4

Tabla 26 Distancias con respecto del centro de la punta del electrodo de los puntos a medir



Fig. 101 Puntos a medir mediante el proyector de perfiles MITUTOYO PJ-H3000, ejemplo pto. 4

Los valores en el eje Y variarán en función de la geometría del electrodo desgastado, y serán los que emplearemos para en análisis de la longitud gastada de electrodo.

Una vez medidas las cinco distancias mencionadas, se procederá a realizar la resta entre la distancia inicial medida en el electrodo nuevo y las distancias obtenidas para el electrodo gastado, obteniendo de esta manera la longitud de electrodo gastada en cada una de ellas.

$$H_{\text{eros.}} = H_{\text{inic.}} - H_{\text{fin.}}$$

Radio de esquina: Se medirán los radios de las esquinas del perfil del electrodo empleado el display de medición del proyector de perfiles. La medición se realizará tomando cuatro puntos de la esquina a medir del electrodo y el propio programa nos dará automáticamente el valor del radio *Fig. 102*.

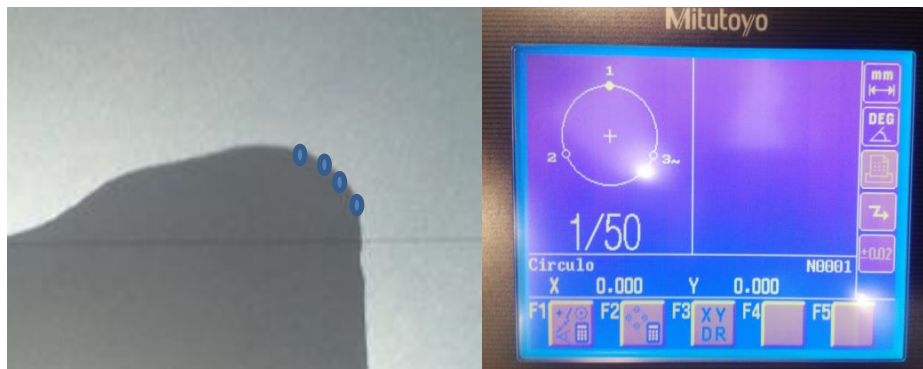


Fig. 102 Izda.) Ejemplo de puntos a medir de una esquina de electrodo, Dcha.) Display de la herramienta de medición de radios del proyector de perfiles

Perfil	Distancia respecto de (Z=0) mm
A	-3.55
B	-2.35
C	-1.15

Tabla 27 Distancia de cada uno de los perfiles respecto de Z

2. Mediciones con el medidor por coordenadas ZEISS MC-850.

Al igual que para la medición de los electrodos antes de la erosión, emplearemos el medidor por coordenadas ZEISS MC-850 para la medición de la geometría del electrodo tras la erosión.

Los perfiles a analizar del electrodo serán los mismos que los mencionados en el apartado de medición de electrodos nuevos empleando el medidor por coordenadas siendo los perfiles (A, B, C) Fig. 85 los perfiles del electrodo a medir Tabla 27. El análisis de dichos perfiles antes y después de la erosión, nos permitirá el estudio del desgaste del electrodo en cada una de las secciones representativas.

Al igual que se mencionó para las mediciones en los electrodos previas a la erosión, se procederá a realizar tres programas de medición para cada Step de erosión, esto es un programa de medición para cada sección a medir del electrodo.

En el caso de las mediciones de los electrodos tras la erosión, dicho apartado no queda definido directamente como en los electrodos nuevos, siendo la etapa de diseño de los programas de medición y la de representación gráfica de la desviación de las mediciones las únicas que difieren de las etapas que constituyen el protocolo de medición de los electrodos nuevos.

Tras lo mencionado anteriormente, el protocolo de medición de electrodos nuevos constará de las etapas señaladas en la Tabla 28.

<i>Etapa</i>	<i>Descripción</i>	<i>Software</i>
1	Calibrado del palpador de referencia	Calypso
2	Calibrado del palpador a emplear	Calypso
3	Introducción del CAD diseñado y selección de las secciones a medir	Holos
4	Diseño de los programas de medición	Holos
5	Instalación y fijación del electrodo a la mesa	-
6	Alineación del electrodo	Holos
7	Medición de las secciones	Holos
8	Obtención de los resultados numéricos de las mediciones y su procesado	Holos, ZEISS.c
9	Comprobación de los resultados.	SIEMENS NX

Tabla 28 Protocolo de medición de electrodos tras la erosión

1. Calibrado del palpador de referencia: Como paso previo al calibrado del palpador a emplear para las mediciones, se procederá al calibrado del palpador de referencia. Un correcto calibrado de dicho palpador nos garantizará una mayor precisión de las mediciones posteriores.

Para llevar a cabo el calibrado del palpador de referencia, se seguirán los pasos explicados en el apartado de calibrado de palpador de referencia para la medición del electrodo nuevo mediante el medidor por coordenadas ZEISS MC-850.

2. Calibrado del palpador a emplear: Tras realizar el calibrado del palpador de referencia, procederemos a calibrar el palpador que emplearemos para las mediciones del electrodo tras la erosión, que será el mismo que el empleado para las mediciones del electrodo nuevo.

Para el calibrado del palpador que emplearemos para las mediciones se seguirán los mismos pasos descritos para el calibrado del palpador a emplear para los electrodos nuevos.

3. Introducción del CAD diseñado y selección de las secciones a medir: Al igual que en el protocolo de medición de electrodos nuevos, Se introducirá el CAD del electrodo el cual deberá de estar guardado en un archivo.IGES. a continuación abriremos la ventana *Model intersection* y generaremos las secciones a medir del electrodo *Tabla 27*.

4. Diseño de los programas de medición: Partiendo del fundamento en el que se basa el medidor por coordenadas ZEISS MC-850 el cual se fundamenta en la comparación de un CAD del electrodo con dimensiones predeterminadas con el electrodo real, surge una problemática a la medición de los electrodos tras la erosión, el desgaste de los mismos.

Debido al desgaste sufrido por los electrodos durante la erosión, el uso de los programas de erosión empleados para los electrodos nuevos queda descartado prácticamente para

todas las mediciones de los electrodos tras la erosión. Dicho descarte de los programas de medición empleados previamente se basa en el fundamento de medición de la máquina de medir por coordenadas.

En aquellos electrodos con un desgaste muy pronunciado, teniendo en cuenta que casi todo el desgaste se producirá en la punta del electrodo, si empleásemos el mismo programa de medición que para los electrodos nuevos, llegará un momento en el que el medidor por coordenadas tratará de palpar un punto del electrodo el cual ya no existirá debido al desgaste del mismo *Fig. 103*.

Dicho fallo será interpretado como un error del programa y por seguridad el software Holo cancelará la medición.

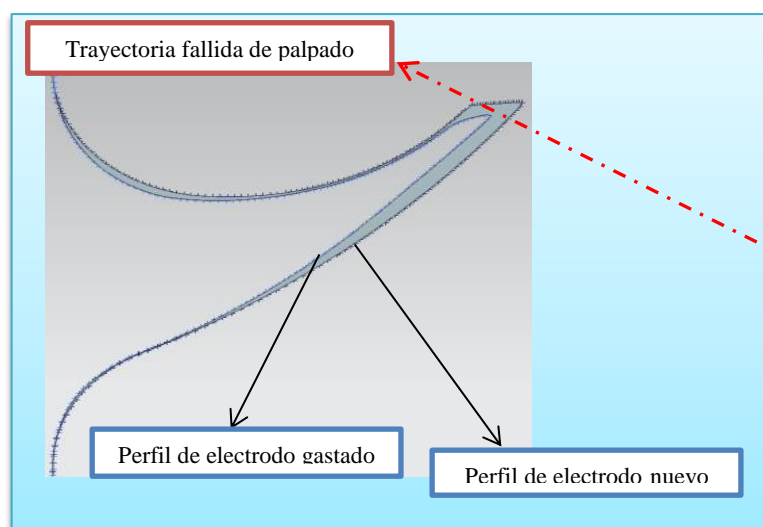


Fig. 103 Representación de la trayectoria fallida de palpado en la medición de un electrodo tras la erosión

Tal y como se ha mencionado anteriormente, cabe la posibilidad de que un programa de medición de una sección de electrodo nuevo sirva para la medición de la misma sección del mismo electrodo tras la erosión. Se trata de una situación anómala la cual sucede debido al “recrecido”.

Dicho fenómeno de recrecido sucede debido a la adhesión al electrodo tanto de granos de grafito desprendidos durante la erosión como de partículas pertenecientes a la propia pieza erosionada. El fenómeno de recrecido en el electrodo se situará en la punta del mismo debido a que las partículas las cuales lo conforman generalmente quedarán depositadas en la parte más baja de la erosión. Siendo a su vez la geometría final del mismo difícilmente predecible.

Por ello el diseño de los programas de medición se llevará a cabo de la empleando el siguiente algoritmo *Fig. 104*:

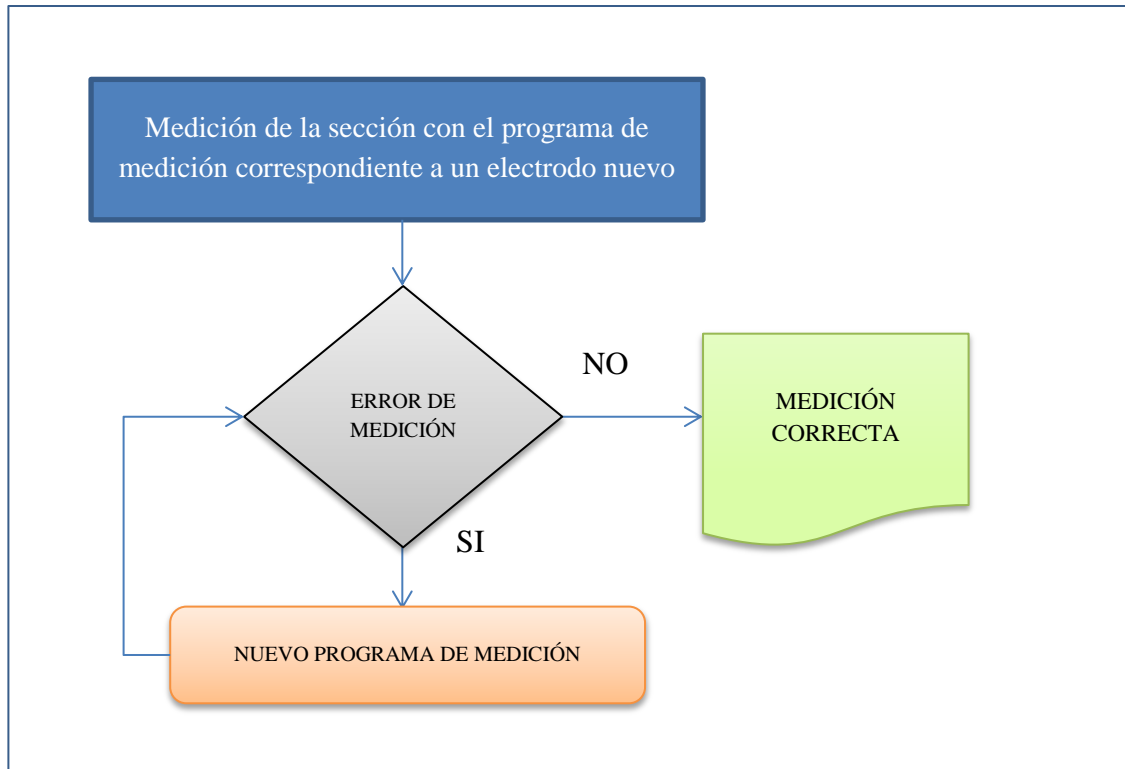


Fig. 104 Algoritmo de diseño de programas de medición para electrodos tras la erosión

Diseño de nuevos programa de medición: Para el diseño de nuevos programas de medición de cualquiera de las secciones de un electrodo gastado habrá que tener en cuenta el factor del desgaste del electrodo.

Puesto que el software Holos no nos permite introducir el valor numérico del punto al que queremos que llegue la medición, tendremos que indicar manualmente el punto final de medición de nuestro programa.

Teniendo en cuenta que el fallo en las mediciones únicamente se producirá en la punta del electrodo, tendremos que ajustar el programa de medición del electrodo en dos tramos de medición del electrodo.

Tramo 1: Para el ajuste de las mediciones correspondientes del primer tramo diseñaran programas de medición reduciendo la distancia a medir, pudiendo de tal manera obtener un programa de medición que represente correctamente el electrodo gastado en dicho tramo Fig. 105 .

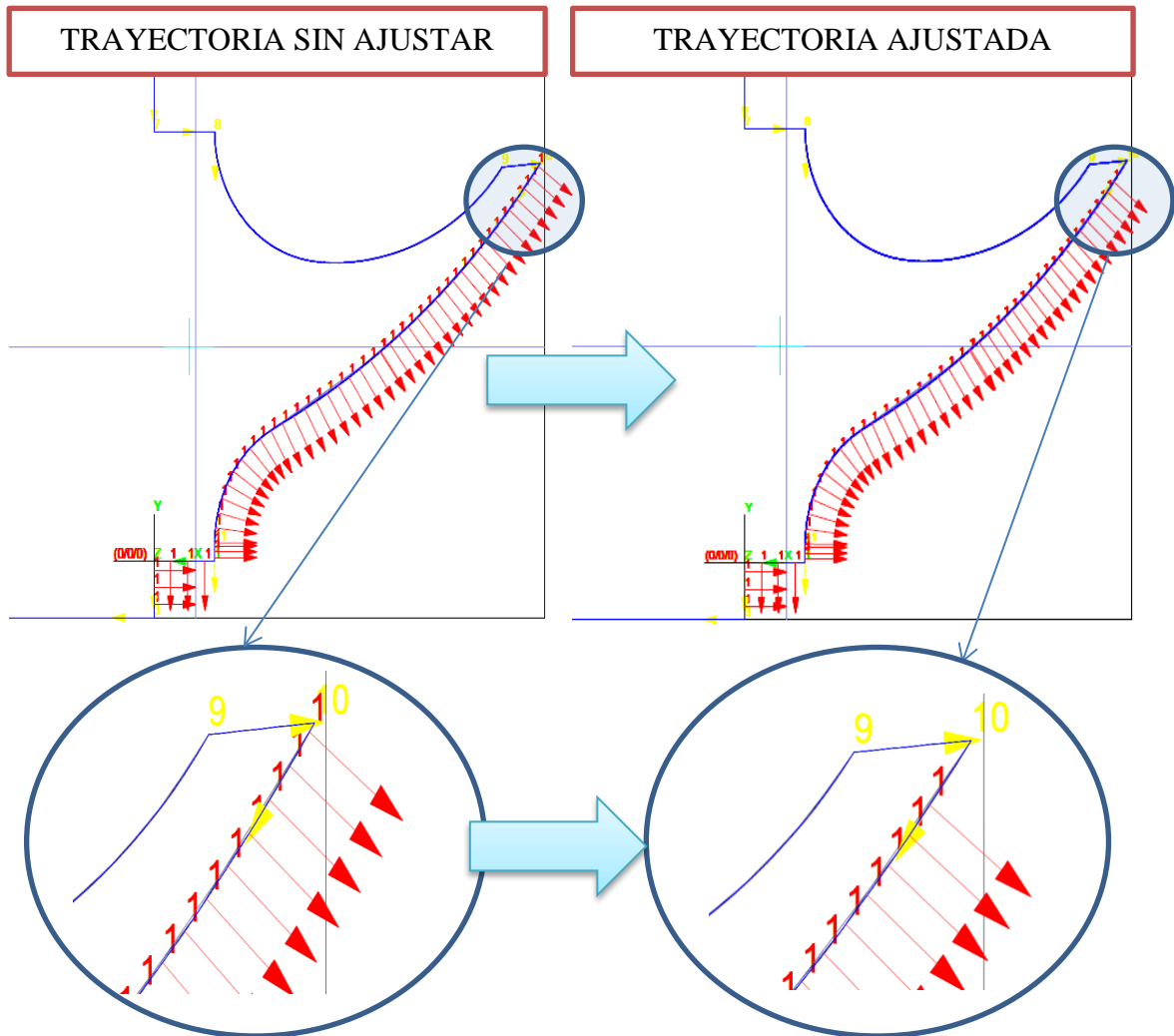


Fig. 105 Representación del ajuste de trayectorias de medición para electrodos gastados (TRAMO 1)

Tramo 2: Para una correcta medición de la punta del electrodo gastada, se procederá a ajustar un segundo tramo de las mediciones, que corresponderá al tramo de la sección correspondiente al plano situado en la punta del electrodo Fig. 106.

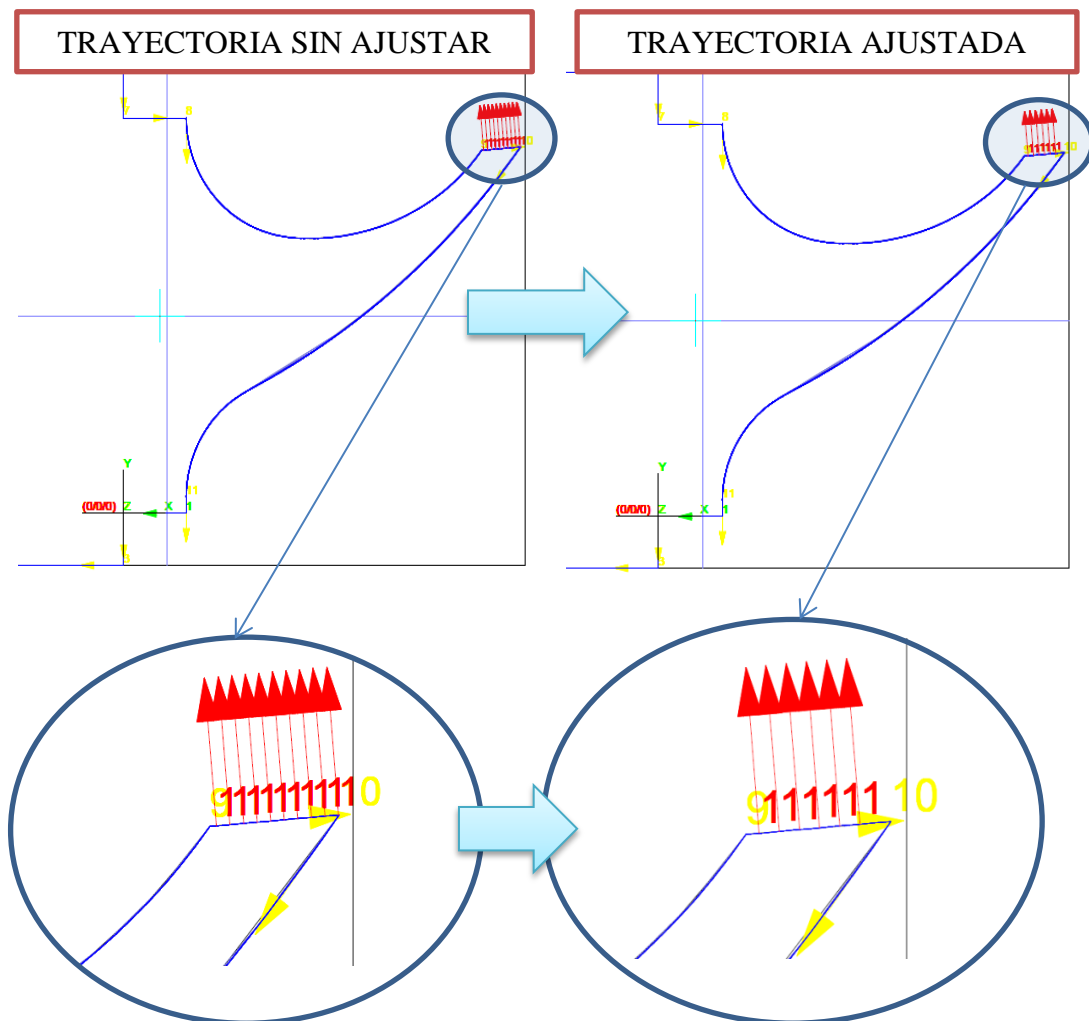


Fig. 106 Representación del ajuste de trayectorias de medición para electrodos gastados (TRAMO 2)

El ajuste en los dos tramos mencionados se realizará tantas veces como fuese necesario hasta obtener una medición correcta del electrodo desgastado.

5.Instalación y fijación del electrodo a la mesa: Se fijará el electrodo a la mesa empleando un material plástico de fijación, la correcta fijación garantizará que el electrodo no se mueva durante la medición.

6.Alineación del electrodo: La alineación del electrodo se realizará siguiendo los mismos pasos que para la alineación de electrodos nuevos.

7.Medición de las secciones: Se procederá a medir las secciones del electrodo gastado empleando los programas de medición diseñados previamente. Éste apartado de medición está estrechamente relacionado con el de diseño de los programas dado que

será en ésta etapa donde nos daremos cuenta si el programa de medición diseñado funciona correctamente o tendremos que volver a diseñar otro programa de medición.

Cabe mencionar que en el caso de tener que diseñar un nuevo programa de medición, no habría que alinear nuevamente el electrodo.

8.Obtención de los resultados numéricos de las mediciones y su procesado: Una vez finalizadas las mediciones de las tres secciones del electrodo se procederá a obtener los resultados numéricos correspondientes a las mediciones y el procesado de las mismas. De esta manera obtendremos el archivo.txt correspondiente a las mediciones de tal manera que pueda ser interpretado directamente mediante el software SIEMENS NX.

El procedimiento a seguir para la obtención de las mediciones y su procesado es el mismo que el empleado para los resultados numéricos correspondientes a las mediciones de electrodos nuevos. Dicho procedimiento queda descrito en el protocolo de medición de electrodos nuevos.

9.Comprobación de los resultados: Como paso final de medición de los electrodos usados se procederá a su representación gráfica en el programa SIEMENS NX tal y como. Mediante dicha representación nos garantizaremos que las mediciones han sido realizadas correctamente pudiendo dar por finalizada la medición del electrodo.

3.6.2.3 ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES

Una vez finalizadas las mediciones tanto de los ensayos de las cuñas como de los ensayos para Blisk se procedió al análisis de las mediciones e interpretación de los resultados. Puesto que para la interpretación de las mediciones se requería de una gran exactitud y precisión se optó por el uso del software Siemens NX.

La interpretación de las mediciones, al igual que los ensayos se dividió en dos grupos el de los ensayos con electrodos con forma de cuña a 60° y los electrodos para Blisk. Las mediciones se basaron en la superposición de un perfil característico del electrodo con el mismo perfil correspondiente a la cavidad formada tras la erosión. El perfil del electrodo será el medido previamente ya sea con el perfilómetro confocal Leica DCM3D en el caso de los electrodos con forma de cuña, o el medido mediante el medidor por coordenadas ZEISS MC850 en los electrodos para Blisk.

Los factores a analizados fueron los siguientes:

1.Material total erosionado: El análisis de dicho factor nos proporcionará el volumen total erosionado durante la erosión. Dicho análisis se realizó para los ensayos con electrodos con forma de cuña.

2.Área total del gap: Mediante la superposición del electrodo y de la cavidad podremos evaluar el área total que abarca el gap. Dicho análisis se realizó para los ensayos con electrodos con forma de cuña.

3.Distintos valores del gap a lo largo del perfil del electrodo: Se analizaron los distintos valores del gap a lo largo del perfil del electrodo para ambas baterías de ensayos.

4.Valores máximos y mínimos del gap: Se obtuvieron de los valores máximos y mínimos del gap para ambas baterías de ensayos.

5Análisis de la rugosidad en la superficie de la cavidad: Se analizó la rugosidad de la superficie de la cavidad para verificar la desviación de los valores obtenidos en el gap para ambas baterías de ensayos.

Para el análisis de los factores mencionados anteriormente se diseñó un procedimiento de análisis el cual será distinto para los electrodos con forma de cuña a 60° y para los electrodos para Blist.

3.6.2.4 ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES DE LOS ELECTRODOS CON FORMA DE CUÑA A 60°

Tras las mediciones de los distintos ensayos realizados, tendremos mediciones de tres perfiles característicos de cada electrodo empleado y las rebanadas correspondientes a cada perfil.

Para el análisis de cada erosión se empleará el perfil central de cada electrodo y su cavidad correspondiente. Puesto que los resultados han de interpretarse mediante el software Siemens NX, se diseñó un procedimiento de análisis a seguir para medir satisfactoriamente los factores mencionados anteriormente *Tabla 29*.

<i>Etapa</i>	<i>Descripción</i>
1	Obtención de las coordenadas de la medición del perfil de electrodo a analizar
2	Conversión de la imagen de la cavidad a formato.tiff
3	Obtención del perfil característico del electrodo en el software Siemens NX
4	Alineación y centrado del perfil del electrodo
5	Obtención del perfil característico de la cavidad
6	Análisis del material total erosionado
7	Alineación y superposición de electrodo y cavidad
8	Análisis del área total del gap
9	Análisis de los valores del gap a lo largo del perfil del electrodo
10	Análisis de la rugosidad del perfil característico de la cavidad

Tabla 29 Procedimiento de análisis de las mediciones

1. Obtención de las coordenadas de la medición del perfil de electrodo a analizar: Se escogerá el perfil característico central del electrodo a estudiar y obtendremos el archivo.txt correspondiente a las mediciones de dicho perfil. Dicho archivo.txt estará constituido por las coordenadas X, Y, Z de cada punto del perfil.

2. Conversión de la imagen de la cavidad a formato.tiff: Para la conversión de la imagen de la cavidad a formato.tiff, abriremos la imagen en el software Paint y procederemos a guardarla en formato.tiff.

3. Obtención del perfil característico del electrodo en el software Siemens NX: Tal y como se ha mencionado previamente, se empleará el software Siemens NX para el estudio de diversos parámetros de la erosión. El primero paso para llevar a cabo dicho estudio consistirá en importar los puntos correspondientes a las mediciones del perfil central del electrodo tras la erosión al software.

Para llevar a cabo la importación de dichos puntos emplearemos la opción “*Import Points from file*”. Tras ejecutar dicha operación obtendremos la representación gráfica de los puntos correspondientes a la medición.

Tal y como se puede observar en la *Fig. 107*, se puede apreciar la aparición de puntos fuera del perfil, dichos puntos son zonas no medidas del electrodo. Debido a que el número de puntos no medidos es muy pequeño en comparación con la cantidad de puntos bien medidos del electrodo, se procederá a su eliminación manual, seleccionándolos y eliminándolos.

La eliminación de dichos puntos nos facilitará la interpretación del perfil del electrodo en pasos posteriores.

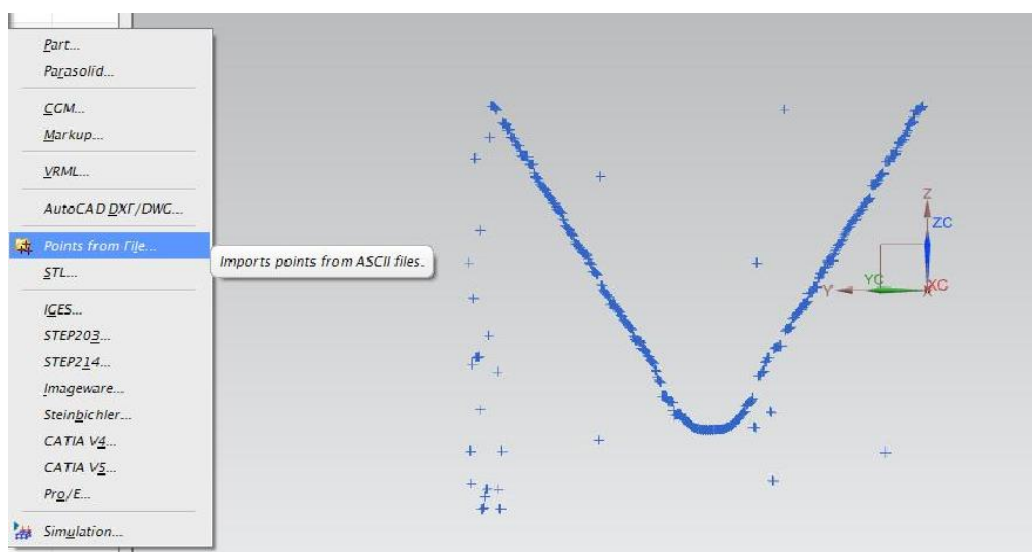


Fig. 107 Representación de los puntos importados de la medición de un perfil de electrodo gastado

Tras haber eliminado los puntos correspondientes al ruido de la medición, se procederá a obtener el perfil de la medición.

Para la obtención del perfil se seleccionarán todos los puntos y se seleccionará la opción “Fit curve” mediante la cual obtendremos la curva resultante a la unión de todos los puntos Fig. 108. Para que la curva se adecue de manera exacta a los puntos, se les asignará un grado dos a los segmentos que la constituyen y a su vez, elevaremos el número de segmentos que constituirán nuestra curva hasta que obtengamos un error (< 0.002).

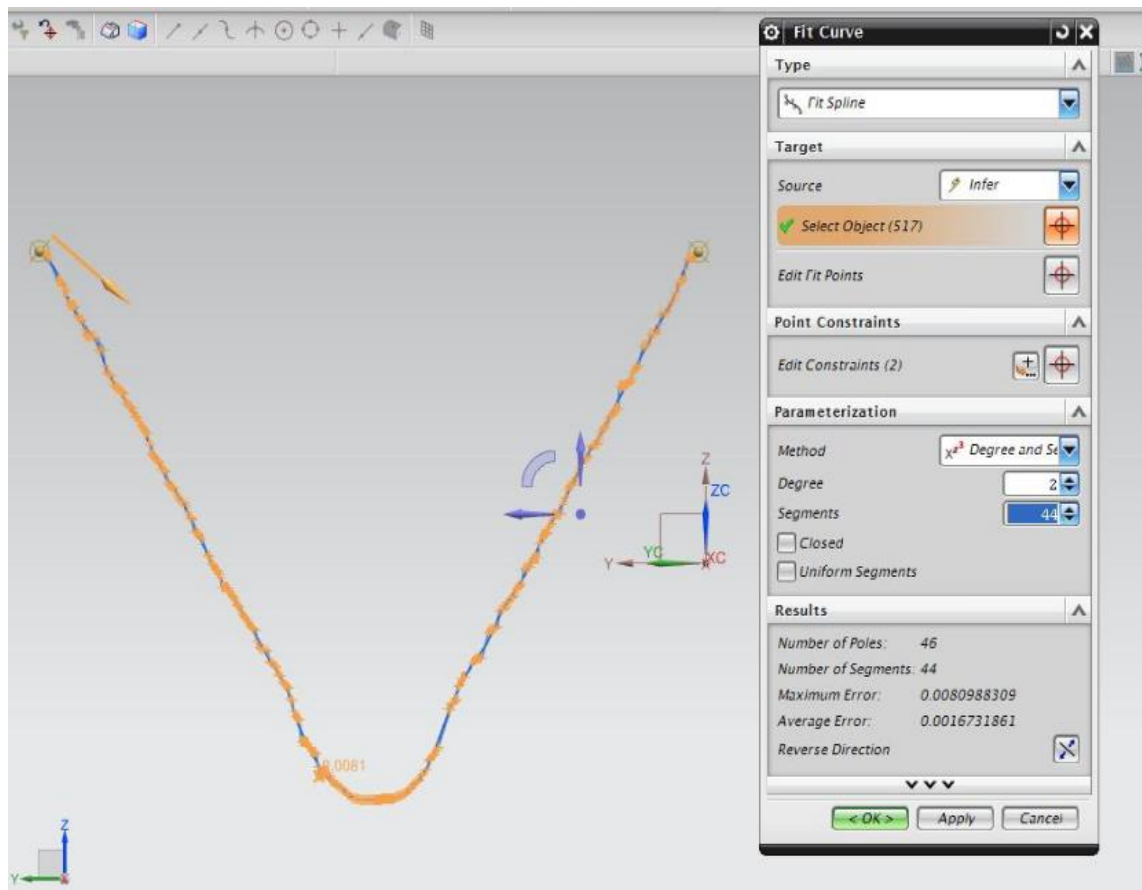


Fig. 108 Curva correspondiente al perfil del electrodo, obtenida empleando la opción Fit curve

4. Alineación y centrado del perfil del electrodo: Para los correctos análisis posteriores y superposición de electrodo y cavidad, es necesario alinear y situar perfectamente el centro del perfil del electrodo.

Como primer paso para situar el centro del electrodo, se hará pasar una recta horizontal por el punto más bajo del perfil del electrodo. A continuación, empleando la opción “Offset curve” representaremos rectas paralelas a la recta horizontal dibujada previamente Fig. 109. Se seleccionará la separación entre dichas rectas paralela en función de la profundidad de la erosión realizada.

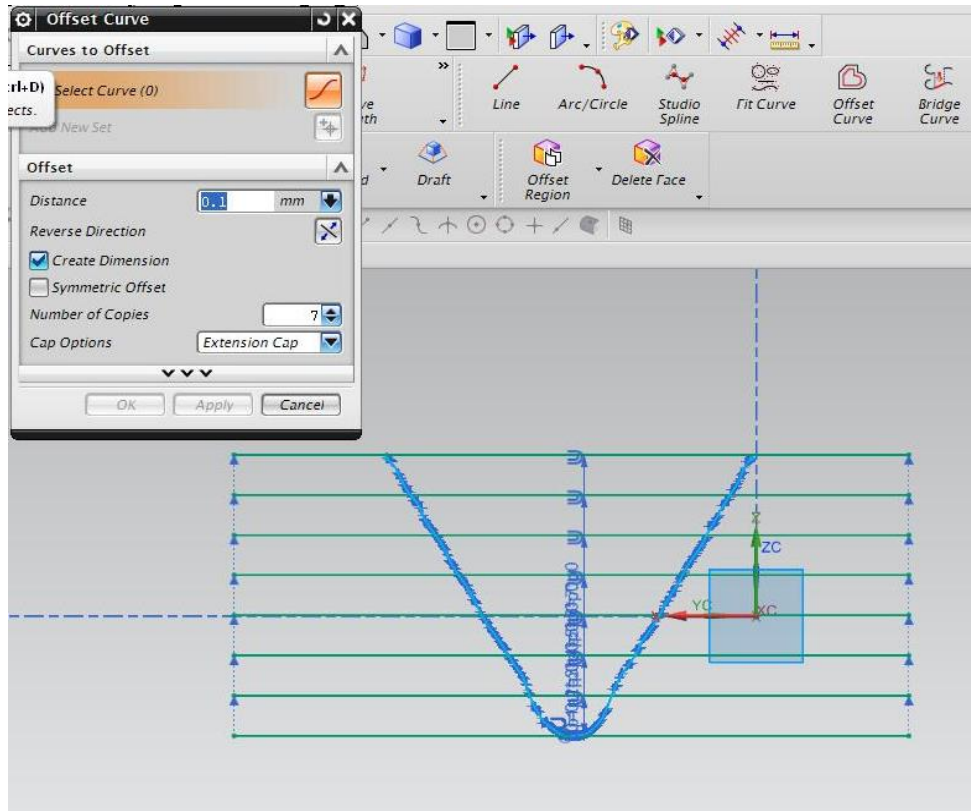


Fig. 109 Rectas horizontales paralelas desde el punto más bajo del perfil del electrodo

A continuación se eliminarán las partes de las rectas paralelas que queden situadas fuera de la sección del electrodo.

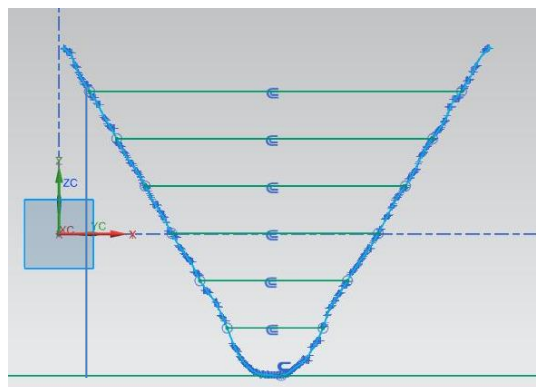


Fig. 110 Rectas paralelas situadas dentro de la sección del electrodo.

Tal y como se puede observar en la Fig. 110 cada una de las rectas situadas dentro de la sección del electrodo tiene señalado el centro de la misma. A su vez se dibujará una recta vertical desde la intersección entre el perfil del electrodo con la recta paralela más alejada de la punta del perfil del electrodo.

A continuación mediremos las distancias horizontales desde la recta vertical hasta los centros de las rectas paralelas y sacaremos la media de todas las mediciones. A continuación realizaremos una recta paralela a la recta vertical y obtendremos directamente el centro del perfil del electrodo *Fig. 111*.

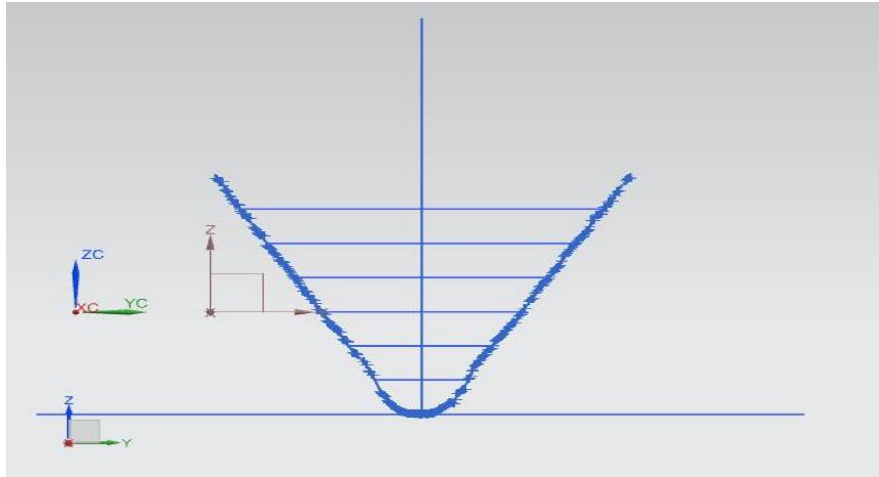


Fig. 111 Recta vertical para la representación del centro del perfil del electrodo

5. Obtención del perfil característico de la cavidad: Para la obtención de los perfiles característicos de las cavidades se empleará el software Siemens NX.

Teniendo la imagen de la cavidad ya guardada en formato.tiff procederemos a importar dicha imagen en el Siemens NX. Para la importación de la imagen emplearemos la opción “*raster image*” *Fig. 112*. A continuación tendremos que seleccionar el tamaño de la imagen a importar, dichas dimensiones las habremos obtenido antes de obtener las imágenes de las cavidades en el perfilómetro Leica DCM3D.

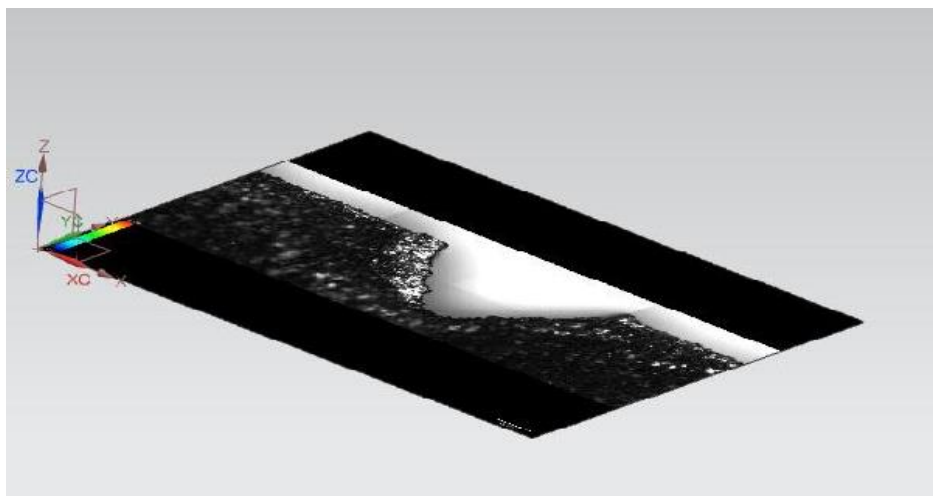


Fig. 112 Imagen de una cavidad importada en el software Siemens NX

A continuación procederemos a obtener el perfil característico de la cavidad del electrodo. Como paso previo a dicha obtención del perfil realizaremos una recta de esquina a esquina de la imagen representando de esa forma la superficie de la pieza correspondiente a la cavidad. Mediante dicha recta, posteriormente se podrá alinear la cavidad y disponerla horizontalmente para el correcto análisis posterior.

La obtención del perfil de la cavidad se realizará empleando el comando “*studio spline*” mediante el cual se podrá representar el perfil de la cavidad de manera detallada empleando el número de puntos que se crean convenientes *Fig. 113*.

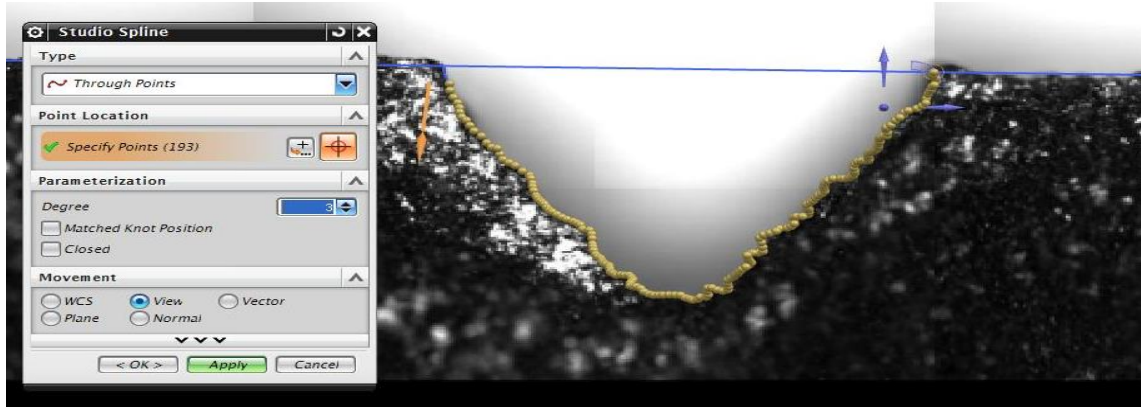


Fig. 113 Obtención del perfil representativo de la cavidad

6. Análisis del material total erosionado: Una vez obtenido el perfil representativo de la cavidad se procederá al análisis del volumen total de pieza erosionado. Para el estudio del volumen total erosionado se extruirá el perfil obtenido de la cavidad una longitud de 20mm y a continuación se analizará el volumen total de la extrusión empleando el comando “Measure Bodies” *Fig. 114*. De esta manera obtendremos el valor numérico del volumen total erosionado

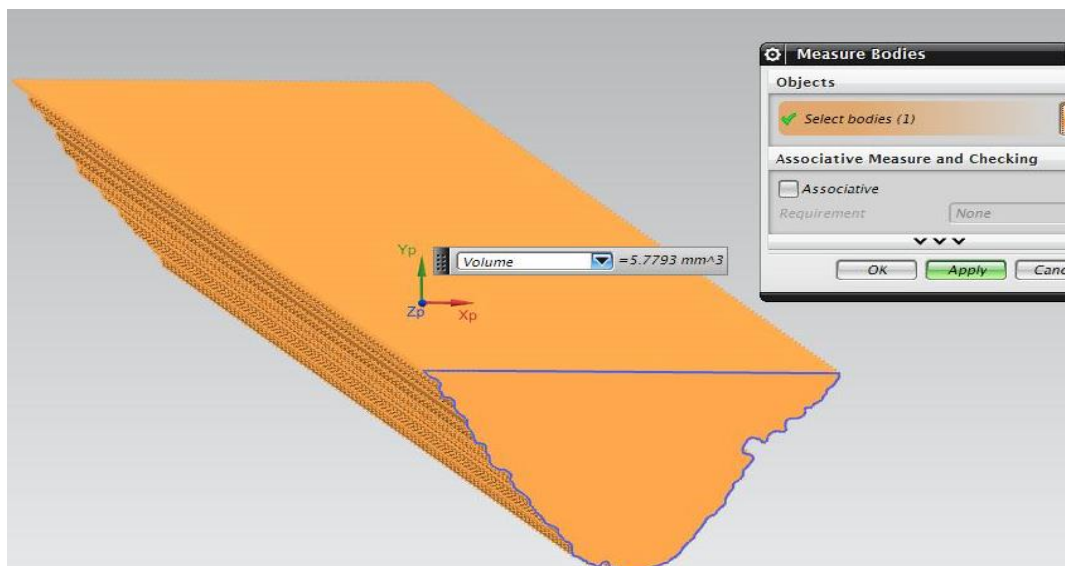


Fig. 114 Representación y cálculo del volumen total erosionado

7. Alineación y superposición de electrodo y cavidad: Para la realización de los análisis posteriores es necesaria la correcta superposición del electrodo y de la cavidad. Para ello se han de seguir los siguientes pasos.

7.1 Alineación y centrado del perfil de la cavidad: Para ello se realizará el mismo procedimiento empleado para la alineación y centrado del perfil del electrodo. De tal manera obtendremos un perfil de la cavidad con una línea central representando el centro del perfil.

7.2 Unión de los puntos inferiores de los perfiles: Una vez realizado el centrado y alineación de la cavidad, y teniendo ya centrado y alineado el perfil del electrodo, superpondremos ambos perfiles teniendo como punto de superposición el punto inferior central de ambos (fig.)

7.3 Desplazamiento del perfil del electrodo: Para la superposición final del electrodo y de la cavidad se ha de tener en cuenta el desgaste del electrodo, se procederá a desplazar en el eje vertical el perfil del electrodo una distancia igual a la pérdida de longitud de dicho perfil del electrodo durante la erosión.

La longitud total desgastada en el perfil del electrodo será la medida en la esfera de referencia en la propia máquina tras la erosión.

Será la aplicación del factor del desgaste el que nos proporcionará la superposición final real de electrodo y cavidad *Fig. 115*.

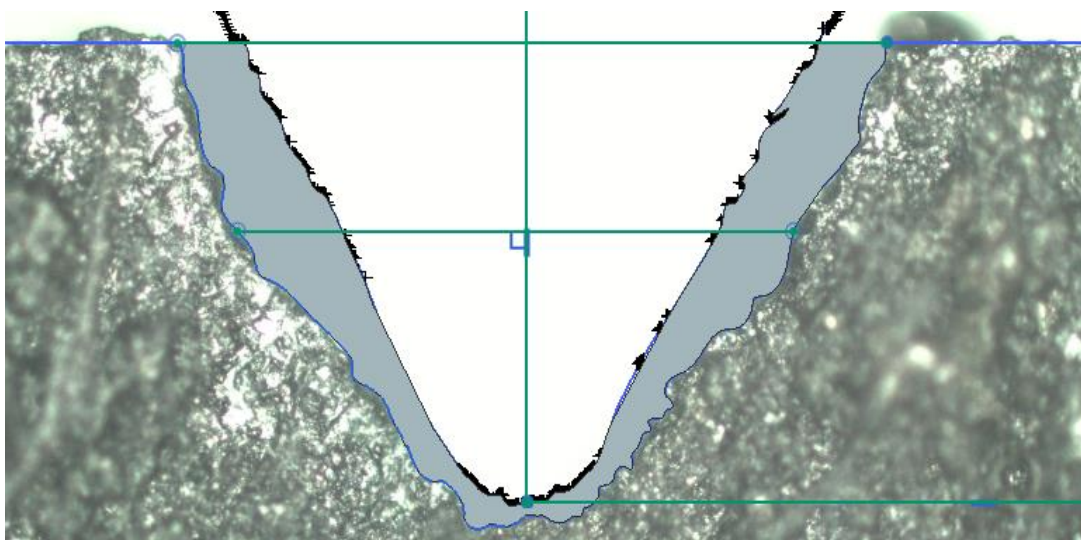


Fig. 115 Superposición final de electrodo y cavidad

8. Análisis del área total del gap: Una vez finalizada la superposición se realizará una extrusión se analizará el área encerrada entre electrodo y pieza, a la cual se denominará área de gap. Para ello se realizará una extrusión de 20 mm de dicha área, y de tal manera podremos analizar mediante el comando “measure faces” el área del gap Fig. 116.

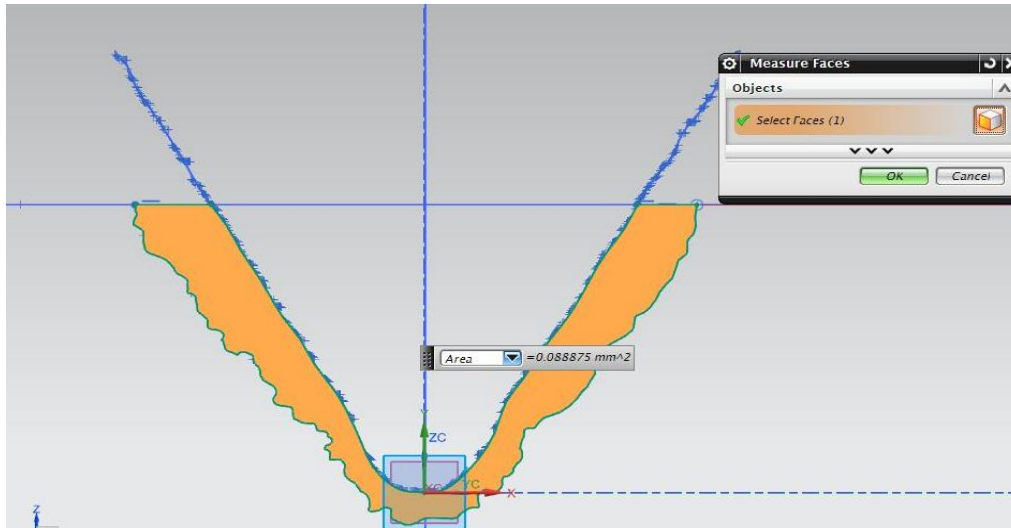


Fig. 116 Análisis del área del gap

De la misma manera, pero en este caso empleando el comando “Measure Bodies” analizaremos el volumen total correspondiente al área del gap en toda la erosión Fig. 117.

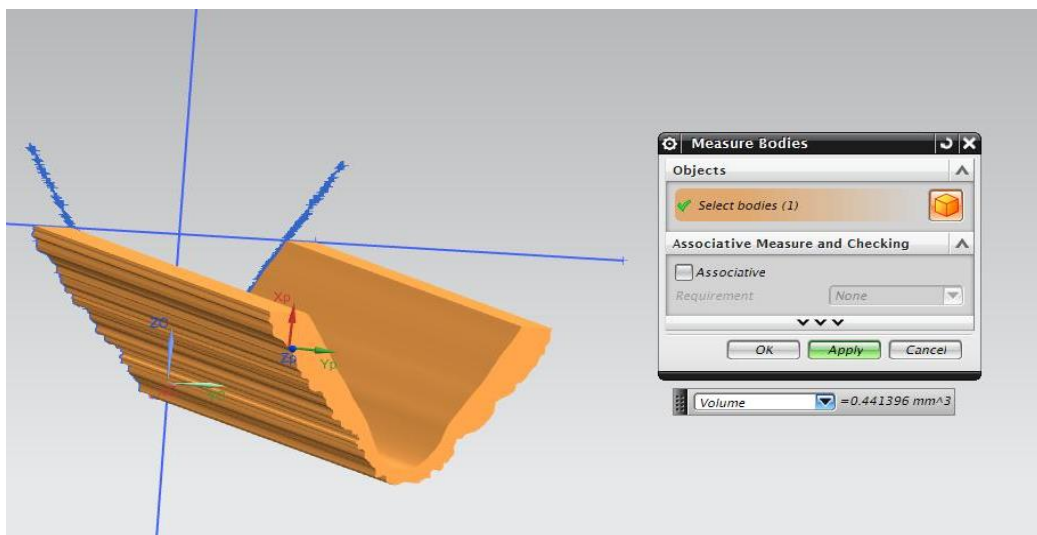


Fig. 117 Análisis de volumen correspondiente al área del gap en toda la erosión

9. Análisis de los valores del gap a lo largo del perfil del electrodo: Siendo el gap uno de los factores que mayor relevancia tiene a la hora de definir la exactitud del proceso de mecanizado de los materiales mediante electroerosión por penetración. Su correcto estudio y entendimiento nos proporcionará un conocimiento de alto valor científico e indispensable para la futura evolución del proceso de electroerosión por penetración.

Para el estudio del gap, se emplearán las rectas paralelas representadas anteriormente para el centrado y alineación del electrodo.

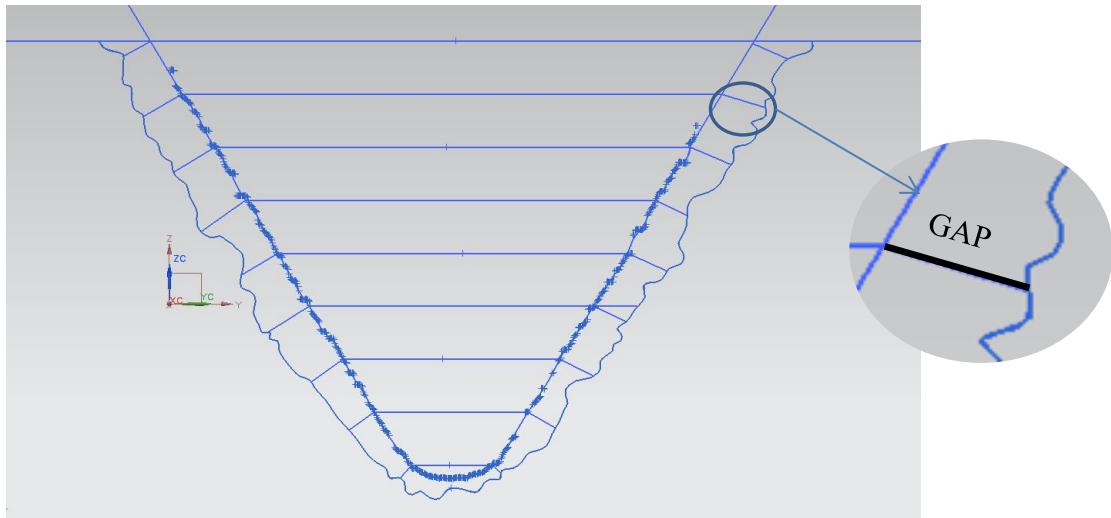


Fig. 118 Representación del gap a lo largo del perfil del electrodo

Teniendo los perfiles de electrodo y cavidad superpuestos y las rectas paralelas representadas en el electrodo, se dibujarán rectas perpendiculares desde el punto de corte de cada recta paralela con el perfil del electrodo hasta el perfil correspondiente a la cavidad. De esta manera tendremos representado el gap a lo largo de todo el perfil del electrodo *Fig. 118*.

Una vez representado el gap a lo largo de todo el perfil del electrodo se procederá a su medición empleando el comando de medición.

10. Análisis de la rugosidad del perfil característico de la cavidad: Se procederá a analizar la rugosidad máxima de la cavidad empleando el comando de medición del software *SIEMENS NX*.

3.6.2.5 ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES DE LOS ENSAYOS CON ELECTRODOS PARA BLISK

Una vez obtenidas todas las mediciones procederemos a analizar los resultados obtenidos en las mismas. Teniendo en cuenta que dispondremos de tres secciones de cada uno de los electrodos medidas antes y después de la erosión se procederá a analizar en primer lugar el desgaste en cada una de ellas, y a continuación se analizará el gap en la sección central del electrodo.

El análisis tanto del desgaste del electrodo como del gap se realizará empleando el software *Siemens NX*.

El protocolo de análisis de las mediciones de los ensayos con electrodos para Blist constata de las siguientes etapas, divididas en dos partes, el estudio del desgaste, y el estudio del gap.

Protocolo de análisis del desgaste de electrodo (*será llevado a cabo para cada una de las tres secciones representativas del electrodo*) Tabla 30:

<i>Etapa</i>	<i>Descripción</i>
1	Importación de las medidas procesadas correspondientes a la sección de electrodo antes de la erosión
2	Obtención del perfil característico del electrodo antes de la erosión
3	Importación de las medidas procesadas correspondientes a la sección de electrodo tras la erosión
4	Obtención del perfil característico del electrodo tras la erosión
5	Superposición de ambos perfiles del electrodo y análisis del área de electrodo desgastada en la sección de análisis

Tabla 30 Protocolo de análisis del desgaste de electrodo

1.Importación de las medidas procesadas correspondientes a la sección de electrodo antes de la erosión: Teniendo las medidas de la sección del electrodo a estudio ya procesadas mediante el programa *Zeiss.c* se procederá a importar las coordenadas correspondientes a las mediciones de dicha sección al software Siemens.

2.Obtención del perfil característico del electrodo antes de la erosión: Una vez importadas las coordenadas correspondientes a la medición del perfil, se procederá a la selección de todos los puntos, y empleando el comando "*Fit curve*" de igual manera que se utilizó para las mediciones de los electrodos con forma de cuña, se generará el perfil del electrodo correspondiente a las mediciones previas a la erosión.

3.Importación de las medidas procesadas correspondientes a la sección de electrodo tras la erosión: Al igual que se realizó en la etapa 1 para las medidas correspondientes al electrodo antes de la erosión, se procederá a importar las medidas correspondientes a la misma sección del electrodo tras la erosión.

4.Obtención del perfil característico del electrodo tras la erosión: Se procederá a obtener el perfil característico del perfil del electrodo tras la erosión de siguiendo el mismo procedimiento seguido en el paso 2 para la obtención del perfil correspondiente a la sección del electrodo antes de la erosión.

5. Superposición de ambos perfiles del electrodo y análisis del área de electrodo desgastada en la sección de análisis: Empleando las referencias del electrodo (fig.) procederemos a superponer los dos perfiles representativos de antes y después de la erosión, quedando de tal manera representada gráficamente el área desgastada de electrodo durante el proceso de erosión Fig. 119.

A continuación se procederá a analizar el área desgastada del electrodo, que será el área encerrada entre los dos perfiles de la sección analizada. Para ello se empleará el comando “Measure Faces” tal y como se muestra en la Fig. 116.

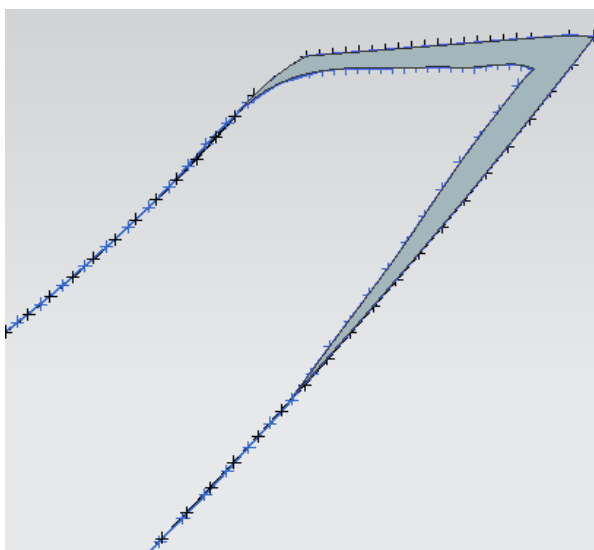


Fig. 119 Representación del área desgastada mediante la superposición de los perfiles de antes y después de la erosión, correspondiente a un VDI 39 Step3

El protocolo de análisis del desgaste del electrodo se realizará en las tres secciones características de cada uno de ellos.

Protocolo de medición diseñado para el análisis del gap (*Se analizará el perfil central de cada electrodo empleando la rebanada de la cavidad correspondiente a dicho perfil*):

Etapa	Descripción	Software
1	Subdivisión del electrodo	Siemens NX
2	Obtención de los puntos a analizar de la cavidad	Leicascan
3	Superposición del electrodo tras la erosión y los puntos a medir de la cavidad	Siemens NX
4	Análisis del gap	Siemens NX

Tabla 31 Protocolo de análisis del gap

1.Subdivisión del electrodo: Empleando la representación de la superposición de las secciones obtenida anteriormente para el análisis del desgaste del electrodo.

Procederemos a la subdivisión del perfil correspondiente al electrodo nuevo empleando 32 rectas horizontales, paralelas entre sí a una distancia de 0.8mm, las cuales comenzarán desde la parte superior del electrodo, siendo dicho punto de partida el equivalente a la profundidad máxima de erosión que se alcanzarán en los ensayos.

Empleando dicho procedimiento tendremos representado el perfil del electrodo mediante 64 puntos, los cuales serán aquellos en los que el perfil del electrodo se corta con las rectas horizontales representadas anteriormente *Fig. 120* .

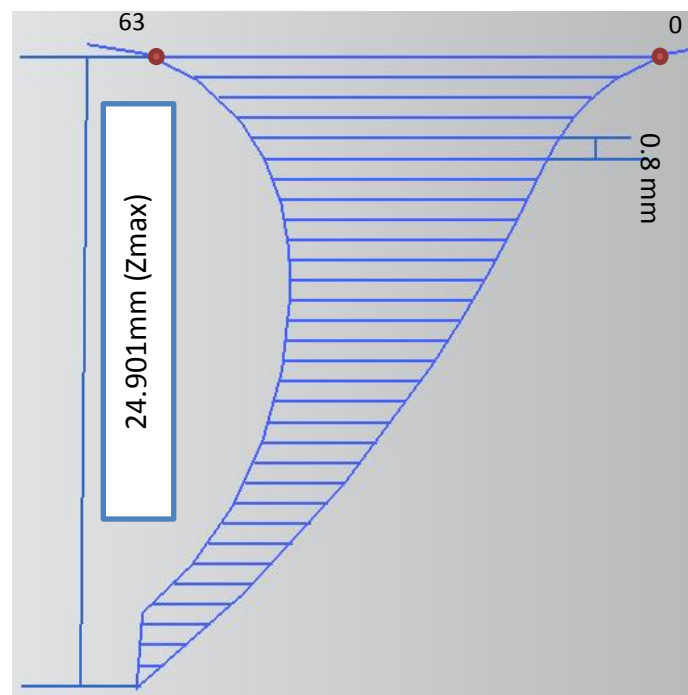


Fig. 120 Subdivisión del electrodo y punto obtenidos para el análisis del gap

2.Obtención de los puntos a analizar de la cavidad: Para la obtención de los puntos de la cavidad a analizar emplearemos el Software Leicascan. Para la correcta obtención de dichos puntos se han de seguir los siguientes pasos.

2.1 Alineación de la cavidad: Se dispondrá la cavidad en la mesa del perfilómetro confocal situada sobre un soporte de metacrilato para facilitar su desplazamiento durante la alineación.

Empleando el objetivo de 10 aumentos situaremos el puntero de medición sobre la zona superior de la cavidad correspondiente a la superficie de la pieza y en dicho emplazamiento situaremos nuestra referencia *Fig. 121*.

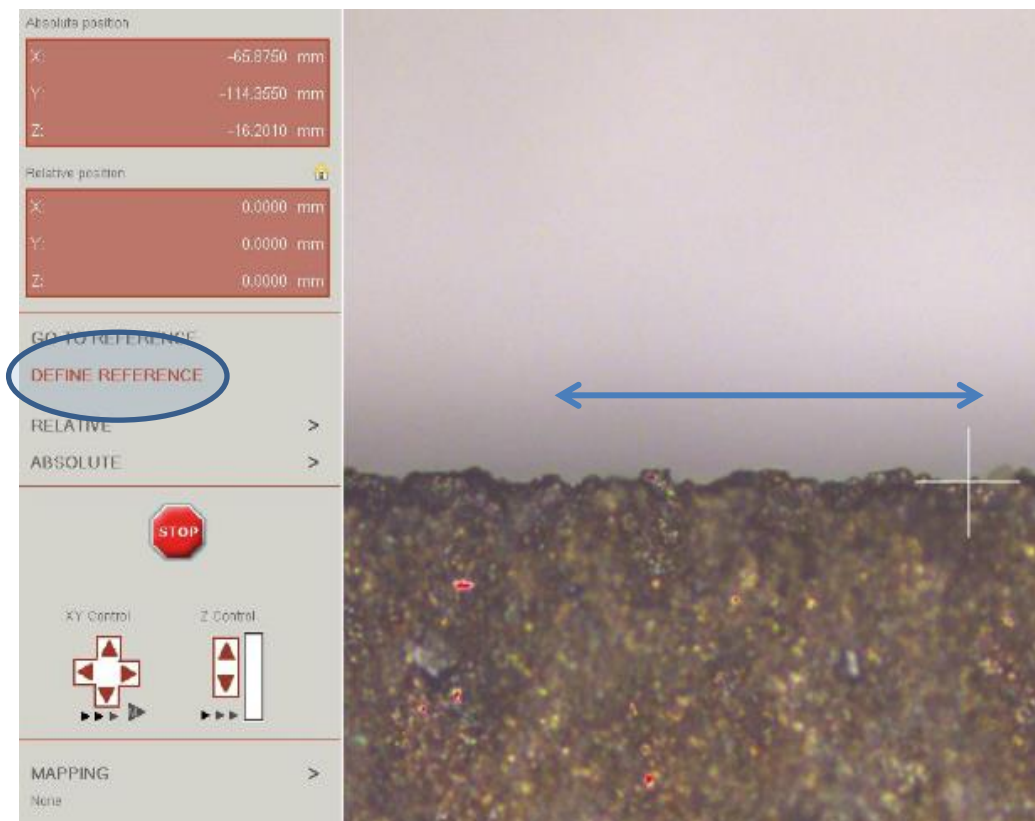


Fig. 121 Definir referencia para las mediciones de la cavidad

A continuación procederemos a desplazar a lo largo del eje x el puntero de lado a lado de la cavidad para comprobar la horizontalidad de la misma, modificando la disposición de la misma hasta conseguir una horizontalidad con una desviación menor de 10 μm .

La alineación de la cavidad es de vital importancia para los posteriores análisis que se realizarán.

2.2 Obtención de los puntos representativos de la cavidad: En primer lugar, teniendo referenciada la cavidad en el paso anterior en el lugar donde se aplicó el comando “define reference” se desplazará el cursor a lo largo del eje Y del Leica (que a su vez estará representando el eje Z correspondiente a la erosión) una distancia igual a :

$$\text{Desplazamiento } Y(\text{Leica}) = Z_{\text{max}} - Z_{\text{step}}$$

Donde el valor Z_{max} será constante para todas las mediciones, y será igual a 24.901mm, correspondiente a la profundidad máxima de erosión. En cambio, el valor correspondiente a Z_{step} variará en función del Step correspondiente al ensayo a analizar *Tabla 32*.

Step	Zstep (mm)
1	11.693
2	19.313
3	24.901
4	24.901

Tabla 32 Valor de Zstep en función del ensayo a analizar

Una vez desplazado el puntero la distancia requerida se definirá en dicho emplazamiento la nueva referencia.

A continuación y dependiendo del ensayo a analizar, se apuntarán las coordenadas de la cavidad en las siguientes profundidades *Tabla 33, Tabla 34, Tabla 35, Tabla 36*, siempre teniendo en cuenta que el eje (*Y Leica= Z erosión*). Las referencias se tomarán respecto de la referencia anteriormente definida *Fig. 122*.

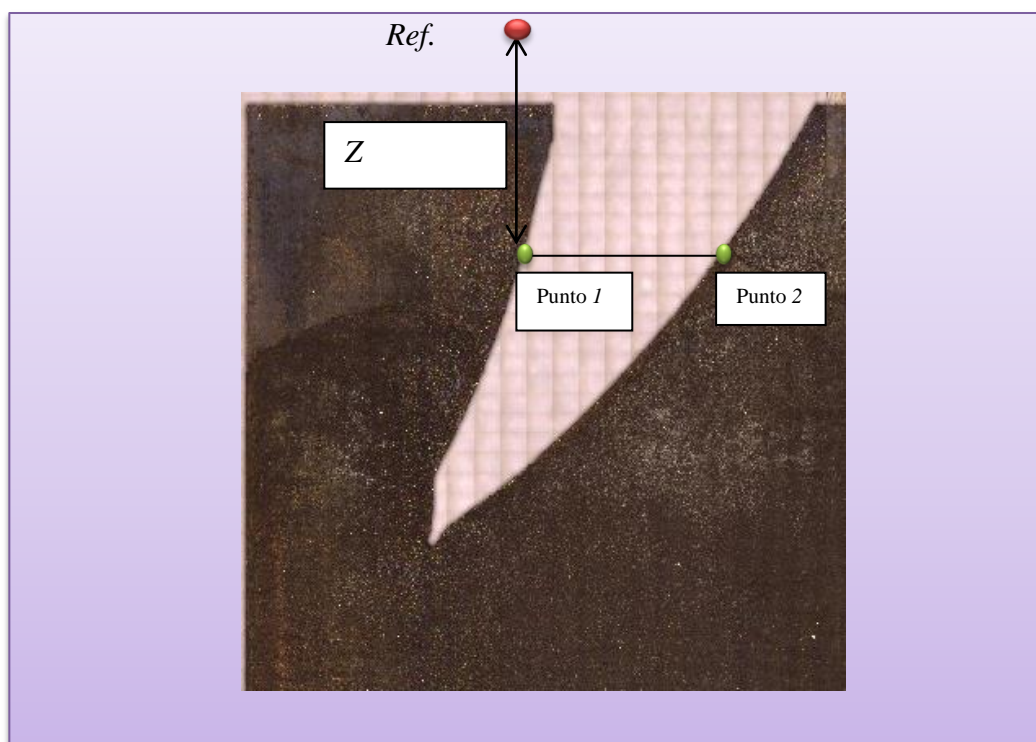


Fig. 122 Representación de las mediciones de la cavidad a realizar para cada profundidad

Por cada una de las coordenadas Z a las cuales se realizarán las medidas, se tomarán dos puntos de la cavidad, correspondientes a las coordenadas en el eje X a las cuales para dicha profundidad Z queda definida la cavidad.

Mediciones Step 1	
Punto	Z medición (mm)
17	-18,8499
19	-20,4499
21	-22,0499
23	-23,6499
25	-25,2499
27	-26,8499
28	-27,6499
29	-28,4499
30	-29,2499
31	-30,0499
32	-30,0499
33	-29,2499
34	-28,4499
35	-27,6499

Tabla 33 Mediciones correspondientes al estudio del gap para las erosiones con Step1

Mediciones Step 2	
Punto	Z medición (mm)
15	-17,2499
19	-20,4499
22	-22,8499
25	-25,2499
27	-26,8499
28	-27,6499
29	-28,4499
30	-29,2499
31	-30,0499
32	-30,0499
33	-29,2499
34	-28,4499
35	-27,6499

Tabla 34 Mediciones correspondientes al estudio del gap para las erosiones con Step2

Mediciones Step3	
Punto	Z medición (mm)
0	-5,2499
1	-6,0499
24	-24,4499
26	-26,0499
28	-27,6499
29	-28,4499
30	-29,2499
31	-30,0499
32	-30,0499
33	-29,2499
34	-27,6499
35	-27,6499
47	-18,0499
50	-15,6499
53	-13,2499
56	-10,8499
59	-8,4499
61	-6,8499
62	-6,0499
63	-5,2499

Tabla 35 Mediciones correspondientes al estudio del gap para las erosiones con Step3

Mediciones Step4	
Punto	Z medición (mm)
0	-5,2499
5	-9,2499
10	-13,2499
15	-17,2499
20	-21,2499
25	-25,2499
28	-27,6499
29	-28,4499
30	-29,2499
31	-30,0499
32	-30,0499
33	-29,2499
34	-28,4499
35	-27,6499
38	-25,2499
43	-21,2499
48	-17,2499
53	-13,2499
58	-9,2499
63	-5,2499

Tabla 36 Mediciones correspondientes al estudio del gap para las erosiones con Step4

3. Superposición del electrodo tras la erosión y los puntos a medir de la cavidad: Como paso previo a la superposición del perfil del electrodo y los puntos correspondientes a la cavidad, se procederá a trazar rectas perpendiculares al perfil del electrodo en aquellos puntos donde las rectas representadas para la subdivisión del electrodo corten con el perfil del mismo *Fig. 123*.

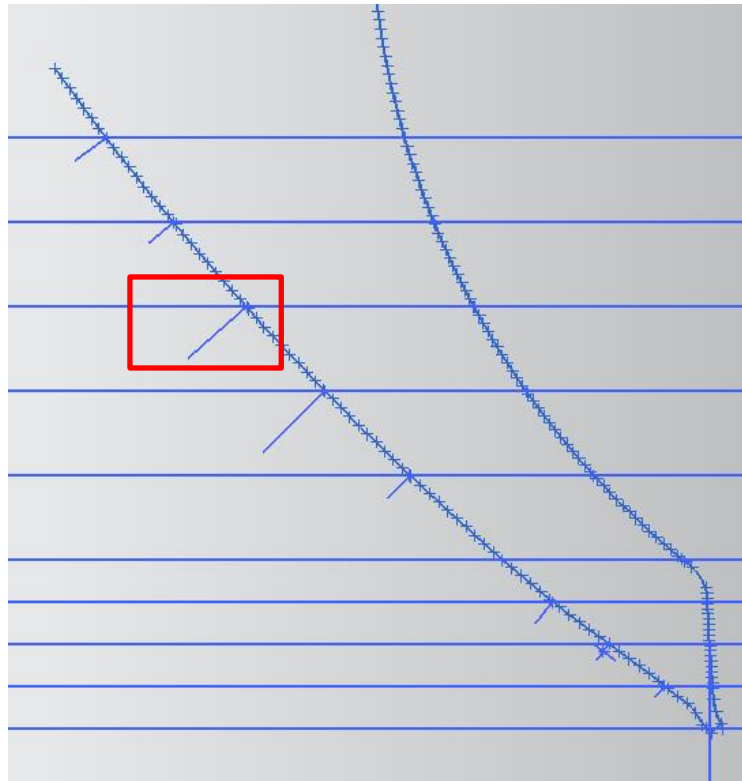


Fig. 123 Rectas perpendiculares al perfil del electrodo en los puntos de intersección entre perfil de electrodo y rectas correspondientes a la subdivisión del mismo

Tal y como se puede observar en la *Fig. 123*, solo se realizarán rectas perpendiculares en aquellos puntos de corte que correspondan a los puntos medidos de la cavidad para dicho Step o estrategia de erosión.

4. Análisis del gap: Teniendo representadas tanto las rectas perpendiculares al perfil como las rectas horizontales correspondientes, procederemos al análisis del ángulo formado por las rectas perpendiculares al perfil y las rectas horizontales empleadas para la subdivisión del electrodo. Se analizará el ángulo para todos los puntos del perfil del electrodo donde corten las rectas perpendiculares al perfil y las rectas horizontales empleadas para la subdivisión del electrodo.

El análisis del ángulo formado se realizará empleando el comando “*measure angle*”, el cual seleccionando dos rectas nos proporcionará el ángulo formado por ambas rectas Fig. 124.

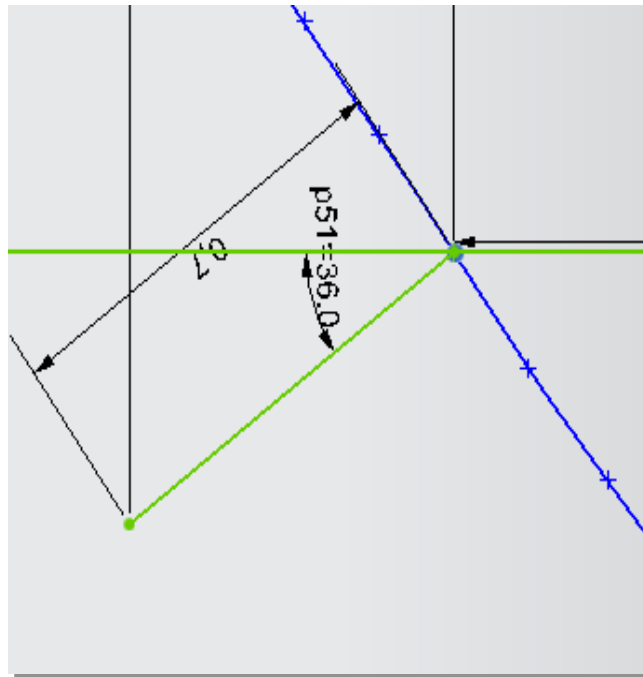


Fig. 124 Análisis del ángulo formado por las rectas de subdivisión de electrodo y las rectas perpendiculares al perfil del mismo

Una vez obtenido el ángulo formado en todos los puntos a analizar en dicho ensayo, se procederá a la superposición tanto de los puntos obtenidos de la cavidad como del perfil del electrodo.

Cabe mencionar que la distancia horizontal entre el perfil del electrodo y los puntos de la cavidad obtenidos previamente en el perfilómetro Leica DCM 3D, nos representará un parámetro del gap al cual se le denominará *gap horizontal*.

El gap horizontal es la componente del gap correspondiente al eje horizontal, el cual por sí solo no nos proporciona ningún valor real del gap dado que el gap es siempre perpendicular a la superficie del electrodo.

Tras tener la superposición del electrodo y de los puntos de la cavidad, teniendo en cuenta que disponemos de los valores correspondientes a los ángulos formados por el gap horizontal y la componente real del mismo que será perpendicular al perfil, podremos obtener de tal manera el valor real del gap en todos aquellos puntos a estudio.

Pudiendo representar el valor del gap mediante la fórmula:

$$Gap_i = Horizontal\ gap_i * \cos(\alpha_i)$$

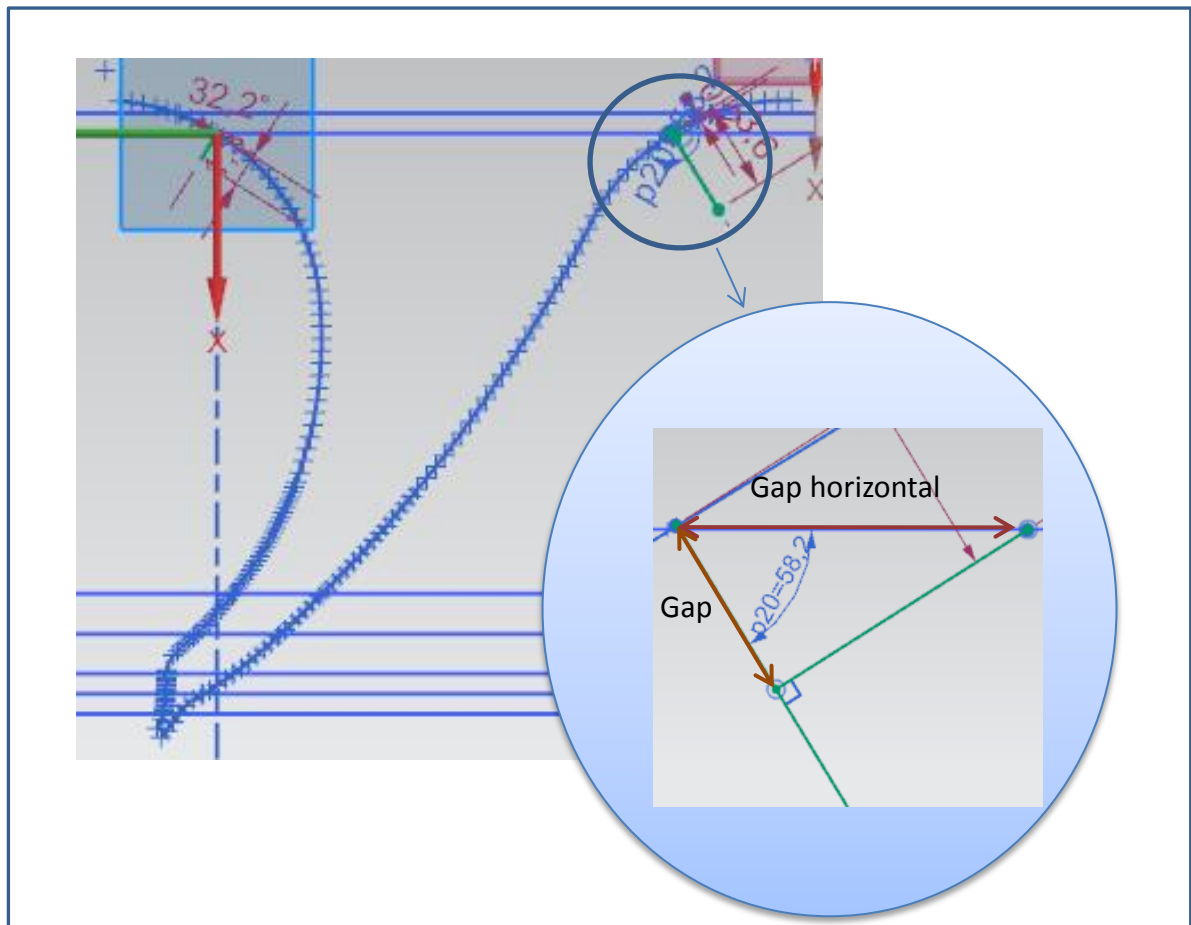


Fig. 125 Representación y análisis de las componentes del gap

3.7 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

3.7.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado del trabajo se presentarán los resultados obtenidos sobre el desgaste de los electrodos y la dimensión del gap a lo largo del perfil de los mismos tras la interpretación de los resultados de las mediciones.

Para ello se incluyen cuatro subapartados siendo los dos primeros los relativos a los resultados obtenidos en los electrodos con forma de cuña y en los electrodos para Blisk.

A su vez cada uno de los subapartados estará subdividido en función de los resultados analizados para los ensayos de cada geometría de electrodo empleada para las erosiones.

3.7.2 RESULTADOS DE LAS EROSIONES REALIZADAS CON ELECTRODOS CON FORMA DE CUÑA A 60°

En la tabla que se muestra a continuación se muestran los resultados obtenidos mediante la interpretación de las mediciones para los electrodos con forma de cuña a 60° *Tabla 37*:

Resultados	Descripción
<i>Radio de punta del electrodo tras la erosión</i>	Resultados correspondientes a la dimensión del radio de punta del electrodo en cada una de sus secciones características tras la erosión para cada una de las profundidades erosionadas
<i>Longitud de electrodo desgastada</i>	Resultados correspondientes a la longitud de electrodo desgastada en cada una de sus secciones características para cada una de las profundidades erosionadas.
<i>Área desgastada por sección de electrodo</i>	Resultados correspondientes al área de electrodo desgastada en cada una de las secciones características del mismo para cada profundidad erosionada.
<i>Tasa de desgaste de electrodo</i>	Resultados correspondientes a la tasa de desgaste de electrodo en función de la profundidad erosionada.
<i>Tasa de erosión de material</i>	Resultados correspondientes a la tasa de erosión de material en función de la profundidad erosionada.
<i>Desgaste volumétrico de electrodo en función de la cantidad de material erosionado</i>	Resultados correspondiente al desgaste volumétrico del electrodo en función de la cantidad de material erosionado
<i>Dimensión del gap en función de la profundidad de erosión</i>	Resultados correspondientes a la dimensión del gap a lo largo del electrodo para cada profundidad erosionada.

Tabla 37 Resultados de las erosiones realizadas con electrodos con forma de cuña a 60°

A modo de introducción a la nomenclatura de las mediciones, tal y como se observa en la *Fig. 126*, el punto correspondiente a la sección central del electrodo será el denominado 10 mm, de la misma manera aquellos dos puntos de medición que se encuentran desplazados 5mm a cada lado con respecto al punto central (10mm) serán los denominados 5mm y 10mm respectivamente.

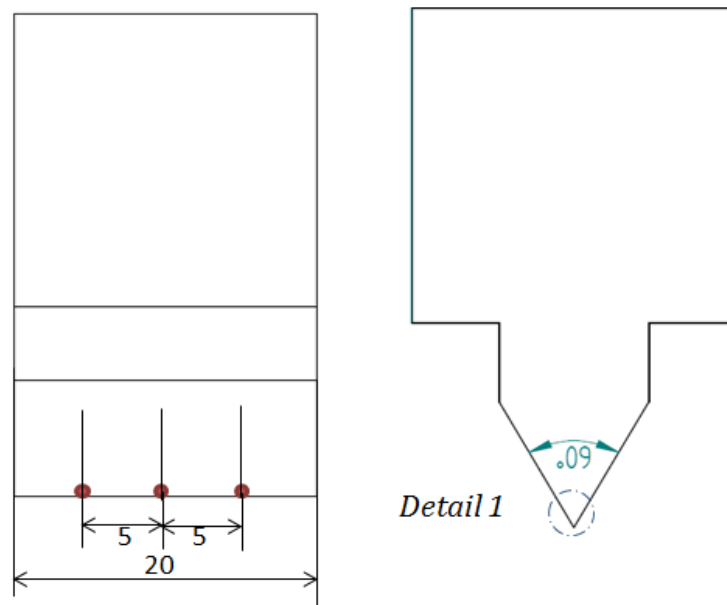


Fig. 126. Representación de las tres zonas de medida del electrodo

Radio de punta

A continuación se muestran los resultados correspondientes al radio de punta de los electrodos tras la erosión *Tabla 38*. Los resultados representan la media del radio de punta para cada profundidad de erosión, disponiendo de los resultados completos de cada una de las erosiones realizadas en el (*Anexo 5.2 Resultados*).

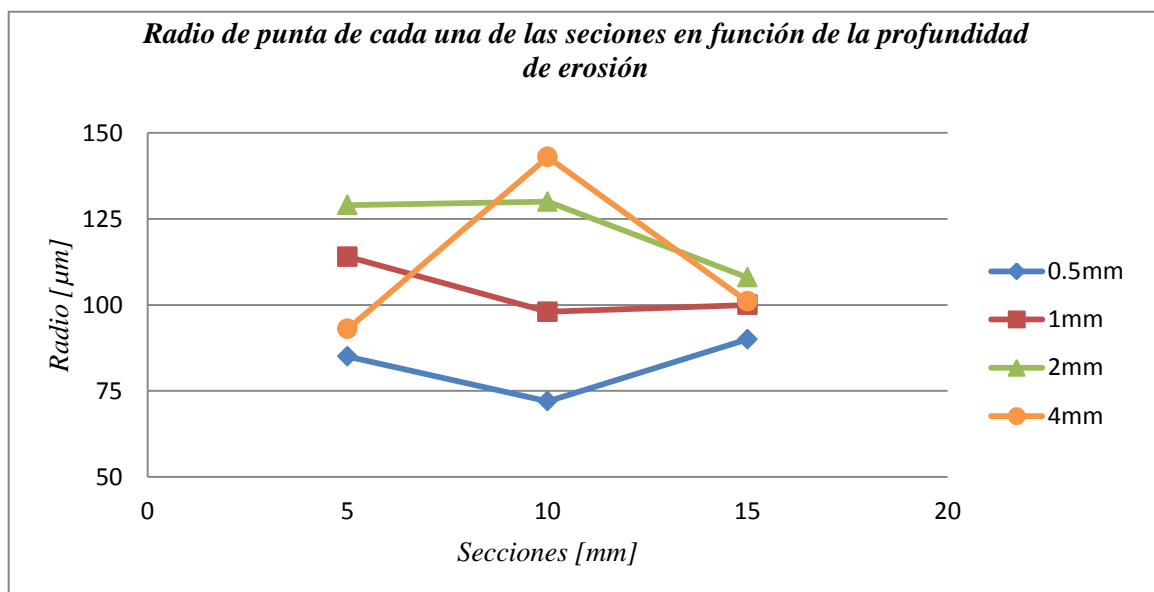
Tal y como se ha comentado previamente en el apartado (*3.6.1 Marco teórico*), la geometría final de la cavidad quedará directamente relacionada con la geometría final del electrodo desgastado, es por ello que el estudio del radio de punta de los electrodos nos permitirá conocer la dimensión del radio de las esquinas correspondientes a la cavidad, en este caso empleando electrodo con forma de cuña a 60°. Pudiendo de tal manera prever de manera más detallada la geometría final de la cavidad.

A su vez, teniendo en cuenta que la punta del electrodo será una zona de acumulación de calor durante la erosión se podrá observar la influencia del calor acumulado en la erosión de la punta del electrodo.

Radio de punta (μm) (media de los resultados en cada a cada profundidad de erosión)

Secciones [mm]	0.5mm	1mm	2mm	4mm
5	85	114	129	93
10	72	98	130	143
15	90	100	108	101
Media	82.333	104	122.333	112.333

Tabla 38 Radio de punta de los electrodo para cada profundidad de erosión



Gráfica 3 Representación de los radios de punta de cada sección para cada una de las profundidades de erosión

Tal y como se puede observar en la *Gráfica 3* el radio de punta de los electrodo tiende a aumentar en función de la profundidad de erosión hasta la profundidad de 2mm, estabilizándose dicho aumento del radio de punta en las erosiones de 4mm de profundidad quedándose en un valor intermedio entre el radio de punta para las erosiones a 1mm de profundidad y las erosiones a 2 mm de profundidad.

Longitud de electrodo desgastada

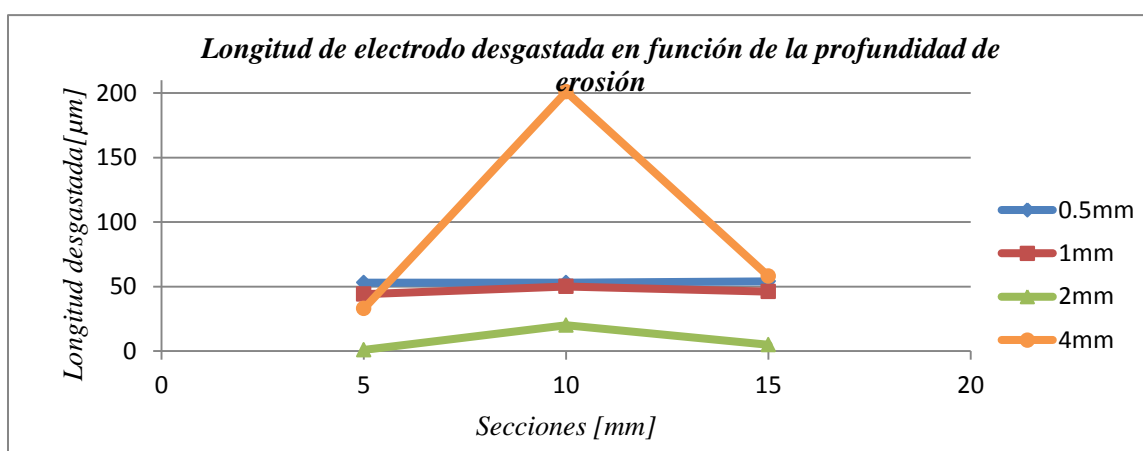
A continuación se muestran los resultados correspondientes a la longitud de electrodo desgastada en cada uno de los perfiles del mismo para las distintas profundidades de erosión ensayadas *Tabla 39*. Los resultados representan la media del desgaste del electrodo en cada sección para cada profundidad de erosión ensayada. Los resultados completos de cada una de las erosiones se encuentran detallados en el apartado (5.2 anexos).

La longitud de electrodo desgastada e un dato particularmente importante dentro del desgaste de los electrodos. Dicha importancia reside en que la longitud de electrodo desgastada influirá directamente en la profundidad final de la cavidad erosionada. Su conocimiento permitirá predecir de manera más exacta la profundidad final de las cavidades erosionadas en función de la profundidad de erosión requerida.

Longitud de electrodo desgastada (media de los resultados a cada profundidad de erosión)

Secciones [mm]	0.5mm	1mm	2mm	4mm
5	53	44	1	33
10	53	50	20	201
15	54	46	5	58

Tabla 39 Longitud de electrodo desgastada en cada sección característica del electrodo para cada profundidad de erosión



Gráfica 4 Representación de la longitud de electrodo desgastada en cada sección para cada profundidad de erosión

Tal y como se puede observar en la *Gráfica 4*, la longitud de electrodo desgastada para las erosiones de menor profundidad 0.5mm se encuentra entre $(53-54)\ \mu\text{m}$. Tomando como referencia dicho valor, cabría esperar un mayor desgaste de electrodo a mayores profundidades. En cambio tal y como se puede observar, dicho desgaste disminuye entre $(5-10)\ \mu\text{m}$ a una profundidad de erosión de 1mm , llegando a ser prácticamente nulo el desgaste en ciertas secciones para profundidades de 2mm .

Dicho fenómeno de incremento negativo del desgaste es debido al recrecido del electrodo en la punta del mismo. Se trata de la adhesión de partículas tanto del grafito desprendido durante las descargas como del metal erosionado.

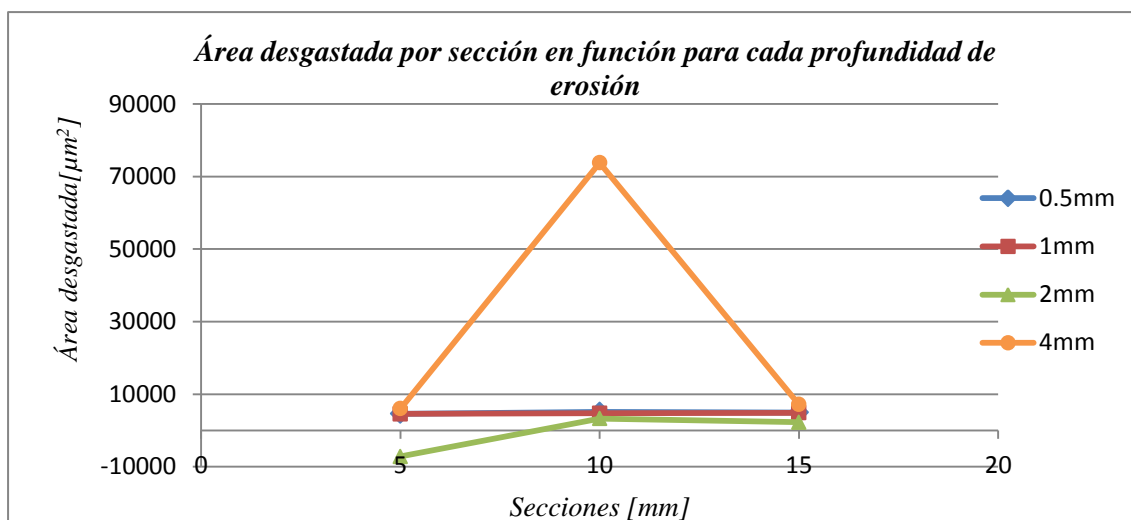
De la misma manera, se observa que el recrecido del electrodo tiende a desaparecer para las erosiones a 4mm de profundidad en las secciones laterales del electrodo, siendo la sección central del mismo la que mayor desgaste de longitud sufre, del orden de $150\ \mu\text{m}$ mayor que las secciones laterales.

Área desgastada por sección

A continuación se muestran los resultados correspondientes al área desgastada de electrodo por sección característica de electrodo. El conocimiento del desgaste del electrodo presentado a continuación, junto con los resultados de longitud de electrodo desgastada, proporcionarán un conocimiento necesario para poder predecir de manera más exacta la evolución del desgaste de los electrodos a diferentes profundidades. Los resultados particulares de cada una de las erosiones se encuentran en el apartado (Anexos 5.2).

<i>Área desgastada por sección (μm^2) (media de las erosiones a cada profundidad de erosión)</i>				
Secciones [mm]	0.5mm	1mm	2mm	4mm
5	4599	4558	-7193	6014
10	5078	4724	3304	73786
15	4975	4860	2286	7144

Tabla 40 Resultados del área desgastada de electrodo en cada sección para las diferentes profundidades de erosión



Gráfica 5 Representación del desgaste de electrodo en cada una de las secciones características para las diferentes profundidades de erosión

Tal y como se puede observar en la Gráfica 5, el desgaste de electrodo en las primeras etapas de erosión (de 0.5 a 1) mm de profundidad, decrece ligeramente del orden de (90µm en las secciones laterales y 300µm en la sección central). Dicho desgaste negativo se intensifica para las erosiones a 2mm de profundidad, estabilizándose posteriormente al llegar a los 4 mm de profundidad de erosión.

A su vez, se observa que el mayor desgaste de electrodo se produce en la sección central (del orden de 65000µm²), pudiendo de tal manera establecer una relación con los resultados obtenidos previamente para la longitud de electrodo desgastada.

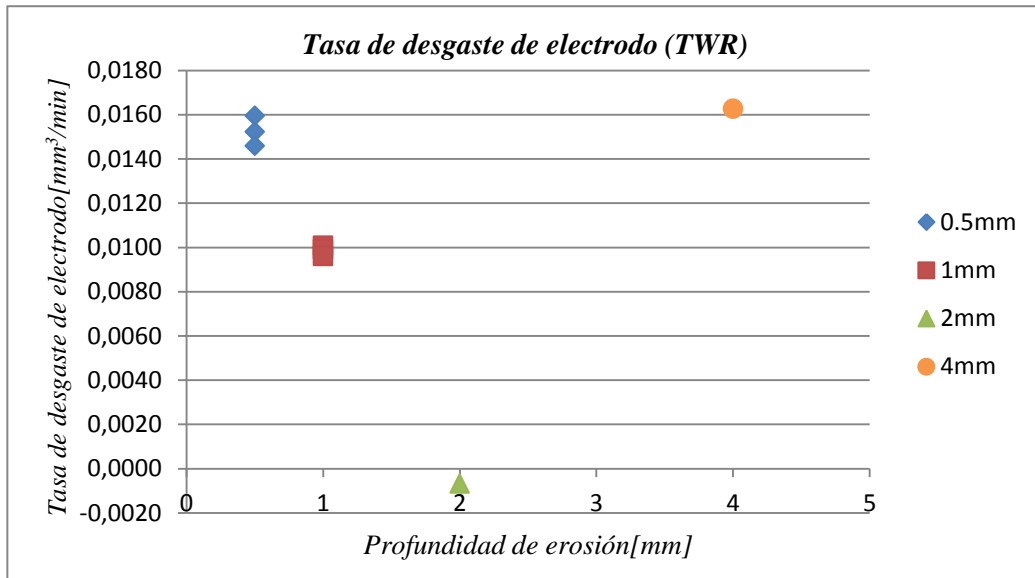
Tasas de desgaste de electrodo (TWR) y de erosión de material (MRR)

A continuación se muestran los resultados correspondientes a la tasa de desgaste de electrodo (TWR) Tabla 41 **Resultados de la tasa de desgaste de electrodo para las distintas profundidades de erosión**

y la tasa de erosión de material (MRR) Tabla 42 para las diversas profundidades de erosión. El análisis de dichos valores nos permitirá tener un mayor conocimiento del proceso de electroerosión por penetración y a su vez el comportamiento frente al desgaste de los electrodos para distintas profundidades de erosión.

Tasa de desgaste de electrodo(TWR) (mm ³ /min)							
0,5mm	0,0159	1mm	0,0101	2mm	-0,0007	4mm	0,0163
0,5mm	0,0152	1mm	0,0099				
0,5mm	0,0146	1mm	0,0096				

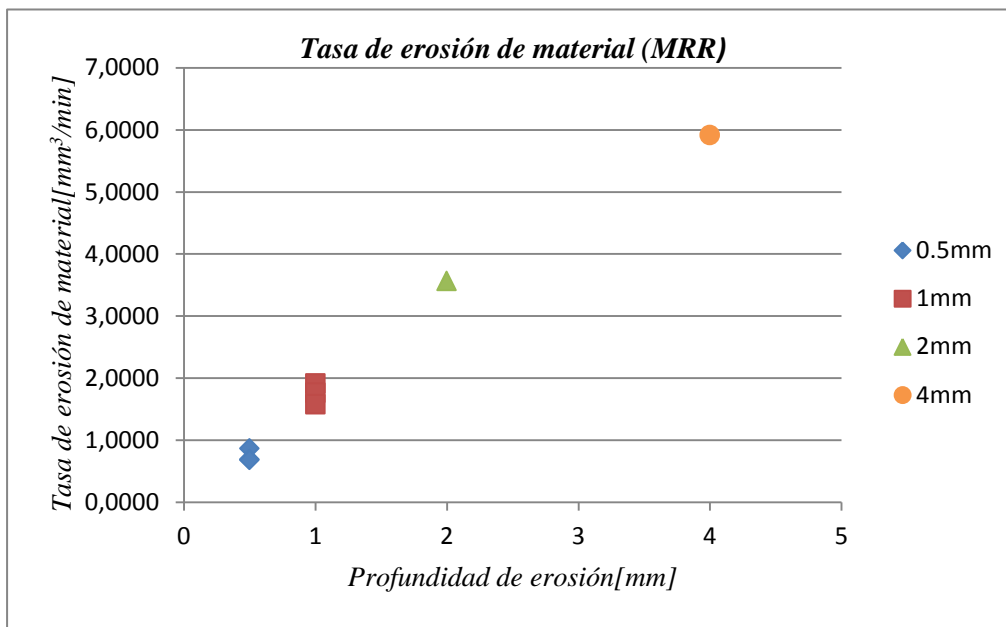
Tabla 41 Resultados de la tasa de desgaste de electrodo para las distintas profundidades de erosión



Gráfica 6 Tasa de desgaste de electrodo para distintas profundidades de erosión

Tasa de erosión de material (mm ³ /min)							
0,5mm	0,8599	1mm	1,9120	2mm	3,5625	4mm	5,9129
0,5mm	0,6851	1mm	1,7591				
0,5mm	0,6745	1mm	1,5734				

Tabla 42 Resultados de la tasa de erosión de material para distintas profundidades



Gráfica 7 Tasa de erosión de material para distintas profundidades

Tal y como se puede observar en la *Gráfica 6*, y empleando como referencia la tasa de desgaste de electrodo para las erosiones a menor profundidad (*0.5mm*) la cual es de $0.0159 \text{ mm}^3/\text{min}$, se observa una reducción significativa en la tasa de desgaste de electrodo para la profundidad de erosión de 1mm, llegando a ser la tasa de erosión de electrodo negativa para la profundidad de erosión de 2mm. Dicho fenómeno de tasa de desgaste de electrodo negativa es debido al recrecido sufrido en el electrodo tal y como se ha comentado anteriormente.

A su vez, se observa que el valor de la tasa de desgaste de electrodo para la profundidad de erosión de 4mm se estabiliza hasta llegar a un valor prácticamente igual al observado para las primeras etapas de erosión (*0.5mm de profundidad*). Por lo que se puede deducir que el desgaste en las caras planas del electrodo tiende a ser nulo, y que el desgaste se produce únicamente en la punta del electrodo.

De la misma manera, analizando los resultados representados en la *Gráfica 7*, se puede observar una evolución lineal en la tasas de erosión de material para los electrodos con forma de cuña a 60° .

Desgaste volumétrico de electrodo en función del material erosionado [TWR/MRR]*100

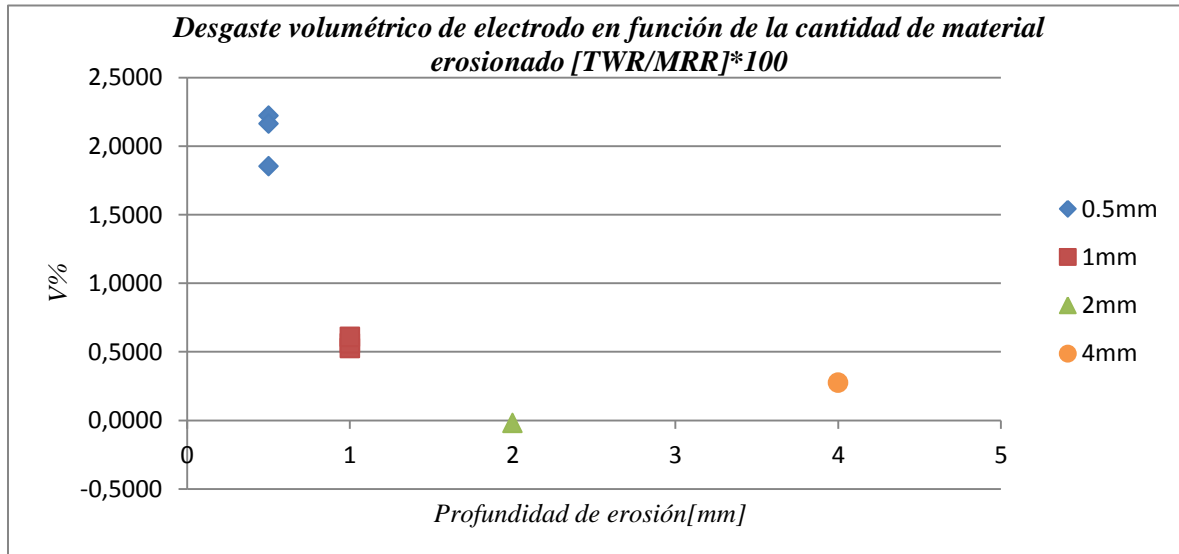
A continuación se muestran los porcentajes del desgaste volumétrico de electrodo en función de la cantidad de material erosionado *Tabla 43 Resultados del desgaste volumétrico de electrodo en función de la cantidad de material erosionado*

. Los datos en los que se basan dichos cálculos se encuentran en el apartado (*Anexo 5.2 Resultados*).

*Desgaste volumétrico de electrodo en función de la cantidad de material erosionado [TWR/MRR]*100*

Prof. eros.	[%]	Prof. eros.	[%]	Prof. eros.	[%]	Prof. eros.	[%]
0,5mm	1,8549	1mm	0,5269	2mm	-0,0189	4mm	0,2751
0,5mm	2,2235	1mm	0,5634	2mm		4mm	
0,5mm	2,1639	1mm	0,6106	2mm		4mm	

Tabla 43 Resultados del desgaste volumétrico de electrodo en función de la cantidad de material erosionado



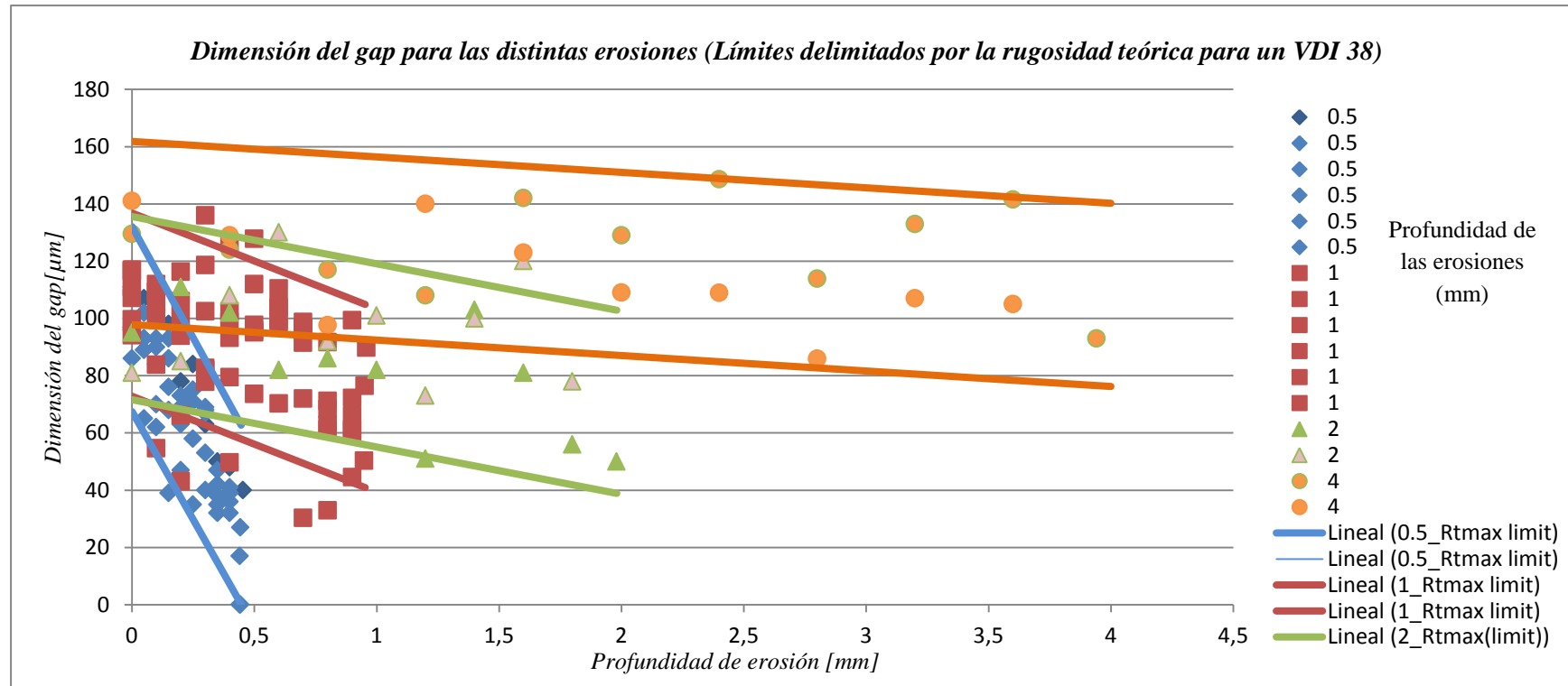
Gráfica 8 Representación de los resultados del desgaste volumétrico de electrodo en función del material erosionado

Tal y como se puede observar en la *Gráfica 8*, el desgaste volumétrico en función de la cantidad de material erosionado disminuye a medida que se aumenta la profundidad de erosión, hasta una profundidad de 2mm, donde el desgaste volumétrico adquiere un valor negativo. Dicho valor negativo del desgaste representa un recrecido del electrodo, esto es, el electrodo en vez de desgastarse ha aumentado de tamaño.

Teniendo en cuenta los resultados analizados anteriormente se puede considerar que el recrecido tiende a desaparecer al llegar a una profundidad de 4mm, pese a ello el desgaste volumétrico de electrodo en función de la profundidad de erosión a dicha profundidad es muy pequeño, lo que indica que la eficiencia en el desgaste de los electrodos tiende a aumentar a medida que se aumenta la profundidad de erosión empleando electrodos con forma de cuña a 60°.

Dimensión del gap

A continuación se muestra la representación de los resultados del gap a lo largo del perfil del electrodo para todas las profundidades de erosión ensayadas. A su vez en dicha representación se incluyen los límites teóricos del gap debidos a la rugosidad máxima teórica correspondiente a un VDI38, el cual se empleó para la realización de las erosiones. Los valores detallados del gap para cada una de las erosiones realizadas se encuentran en el apartado (*Anexo 5.2 Resultados*)



Gráfica 9 Representación de la dimensión del gap para las distintas erosiones realizadas (Límites delimitados por la rugosidad teórica para un VDI 38)

Tal y como se puede observar en la *Gráfica 9*, la dimensión del gap disminuye a medida que avanza la profundidad de erosión. Dicha tendencia a la disminución de la dimensión del gap se puede apreciar en cada una de las cuatro profundidades de erosión ensayadas.

A su vez, se puede apreciar que dicha tendencia a la disminución del gap en función de la profundidad de erosión tiende a estabilizarse a medida que la profundidad de erosión llega a los *4 mm* de profundidad.

3.7.3 RESULTADOS DE LAS EROSIONES REALIZADAS CON ELECTRODOS PARA BLISK

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos de los ensayos realizados con electrodos para Blisk. Dichos resultados se dividen en dos grandes bloques, los resultados del desgaste de electrodo y los resultados del análisis del gap.

A su vez, en cada uno de los dos grandes bloques de resultados se mostrarán distintos resultados de las erosiones, lo cuales quedan resumidos en la *Tabla 44*:

<i>Bloque de resultados</i>	<i>Resultados de:</i>	<i>Descripción</i>
<i>Desgaste de electrodo</i>	Tiempo de erosión	Resultados correspondientes al tiempo de erosión de cada uno de los ensayos realizados.
	Área desgastada por sección	Resultados correspondientes al valor del área desgastada en las distintas secciones características de electrodo para cada uno de los ensayos realizados.
	Longitud de electrodo desgastada	Resultados correspondientes a la longitud de electrodo desgastada de electrodo para cada uno de los ensayos realizados.
	Radios de esquina de electrodo	Resultados correspondientes a los valores de radios de esquina de los electrodos tras las erosiones.
<i>Análisis del gap</i>	Dimensión del gap	Se mostrarán los resultados correspondientes a la dimensión del gap para cada uno de los ensayos realizados.

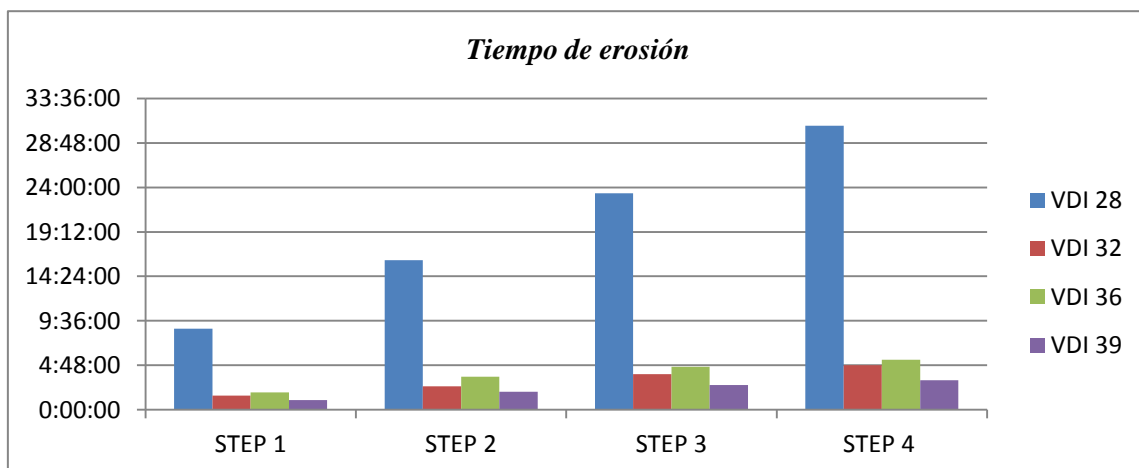
Tabla 44 Distribución de los resultados obtenidos

Desgaste de electrodoTiempo de erosión

A continuación se mostrarán los resultados del tiempo de erosión de cada uno de los ensayos realizados *Tabla 45*, así como las gráficas comparativas de dichos resultados, en función de la estrategia de erosión y de la tecnología empleada para las erosiones *Gráfica 10*.

<i>Tiempo de erosión(horas:minutos:segundos)</i>				
	STEP 1	STEP 2	STEP 3	STEP 4
VDI 28	8:45:43	16:08:27	23:21:25	30:39:27
VDI 32	1:31:28	2:32:04	3:51:02	4:47:49
VDI 36	1:53:00	3:33:29	4:37:09	5:24:04
VDI 39	1:02:40	1:56:22	2:39:04	3:10:19

Tabla 45 Tiempos de erosión de cada uno de los ensayos realizados



Gráfica 10 Representación gráfica del tiempo de erosión de cada uno de los ensayos realizados en función de las tecnologías de erosión empleadas

Tal y como se puede observar, el tiempo de erosión tiende a aumentar en función de la tecnología de erosión empleada, esto es, cuanto menor *VDI* se emplee para la erosión, mayor será el tiempo de la misma. A excepción de la transición desde un *VDI 36* a un *VDI 32*, en las que los tiempos de erosión son muy parejos, llegando a ser menores en el empleo de un *VDI 32*.

La tendencia del incremento del tiempo de erosión para menores *VDI*, esto es, para mejores acabados superficiales teóricos, alcanza un máximo para las erosiones en las que se emplea un *VDI 28* (*Tecnología para acabados superficiales con rugosidades muy bajas*). La diferencia de tiempo de erosión entre las erosiones empleando un *VDI 28* en comparación con las otras tecnologías de erosión empleadas llega a ser de más de

1 día para las erosiones de mayor profundidad y entre 5-10 veces mayor para las erosiones a menor profundidad.

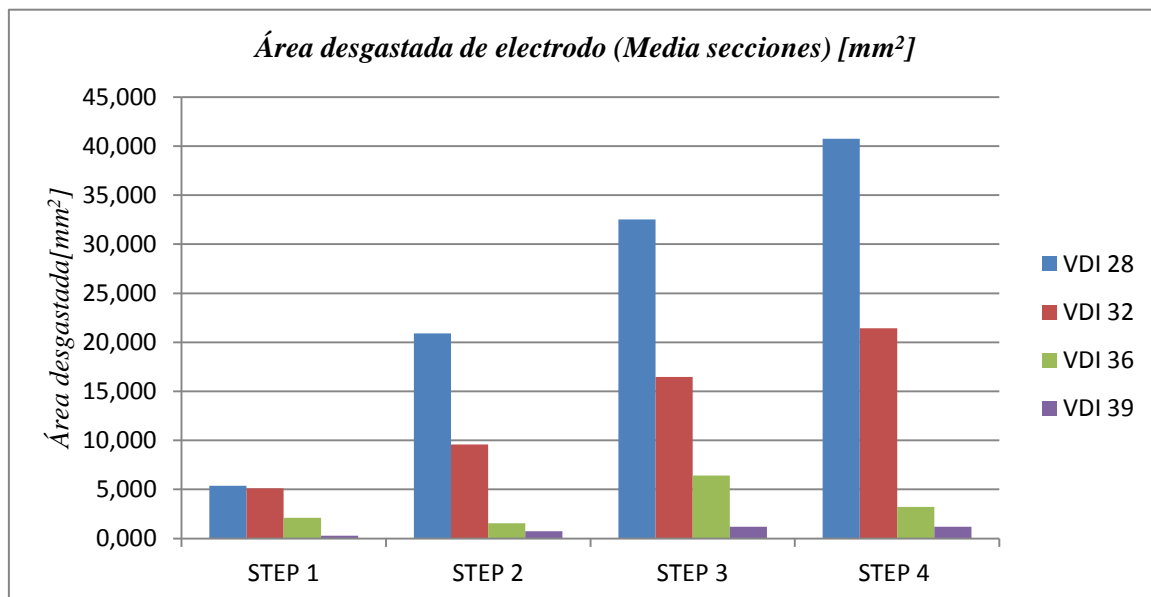
Área desgastada

A continuación se mostrarán los resultados correspondientes al área de electrodo desgastada en las tres secciones características medidas. Dichos resultados corresponderán a la media del desgaste en las tres secciones para cada ensayo *Tabla 46*.

De la misma manera, se representarán gráficamente los resultados obtenidos *Gráfica 11*, para poder comparar de manera más sencilla los mismos. Los resultados detallados en cada uno de los ensayos se encuentran en el apartado (5.2.2 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES EN ELECTRODOS PARA BLISK)

<i>Área desgastada de electrodo (Media secciones) [mm²]</i>				
	STEP 1	STEP 2	STEP 3	STEP 4
VDI 28	5,364	20,911	32,538	40,766
VDI 32	5,111	9,588	16,460	21,428
VDI 36	2,104	1,540	6,414	3,233
VDI 39	0,290	0,749	1,180	1,201

Tabla 46 Área desgastada de electrodo

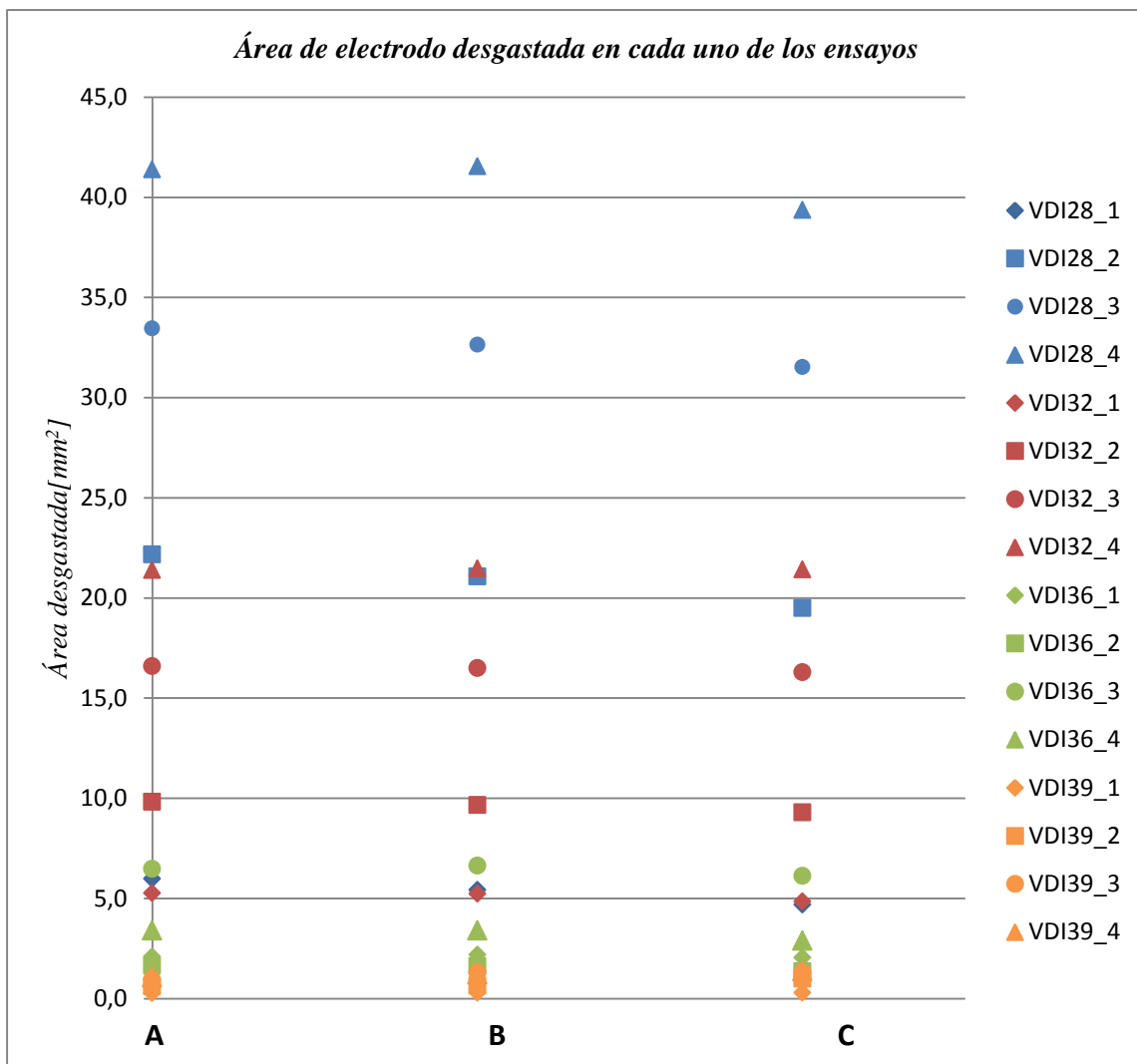


Gráfica 11 Representación gráfica del desgaste de electrodo en función de la estrategia de erosión y de la tecnología empleada

Tal y como se puede observar en la *Tabla 46* y en la *Gráfica 11* , el desgaste de electrodo tiende a aumentar en función de la tecnología de erosión empelada, esto es, a menor VDI empleado, el desgaste de electrodo aumenta.

Dicho aumento en el desgaste de los electrodos es relativamente pequeño para las transiciones entre tecnologías más erosivas (*VDI 39 Y VDI 36*). En cambio, las erosiones realizadas con tecnologías menos erosivas conllevan un incremento del desgaste de electrodo mucho mayor en comparación con las mencionadas anteriormente.

A su vez, se puede apreciar que dicho incremento del desgaste en función del *VDI* empleado se produce de manera más pronunciada a medida que las estrategias de erosión empleadas conllevan erosiones a mayores profundidades *Gráfica 12*.



Gráfica 12 Representación gráfica del área de electrodo desgastada en cada uno de los ensayos realizados

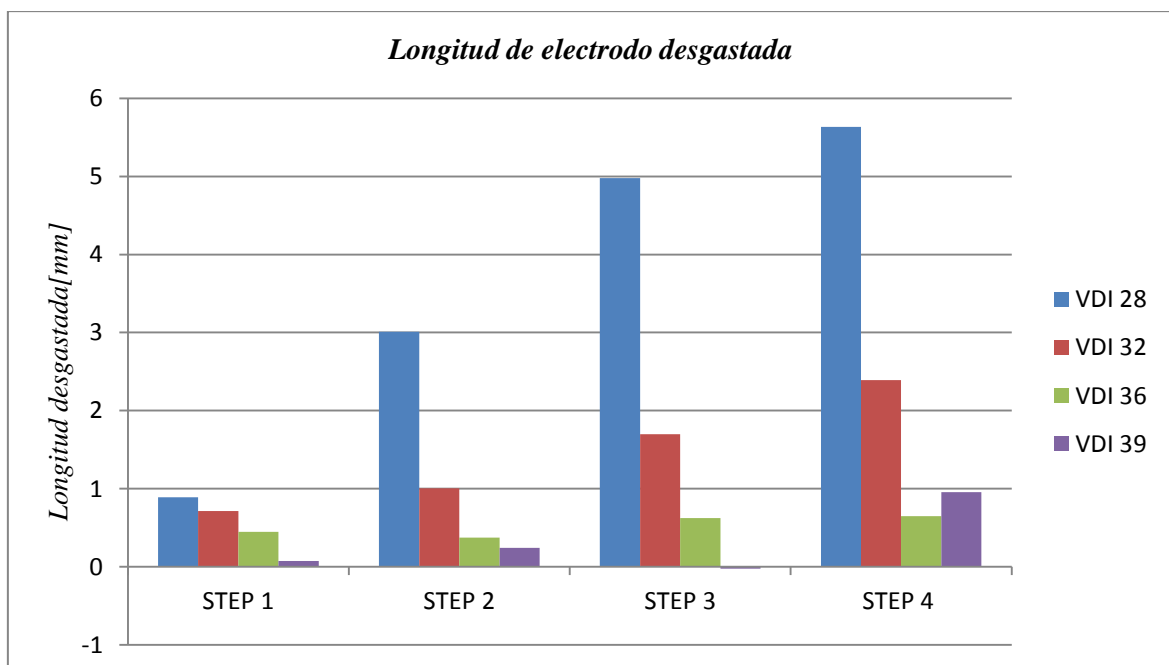
Longitud de electrodo desgastada

A continuación se muestran los resultados correspondientes a la longitud de electrodo gastada para cada uno de los ensayos. Los resultados mostrados en la *Tabla 47*, corresponde a la media de la longitud de electrodo desgastada en cada uno de los cinco puntos medidos *Fig. 127*.

De la misma manera, se representarán gráficamente los resultados tanto de los valores correspondientes a la media del desgaste en cada ensayo *Gráfica 13*, *Gráfica 14*, como los valores individuales de cada una de las secciones características para cada ensayo. Los valores detallados del desgaste en cada una de las secciones para cada ensayo se encuentran en (5.2.2 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES EN ELECTRODOS PARA BLISK).

<i>Longitud de electrodo desgastada [mm]</i>				
	STEP 1	STEP 2	STEP 3	STEP 4
VDI 28	0,888	3,0098	4,9766	5,636
VDI 32	0,7136	1,0038	1,6964	2,3882
VDI 36	0,4442	0,3736	0,6232	0,6484
VDI 39	0,073	0,2424	-0,0264	0,953

Tabla 47 Longitud de electrodo desgastada en cada uno de los ensayos



Gráfica 13 Representación gráfica de la longitud de electrodo desgastada en cada uno de los ensayos

Tanto los datos mostrados en la *Tabla 47* como su representación en la *Gráfica 12* muestran un claro incremento del desgaste de los electrodos cuanto mayor es la profundidad de erosión.

De la misma manera, los electrodos empleados con tecnologías de erosión menos erosivas (mejor acabado), pese a tener parámetros de erosión más conservadores, muestran un desgaste mucho mayor que las tecnologías de erosión más erosivas. Dicho fenómeno es debido a que el tiempo de erosión requerido para tecnologías de erosión que garanticen un menor acabado superficial (tecnologías menos erosivas) es mucho mayor que para las tecnologías de desbaste. Dicho incremento en el tiempo de erosión *Gráfica 10* implica a su vez tal y como se observa en la *Gráfica 14* una longitud de electrodo desgastada mucho mayor.

A su vez, se puede observar en ciertos casos, que empleando una misma tecnología de erosión, al aumentar la profundidad de erosión el desgaste de electrodo disminuye. Dicho fenómeno representa la aparición de recrecido en la punta del electrodo. Su influencia en el desgaste de la longitud de electrodo puede verse claramente caracterizada en el resultado correspondiente al *Step 3* en un *VDI 39*, en el que el desgaste de electrodo acaba siendo negativo, esto es, el electrodo al finalizar la erosión tiene una mayor longitud que antes de la misma.

La representación gráfica detallada de la longitud desgastada en cada una de las secciones características para cada uno de los ensayos queda representada mediante la *Gráfica 14*.

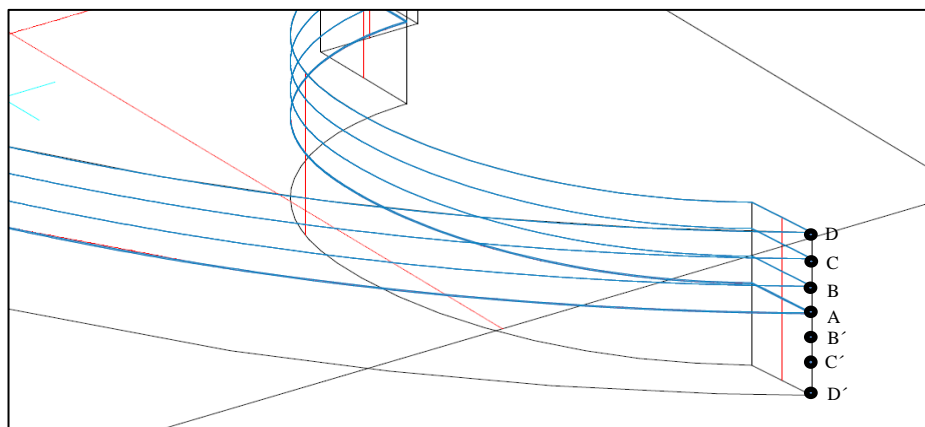
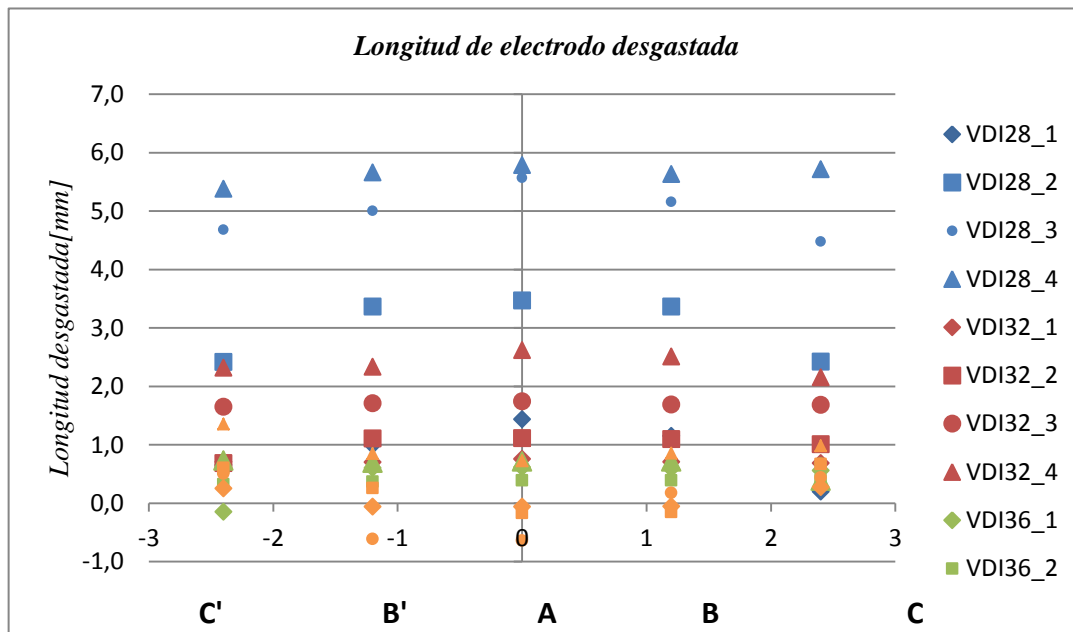


Fig. 127 Nomenclatura de las secciones



Gráfica 14 Representación gráfica de la longitud de electrodo desgastada en cada una de las secciones características para cada ensayo

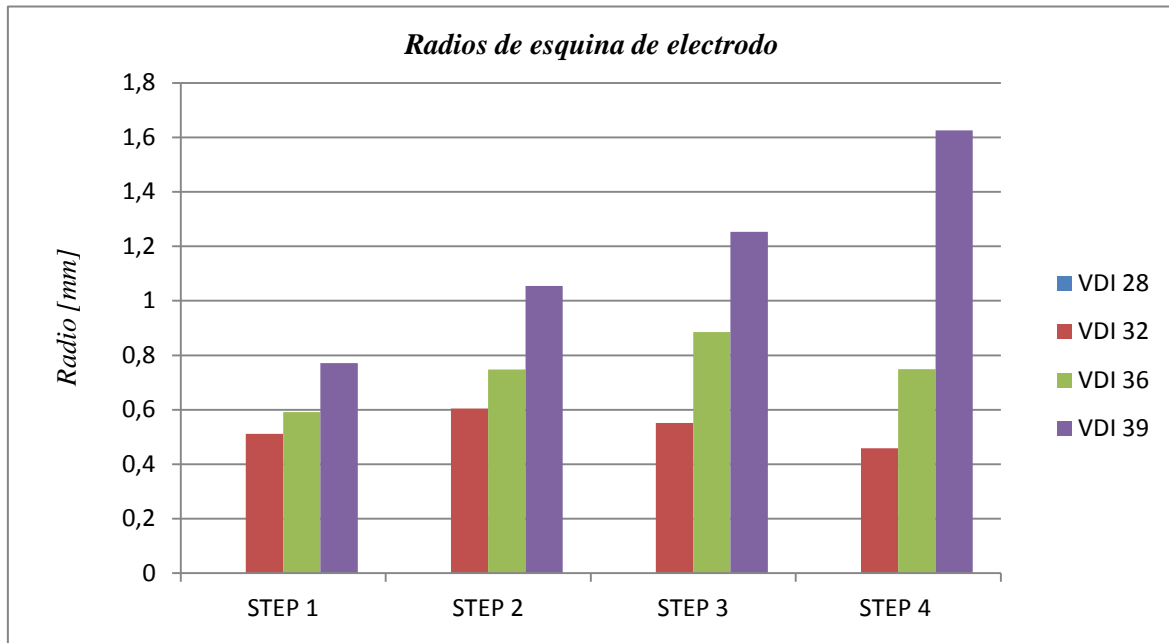
Radio de esquina de electrodo

A continuación se muestran los resultados correspondientes al radio de esquina de los electrodos tras la erosión en cada uno de los ensayos *Tabla 48*, de la misma manera dichos resultados serán representados gráficamente para su mejor interpretación *Gráfica 15*.

Los resultados correspondientes a los electrodos empleando un VDI 28 no han sido incluidos debido a la geometría de electrodo final tras la erosión.

<i>Radio de esquina de electrodo[mm]</i>				
	STEP 1	STEP 2	STEP 3	STEP 4
VDI 28	<i>(Radios no medidos debido a la geometría de electrodo tras la erosión)</i>			
VDI 32	0,512	0,604	0,552	0,458
VDI 36	0,592	0,748	0,885	0,750
VDI 39	0,771	1,055	1,254	1,626

Tabla 48 Radio de esquina de electrodos tras la erosión para cada uno de los ensayos



Gráfica 15 Representación gráfica de los resultados correspondientes al radio de esquina de electrodo tras la erosión en cada ensayo

Los radios de esquina tienden a aumentar en función de la tecnología de erosión empleada, esto es, el empleo de tecnologías de erosión muy erosivas implicarán un radio de esquina mayor que las tecnologías de erosión más conservadoras, las cuales son empleadas comúnmente para acabados superficiales con menor rugosidad.

Es por ello que el empleo de tecnologías de erosión más conservadoras nos garantizarán esquinas con radios de esquina de las cavidades más pequeños que las erosiones realizadas con tecnologías de erosión más erosivas.

Cabe destacar que los radios de esquina en las erosiones empleando un *VDI 28* no han sido medidos debido a la irregular geometría de la punta del electrodo.

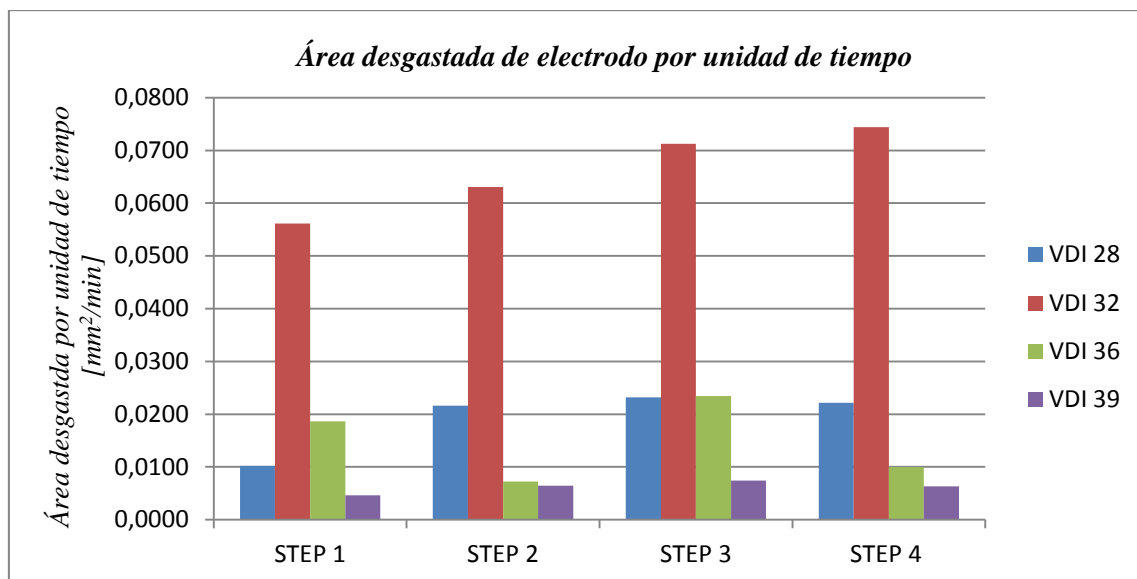
Área desgastada de electrodo por unidad de tiempo

A continuación se muestran los resultados correspondientes al desgaste de electrodo por unidad de tiempo *Tabla 49*, representado en [mm^2/min], correspondiente al desgaste medio de las secciones de cada electrodo por unidad de tiempo. De la misma manera, dichos valores quedan representados gráficamente en

Dicho parámetro nos permitirá conocer la eficiencia temporal de los electrodos frente al desgaste, siendo dicho parámetro de vital importancia para la optimización de los electrodos durante el mecanizado.

<i>Área desgastada de electrodo por unidad de tiempo [mm²/min]</i>				
	STEP 1	STEP 2	STEP 3	STEP 4
VDI 28	0,0102	0,0216	0,0232	0,0222
VDI 32	0,0562	0,0631	0,0713	0,0744
VDI 36	0,0186	0,0072	0,0234	0,0100
VDI 39	0,0046	0,0065	0,0074	0,0063

Tabla 49 Valores del desgaste medio de las secciones de cada electrodo por unidad de tiempo.



Gráfica 16 Representación gráfica del desgaste de los electrodos por unidad de tiempo

La representación gráfica de los valores del desgaste de electrodo por unidad de tiempo expuestos en la *Tabla 49*, nos muestran que el mayor desgaste de electrodo por unidad de tiempo se produce empleando un *VDI 32*, el cual garantiza un buen acabado superficial pero tal y como se puede apreciar, genera un desgaste de electrodo por unidad de tiempo muy superior a las otras tecnología de erosión empleadas.

De la misma manera, cabe destacar que el empleo de tecnologías de erosión más agresivas tales como los (*VDI 36*, *VDI 39*), pese a ser teóricamente más erosivas tanto para la pieza como para el electrodo, generan un desgaste mucho menor que la tecnología de erosión anteriormente citada (*VDI 32*).

Dimensión del gap

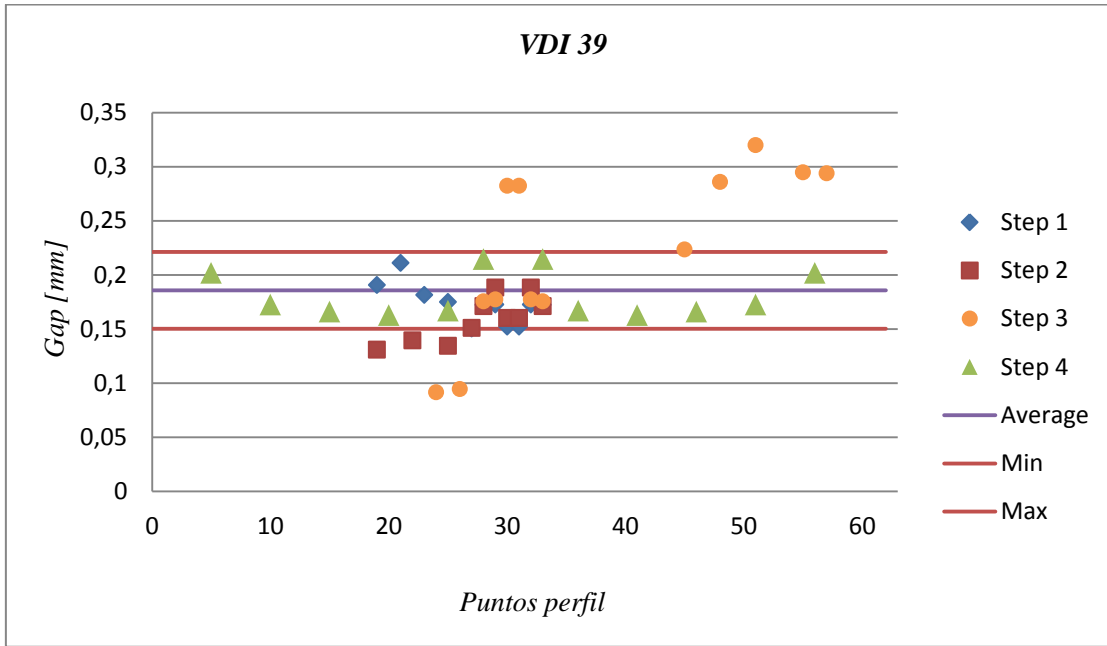
A continuación se representan los valores correspondientes al gap para las diversas erosiones realizadas. A su vez se incluirán datos como la desviación estándar de los datos, la media de la dimensión del gap, la rugosidad máxima teórica, los valores reales máximos y mínimos obtenidos, y los valores máximos y mínimos teóricos en función de la rugosidad teórica para cada tecnología de erosión empleada *Tabla 50*.

Los datos detallados de cada uno de los ensayos realizados y las distintas dimensiones del gap en todos los puntos medidos se encuentran en el apartado ((5.2.2 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES EN ELECTRODOS PARA BLISK).

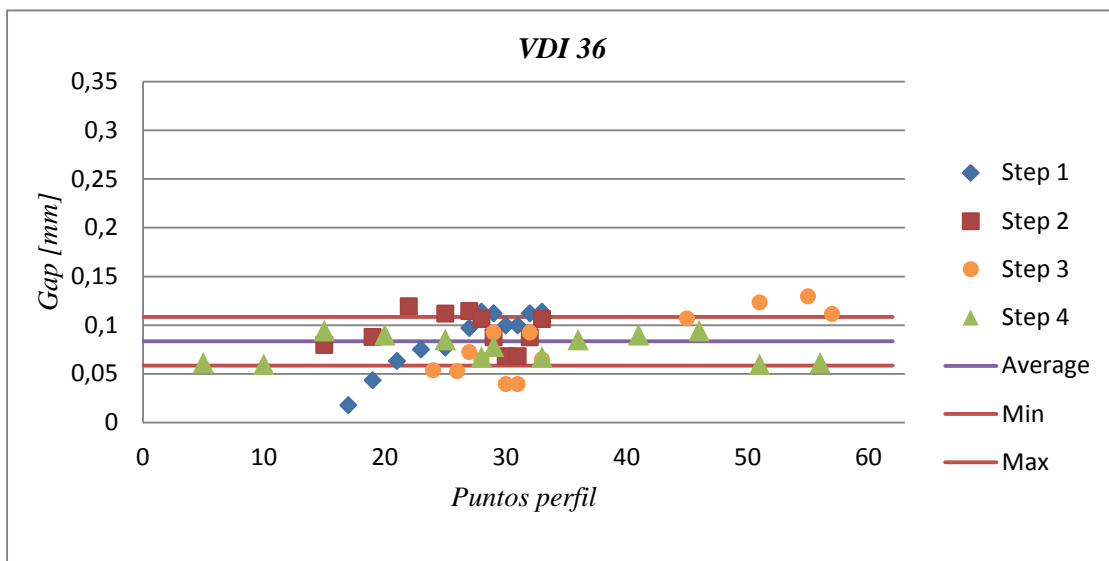
Dimensión del gap obtenida y límites teóricos en función de la rugosidad

	VDI39	VDI36	VDI32	VDI28
Gap a [μm]	0,27	0,19	0,115	0,062
Gap mín. [μm]	0,091	0,017	0,008	0,004
Gap máx. [μm]	0,320	0,129	0,146	0,041
Gap Interval. [μm]	0,229	0,112	0,138	0,037
Media [μm]	0,186	0,083	0,070	0,020
Desviación est. [μm]	0,049	0,025	0,029	0,010
Rt máx. [μm]	0,071	0,050	0,032	0,020
Mín. [μm]	0,150	0,058	0,054	0,010
Máx. [μm]	0,221	0,108	0,086	0,030

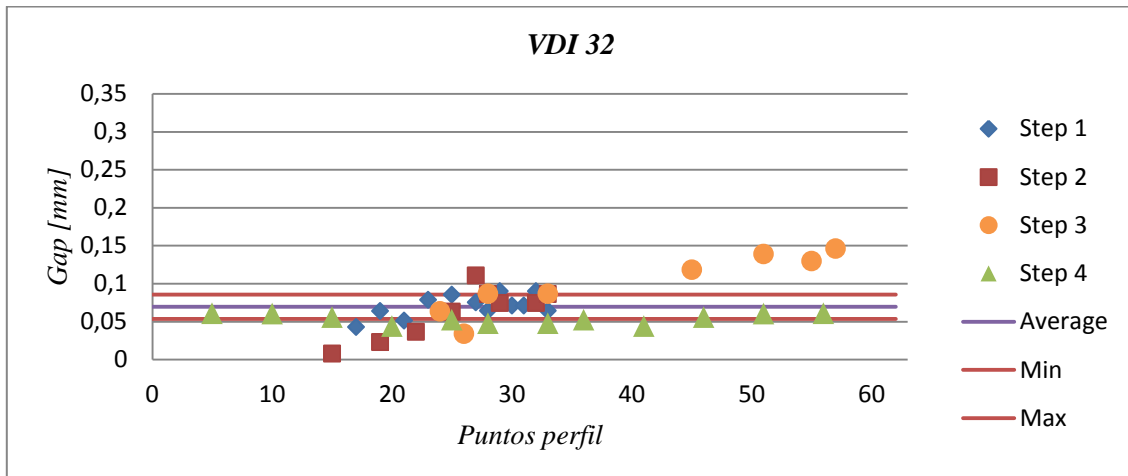
Tabla 50 Dimensión del gap para cada uno de los ensayos e interpretación de los datos en función de la rugosidad teórica



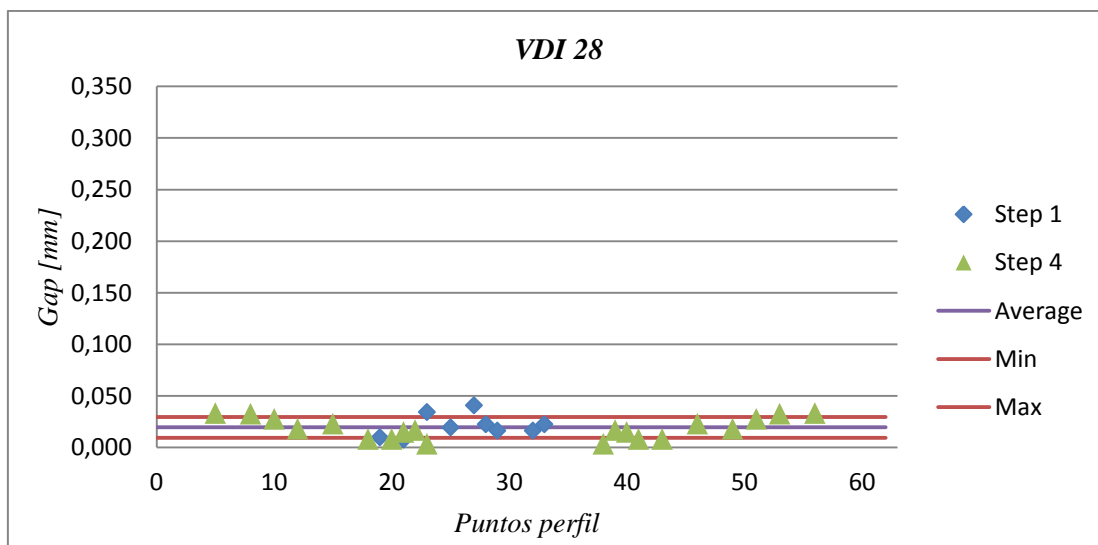
Gráfica 17 Representación gráfica del gap para los ensayos realizados con un VDI 39, incluyendo los límites teóricos en función de la rugosidad



Gráfica 18 Representación gráfica del gap para los ensayos realizados con un VDI 36, incluyendo los límites teóricos en función de la rugosidad



Gráfica 19 Representación gráfica del gap para los ensayos realizados con un VDI 32, incluyendo los límites teóricos en función de la rugosidad



Gráfica 20 Representación gráfica del gap para los ensayos realizados con un VDI 28, incluyendo los límites teóricos en función de la rugosidad

Los resultados representados gráficamente en Gráfica 17, Gráfica 18, Gráfica 19, Gráfica 20 nos muestran una tendencia al incremento de la dimensión del gap a medida que se emplean tecnologías de erosión más erosivas, dicho fenómeno es lógico teniendo en cuenta que la energía aplicada en cada descarga es mayor.

De la misma manera, se puede observar que para un VDI 28, los valores reales del gap se ciñen de manera muy exacta a los valores teóricos de la dimensión del gap los cuales son calculados en función de la rugosidad máxima teórica, fenómeno que a medida que se va aumentando el VDI comienza a dispersarse, llegando al VDI 39 en el cual gran parte de los valores del gap no quedan entre los valores teóricos calculados.

Dicho fenómeno puede verse respaldado por el valor de la desviación estándar calculado, dicho valor nos muestra la medida de la dispersión de los valores respecto a la media (valor promedio). Dicho valor queda definido en la *Tabla 50* para cada uno de los ensayos, y tal y como se puede observar el valor de la desviación aumenta a medida que se emplean tecnologías de erosión más erosivas, llegando a haber una desviación 5 veces mayor para un *VDI 39* en comparación con un *VDI 28*. Dicho valor nos otorga un conocimiento sobre la homogeneidad de las descargas a lo largo del perfil del electrodo.

3.7.4 CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los resultados mostrados anteriormente y los resultados detallados de cada uno de los ensayos los cuales se encuentran en el apartado (*5.2 Resultados*) de los ANEXOS, a continuación se mostrarán las conclusiones del estudio divididas en dos bloques, conclusiones para los ensayos con electrodos con forma de cuña a 60° y conclusiones para los ensayos con electrodos para blisk.

3.7.4.1 CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS CON ELECTRODOS CON FORMA DE CUÑA A 60°

- En lo que respecta al desgaste de los electrodos, se puede concluir que en las primeras etapas de la erosión, el desgaste sufrido por el electrodo se centra casi exclusivamente en la punta. A su vez se observa una clara tendencia a la estabilización de dicho desgaste de punta a medida que la erosión avanza en profundidad, hasta el punto que finalmente el desgaste de la punta del electrodo se puede equiparar al sufrido en las caras que forman la geometría del mismo.
- En relación con el desgaste del electrodo comentado en el punto anterior, se puede concluir que el radio de punta de electrodo el cual está directamente relacionado con el desgaste de la punta del mismo, tiende a aumentar a medida que se avanza en la profundidad de erosión, llegando a alcanzar su máximo valor para una profundidad de 2mm.

De la misma manera, se observa que tras superar dicha profundidad de erosión, el radio de punta del electrodo tiende a estabilizarse hasta llegar a tener un valor similar al de las erosiones a profundidades de (1 mm-2mm).

- En lo que respecta al fenómeno del recrecido en los electrodos, observando los resultados correspondientes al radio de punta de los electrodos y a la longitud de electrodo desgastada en los cuales se puede apreciar las etapas de la erosión en las que aparece el fenómeno del recrecido, se puede concluir que existe una relación entre el radio de punta del electrodo y la adhesión de las partículas que conforman el recrecido. Es por ello que se puede concluir que a partir de una cierta dimensión del radio de punta, el recrecido no se adhiere a la punta del electrodo.
- En lo que respecta a la dimensión del gap a lo del perfil del electrodo, se puede concluir que el gap no es constante a lo largo del perfil. Observando la Gráfica 9, se puede afirmar que la dimensión del gap disminuye a medida que aumenta la profundidad de la erosión. De la misma manera, se puede concluir que dicha tendencia a la disminución del gap a medida que aumenta la profundidad de erosión tiende a estabilizarse a medida que se alcanza la profundidad de erosión de 4mm.

3.7.4.2 CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS CON ELECTRODOS PARA BLISK

- En cuanto al tiempo de erosión en para las distintas tecnologías de erosión empleadas, se puede concluir que el empleo de tecnologías poco erosivas y que garanticen una rugosidad superficial menor quedan descartadas por la larga duración por unidad de erosión que implican. De la misma manera, el empleo de tecnologías de erosión más erosivas (VDI 39 , VDI 36) nos garantizarán erosiones con tiempos de mecanizado mucho menores, pudiendo reducir de esta manera el costo temporal y por lo tanto una reducción del coste del mecanizado.
- En relación con el punto anterior, y pese a que el empleo de tecnologías de erosión menos erosivas implica teóricamente un desgaste de electrodo por unidad de tiempo menor, observando la Gráfica 16, podemos concluir que el desgaste de electrodo por unidad de tiempo se ve optimizado en gran medida mediante el empleo de tecnologías de erosión muy erosivas tales como (VDI 39 , VDI 36) lo que a su vez implicaría directamente el empleo de un menor número de electrodos para realizar una erosión con unas dimensiones requeridas, pudiendo abaratar los altos costos de fabricación de electrodos.
- En lo que respecta los radios de esquina de electrodo, se puede concluir que existe una tendencia al aumento de dichos radios de esquina en función del VDI empleado, esto es, a mayor VDI empleado, mayor radio de esquina de

electrodo obtendremos al finalizar la erosión, y por lo consiguiente las esquinas de las cavidades generadas tenderán a ser más circulares.

- La aleatoriedad del recrecido en la punta del electrodo incide directamente en las cavidades finales obtenidas e impide una modelización y conocimiento exacto de la evolución del mismo en función de la profundidad de erosión.
- En lo que respecta a la dimensión del gap, se puede concluir que una existe una tendencia al incremento de la dimensión del gap a medida que se emplean tecnologías de erosión más erosivas. A su vez los valores reales del gap se ciñen de manera muy exacta a los valores delimitados por la rugosidad teórica para tecnologías de erosión menos erosivas.
- En lo que respecta a la desviación de las dimensiones del gap tomando como límite la rugosidad teórica, se puede observar que dichas desviaciones se dan principalmente en aquellos programas de erosión en los que en última instancia la superficie de electrodo en la cual se produce la descarga es menor. A su vez y tomando como ejemplo los programas de erosión Step 4 en los que en última instancia la superficie de electrodo en la cual se produce la descarga es mayor, se puede observar que los valores del gap no se desvían de los valores teóricos en función de la rugosidad teórica. Es por ello que se puede concluir que a dimensión del gap además de depender de la tecnología de erosión empleada, a su vez se ha de tener en cuenta la superficie de electrodo en la cual en última instancia se produce la descarga.

3.8 VALORACIONES GENERALES Y LÍNEAS FUTURAS

A continuación se realizará una valoración personal del enfoque utilizado en el estudio y se emitirá la opinión personal del contenido y forma de trabajo a lo largo del mismo.

El presente estudio, se ha tratado de un proyecto de investigación en colaboración con el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao y el departamento de I+D de la empresa ONA ELECTROEROSIÓN, el cual se ha desarrollado aproximadamente desde Noviembre de 2014 hasta Mayo de 2015, en el Taller Mecánico de la misma escuela, dentro del grupo de Fabricación de Alto Rendimiento.

Durante el desarrollo del presente proyecto el autor ha adquirido diferentes competencias relativas al desarrollo de actividades de I+D+i. Se han trabajado aspectos como la definición de baterías de ensayos, la selección de las herramientas más adecuadas para la realización de las medidas o el tratamiento de datos. Por otra parte, el

autor ha aprendido a llevar a cabo un trabajo experimental de forma sistemática y a extraer conclusiones a partir del análisis de resultados experimentales.

Además de lo mencionado anteriormente, el autor ha ido aprendiendo como utilizar diversas máquinas tales como la máquina de corte por hilo (WEDM) *ONA AX3*, mediante la cual se cortaron los electrodos con forma de cuña a 60°, la máquina de electroerosión por penetración *ONA CS300*. De la misma manera, el autor ha ido aprendiendo a utilizar máquinas de metrología de alta precisión tales como el perfilómetro confocal *LEICA DCM 3D* (y su software específico) y el medidor por coordenadas *ZEISS MC 850* (y su software específico). También ha adquirido competencias en el manejo de programas CAD/CAM como el *SIEMENS UNIGRAPHX 9.0* y a su vez mejorando habilidades en torno a programas de elaboración de hojas de cálculo (Microsoft Excel).

El autor considera que todo ello puede contribuir de manera muy positiva en el desarrollo de futuras competencias y habilidades de cara a desarrollar una profesión en el ámbito de la ingeniería mecánica.

Asimismo, se considera que el estudio realizado tiene un componente innovador dado que se ha demostrado que el gap a lo largo del perfil del electrodo no es constante en todas las erosiones, sino que para geometrías de electrodo con forma de cuña las cuales son ampliamente empleadas en el ámbito industrial, se ha demostrado que en erosiones menores de 4mm dicho gap no es constante y que va disminuyendo en función de la profundidad erosionada. Añadido esto cabe destacar otro componente innovador en el proyecto, el hecho de haber diseñado una metodología de medición fiable tanto del desgaste de los electrodos como del gap, puesto que hasta la fecha se carecía de una metodología fiable de medición del desgaste de electrodos y del gap, prueba de ello es el desconocimiento de la no constancia del gap para erosiones menores de 4mm. Las innovaciones mencionadas ayudarán a tener un mayor conocimiento científico del proceso de mecanizado de materiales mediante electroerosión por penetración pudiendo optimizar dicho procedimiento mediante el empleo de éstos nuevos conocimientos.

3.8.2 LÍNEAS FUTURAS Y PROPUESTA TÉCNICA

A la vista de los resultados y conclusiones presentados en apartado “3.7 *Resultados y conclusiones*” en los que se ha demostrado la no constancia del gap para todas las erosiones. Así como la tendencia a la desaparición del recrecido a partir de un cierto valor del radio de punta de los electrodos. Así como el comportamiento de los electrodos frente al desgaste en función de distintas tecnologías de erosión, se puede profundizar el trabajo de la siguiente forma:

Teniendo en cuenta que se ha diseñado una metodología de medición fiable tanto del desgaste de electrodos como del gap a lo largo del perfil de los mismos.

Puesto que se ha demostrado que el valor del gap a lo largo del perfil del electrodo para erosiones con electrodos con forma de cuña a 60° no es constante en erosiones menores de 4mm, deberán realizarse ensayos con electrodos de diversas geometrías para verificar que lo demostrado para los electrodos con forma de cuña se cumple para otras geometrías de electrodos distintas. A su vez, se deberá comprobar el valor límite del radio de punta de los electrodos para el cual el recocado desaparece completamente.

En definitiva, la principal línea futura a desarrollar consistirá en maximizar el conocimiento tanto del desgaste de los electrodos como de las geometrías mediante las cuales se garantice la desaparición del recocado en la punta de los electrodos, así como el conocimiento del valor real del gap en todo el perfil de los electrodos. Dicho conocimiento permitirá en un futuro modelizar el desgaste de electrodos, permitiendo de tal manera diseñar electrodos con una geometría tal que se garantice una cavidad final de las dimensiones requeridas empleando un único electrodo.

Todo el trabajo que se recoge en este estudio junto con la ejecución de las líneas futuras aquí expuestas, puede dar lugar a una propuesta técnica mediante la cual se podrá en un futuro modelizar el desgaste de electrodos, permitiendo de tal manera diseñar electrodos con una geometría tal que se garantice una cavidad final de las dimensiones requeridas empleando un único electrodo. El modelizado del desgaste de electrodos supondrá una gran optimización del proceso de electroerosión por penetración, incidiendo directamente en un gran ahorro económico en aquellas industrias en las que la electroerosión por penetración es empleada y pudiendo ampliar el uso de dicho proceso de mecanizado a nuevas industrias y aplicaciones.

