

*ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LAS
PROPIEDADES DIMENSIONALES DE LA PIEZA
FINAL Y VIDA DE LA HERRAMIENTA EN
PROCESOS DE MECANIZADO POR
ELECTROEROSIÓN. ANÁLISIS DE SU
APLICACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN NAVAL*

Doctorado en Tecnologías Industriales

Autor: Carlos A. Mascaraque Ramírez

Director: Dr. Patricio Franco Chumillas

Cartagena 2018



Escuela
Internacional
de Doctorado

DOCTORADO EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

**“ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LAS
PROPIEDADES DIMENSIONALES DE LA PIEZA FINAL Y
VIDA DE LA HERRAMIENTA EN PROCESOS DE
MECANIZADO POR ELECTROEROSIÓN. ANÁLISIS DE SU
APLICACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN NAVAL”**

Tesis presentada por:

Carlos Arsenio Mascaraque Ramírez

Director:

Dr. Patricio Franco Chumillas

Cartagena, Febrero de 2018

**CONFORMIDAD DE SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN DE DEPÓSITO DE
TESIS DOCTORAL POR EL/LA DIRECTOR/A DE LA TESIS**

D. PATRICIO FRANCO CHUMILLAS Director de la Tesis doctoral ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DIMENSIONALES DE LA PIEZA FINAL Y VIDA DE LA HERRAMIENTA EN PROCESOS DE MECANIZADO POR ELECTROEROSIÓN. ANÁLISIS DE SU APLICACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN NAVAL.

INFORMA:

Que la referida Tesis Doctoral, ha sido realizada por D. CARLOS ARSENIO MASCARAQUE RAMÍREZ, dentro del Programa de Doctorado en TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES, dando mi conformidad para que sea presentada ante el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado para ser autorizado su depósito.

La rama de conocimiento en la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- Ciencias
- Ciencias Sociales y Jurídicas
- Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 15 de ENERO de 2018

EL DIRECTOR DE LA TESIS



Fdo.: Patricio Franco Chumillas

COMITÉ DE DIRECCIÓN ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO



CONFORMIDAD DE DEPÓSITO DE TESIS DOCTORAL
POR LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA

D. JUAN SUARDÍAZ MURO, Presidente de la Comisión Académica del Programa TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES.

INFORMA:

Que la Tesis Doctoral titulada, “ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DIMENSIONALES DE LA PIEZA FINAL Y VIDA DE LA HERRAMIENTA EN PROCESOS DE MECANIZADO POR ELECTROEROSIÓN. ANÁLISIS DE SU APLICACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN NAVAL”, ha sido realizada, dentro del mencionado Programa de Doctorado, por D. CARLOS ARSENIO MASCARAQUE RAMÍREZ, bajo la dirección y supervisión del Dr. PATRICIO FRANCO CHUMILLAS.

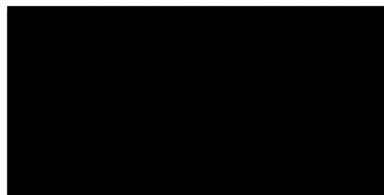
En reunión de la Comisión Académica, visto que en la misma se acreditan los indicios de calidad correspondientes y la autorización del Director de la misma, se acordó dar la conformidad, con la finalidad de que sea autorizado su depósito por el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado.

La Rama de conocimiento por la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- Ciencias
- Ciencias Sociales y Jurídicas
- Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 15 de ENERO de 2018

EL PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA



Fdo: Juan Suardíaz Muro

COMITÉ DE DIRECCIÓN ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

Agradecimientos

Quisiera agradecer de manera muy especial al director de esta Tesis Doctoral, Dr. Patricio Franco Chumillas, su apoyo y motivación a lo largo de todo el período formativo de doctorado y durante el desarrollo de esta Tesis. Me siento afortunado por haber contado con sus sugerencias y consejos, y por haber tenido la oportunidad de trabajar con una gran persona y un excelente investigador. Sin su inestimable colaboración no hubiera sido posible realizar este trabajo.

Mi agradecimiento también a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceánica, al Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación, y al Departamento de Tecnología Naval, haber confiado en mis capacidades y haberme otorgado la oportunidad de dedicarme profesionalmente a la docencia y la investigación. Especialmente a los compañeros Dr. Jerónimo Esteve Pérez, Dr. José Enrique Gutiérrez Romero, Dr. Juan José Hernández Ortega y Dr. Gregorio Munuera Saura.

Y en general al profesorado y al personal de administración y servicios de la Universidad Politécnica de Cartagena, por la ayuda que he recibido de muchos de ellos durante el desarrollo de esta tesis.

También a los profesores Dr. Juan Francisco Muñoz Rosas y Dra. Encarnación Álvarez Verdejo, de la Universidad de Granada, por su continuado apoyo, buenos consejos y amistad a lo largo de todo este tiempo.

Mi agradecimiento, además, al Dr. Juan Eugenio Para Conesa, por haber suscitado en mí el interés y la pasión por un interesante ámbito como es la Ingeniería de Fabricación y por la actividad docente de carácter universitario.

Agradezco a D. Gonzalo Alcalde Vicente las largas horas de trabajo acerca de la modelización de los procesos de electroerosión, y ante todo por la amistad surgida durante este tiempo.

Quisiera agradecer de manera muy especial a mis padres, José y Ana, a mi hermano, José Manuel, y a mis abuelos, Manuel, Pepita, Arsenio e Isabel, su continuada ayuda y comprensión, y haber sido el pilar más importante que he tenido a lo largo de mi vida.

Finalmente, mi especial agradecimiento también a mi esposa, Lorena, quien me animó desde el principio a realizar los estudios de Doctorado, y en todo momento me ha proporcionado su confianza, comprensión, apoyo y amor. Todo esto no habría sido posible sin su ayuda.

Resumen

El mecanizado por electroerosión (EDM) es una de las tecnologías de mecanizado no convencional más extendidas gracias a su capacidad para fabricar piezas de alta complejidad geométrica y constituidas por materiales de alta dureza. Su aplicabilidad está en continuo crecimiento en diversos sectores tales como la industria aeroespacial, automotriz, fabricación de maquinaria, etc. No obstante, aún está empezando a introducirse en otros sectores donde la utilización de tecnologías productivas más innovadoras suele resultar más lenta, como es el caso de la industria naval, tanto en el campo de nuevas construcciones como en la reparación de buques y componentes de embarcaciones.

Los procesos de mecanizado por electroerosión comenzaron a utilizarse en la década de 1940 con las primeras investigaciones científicas sobre estas tecnologías, y desde entonces la comunidad científica ha llevado a cabo numerosos estudios para tratar de determinar los fenómenos que se producen en estos procesos y los parámetros que permiten la optimización de estos procesos de mecanizado para diferentes geometrías, materiales de partida y campos de aplicación. Los trabajos más recientes se han centrado en el análisis de nuevas configuraciones para estos procesos, el efecto de los parámetros del proceso y material de partida, y la modelización teórica del proceso.

La presente tesis doctoral tiene el objetivo de conocer en mayor detalle la influencia de algunos de los principales parámetros del proceso sobre el acabado superficial alcanzable en las piezas mecanizadas y el desgaste que se origina en la herramienta durante el proceso de corte, y asimismo tratar de identificar la aplicabilidad de estas tecnologías en el sector naval, para lo cual se ha efectuado el estudio teórico y experimental de estos procesos considerando diferentes condiciones de corte.

Dentro del primer capítulo de la presente tesis doctoral, se llevará a cabo un análisis sobre la aplicabilidad del mecanizado por electroerosión en la industria naval. Se comprueba que estas tecnologías tienen interés para los campos de nuevas construcciones y reparaciones navales, y pueden servir para mejorar la competitividad de los astilleros en el mercado actual altamente globalizado y con una enorme competencia a nivel mundial.

El estudio experimental incluirá el análisis de las imperfecciones que se originan en la superficie de la pieza, considerando distintos indicadores para la identificación del acabado superficial de la pieza mecanizada. Se evaluará el efecto de distintos parámetros del proceso tales como la intensidad de corriente y la profundidad de penetración, y se deducirá las ecuaciones que permitan seleccionar los valores adecuados para los parámetros de corte de acuerdo con la calidad superficial que se debe respetar.

También se recurrirá al análisis experimental para estudiar la pérdida de material que tiene lugar en la superficie del electrodo y caracterizar la forma desgastada de la superficie de la herramienta. Se evaluará las condiciones de corte que permiten optimizar la vida de la herramienta, y se obtendrá las ecuaciones que relacionan las irregularidades de la superficie del electrodo con el valor de los parámetros del proceso que han sido considerados.

Por otra parte, se procederá al estudio teórico del proceso de electroerosión, utilizando para ello un modelo numérico simplificado que permita centrarse en los parámetros a estudiar en esta tesis doctoral. El modelo teórico servirá para determinar la eliminación de material que se produce durante el proceso y la textura que presenta la superficie de la pieza mecanizada, y los resultados teóricos obtenidos se compararán con las observaciones experimentales.

Finalmente, entre las conclusiones más importantes de esta tesis doctoral se puede destacar la posibilidad de definir un indicador adecuado para describir la calidad superficial de las piezas obtenidas mediante electroerosión por penetración, y la identificación de las diferentes regiones que caracterizan la forma desgastada de la herramienta, así como las ecuaciones que permiten estimar la influencia de los parámetros del proceso sobre el acabado superficial de la pieza final y desgaste que tiene lugar en la superficie del electrodo.

Abstract

Electro Discharge Machining (EDM) is one of the most widespread unconventional machining technologies thanks to its ability to manufacture parts of high geometric complexity and made of high hardness materials. Its applicability is continuously growing in various industrial sectors such as aerospace, automotive, machinery manufacturing, etc. However, it is still beginning to be introduced in other sectors where the use of more innovative production technologies is often slower, such as the shipbuilding industry, both in the field of new construction and in ship and boat component repair.

The EDM processes began to be used in the 1940s with the first scientific research on these technologies, and since then the scientific community has carried out numerous studies for trying to determine the phenomena that occur in these processes and the parameters that allow the optimization of these machining processes for different geometries, raw materials and application fields. The most recent works were focused on the analysis of new configurations for these processes, the effect of process parameters and raw material, and the theoretical modeling of the process.

The objective of this doctoral thesis is knowing in greater detail the influence of some of the main process parameters on the surface finish of machined parts and the tool wear originated during the cutting process, and also trying to identify the applicability of these technologies in the naval sector, for which the theoretical and experimental study of these processes has been carried out considering different cutting conditions.

Within the first chapter of this doctoral thesis, an analysis on the applicability of EDM in the naval industry will be carried out. It is proven that these technologies are of interest for the fields of new construction and ship repair, and can serve to improve the competitiveness of shipyards in the current highly globalized market with enormous competition worldwide.

The experimental study will include the analysis of imperfections originated on the part surface, considering different indicators for identifying the surface finish of machined part. The effect of different process parameters such as current intensity and penetration depth will be evaluated, and the equations that serve to select the appropriate values of cutting parameters according to the desired surface quality will be deduced.

Experimental analysis will also be used to study the loss of material on the electrode surface and to characterize the worn shape of the tool surface. The cutting conditions that allow optimizing the tool life will be evaluated, and the equations that describe the relationship among the irregularities of electrode surface and the process parameters that have been considered will be obtained.

On the other hand, the theoretical study of the EDM process will be carried out, using a simplified numerical model that allows focusing on the parameters to be studied in this doctoral thesis. The theoretical model will serve to determine the material removal produced during the process and the texture showed by the surface of the machined part, and the theoretical results obtained will be compared with the experimental observations.

Finally, among the most important conclusions of this doctoral thesis, it is possible to highlight the possibility of defining an appropriate indicator to describe the surface quality of the parts obtained by die sinking EDM, and the identification of the different regions that characterize the worn shape of the tool, as well as the equations that allow estimating the influence of the process parameters on the surface finish of final part and wear that takes place on the electrode surface.

Índice general

Agradecimientos.....	I
Resumen.....	III
Abstract	V
Índice general	VII
Índice de figuras.....	XI
Índice de tablas.....	XIX
Nomenclatura.....	XXI
Capítulo 1. Introducción a los procesos de electroerosión y su aplicación al sector naval	1
1.1. Introducción a los procesos de electroerosión.	2
1.1.1. <i>Definición de mecanizado por electroerosión.....</i>	3
1.1.2. <i>Introducción histórica a la electroerosión.</i>	3
1.1.3. <i>Fundamentos básicos de los procesos de electroerosión.</i>	4
1.1.4. <i>Producción de las descargas eléctricas.</i>	5
1.1.5. <i>La máquina de electroerosión.</i>	6
1.1.6. <i>El fluido dieléctrico.....</i>	7
1.1.7. <i>Principales características del proceso.....</i>	9
1.1.8. <i>Tipos de mecanizados por electroerosión.</i>	9
1.2. Estado del arte.	10
1.2.1. <i>Distribución de energía térmica en la zona de corte.....</i>	12
1.2.2. <i>Influencia del fluido dieléctrico.....</i>	13
1.2.3. <i>Estudio del acabado superficial y productividad del proceso.....</i>	13

1.2.4.	<i>Estudio del desgaste del electrodo.....</i>	15
1.2.5.	<i>Modelización teórica del proceso.</i>	16
1.2.6.	<i>Otras técnicas de electroerosión.....</i>	17
1.3.	Objetivos y estructura de la tesis doctoral.	19
1.4.	Aplicaciones más relevantes del mecanizado por electroerosión en la industria naval. ...	21
Capítulo 2.	Análisis experimental del acabado superficial de la pieza mecanizada	27
2.1.	Metodología experimental.	27
2.1.1.	<i>Material de trabajo.....</i>	27
2.1.2.	<i>Máquina de electroerosión.....</i>	30
2.1.3.	<i>Parámetros del proceso.....</i>	32
2.1.4.	<i>Geometría de las piezas.</i>	34
2.1.5.	<i>Etapas de los ensayos.....</i>	36
2.1.6.	<i>Evaluación de la superficie de la pieza.....</i>	42
2.2.	Acabado superficial en la cara frontal de la pieza mecanizada.....	47
2.2.1.	<i>Rugosidad superficial.</i>	48
2.2.2.	<i>Tasa de material portante.....</i>	57
2.2.3.	<i>Tamaño de los cráteres.</i>	61
2.3.	Acabado superficial en la cara lateral de la pieza mecanizada.	65
2.3.1.	<i>Rugosidad superficial.</i>	66
2.3.2.	<i>Tasa de material portante.....</i>	72
2.3.3.	<i>Tamaño de los cráteres.</i>	74
2.4.	Productividad del proceso de electroerosión.	77
Capítulo 3.	Análisis experimental del desgaste del electrodo	81
3.1.	Metodología experimental.	81
3.1.1.	<i>Geometría de los electrodos.</i>	82
3.1.2.	<i>Preparación de los electrodos.....</i>	85
3.1.3.	<i>Definición de las zonas a estudiar en la superficie del electrodo.....</i>	87
3.1.4.	<i>Evaluación de la superficie del electrodo.</i>	88
3.2.	Degradación de la superficie del electrodo.	92
3.2.1.	<i>Rugosidad superficial.</i>	92
3.2.2.	<i>Tasa de material portante.....</i>	95
3.2.3.	<i>Geometría de la superficie desgastada.....</i>	100

3.3.	Contaminación de la superficie del electrodo.....	114
3.3.1.	<i>Contaminación en la superficie completa.</i>	115
3.3.2.	<i>Contaminación en las protuberancias y depresiones.</i>	123
Capítulo 4.	Análisis numérico del arranque de material en la superficie mecanizada.....	131
4.1.	Fundamentos del modelo teórico para procesos de electroerosión.	131
4.2.	Ecuaciones básicas para la modelización del proceso de electroerosión.....	132
4.2.1.	<i>Energía aportada por las descargas eléctricas.</i>	135
4.2.2.	<i>Transmisión de calor en la pieza.</i>	137
4.3.	Mallado del proceso.	140
4.4.	Cálculo de temperaturas.....	142
4.5.	Condiciones de contorno.	147
4.5.1.	<i>Nodos extremos del mallado.</i>	147
4.5.2.	<i>Número de descargas eléctricas simultáneas.</i>	148
4.5.3.	<i>Ciclos de descarga y de enfriamiento.</i>	149
4.5.4.	<i>Gap máximo de descarga.</i>	151
4.6.	Parámetros del proceso.....	151
4.6.1.	<i>Parámetros constantes.</i>	152
4.6.2.	<i>Parámetros aleatorios.</i>	153
4.6.3.	<i>Parámetros de salida.</i>	153
4.7.	Limitaciones de la modelización del proceso de electroerosión.....	154
4.7.1.	<i>Modelización 2D y 3D.</i>	154
4.7.2.	<i>Modelización de grandes piezas (mallado progresivo).</i>	156
4.7.3.	<i>Límites en la precisión del mallado.</i>	157
4.7.4.	<i>Modelización del electrodo.</i>	158
4.8.	Simulación numérica del proceso de electroerosión.	159
4.8.1.	<i>Distribución de temperaturas en la superficie mecanizada.</i>	159
4.8.2.	<i>Perfil de la superficie en la pieza final.</i>	161
4.8.3.	<i>Diámetro del cráter en la pieza final.</i>	163
Capítulo 5.	Conclusiones finales y desarrollos futuros.....	167
5.1.	Conclusiones finales.	168
5.1.1.	<i>Conclusiones sobre el acabado superficial de la pieza mecanizada.</i>	168
5.1.2.	<i>Conclusiones sobre el desgaste de la herramienta de corte.</i>	169
5.1.3.	<i>Conclusiones sobre la modelización teórica del proceso de electroerosión.</i>	170

5.1.4. Conclusiones sobre las aplicaciones del mecanizado por electroerosión en el sector naval.....	171
5.2. Desarrollos futuros.....	171
Anexo I: Descripción de la aplicación informática desarrollada para la simulación del proceso.....	173
Bibliografía	181
Biografía del autor	187

Índice de figuras

Figura 1.1 Esquema del proceso de producción de las descargas eléctricas.	5
Figura 1.2 Representación esquemática de una máquina de EDM por penetración.	6
Figura 1.3 Clasificación de los campos de investigación sobre procesos EDM. Fuente: [3]	11
Figura 1.4 Timón y cojinetes de apoyo. Fuente: D.J. Eyres y G.J. Bruce [61]	22
Figura 1.5 Tapa de escotilla para bodega de carga. Fuente: D.J. Eyres y G.J. Bruce [61]	23
Figura 1.6 Hélice de paso controlable. Fuente: MAN [62]	24
Figura 2.1 Máquina de electroerosión ONA DATIC D2030.....	30
Figura 2.2 Parámetros predefinidos para VDI = 30 con electrodo de cobre y pieza de acero [63]. ...	34
Figura 2.3 Esquema con la geometría de las piezas de trabajo.....	35
Figura 2.4 Etapas del proceso de electroerosión de cada ensayo definido.	36
Figura 2.5 Sierra de cinta para la preparación de las piezas de partida.....	37
Figura 2.6 Tanque de la máquina de electroerosión ONA DATIC D 2030.	38
Figura 2.7 Utillaje para la fijación de las piezas.	38
Figura 2.8 Menú de edición de los parámetros del programa para la máquina.	40
Figura 2.9 Indicación de correcto funcionamiento de la máquina de EDM.....	40
Figura 2.10 Ejemplo de etiquetado de piezas de trabajo.....	41
Figura 2.11 Ejemplo de etiquetado de electrodos.....	41
Figura 2.12 Rugosímetro modelo HOMMELWERKE T1000.	43
Figura 2.13 Software para datos de rugosidad superficial Turbo Datawin NT 1.48.	43
Figura 2.14 Selección de recorrido del palpador en las piezas mecanizadas.....	44
Figura 2.15 Microscopio electrónico de barrido (SEM) de la UPCT.....	44

Figura 2.16 Selección de puntos para toma de imágenes SEM en las piezas mecanizadas.....	46
Figura 2.17 Imagen monitorizada de la muestra dentro del microscopio electrónico de barrido.....	47
Figura 2.18 Identificación de la cara frontal y caras laterales de las piezas.....	48
Figura 2.19 Ejemplo de perfil primario en la superficie de la pieza.....	49
Figura 2.20 Ejemplo de perfil primario, perfil de rugosidad y perfil de ondulación en la superficie de la pieza.....	49
Figura 2.21 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara frontal para una profundidad de penetración de 3 mm.	51
Figura 2.22 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara frontal para una profundidad de penetración de 5 mm.	52
Figura 2.23 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara frontal para una profundidad de penetración de 7 mm.	52
Figura 2.24 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara frontal para una intensidad de corriente de 6 A.....	54
Figura 2.25 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara frontal para una intensidad de corriente de 8 A.....	54
Figura 2.26 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara frontal para una intensidad de corriente de 12 A.....	55
Figura 2.27 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara frontal para una intensidad de corriente de 14 A.....	56
Figura 2.28 Curva de tasa de material portante en la cara frontal de la pieza para una profundidad de penetración de 5 mm: a) intensidad de corriente de 6 A, b) 8 A, c) 12 A y d) 14 A..	58
Figura 2.29 Pendiente en el tramo central de la curva de tasa de material portante en función de la intensidad de corriente en la cara frontal de la pieza.	59
Figura 2.30 Pendiente en el tramo central de la curva de tasa de material portante en función de la profundidad de penetración en la cara frontal de la pieza.	60
Figura 2.31 Imágenes SEM de la cara frontal de la pieza para profundidad de penetración de 5 mm: a) intensidad de corriente de 6 A, b) 8 A, c) 12 A y d) A.	62
Figura 2.32 Diámetro del cráter en función de la intensidad de corriente en la cara frontal de la pieza.....	63
Figura 2.33 Diámetro del cráter en función de la profundidad de penetración en la cara frontal de la pieza.....	64
Figura 2.34 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara lateral para una profundidad de penetración de 3 mm.	67

Figura 2.35 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara lateral para una profundidad de penetración de 5 mm.	67
Figura 2.36 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara lateral para una profundidad de penetración de 7 mm.	68
Figura 2.37 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara lateral para una intensidad de corriente de 6 A.	69
Figura 2.38 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara lateral para una intensidad de corriente de 8 A.	70
Figura 2.39 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara lateral para una intensidad de corriente de 12 A.	70
Figura 2.40 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara lateral para una intensidad de corriente de 14 A.	71
Figura 2.41 Curva de tasa de material portante en la cara lateral de la pieza para una profundidad de penetración de 5 mm: a) intensidad de corriente de 6 A, b) 8 A, c) 12 A y d) 14 A..	72
Figura 2.42 Pendiente en el tramo central de la curva de tasa de material portante en función de la intensidad de corriente en la cara lateral de la pieza.	73
Figura 2.43 Pendiente en el tramo central de la curva de tasa de material portante en función de la profundidad de penetración en la cara lateral de la pieza.	74
Figura 2.44 Imágenes SEM de la cara lateral de la pieza para profundidad de penetración de 5 mm: a) intensidad de corriente de 6 A, b) 8 A, c) 12 A y d) A.	75
Figura 2.45 Diámetro del cráter en función de la intensidad de corriente en la cara lateral de la pieza.	76
Figura 2.46 Diámetro del cráter en función de la profundidad de penetración en la cara lateral de la pieza.	77
Figura 2.47 Tiempo de mecanizado en función de la intensidad de corriente.	78
Figura 2.48 Tasa de eliminación de material en función de la intensidad de corriente.	79
Figura 3.1 Esquema con la geometría de las herramientas de corte.	83
Figura 3.2 Representación gráfica del rebaje para la sujeción del electrodo.	84
Figura 3.3 Cabezal porta-herramientas de la máquina ONA DATIC D2030.	84
Figura 3.4 Micro-cortadora metalográfica para la preparación de los electrodos.	85
Figura 3.5 Pulidora metalográfica para la preparación de los electrodos.	86
Figura 3.6 Ejemplo de electrodos empleados en el proceso de EDM.	86
Figura 3.7 Esquema de las diferentes zonas del electrodo en procesos de EDM.	87

Figura 3.8 Selección del recorrido del palpador en los electrodos.....	89
Figura 3.9 Selección del punto de toma de imágenes SEM en los electrodos.	90
Figura 3.10 Ejemplo de selección de áreas para el microanálisis del material en la superficie afectada del electrodo: a) cara frontal y b) cara lateral.....	91
Figura 3.11 Ejemplo de selección de áreas para el microanálisis de protuberancias y depresiones en la superficie del electrodo.	91
Figura 3.12 Ejemplo de perfil primario, perfil de rugosidad y perfil de ondulación en la superficie de la herramienta de corte.....	92
Figura 3.13 Rugosidad superficial en la cara frontal de los electrodos en función de la intensidad de corriente.	93
Figura 3.14 Rugosidad superficial en la cara frontal de los electrodos en función de la profundidad de penetración.	94
Figura 3.15 Profundidad en el tramo inicial de la curva de tasa de material portante en la superficie del electrodo para una profundidad de penetración de 7mm: a) intensidades de corriente de 6 A, b) 8 A, c) 12 A y d) 14 A.....	96
Figura 3.16 Imagen SEM de la zona central del electrodo para una profundidad de penetración de 7 mm e intensidad de corriente de 6 A.	97
Figura 3.17 Imagen SEM de la zona central del electrodo para una profundidad de penetración de 7 mm e intensidad de corriente de 14 A.	97
Figura 3.18 Profundidad en el tramo inicial de la curva de tasa de material portante en función de la intensidad de corriente.....	98
Figura 3.19 Profundidad en el tramo inicial de la curva de tasa de material portante en función de la profundidad de penetración.	99
Figura 3.20 Perfil de la superficie en la zona límite del electrodo para una intensidad de corriente de 12 A y profundidad de penetración de 5 mm.....	100
Figura 3.21 Geometría de la zona límite del electrodo para una profundidad de penetración de 3 mm.	102
Figura 3.22 Imágenes SEM en la zona límite del electrodo para profundidad de penetración de 3 mm.	103
Figura 3.23 Geometría de la zona límite del electrodo para una profundidad de penetración de 5 mm.	104
Figura 3.24 Imágenes SEM en la zona límite del electrodo para profundidad de penetración de 5 mm.	104
Figura 3.25 Geometría de la zona límite del electrodo para una profundidad de penetración de 7 mm.	105

Figura 3.26 Imágenes SEM en la zona límite del electrodo para profundidad de penetración de 7 mm.	105
Figura 3.27 Geometría de la zona límite del electrodo para una intensidad de corriente de 6 A. ..	107
Figura 3.28 Imágenes SEM en la zona límite del electrodo para una intensidad de corriente de 6 A.	107
Figura 3.29 Geometría de la zona límite del electrodo para una intensidad de corriente de 8 A. ..	108
Figura 3.30 Imágenes SEM en la zona límite del electrodo para una intensidad de corriente de 8 A.	108
Figura 3.31 Geometría de la zona límite del electrodo para una intensidad de corriente de 12 A. .	109
Figura 3.32 Imágenes SEM en la zona límite del electrodo para una intensidad de corriente de 12 A.	109
Figura 3.33 Geometría de la zona límite del electrodo para una intensidad de corriente de 14 A. .	110
Figura 3.34 Imágenes SEM en la zona límite del electrodo para una intensidad de corriente de 14 A.	110
Figura 3.35 Profundidad máxima en el surco del electrodo en función de la profundidad de penetración.	112
Figura 3.36 Ejemplo de microanálisis en superficie completa del electrodo para 8 A de intensidad de corriente y 3 mm de profundidad de penetración.	115
Figura 3.37 Ejemplo de composición química mediante EDS en superficie completa del electrodo para una intensidad de corriente de 8 A y 3 mm de profundidad de penetración.	116
Figura 3.38 Composición química en la superficie activa del electrodo en función de la intensidad de corriente.	117
Figura 3.39 Composición química en la superficie activa del electrodo en función de la profundidad de penetración.	118
Figura 3.40 Composición química superficial de carbono en función la intensidad de corriente.	119
Figura 3.41 Composición química superficial de oxígeno en función la intensidad de corriente	119
Figura 3.42 Composición química superficial de hierro en función la intensidad de corriente.	119
Figura 3.43 Composición química superficial de cobre en función la intensidad de corriente.	120
Figura 3.44 Composición química superficial de carbono en función la profundidad de penetración.	121
Figura 3.45 Composición química superficial de oxígeno en función la profundidad de penetración.	121
Figura 3.46 Composición química superficial de hierro en función la profundidad de penetración.	121

Figura 3.47 Composición química superficial de cobre en función la profundidad de penetración.	122
Figura 3.48 Ejemplo de selección de protuberancia y depresión en la superficie del electrodo para una intensidad de corriente de 8 A y profundidad de penetración de 7 mm.	124
Figura 3.49 Ejemplo de microanálisis en protuberancia del electrodo para una intensidad de corriente de 8 A y profundidad de penetración de 7 mm.....	124
Figura 3.50 Ejemplo de microanálisis en depresión del electrodo para una intensidad de corriente de 8 A y profundidad de penetración de 7 mm.....	125
Figura 3.51 Ejemplo de composición química mediante EDS en protuberancia del electrodo para una intensidad de corriente de 8 A y profundidad de penetración de 7 mm.	125
Figura 3.52 Ejemplo de composición química mediante EDS en depresión del electrodo para una intensidad de corriente de 8 A y profundidad de penetración de 7 mm.....	126
Figura 3.53 Composición química en diferentes regiones del electrodo para profundidad de penetración de 3 mm e intensidad de corriente de 8 A.	127
Figura 3.54 Composición química en diferentes regiones del electrodo para profundidad de penetración de 7 mm e intensidad de corriente de 8 A.	128
Figura 3.55 Composición química en diferentes regiones del electrodo para profundidad de penetración de 7 mm e intensidad de corriente de 14 A.	128
Figura 4.1 Fases del proceso de electroerosión: a) tensión; b) intensidad de corriente.	133
Figura 4.2 Distribución de calor en la superficie de la pieza derivada del canal de plasma.	136
Figura 4.3 Esquema de aporte de calor por el canal de plasma y transferencia de calor por conducción en EDM.	138
Figura 4.4 Esquema de transmisión de calor por convección y conducción en EDM.	139
Figura 4.5 Ejemplo de mallado en pieza mecanizada.	141
Figura 4.6 Representación esquemática de la temperatura equivalente.....	143
Figura 4.7 Esquema de la variación de temperaturas entre nodos del mallado en modelo 2D.	144
Figura 4.8 Esquema de la variación de temperaturas entre nodos del mallado en modelo 3D.	144
Figura 4.9 Ejemplos de transferencia de calor en distintos nodos.	146
Figura 4.10 Ejemplo de nodos extremos del mallado de una pieza.	148
Figura 4.11 Diagrama de ciclos de impulso y ciclos de pausa en relación a la duración del ciclo de cálculo.....	150
Figura 4.12 Planos definidos en una simulación 2D y 3D.....	156
Figura 4.13 Ejemplo de mallado progresivo de la pieza durante el proceso de mecanizado.	157

Figura 4.14 Ejemplo de diagrama de temperaturas detallado mediante simulación numérica.	160
Figura 4.15 Ejemplo de diagrama de temperaturas resultante mediante simulación numérica.	161
Figura 4.16 Perfil de la superficie de la pieza mediante simulación numérica: a) intensidad de corriente de 6 A, b) 8 A, c) 12 A y d) 14 A.....	162
Figura 4.17 Mapa tridimensional de la superficie de la pieza mediante simulación numérica: a) intensidad de corriente de 6 A, b) 8 A, c) 12 A y d) 14 A.....	163
Figura 4.18 Comparativa resultados experimentales y numéricos del diámetro de los cráteres. ...	164
Figura I.1 Ventana de inicio del programa “EDM Simulator”	173
Figura I.2 Ventana del menú “Datos del Proceso”	175
Figura I.3 Ventana del menú “Propiedades del Material”	176
Figura I.4 Ventana del menú “Parámetros del Mallado”	177
Figura I.5 Ventana del menú “Análisis de rugosidad”	178
Figura I.6 Ventana del menú “Ayuda”	179

Índice de tablas

Tabla 2.1 Propiedades del acero inoxidable AISI 316 (material de las piezas).....	29
Tabla 2.2 Características principales de la máquina de electroerosión ONA DATIC D2030.....	30
Tabla 2.3 Rango de valores de los valores del proceso.....	33
Tabla 2.4 Rugosidad superficial en la cara frontal de la pieza.....	50
Tabla 2.5 Pendiente de la curva de tasa de material portante en la cara frontal de la pieza	59
Tabla 2.6 Diámetro de los cráteres en la cara frontal de las piezas	63
Tabla 2.7 Rugosidad superficial en la cara lateral de las piezas.	66
Tabla 2.8 Pendiente de la curva de tasa de material portante en la cara lateral de la pieza	73
Tabla 2.9 Diámetro de los cráteres en la cara frontal de las piezas	75
Tabla 2.10 Tasa de eliminación de material.	78
Tabla 3.1 Propiedades del cobre electrolítico (material de los electrodos).....	82
Tabla 3.2 Rugosidad superficial en la cara frontal de los electrodos.....	93
Tabla 3.3 Profundidad para el 10% de tasa de material portante (δ).....	96
Tabla 3.4 Profundidad máxima en el surco del electrodo en función de la profundidad de penetración e intensidad de corriente.....	111
Tabla 3.5 Constante y exponente para la profundidad máxima del surco en función de la intensidad de corriente.....	113
Tabla 3.6 Coeficientes para la profundidad máxima en el surco del electrodo.	114
Tabla 3.7 Composición superficial de los electrodos.	117
Tabla 3.8 Composición superficial en superficie completa, protuberancias y depresiones de los electrodos.....	126
Tabla 4.1 Parámetros relativos a las propiedades del material.	152

Tabla 4.2 Parámetros relativos al proceso de EDM.	152
Tabla 4.3 Parámetros relativos al modelo numérico.	153
Tabla 4.4 Diámetro medio de cráter mediante estudio experimental y simulación numérica en función de la intensidad de corriente	163

Nomenclatura

Notación griega:

γ	Pendiente en el tramo central de la curva de tasa de material portante (entre el 10 y 80% de tasa de material portante)
δ	Profundidad en el tramo inicial de la curva de tasa de material portante (para el 10% de tasa de material portante)
ΔA	Área de transferencia entre dos puntos de la malla
Δm	Masa efectiva en el nodo de estudio
Δs	Distancia entre dos puntos de la malla
Δt	Paso de tiempo para la simulación del proceso
ΔT_A	Variación de la temperatura por intercambio de calor con el nodo de la zona posterior
ΔT_B	Variación de la temperatura por intercambio de calor con el nodo de la zona inferior
ΔT_{cond}	Variación de la temperatura por intercambio de calor por conducción con el nodo adyacente
ΔT_{conv}	Variación de la temperatura por intercambio de calor por convección con el fluido dieléctrico
ΔT_F	Variación de la temperatura por intercambio de calor con el nodo de la zona frontal
ΔT_L	Variación de la temperatura por intercambio de calor con el nodo de la zona izquierda
ΔT_R	Variación de la temperatura por intercambio de calor con el nodo de la zona derecha
ΔT_T	Variación de la temperatura por intercambio de calor con el nodo de la zona superior

Notación latina:

AJM	Mecanizado por chorro abrasivo (Abrasive Jet Machining)
CCEDM	Mecanizado por electroerosión convencional refrigerado criogénicamente (Criogenic Conventional Electro Discharge Machining)
CEDM	Mecanizado por electroerosión convencional (Conventional Electro Discharge Machining)
CF	Cara frontal (utilizado como subíndice)
CL	Cara lateral (utilizado como subíndice)
Cp	Calor específico del material.
d ₀	Distancia a la posición central del surco del electrodo
d _c	Distancia a la zona central del electrodo
D _c	Diámetro del cráter (μm)
DEDM	Mecanizado por electroerosión en seco (Dry Electro Discharge Machining)
EDM	Mecanizado por electroerosión (Electro Discharge Machining)
EL	Electrodo (utilizado como subíndice)
F _w	Proporción de aporte de calor transmitido al material de la pieza de trabajo
h	Coefficiente de convección
h ₀	Profundidad máxima en el surco del electrodo
h _c	Profundidad media en la zona central del electrodo
I	Intensidad de corriente (A)
I _f	Intensidad de descarga (A)
k	Conductividad térmica del material W/(m K)
MRR	Tasa de eliminación de material (Material Removal Rate)
q ₀	Energía calorífica total producida por la descarga eléctrica (kJ)
q(r,d)	Energía calorífica transmitida por el canal de plasma al nodo de coordenadas (r,d)
R ²	Coefficiente de regresión
Ra	Desviación media aritmética (μm)
R _p	Radio del canal de plasma (μm)
Rq	Desviación media cuadrática (μm)
Rt	Altura máxima del perfil (μm)
SEM	Microscopía electrónica de barrido (Scanning Electron Microscopy)
t _d	Tiempo de ionización (μs)
T _d	Temperatura en el fluido dieléctrico durante el proceso de electroerosión
t _{EDM}	Tiempo total del proceso de mecanizado por electroerosión (min)
t _f	Tiempo de descarga (μs)

t_i	Tiempo de impulso (μs)
$T_{i,j,k,s}$	Temperatura en el nodo de coordenadas (i,j,k) para el instante s
$T_{i,j,k,s-1}$	Temperatura en el nodo de coordenadas (i,j,k) para el instante s-1
$T_{i',j',k',s-1}$	Temperatura en el nodo de coordenadas (i',j',k') para el instante s-1 (nodo adyacente al nodo de cálculo)
t_n	Duración del ciclo de cálculo de la simulación numérica (μs)
t_o	Tiempo de pausa (μs)
T_o	Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)
t_p	Período (μs)
TWR	Tasa de desgaste de la herramienta (Tool Wear Rate)
UEDM	Mecanizado por electroerosión con ultrasonidos (Ultrasonic Electro Discharge Machining)
U_f	Tensión de descarga (V)
U_o	Tensión de vacío (V)
USV	Vibración ultrasónica (UltraSonic Vibration)
V_w	Tasa de eliminación de material (mm^3/min)
W/O	Agua en emulsión de aceite (Water-in-Oil Emulsions)
WEDM	Mecanizado por electroerosión por hilo (Wired Electro Discharge Machining)
z	Profundidad de penetración (mm)

Capítulo 1. Introducción a los procesos de electroerosión y su aplicación al sector naval

Los procesos de electroerosión están comprendidos dentro de las tecnologías utilizadas para la fabricación de componentes mecánicos mediante el arranque de material. Estos procesos permiten la eliminación del material sin contacto directo entre la herramienta y la superficie a mecanizar, y se emplean para la fabricación de componentes para diversos sectores de la industria tales como los sectores de fabricación de maquinaria, automotriz, naval y aeroespacial.

En la actualidad se requiere dedicar mayores esfuerzos para el análisis de estos procesos de fabricación, con la finalidad de conseguir comprender mejor la relación existente entre los parámetros del proceso y la calidad superficial de las piezas mecanizadas, y hacer la selección de las condiciones de corte que permiten minimizar las imperfecciones originadas en la superficie de la pieza.

Por ese motivo, en la presente tesis doctoral se procede al estudio de la influencia de algunos de los principales parámetros que intervienen en estos procesos y la identificación de la tipología de los defectos que se observan en la superficie mecanizada, y a partir de ello se determina el rango de estos parámetros que hacen posible la optimización de la calidad superficial de las piezas fabricadas.

Esta tesis doctoral se centra en el análisis de los procesos de electroerosión por penetración, y en concreto se dedica al estudio del acabado superficial alcanzable en la superficie mecanizada

y la degradación que se produce en la superficie del electrodo, para lo cual se distingue entre la pérdida de material que tiene lugar en la zona frontal y en la zona lateral del electrodo.

En este primer capítulo se definen los objetivos perseguidos en esta tesis doctoral, mientras que en los capítulos siguientes se procede a la discusión de los resultados obtenidos durante el estudio de estos procesos de mecanizado y la presentación de las conclusiones extraídas a partir de este trabajo.

En la primera parte de este capítulo se lleva a cabo una introducción a los procesos de mecanizado por electroerosión (también conocidos por las siglas EDM que corresponden a su denominación en inglés como procesos de “Electro Discharge Machining”), la cual comprende una breve descripción de los fundamentos del mecanizado por electroerosión y los tipos de procesos que comprende, centrándose especialmente en la electroerosión por penetración al tratarse de los procesos que son objeto de esta tesis doctoral.

Posteriormente se efectúa una revisión del estado del arte sobre los procesos de electroerosión, identificando las principales áreas de interés en las que se ha trabajado durante los últimos años dentro de este campo de estudio.

En la tercera parte de este capítulo se enumeran los objetivos concretos que persiguen en la presente tesis doctoral y la forma en que se estructuran los diferentes capítulos que componen este trabajo.

Por último, se procede al análisis de los principales campos de la industria naval para los cuales se puede recurrir a los procesos de electroerosión, tanto en el ámbito de la construcción de nuevas embarcaciones como en el ámbito de las reparaciones navales y conversiones de buques. Se remarcará la importancia del empleo de tecnologías de mecanizado avanzadas en la industria de la fabricación naval, y las ventajas del uso del mecanizado por electroerosión frente a otros procesos de mecanizados tradicionales.

1.1. Introducción a los procesos de electroerosión.

Existen diversas monografías que permiten conocer las características generales de los procesos de mecanizado por electroerosión, entre las cuales se encuentra, por ejemplo, el libro publicado por A. Camprubi Graell [1], con el título “Electro-erosión fundamentos de su física y de su técnica”, o la guía publicada por el fabricante de máquinas de electroerosión ONA, con el título “Teoría y práctica de la electroerosión” [2].

Por otra parte, se puede consultar diversos artículos científicos que recogen los resultados obtenidos por determinados autores durante el análisis de estos procesos, como se describirá más adelante en la sección 1.2, dedicada a la revisión del estado del arte. Se puede adelantar a este respecto el artículo de K.H. Ho y S.T. Newman [3], en el cual se realiza una revisión acerca de algunos de los avances conseguidos en los procesos de electroerosión.

En el presente capítulo de esta tesis doctoral, se comenzará por una descripción básica de los principios generales de este proceso de mecanizado, y seguidamente se llevará a cabo una revisión del estado del arte, antes de abordar las principales aplicaciones de la electroerosión en la industria naval y definir los objetivos que se persiguen esta tesis doctoral.

1.1.1. Definición de mecanizado por electroerosión.

La electroerosión consiste en un método de eliminación de material, que se basa en la acción de las descargas eléctricas controladas que se producen entre el electrodo y la pieza dentro de un medio dieléctrico [1]. Se trata de un proceso que permite reproducir de manera directa la forma del electrodo en la pieza de origen, a partir de la energía calorífica proporcionada por estas descargas eléctricas. En los siguientes apartados se explicarán las características básicas de estos procesos de fabricación.

1.1.2. Introducción histórica a la electroerosión.

Se considera que los procesos de electroerosión tienen su origen en 1943, fecha en la cual comenzaron los estudios de los hermanos B.R. y N.I. Lazarenko, si bien en 1770 J. Priestley ya había descubierto el efecto erosionador que poseen las descargas eléctricas sobre los materiales metálicos [1].

Fue en 1943 cuando B.R. y N.I. Lazarenko profundizaron en estos descubrimientos, y llevaron a cabo la primera publicación científica sobre estos procesos, en la búsqueda de un método que permitiera efectuar de manera controlada la erosión originada por las descargas eléctricas, y lo cual, daría lugar a una nueva tecnología de mecanizado que se denominó “electroerosión”. Esta tecnología resultó revolucionaria porque no requería el contacto físico entre la pieza y la herramienta de corte, y por lo tanto no dependería de las propiedades mecánicas del material de partida.

Las primeras aplicaciones industriales de la electroerosión no llegarían hasta la década de 1950, dedicadas a la extracción de brocas y machos que se habían partido en el interior de las

piezas, y posteriormente en 1959 cuando se presentó en París la primera máquina equipada con un generador de impulsos rectangulares aplicados a la herramienta y a la pieza, la cual proporcionaba descargas controladas que permitían eliminar el material de la pieza, consiguiendo reproducir en ella la forma del electrodo.

La utilización de generadores de impulsos mediante transistores supuso el auge de la electroerosión, ya que hicieron posible obtener una mayor velocidad de corte, un menor desgaste del electrodo y, sobre todo, una mayor uniformidad en la rugosidad superficial de las piezas fabricadas por electroerosión.

1.1.3. Fundamentos básicos de los procesos de electroerosión.

Como se ha descrito anteriormente, la electroerosión consiste en un proceso de erosión térmica que permite el arranque de material mediante una serie de descargas eléctricas recurrentes entre una herramienta que actúa como electrodo y una pieza constituida por un material conductor, estando ambos sumergidos en un fluido dieléctrico [1].

Las descargas eléctricas se producen en el espacio comprendido entre el electrodo y la pieza, conocido por el término anglosajón “gap” (separación). Se trata de uno de los principales parámetros del proceso, y debe ser controlado en todo momento de manera que sea suficientemente grande para que la pieza y herramienta no entren en contacto, y lo suficientemente pequeño para hacer posible la obtención de descargas eléctricas controladas.

Si el gap es excesivo no se pueden conseguir las descargas eléctricas, y se necesitarán mayores tiempos de mecanizado. Por el contrario, si el gap es demasiado pequeño existe el riesgo de que la herramienta y la pieza entren en contacto y se produzca un corto circuito, lo cual generaría grandes incrementos de temperatura que podrían provocar la transferencia de material entre ambos, así como el deterioro de la geometría de la herramienta.

Los procesos de electroerosión utilizan corrientes pulsantes de elevada energía y reducida duración, de entre 2 a 2000 μ s, las cuales dan lugar a elevadas temperaturas en una zona localizada de la superficie de la pieza (habitualmente entre 8.000 y 12.000 °C). Debido al breve intervalo de tiempo de aplicación de la descarga eléctrica, el calor no se puede propagar por toda la pieza, sino que se produce la fusión e incluso evaporación del material en la zona de la descarga, dando lugar a un cráter de forma semiesférica.

1.1.4. Producción de las descargas eléctricas.

Es importante conocer las distintas fases que forman parte del proceso de producción de las descargas eléctricas. Como se puede observar en la Figura 1.1, a causa de la descarga eléctrica se origina un canal de plasma entre la herramienta y la pieza, que comenzará a transmitir la energía generada por el circuito eléctrico de la máquina.

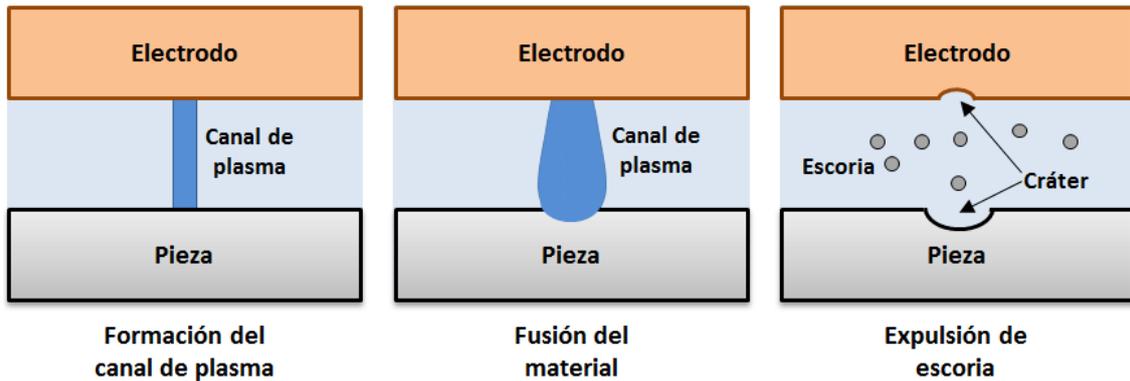


Figura 1.1 Esquema del proceso de producción de las descargas eléctricas.

Una vez estabilizado el canal de plasma, se produce un aumento de la temperatura en la zona de incidencia del canal, provocando la fusión parcial del material de la pieza y también, aunque en menor medida, la fusión del material de la herramienta de corte. Este proceso es independiente de las propiedades mecánicas del material de la pieza de trabajo, y sólo depende de sus propiedades térmicas.

A continuación, se interrumpe bruscamente la energía en el circuito y desaparece el canal de plasma, y por tanto el material fundido queda suspendido en el fluido dieléctrico en forma de pequeñas partículas que se denominan “escoria”.

En el fluido dieléctrico se establece un flujo que permite evacuar la escoria de la zona de corte, con el fin de evitar que vuelva a adherirse a la superficie de la pieza o el electrodo, ya que esto sería perjudicial para la productividad del proceso de electroerosión y para el acabado superficial de la pieza.

Acerca de la polaridad que se utiliza en el circuito eléctrico, lo más habitual es que la herramienta actúe como cátodo (electrodo positivo), mientras que la pieza sea el ánodo (electrodo negativo).

1.1.5. La máquina de electroerosión.

En la Figura 1.2 se muestra una representación esquemática de una máquina de electroerosión por penetración. Este tipo de máquinas de mecanizado no convencional, se componen de los siguientes elementos principales:

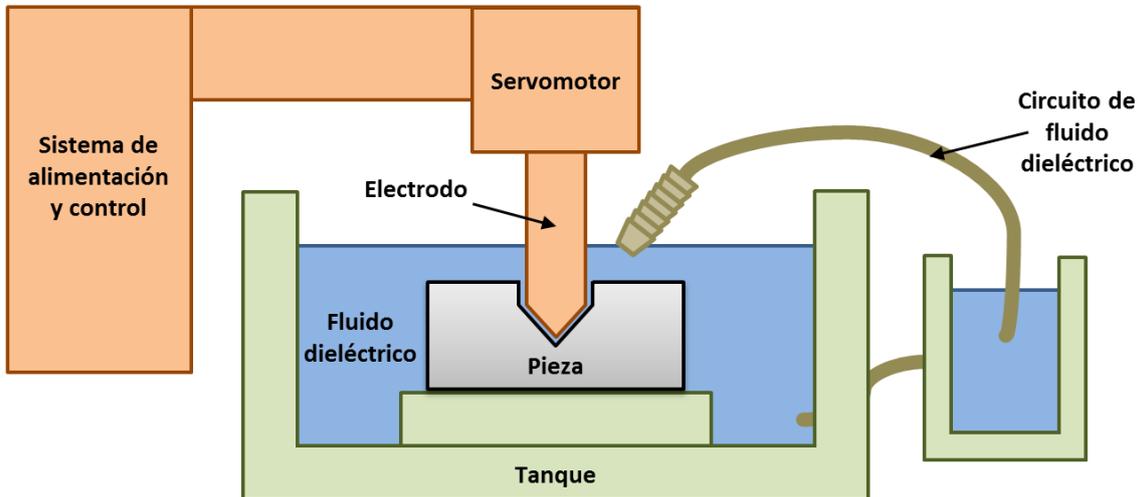


Figura 1.2 Representación esquemática de una máquina de EDM por penetración.

- Sistema de alimentación y control: con el objetivo de rectificar la corriente de entrada a la máquina y generar la tensión deseada entre la pieza y el electrodo, según la tensión e intensidad seleccionada para cada proceso de mecanizado.
- Servomotor: es el responsable del movimiento del electrodo, manteniendo en todo momento un gap adecuado entre la pieza de trabajo y la herramienta de corte para asegurar que las descargas eléctricas se puedan producir correctamente.
- Tanque: permite alojar el fluido dieléctrico dentro del cual estarán sumergidos la pieza y la herramienta de corte. La pieza se fijará en la mesa de trabajo situada en el interior de este depósito.
- Circuito de fluido dieléctrico: tienen la función de recircular el fluido dieléctrico, así como filtrar y eliminar la escoria generada durante el proceso de mecanizado.

1.1.6. El fluido dieléctrico.

El fluido dieléctrico desarrolla tres funciones esenciales en el proceso de electroerosión, y por ello tiene una gran relevancia en el buen funcionamiento del proceso. Estas tres funciones son las siguientes:

- Actuar como aislante entre la pieza y la herramienta, concentrando las descargas eléctricas generadas.
- Proporcionar un medio que permita el enfriamiento de la superficie de la pieza y del electrodo.
- Llevar a cabo la limpieza y retirada de la escoria producida durante el proceso de electroerosión.

Su primera función consiste en servir como aislante entre el electrodo y la pieza de trabajo. La principal característica eléctrica que debe presentar como aislante es su rigidez dieléctrica. Al ir aumentando la tensión entre el electrodo y la pieza, llega un momento en que el fluido dieléctrico se ioniza ligeramente permitiendo el paso de una pequeña corriente eléctrica. Esto provoca un aumento de la ionización, con lo que la resistencia eléctrica del dieléctrico desciende bruscamente y se origina una descarga en forma de avalancha que caracteriza a las descargas erosivas. Una vez terminado el impulso, el fluido se des-ioniza y la siguiente descarga tendrá lugar en el punto en el que el campo eléctrico entre el electrodo y la pieza permita volver a ionizarlo y formar el canal de plasma a través del cual se efectuará la siguiente descarga eléctrica, lo cual implica un reparto al azar de las descargas sobre la superficie a erosionar.

La segunda función del fluido dieléctrico es la de proporcionar el enfriamiento necesario en la superficie de la pieza y la herramienta. El proceso de electroerosión se caracteriza por elevados incrementos de temperatura que producen la fusión e incluso evaporación del material, pero es necesario que después de cada descarga se proceda al enfriamiento del electrodo y la pieza, con el fin de preservar sus propiedades evitando alteraciones de fase o deformaciones geométricas por efecto de la temperatura. Además, es preciso enfriar el sistema para proteger la máquina frente a elevadas temperaturas en sus componentes.

Finalmente, el fluido dieléctrico debe servir para retirar todas las partículas erosionadas de la pieza, las cuales quedan suspendidas en el gap entre la pieza y el electrodo. Es necesario retirar esta escoria para minimizar la adhesión de partículas en la superficie de la pieza y del

electrodo, ya que esto perjudicaría al acabado superficial de la pieza, la vida de la herramienta y el tiempo de mecanizado.

Para poder desempeñar eficazmente estas tres funciones, los líquidos dieléctricos deben cumplir los siguientes requerimientos:

- Poseer una suficiente rigidez dieléctrica para poder soportar los campos eléctricos creados por las tensiones aplicadas entre el electrodo y la pieza (entre 60 y 300 V), los cuales están separados por un reducido gap (entre 10 y 200 μm), con el fin de no permitir el paso de la corriente, si no es en forma de descarga.
- Presentar una baja viscosidad y baja tensión superficial para poder penetrar con facilidad en los intersticios existentes entre la pieza y el electrodo, haciendo posible el proceso de electroerosión y el arrastre de los residuos generados.
- Deben ser químicamente neutros (nunca ácidos), con el fin de no atacar al electrodo y la pieza, ni a los elementos de la máquina con los que deben estar en contacto.
- Presentar una reducida volatilidad para evitar pérdidas del fluido dieléctrico.
- Su punto de inflamación debe ser lo suficientemente elevado para evitar el riesgo de incendio.
- No deben desprender vapores nocivos, ni con olor especialmente desagradable.
- Poseer las características térmicas adecuadas para enfriar las superficies erosionadas y evitar las posibles variaciones dimensionales que podrían originar las elevadas temperaturas locales que se producen durante el proceso.
- Deben presentar una mínima formación de lodos o residuos bajo las peores condiciones de mecanizado.
- Deben conservar sus propiedades frente a las diferentes condiciones de mecanizado.
- Deben ser fáciles de obtener en el mercado y tener un precio que no resulte excesivo.

Teniendo en cuenta estos requisitos, los dieléctricos más empleados son aceites y derivados del petróleo.

Los aceites que mejor soportan este proceso son los aceites minerales, ya que presenta una elevada temperatura de inflamación que oscila entre 120 y 150 °C. Además, poseen una elevada viscosidad, entre 6 y 20 cSt, lo cual los hace aconsejables para las operaciones de desbaste, debido a que en estas operaciones se utiliza un gap elevado y no suele haber

problemas de circulación del dieléctrico. Sin embargo, no es válido para operaciones de acabado, en las cuales el gap es muy reducido y el aceite no puede circular a través de él, como consecuencia de su elevada viscosidad.

El petróleo posee un punto de inflamación más reducido que el aceite, entre 75 y 80 °C, y también una menor viscosidad, de alrededor de 2 cSt. Estas propiedades los hacen aconsejables para las operaciones de acabado en las cuales la temperatura y el gap son más reducidos.

En la presente tesis doctoral, debido a la intención de analizar el acabado superficial de la pieza y el desgaste del electrodo, se decidió emplear queroseno, puesto que como derivado del petróleo permite operar adecuadamente en condiciones de acabado.

1.1.7. Principales características del proceso.

Las dos principales propiedades que caracterizan el proceso de mecanizado por electroerosión son las siguientes:

- En primer lugar, se trata de un proceso que no depende de las propiedades mecánicas de la pieza, como son la dureza, resistencia a tracción y ductilidad, sino que, por el contrario, sólo se ve afectado por sus propiedades térmicas y eléctricas, por lo cual resulta una tecnología muy adecuada para el mecanizado de aceros y otras aleaciones metálicas de elevada dureza o refractarias.
- Por otra parte, permite generar formas complejas, las cuales resultan muy difíciles o imposibles de conseguir mediante procesos de mecanizado convencional. El electrodo suele ser de grafito o cobre, y se mecaniza hasta obtener la forma deseada para posteriormente reproducir esta geometría en la pieza final. El coste mecanizado del electrodo se amortiza por la fabricación de un elevado número de piezas a partir del mismo electrodo.

1.1.8. Tipos de mecanizados por electroerosión.

Dependiendo de la forma del electrodo y su movimiento relativo respecto de la pieza, se puede distinguir entre tres tipos de procesos de electroerosión [1, 4]:

- Electroerosión por penetración: se trata del método más utilizado en la industria, y por ello es el tipo de proceso que se estudia en la presente tesis doctoral. Consiste en

transferir a la pieza de trabajo la forma de la herramienta, para lo cual se realiza un avance continuo y servo-controlado del electrodo a medida que penetra en la superficie de la pieza en presencia de un líquido dieléctrico.

- Electroerosión por hilo: su principal diferencia respecto de la electroerosión por penetración reside en que la forma de la herramienta no influye en el resultado obtenido, ya que en este caso no se lleva a cabo el copiado de la forma del electrodo, sino el corte de la pieza. Para ello, se emplea como herramienta de corte un hilo que al ir desplazándose efectúa el corte de la pieza.
- Rectificado por electroerosión: consiste en un tipo de mecanizado por electroerosión que se caracteriza por aplicar un movimiento de rotación al electrodo, de un modo similar a lo que sucede en los procesos de rectificado convencional, si bien en este caso no existe contacto entre la herramienta y la pieza.

Existen también otros procesos de corte por electroerosión como variantes de la electroerosión por hilo, como es el método de corte de tubería estudiado por S.L. Chen, et al. [5], en el cual la pieza gira y uno o varios electrodos actúan sobre ella para reducir su espesor hasta conseguir el corte de la pieza, si bien no son procesos habituales en la industria.

1.2. Estado del arte.

En este apartado se lleva a cabo una revisión de los principales trabajos relacionados con el análisis y la mejora de los procesos de electroerosión, incluyendo tanto trabajos dedicados al estudio experimental de estos procesos de mecanizado no convencional, como al desarrollo de modelos matemáticos que permitan predecir el efecto de las descargas eléctricas.

Entre los estudios realizados por diversos autores, se puede destacar por ejemplo el trabajo de K.H. Ho y S.T. Newman [3], el cual identifica cuatro campos de investigación actuales en relación a los procesos de electroerosión, como son la optimización de los parámetros del proceso, el control del proceso, la mejora de la tasa de eliminación de material, desgaste de la herramienta y acabado superficial, y el desarrollo de nuevas tecnologías de electroerosión (Figura 1.3).

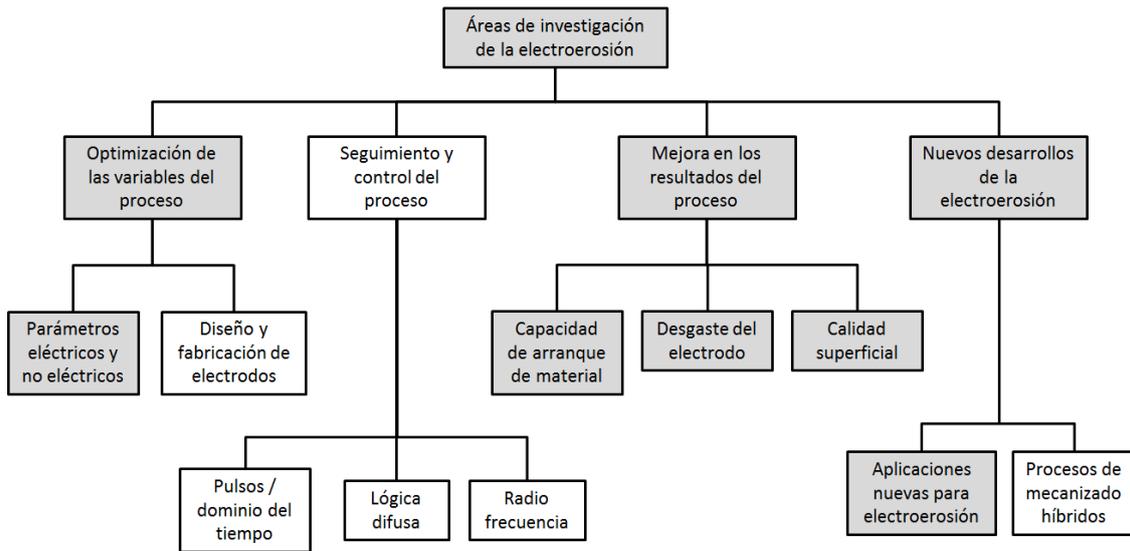


Figura 1.3 Clasificación de los campos de investigación sobre procesos EDM. Fuente: [3]

La presente tesis doctoral se corresponde fundamentalmente con el primer y el tercer campo de esta clasificación, así como el cuarto campo en la medida de que en ella se apuesta por nuevas aplicaciones de este proceso para el sector naval. Estos campos han sido sombreados en la Figura 1.3.

Según la clasificación efectuada por K.H. Ho y S.T. Newman [3], dentro de los estudios orientados a la optimización de los parámetros del proceso se puede distinguir entre el análisis de los parámetros eléctricos y no eléctricos del proceso de electroerosión, y el desarrollo de nuevos métodos para el diseño y fabricación de los electrodos. En esta tesis doctoral se abordará este primer punto, ya que se procede al análisis de algunos de los parámetros de estos procesos.

Por otra parte, la mejora de los resultados del proceso se centra en tres aspectos fundamentales, como son el aumento de la tasa de eliminación de material, la reducción del desgaste sufrido por la herramienta de corte, y la optimización de la calidad superficial en la pieza mecanizada. Estos tres factores serán estudiados en la presente tesis doctoral, y los resultados obtenidos a este respecto serán explicados en los siguientes capítulos.

Dentro de la presente tesis doctoral, se recogen algunas indicaciones acerca de las aplicaciones para las que se podría utilizar la electroerosión en la industria naval, lo cual está relacionado con uno de los puntos que se abarcan en el último campo de esta clasificación.

En los siguientes apartados se realizará una breve referencia a los principales estudios que se han desarrollado durante los últimos años sobre los procesos de electroerosión, distinguiendo entre diferentes temáticas relacionadas con estos procesos.

1.2.1. Distribución de energía térmica en la zona de corte.

En el ámbito de los procesos de electroerosión, tiene una gran relevancia el análisis de las propiedades del canal de plasma y de la distribución de energía térmica en la zona de corte, debido a su considerable influencia sobre las propiedades resultantes de la pieza final.

Entre los trabajos llevados a cabo sobre estas temáticas, H. Singh [6] se centran en el estudio de la distribución de la energía suministrada por el canal de plasma sobre la superficie de la pieza, mientras M.H. Joudivand Sarand y M.R. Shabgard [7] se dedican al desarrollo de modelos térmicos de difusión para poder predecir el desgaste del electrodo.

Y. Zhang, et al. [8] presentaron un nuevo método para estimar la distribución de energía y diámetro del canal de plasma en procesos de electroerosión, y comprobaron que se debería contemplar el aumento del diámetro del canal de plasma para un análisis más preciso del proceso.

En el trabajo de M. Zhang, et al. [9] se analiza una descarga de un único impulso para deducir las diferencias existentes en el canal de plasma y tamaño del cráter a partir de procesos de mecanizado por arco eléctrico (EAM) y mecanizado por electroerosión (EDM).

M. Kiyak, et al. [10], evaluó la influencia de la energía de descarga en la tasa de eliminación de material, la tasa de desgaste del electrodo y la rugosidad superficial de la pieza, durante el mecanizado de piezas de acero AISI 1040 con electrodos de cobre.

La fabricación de electrodos constituidos por monocristales transparentes permite analizar los fenómenos que tienen lugar en la zona de corte. T. Kitamura y M. Kunieda [11] emplearon electrodos de óxido de galio (Ga_2O_3) y carburo de silicio (SiC), y utilizaron cámaras de grabación de alta velocidad para visualizar la formación del canal de plasma y la aparición de los cráteres. Estos autores concluyeron que el diámetro del canal de plasma es menor que el diámetro de los cráteres, lo cual permite verificar los modelos de dispersión de temperatura del canal de plasma.

Los estudios realizados por T. Kitamura, et al. [12] se centraron en el análisis de burbujas en el espacio entre la pieza de trabajo y la herramienta. Se utilizaron electrodos transparentes para

visualizar la zona del gap, y se verificó que durante algunas centenas de descargas, las burbujas creadas por cada chispa cubrían más del 70% de la superficie de trabajo.

Z. Li y J. Bai [13] analizaron la influencia del gap sobre las características de las descargas eléctricas en procesos de micro-EDM, y comprobaron que el diámetro y profundidad de los cráteres disminuyen con el tamaño del gap.

1.2.2. Influencia del fluido dieléctrico.

Durante los últimos años se han efectuado varios estudios dedicados a proporcionar fluidos dieléctricos que permitan mejorar la eficiencia del proceso. Q.Y. Ming y L.Y. He [14] utilizaron ciertos aditivos para el queroseno, y comprobaron que estos aditivos permiten mejorar la MRR, TWR y rugosidad superficial. De modo parecido, en el trabajo de Y.S. Wong, et al. [15], se observó que el empleo de un dieléctrico con partículas en suspensión permite reducir el tiempo de mecanizado, obtener una distribución más homogénea de las descargas eléctricas y mejorar la estabilidad del mecanizado.

Por otra parte, X. Wang, et al. [16] estudiaron la influencia del tipo de fluido dieléctrico durante el EDM de aleaciones de titanio, y comprobaron las diferencias existentes entre utilizar un dieléctrico compuesto, agua destilada o queroseno.

Y. Zhang, et al. [17] estudiaron la influencia de los mecanismos de eliminación de material en EDM considerando cinco tipos de dieléctricos, que incluyen diferentes dieléctricos gaseosos (aire y oxígeno) y dieléctricos líquidos (agua des-ionizada, queroseno y emulsión de agua y aceite). A partir de los resultados obtenidos, se comprueba que la presión en el punto de descarga es un factor determinante para las características de la eliminación del material.

A.K. Singh, et al. [18] analizaron el mecanizado por electroerosión de superaleaciones Super Co 605 utilizando un dieléctrico con partículas de grafito, y concluyeron que el empleo de estas partículas permite mejorar el acabado superficial de la pieza.

1.2.3. Estudio del acabado superficial y productividad del proceso.

M. Hourmand, et al. [19] analizaron el mecanizado por electroerosión de materiales compuestos de matriz metálica (MMCs), empleando un fluido dieléctrico a base de aceite con polvo de aluminio. Estos autores demostraron que la tasa de eliminación de material (MRR) depende principalmente de la tensión de descarga, intensidad de corriente, tiempo de pausa y

tiempo de impulso, mientras que la tasa de desgaste del electrodo (EWR) se ve afectada sobre todo por el tiempo de impulso.

En el trabajo efectuado por A.K. Singh, et al. [18], se estudió el acabado superficial alcanzable durante el mecanizado por electroerosión de la superaleación Super Co 605 empleando un fluido dieléctrico con polvo de grafito. El dieléctrico mezclado con polvo de grafito permitió una importante mejora del acabado superficial, y también proporcionaban una mayor calidad superficial la polaridad de corriente, la intensidad de corriente y el tiempo de impulso.

S. Kumar, et al. [20] facilitan una revisión sobre los trabajos relacionados con la modificación de la superficie de acuerdo con fenómenos que se originan durante el proceso de corte.

L. Li, et al. [21] estudiaron la eficiencia del arranque de material, acabado superficial y microdureza alcanzables durante la fabricación de piezas de la aleación de níquel Inconel 718, mediante electroerosión por hilo.

L. Zhang, et al. [22] desarrollaron un modelo para simular la generación de micro-cavidades en materiales de alta dureza mediante micro-fresado por EDM con herramienta cónica, y se comprueba la validez de este modelo teórico para predecir la superficie mecanizada.

La importancia del estudio de los parámetros eléctricos es patente debido a las diversas investigaciones que se han presentado, así mismo T. Muthuramalingam y B. Mohan [23] realizan un revisión del estado del arte en este aspecto, recopilando las principales conclusiones de los distintos investigadores del área. Por su parte, A. Thakur y S. Gangopadhyay [24] realizan la revisión del estado del arte de la integridad superficial al mecanizar aleaciones con base de níquel.

S. Plaza, et al. [25] realizaron un estudio experimental sobre el micro-taladrado EDM de aleaciones de titanio Ti6Al4V, y consiguieron reducir el tiempo de mecanizado mediante el empleo de electrodos helicoidales.

S. Dong, et al. [26] analizaron el micro-EDM de aleaciones de cobre-berilio C17200 con un electrodo auxiliar. A partir de los resultados de este trabajo, se deduce el espesor del electrodo auxiliar, intensidad de corriente y tiempo de impulso que permiten mejorar la rugosidad superficial.

Los estudios H.C. Tsai, et al. [27] proponen la utilización de electrodos revestidos con partículas de cromo, y analizan su influencia sobre la MRR, TWR, rugosidad superficial y espesor de la capa fundida.

1.2.4. Estudio del desgaste del electrodo.

Otro gran número de trabajos se centraron en el análisis del desgaste del electrodo durante el proceso de corte. Por ejemplo, A. Torres, et al. [28] estudiaron el mecanizado por electroerosión de TiB_2 mediante electrodos de cobre, y constataron que el desgaste del electrodo se ve afectado por el tiempo de impulso, mientras que la MRR y la rugosidad superficial dependen fundamentalmente de la intensidad de corriente.

En el trabajo de S. Kumar, et al. [29] se aplicaron diferentes estrategias de movimiento de herramientas para mejorar las características de las operaciones de perforación mediante EDM. Las estrategias de movimiento propuestas son de penetración helicoidales y radiales, y se comprueba que un movimiento orbital radial proporciona una menor tasa de desgaste de la herramienta.

Otros autores consideraron distintos materiales de trabajo, diferentes geometrías y materiales del electrodo, y comprobaron que estos tres factores afectaban a la tasa de desgaste de la herramienta (TWR) [30].

B. Ekmekci y A. Sayar [31] analizaron el efecto de la escoria durante la fabricación de micro-agujeros mediante EDM, y comprobaron que para determinadas condiciones de corte se produce una aglomeración de escoria que actúa como electrodo, y da lugar a una forma cóncava en el fondo de la cavidad.

M.H. Joudivand Sarand y M.R. Shabgard [7] analizaron la influencia del coeficiente de difusividad térmica del material de la herramienta en procesos de EDM, y comprobaron que la tasa de desgaste de la herramienta disminuyera con este parámetro.

El EDM con agua des-ionizada permite un menor desgaste del electrodo, pero provoca una excesiva erosión electrolítica. Q. Yin, et al. [32] desarrollaron un nuevo método que utiliza un electrolito con una mayor conductividad que el agua des-ionizada, y comprobaron que reduce el deterioro de la herramienta.

Otros estudios se centran en el empleo de recubrimientos en la superficie de los electrodos. Esto tiene una consecuencia directa sobre el incremento del coste de los electrodos, pero puede servir para aumentar el rendimiento del proceso, como señalan E. Uhlmann y D.C. Domingos [33].

M.A. Habib y M. Rahman [34] recurren a la deposición electroquímica localizada (LECD) para la fabricación de electrodos con formas complejas para procesos de micro-EDM, y analizan los

resultados que se obtienen para varios materiales de partida en términos de tasa de eliminación de material y tasa de desgaste de la herramienta.

R.V. Barenji, et al. [35] analizaron la tasa de eliminación de material y la tasa de desgaste de la herramienta durante el mecanizado por electroerosión de un acero herramienta AISI D6. De acuerdo con los resultados de este trabajo, los mayores valores de tiempo de impulso permiten optimizar el MRR y TWR.

C.K. Nirala y P. Saha [36] proponen un método para compensar el desgaste de la herramienta en procesos de micro-taladrado EDM. Para ello consideran una aproximación que se basa en la eliminación del volumen por descarga (VRD), y se obtienen mejores resultados que con el método de desgaste uniforme (UWM).

1.2.5. Modelización teórica del proceso.

Algunos autores han tratado de desarrollar modelos teóricos que permiten simular estos procesos de mecanizado no convencional. Por ejemplo, D.D. DiBitonto, et al. [37], M.R. Patel, et al. [38] y J.A. McGeough y H. Rasmussen [39] proponen modelos matemáticos que proporcionan los fundamentos para otros modelos numéricos.

M.T. Shervani-Tabar, et al. [40] se centraron en la modelización de las burbujas producidas por las descargas eléctricas, mientras que M. Shabgard, et al. [41] propusieron un modelo matemático para predecir la distribución de temperaturas y la eficiencia del canal de plasma para una única descarga.

K.P. Somashekhar, et al. [42] han propuesto un modelo para la distribución de temperaturas en procesos de micro- EDM con múltiples descargas.

U. Aich y S. Banerjee [43] propusieron unos modelos para la tasa de eliminación de material y rugosidad superficial en EDM, y recurrieron a métodos de máquinas de vectores de soporte (SVM) y optimización por nube de partículas (PSO).

En el trabajo de S. Das, et al. [44] se propone un modelo numérico para procesos de mecanizado por electroerosión, y se comprueba la validez de este modelo para predecir la forma del cráter.

S. Hinduja y M. Kunieda [45] llevaron a cabo una revisión de algunos de los modelos que pueden ser utilizados para el mecanizado electroquímico y el mecanizado por electroerosión, y destacan algunas mejoras que serían deseables en estos modelos.

R.V. Barenji, et al. [35] presentaron modelos para la estimación de la MRR y TWR durante el EDM de acero de herramientas AISI D6.

J. Pei, et al. [46] desarrollan un modelo para predecir el desgaste de la herramienta a partir del campo eléctrico generado en el fluido dieléctrico, mientras que G. Puthumana, et al. [47] han llevado a cabo la modelización de los errores que se producen en la profundidad de las cavidades generadas en micro-fresado mediante EDM a partir de los errores en la estimación de la TWR.

C.-S. Lee, et al. [48] propusieron un modelo para estimar el desgaste de la herramienta en procesos de taladrado mediante EDM, y se comprueba que este modelo permite estimar el desgaste del electrodo.

A pesar de estos trabajos, se evidencia la necesidad de desarrollar nuevos modelos numéricos que permitan simular el proceso completo, como se lleva a cabo en la presente tesis doctoral.

1.2.6. Otras técnicas de electroerosión.

Además de los trabajos dedicados al estudio de los fenómenos que tienen lugar durante el proceso y la optimización del acabado de la pieza final, y el desgaste de la herramienta, existen otros trabajos en los cuales se pretenden obtener nuevas alternativas para otras aplicaciones [49]. Entre estas alternativas se encuentra el empleo de los procesos de EDM para operaciones de micro-taladrado y micro-fresado [50].

También se ha explorado la utilización de procesos de electroerosión para la generación de prótesis dentales. Entre los autores que han abordado estas temáticas cabe destacar a S. Zinelis [51], que se ha centrado en alcanzar un alto nivel de acabado, A. Ntasi, et al. [52], que han analizado la influencia del proceso sobre la resistencia a la corrosión de las aleaciones empleadas para las prótesis dentales.

C.S. Trueman y J. Huddleston [53] utilizaron EDM en condiciones de desbaste para el mecanizado de materiales cerámicos, recurriendo a prolongadas descargas de alta energía, que proporcionan elevadas temperaturas y hacen posible la fusión de estos materiales, los cuales son muy difíciles de mecanizar mediante técnicas convencionales.

Y. Shen, et al. [54] desarrollaron una nueva técnica de electroerosión en seco a alta velocidad, con el objetivo de incrementar la competitividad, reducir el coste del proceso y minimizar el

impacto ambiental. Según N. Mohd Abbas, et al. [55], esta técnica puede presentar problemas de vibraciones del electrodo.

Por otra parte, Q.H. Zhang, et al. [56] aplicaron un movimiento ultrasónico a la pieza de trabajo para incrementar la eficiencia del mecanizado por electroerosión en medio gaseoso, en un proceso que se denomina mecanizado por electroerosión asistido por ultrasonidos (UEDM). Esta técnica permite incrementar la tasa de eliminación de material, llegando a duplicar la del EDM en medio gaseoso, aunque sin alcanzar los valores del EDM convencional, sin embargo proporciona peores resultados en términos de acabado superficial.

V. Kumar S. y P. Kumar M. [57] estudiaron la fabricación de aceros de herramientas mediante mecanizado por electroerosión convencional (CEDM) y mecanizado por electroerosión con electrodo refrigerado criogénicamente (CCEDM), y comprobaron que el CCEDM permite conseguir una reducción aproximada del 20% en el desgaste de la herramienta y la rugosidad superficial de la pieza mecanizada.

En el trabajo de P. Steuer, et al. [58], se propone un proceso en cadena que contempla el procesamiento de los electrodos mediante mecanizado electroquímico pulsado y el mecanizado por electroerosión de metal duro utilizando estos electrodos. De esta forma se obtiene una solución integrada que permite aumentar el rendimiento del EDM y proporciona un proceso libre de desgaste que podría servir para optimizar la fabricación de piezas con geometrías complejas.

En el trabajo desarrollado por Y.J. Lu, et al. [59], se recurre a la descarga por contacto eléctrico (ECD) en seco para el acondicionamiento de herramientas de diamante para el rectificado en seco de carburos metálicos, y se analiza el arranque de granos de diamante y sustrato metálico.

Y.-C. Lin, et al. [60] desarrollaron un proceso híbrido de EDM en gas combinado con mecanizado por chorro abrasivo (AJM) y vibración ultrasónica (USV) para tratar de mejorar el mecanizado de ciertos aceros, y comprobaron que este método proporciona una mayor tasa de eliminación de material.

1.3. Objetivos y estructura de la tesis doctoral.

El principal objetivo de la presente tesis doctoral consiste en el estudio de los procesos de electroerosión por penetración y la aplicación de estos procesos al sector naval. Para ello se procede al estudio experimental y modelización teórica del proceso de electroerosión, con la finalidad de hacer posible la mejora de estas tecnologías para su aplicación en la industria de la fabricación naval. Este trabajo se centra en el mecanizado de piezas de acero inoxidable mediante la utilización de electrodos de cobre, y se dedica al análisis del acabado superficial de las piezas mecanizadas y del desgaste originado en la herramienta de corte. En este apartado se establecen los objetivos de esta tesis doctoral y la estructura en que se dividen los contenidos de este trabajo.

Los objetivos generales que se persiguen en la presente tesis doctoral son los que se indican a continuación:

- Estudiar la naturaleza de las imperfecciones que se originan en la superficie de la pieza durante los procesos de mecanizado por electroerosión, incluyendo la rugosidad superficial, la pendiente de la curva de la tasa de material portante y el diámetro de los cráteres.
- Deducir la relación existente entre la calidad de la superficie mecanizada y algunos de los principales parámetros del proceso, como son la intensidad de corriente y la profundidad de penetración.
- Indicar la forma en que se produce la degradación de la herramienta durante los procesos de mecanizado mediante electroerosión y la contaminación en la superficie del electrodo a causa del material de la pieza, distinguiendo entre la pérdida de material que se origina en las diferentes zonas de la superficie activa del electrodo.
- Determinar la influencia que presentan algunos de los principales parámetros del proceso sobre el desgaste que se produce en la superficie del electrodo, con la finalidad de hacer posible la selección de las condiciones de corte que permiten optimizar la vida de la herramienta en estos procesos de mecanizado.
- Describir de las ecuaciones semi-empíricas que se pueden considerar para la simulación numérica de los procesos de electroerosión por penetración, y proponer un modelo simplificado que permita estudiar el gradiente de temperaturas, arranque de material y acabado superficial que se producen a causa de las descargas eléctricas.

- Comparar los resultados que proporciona el modelo teórico y las observaciones experimentales sobre la calidad superficial de la pieza mecanizada, con el fin de comprobar la validez del modelo para las condiciones de corte que se consideran en la presente tesis doctoral.

En definitiva, a través de estos distintos objetivos se pretende contribuir a la mejora de los procesos de mecanizado de electroerosión, disponiendo de un mayor conocimiento acerca de las imperfecciones que se originan en estos procesos y los valores que deben ser asumidos en los parámetros del proceso para conseguir optimizar la calidad superficial de las piezas fabricadas y la duración del electrodo, todo ello para su aplicación en la industria naval y otros diversos sectores. De hecho, dentro del primer capítulo de esta tesis doctoral se trata de identificar las posibles aplicaciones del mecanizado por electroerosión dentro de la fabricación naval, incluyendo las ventajas que pueden presentar estos procesos para el mecanizado de determinados componentes utilizados en este importante sector industrial.

A continuación se muestra el modo en que han sido estructurados los diferentes capítulos que forman parte de esta tesis doctoral, en los cuales se recogen los resultados obtenidos en este trabajo:

1. Introducción a los procesos de mecanizado por electroerosión, revisión del estado del arte, definición de los objetivos generales y estructura de la presente tesis doctoral, y estudio de las posibles aplicaciones de estas tecnologías productivas en el sector naval.
2. Estudio experimental del acabado superficial de las piezas fabricadas mediante procesos de electroerosión por penetración y deducción de las expresiones que permiten identificar la influencia de algunos de los principales parámetros del proceso.
3. Estudio experimental de la degradación del electrodo durante los procesos de electroerosión, incluyendo la textura de la superficie, los surcos que se originan en la zona activa del electrodo y la contaminación de la superficie de la herramienta.
4. Modelización numérica de los procesos de electroerosión por penetración, para el análisis de la distribución de temperaturas y formación de cráteres en la superficie de la pieza a partir de la energía suministrada por el canal de plasma.
5. Extracción de las conclusiones que se desprenden de los resultados obtenidos durante esta tesis doctoral, y descripción de los desarrollos futuros que se pretenden abordar posteriormente para la continuación de este trabajo.

1.4. Aplicaciones más relevantes del mecanizado por electroerosión en la industria naval.

En la industria naval, para la fabricación del casco de las embarcaciones se recurre principalmente a tres tipos de operaciones, como son el conformado y soldadura de planchas y perfiles de acero, el laminado de materiales compuestos y la carpintería de ribera, que se utilizara para la construcción artesanal de embarcaciones de madera.

En ninguna de estas tres aplicaciones es necesario el uso de procesos de mecanizado de alta precisión; sin embargo, la industria naval no se limita a la construcción de la estructura del casco de los buques, sino que cubre también el montaje de equipos y componentes sobre la plataforma construida, que son aplicaciones en las cuales el mecanizado de piezas de precisión resulta de interés. En efecto, para la fabricación de componentes y la realización de los pasos de casco en la estructura se emplean procesos de mecanizado, y en muchos casos se requiere un elevado nivel de precisión.

Tras un análisis de los componentes integrados en los buques para los cuales puede resultar más adecuado el empleo de procesos de mecanizado de alta precisión, a continuación se mostrarán algunos de los ejemplos que se consideran más representativos, desde la posible aplicación de los procesos de mecanizado por electroerosión:

- Cojinetes de apoyo de los timones (Figura 1.4): los cojinetes que se utilizan en los grandes timones de los buques (en inglés “upper bearing” o “lower bearing”), necesitan un mecanizado de gran precisión para realizar las acanaladuras necesarias para el sistema de lubricación por medio de aceite a presión. Para el mecanizado de estas formas complejas, se podría recurrir al mecanizado por electroerosión, siempre que lo permita la geometría de las canaladuras.

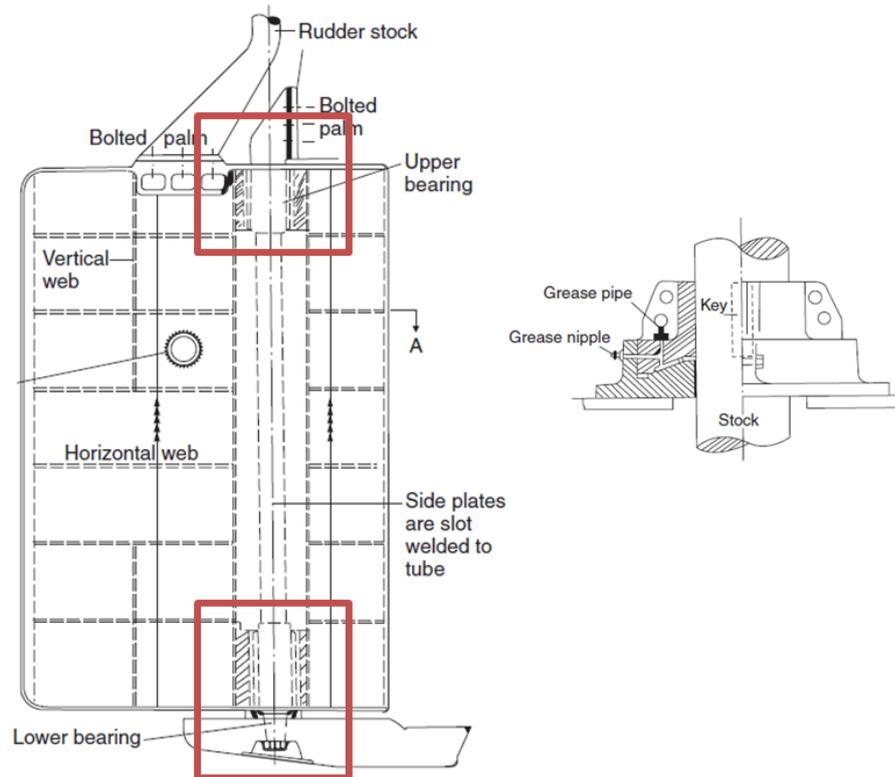


Figura 1.4 Timón y cojinetes de apoyo. Fuente: D.J. Eyres y G.J. Bruce [61]

- Componentes de aperturas en cubierta: Las aperturas en cubierta, incluyendo desde las tapas de escotilla hasta las grandes aperturas de bodegas para los buques de transporte de mercancías del tipo bulkcarrier (Figura 1.5), requieren de partes móviles y fijas que garanticen el cierre entre ambas. En las zonas de cierre de estas piezas, se debe realizar mecanizados de alta precisión con la finalidad de conseguir un ajuste que proporcione la estanqueidad deseada. A pesar del empleo de juntas de estanqueidad constituidas por gomas, el acabado de las piezas metálicas es necesario para el correcto funcionamiento de las juntas.

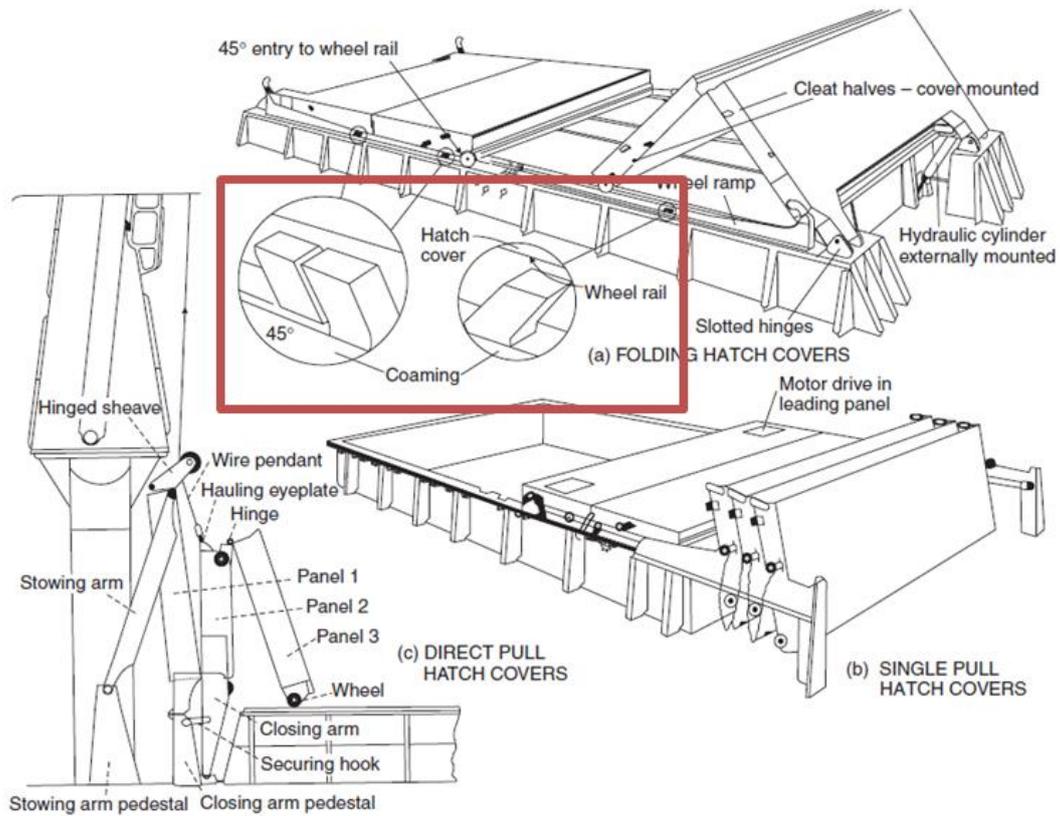


Figura 1.5 Tapa de escotilla para bodega de carga. Fuente: D.J. Eyres y G.J. Bruce [61]

- Bridas para tuberías de alta presión: En las instalaciones de las embarcaciones, se suelen emplear bridas constituidas por acero inoxidable o aleaciones de níquel, titanio o aluminio. Entre las alternativas disponibles para la fabricación de estos elementos, se podría contemplar el mecanizado por electroerosión.
- Componentes del núcleo de las hélices de paso controlable, como el modelo que se aprecia en la Figura 1.6, dentro del núcleo de la hélice existen algunos componentes que podrían ser generados mediante electroerosión, en lugar de recurrir a otros procesos de mecanizado.

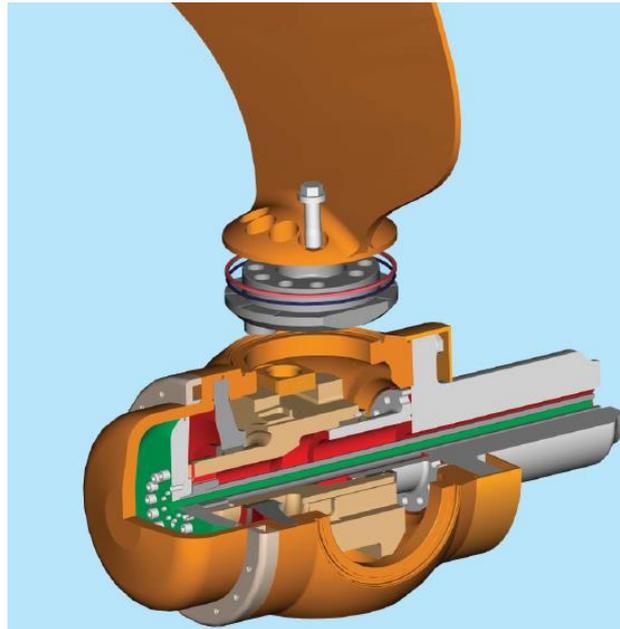


Figura 1.6 Hélice de paso controlable. Fuente: MAN [62]

- Componentes de los equipos embarcados: Conviene no olvidar que la construcción naval es una industria de integración, al igual que la industria aeronáutica y aeroespacial, dado que los buques están compuestos por diferentes sistemas, subsistemas y equipos, los cuales deben ser fabricados precisamente recurriendo a las tecnologías que resulten más adecuadas. Algunos de los componentes de estos sistemas podrían ser generados mediante electroerosión.

Todos los ejemplos expuestos anteriormente se caracterizan por los requisitos que se indican a continuación, por lo cual se pueden considerar adecuados para su fabricación mediante mecanizado por electroerosión:

- Materiales con elevadas propiedades mecánicas: En muchos casos se emplean aleaciones de alta resistencia y dureza que resultan muy difíciles de fabricar mediante procesos de mecanizado convencional, como son determinados aceros inoxidable, aceros al carbono de alto límite elástico, aleaciones de titanio, etc. Por lo tanto, la electroerosión sería una tecnología apropiada, al depender únicamente de las propiedades térmicas del material.
- Geometrías muy complejas: Muchos de estos elementos presentan formas geométricas con una gran complejidad, como son entre otros los capilares de lubricación que se requieren en las paredes de algunos de estos elementos.

- Acabados superficiales muy exigentes: Para poder garantizar la estanqueidad muchas de estas piezas precisan excelentes acabados en las superficies donde se ha de colocar las juntas de goma, como sucede por ejemplo en las bridas para tuberías de alta presión y tapas de escotilla.

Capítulo 2. Análisis experimental del acabado superficial de la pieza mecanizada

En el presente capítulo, se aborda el estudio de las imperfecciones que aparecen en la pieza mecanizada, en función de los parámetros del proceso que han sido analizados, como son la intensidad de corriente y la profundidad de penetración.

En los siguientes apartados se explica la metodología experimental utilizada, y los resultados obtenidos a partir de los ensayos dirigidos al análisis del proceso de mecanizado por electroerosión.

2.1. Metodología experimental.

En este apartado se describe la metodología que ha sido aplicada en esta tesis doctoral para la realización de los ensayos de mecanizado por electroerosión, los valores contemplados para los parámetros del proceso y la medición de irregularidades originadas en la superficie de la pieza.

2.1.1. Material de trabajo.

El proceso de mecanizado por electroerosión puede ser aplicado para la fabricación de componentes de diversos materiales, siempre que cumplan el requisito de permitir la conducción de la electricidad, y por tanto haga posible la generación de las descargas eléctricas entre el electrodo y la pieza de trabajo.

La industria naval normalmente se caracteriza por tratarse de una industria en la que resulta indispensable la minimización del coste de los materiales, debido al enorme volumen de los elementos estructurales de los buques. Es por ello que los materiales más empleados en la construcción naval convencional son los aceros al carbono y los aceros inoxidable.

Los aceros al carbono se emplean en la construcción del casco del buque, tanto en las planchas de forro como en los refuerzos principales y secundarios. Estas piezas de las embarcaciones se suelen construir mediante técnicas de conformado por deformación plásticas y procesos de unión por soldadura, si bien además requieren la aplicación de procesos de corte.

En cambio, los aceros inoxidable habitualmente se utilizan en las estructuras auxiliares y componentes integrados en el buque. Estas estructuras auxiliares y equipos son de construcción mucho más compleja, con geometrías que dificultan su fabricación mediante métodos convencionales, por tanto en algunos de estos casos puede resultar aconsejable la aplicación de procesos de mecanizado por electroerosión. Se puede encontrar diversos elementos para los cuales se recurre al mecanizado convencional, entre los cuales cabe citar por ejemplo las chumaceras de apoyo y de empuje, las bocinas de los ejes, pasos de casco para instalaciones de alta presión o altos requisitos de seguridad, si bien para determinadas aplicaciones convendría emplear también otras tecnologías como es el mecanizado por electroerosión.

Por todo lo anterior, en la presente tesis doctoral se ha decidido seleccionar un acero inoxidable como material de las piezas a mecanizar, en concreto el acero inoxidable AISI 316. Las propiedades principales de este material se pueden ver en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Propiedades del acero inoxidable AISI 316 (material de las piezas)

Propiedades	Valor
Propiedades físicas:	
Densidad	8.00 g/cc
Propiedades mecánicas:	
Dureza, Brinell	149
Dureza, Knoop	169
Dureza, Rockwell B	80
Dureza, Vickers	155
Resistencia a la tracción, Ultimate	550 MPa
Resistencia a la tracción, Yield	240 MPa
Elongación a la rotura	60%
Módulo de elasticidad	193 GPa
Impacto Izod	129 J
Impacto Charpy	105 J
Propiedades eléctricas:	
Resistencia eléctrica	0.0000740 ohm·cm
Propiedades térmicas:	
Capacidad específica de calor	0.500 J/(g·°C) (Temperatura 0 - 100 °C)
Conductividad térmica	16.3 W/(m·°C) (Temperatura 0 - 100 °C)
Punto de fusión	1370 - 1400 °C
Solidus	1370 °C
Liquidus	1400 °C
Composición:	
Carbono, C	≤ 0.080%
Cromo, Cr	16 - 18%
Hierro, Fe	61.8 - 72%
Manganeso, Mn	≤ 2.0%
Molibdeno, Mo	2.0 - 3.0%
Níquel, Ni	10 - 14%
Fósforo, P	≤ 0.045%
Silicio, Si	≤ 1.0%
Azufre, S	≤ 0.030%

Para la totalidad de los ensayos se utilizarán electrodos de cobre, al tratarse de una composición muy habitual para la herramienta de corte. En el capítulo siguiente se explicará en un mayor detalle la metodología empleada para la preparación de los ensayos y la evaluación de la superficie desgastada de la herramienta, si bien el presente artículo se centra más en la pieza de trabajo, ya que se dedica al análisis de la calidad superficial de la pieza.

Como fluido dieléctrico para los ensayos se seleccionó queroseno, ya que como derivado del petróleo presenta unas cualidades apropiadas para la realización del proceso. Otras alternativas que suelen ser utilizadas son gasóleos y gasolinas.

2.1.2. Máquina de electroerosión.

Para efectuar los ensayos de mecanizado por electroerosión, se utiliza una máquina de electroerosión ONA DATIC D2030, la cual se puede observar en la Figura 2.1. Esta máquina dispone de un control numérico CNC DATIC F30. Las características básicas de esta máquina de EDM son las que se exponen en la Tabla 2.2.



Figura 2.1 Máquina de electroerosión ONA DATIC D2030.

Tabla 2.2 Características principales de la máquina de electroerosión ONA DATIC D2030

Propiedades	Valores
Recorrido del eje X	300 mm
Recorrido del eje Y	200 mm
Recorrido del eje Z	250 mm
Dimensiones del tanque de trabajo (X, Y, Z)	800 x 500 x 320 mm
Distancia máxima desde el cabezal a la mesa	520 mm
Peso máximo del electrodo	100 Kg
Peso máximo de la pieza	350 Kg
Potencia	30 A

De acuerdo con el manual de uso de la máquina, se recomienda seguir siempre los siguientes pasos para realizar correctamente el proceso:

- Puesta en marcha del interruptor general.
- Comprobar que los ceros de los ejes de la máquina están localizados.
- Fijación y alineado de la pieza a erosionar.
- Fijación y alineado del electrodo.
- Situarse en el punto de erosión y tomar referencia.
- Memorizar el decalaje.
- Comprobar la dirección del chorro de limpieza, tipo y caudal.
- Desactivar la limpieza.
- Subir el electrodo hacia arriba.
- Llenar el tanque (5 cm por encima del punto máximo a erosionar en la pieza).
- Operaciones máquina.
- Crear el programa.
- Revisar la sesión de trabajo.
- Ejecutar el programa.

Las máquinas de electroerosión disponen de unos programas prefijados, con la finalidad de facilitar al usuario el manejo de la máquina. A partir de la rugosidad superficial deseada, en términos de desviación media aritmética (R_a), se debe determinar el VDI según la siguiente expresión:

$$VDI = 20 * \log(10 * R_a) \quad (1)$$

El operario debe seleccionar el programa que corresponde al VDI deseado, y además seleccionar el criterio más adecuado para el proceso entre los tres que se indican a continuación:

- Criterio 1: máximo arranque
- Criterio 2: equilibrio arranque-desgaste
- Criterio 3: mínimo desgaste

Sin embargo, la máquina permite modificar todos los parámetros del proceso, lo cual será llevado a cabo en este trabajo para poder comprobar la influencia de algunos de los principales factores que intervienen en el proceso.

2.1.3. Parámetros del proceso.

Uno de los objetivos de la presente tesis doctoral es mostrar la relación entre los parámetros más significativos del proceso de electroerosión y el acabado de la pieza mecanizada, obteniendo al mismo tiempo criterios de desgaste y contaminación del electrodo utilizado. Bajo esta búsqueda de resultados, se ha definido el alcance de la investigación experimental, es decir, han sido elegidos los parámetros a mantener constantes en todos los ensayos realizados y los parámetros a variar.

Como se ha explicado brevemente en el capítulo anterior, entre los principales parámetros de los procesos de mecanizado por electroerosión se encuentra la intensidad de corriente I , el tiempo de impulso t_i y el tiempo de pausa t_o . Estos tiempos son significativos por estar directamente relacionados con la cantidad de energía que transmite el canal de plasma a la pieza de trabajo, y es sin duda la intensidad de corriente la que tiene una mayor influencia sobre la energía del canal de plasma.

La energía generada será la encargada de calentar el material de la pieza y producir su fusión e incluso evaporación, originando los cráteres característicos de la superficie de las piezas fabricadas mediante procesos de electroerosión y la superficie desgastada de los electrodos. La intensidad de corriente será el factor más relevante en el proceso de mecanizado, por su efecto sobre el acabado superficial de la pieza y el desgaste del electrodo, y por ese motivo es uno de los parámetros estudiados en esta tesis doctoral.

Los valores de intensidad de corriente y profundidad de penetración que han sido considerados en los ensayos de electroerosión, se muestran en la Tabla 2.3.

Como se observa en la tabla, para la intensidad de corriente se han seleccionado valores de 6, 8, 12 y 14 A. Este rango de intensidades de corriente supone un espectro suficientemente amplio para poder analizar el efecto de este parámetro del proceso.

Además de los parámetros propios del proceso de electroerosión, es importante analizar otros factores que también son relevantes en los resultados obtenidos, como son los relativos a la geometría de la pieza, entre los cuales se encuentra la profundidad de penetración z exigida por la geometría deseada.

La profundidad de penetración está directamente relacionada con el tiempo total de mecanizado y por tanto afectará a la tasa de eliminación de material. Además determinará el tiempo que existe interacción entre el electrodo y la pieza, lo cual se verá reflejado en el desgaste de la superficie de la herramienta. Como consecuencia, la profundidad de penetración es otro de los parámetros del proceso que se estudian en este trabajo.

Los valores de profundidad de penetración que han sido adoptados en los ensayos son de 3, 5 y 7 mm. Estos valores permitirán estudiar el desgaste gradual de la herramienta de corte en función de la longitud total que debe recorrer por el electrodo durante el mecanizado de la pieza.

El rango de valores de intensidad de corriente y profundidad de penetración con el que se ha trabajado en la presente tesis doctoral es el expuesto en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Rango de valores de los valores del proceso

Profundidad de penetración (mm)	Intensidad de corriente (A)
3	6
3	8
3	12
3	14
5	6
5	8
5	12
5	14
7	6
7	8
7	12
7	14

En los ensayos de electroerosión efectuados en esta tesis doctoral, se ha asumido diferentes valores para los factores analizados, manteniendo constantes los restantes parámetros del proceso. Para ello se han respetado las condiciones establecidas por el fabricante de la máquina para un VDI = 30 con electrodo de cobre y pieza de acero, las cuales se pueden observar en la Figura 2.2, salvo los factores que se desea analizar.

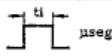
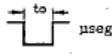
 TECNOLOGIA DATIC-F				E-Cu  St  TECNO: 0					
VDI	29			30			31		
CRITERIO	1	2	3	1	2	3	1	2	3
		6	5			5		7	6
		+200	+200			+200		+200	+200
 μseg		25	50			100		25	50
 μseg		8	15			25		8	15
 C		-	-			-		-	-
 V		60	60			60		60	60
 seg		0,3	0,3			0,3		0,3	0,3
 seg		0,6	0,6			0,6		0,6	0,6
V % vol.		4	1			<0,5		6	1
V W mm^3/min		28	16			15		45	25

Figura 2.2 Parámetros predefinidos para VDI = 30 con electrodo de cobre y pieza de acero [63].

Como se puede apreciar en esta tabla para un VDI = 30 el fabricante establece una intensidad de corriente de 5 A, tensión de vacío de 200 V, tiempo de impulso de 100 μs , tiempo de pausa de 25 μs , tiempo de retroceso de 0,3 segundos y tiempo de trabajo de 0,6 segundos. La relación porcentual del volumen de electrodo gastado respecto del volumen de material arrancado será menor del 0,5%, y la capacidad de arranque será de 15 mm^3/min .

2.1.4. Geometría de las piezas.

Para la definición de la geometría de las piezas a considerar en los ensayos, se ha tenido en cuenta una serie de requisitos:

- Emplear geometrías sencillas que condicionen mínimamente los resultados obtenidos.
- Que puedan ser colocadas cómodamente en la máquina de electroerosión.
- Que faciliten la observación de la superficie mecanizada, mediante las técnicas de medición de la rugosidad superficial y microscopía electrónica aplicadas.

- Minimizar el número de operaciones requeridas para la preparación de las piezas de partida.
- Minimizar el volumen de material necesario para limitar el coste de los ensayos.

De acuerdo con estos requisitos, los ensayos han sido realizados con piezas de acero inoxidable AISI-316 con unas dimensiones de 40 x 40 x 10 mm, de manera que en cada una de estas piezas se puede llevar a cabo una totalidad de 4 ensayos.

En la Figura 2.3 se muestra un esquema que recoge la geometría que ha sido considerada para las piezas sometidas a los ensayos de electroerosión. Como se observa en esta figura, las huellas resultantes de cada ensayo tendrán forma rectangular con unas dimensiones de 14 x 7 mm.

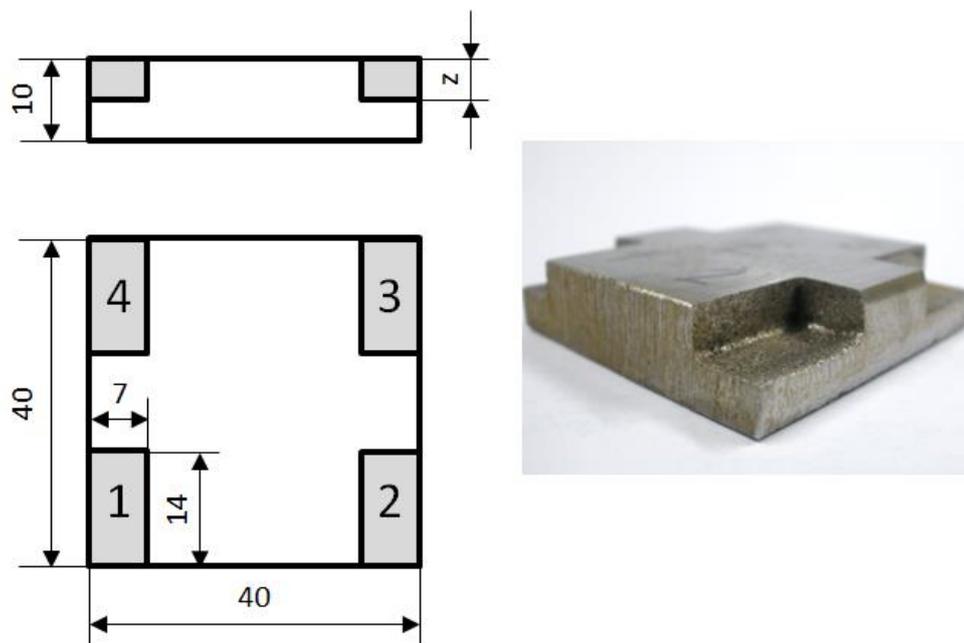


Figura 2.3 Esquema con la geometría de las piezas de trabajo.

Para todas las piezas se ha respetado la forma y dimensiones que se reflejan en esta figura, con el fin de facilitar la correcta localización de las piezas de partida con unos utillajes auxiliares.

El tamaño de estas piezas es adecuado para su introducción en la cámara de vacío del equipo de microscopía electrónica de barrido (SEM) utilizado para evaluar las imperfecciones de la superficie y estudiar la composición de la superficie desgastada de los electrodos. La forma abierta de las zonas a mecanizar en los sucesivos ensayos, permite facilitar la utilización de un rugosímetro para evaluar la rugosidad superficial, tanto en la cara frontal como en las caras

laterales, que corresponden respectivamente a la superficie horizontal y los flancos laterales de las zonas sometidas al proceso de electroerosión.

2.1.5. *Etapas de los ensayos.*

En la Figura 2.4 se representa un diagrama con las etapas que cubren la totalidad de las tareas que se requerirán para la realización de los ensayos, incluyendo tanto las tareas preparatorias auxiliares como la propia ejecución de los ensayos de mecanizado.

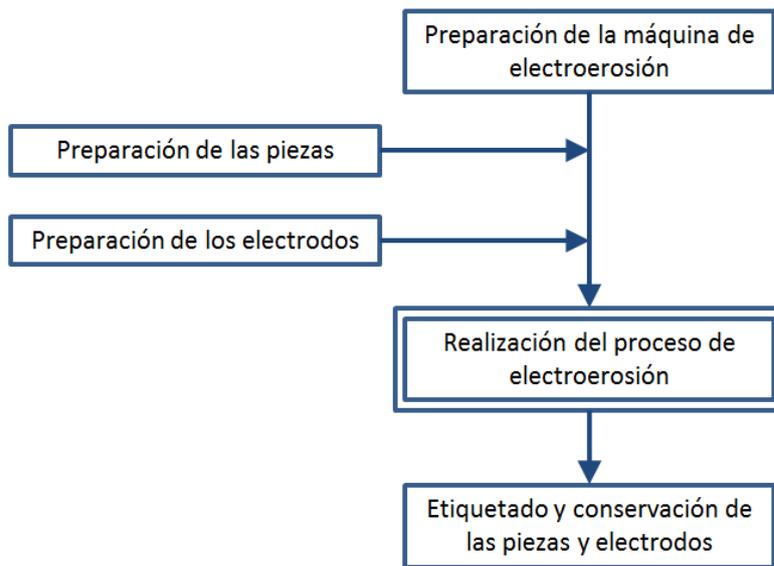


Figura 2.4 Etapas del proceso de electroerosión de cada ensayo definido.

Como se indica en este diagrama, las tareas necesarias para efectuar los ensayos incluyen el corte de las pletinas destinadas a la obtención de las piezas de partida, la preparación de los electrodos con anterioridad al comienzo de cada ensayo, la preparación de la máquina de electroerosión, la realización del proceso de mecanizado por electroerosión con las condiciones de corte deseadas, y el etiquetado y conservación de las piezas y electrodos para facilitar su posterior evaluación. Estas fases vendrán seguidas de la medición de la rugosidad superficial y la observación de la superficie mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).

Preparación de las piezas:

Con antelación a los ensayos de EDM, se procede a la preparación de las piezas de partida de acuerdo con la forma y dimensiones de la Figura 2.3. Estas piezas tendrán unas dimensiones de 40 x 40 x 10 mm y estarán constituidas por acero inoxidable AISI 316.

Las piezas de partida se obtienen mediante el corte de pletinas de 40 x 40 mm, utilizando la sierra de cinta de que se dispone en el laboratorio de máquinas-herramienta del Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación de la UPCT (Figura 2.5).



Figura 2.5 Sierra de cinta para la preparación de las piezas de partida.

Preparación de los electrodos:

Los electrodos utilizados en estos ensayos, serán fabricados a partir de una barra cuadrada de 20 x 20 mm de cobre, y con anterioridad a cada ensayo de electroerosión se procede al mecanizado del extremo para obtener una nueva herramienta.

En el primer apartado del capítulo siguiente se explicará en mayor detalle el método seguido para la preparación de los electrodos.

Preparación de la máquina de electroerosión:

Antes de cada ensayo, la máquina de electroerosión ONA DATIC D203, empleada en esta tesis doctoral, precisará algunos preparativos para garantizar la correcta ejecución de los ensayos.

En primer lugar, se deberá garantizar su limpieza y correcto mantenimiento, debiendo guardar especial cuidado con la limpieza del tanque y de los filtros del fluido dieléctrico, para evitar que la suciedad existente en el tanque pudiera adherirse a la pieza o al electrodo durante el proceso, alterando los resultados del proceso. Asimismo, se deberá disponer de suficiente fluido dieléctrico para llenar el tanque de trabajo y el circuito de circulación y filtrado, y un

excedente adecuado en el tanque externo de la máquina. En la Figura 2.6 se muestra el tanque de la máquina de electroerosión.



Figura 2.6 Tanque de la máquina de electroerosión ONA DATIC D 2030.

Dentro del tanque de la máquina se dispondrá de una mesa de trabajo cuya función será la de posicionar la pieza y facilitar la formación del circuito eléctrico entre el electrodo y la pieza. Para la correcta localización de las piezas que corresponden a las diferentes series de ensayos a la mesa de trabajo, se ha diseñado un utillaje en forma de escuadra. En la Figura 2.7 se muestra este utillaje sobre la mesa de trabajo en el interior del tanque, estando éste vacío para poder visualizar el utillaje descrito.



Figura 2.7 Utillaje para la fijación de las piezas.

Realización del proceso de electroerosión:

Una vez finalizadas las fases preparatorias anteriores, se puede proceder a la realización de los ensayos que han sido definidos en la Tabla 2.3.

Como primer paso es necesario colocar el electrodo en el cabezal porta-herramientas de que dispone la máquina. Una vez situada la herramienta, se colocará la pieza de partida con la ayuda del utillaje diseñado para este propósito.

Actuando manualmente sobre los mandos de la máquina, se hace que el electrodo toque la pieza en el punto de trabajo deseado y se establece el decalaje, que en este caso será el número 1. Una vez establecido el decalaje, se programa la máquina para la operación deseada utilizando las siguientes líneas de código del programa:

- 0010 ESTB DECA Nº 1
- 0020 TRAV X0 Y0 C0
- 0030 TRAV Z3
- 0040 SREG VDI30 CRIT3 TECNO
- 0050 EROS -3
- 0060 RTAC

El programa indica que el electrodo se sitúe en el decalaje establecido como número 1, se desplace hasta la posición (X0, Y0, C0) y finalmente se sitúe a una altura de 3 mm sobre la pieza. Una vez en esta posición, el electrodo empezará a descender en la dirección del eje z erosionando hasta la cota establecida para cada una de las series de ensayos, y a continuación finalizará el programa y volverá a situar el electrodo en la posición inicial (RTAC).

Para la programación de la máquina, se ha partido del programa por defecto para un valor de rugosidad superficial VDI = 30, con el criterio de acabado número 3 y la tecnología 0 correspondiente a electrodo de cobre y pieza de acero.

Los valores de los parámetros del proceso que se mantendrán constantes en los ensayos de EDM serán los siguientes (Figura 2.2):

- Tensión: +200 V
- Tiempo de impulso: 100 μ s
- Tiempo de pausa: 25 μ s

- Parámetro de referencia del servo: 60 V
- Tiempo de retroceso: 0.3 s
- Tiempo de trabajo: 0.6 s

En la Figura 2.8 se muestra el menú de la máquina en el cual se modificará la intensidad de corriente antes del comienzo de cada ensayo.



Figura 2.8 Menú de edición de los parámetros del programa para la máquina.

En la Figura 2.9 se muestra la pantalla del CNC de la máquina de electroerosión durante la ejecución de uno de los ensayos de mecanizado.

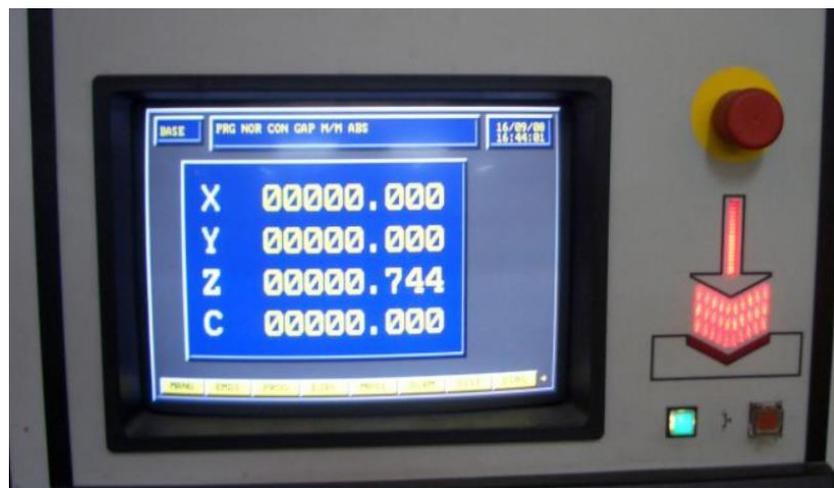


Figura 2.9 Indicación de correcto funcionamiento de la máquina de EDM.

Una vez finalizado el proceso, se esperará un cierto tiempo para asegurar que la pieza se haya enfriado y se procederá a su extracción de la máquina. De forma similar, se procederá a la extracción del electrodo cada 2 ensayos, por las razones que se señalan en el primer apartado del capítulo siguiente.

Etiquetado y conservación de piezas y electrodos:

En la Figura 2.10 y la Figura 2.11 se muestra un ejemplo de los electrodos y piezas de trabajo que han sido generados durante los ensayos de EDM. En la Figura 2.10 se ilustra, a modo de ejemplo, el etiquetado de una de las piezas obtenidas durante los ensayos, mientras que en la Figura 2.11 se observan las etiquetas que se pegarán en la superficie lateral de la punta de los electrodos.

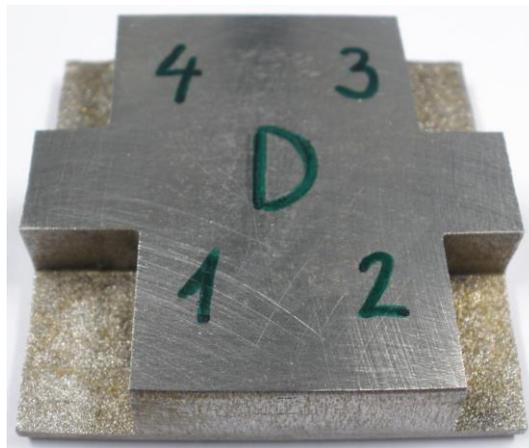


Figura 2.10 Ejemplo de etiquetado de piezas de trabajo.

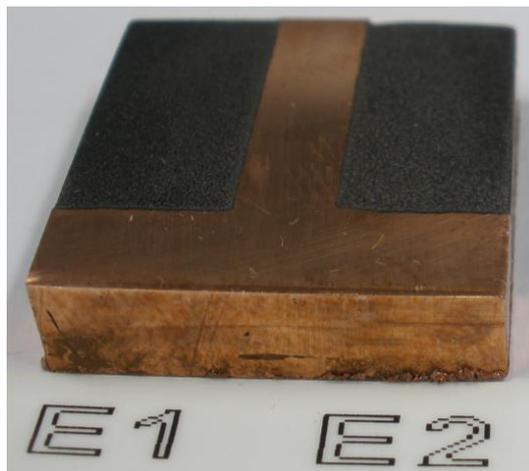


Figura 2.11 Ejemplo de etiquetado de electrodos.

Para garantizar una correcta medición de la rugosidad superficial y composición del material de la superficie, la pieza y electrodos se someterán a un taque químico y soplado con aire a presión, con el fin de eliminar cualquier resto de líquido dieléctrico o cualquier otro tipo de

suciedad que pudiera afectar al resultado de las medidas. El ataque ha de ser realizado por inmersión o mediante un algodón embebido en el líquido limpiador durante algunos segundos.

Para la limpieza de la superficie de las piezas se recurrirá a nital, que es una solución de ácido nítrico y alcohol, adecuada para el ataque y limpieza de la mayoría de los metales ferrosos. Sin embargo, en el caso de los electrodos se utilizará únicamente alcohol, para permitir la medición de la contaminación en la superficie de la herramienta, por lo cual no se puede emplear el nital puesto que eliminaría parte de los residuos de la superficie del electrodo.

Tras el ataque químico de estas superficies, se realiza un breve soplado con aire comprimido para eliminar cualquier resto de fibras de algodón o papel que se pudieran haber adherido durante la limpieza, o cualquier otro resto de suciedad como puede ser el polvo ambiental.

Por último se procederá a la adecuada conservación de las piezas y electrodos, para evitar que resulten dañadas o alteradas antes de llevar a cabo su análisis.

2.1.6. Evaluación de la superficie de la pieza.

En este apartado se explicarán las técnicas que serán empleadas para la medición de las irregularidades existentes en las piezas mecanizadas y el registro de los valores de tiempo de mecanizado.

Medición de la rugosidad superficial de las piezas:

Como resultado del proceso de electroerosión por penetración, se obtiene la geometría negativa de los electrodos en las piezas resultantes, esto es algo que es conocido de forma suficiente, pero las características de las superficies resultantes y su relación con los parámetros del proceso son de interés en el campo de la ingeniería de fabricación.

Es imprescindible conocer con antelación a la ejecución del proceso, la calidad superficial de las piezas y el desgaste que sufrirá el electrodo. Bajo este objetivo, se han definido los ensayos a realizar en las piezas, y la primera obtención de resultados que se precisa es la medición de la rugosidad en las superficies resultantes de las piezas.

Para realizar la medición de rugosidades se empleará un rugosímetro modelo HOMMELWERKE T1000 (Figura 2.12). El cual utiliza un palpador mecánico tipo TK 300 con un filtro ISO 11562. El rugosímetro transmite los datos recogidos a un ordenador, éste los procesará por medio del software Turbo Datawin NT 1.48 (Figura 2.13).



Figura 2.12 Rugosímetro modelo HOMMELWERKE T1000.

Turbo Datawin-NT 1.48 - [UPCartagena]

Prog.med. Perfil Elab. Ajuste Formul. Prespect. Opcion. Ventana Ayuda

F1 F2 F3 F4 F5 F6 F7 F8 F9 F10 F11 F12

Firma: Universidad Politécnica de Cartagena
 Usuario:
 Departamento:
 Pieza de trabajo:
 Comentarios:

Condiciones de medida	Parámetros DIN e ISO	Documentación
HOMMELWERKE Turbo Datawin-NT 1.48 Condiciones de medic Tipo de palpador TK300 Zona de medicion 320 µm Trayecto de medicion 4.80 mm Lc (Cut Off) 0.800 mm Lc / Ls: 300	Ra 5.77 µm RzISO 31.01 µm Wt' 131.82 µm Pt' 188.11 µm Rt 39.37 µm Rmax 39.37 µm Rq 7.20 µm	Cliente Dirección Usuario Tipo de pieza N° de serie Responsable

Figura 2.13 Software para datos de rugosidad superficial Turbo Datawin NT 1.48.

El programa Turbo Datawin NT 1.48 permite consultar el perfil primario, perfil de rugosidad y perfil de ondulación, así como los diferentes parámetros que se suelen utilizar para representar la rugosidad superficial.

Dentro de la superficie de la pieza, la rugosidad superficial se medirá en la cara frontal y en la cara lateral de mayor longitud. La cara frontal corresponde a la superficie inferior de la zona mecanizada, mientras que se adopta como cara lateral el flanco de mayor longitud. La Figura 2.14 representa el recorrido seguido por el palpador del rugosímetro durante la explicación de la superficie mecanizada, en las dos caras de la geometría generada durante el proceso de electroerosión.

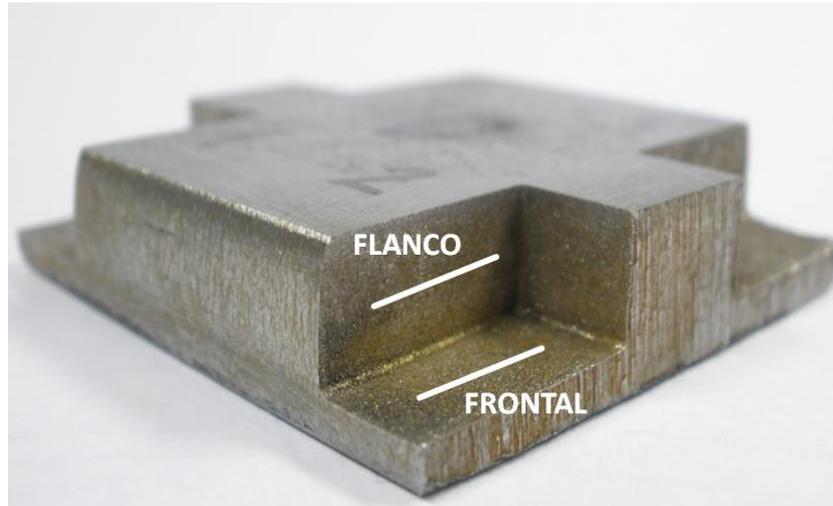


Figura 2.14 Selección de recorrido del palpador en las piezas mecanizadas.

Análisis mediante microscopía electrónica:

La medición de la rugosidad superficial aporta una valiosa información acerca del acabado superficial de la pieza, pero conviene poder contrastar estos resultados con el análisis de la superficie mediante microscopía electrónica de barrido (Scanning Electron Microscopy, o también conocida por las siglas en inglés SEM).

El equipo utilizado para ello es un microscopio electrónico de barrido Hitachi S-3500N, disponible en los laboratorios del SAIT (Servicio de Apoyo a la Investigación Tecnológica) de la Universidad Politécnica de Cartagena. Este equipo se ilustra en la Figura 2.15

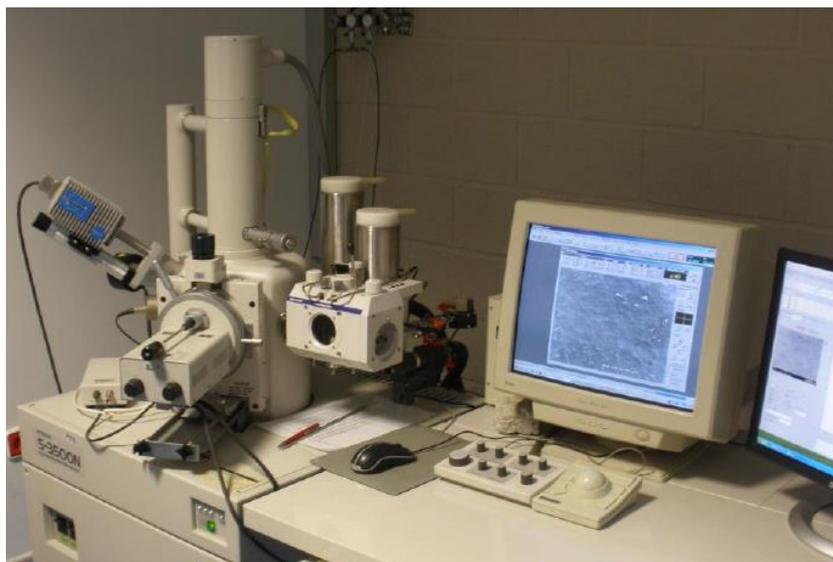


Figura 2.15 Microscopio electrónico de barrido (SEM) de la UPCT.

A continuación se facilita un resumen de las características del microscopio electrónico que ha sido aplicado para la observación de la superficie desgastada:

- Cañón de electrones con un voltaje acelerador de 0,5 a 30 kV, ajustable por pasos.
- Fuente de electrones con filamento de W, polarización automática y alineamiento electrónico del cañón.
- Sistema de lentes con supresión de histéresis. Corriente de sonda con ajuste manual o automático, ajustable desde 1 pA a 1 mA. Corrección de astigmatismo manual y electrónica.
- Movimientos motorizados en los ejes X e Y.
- Resolución de imagen de electrones secundarios de al menos 3,0 nm, en modo de alto vacío.
- Resolución de imagen de electrones retro-dispersados de al menos 5,0 nm, en modo de presión variable. Este detector trabaja en modo composicional o topográfico.
- Rango de magnificación desde 18 hasta 300.000x, en más de 60 etapas.
- Cámara infrarroja.
- Sistema de vacío con control de evacuación, provisto de una bomba difusora y dos bombas rotatorias.
- Enfoque manual y automático, con ajuste grueso y fino. Rastreo automático del foco.

Además, este equipo cuenta con una cámara digital de alta resolución, cuyas características más generales son las siguientes:

- Resolución mínima de 2624x4000 píxeles.
- Adquisición de hasta 8 fps.
- Integración de cuadros.
- Obtención de imágenes con hasta 16 bits de rango dinámico.
- Enfriamiento por Peltier.
- Obturador electrónico.
- Exposición ajustable desde 10 ms a 10 s.

Las imágenes de microscopía electrónica han sido procesadas mediante el programa de imagen Image-pro Plus (de Media Cybernetics). Esta aplicación permite determinar longitudes, ángulos, áreas, perímetros, huecos, redondez y relación de aspecto.

Las imágenes SEM se deben efectuar en zonas que sirvan para contrastar las medidas obtenidas mediante el rugosímetro. Por ello se tomarán en determinados puntos de la cara frontal y la cara lateral de las piezas, coincidiendo con las zonas en que se lleva a cabo la medición de la rugosidad superficial, como se puede apreciar en la Figura 2.16.

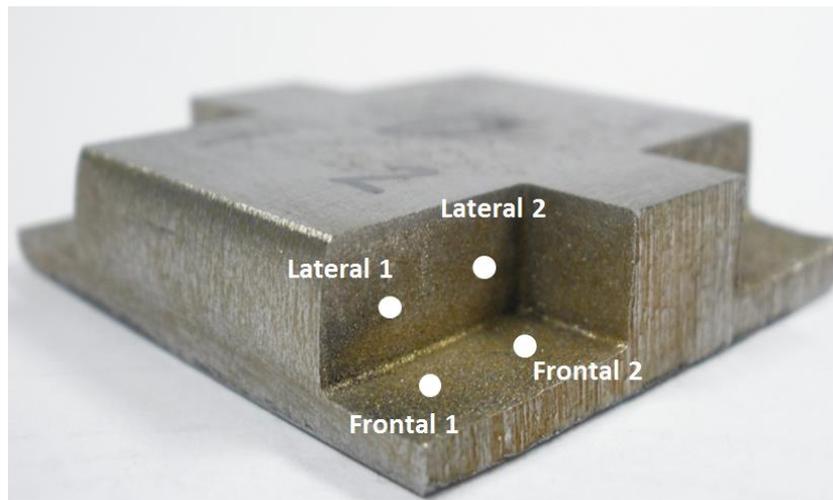


Figura 2.16 Selección de puntos para toma de imágenes SEM en las piezas mecanizadas.

Es recomendable realizar un seguimiento del desplazamiento de la muestra dentro de la cámara de vacío del microscopio para poder situarla correctamente en la posición indicada, para lo cual se recurre a la cámara de infrarrojos de que dispone el equipo y cuya imagen se visualiza en un monitor auxiliar (Figura 2.17).



Figura 2.17 Imagen monitorizada de la muestra dentro del microscopio electrónico de barrido.

Las imágenes de microscopía electrónica obtenidas servirán para observar los cráteres ocasionados por las descargas eléctricas en las piezas y electrodos. Además, en el caso de los electrodos se efectuará un mapeado de la superficie, para comprobar las alteraciones producidas en la composición del material de la herramienta, a causa de la contaminación por el material que proviene del material de trabajo.

Registro de tiempos de mecanizado:

Durante la realización de los ensayos, se llevará a cabo la medición del tiempo transcurrido durante el arranque de material, para determinar la tasa de eliminación de material, y por tanto poder deducir la productividad que se alcanza en el proceso de corte.

El registro del tiempo de mecanizado se realizará mediante un cronómetro, desde que se pulsa el botón de marcha hasta que la máquina indica que el proceso ha concluido.

2.2. Acabado superficial en la cara frontal de la pieza mecanizada.

En las piezas se puede distinguir entre dos regiones diferenciadas como son la cara frontal y las caras laterales o flancos. Estas zonas se ilustran en la Figura 2.18, y de acuerdo con los resultados que se muestran a continuación se comprueba que existen importantes diferencias entre ellas, teniendo en cuenta que las caras laterales presentan un tiempo de exposición a la acción del electrodo más prolongado que la cara frontal de las piezas.

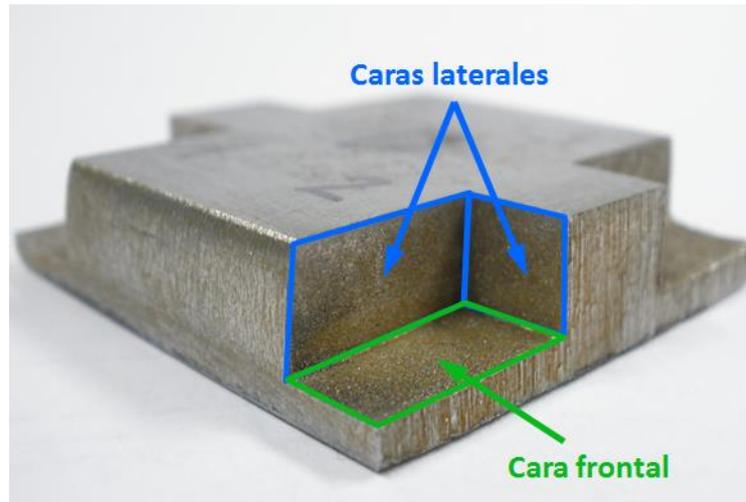


Figura 2.18 Identificación de la cara frontal y caras laterales de las piezas.

En la cara frontal, el tiempo de exposición a las descargas eléctricas es el mismo para todos los puntos de dicha cara. Sin embargo, en las caras laterales este tiempo dependerá de la profundidad de penetración seleccionada en cada ensayo. Por ello resulta de interés el registro del tiempo de mecanizado tanto en la cara frontal como en las caras laterales.

Se comenzará por el estudio de la rugosidad superficial de las piezas mecanizadas y su variación respecto de la intensidad de corriente y profundidad de penetración.

Posteriormente se considerará otro indicador como es la pendiente en el tramo central de la curva de tasa de material portante, y también se procederá a la correlación con los parámetros del proceso.

Por último, se estudiará el tamaño de los cráteres que se originan durante el proceso de corte, incluyendo la posible relación con los parámetros estudiados.

2.2.1. Rugosidad superficial.

Utilizando un rugosímetro HOMMELWERKE T1000, y siguiendo el procedimiento de medición de rugosidad superficial que se ha descrito en el primer apartado de este capítulo, se ha extraído el perfil de rugosidad de las caras frontales y laterales de las piezas mecanizadas.

En primera instancia, el rugosímetro recoge el perfil primario de la superficie analizada. En la Figura 2.19 se muestra un ejemplo del perfil registrado para uno de los ensayos, para una profundidad de penetración de 7 mm e intensidad de corriente de 14 A.

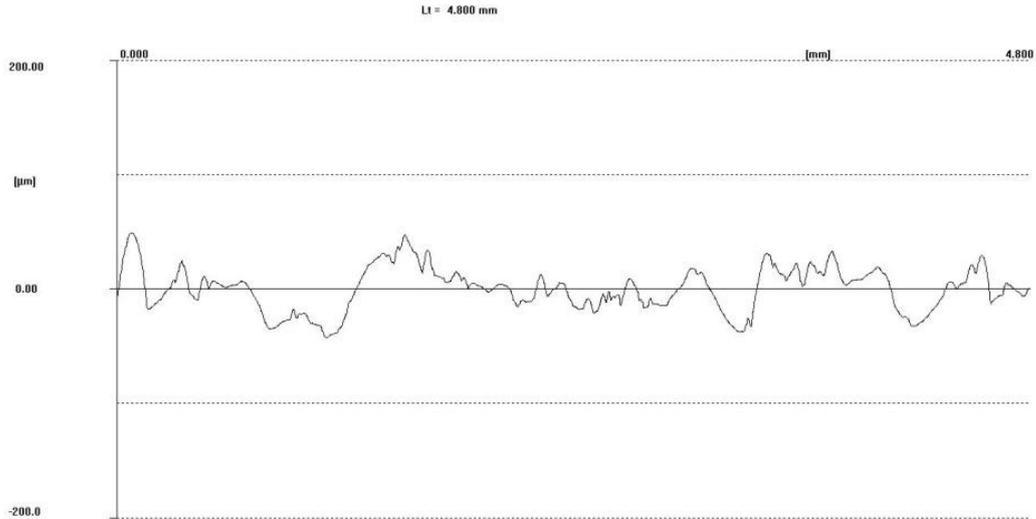


Figura 2.19 Ejemplo de perfil primario en la superficie de la pieza.

En la Figura 2.20 se representa superpuestos el perfil primario, perfil de rugosidad y perfil de ondulación para uno de los ensayos efectuados en este trabajo.

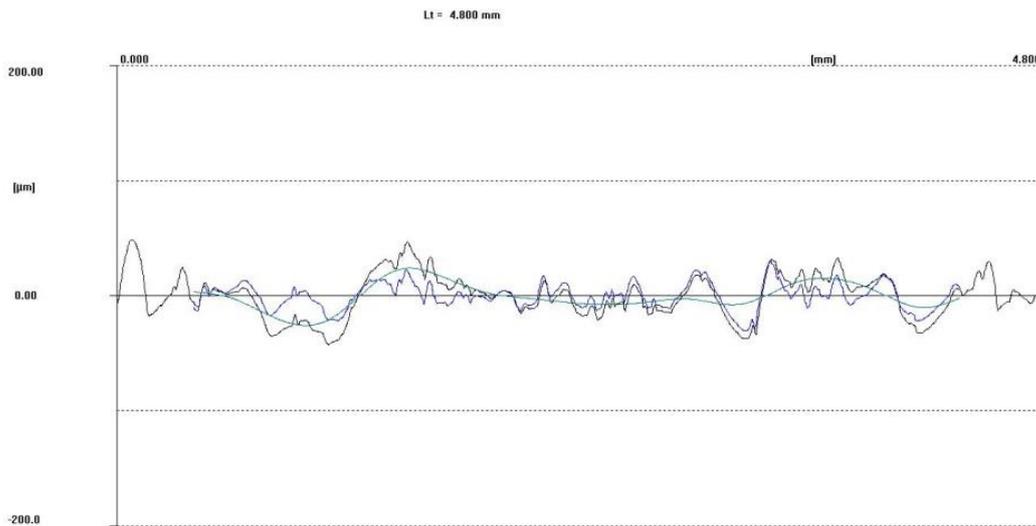


Figura 2.20 Ejemplo de perfil primario, perfil de rugosidad y perfil de ondulación en la superficie de la pieza.

A partir del perfil de rugosidad, el programa utilizado para el tratamiento de estos datos proporciona los parámetros de rugosidad que se desee estudiar. En este trabajo, para describir la rugosidad superficial de las piezas mecanizadas se considerarán tres parámetros de rugosidad, como son la desviación media aritmética (R_a), desviación media cuadrática (R_q) y altura máxima del perfil (R_t).

En la Tabla 2.4 se puede observar el valor medio de los parámetros de rugosidad que han sido registrados, como son la altura máxima del perfil (R_t), desviación media aritmética (R_a) y

desviación media cuadrática (Rq). Los resultados que se recogen en esta tabla corresponden al análisis de la cara frontal de la pieza.

Tabla 2.4 Rugosidad superficial en la cara frontal de la pieza.

Profundidad de penetración (mm)	Intensidad de corriente (A)	Altura máxima del perfil (μm)	Desviación media aritmética (μm)	Desviación media cuadrática (μm)
3	6	32,96	5,74	7,29
3	8	41,14	6,72	8,29
3	12	75,70	13,11	15,89
3	14	73,78	10,87	13,55
5	6	43,94	7,08	8,71
5	8	55,91	9,15	11,17
5	12	56,26	7,63	9,83
5	14	64,73	10,46	12,97
7	6	49,10	6,50	8,10
7	8	47,39	7,54	9,24
7	12	72,42	9,39	11,86
7	14	62,74	9,23	11,60

Los resultados obtenidos permitirán estudiar el efecto que presentan la intensidad de corriente y la profundidad de penetración sobre el acabado superficial de la pieza mecanizada.

Las Figuras 2.21-2.23 representan los resultados relativos a la variación de la rugosidad superficial frente a la intensidad de corriente para una profundidad de penetración de 3, 5 y 7 mm respectivamente. En la parte superior de estas figuras se puede observar la influencia de la corriente sobre la altura máxima del perfil (R_t), mientras que en la parte inferior se recoge también la variación que se produce en otros dos parámetros de rugosidad como son la desviación media aritmética (R_a) y la desviación media cuadrática (R_q).

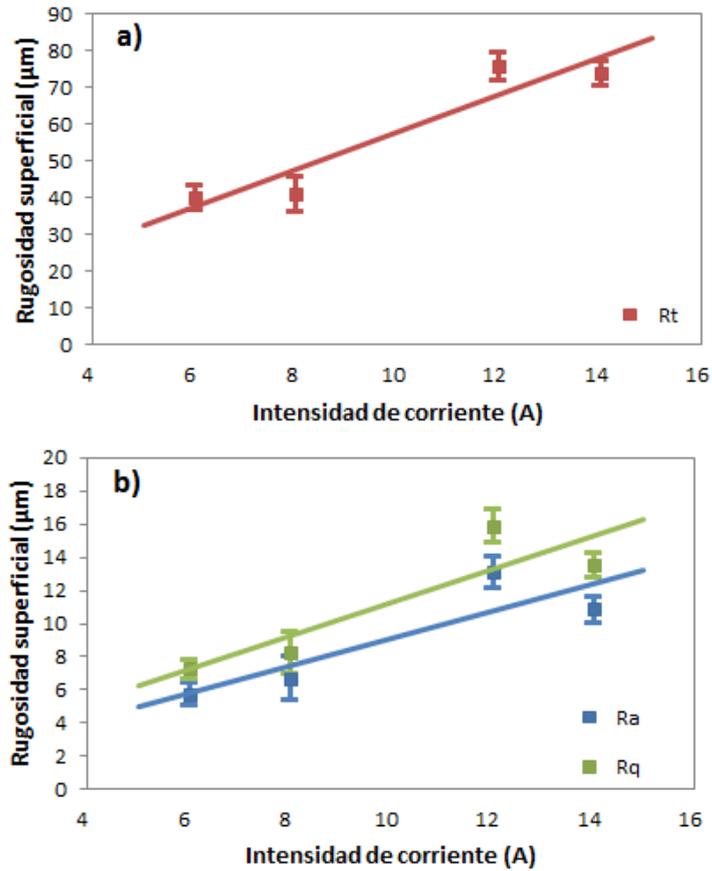


Figura 2.21 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara frontal para una profundidad de penetración de 3 mm.

Estas figuras muestran los valores medios obtenidos para estos parámetros de rugosidad que se recogen en la Tabla 2.4, así como los intervalos de error que corresponden a la incertidumbre asociada a la medición de estos parámetros.

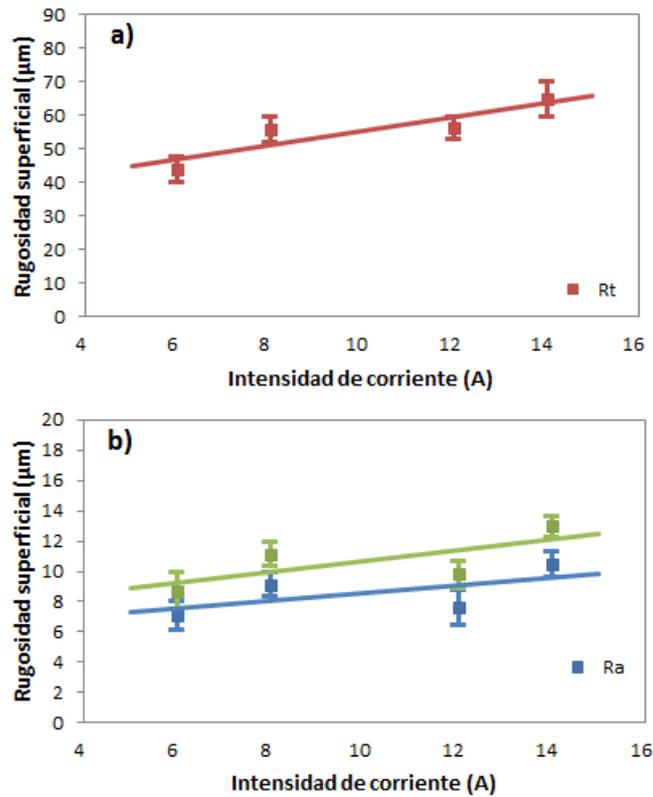


Figura 2.22 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara frontal para una profundidad de penetración de 5 mm.

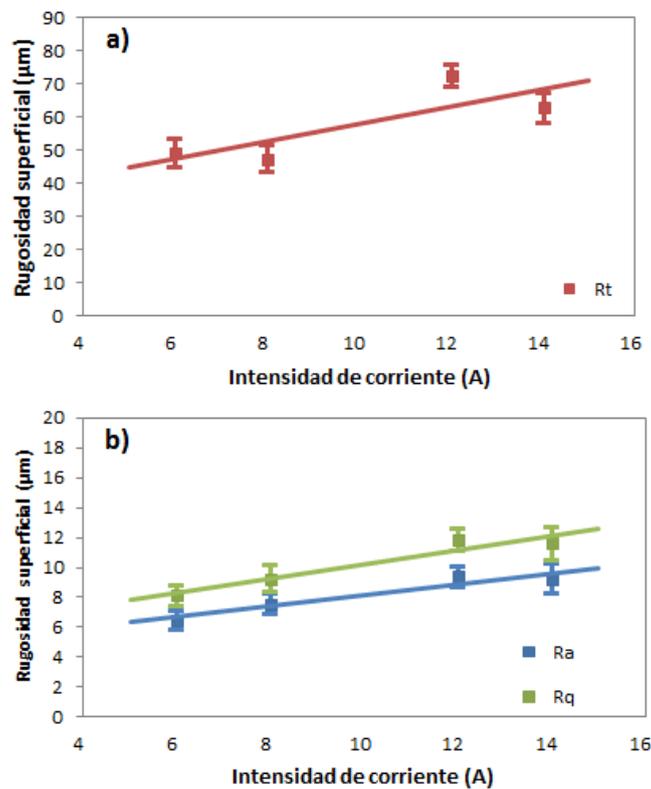


Figura 2.23 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara frontal para una profundidad de penetración de 7 mm.

En estas figuras que ilustran la rugosidad superficial para valores de profundidad de corte de 3, 5 y 7mm, se evidencia un fuerte incremento de los tres parámetros de rugosidad que han sido considerados en función de la intensidad de corriente, especialmente para la profundidad de corte más reducida.

El aumento de la rugosidad superficial con la intensidad de corriente, se debe a la aplicación de mayores cantidades de energía a través del canal de plasma, la cual provoca el arranque de porciones de material de mayor tamaño en las sucesivas descargas eléctricas.

Por otra parte, la menor variación que se observa en función de la intensidad de corriente para los valores más altos de profundidad de penetración, puede ser atribuida al efecto de la degradación del electrodo.

Al incrementar la profundidad de penetración se produce una mayor pérdida de material en la zona activa del electrodo a causa del tiempo adicional que el electrodo queda expuesto a las descargas eléctricas producidas al aumentar el tiempo de mecanizado, además del aumento de la dificultad para la limpieza de la escoria al encontrarse a una mayor distancia respecto de la superficie externa de la pieza de trabajo. Todo esto, se analizará más detalladamente en el siguiente capítulo, dedicado al estudio de la degradación de la herramienta.

En las Figuras 2.24-2.27, se ilustra la influencia de la profundidad de penetración en la rugosidad de la superficie mecanizada, para valores de intensidad de corriente de 6, 8, 12 y 14 A respectivamente.

En estas figuras se recoge en la parte superior la variación de la altura máxima del perfil (R_t) en función de la profundidad de penetración, mientras que en la parte inferior se ilustra el efecto de este parámetro del proceso sobre la desviación media aritmética (R_a) y la desviación media cuadrática (R_q).

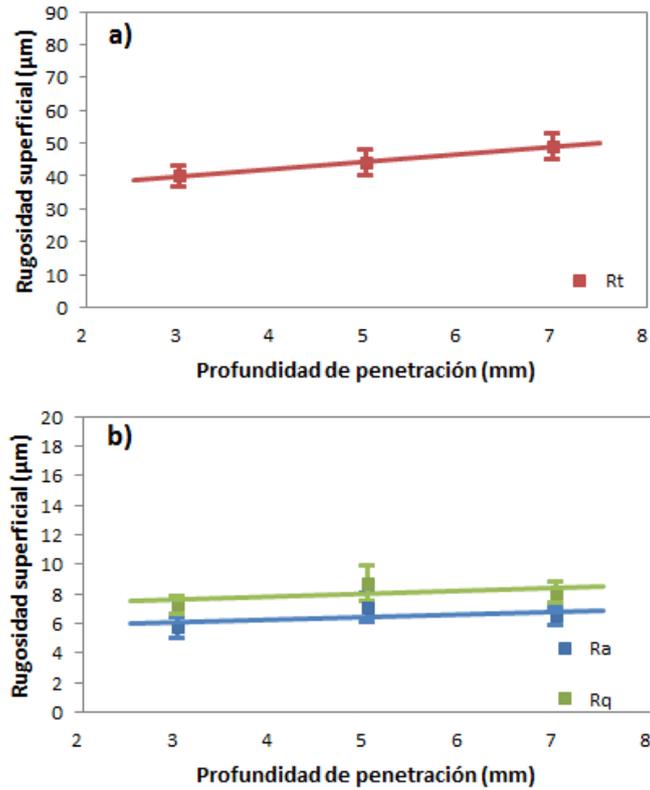


Figura 2.24 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara frontal para una intensidad de corriente de 6 A.

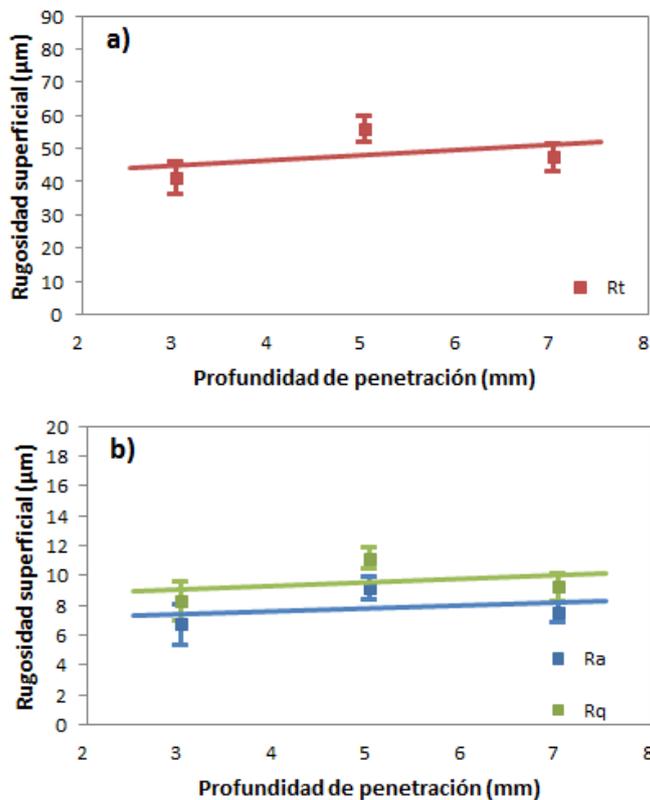


Figura 2.25 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara frontal para una intensidad de corriente de 8 A.

Los cuatro valores de intensidad de corriente de 6, 8, 12 y 14 A que han sido considerados en este trabajo, permiten cubrir un amplio rango de valores de este parámetro, con el fin de poder comprobar los efectos que provoca en las irregularidades de las superficies generadas mediante procesos de electroerosión.

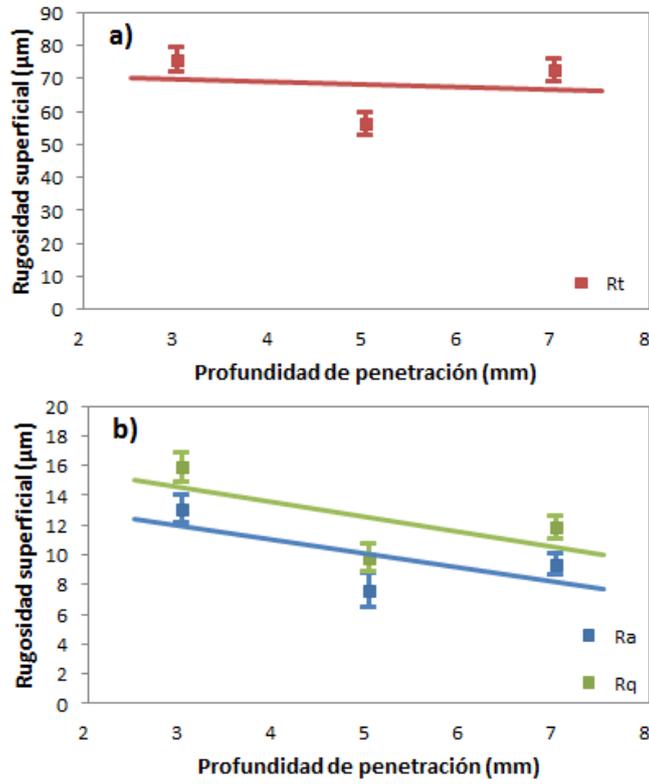


Figura 2.26 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara frontal para una intensidad de corriente de 12 A.

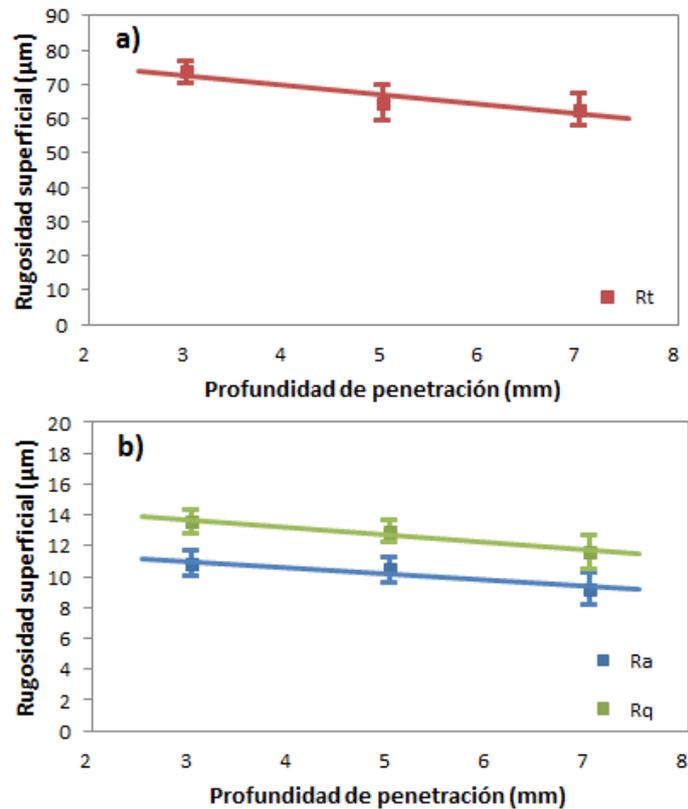


Figura 2.27 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara frontal para una intensidad de corriente de 14 A.

A partir de los resultados recogidos en las figuras anteriores, no es posible concluir una tendencia clara acerca de la influencia de la profundidad de penetración sobre la rugosidad superficial de la pieza.

Para valores reducidos de intensidad de corriente (6 y 8 A), se aprecia una ligera tendencia creciente en los parámetros de rugosidad en función de la profundidad de penetración, si bien esta tendencia parece invertirse para las intensidades de corriente más altas (12 y 14 A). Esto puede deberse a que la degradación del electrodo, como consecuencia de una mayor profundidad de penetración, tiene un mayor efecto en la calidad de la superficie mecanizada cuando se considera moderadas intensidades de corriente; y en cambio para mayores valores de esta última disminuya la importancia del estado de desgaste en que se encuentra la herramienta a causa de la profundidad de penetración, posiblemente como consecuencia de la prevalencia de los elevados niveles de energía aportada a la zona de corte a través del canal de plasma.

Por lo tanto, no es posible concluir una determinada relación entre la profundidad de penetración y el acabado superficial de la pieza resultante, puesto que el efecto de este

parámetro dependerá del valor seleccionado para la intensidad de corriente, y por tanto de la energía suministrada por las descargas eléctricas durante el proceso de corte.

La influencia de la profundidad de penetración sobre la pérdida de material en la superficie de la herramienta y la forma que adquiere la superficie desgastada del electrodo, se analiza en el siguiente capítulo, y de este modo se podrá comprender mejor la repercusión de que tiene este parámetro en el proceso de mecanizado por electroerosión.

La profundidad de penetración afectará a la tasa de eliminación de material, por su relación directa con el volumen de material eliminado. El análisis de los resultados obtenidos para la tasa de eliminación a causa de los parámetros del proceso, se lleva a cabo en el último apartado del presente capítulo.

2.2.2. Tasa de material portante.

Con el propósito de poder conocer en detalle la repercusión de los parámetros del proceso sobre las imperfecciones provocadas en la superficie de la pieza, se ha procedido al análisis no sólo de la rugosidad superficial sino también de la tasa de material portante y el tamaño de los cráteres que aparecen como consecuencia de las descargas eléctricas. En este apartado se aborda el estudio de las variaciones que tienen lugar en la curva de tasa de material portante, en función de las condiciones de corte asumidas para el proceso de mecanizado por electroerosión.

En la Figura 2.28 se representa a modo de ejemplo algunas de las curvas de tasa de material portante que han sido registradas durante el análisis del proceso, para una profundidad de corte de 5 mm.

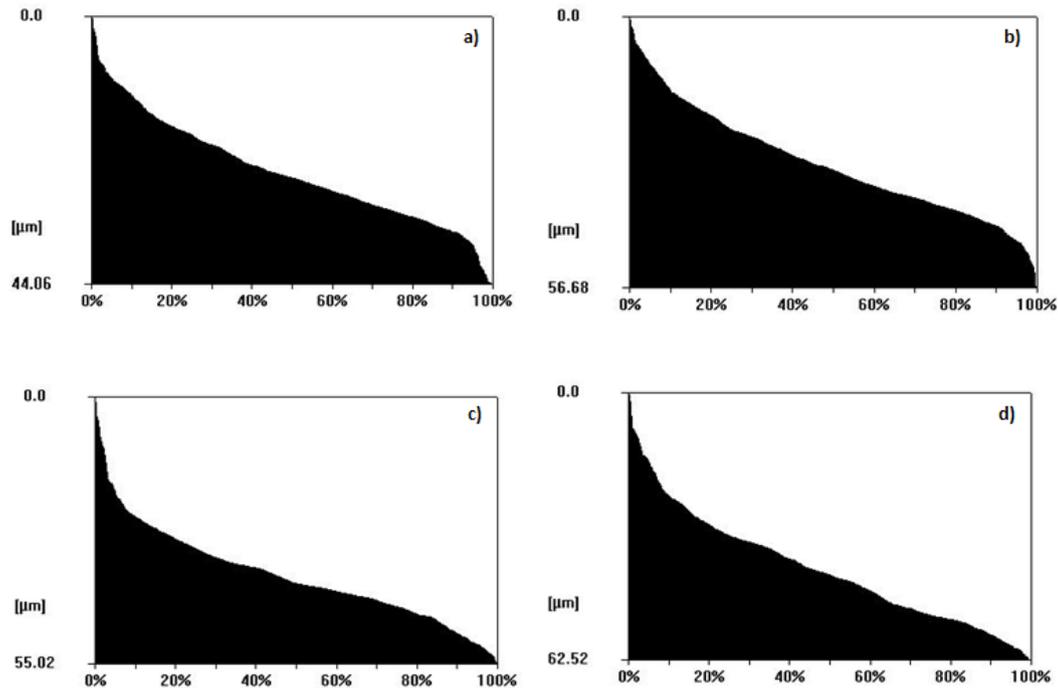


Figura 2.28 Curva de tasa de material portante en la cara frontal de la pieza para una profundidad de penetración de 5 mm: a) intensidad de corriente de 6 A, b) 8 A, c) 12 A y d) 14 A.

Para poder analizar la información proporcionada por las curvas de tasa de material portante, se ha optado por el estudio de la pendiente de la curva. Para ello se considera el tramo central de la curva, comprendido entre valores del 10 al 80% de tasa de material portante. Los puntos comprendidos fuera de este intervalo están sujetos a una mayor dispersión y por lo tanto no son tan representativos; por este motivo, se ha asumido la pendiente en el tramo central para el análisis de estas curvas [64].

De este modo, se define la pendiente en el tramo central de la curva de tasa de material portante, que corresponderá al intervalo comprendido entre el 10 y el 80% de tasa de material portante. Para la pendiente de la curva se adopta el símbolo γ_{CF} , dándole el subíndice CF hace referencia a la cara frontal de la pieza.

El cálculo de la pendiente de la curva de tasa de material portante se lleva a cabo a partir de los valores que corresponden a una tasa de material portante del 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 y 80%. Partiendo de estos datos se efectúa el ajuste por regresión a una línea recta, y de este modo se obtiene la pendiente en el tramo central de la curva, la cual será considerada para estudiar el efecto de los parámetros del proceso.

En la Tabla 2.5 se recoge el valor medio de los resultados obtenidos durante el cálculo de la pendiente de la curva de tasa de material portante para la cara frontal de la pieza mecanizada.

En la última columna de esta tabla se incluyen los valores del coeficiente de regresión R^2 , para poder comprobar la validez del ajuste.

Tabla 2.5 Pendiente de la curva de tasa de material portante en la cara frontal de la pieza

Profundidad de penetración (mm)	Intensidad de corriente (A)	Pendiente de la curva de tasa de material portante	Coefficiente de regresión R^2
3	6	2,22	0,9643
3	8	2,46	0,9922
3	12	4,87	0,9816
3	14	4,20	0,9790
5	6	2,75	0,9805
5	8	3,54	0,9842
5	12	2,69	0,9802
5	14	4,06	0,9900
7	6	2,42	0,9907
7	8	2,80	0,9970
7	12	3,47	0,9687
7	14	3,34	0,9938

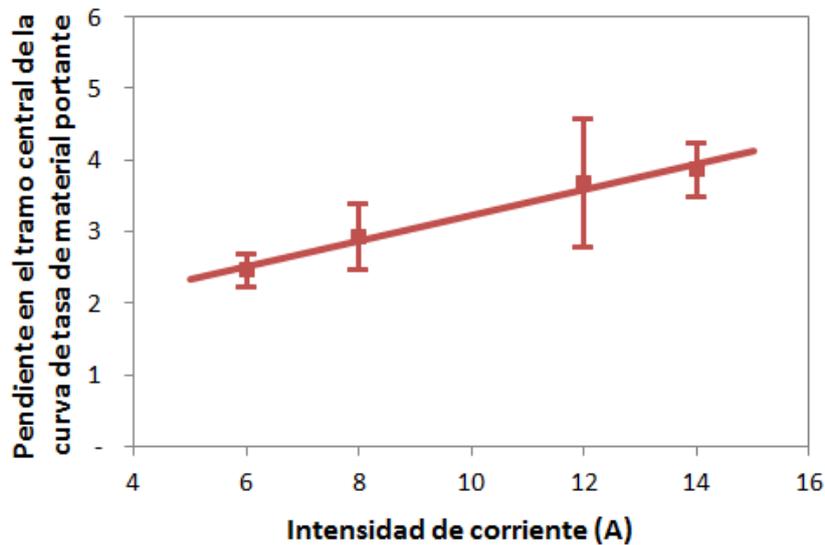


Figura 2.29 Pendiente en el tramo central de la curva de tasa de material portante en función de la intensidad de corriente en la cara frontal de la pieza.

En la Figura 2.29 se representa la pendiente de la curva de tasa de material portante en función de la intensidad de corriente. En esta figura se aprecia una tendencia creciente en la pendiente en el tramo de la curva de tasa de material portante. Estos resultados son consistentes con los obtenidos para la rugosidad superficial, los cuales han sido analizados en el apartado anterior.

La tendencia que se aprecia en esta figura para la pendiente de la curva de tasa de material portante, se puede expresar mediante la siguiente ecuación, si bien es necesario tener en cuenta la elevada dispersión que se observa en algunos puntos.

$$\gamma_{CF} = 1,455 + 0,178 I \quad (2)$$

Esta ecuación representa el incremento lineal que se produce en la pendiente de la curva en función de la intensidad de corriente. Esto se puede atribuir al aumento del tamaño de los cráteres a causa de la mayor energía calorífica aportada por el canal de plasma para valores crecientes de intensidad de corriente, lo cual se estudia en el siguiente apartado de este capítulo. El incremento del tamaño de los cráteres implica, no sólo el aumento de su diámetro, sino también una mayor profundidad de esas depresiones que caracterizan la textura de las superficies generadas mediante procesos de electroerosión.

De forma análoga, Figura 2.30 ilustra la variación de la tasa de material portante en la cara frontal de la pieza en función de la intensidad de corriente.

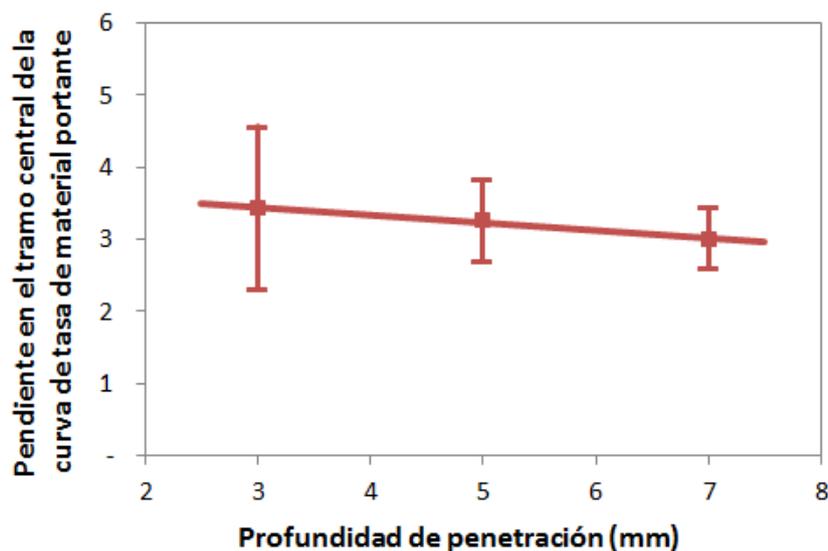


Figura 2.30 Pendiente en el tramo central de la curva de tasa de material portante en función de la profundidad de penetración en la cara frontal de la pieza.

En esta figura se observa una elevada dispersión en la totalidad de los puntos, lo cual no permite deducir una clara relación entre la pendiente de la curva de tasa de material portante y los valores seleccionados para la profundidad de penetración.

Como sucedió durante el estudio de la rugosidad superficial que se llevó a cabo en el apartado anterior, no es posible determinar la influencia que presenta la profundidad de penetración sobre la tasa de material portante, posiblemente debido a la mayor repercusión que tendrá la

intensidad de corriente a través del aumento de la energía suministrada por el canal de plasma.

2.2.3. *Tamaño de los cráteres.*

Los procesos de mecanizado por electroerosión se caracterizan por la formación de cráteres en la superficie de las piezas mecanizadas, siendo el tamaño de estos cráteres una de las propiedades más representativas del acabado superficial de las piezas generadas mediante estos procesos de mecanizado.

Por este motivo, en esta tesis doctoral se considera conveniente incluir el análisis del tamaño de los cráteres para poder comprender las relaciones existentes entre los parámetros del proceso y el acabado superficial de las piezas resultantes. Con este propósito se recurrirá a microscopía electrónica de barrido (SEM), para poder capturar con elevada precisión las imágenes que permitirán identificar el tamaño y distribución de los cráteres que se originen sobre la superficie mecanizada, a causa de las descargas eléctricas generadas durante el proceso de electroerosión.

En este apartado se incluye el estudio del tamaño de los cráteres que se observan en la cara frontal de la pieza, mientras que las irregularidades de la cara lateral serán analizadas en otro apartado posterior.

Para la obtención de las imágenes de microscopía electrónica se abarcará un área suficientemente amplia para poder visualizar un elevado número de cráteres que permita deducir el valor medio que corresponde al diámetro del cráter.

En la Figura 2.31 se ilustra a modo de ejemplo las imágenes SEM capturadas durante la observación de la textura de la superficie mecanizada para las diferentes condiciones de corte consideradas en los ensayos de mecanizado por electroerosión. Las imágenes que se muestran en esta figura corresponden a una profundidad de penetración de 5 mm, e incluyen un ejemplo de la textura que se aprecia en la superficie mecanizada para intensidades de corriente de 6, 8, 12 y 14 A.

De manera análoga, se ha explorado el tamaño de cráter en la totalidad de las piezas generadas para las distintas condiciones de corte que han sido descritas al comienzo del este capítulo, en el apartado dedicado a la metodología experimental.

Las imágenes SEM permiten comprobar la homogeneidad que existe en la distribución de los cráteres a lo largo de la superficie mecanizada, lo cual facilita el cálculo del valor medio de diámetro del cráter a partir de las depresiones que se detectan en estas figuras.

En las imágenes SEM de la Figura 2.31, se aprecia un claro incremento en el diámetro de los cráteres de la superficie electroerosionada, lo cual puede ser atribuido al aumento de la energía calorífica provocada por las descargas eléctricas para valores crecientes de intensidad de corriente.

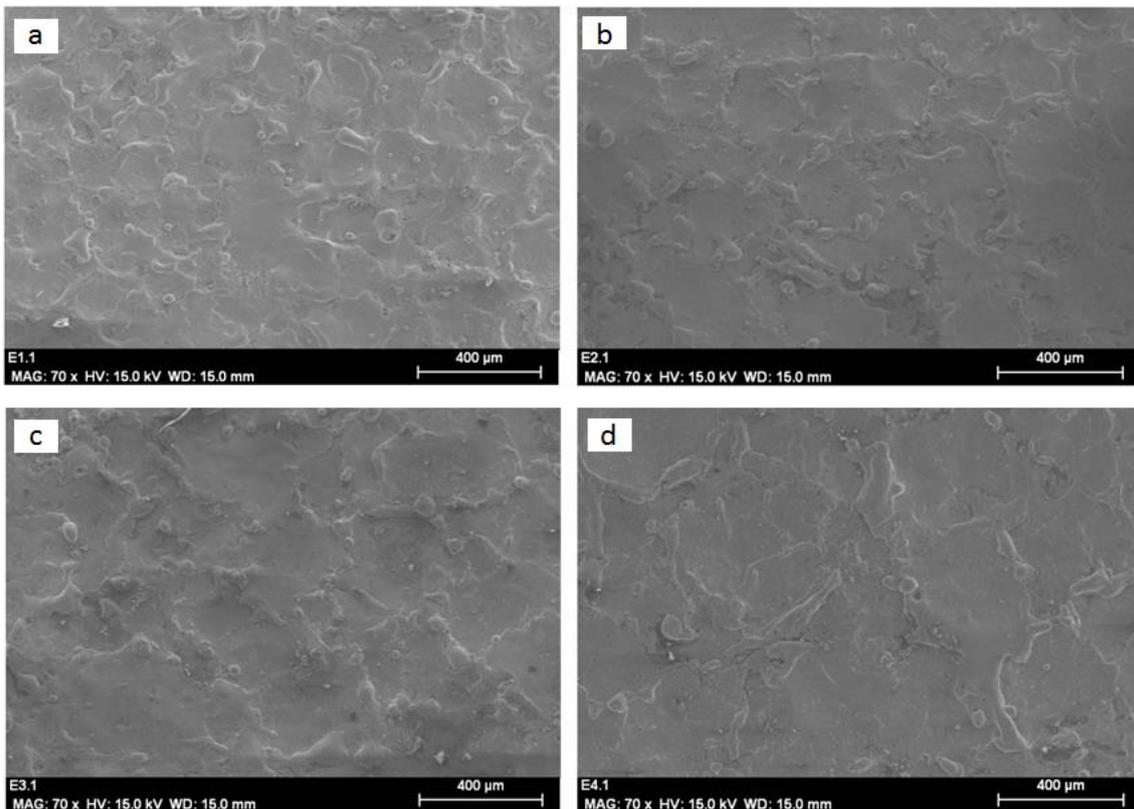


Figura 2.31 Imágenes SEM de la cara frontal de la pieza para profundidad de penetración de 5 mm: a) intensidad de corriente de 6 A, b) 8 A, c) 12 A y d) A.

La Tabla 2.6 muestra el valor medio del diámetro del cráter que ha sido deducido a partir de las imágenes SEM correspondientes a los ensayos efectuados con los diferentes valores de los parámetros del proceso.

Tabla 2.6 Diámetro de los cráteres en la cara frontal de las piezas

Profundidad de penetración (mm)	Intensidad de corriente (A)	Diámetro de los cráteres de la cara frontal (μm)
3	6	146
3	8	187
3	12	215
3	14	245
5	6	138
5	8	197
5	12	283
5	14	343
7	6	159
7	8	213
7	12	299
7	14	378

De acuerdo con los resultados que se recogen en la Tabla 2.6, se comprueba que el diámetro del cráter aumenta claramente en función de la intensidad de corriente asumida para la realización del proceso de electroerosión, observando esta misma tendencia para todos los valores de profundidad de penetración.

La Figura 2.32 representa los valores medios de diámetro del cráter, incluyendo los intervalos de error que corresponden a la dispersión de estos valores en términos de desviación típica. En esta figura se evidencia la tendencia creciente del tamaño de los cráteres en función de la intensidad de corriente en la cara frontal de la pieza.

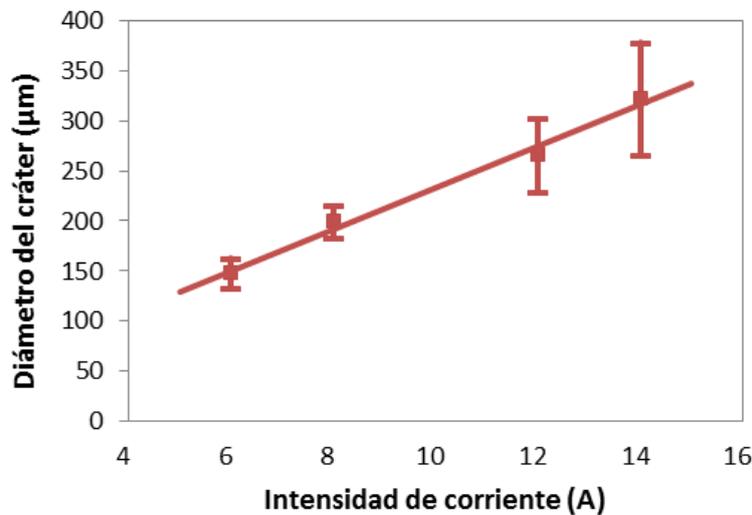


Figura 2.32 Diámetro del cráter en función de la intensidad de corriente en la cara frontal de la pieza.

Para describir el valor del diámetro de los cráteres en la superficie que corresponde a la cara frontal dependiendo del valor adoptado para la intensidad de corriente, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$d_{CF} = 25,875 + 20,773 I \quad (3)$$

Se comprueba que el diámetro del cráter permite representar con mayor claridad el efecto de la intensidad de corriente sobre la calidad de la superficie mecanizada, en comparación con la tendencia que se observa en las figuras que ilustran la rugosidad superficial y la pendiente de la curva de tasa de material portante. Por lo tanto, se concluye que el valor medio del diámetro de los cráteres se puede recomendar como indicador del acabado superficial alcanzable en función de la intensidad de corriente.

De manera análoga, la Figura 2.33 refleja la variación que se observa en el diámetro de los cráteres en función de la profundidad de penetración, para la superficie que corresponde a la cara frontal de la pieza electroerosionada.

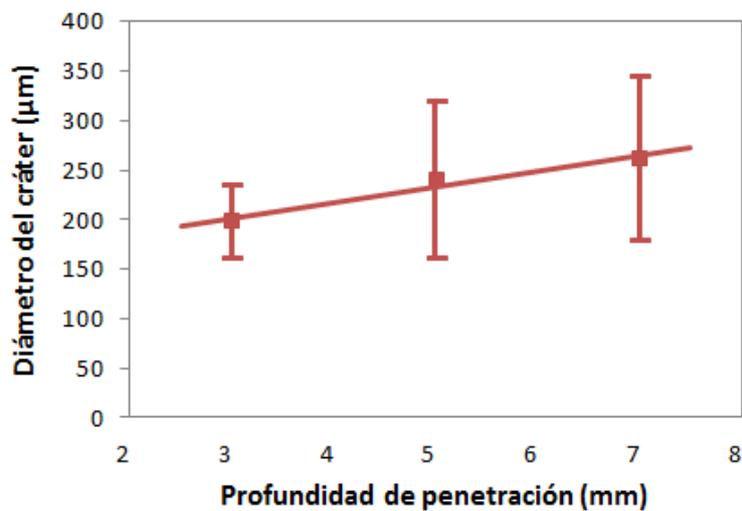


Figura 2.33 Diámetro del cráter en función de la profundidad de penetración en la cara frontal de la pieza.

De acuerdo con esta figura, se aprecia un ligero incremento en el valor medio del diámetro del cráter conforme aumenta la profundidad de penetración. No obstante, existe una alta dispersión en los resultados obtenidos, y como consecuencia no es posible deducir una tendencia clara en el tamaño de los cráteres frente a este parámetro del proceso, de un modo similar a lo que sucedió anteriormente durante el análisis de la rugosidad superficial y tasa de material portante.

Cabría prever que la profundidad de penetración se traduzca en un empeoramiento de la calidad superficial, debido a un mayor tamaño de las depresiones originadas en forma de cráter, ya que da lugar a un mayor tiempo de mecanizado y por tanto hace aumentar la cantidad de calor transmitido a la superficie de trabajo, y además dificulta la acción de refrigeración de la zona de corte y extracción de escoria que efectúa el flujo del fluido dieléctrico. Sin embargo, probablemente la influencia de este parámetro no se aprecie con claridad a causa de la prevalencia del aumento de la energía aportada por parte de la intensidad de corriente.

En efecto, el incremento del diámetro del cráter es una consecuencia de la elevación de la energía calorífica transferida a la superficie de trabajo, si bien esta última se ve afectada sobre todo por la intensidad de corriente adoptada para el proceso.

2.3. Acabado superficial en la cara lateral de la pieza mecanizada.

Al igual que se ha llevado a cabo anteriormente en relación con la cara frontal, en este capítulo se analiza las imperfecciones que se producen en la cara lateral de las piezas sometidas a procesos de electroerosión.

Las caras laterales están más tiempo expuestas a este proceso de mecanizado, y hasta que no exista un gap suficientemente amplio entre el electrodo y la cara lateral de la pieza se seguirán originando descargas eléctricas sobre esta superficie de la pieza. Esto hace pensar que esta superficie sufra un número mayor de descargas eléctricas, si bien la transferencia de calor al material de trabajo en la cara frontal puede ser más elevada.

Con el propósito de estudiar detalladamente las irregularidades que se producen en la cara lateral de las piezas mecanizadas, se seguirá un procedimiento análogo al aplicado en el apartado anterior para la cara frontal. Por lo tanto, se analizará tanto la rugosidad superficial como la tasa de eliminación de material y el tamaño del cráter.

2.3.1. Rugosidad superficial.

Siguiendo el mismo procedimiento que ha sido empleado anteriormente para la rugosidad superficial en la cara frontal de las piezas mecanizadas, se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Rugosidad superficial en la cara lateral de las piezas.

Profundidad de penetración (mm)	Intensidad de corriente (A)	Altura máxima del perfil (μm)	Desviación media aritmética (μm)	Desviación media cuadrática (μm)
3	6	43,88	5,50	7,24
3	8	54,73	8,00	10,15
3	12	73,05	13,47	16,26
3	6	43,88	5,50	7,24
5	6	29,81	4,04	5,02
5	8	37,53	5,45	6,76
5	12	66,92	10,14	12,84
5	14	56,98	9,09	11,28
7	6	38,21	4,34	5,67
7	8	58,91	7,18	9,78
7	12	82,32	10,53	13,59
7	14	77,19	9,68	12,89

En esta tabla se recogen los valores medios obtenidos para los tres parámetros que han sido considerados para representar la rugosidad superficial de la pieza, como son la altura máxima del perfil (R_t), la desviación media aritmética (R_a) y la desviación media cuadrática (R_q). Se incluyen los valores que corresponden a una profundidad de penetración de 3, 5 y 7 mm, y una intensidad de corriente de 6, 8, 12 y 14 A.

Las Figuras 2.34-2.36 ilustran la rugosidad superficial registrada en función de la intensidad de corriente para una profundidad de penetración de 3, 5 y 7 mm, respectivamente. En la parte superior se puede observar la altura máxima del perfil (R_t), mientras que los resultados que aparecen en la parte inferior de las figuras corresponden a la desviación media aritmética (R_a) y la desviación media cuadrática (R_q).

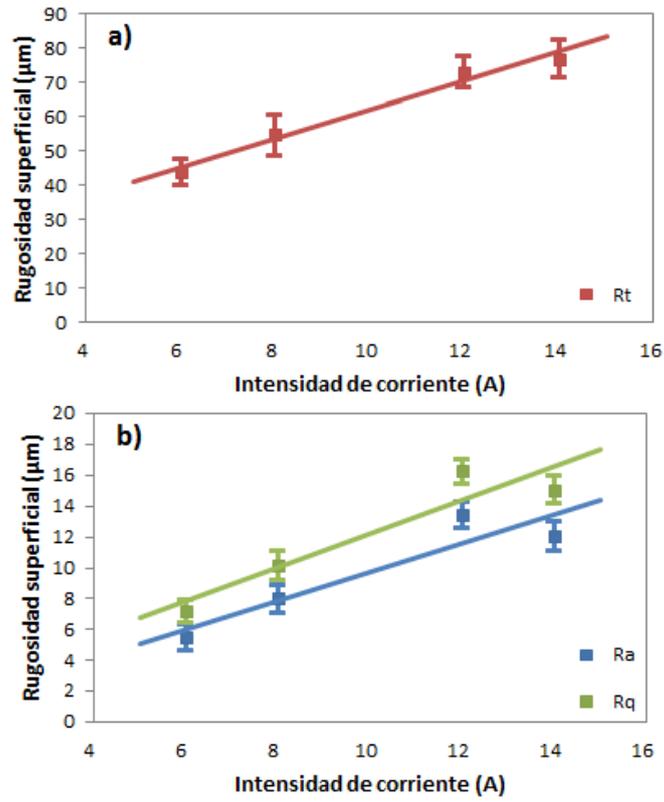


Figura 2.34 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara lateral para una profundidad de penetración de 3 mm.

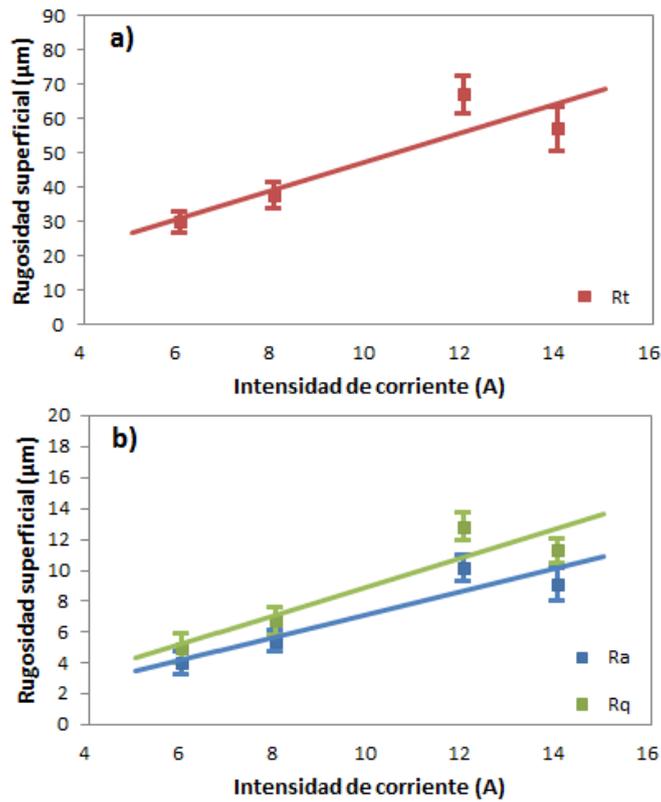


Figura 2.35 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara lateral para una profundidad de penetración de 5 mm.

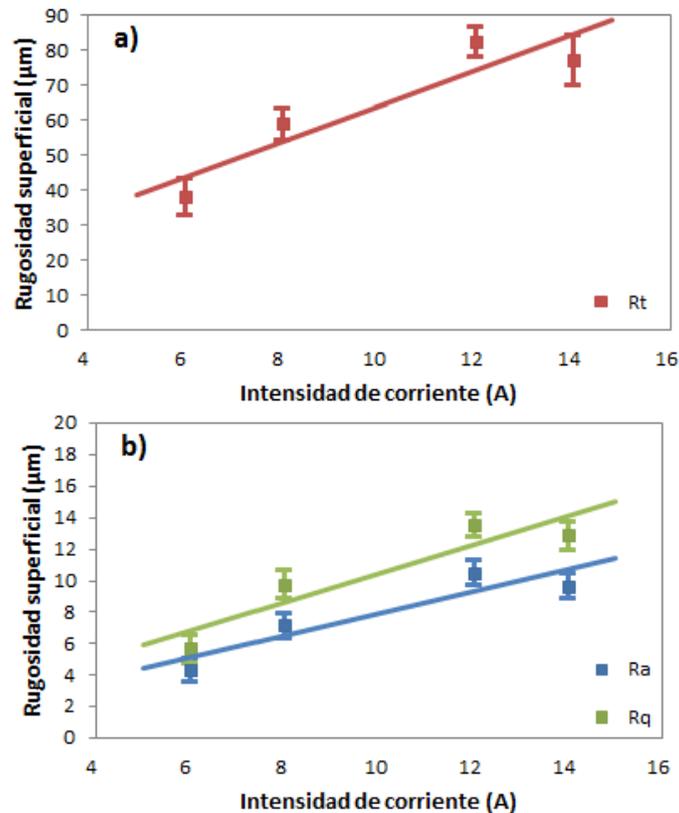


Figura 2.36 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara lateral para una profundidad de penetración de 7 mm.

Estas figuras revelan una tendencia creciente en la rugosidad superficial a medida que aumenta la intensidad de corriente, como se comprobó también anteriormente en la cara frontal de las piezas electroerosionadas.

A diferencia de lo que se comentó anteriormente acerca de la rugosidad superficial en la cara frontal, cuya variación con la intensidad de corriente disminuía para los valores más altos de profundidad de penetración, en el caso de la cara lateral de la pieza mecanizada la tendencia que aparece en estas figuras se mantiene prácticamente constante. El comportamiento se puede atribuir a la acción más prolongada que efectúa el electrodo sobre esta superficie de la pieza, lo cual puede facilitar una mayor homogeneidad en la eliminación de material en esta superficie, hasta alcanzar un gap suficientemente elevado.

Por otra parte, el arranque de material en la cara frontal de la pieza de trabajo es llevado a cabo por la misma zona del electrodo durante la totalidad del proceso, por lo que se ve influenciado por el desgaste que se produce en la cara frontal del electrodo, el cual aumenta con la profundidad de penetración, así como por la contaminación que sufre la superficie de la herramienta a partir del material de la pieza.

En cambio, la cara lateral es mecanizada por diferentes zonas del electrodo, debido a que éste último avanza continuamente introduciéndose en la pieza, y por tanto recurre a zonas que han sufrido un menor desgaste y una menor contaminación. Estos mecanismos pueden servir para explicar que en la cara lateral de la pieza se mantenga una tendencia más uniforme en la rugosidad superficial a partir de la intensidad de corriente.

Una vez estudiado el efecto de la intensidad de trabajo, en las Figuras 2.37-2.40 se representa la relación existente entre la rugosidad superficial y la profundidad de penetración asumida para el proceso de mecanizado, para una intensidad de corriente de 6, 8, 12 y 14 A, respectivamente. En estas figuras se recoge los resultados registrados para los tres parámetros de rugosidad que han sido contemplados, como son la altura máxima del perfil (R_t), la desviación media aritmética (R_a) y la desviación media cuadrática (R_q).

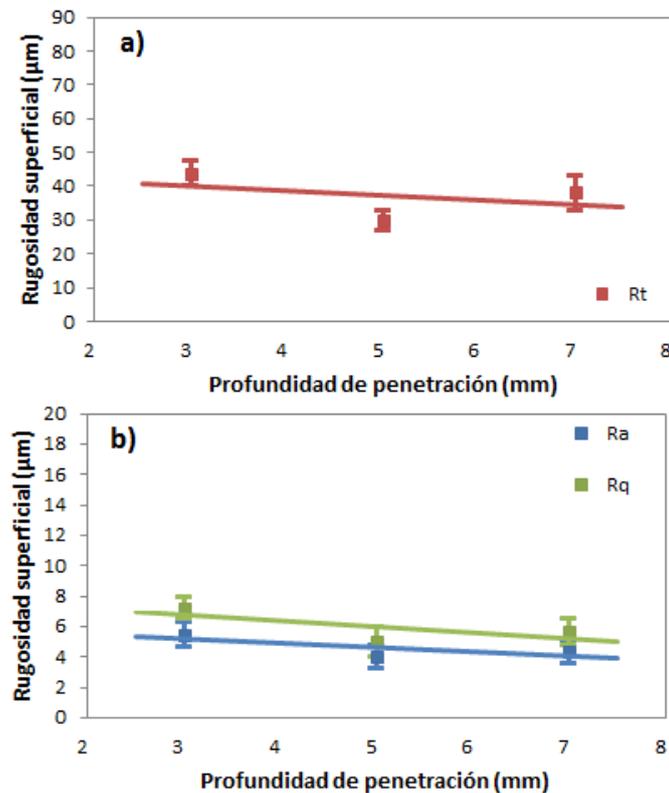


Figura 2.37 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara lateral para una intensidad de corriente de 6 A.

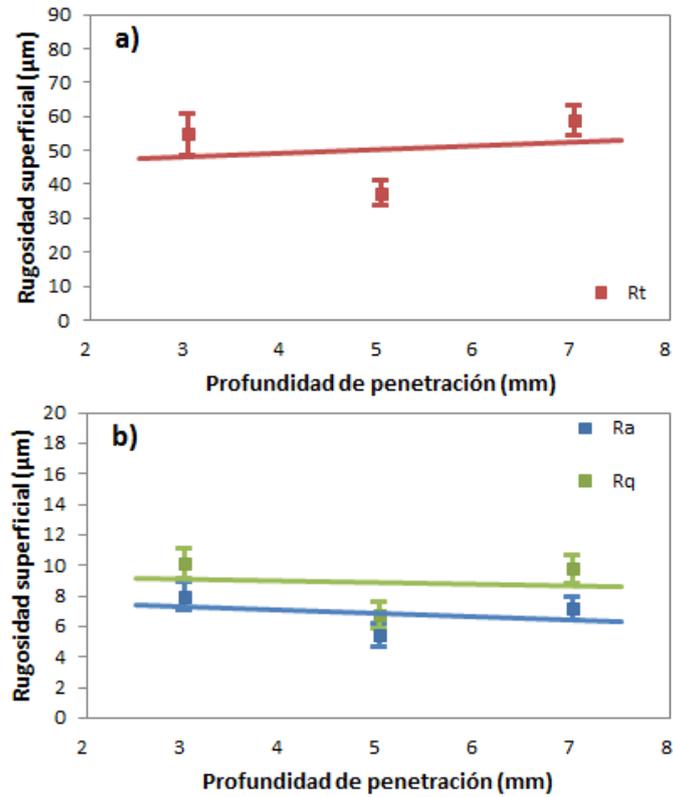


Figura 2.38 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara lateral para una intensidad de corriente de 8 A.

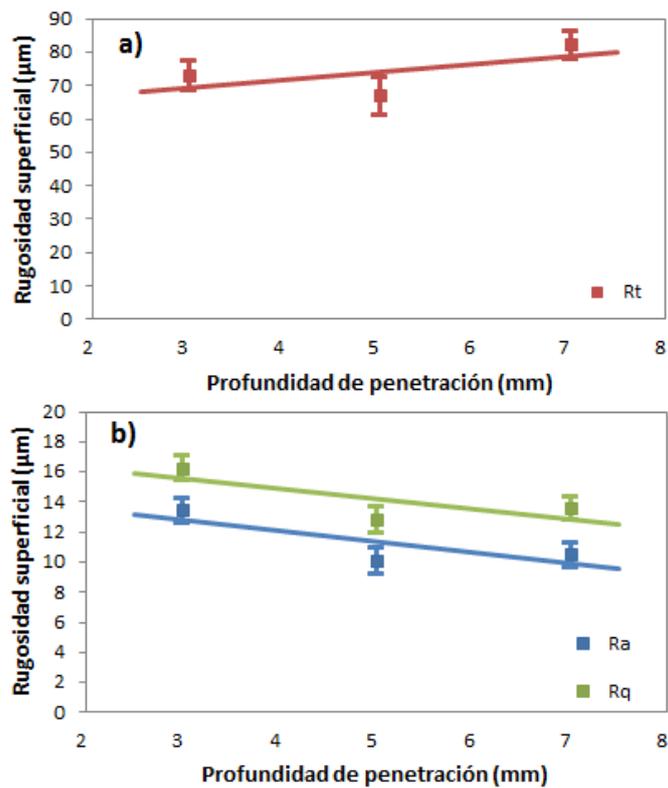


Figura 2.39 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara lateral para una intensidad de corriente de 12 A.

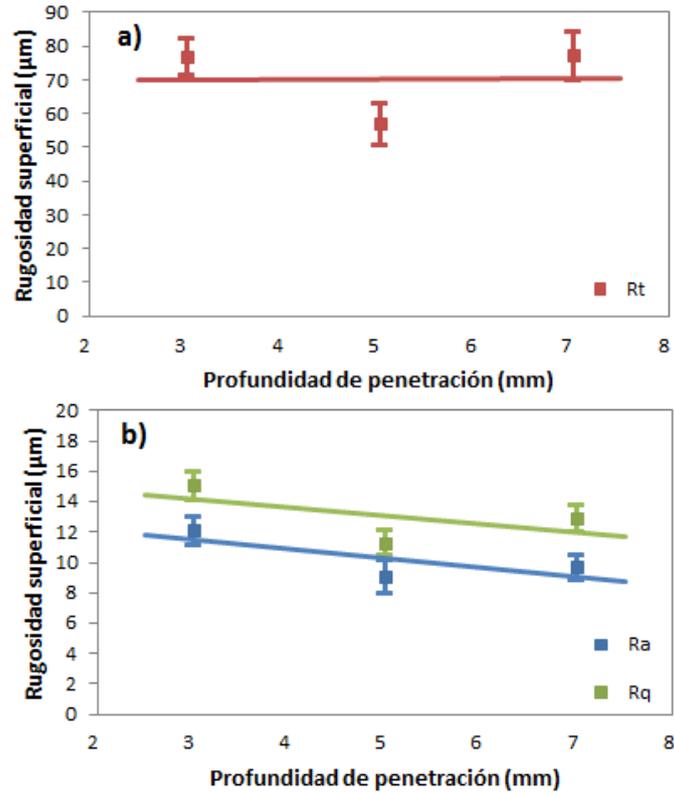


Figura 2.40 Rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración en la cara lateral para una intensidad de corriente de 14 A.

A partir de los resultados de las figuras anteriores, se deduce la falta de correlación entre la rugosidad superficial en la cara lateral de la pieza mecanizada y la profundidad de penetración establecida para la realización de los ensayos. Como se acaba de comentar, la ausencia de una cierta influencia de la profundidad de penetración sobre la rugosidad superficial en la cara lateral se puede atribuir al hecho de que el electrodo avanza continuamente en el interior de la pieza y no influye de forma relevante en el acabado superficial de esta cara de la pieza de trabajo. Es decir, dado que el electrodo se encuentra en movimiento respecto de la cara lateral de la pieza, en el mecanizado de esta superficie no interviene una única zona del electrodo como ocurre en el caso de la cara frontal, sino que por el contrario intervienen distintas zonas del electrodo conforme avanza éste último.

2.3.2. Tasa de material portante.

De un modo similar al análisis que se efectuó anteriormente en la cara frontal de la pieza mecanizada, en este apartado se aborda el efecto de los parámetros del proceso sobre la tasa de material portante.

En la Figura 2.41 se muestra a modo de ejemplo las curvas de tasa de material portante registradas para algunos de los ensayos de electroerosión que han sido realizados. En concreto, los resultados que se recogen en esta figura corresponden a una profundidad de penetración de 5 mm, y en ella se puede observar las curvas que se obtienen para una intensidad de corriente de 6, 8, 12 y 14 A.

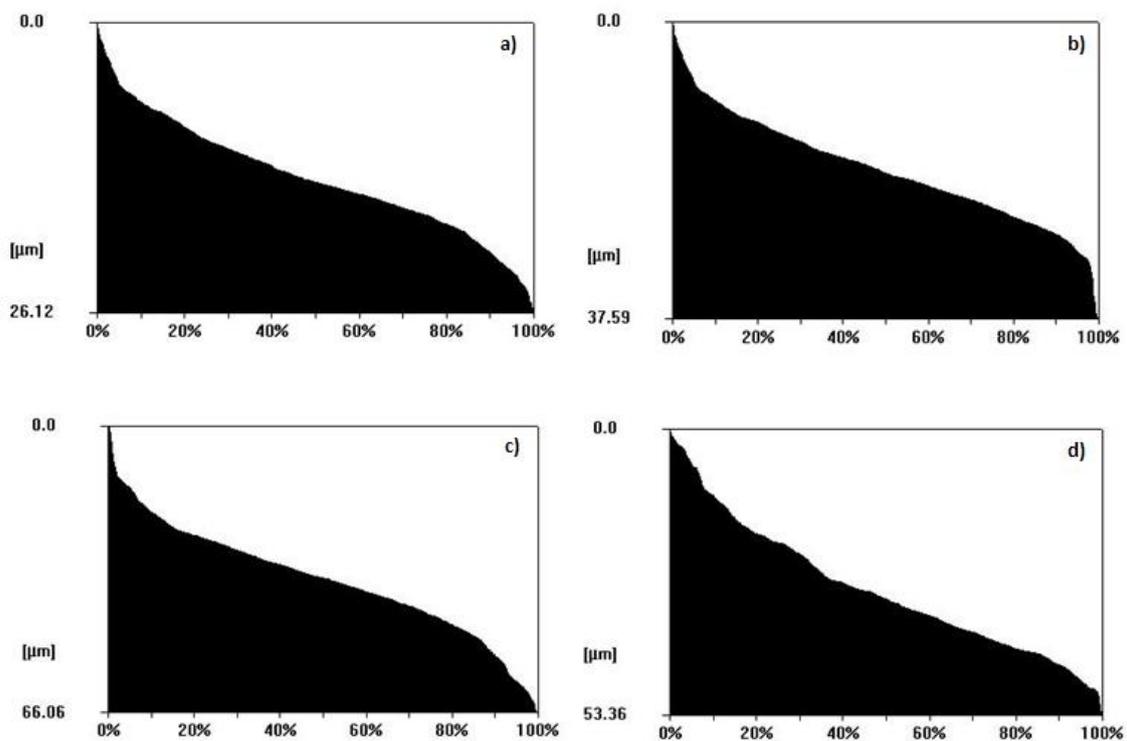


Figura 2.41 Curva de tasa de material portante en la cara lateral de la pieza para una profundidad de penetración de 5 mm: a) intensidad de corriente de 6 A, b) 8 A, c) 12 A y d) 14 A.

Como se hizo anteriormente en relación con la cara frontal, a continuación se considera la pendiente en el tramo central de la curva de tasa de material portante para representar la forma que presenta esta curva dependiendo de las condiciones de corte adoptadas en los ensayos. La pendiente de la curva de tasa de material portante se calcula a partir de los puntos comprendidos entre un 10 y 80% de tasa de material portante, y se representa mediante el símbolo γ_{CL} , donde CL es un subíndice que hace referencia a la cara lateral.

Los valores deducidos para la pendiente de la curva de tasa de material portante se recogen en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Pendiente de la curva de tasa de material portante en la cara lateral de la pieza

Profundidad de penetración (mm)	Intensidad de corriente (A)	Pendiente entre el 10 y 80% de tasa de material portante	Coefficiente de regresión R^2
3	6	1,81	0,9971
3	8	3,00	0,9901
3	12	4,87	0,9995
3	14	4,41	0,9801
5	6	1,53	0,9866
5	8	2,04	0,9962
5	12	3,47	0,9933
5	14	3,93	0,9763
7	6	1,71	0,9586
7	8	2,49	0,9850
7	12	3,95	0,9655
7	14	4,86	0,9512

A partir de los resultados que se muestran en esta tabla, la Figura 2.42 representa la influencia de la intensidad de corriente sobre la tasa de material portante, para la cara lateral de la pieza final. En esta figura se aprecia una marcada tendencia creciente al igual que sucede en la cara frontal.

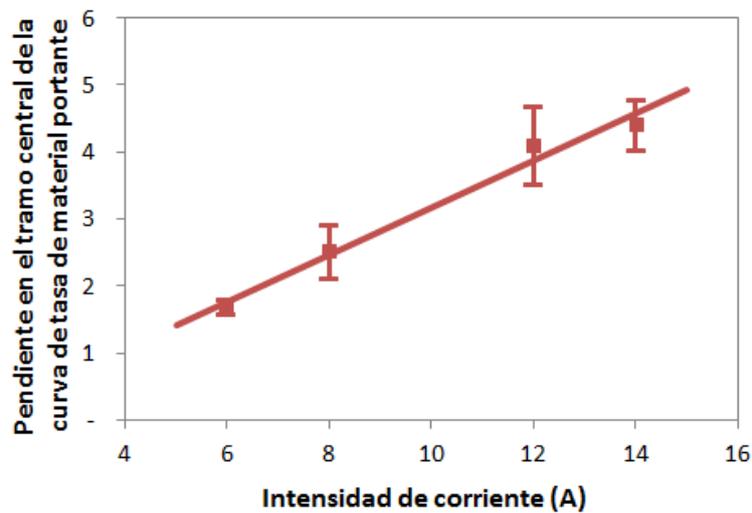


Figura 2.42 Pendiente en el tramo central de la curva de tasa de material portante en función de la intensidad de corriente en la cara lateral de la pieza.

La tendencia que se observa en la Figura 2.42, se puede describir mediante la siguiente expresión:

$$\gamma_{CL} = -0,340 + 0,351 I \quad (4)$$

La Figura 2.43 permite comprobar la variación de la pendiente de la curva de tasa de material portante en función de la profundidad de penetración, para la cara lateral de la pieza. De acuerdo con esta figura, no existe correlación entre estos dos parámetros, lo cual es consistente con las conclusiones reseñadas anteriormente en relación con la cara frontal. Esto también coincide con las conclusiones que se desprenden del análisis de la rugosidad superficial en la cara lateral.

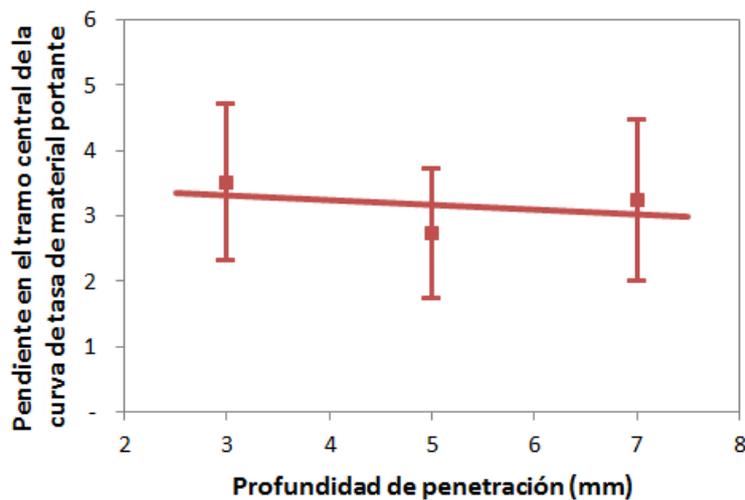


Figura 2.43 Pendiente en el tramo central de la curva de tasa de material portante en función de la profundidad de penetración en la cara lateral de la pieza.

2.3.3. *Tamaño de los cráteres.*

Una vez estudiada la rugosidad superficial y la tasa de eliminación de material, en este apartado se procede al análisis de la influencia de los parámetros del proceso sobre el diámetro de los cráteres que aparecen en la superficie que corresponde a la cara lateral de la pieza resultante.

La Figura 2.44 ilustra un ejemplo de las imágenes capturadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) para algunos de los ensayos de mecanizado por electroerosión. En concreto las imágenes que se muestran en esta figura corresponden a una profundidad de penetración de 5 mm e intensidades de corriente de 6, 8, 12 y 14 A.

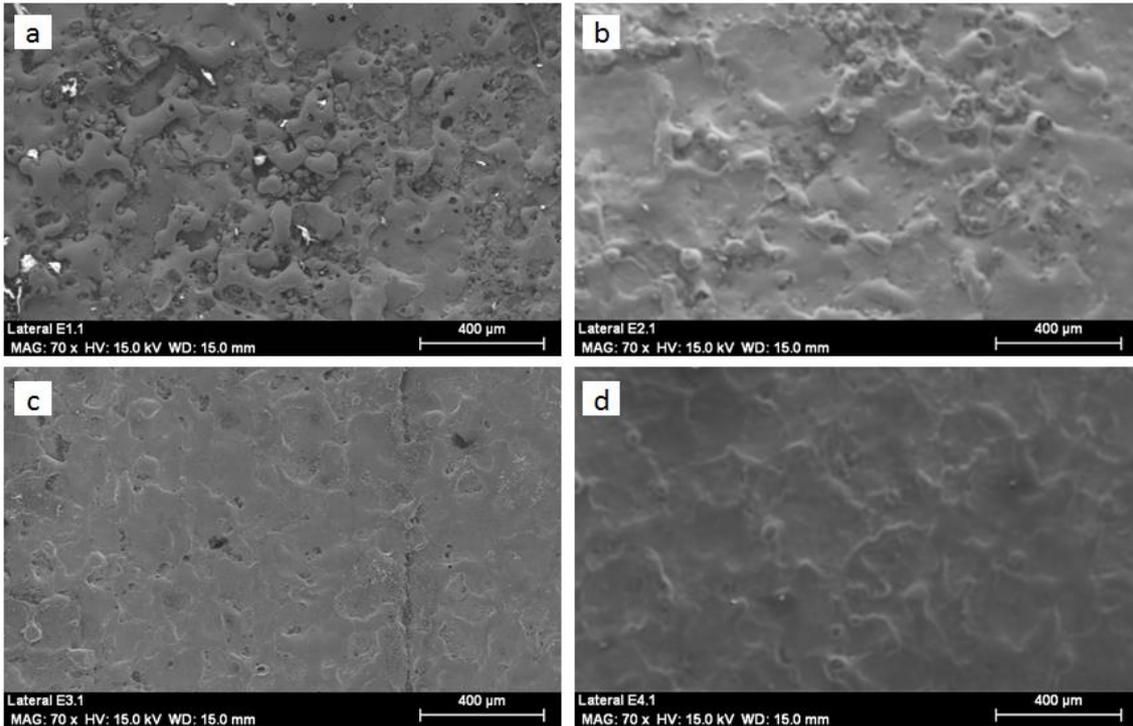


Figura 2.44 Imágenes SEM de la cara lateral de la pieza para profundidad de penetración de 5 mm: a) intensidad de corriente de 6 A, b) 8 A, c) 12 A y d) 14 A.

A partir de la observación de la superficie de las piezas generas durante los ensayos, recurriendo a microscopía electrónica de barrido (SEM), se hallan los valores medios de diámetro del cráter que se muestran en la Tabla 2.9

Tabla 2.9 Diámetro de los cráteres en la cara frontal de las piezas

Profundidad de penetración (mm)	Intensidad de corriente (A)	Diámetro de los cráteres (μm)
3	6	94
3	8	116
3	12	234
3	14	247
5	6	104
5	8	141
5	12	240
5	14	290
7	6	110
7	8	151
7	12	263
7	14	336

Las imágenes SEM de la Figura 2.44 ponen de manifiesto la homogeneidad que existe en la distribución de las irregularidades comprendidas en la superficie mecanizada, como se observó también anteriormente en la otra cara de la pieza. En cambio, a diferencia de lo que sucede en

la cara frontal, en la superficie que corresponde a la cara lateral de la pieza se constata la aparición de una serie de protuberancias que probablemente habrán sido provocadas por la resolidificación del material.

Esto es posible gracias a que el electrodo se encuentra en continuo movimiento respecto de esta superficie de la pieza, y por ello resulta más sencilla la función refrigerante que ejerce el fluido dieléctrico. Sin embargo, el reducido gap existente entre el electrodo y la pieza dificulta la labor de limpieza a desempeñar por el fluido dieléctrico, y una cierta parte de la escoria que no consigue ser evacuada puede terminar volviendo a solidificar sobre la superficie de la pieza.

Al igual que sucedía en la cara frontal de la pieza electroerosionada, se comprueba una clara tendencia creciente en el diámetro de los cráteres en la cara lateral, en función de la intensidad de corriente, manteniéndose esta tendencia para todos los valores de profundidad de penetración.

La Figura 2.45 representa la variación que se produce en el diámetro del cráter en la cara lateral, de acuerdo con los valores seleccionados para la intensidad de corriente.

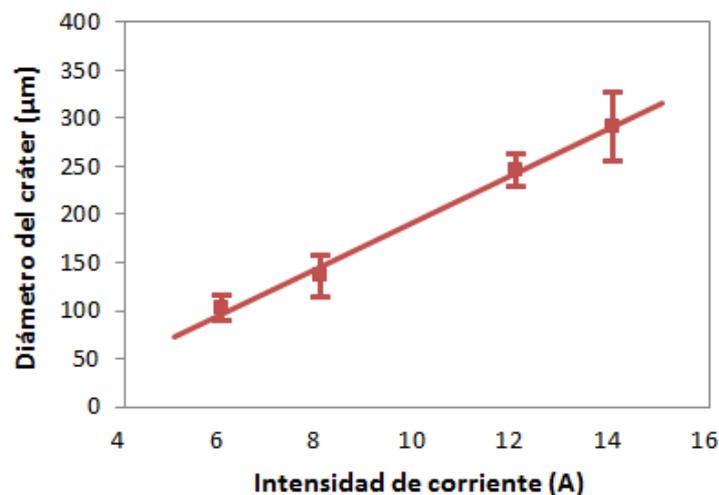


Figura 2.45 Diámetro del cráter en función de la intensidad de corriente en la cara lateral de la pieza.

De nuevo, esta figura permite corroborar una fuerte relación entre el diámetro del cráter y la intensidad de corriente, como también se puso de manifiesto anteriormente.

La influencia de la intensidad de corriente sobre el diámetro de los cráteres que se ilustra en esta figura, se puede representar mediante la siguiente expresión:

$$D_{CCL} = -49,389 + 24,330 I \quad (5)$$

Por otra parte, la Figura 2.46 recoge la relación existente entre el diámetro de los cráteres que se originan en la cara lateral y la profundidad de penetración.

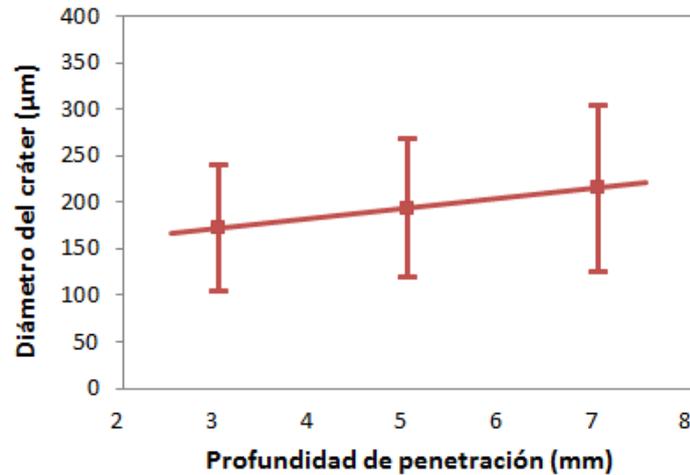


Figura 2.46 Diámetro del cráter en función de la profundidad de penetración en la cara lateral de la pieza.

En esta figura se intuye un ligero aumento en el diámetro de los cráteres. Sin embargo, no es posible asumir una determinada tendencia en el tamaño que presentan los cráteres de la cara lateral en función de la profundidad de penetración, debido a la elevada dispersión asociada a estos resultados.

2.4. Productividad del proceso de electroerosión.

En comparación con los procesos de mecanizado convencional, el mecanizado por electroerosión requiere mayores tiempos totales para completar el proceso, y por lo tanto se caracteriza por menores valores de tasa de eliminación de material V_w , que consiste en el volumen de material arrancado de la pieza de partida por unidad de tiempo.

En este apartado se analiza el tiempo de mecanizado y la tasa de eliminación de material alcanzable en mecanizado por electroerosión para diferentes condiciones de corte, a partir de los ensayos que han sido efectuados.

Para determinar el tiempo de mecanizado, en este trabajo se procedió a cronometrar la duración de la totalidad de los ensayos de EDM, y dada la sencillez de la geometría seleccionada es posible calcular analíticamente el volumen de material arrancado, y por tanto la tasa de eliminación de material, cuyos valores se recogen en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10 Tasa de eliminación de material.

Profundidad de penetración (mm)	Intensidad de corriente (A)	Volumen de material arrancado (mm ³)	Tiempo del proceso (min)	Tasa de eliminación de material (mm ³ /min)
3	6	294	31	9,5
3	8	294	16	18,4
3	12	294	5	58,8
3	14	294	4,5	65,3
5	6	490	61	8,0
5	8	490	23	21,3
5	12	490	9	54,4
5	14	490	8	61,3
7	6	686	113	6,1
7	8	686	33	20,8
7	12	686	13	52,8
7	14	686	11	62,4

En la tabla se observa un notable aumento de la tasa de eliminación de material para las intensidades de corriente comprendidas entre 6 y 12 A, y en cambio a partir de este valor se produce un incremento mucho menor. Esta tendencia se repite para todos los valores de profundidad de penetración.

Los resultados obtenidos para el tiempo de proceso, se representan en función de la intensidad de corriente en la Figura 2.47, incluyendo una familia de curvas que corresponde a valores de profundidad de penetración de 3,5 y 7 mm.

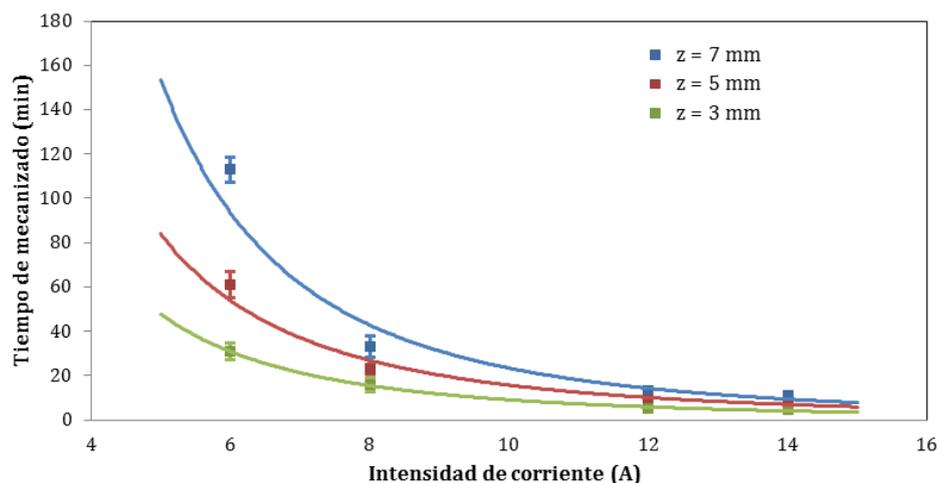


Figura 2.47 Tiempo de mecanizado en función de la intensidad de corriente.

En esta figura se observa una rápida disminución del tiempo de mecanizado con la intensidad de corriente, siguiendo una tendencia exponencial decreciente. Para los diferentes valores de

profundidad de penetración, se registran curvas con una distinta pendiente, las cuales tienden a cero a medida que aumenta la intensidad de corriente.

A partir de los tiempos de mecanizado que han sido registrados para las diferentes condiciones de corte, se pueden deducir los valores de tasa de eliminación de material que se ilustran en la Figura 2.48. En esta figura se incluye una única curva para todos los valores de profundidad de corte, ya que la tasa de eliminación de material no depende de este parámetro, al tratarse de un volumen por unidad de tiempo.

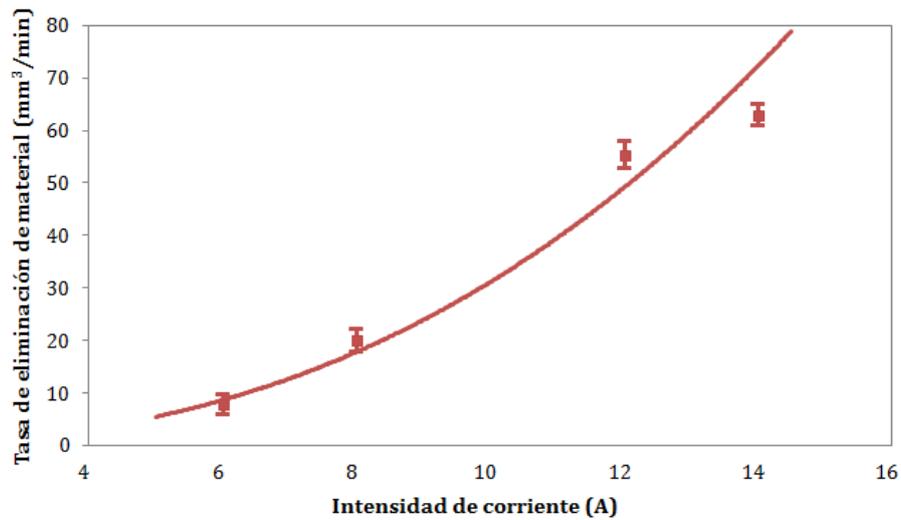


Figura 2.48 Tasa de eliminación de material en función de la intensidad de corriente.

En esta figura se evidencia una notable influencia de la intensidad de corriente sobre la tasa de eliminación de material, al igual que sucede con el tiempo de duración del proceso. La tendencia que se aprecia en la Figura 2.48, se puede describir mediante la siguiente ecuación:

$$V_w = 0,099 I^{2,4985} \quad (6)$$

Esta ecuación puede servir para estimar la cantidad de material que es posible arrancar mediante el proceso de mecanizado por electroerosión, dependiendo de las condiciones de corte adoptadas.

Capítulo 3. Análisis experimental del desgaste del electrodo

A diferencia del capítulo anterior, en el tercer capítulo de esta tesis doctoral se lleva a cabo el análisis de la degradación que tiene lugar en la herramienta de corte durante el proceso de electroerosión, con la finalidad de determinar la influencia de los parámetros del proceso.

En primer lugar se detalla la metodología aplicada para la realización de los ensayos y medición del desgaste de la herramienta, y posteriormente se procede a la discusión de los resultados y la deducción de la relación existente entre las condiciones de corte y la pérdida de material en la superficie del electrodo.

3.1. Metodología experimental.

El estudio del acabado superficial de la pieza y desgaste de la herramienta se ha llevado a cabo a través de los mismos ensayos de mecanizado de electroerosión, por lo que se debe remitir primeramente a la metodología experimental que ha sido detallada en el capítulo anterior.

No obstante, en este apartado se explica además los detalles relativos a la medición de la degradación del electrodo en función de los parámetros del proceso.

Como se indicaba en el apartado de metodología experimental del segundo capítulo, para la realización de los ensayos se ha optado por electrodos de cobre electrolítico. Se trata de un material muy utilizado como electrodo en procesos de electroerosión, ya que presenta una excelente conductividad eléctrica y además puede ser mecanizado fácilmente para proporcionarle la forma deseada.

De esta forma, los ensayos de EDM servirán para conocer en mayor detalle los mecanismos de desgaste que afectan a estos procesos cuando se recurre a electrodos de cobre para el mecanizado de piezas constituidas por acero inoxidable AISI 316.

En la Tabla 3.1 se muestran las propiedades del cobre electrolítico, como material utilizado para la fabricación de los electrodos con los que se ha efectuado los ensayos de mecanizado por electroerosión.

Tabla 3.1 Propiedades del cobre electrolítico (material de los electrodos)

Propiedades físicas	Valor
Densidad	8.91 g/cc (Temperatura 20 °C)
Propiedades mecánicas	
Dureza, Rockwell	15-115
Resistencia a la tracción	22-40 kg/mm ²
Elongación a la rotura	0,6
Límite elástico	5-34 kg/mm ²
Propiedades eléctricas	
Resistencia eléctrica	0.00000172 ohm·cm
Propiedades térmicas	
Calor de fusión	204.8 J/g
Calor de evaporación	5230 J/g
Capacidad específica de calor	0.385 J/(g·°C)
Conductividad térmica	392 W/(m·K) (Temp. 27 °C)
Punto de fusión	1083 °C
Punto de evaporación	2560 °C

3.1.1. Geometría de los electrodos.

El apartado de metodología experimental del anterior capítulo se centró especialmente en la descripción de la geometría definida para el material de trabajo, mientras que en este apartado se detalla la geometría que ha sido seleccionada para la herramienta de corte.

Las herramientas utilizadas en los ensayos de mecanizado se fabricarán a partir de barras cuadradas de cobre electrolítico con una sección de 20x20 mm, y cada electrodo servirá para la realización de dos ensayos, disponiendo de dos zonas útiles de actuación sobre la pieza con unas dimensiones de 14x7 mm, como se puede observar en la Figura 3.1.

Las muestras de la punta del electrodo tienen un tamaño adecuado para su introducción en la cámara de vacío del microscopio electrónico de barrido que se utilizará para la observación de la superficie desgastada del electrodo, y disponen de una zona útil suficientemente amplia

para facilitar la identificación de la degradación originada en la herramienta de corte. La forma y tamaño de estas muestras son también apropiados para la medición de la rugosidad superficial mediante un rugosímetro de palpación mecánica.

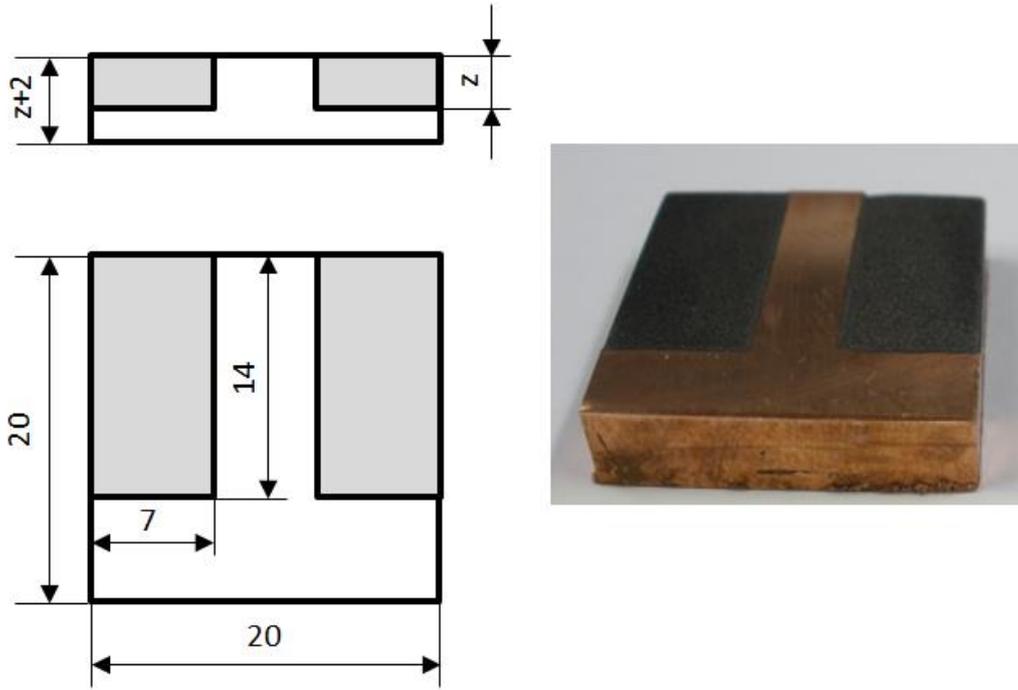


Figura 3.1 Esquema con la geometría de las herramientas de corte.

Al finalizar cada ensayo de electroerosión, se cortará el extremo del electrodo con el fin de disponer de una muestra que resulte fácil de transportar y someter a las técnicas de medida seleccionadas, y se procederá al reacondicionamiento de la punta del electrodo para el siguiente ensayo.

El corte del extremo del electrodo al final de cada ensayo, se realiza siempre incluyendo un determinado espesor adicional de electrodo sin desgastar, procurando dejar además del espesor afectado por el proceso de electroerosión, en el cual se aprecia la formación de cráteres. El electrodo que aparece en la Figura 3.1 corresponde a un ensayo con una profundidad de penetración de 3 mm; se aprecia que se ha realizado el corte del electrodo con un espesor de 5 mm para disponer un margen adicional de alrededor de 2 mm de electrodo no afectado por el proceso.

Para una correcta sujeción de la herramienta en el cabezal de la máquina de electroerosión garantizando la precisión necesaria en la posición del electrodo sobre la pieza de trabajo, el extremo posterior del electrodo dispondrá de un rebaje en ángulo que facilita su asiento en el

cabezal. La Figura 3.2 muestra un esquema con el rebaje efectuado en el extremo del electrodo con este propósito.

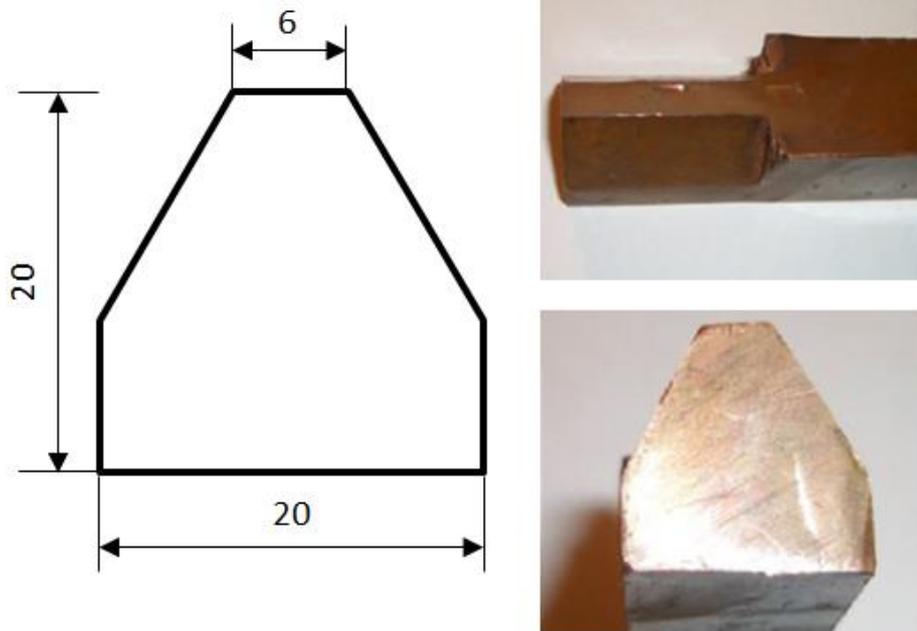


Figura 3.2 Representación gráfica del rebaje para la sujeción del electrodo.

La geometría del rebaje descrito, se ajusta a la forma de la máquina de EDM. En la Figura 3.3 se ilustra la sujeción del electrodo en el cabezal porta-herramientas.

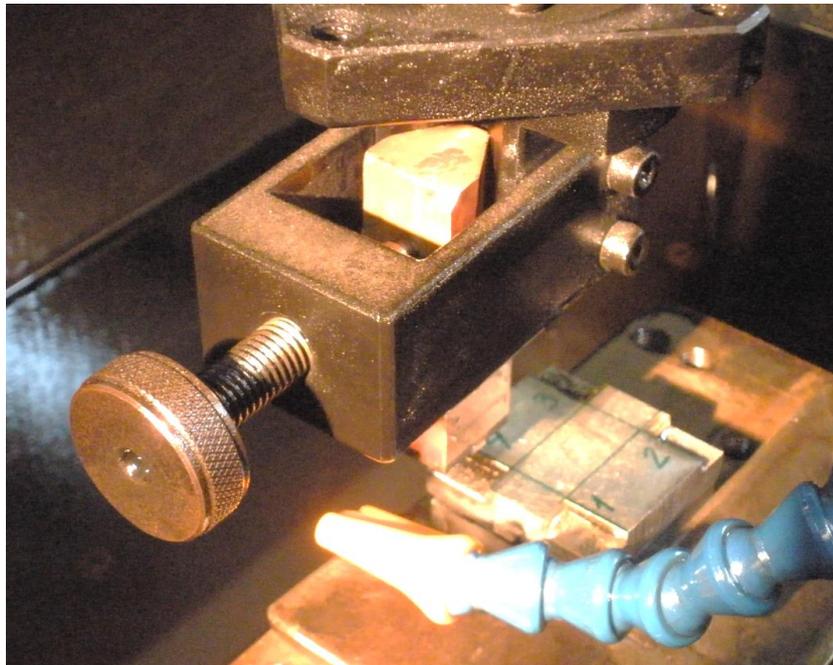


Figura 3.3 Cabezal porta-herramientas de la máquina ONA DATIC D2030.

3.1.2. Preparación de los electrodos.

Los electrodos serán fabricados a partir de una barra cuadrada de cobre electrolítico con una sección de 20x20 mm. Se mecaniza el extremo posterior de la barra, para permitir su correcta sujeción en la máquina, y antes de cada ensayo se reacondicionará la cara frontal del electrodo.

Para los electrodos se ha seleccionado una forma y tamaño que faciliten la posterior inspección tanto en la zona afectada por el proceso de electroerosión como en la zona que no participa en este proceso, con el fin de poder estudiar el estado de la herramienta. El mecanizado que se realiza en la cara del electrodo antes de cada ensayo, permitirá comparar entre estas dos zonas de la herramienta.

Para el corte de los electrodos, se usará una micro-cortadora metalográfica disponible en los laboratorios del Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación de la UPCT, lcomo se ilustra en la Figura 3.4.

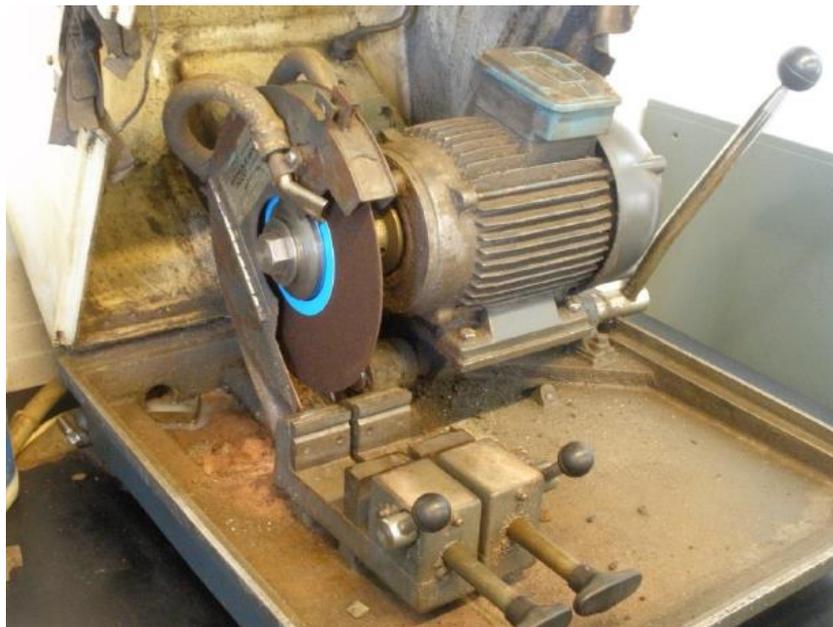


Figura 3.4 Micro-cortadora metalográfica para la preparación de los electrodos.

A continuación, tanto la cara frontal como la cara lateral de los electrodos se someterán a un proceso de pulido para disponer de un adecuado acabado superficial en la región no afectada por el proceso de electroerosión.

Se aplicará un pulido que proporcione un acabado de pulido espejo, para poder comparar con las rugosidades inferiores a $10\ \mu\text{m}$ de la superficie electroerosionada. Para este fin se empleará una pulidora metalográfica del Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación de la Universidad Politécnica de Cartagena, que puede apreciarse en la Figura 3.5.



Figura 3.5 Pulidora metalográfica para la preparación de los electrodos.

Todas estas operaciones se repetirán para preparar cada nuevo electrodo a partir de la barra de cobre electrolítico empleada en los ensayos previos. Esto será cada 2 ensayos, debido a que la geometría de la herramienta permite efectuar 2 ensayos en cada punta del electrodo.

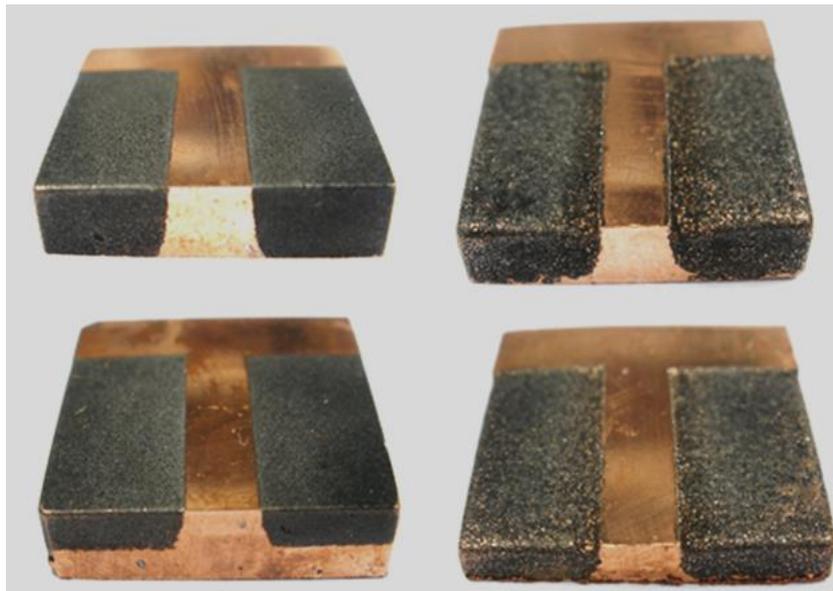


Figura 3.6 Ejemplo de electrodos empleados en el proceso de EDM.

Las muestras de la punta de la herramienta obtenidas de este modo, serán utilizadas para analizar el desgaste originado en el electrodo. En la Figura 3.6 se puede apreciar, a título ilustrativo, cuatro electrodos correspondientes a algunos de los ensayos que han sido ejecutados con diferentes valores de intensidad de corriente y profundidad de penetración.

3.1.3. Definición de las zonas a estudiar en la superficie del electrodo.

En la superficie desgastada de los electrodos se aprecia una clara diferencia entre la zona que ha participado activamente en el proceso de electroerosión que resulta en color gris oscuro debido al quemado provocado por las descargas eléctricas, y la zona no afectada del electrodo, que continúa conservando su aspecto previo al proceso, como se puede comprobar a modo de ejemplo en las fotografías incluidas en la Figura 3.6.

Un análisis detallado de la interfase entre la zona afectada del electrodo y la zona no desgastada, permite identificar la aparición de una depresión más acusada en la región de la zona afectada que se encuentra más próxima a la zona que no interviene en el proceso. Por tanto, se advierte que es posible distinguir entre dos regiones claramente diferentes dentro de la zona activa del electrodo.

En el esquema de la Figura 3.7 se representa las zonas en las que se puede descomponer la superficie del electrodo, incluyendo la zona que se caracteriza por la formación de este surco, además de la zona central que corresponde al resto del área activa durante el proceso.

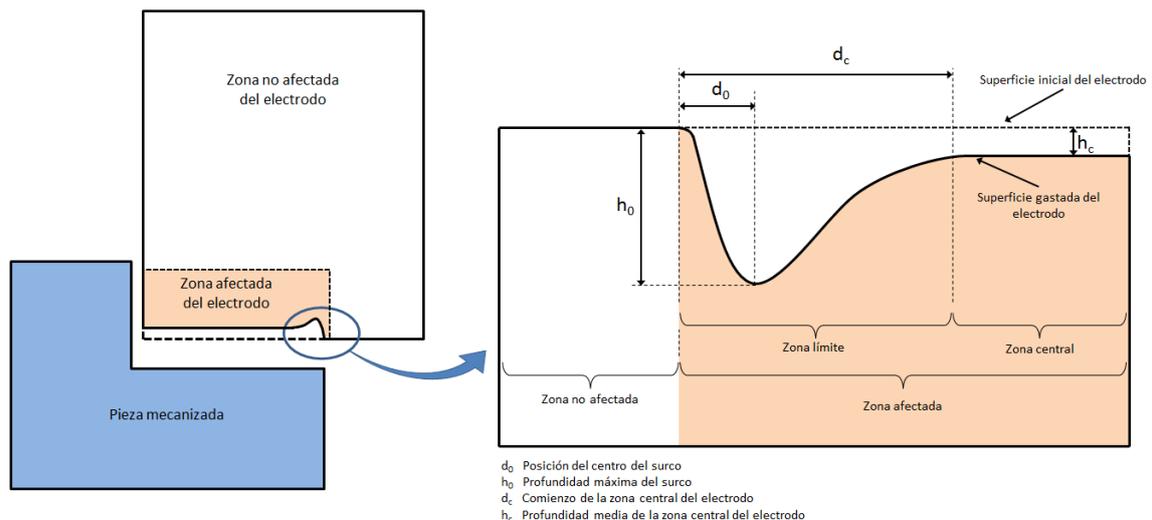


Figura 3.7 Esquema de las diferentes zonas del electrodo en procesos de EDM.

La parte izquierda de la Figura 3.7 muestra la posición relativa del electrodo respecto a la pieza mecanizada, identificando que la zona límite del electrodo coincide con el extremo de la pieza. En cambio, en la parte derecha se representa las diferencias existentes entre el área que comprende a la zona central del electrodo y el área que en este trabajo se denominará zona límite, que será la región en la cual se produce una abrupta depresión en forma de surco dentro de la superficie del electrodo.

En la Figura 3.7 también se reflejan los parámetros que han sido establecidos en la presente tesis doctoral para caracterizar el tamaño y posición de esta depresión. De esta forma, se define d_o como la posición del surco respecto del inicio de la zona afectada y h_o como la profundidad máxima del surco.

En lo referente a la zona central del electrodo, se establece también dos parámetros para describir su variación durante el proceso. Estos parámetros son la posición de la zona central respecto del inicio de la zona afectada, que se representa por el símbolo d_c , y la profundidad media de la zona central del electrodo, para la cual se utilizará el símbolo h_c .

Debido a que se trata de dos regiones claramente diferentes de la superficie del electrodo, las cuales cabe esperar que presenten una relación diferente con los parámetros del proceso, el estudio que se lleva a cabo en este capítulo sobre el desgaste de la herramienta de corte se desglosará en dos apartados que abordarán por separado la pérdida de material en la zona central y en la zona límite.

En cada una de estas dos zonas se analizará la rugosidad superficial resultante en la superficie del electrodo y la formación de esta geometría desgastada de la herramienta, y asimismo se procederá al microanálisis de la superficie del electrodo, para poder comprobar la contaminación que tiene lugar en el material de la herramienta de corte, a causa del material procedente de la pieza de partida, como se explicará en el apartado siguiente.

3.1.4. Evaluación de la superficie del electrodo.

En este apartado se explicará la metodología empleada para registrar las alteraciones que se producen en la superficie del electrodo durante el proceso de mecanizado por electroerosión, incluyendo la degradación del acabado superficial, la tasa de material portante en la superficie, la variación de la geometría y la contaminación superficial, todo ello relativo a la herramienta de corte.

A continuación se describirá por separado el procedimiento que se ha aplicado para la medición de las irregularidades que se originan en la superficie de la herramienta de corte, la observación de las alteraciones que tienen lugar en la textura del electrodo y el análisis de la composición del material en la superficie del electrodo.

Medición de las irregularidades en la superficie del electrodo:

El análisis de las irregularidades existentes en la superficie del electrodo permitirá conocer el efecto del proceso sobre el desgaste de la herramienta.

Para el estudio del estado de la superficie del electrodo, se procederá a la medición de la rugosidad superficial, la tasa de eliminación de material y la geometría de la herramienta desgastada. Para todo ello se recurrirá a un rugosímetro de palpación mecánica.

En la Figura 3.8 se ilustra las diferentes zonas en las que se llevará a cabo la evaluación de la superficie del electrodo.

En la parte izquierda de la figura se muestra la zona a explorar para la medición de la rugosidad superficial y la curva de tasa de material portante. Para ello el palpador del rugosímetro se situará en la zona central de la huella y efectuará su recorrido en la dirección que se observa en la figura.

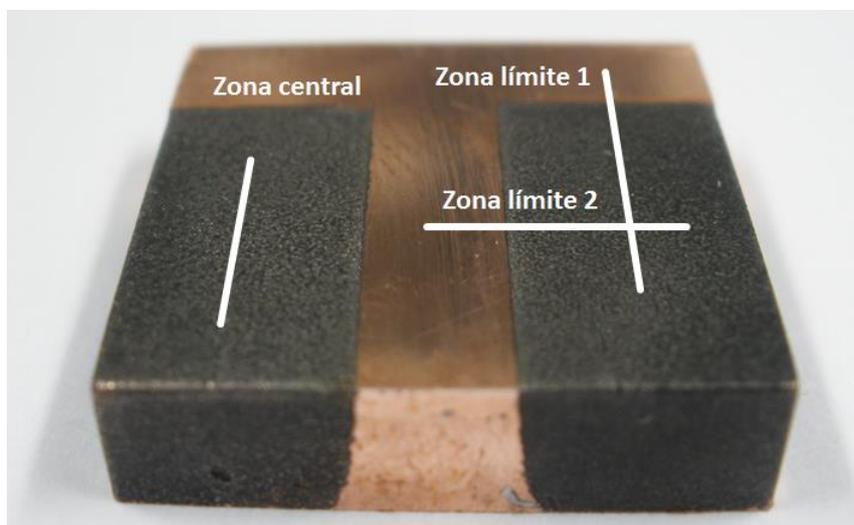


Figura 3.8 Selección del recorrido del palpador en los electrodos.

La medición de los surcos que se producen en la zona límite del electrodo se realizará en ambos bordes de la huella producida en el electrodo. Para ello el palpador recorrerá el trazado que se ilustran en la parte derecha de esta figura. El análisis de estas irregularidades permitirá caracterizar la geometría de la herramienta desgastada.

Observación de la textura de la superficie del electrodo:

Para poder comprobar los resultados relativos a la medición de la rugosidad, tasa de material y geometría de la herramienta desgastada, se llevará a cabo la observación de la superficie de la herramienta mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Para ello se utilizará un microscopio electrónico de barrido Hitachi S-3500N disponible en las instalaciones de la UPCT, al igual que se describió en el capítulo anterior para el análisis de la superficie de la pieza mecanizada.

Se procederá a la observación tanto de la zona central del electrodo como de la interfase entre la zona desgastada y no desgastada de la herramienta. En la Figura 3.9 se observan las zonas en las que se realizará la captura de las imágenes SEM.

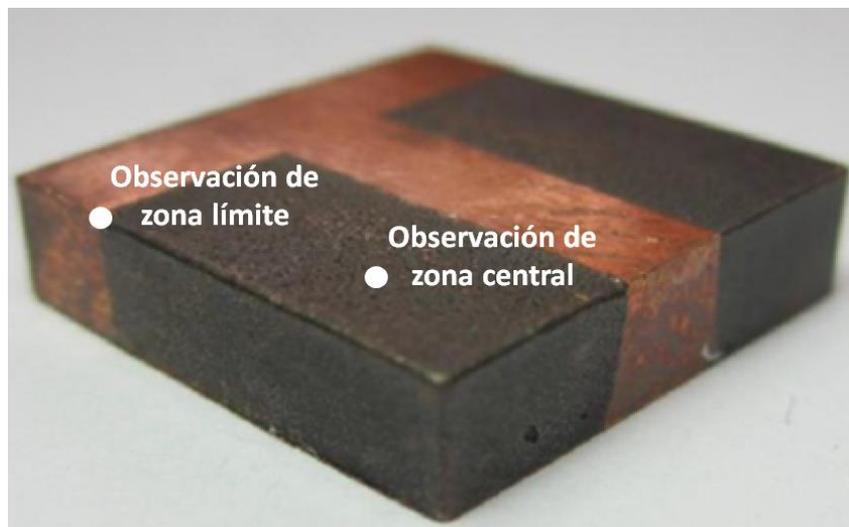


Figura 3.9 Selección del punto de toma de imágenes SEM en los electrodos.

Medición de la contaminación en la superficie del electrodo:

Con el objetivo de conocer la degradación que se producen en el electrodo, además de evaluar la pérdida de material en la superficie del electrodo y la geometría de la herramienta desgastada, es necesario conocer las variaciones que se producen en su composición química durante el proceso de electroerosión.

Para poder evaluar las posibles alteraciones en la composición del electrodo, se llevará a cabo el microanálisis del material de la superficie de la herramienta mediante técnicas de dispersión de energía de rayos X (EDS), para lo cual se recurrirá al analizador Bruker AXS integrado en el microscopio electrónico de barrido Hitachi S-3500N disponible en el Servicio de Apoyo a la Investigación Tecnológica (SAIT) de la UPCT, que se ilustra en la Figura 2.15.

Este analizador de energías dispersivas de rayos X tiene una resolución de 129 eV en el pico $K\alpha$ del Mn a la mitad de su altura y un área activa de 10 mm^2 , y dispone de la aplicación informática Quantax 200 para el análisis de espectros de energías dispersivas de rayos X, perfiles de distribución de elementos a lo largo de una línea y mapas de distribución de elementos en un área seleccionada.

En la Figura 3.10 se muestra un ejemplo de la definición de la zona en la cual efectuar el microanálisis de la superficie del electrodo.

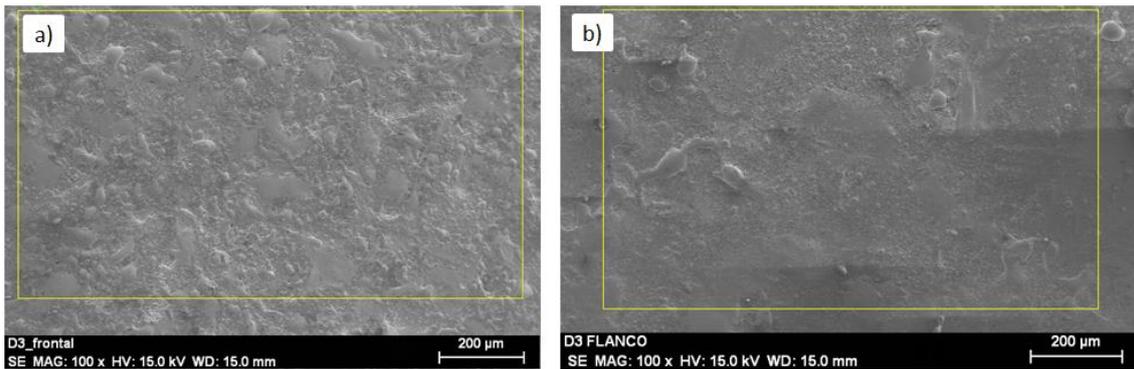


Figura 3.10 Ejemplo de selección de áreas para el microanálisis del material en la superficie afectada del electrodo: a) cara frontal y b) cara lateral.

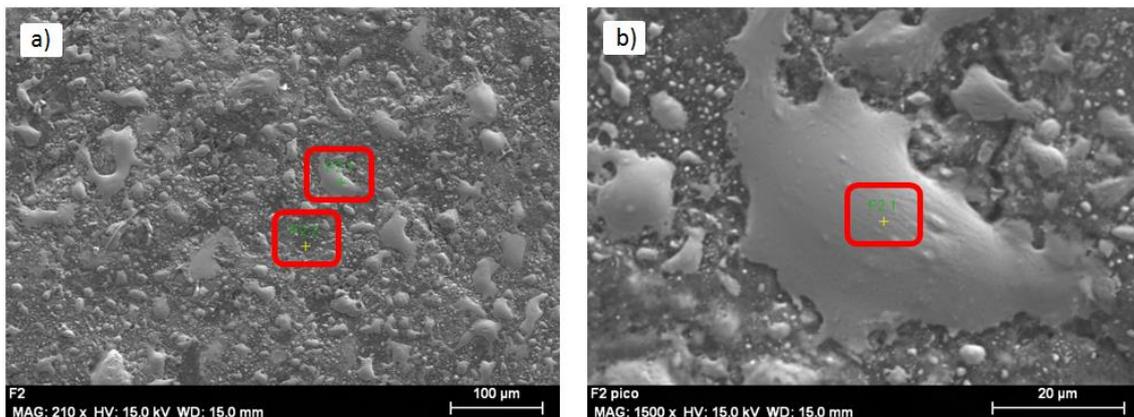


Figura 3.11 Ejemplo de selección de áreas para el microanálisis de protuberancias y depresiones en la superficie del electrodo.

Asimismo, en la Figura 3.11 se puede observar la selección de áreas más específicas como son las protuberancias y depresiones que se aprecian en la superficie, con el fin de esclarecer los mecanismos que intervienen en el desgaste de la herramienta.

Mediante esta técnica se podrá obtener los espectros que describen la composición química en el área seleccionada. En el siguiente apartado se desarrollará la discusión de estos resultados y el análisis de la relación existente con los parámetros del proceso.

3.2. Degradación de la superficie del electrodo.

En el presente apartado de esta tesis doctoral, se procede a la presentación de los resultados obtenidos durante el estudio de la superficie desgastada de la herramienta.

A continuación se incluyen diferentes apartados en los cuales se discuten los resultados relacionados con la medición de la rugosidad resultante en la superficie del electrodo como consecuencia de la degradación provocada por las descargas eléctricas, la curva de tasa de material portante, la geometría de la superficie desgastada del electrodo y la alteración de la composición química de la herramienta de corte.

3.2.1. Rugosidad superficial.

En la Figura 3.12 se muestra a modo de ejemplo el perfil obtenido durante la evaluación de la superficie del electrodo para unas determinadas condiciones de corte. En esta figura se representa simultáneamente el perfil primario (trazo negro), perfil de rugosidad (trazo azul) y perfil de ondulación (trazo verde), medidos en la zona central de la superficie afectada del electrodo para una intensidad de corriente de 8 A y una profundidad de penetración de 7 mm.

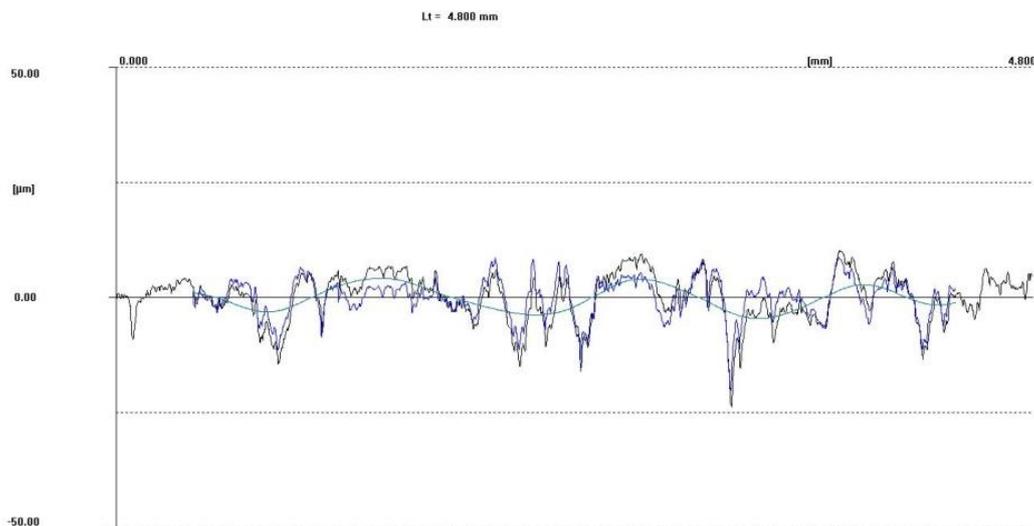


Figura 3.12 Ejemplo de perfil primario, perfil de rugosidad y perfil de ondulación en la superficie de la herramienta de corte.

A partir de los perfiles de rugosidad registrados en la cara frontal del electrodo para las diferentes condiciones de corte que han sido consideradas, se obtienen los valores de rugosidad superficial que se recogen en la Tabla 3.2, en términos de altura máxima del perfil (R_t), desviación media aritmética (R_a) y desviación media cuadrática (R_q).

Tabla 3.2 Rugosidad superficial en la cara frontal de los electrodos.

Profundidad de penetración (mm)	Intensidad de corriente (A)	Altura máxima del perfil (μm)	Desviación media Aritmética (μm)	Desviación media cuadrática (μm)
3	6	31,38	3,98	5,09
3	8	16,72	2,58	3,19
3	12	24,94	2,56	3,36
3	14	20,96	2,52	3,36
5	6	19,12	2,32	2,94
5	8	20,19	2,48	3,16
5	12	26,63	3,27	4,19
5	14	34,50	3,88	5,01
7	6	26,10	3,22	4,19
7	8	29,43	3,38	4,34
7	12	35,90	3,13	4,29
7	14	23,66	2,39	3,19

La Figura 3.13 representa la variación que se produce en la rugosidad de la superficie del electrodo, dependiendo del valor de los parámetros del proceso.

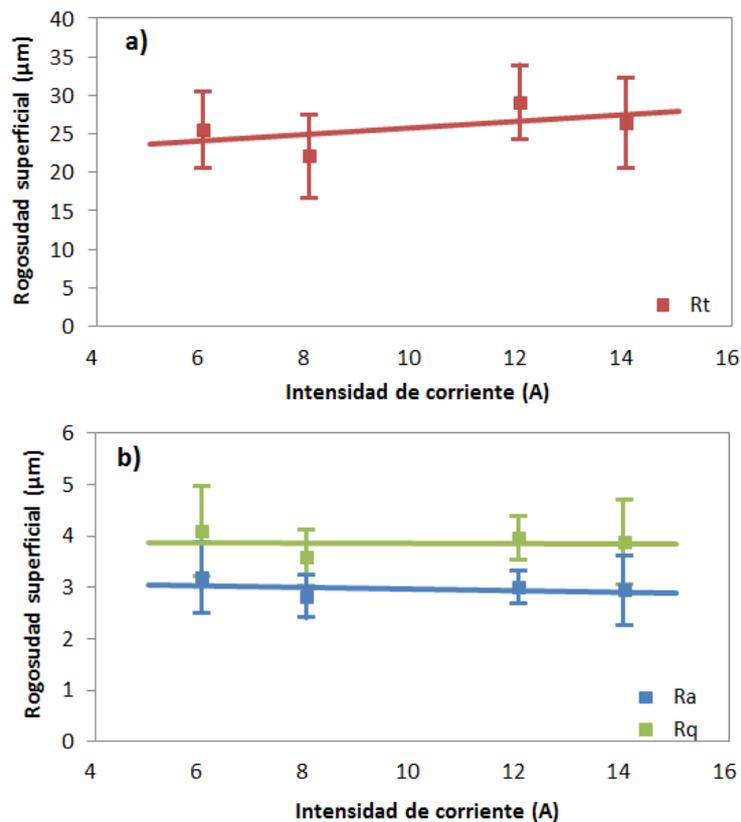


Figura 3.13 Rugosidad superficial en la cara frontal de los electrodos en función de la intensidad de corriente.

En la Figura 3.13a se observa un ligero incremento de la altura máxima del perfil (Rt) conforme aumenta la intensidad de corriente, sin embargo se aprecia una excesiva dispersión que supone la imposibilidad de considerar una determinada relación entre ambos parámetros.

Por otra parte, de acuerdo con las curvas que se ilustran en la Figura 3.13b, se comprueba que la desviación media aritmética (Ra) y la desviación media cuadrática (Rq) no varían con la intensidad de corriente seleccionada en el proceso de mecanizado por electroerosión.

De forma análoga, la Figura 3.14 representa los resultados obtenidos para la rugosidad superficial en función de la profundidad de penetración asumida para el mecanizado de la pieza de partida.

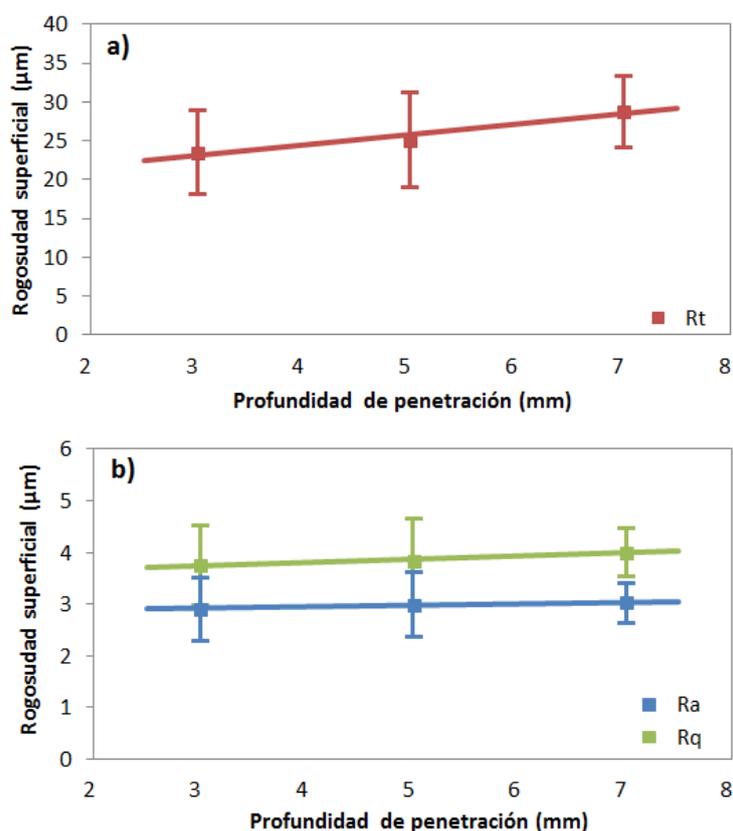


Figura 3.14 Rugosidad superficial en la cara frontal de los electrodos en función de la profundidad de penetración.

De nuevo se aprecia un ligero aumento de la altura máxima del perfil (Rt) conforme se recurre a mayores valores de profundidad de penetración, si bien la elevada dispersión existente no permite deducir una determinada tendencia en función de este parámetro del proceso.

Del mismo modo, no se observa una clara relación entre la profundidad de penetración y otros parámetros de rugosidad superficial como son la desviación media aritmética (Ra) y la desviación media cuadrática (Rq).

Como consecuencia, se puede concluir que el análisis de la rugosidad superficial no es apropiado para caracterizar la influencia de la intensidad de corriente y profundidad de penetración sobre la degradación de la herramienta, y por este motivo en los siguientes apartados se recurrirá al análisis de otros aspectos como son la morfología de la curva de tasa de material portante, la geometría de la superficie desgastada de la herramienta y la contaminación del material del electrodo.

3.2.2. Tasa de material portante.

Con el propósito de evaluar el efecto de los parámetros del proceso sobre la degradación de la superficie del electrodo, se ha incluido el análisis de las variaciones que se producen en la curva de tasa de material portante a causa de las condiciones de corte seleccionadas en los ensayos de electroerosión.

Para el análisis de la morfología de la curva de tasa de material portante en la superficie desgastada del electrodo, en esta tesis doctoral se ha optado por un parámetro que ha sido denominado profundidad en el tramo inicial de la curva de tasa de perfil portante, para el cual se ha seleccionado el símbolo δ . Este parámetro se define como la profundidad que corresponde a un valor de tasa de material portante del 10%.

La medición de la tasa de material portante que se ilustra en la Figura 3.15, se ha llevado a cabo en la zona central de la huella del electrodo como área representativa de la superficie del electrodo que se ve afectada por los fenómenos que tienen lugar durante el proceso de corte.

En el caso de que los valores obtenidos para la profundidad en el tramo inicial de la curva sean muy elevados, se puede deducir que la superficie electroerosionada es muy abrupta y por tanto ha quedado muy degradada durante el proceso. Por el contrario, valores reducidos de este parámetro implicarán que la superficie del electrodo se mantiene libre de un excesivo desgaste.

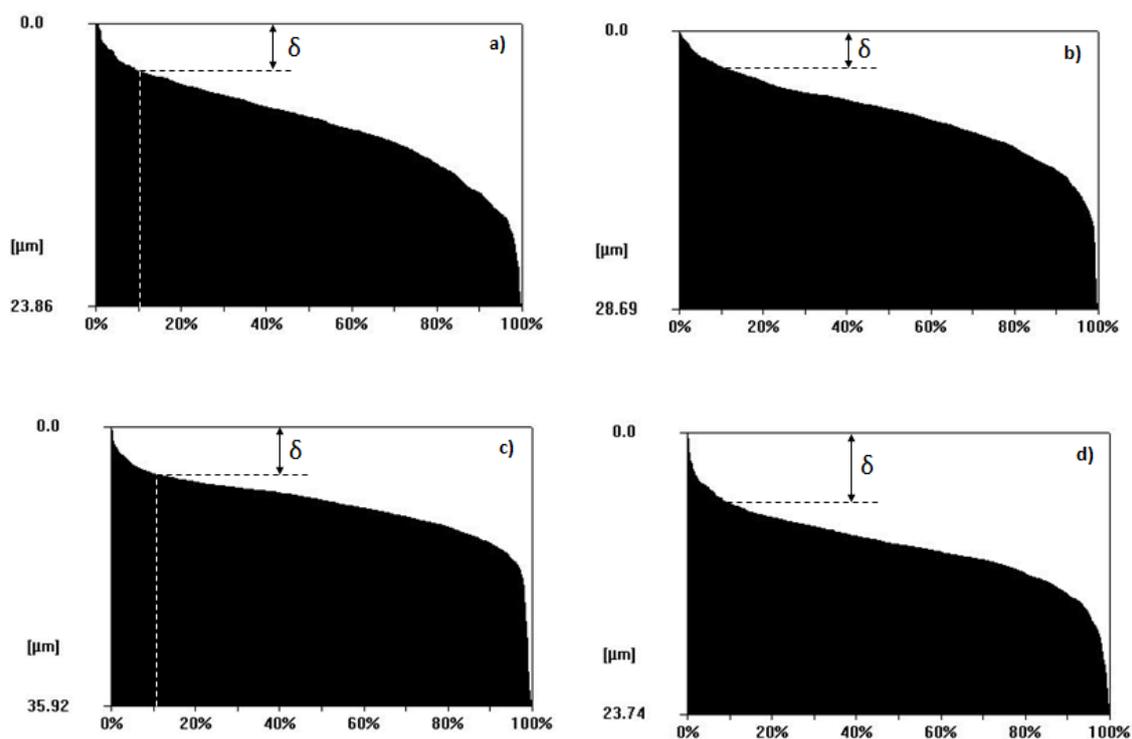


Figura 3.15 Profundidad en el tramo inicial de la curva de tasa de material portante en la superficie del electrodo para una profundidad de penetración de 7mm: a) intensidades de corriente de 6 A, b) 8 A, c) 12 A y d) 14 A.

Los valores obtenidos para la profundidad en el tramo inicial de la curva de tasa de perfil portante, se recogen en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Profundidad para el 10% de tasa de material portante (δ).

Profundidad de penetración (mm)	Intensidad de corriente (A)	Profundidad para el tramo inicial de la curva de tasa de material portante (μm)
3	6	2,75
3	8	2,68
3	12	7,74
3	14	5,49
5	6	1,52
5	8	5,18
5	12	6,98
5	14	10,4
7	6	3,94
7	8	3,68
7	12	5,75
7	14	5,86

De acuerdo con esta tabla, la profundidad que comprende a un 10% de tasa de material portante adopta valores crecientes en función a la intensidad de corriente, y esta tendencia se mantiene para los diferentes valores de profundidad de penetración.

En la Figura 3.16 y Figura 3.17 se ilustran algunas de las imágenes registradas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) durante el análisis de la superficie del electrodo, para poder corroborar los resultados obtenidos durante la evaluación de la tasa de material portante. A modo de ejemplo, en estas figuras se representa las imágenes SEM para una profundidad de penetración de 7 mm y dos diferentes valores de intensidad de corriente.

En estas figuras se aprecia una textura más abrupta en el caso de la intensidad de corriente más elevada, para este mismo valor de profundidad de penetración, lo cual está en concordancia con la tendencia creciente que se pone de manifiesto en los resultados de la Tabla 3.3.

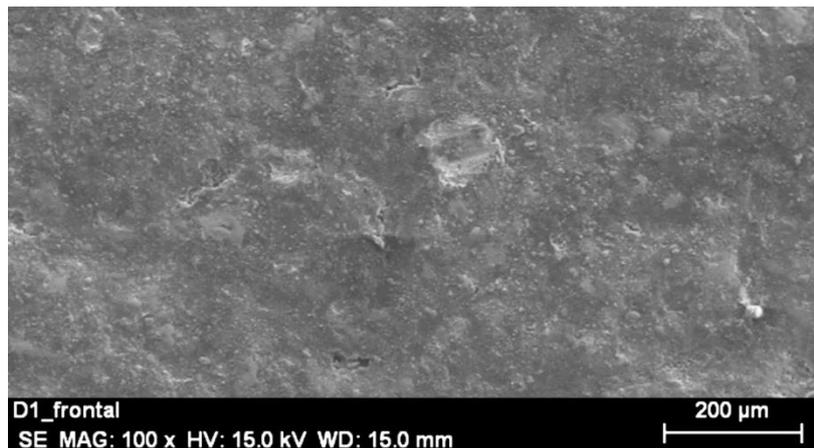


Figura 3.16 Imagen SEM de la zona central del electrodo para una profundidad de penetración de 7 mm e intensidad de corriente de 6 A.

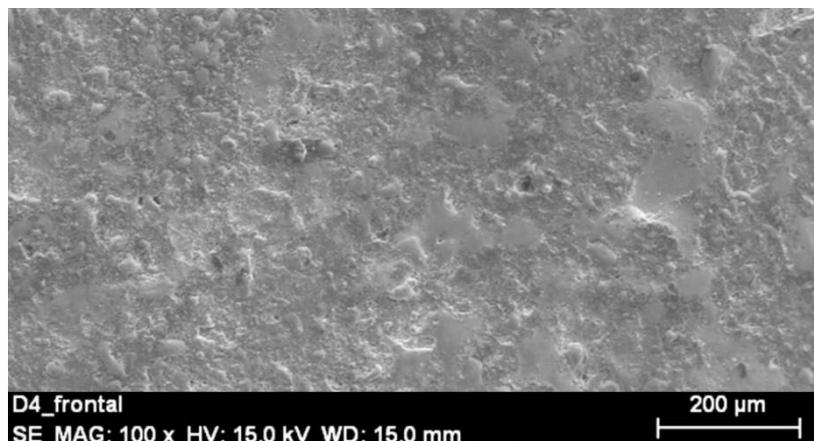


Figura 3.17 Imagen SEM de la zona central del electrodo para una profundidad de penetración de 7 mm e intensidad de corriente de 14 A.

A partir de los resultados que se recogen en la Tabla 3.3, la Figura 3.18 representa la profundidad en el tramo inicial de la curva de tasa de material portante en función de la intensidad de corriente asumida durante el proceso de electroerosión. En esta figura se evidencia una clara tendencia creciente de este indicador del estado de la superficie del electrodo conforme aumenta la intensidad de corriente.

Por tanto, se comprueba que la profundidad que corresponde a una tasa de material portante del 10% se puede adoptar para describir la influencia de la intensidad de corriente sobre la degradación de la herramienta.

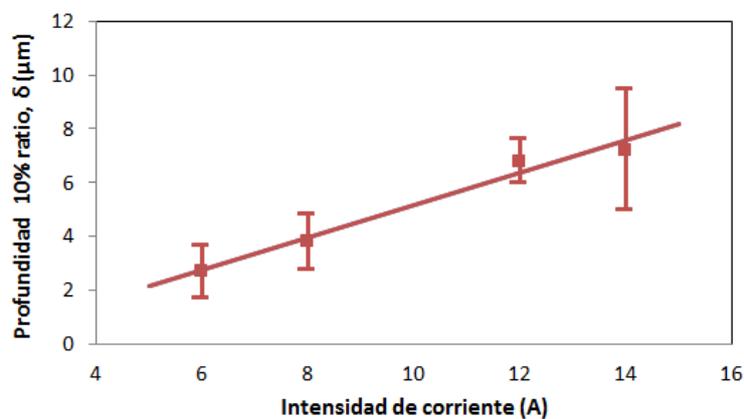


Figura 3.18 Profundidad en el tramo inicial de la curva de tasa de material portante en función de la intensidad de corriente.

La relación existente entre la intensidad de corriente y la profundidad que corresponde a una tasa de material portante del 10%, se puede expresar mediante la siguiente ecuación, dentro del rango de condiciones de corte que han sido consideradas en este trabajo:

$$\delta = -0.8315 + 0,6002 I \quad (7)$$

El incremento de las protuberancias detectadas en la superficie del electrodo puede ser atribuido al aumento de la energía calorífica suministrada por el canal de plasma para mayores valores de intensidad de corriente, lo cual se traduce en una mayor cantidad de material eliminado que se encuentra en suspensión en el fluido dieléctrico y por tanto puede solidificar sobre la superficie del electrodo, quedando adherido a dicha superficie. En efecto, en el último apartado de este capítulo se comprueba que estas protuberancias corresponden a material adherido a la superficie de la herramienta, procedente del material de la pieza de trabajo.

Además, este material recrecido puede conllevar el aumento de la probabilidad de que las descargas se repitan en esa zona de la herramienta de corte, por la mayor proximidad con la superficie de la pieza, contribuyendo al depósito de una mayor cantidad de material procedente de la pieza mecanizada.

Por otra parte, el incremento de la energía proporcionada por las descargas eléctricas puede suponer el alcance de una mayor temperatura en las zonas de la herramienta más próximas al punto en el que se produce la descarga eléctrica, lo cual dará lugar a una mayor pérdida de material en la superficie de la herramienta y será el responsable de las depresiones detectadas durante la evaluación de la superficie de la herramienta desgastada.

La Figura 3.19 recoge los valores obtenidos para la profundidad en el tramo inicial de la curva de tasa de material portante a partir de la profundidad de penetración para las condiciones de corte contempladas en esta tesis doctoral.

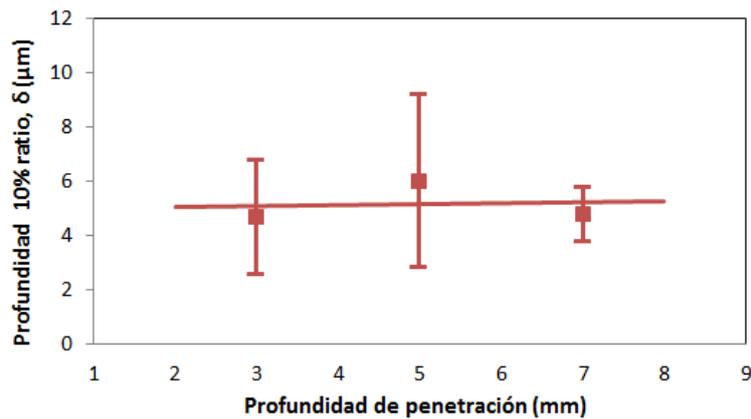


Figura 3.19 Profundidad en el tramo inicial de la curva de tasa de material portante en función de la profundidad de penetración.

En esta figura se pone de manifiesto que no existe una clara relación entre la profundidad de penetración y la profundidad que corresponde a una tasa de material portante del 10%. Esto puede ser explicado por la mayor influencia que tiene la intensidad de corriente sobre la energía calorífica proporcionada por las descargas eléctricas, que es la responsable tanto de la pérdida de material en la superficie del electrodo como de la aparición de material recrecido que procede de la pieza de trabajo.

3.2.3. Geometría de la superficie desgastada.

El estudio de la alteración que tiene lugar en la geometría de la herramienta, permitirá contribuir a la determinación del desgaste de la herramienta durante el proceso de electroerosión.

Como ha sido explicado en el diagrama de la Figura 3.7, en la zona límite del electrodo, que corresponde a las proximidades a la interfase entre la zona afectada y no afectada del electrodo, se tiende a la aparición de un surco dependiendo de las condiciones de corte consideradas. Esta depresión en forma de surco es el resultado de una pérdida considerable de material en una región muy localizada de la superficie del electrodo, la cual corresponde a la zona que se enfrenta al extremo de la superficie de la pieza.

Para el análisis de esta pérdida abrupta de material, se procederá a la evaluación del perfil primario de la superficie y la observación de esta zona mediante microscopía electrónica.

En la Figura 3.20 se ilustra a modo de ejemplo el perfil de rugosidad registrado durante el examen de la zona límite de la superficie de la herramienta de corte para unos determinados valores de los parámetros del proceso. El perfil de rugosidad de la superficie que se muestra en esta figura corresponde a una profundidad de penetración de 5 mm y una intensidad de corriente de 12 A.

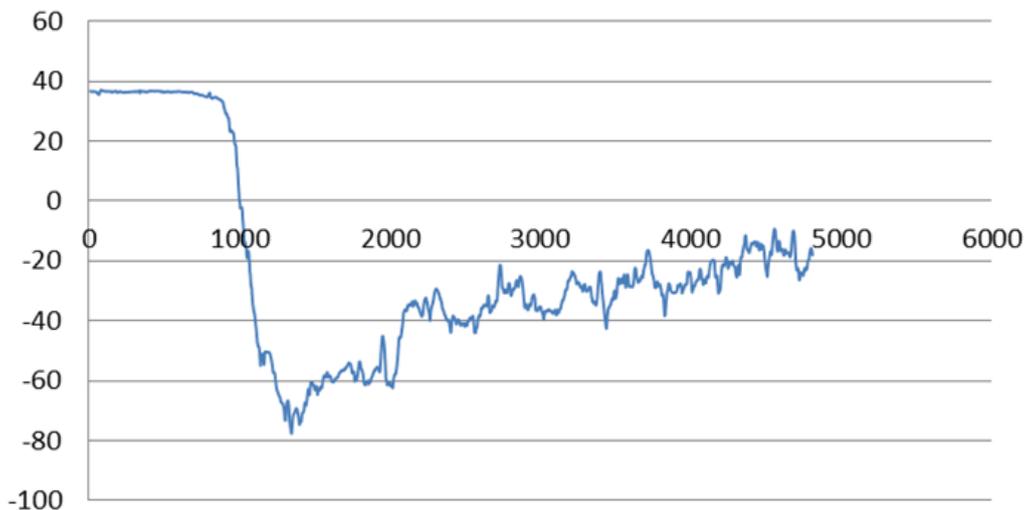


Figura 3.20 Perfil de la superficie en la zona límite del electrodo para una intensidad de corriente de 12 A y profundidad de penetración de 5 mm.

En el perfil de rugosidad que se representa a modo de ejemplo en la Figura 3.20, se aprecia el incremento que tiene lugar en la rugosidad de la superficie en la zona desgastada del electrodo.

No obstante, para el análisis del deterioro de la geometría de la herramienta se recurrirá no al perfil de rugosidad, sino al perfil primario registrado durante la exploración de la superficie del electrodo, ya que el perfil de rugosidad se limita a las irregularidades que se advierten para reducidas longitudes de onda, mientras que el perfil primario representa la totalidad de las variaciones registradas en el perfil de la superficie.

En las siguientes figuras que se recogen en este apartado, se representa el contorno proporcionado por el perfil primario que ha sido registrado durante el análisis de la superficie del electrodo para las diferentes condiciones de corte. En estas figuras se identifica la variación que se produce en los parámetros que han sido definidos en esta tesis doctoral para el análisis de la geometría de la herramienta, como son la distancia a la posición central del surco del electrodo d_o , la profundidad máxima en el surco del electrodo h_o , la distancia a la zona central del electrodo d_c y la profundidad media en la zona central del electrodo h_c .

Las Figuras 3.21, 3.23 y 3.25 representan la geometría de la superficie desgastada de la herramienta para profundidades de penetración de 3, 5 y 7 mm, superponiendo el contorno que corresponde a los diferentes valores de intensidad de corriente que han sido contemplados para los ensayos efectuados con cada profundidad de penetración. En estas figuras se emplea un color distinto para las curvas que corresponden a los diferentes valores de intensidad de corriente, comprendidos entre 6 y 14 A.

Por otra parte, en las Figuras 3.22, 3.24 y 3.26 se recoge algunas imágenes de la zona límite del electrodo que han sido obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), las cuales servirán para corroborar la geometría definida por el perfil primario que ha sido registrado durante la exploración de la superficie del electrodo.

Los resultados registrados para una profundidad de penetración de 3 mm se exponen en la Figura 3.21, en la cual se observan los surcos que aparecen para intensidades de corriente de 12 y 14 A. Sobre las curvas de esta figura, se marcan los parámetros que caracterizan la geometría de la superficie del electrodo, como son la distancia a la posición central del surco del electrodo d_o , la profundidad máxima del surco h_o , la distancia a la zona central del electrodo d_c y la profundidad máxima en la zona central h_c .

De acuerdo con esta figura, para intensidades de corriente de 6 y 8 A no se aprecia aún la formación de una depresión en forma de surco al comienzo de la zona afectada del electrodo, mientras que para valores de intensidad de corriente de 12 y 14 A se demuestra la existencia del surco que caracteriza la geometría de la herramienta desgastada, con una profundidad del surco creciente en función de este parámetro del proceso. Por otra parte, se comprueba que la posición del surco del electrodo se mantiene constante, lo cual puede ser atribuido al hecho de que viene dado por la posición del extremo de la pieza de trabajo y ésta no varía durante el proceso de electroerosión por penetración.

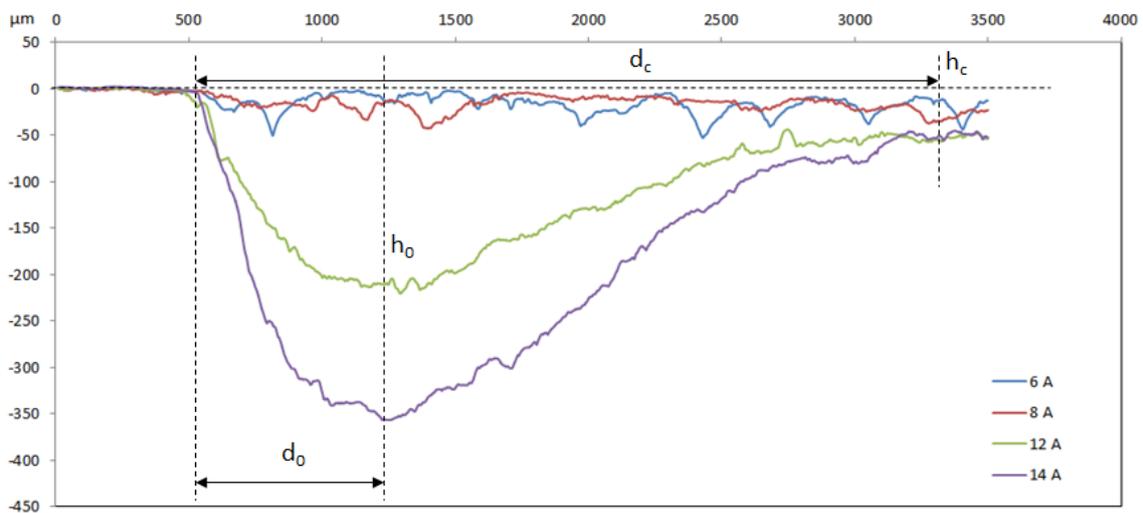


Figura 3.21 Geometría de la zona límite del electrodo para una profundidad de penetración de 3 mm.

En relación con la zona central de la superficie del electrodo, según las curvas que corresponden a intensidades de corriente de 12 y 14 A, se observa que se mantiene constante la posición que marca el comienzo de esta zona, y que se produce una mayor profundidad media para estas elevadas intensidades de corriente.

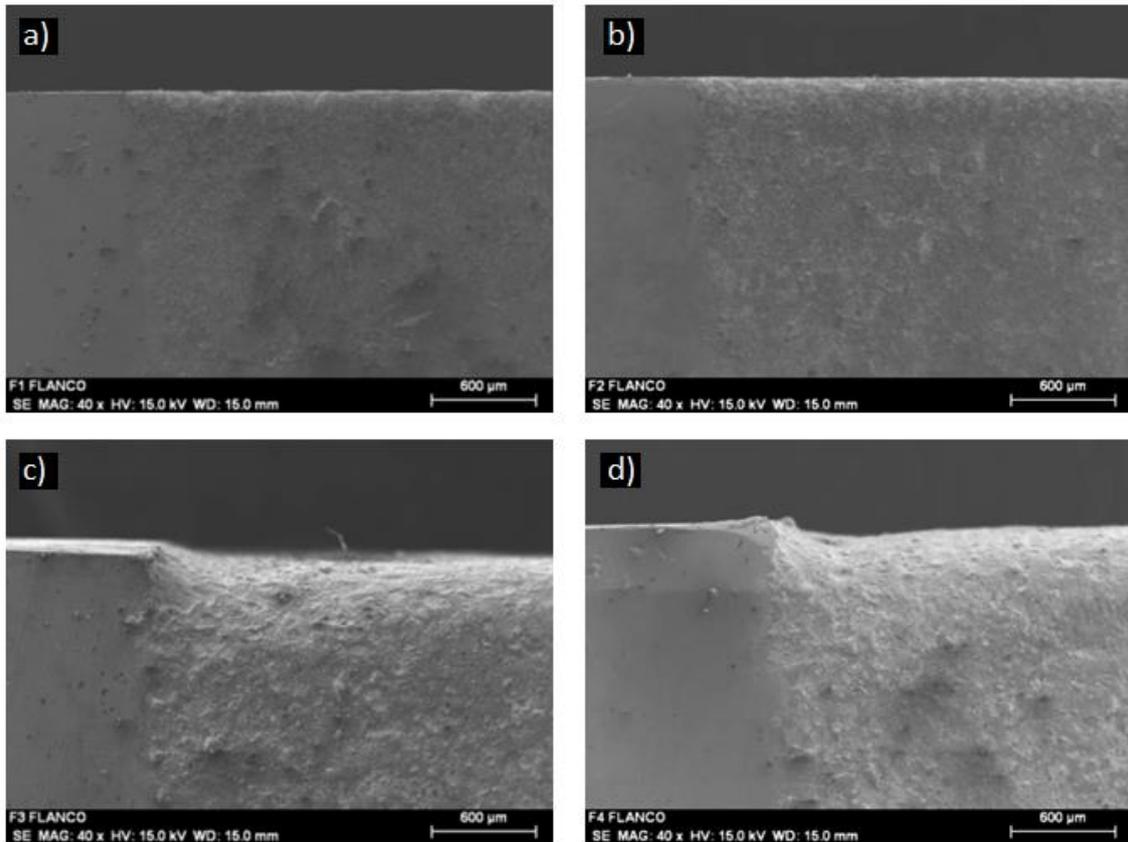


Figura 3.22 Imágenes SEM en la zona límite del electrodo para profundidad de penetración de 3 mm.

La geometría de la herramienta desgastada se puede comprobar en las imágenes de microscopía electrónica que se ilustran en la Figura 3.22. En estas imágenes se evidencia claramente el leve desgaste que se origina para intensidades de corriente moderadas (6 y 8 A) y la aparición de una depresión en forma de surco para los valores más elevados de este parámetro del proceso (12 y 14 A), lo cual está en concordancia con el contorno de la superficie determinado mediante la evaluación del electrodo con un rugosímetro de palpación mecánica.

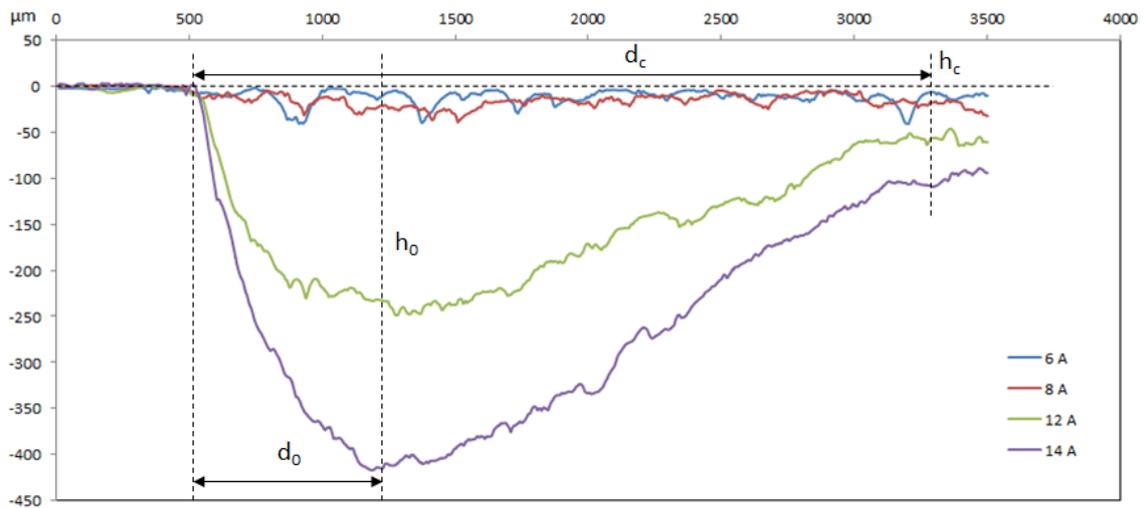


Figura 3.23 Geometría de la zona límite del electrodo para una profundidad de penetración de 5 mm.

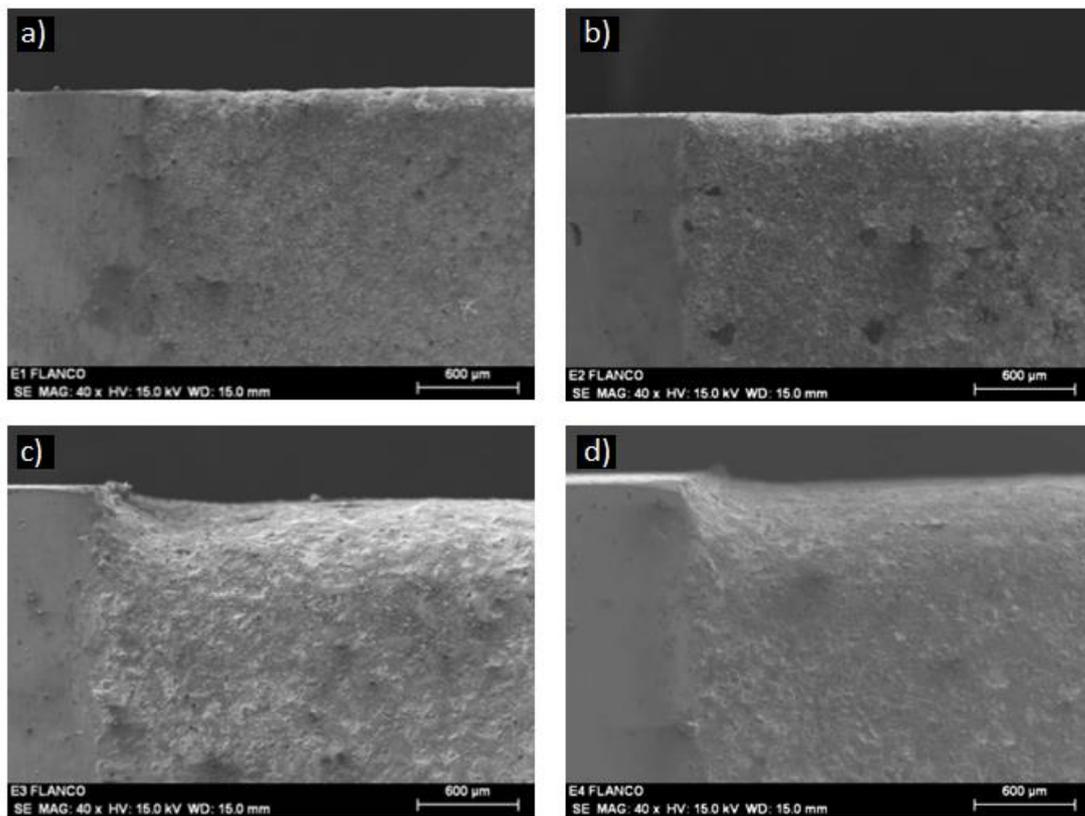


Figura 3.24 Imágenes SEM en la zona límite del electrodo para profundidad de penetración de 5 mm.

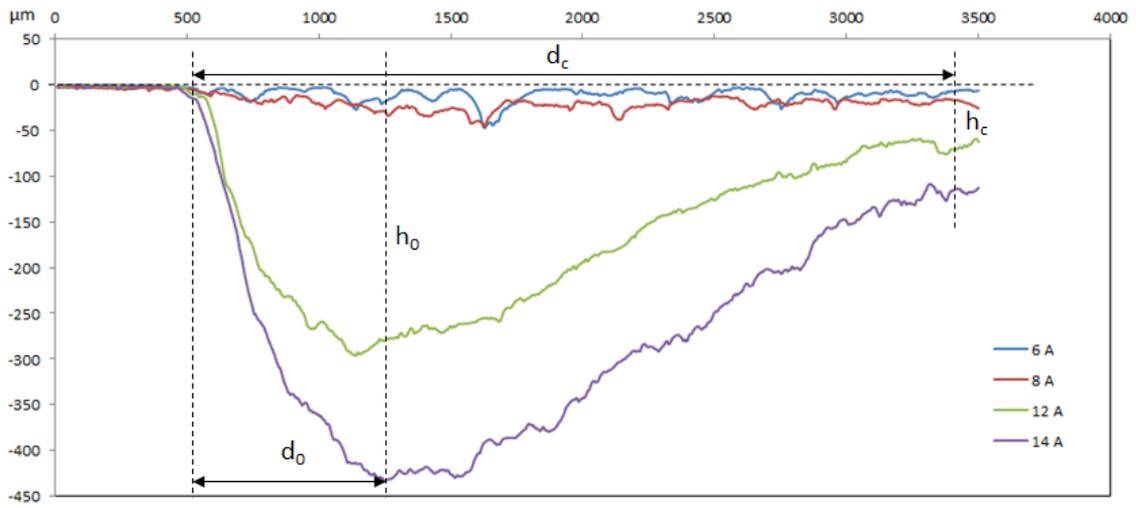


Figura 3.25 Geometría de la zona límite del electrodo para una profundidad de penetración de 7 mm.

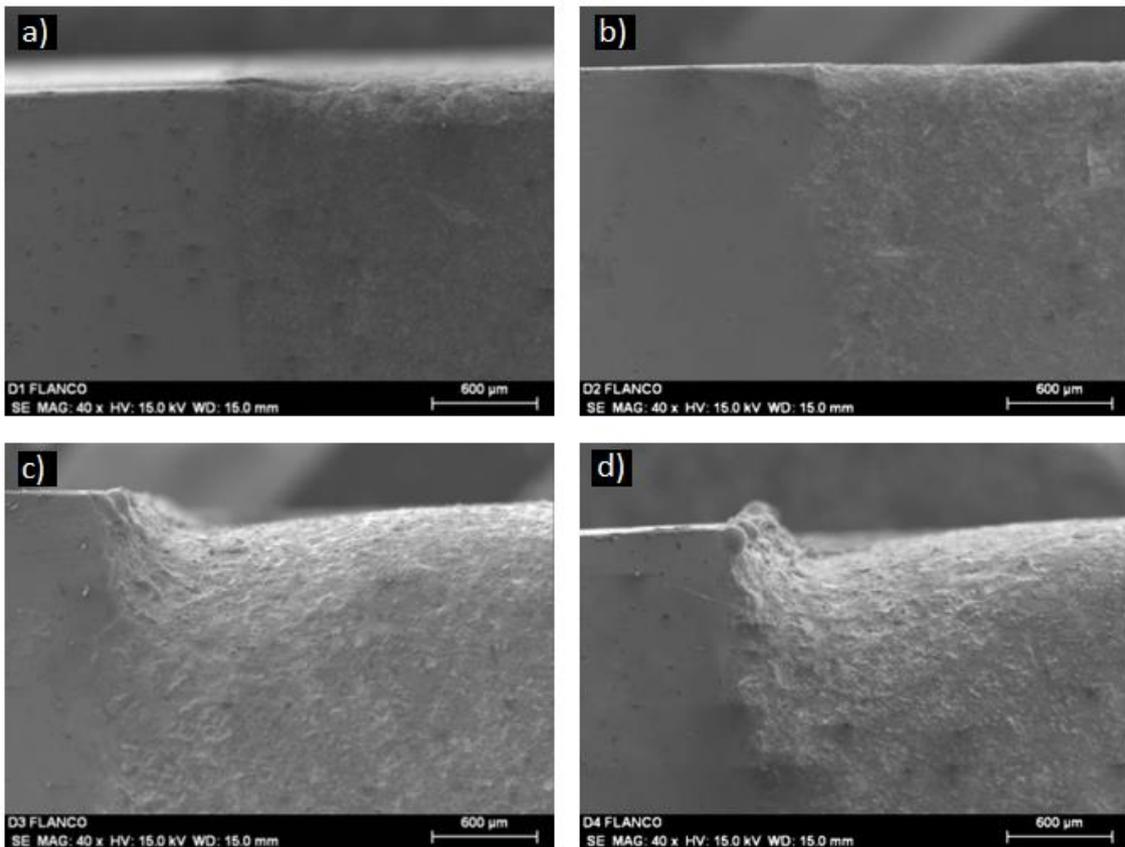


Figura 3.26 Imágenes SEM en la zona límite del electrodo para profundidad de penetración de 7 mm.

Si se comparan las Figuras 3.21, 3.23 y 3.25, se puede describir las variaciones que se producen en el perfil de la superficie para profundidades de penetración de 3, 5 y 7 mm, respectivamente.

Según los resultados que se muestran en estas figuras, se observa que se alcanza una profundidad máxima en el surco cada vez mayor conforme se incrementa la profundidad de penetración, con valores de hasta 440 μm ; mientras que efectivamente se mantiene un valor constante en la distancia entre la posición del surco y la zona no afectada del electrodo, con un valor aproximado de 1200 μm para las condiciones de corte consideradas en este trabajo.

En las curvas que representan el perfil de la superficie, se refleja más claramente el incremento de la profundidad media en la zona central del electrodo para los valores más elevados de profundidad de penetración, hasta una profundidad media de 125 μm ; en cambio se mantiene una distancia prácticamente constante a esta región de la superficie de la herramienta, de alrededor de 3350 μm respecto de la zona no desgastada del electrodo para estos parámetros del proceso.

Por tanto, estas figuras permiten comprobar que la posición del surco y la posición de la zona central del electrodo no están condicionados por la profundidad de penetración y la intensidad de corriente.

Las imágenes SEM que se exponen en las Figuras 3.22, 3.24 y 3.26, permiten comprobar las transformaciones que se han puesto de manifiesto acerca de la geometría de la herramienta desgastada. El desgaste en forma de surco que caracteriza la zona límite del electrodo, se puede explicar por el efecto del borde de la pieza de trabajo, el cual dará lugar a una mayor concentración de descargas eléctricas en los puntos de la superficie del electrodo localizados en la interfase entre la zona afectada y no afectada por el proceso de electroerosión.

La existencia de este mayor número de descargas supondrá una pérdida de material más acusada en esta región del electrodo, y este surco se extenderá a lo largo del borde de la zona límite como se aprecia en las imágenes SEM para las intensidades de corriente más elevadas.

Las Figuras 3.27, 3.29, 3.31 y 3.33 describen el perfil de la superficie para intensidades de corriente de 6, 8, 12 y 14 A, respectivamente. En estas figuras se puede apreciar la influencia de la profundidad de penetración para cada valor de intensidad de corriente.

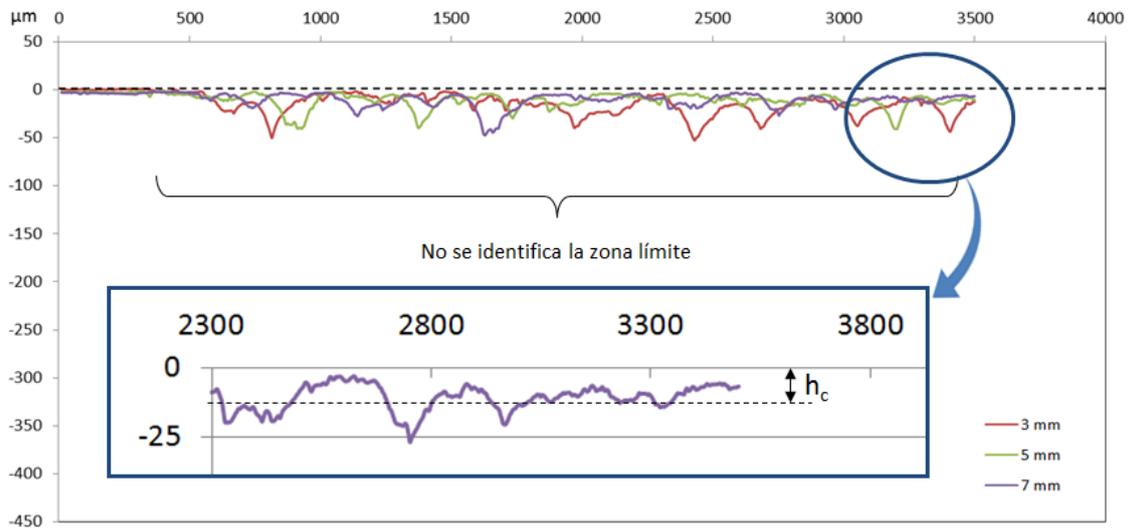


Figura 3.27 Geometría de la zona límite del electrodo para una intensidad de corriente de 6 A.

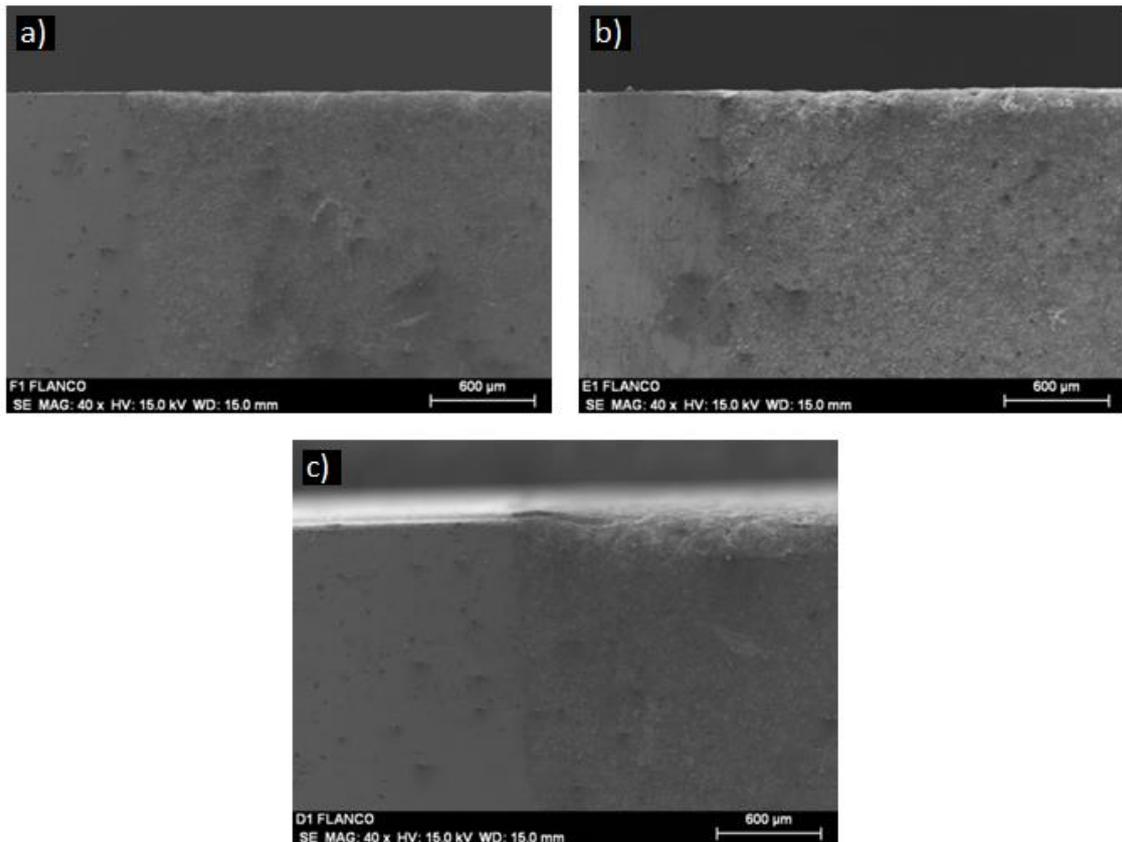
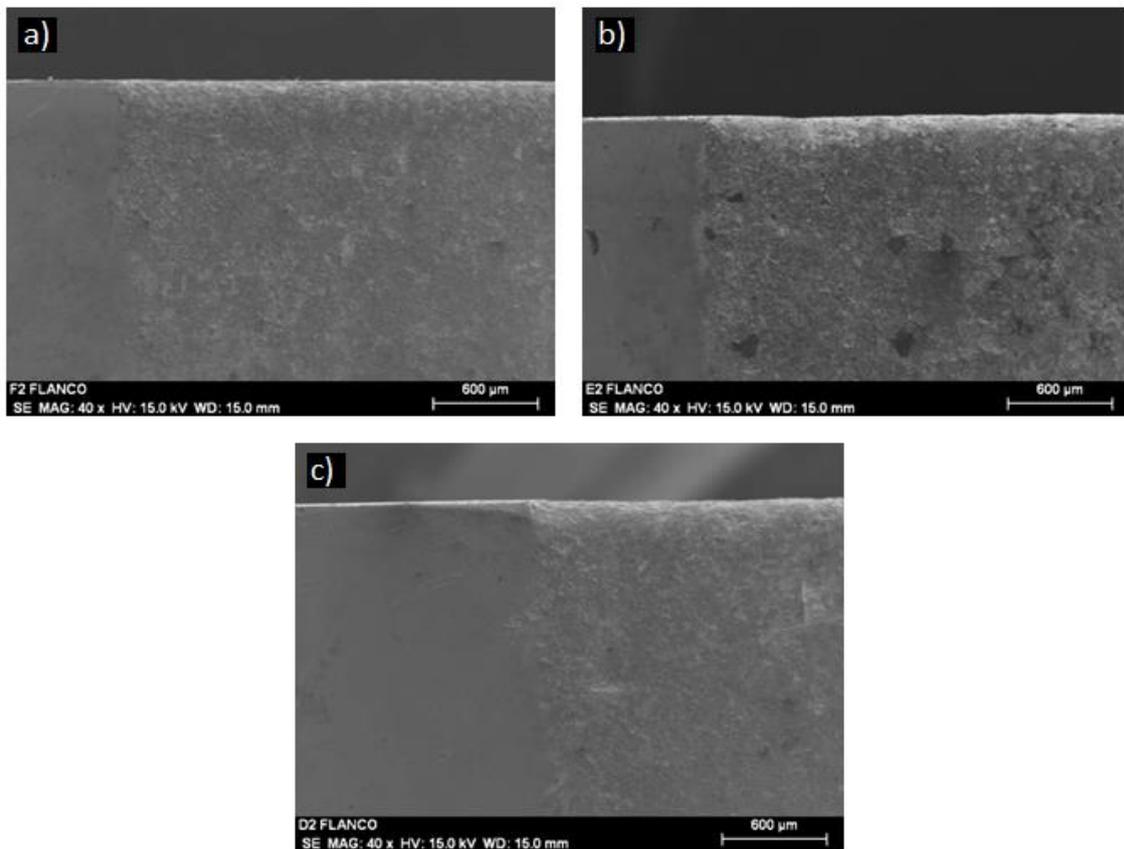
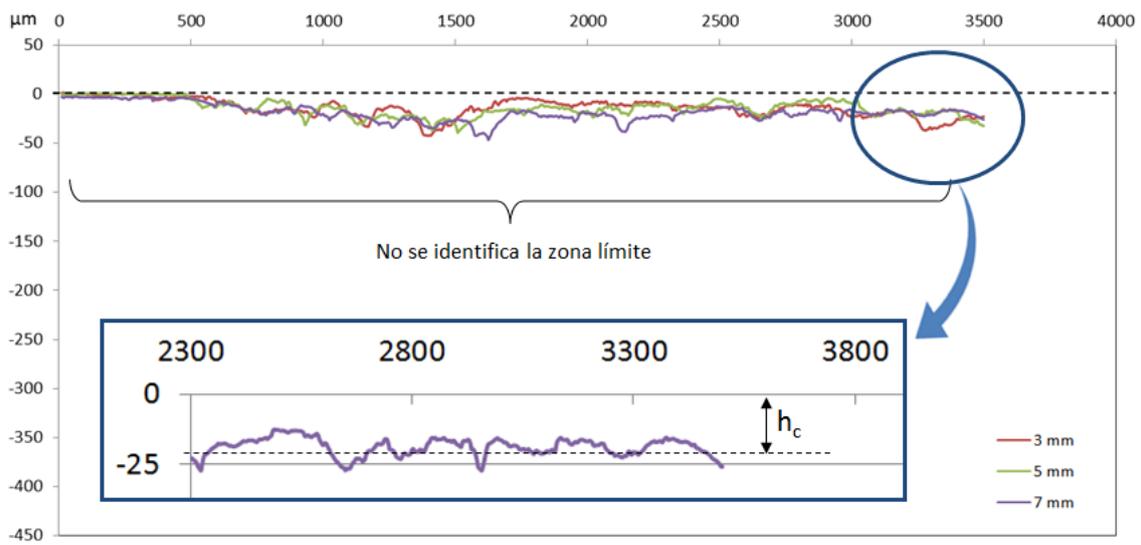


Figura 3.28 Imágenes SEM en la zona límite del electrodo para una intensidad de corriente de 6 A.



En la Figura 3.27 y Figura 3.29 se evidencia la ausencia de una depresión en forma de surco para intensidades de corriente de 6 y 8 A, a diferencia de lo que sucede para mayores valores de intensidad de corriente.

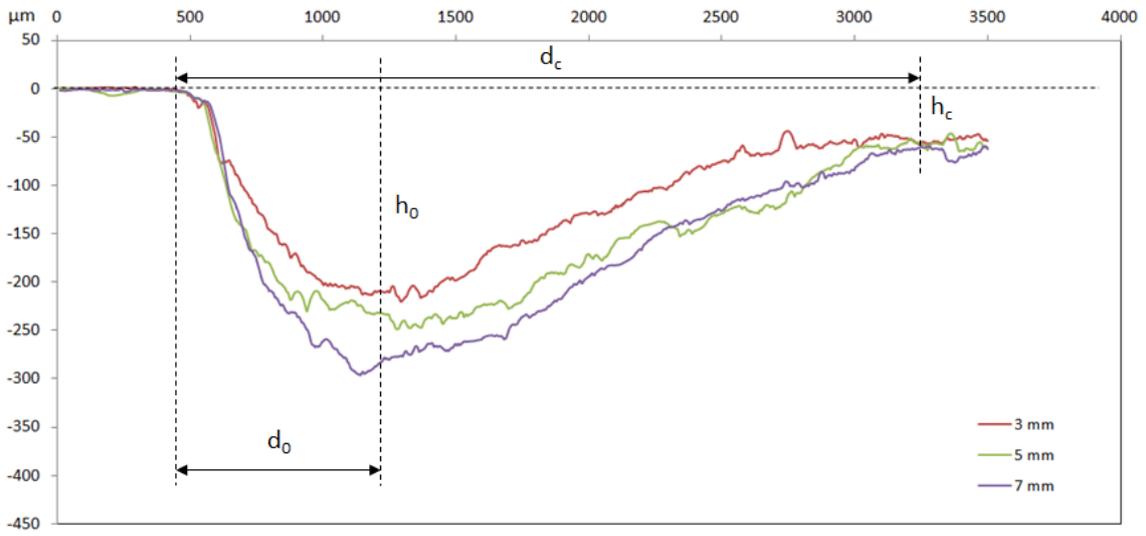


Figura 3.31 Geometría de la zona límite del electrodo para una intensidad de corriente de 12 A.

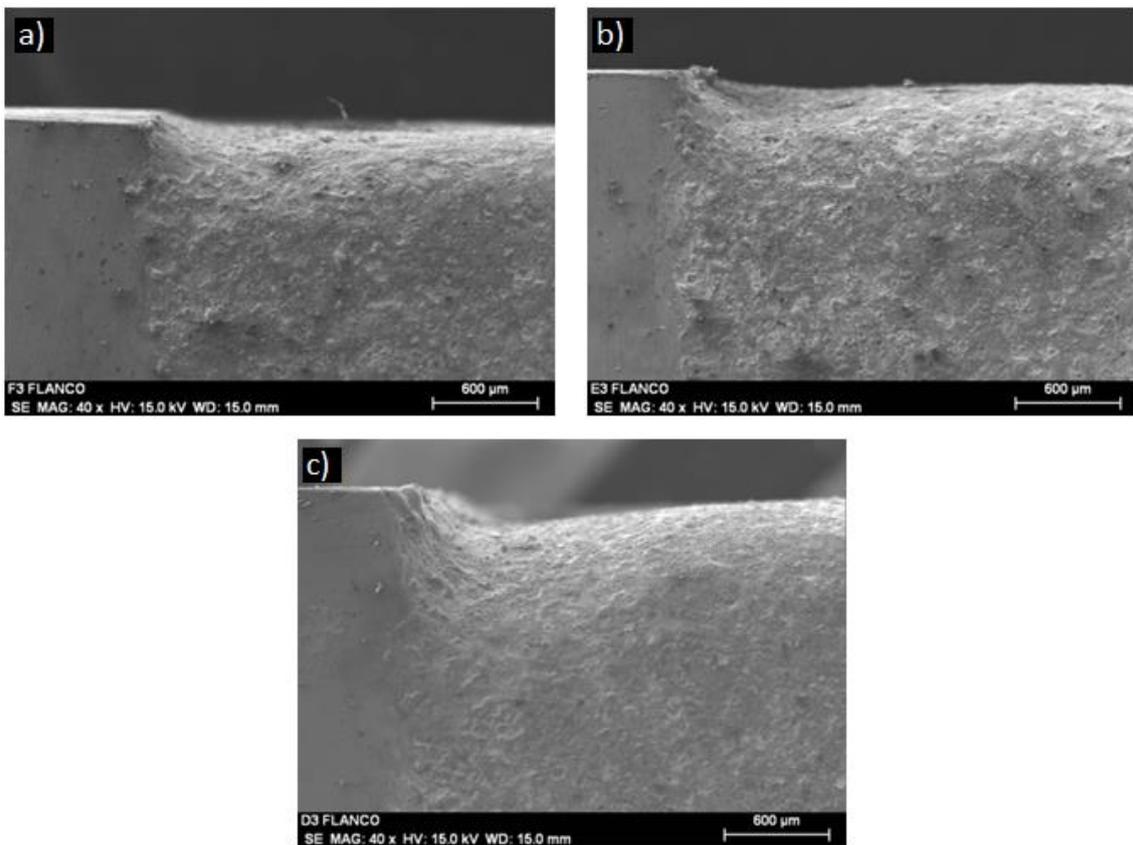


Figura 3.32 Imágenes SEM en la zona límite del electrodo para una intensidad de corriente de 12 A.

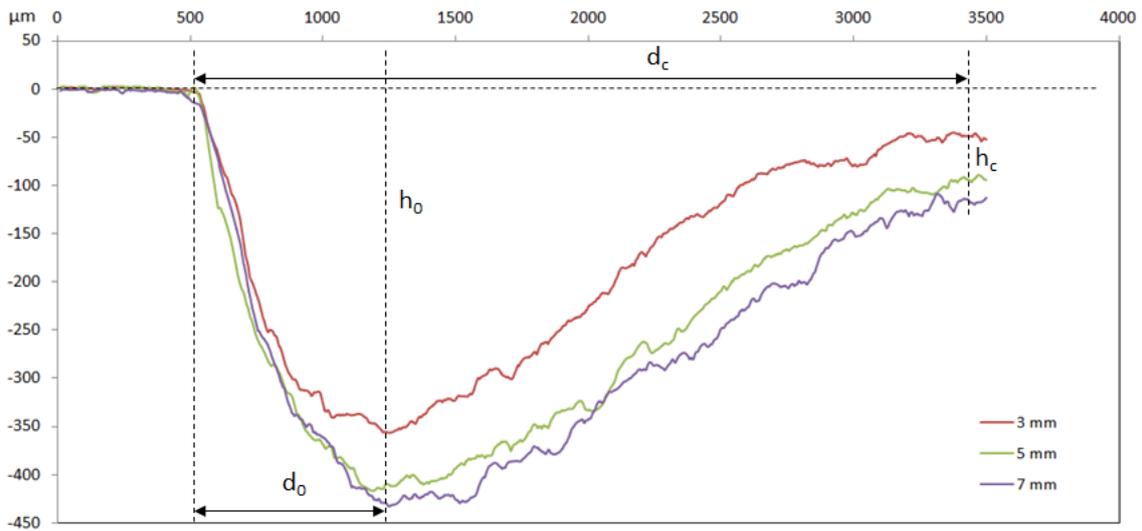


Figura 3.33 Geometría de la zona límite del electrodo para una intensidad de corriente de 14 A.

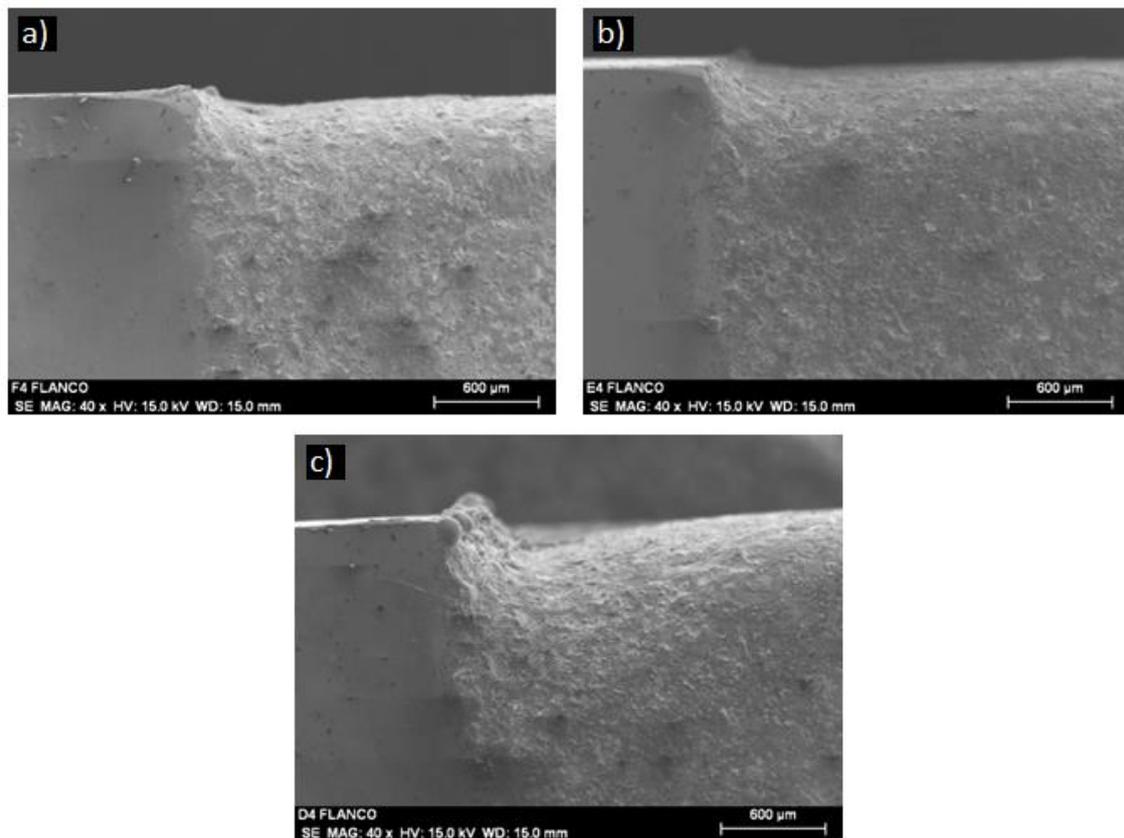


Figura 3.34 Imágenes SEM en la zona límite del electrodo para una intensidad de corriente de 14 A.

De acuerdo con la Figura 3.31 y Figura 3.33, para intensidades de corriente de 12 y 14 A se demuestra la existencia de un surco claramente definido que caracteriza la geometría de la

herramienta desgastada, y se observa el aumento del desgaste del electrodo en forma de surco, con valores de profundidad máxima en el surco comprendidos entre 220 y 300 μm para una intensidad de corriente de 12 A y entre 360 y 440 μm para 14 A. Estas figuras denotan una fuerte relación entre la intensidad de corriente y profundidad máxima en el surco de la zona límite.

Al igual que sucedía en las curvas que representaban la geometría de la herramienta desgastada en función de la profundidad de penetración, en la Figura 3.31 y Figura 3.33 también se evidencia una distancia constante a la posición del surco, con un valor aproximado de 1200 μm .

De la misma manera, estas figuras reflejan una distancia a la zona central que se mantiene prácticamente constante para los diferentes valores de los parámetros del proceso, con valores comprendidos entre 3250 3450 μm .

El perfil de la superficie que se representa en las Figuras 3.27, 3.29, 3.31 y 3.33, se puede corroborar mediante las imágenes SEM que se exponen en las Figuras 3.28, 3.30, 3.32 y 3.34. En estas imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), se refleja la misma geometría de la herramienta desgastada que ha sido deducida a partir del perfil primario de la superficie del electrodo.

Los valores registrados para la profundidad que adquiere la depresión en forma de surco de la zona límite del electrodo, se recogen en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Profundidad máxima en el surco del electrodo en función de la profundidad de penetración e intensidad de corriente.

Profundidad de penetración (mm)	Intensidad de corriente (A)	Profundidad máxima en el surco (μm)
3	6	11
3	8	17
3	12	220
3	14	356
5	6	14
5	8	20
5	12	249
5	14	417
7	6	16
7	8	24
7	12	296
7	14	433

Como se observa en esta tabla, la profundidad del surco tiene una clara tendencia creciente para todos los valores de profundidad de penetración.

El incremento que presentan los valores que se muestran en esta tabla para la profundidad máxima del surco, se representan en la Figura 3.35, para poder apreciar gráficamente la relación existente entre los parámetros del proceso y este parámetro relacionado con la geometría de la herramienta.

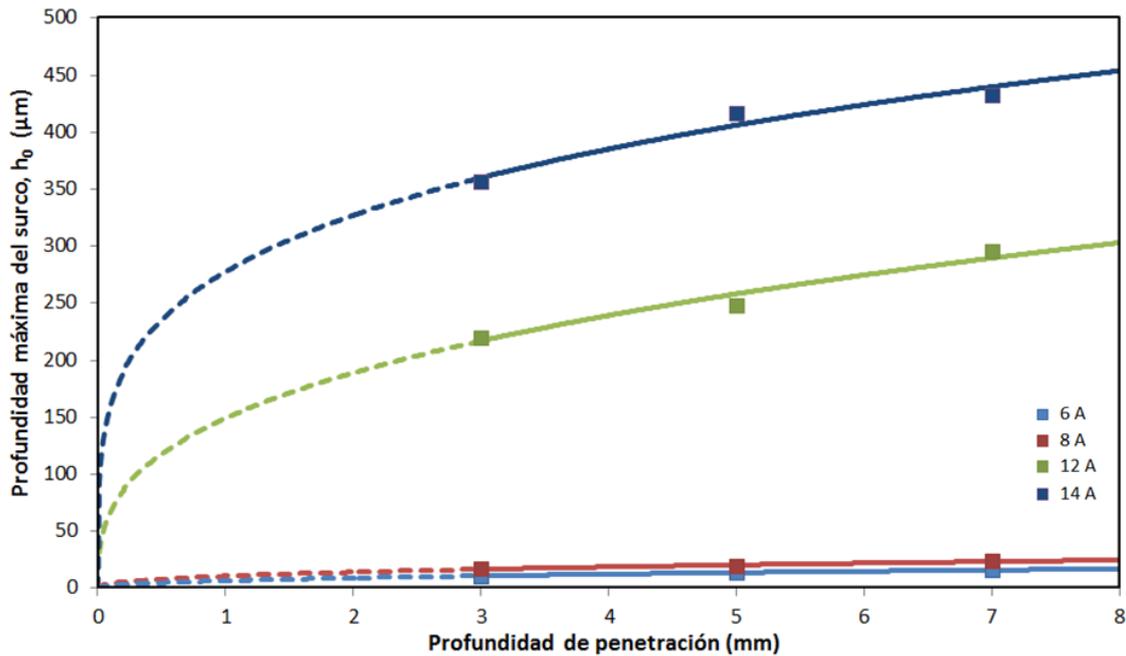


Figura 3.35 Profundidad máxima en el surco del electrodo en función de la profundidad de penetración.

Esta figura representa las curvas de desgaste que describen la evolución de la profundidad del surco del electrodo en función de la profundidad de penetración, que a su vez está relacionada con el tiempo de mecanizado, y por tanto podrían servir para determinar la vida de la herramienta si se asumiera un cierto valor máximo para esta forma de desgaste del electrodo. En esta figura se incluye una familia de curvas que corresponden a los diferentes valores de intensidad de corriente, y en todas ellas se observa una tendencia creciente con la profundidad de penetración.

Para intensidades de corriente de 12 y 14 A, se deducen curvas con una pendiente similar, aunque con una mayor tasa de desgaste inicial en los primeros instantes del proceso, los cuales corresponderían a reducidos valores de profundidad de penetración.

En las curvas que corresponden a intensidades de corriente de 6 y 8 A, se representa un valor de profundidad en el surco que coincide con la profundidad media en la zona central, y se observa que presentan una reducida pendiente en comparación con los valores más elevados de intensidad de corriente.

A través de la correlación entre la profundidad máxima en el surco y los parámetros del proceso que han sido considerados en este trabajo, se puede deducir que la siguiente expresión potencial para describir la variación esperada de esta forma de desgaste de la herramienta en función de las condiciones de corte asumidas en el proceso de electroerosión:

$$h_o = a(I) \cdot z^{b(I)} \quad (8)$$

donde I es la intensidad de corriente seleccionada para el sistema eléctrico de la máquina de EDM, z es la profundidad de penetración que representa la longitud total a recorrer por el electrodo durante el movimiento de penetración en el material de partida, y a(I) y b(I) son la constante y el exponente para la profundidad máxima en el surco, los cuales dependen de la intensidad de corriente.

A partir de los resultados experimentales registrados para el desgaste en forma de surco, se puede deducir para los parámetros a(I) y b(I) los valores que se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Constante y exponente para la profundidad máxima del surco en función de la intensidad de corriente

	6 A	8 A	12 A	14 A
a(I)	2.5	10	160	272
b(I)	0.95	0.50	0.30	0.25

En esta tabla se advierte una clara tendencia creciente en la constante a(I), y por el contrario decreciente en el caso del exponente b(I).

Estos dos parámetros se pueden estimar a partir de la intensidad de corriente mediante las siguientes ecuaciones:

$$a = a_1 \cdot I^{a_2} \quad (9)$$

$$b = b_1 - b_2^{b_3 I} \quad (10)$$

donde I es la intensidad de corriente, y a_1 , a_2 , b_1 , b_2 y b_3 son coeficientes que dependen de las propiedades del material de trabajo y la configuración del proceso de electroerosión. Los valores obtenidos por correlación para estos coeficientes se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Coeficientes para la profundidad máxima en el surco del electrodo.

a_1	0.0010
a_2	4.7128
b_1	0.6200
b_2	0.1000
b_3	0.0930

Como consecuencia, la pérdida de material en la zona límite del electrodo se puede describir mediante la siguiente expresión, para las condiciones de corte y los materiales considerados en esta tesis doctoral:

$$h_o = 0.001 \cdot I^{4.7128} \cdot z^{0.62-0.1^{0.093 \cdot I}} \quad (11)$$

El valor de los coeficientes que aparecen en esta expresión podrá variar si se procede al mecanizado por electroerosión de otros materiales o se asumen otros rangos para las condiciones de corte.

3.3. Contaminación de la superficie del electrodo.

Con el fin de esclarecer los mecanismos involucrados en el desgaste del electrodo durante los procesos de mecanizado por electroerosión, en este apartado se procede al estudio de la alteración de la composición química del material de la herramienta, como consecuencia de la contaminación producida por el material de la pieza de partida.

El material eliminado de la superficie de la pieza, mientras se encuentra suspendido en el fluido dieléctrico es atraído por el electrodo, debido a su polaridad, y de este modo puede llegar a adherirse a la superficie del electrodo, modificando las propiedades eléctricas del material del electrodo y la topografía de la superficie de la herramienta, lo cual puede introducir un empeoramiento del acabado superficial de la pieza que ha sido analizado en el capítulo anterior.

Para determinar la variación experimentada por la composición del material de la superficie del electrodo, se ha recurrido al microanálisis del material del electrodo mediante la técnica de

espectrometría por energías dispersivas de rayos X. Esta técnica permite conocer el porcentaje de cada elemento en la composición química del material que se encuentra en un cierto área de estudio.

En el presente trabajo se ha medido la composición química en la cara frontal de los electrodos, y además se ha analizado de manera específica la composición del material en las protuberancias y depresiones de la superficie del electrodo, para evaluar la influencia de la adhesión de material procedente de la pieza y la pérdida de material por el desgaste del electrodo.

3.3.1. Contaminación en la superficie completa.

En primer lugar se procederá a la discusión de los resultados relativos a la composición química de un modo global en la totalidad de la superficie activa del electrodo, mientras que en el apartado siguiente se abordará el estudio de ciertas áreas específicas como son las protuberancias y las depresiones que se observan en la superficie de la herramienta de corte.

La Figura 3.36 ilustra un ejemplo de la zona completa a someter a microanálisis, para el electrodo que corresponde a uno de los ensayos de mecanizado por electroerosión que han sido efectuados. En esta figura se puede observar la máscara rectangular que define el área en la cual se realizará el análisis mediante espectrometría por energías dispersivas de rayos X. Se comprueba que se trata de un área suficientemente representativa de la superficie del electrodo y que sobre la misma no se identifica ninguna singularidad que pudiera desvirtuar los resultados.

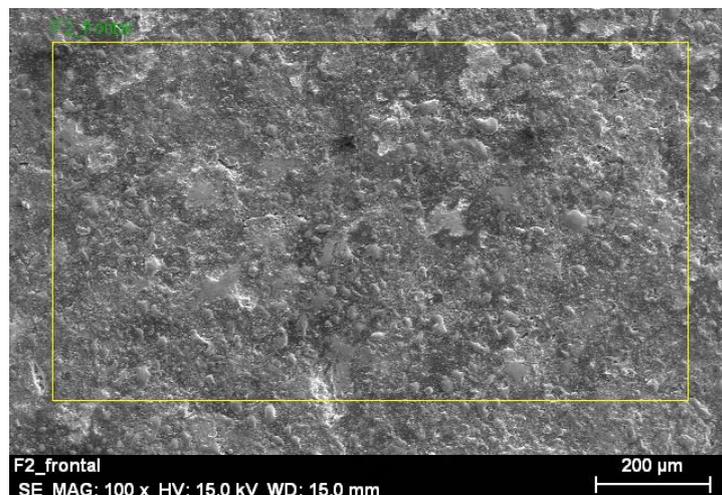


Figura 3.36 Ejemplo de microanálisis en superficie completa del electrodo para 8 A de intensidad de corriente y 3 mm de profundidad de penetración.

El resultado del microanálisis efectuado sobre la superficie de la herramienta dará lugar a un espectro como el que se expone en la Figura 3.37. El gráfico que aparece en esta figura, representa la composición química en el área definida en la figura anterior.

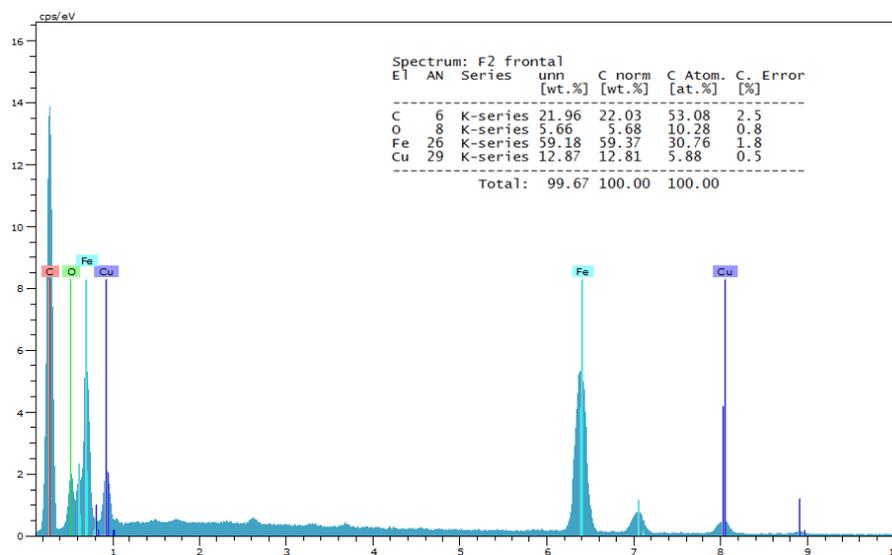


Figura 3.37 Ejemplo de composición química mediante EDS en superficie completa del electrodo para una intensidad de corriente de 8 A y 3 mm de profundidad de penetración.

En estos espectros se refleja los principales elementos químicos que se detectan en la superficie analizada, y la proporción aproximada en que se encuentran dentro de la composición química del material. De acuerdo con los resultados contenidos en este gráfico, para las condiciones de corte que corresponden a este electrodo los elementos que aparecen con una mayor proporción en la superficie de la herramienta son el carbono, oxígeno, hierro y cobre.

Dado que los demás elementos detectados se encuentran en una proporción muy pequeña, el equipo de espectrometría considera que estos elementos no son significativos y corrige los valores obtenidos de manera que una composición del 100% corresponda a la suma de las proporciones reflejadas para estos cuatro elementos que destacan en el microanálisis de la superficie.

La Tabla 3.7 recoge los resultados obtenidos mediante el análisis de la composición química en la superficie del electrodo, para las distintas condiciones de corte que han sido contempladas en esta tesis doctoral. En esta tabla se muestra la composición química registrada durante el estudio de la superficie completa, para la totalidad de los valores de profundidad de penetración e intensidad de corriente.

Tabla 3.7 Composición superficial de los electrodos.

Profundidad de penetración (mm)	Intensidad de corriente (A)	C (%)	O (%)	Fe (%)	Cu (%)
3	6	22,62	7,82	53,85	15,71
3	8	22,03	5,68	59,37	12,92
3	12	12,22	2,43	62,08	23,27
3	14	14,66	3,09	60,01	22,24
5	6	26,61	7,42	55,06	10,91
5	8	19,31	5,24	62,53	12,92
5	12	14,12	2,89	63,33	19,66
5	14	17,76	3,86	62,05	16,33
7	6	24,98	7,64	47,82	19,56
7	8	20,51	3,97	58,13	17,39
7	12	12,67	3,54	64,14	19,65
7	14	13,26	3,65	58,57	24,52

De acuerdo con los resultados de esta tabla, se comprueba que el hierro destaca con una proporción comprendida entre el 50 y 60%, seguido del carbono y cobre con una proporción entre el 10 y 25% para cada uno de estos elementos químicos, y en último lugar se encuentra el oxígeno con una proporción entre el 3 y 7%. Esta elevada presencia de hierro y carbono en el material de la superficie del electrodo, demuestra la adhesión de partículas del material de trabajo.

Con el propósito de estudiar la relación existente entre la composición química del electrodo y los parámetros del proceso, en la Figura 3.38 y Figura 3.39 se representa la variación que se produce en la proporción de los principales elementos químicos en función de la intensidad de corriente y profundidad de penetración, respectivamente.

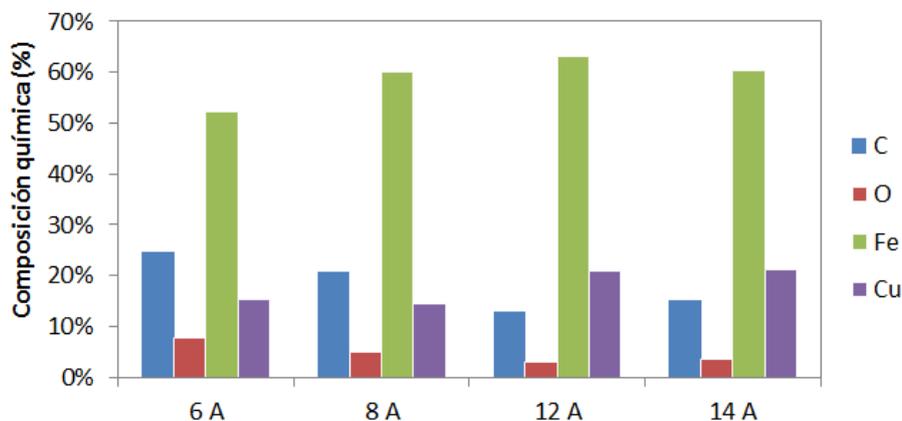


Figura 3.38 Composición química en la superficie activa del electrodo en función de la intensidad de corriente.

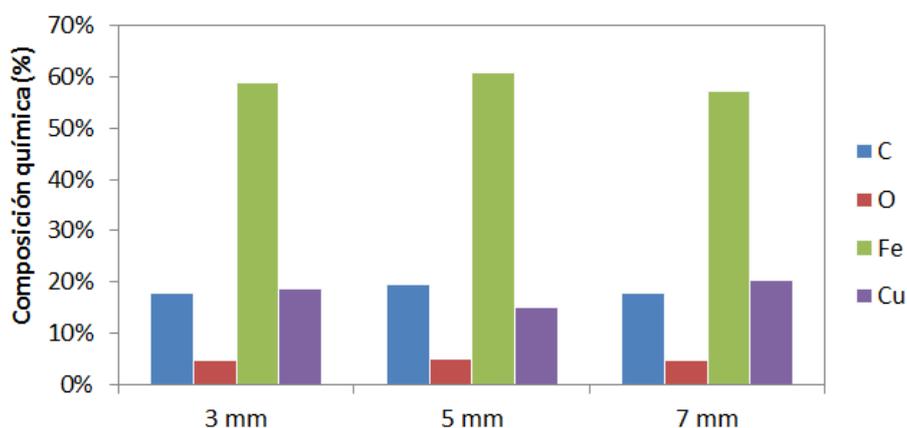


Figura 3.39 Composición química en la superficie activa del electrodo en función de la profundidad de penetración.

Tras un primer análisis de estos gráficos, se puede apreciar que el hierro (Fe) es el elemento predominante en la superficie activa de los electrodos, una vez efectuado el proceso de electroerosión a pesar de que se trata de electrodos de cobre electrolítico. Esto implica que el proceso ha modificado claramente la composición química del material de la superficie de la herramienta, pasando de una composición de cobre (Cu) próximo al 100% a valores comprendidos entre el 15 y 20%. Sin embargo, el hierro se instaura como elemento mayoritario con más de un 50% en la composición del material.

Los siguientes elementos químicos a destacar son el oxígeno (O) y el carbono (C), lo cual era de esperar por tratarse de elementos existentes tanto en la atmósfera como en la composición del fluido dieléctrico, que en definitiva consiste en un hidrocarburo. El carbono también forma parte del material de la pieza, aunque en pequeñas proporciones, por lo cual es más probable que su presencia en la superficie del electrodo provenga del fluido dieléctrico.

También se identifican otros elementos químicos durante el microanálisis de la superficie. Sin embargo, como se indicaba anteriormente, estos elementos han sido despreciados debido a que sus proporciones son muy bajas, y por tanto, no se reflejan en los porcentajes indicados para los cuatro elementos que se representan en estas figuras.

Las Figuras 3.40-3.43 representan la proporción de los principales elementos detectados en la superficie del electrodo en función de la intensidad de corriente.

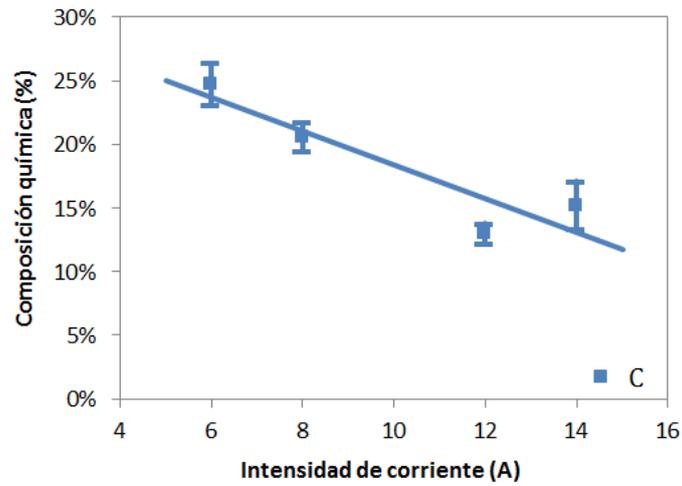


Figura 3.40 Composición química superficial de carbono en función la intensidad de corriente.

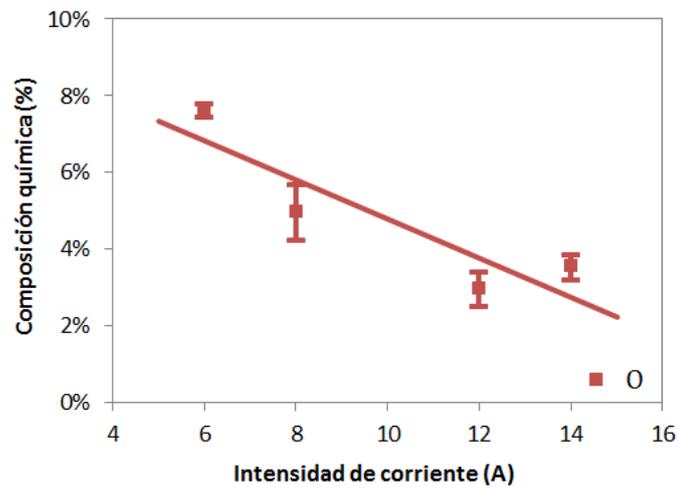


Figura 3.41 Composición química superficial de oxígeno en función la intensidad de corriente

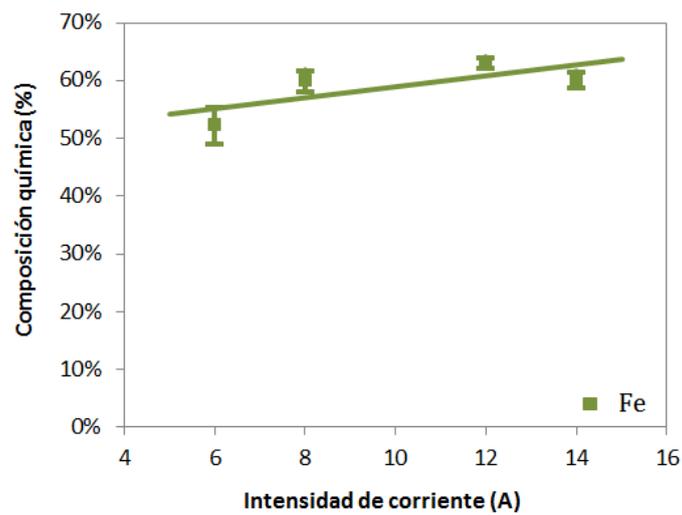


Figura 3.42 Composición química superficial de hierro en función la intensidad de corriente.

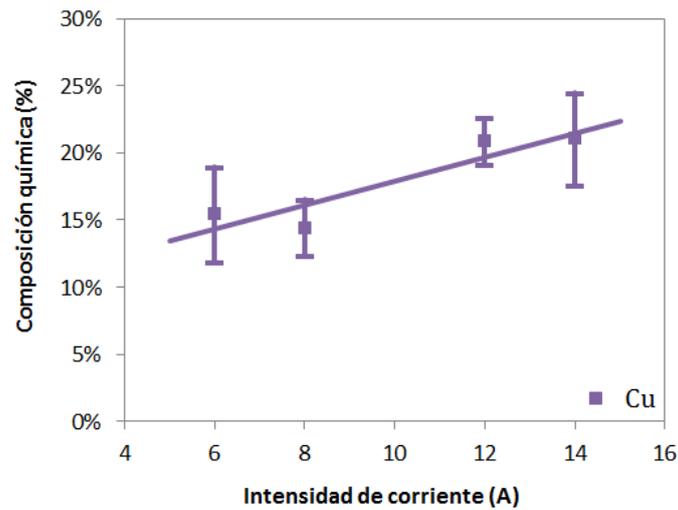


Figura 3.43 Composición química superficial de cobre en función la intensidad de corriente.

En estas figuras se pone de manifiesto la variación que se produce en la composición de estos cuatro elementos químicos dependiendo de los valores adoptados para la intensidad de corriente durante el proceso de electroerosión. Se observa una clara disminución del carbono y oxígeno a medida que se incrementa la intensidad de corriente. En cambio, se detecta una mayor proporción de cobre conforme aumenta este parámetro del proceso, lo cual será una consecuencia de la menor contaminación de la superficie del electrodo a causa de los dos elementos químicos mencionados anteriormente. Por otra parte, el hierro presenta una proporción más constante, con un ligero incremento en función a la intensidad de corriente.

Para describir las tendencias que se indican en estos gráficos, se pueden utilizar las expresiones matemáticas que se indican a continuación:

$$C = 0.3171 - 0.0133 I \quad (12)$$

$$O = 0.0987 - 0.0051 I \quad (13)$$

$$Fe = 0.4936 + 0.0096 I \quad (14)$$

$$Cu = 0.0906 + 0,0089 I \quad (15)$$

De manera análoga, las Figuras 3.44-3.47 muestran los gráficos que se obtienen en función de la profundidad de penetración, que en este caso sirven para comprobar que la composición química de la superficie no está influenciada por este parámetro del proceso.

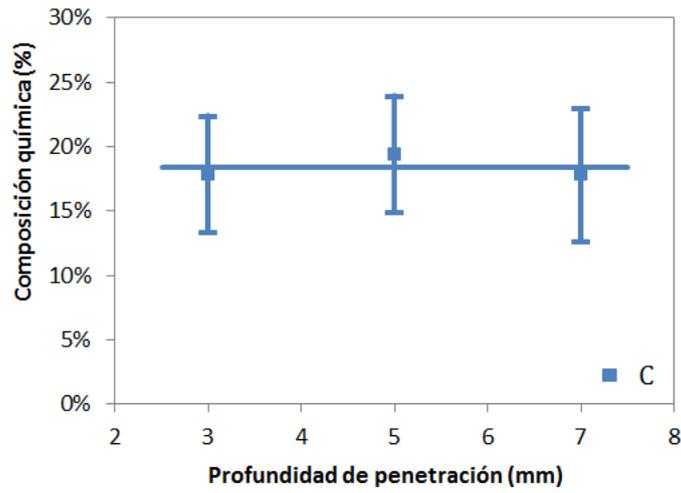


Figura 3.44 Composición química superficial de carbono en función la profundidad de penetración.

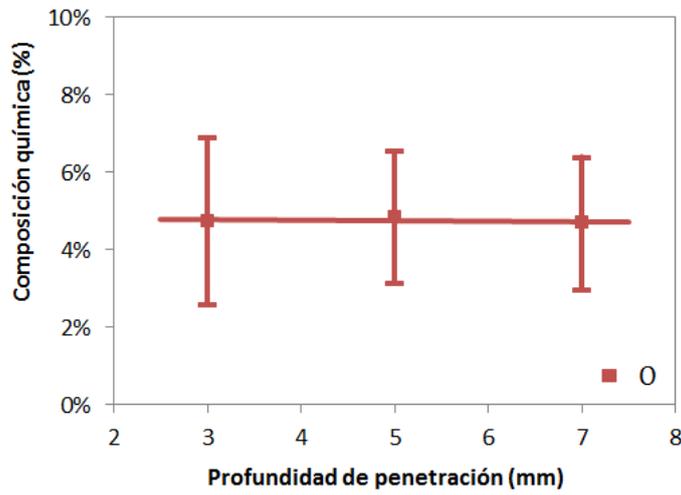


Figura 3.45 Composición química superficial de oxígeno en función la profundidad de penetración.

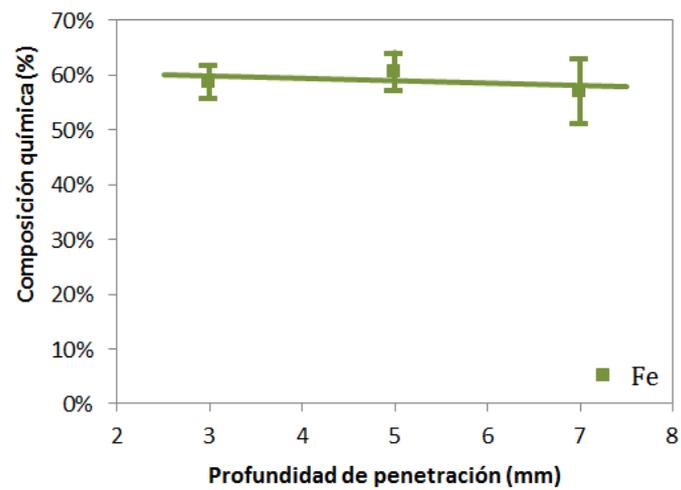


Figura 3.46 Composición química superficial de hierro en función la profundidad de penetración.

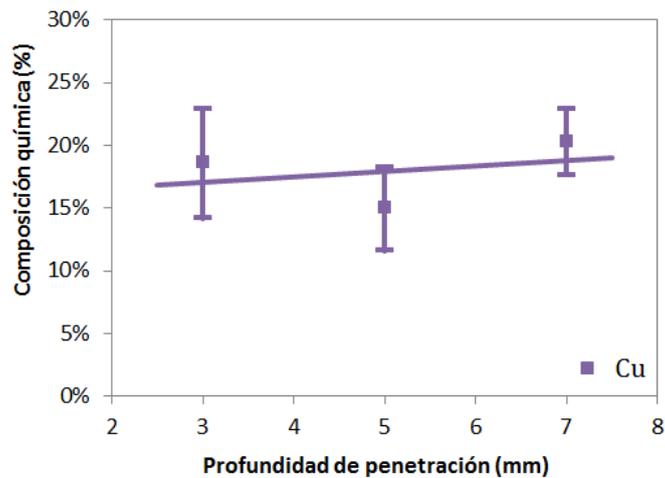


Figura 3.47 Composición química superficial de cobre en función la profundidad de penetración.

En general, se observa una alta dispersión en los resultados que se muestran en estas figuras, con la única excepción del hierro, para el cual se dispone de una dispersión muy reducida. Esto se puede explicar por la elevada influencia de la intensidad de corriente sobre la presencia de carbono, oxígeno y cobre en la composición química de la superficie del electrodo, a diferencia de lo que sucede en el caso del hierro, como se ha podido comprobar anteriormente.

Por otra parte, en estos gráficos se evidencia valores muy similares en el porcentaje que corresponde a los elementos químicos que están presentes en el material de la herramienta, con independencia de la profundidad de penetración seleccionada para los ensayos de mecanizado. Esto pone de manifiesto que la profundidad de penetración, y por tanto el tiempo de mecanizado, no presentan un efecto significativo sobre la composición química de la superficie del electrodo, lo cual implica que la contaminación del electrodo a causa del material de trabajo y el fluido de corte se originan al comienzo del proceso y se mantienen en equilibrio con independencia de la longitud total que el electrodo deba penetrar en la pieza de partida.

La ausencia de relación entre la composición química de la superficie del electrodo y la profundidad de penetración, puede ser atribuida al hecho de que el electrodo está sujeto durante la totalidad del proceso a la pérdida de material como consecuencia de la energía liberada por las descargas eléctricas, aunque en menor medida que la pieza de partida, y por tanto la adhesión de otros compuestos a la superficie del electrodo tendrá lugar de manera continuada a la vez que se produce esta pérdida de material que supone el desgaste de la herramienta. Como consecuencia, la composición química del electrodo estará condicionada

por el equilibrio que se alcanza de acuerdo con los parámetros que intervienen en la generación de las descargas eléctricas, refrigeración de la zona de corte y evacuación de la escoria, y de este modo se mantendrá durante la totalidad del proceso de electroerosión.

De acuerdo con la Figura 3.47, la contaminación sufrida por los electrodos es muy elevada, reduciéndose el porcentaje de cobre hasta valores inferiores al 20% de la composición química total. Por el contrario, el hierro procedente del material de la pieza, se convierte en el elemento químico más relevante en la composición química en la superficie del electrodo, con niveles del orden del 60%. Esto significa que se produce una elevada transferencia de material de la pieza de partida, que quedará adherido a la superficie del electrodo.

Se puede extraer también como conclusión la necesidad de prestar una especial atención a las condiciones del fluido dieléctrico, ya que se trata del encargado de eliminar las partículas en suspensión y por tanto disminuir la posibilidad de que se adhieran a la superficie del electrodo.

3.3.2. Contaminación en las protuberancias y depresiones.

Una vez estudiada la contaminación del electrodo de un modo global en toda su superficie, en este apartado se aborda el microanálisis de la composición química de las protuberancias y las depresiones que se aprecian en la zona afectada de la herramienta de corte.

En las Figuras 3.48-3.50 se ilustra un ejemplo de las áreas específicas que han sido analizadas para distinguir entre la composición química que corresponde a las distintas zonas comprendidas en la superficie del electrodo, como son las protuberancias y depresiones que aparecen en la superficie.



Figura 3.48 Ejemplo de selección de protuberancia y depresión en la superficie del electrodo para una intensidad de corriente de 8 A y profundidad de penetración de 7 mm.

En la Figura 3.48 se muestra un ejemplo de la definición de las áreas específicas a analizar, mientras que la Figura 3.49 y Figura 3.50 exponen estas áreas que corresponden a una de las protuberancias y una de las depresiones que existen en la superficie de la herramienta, respectivamente.

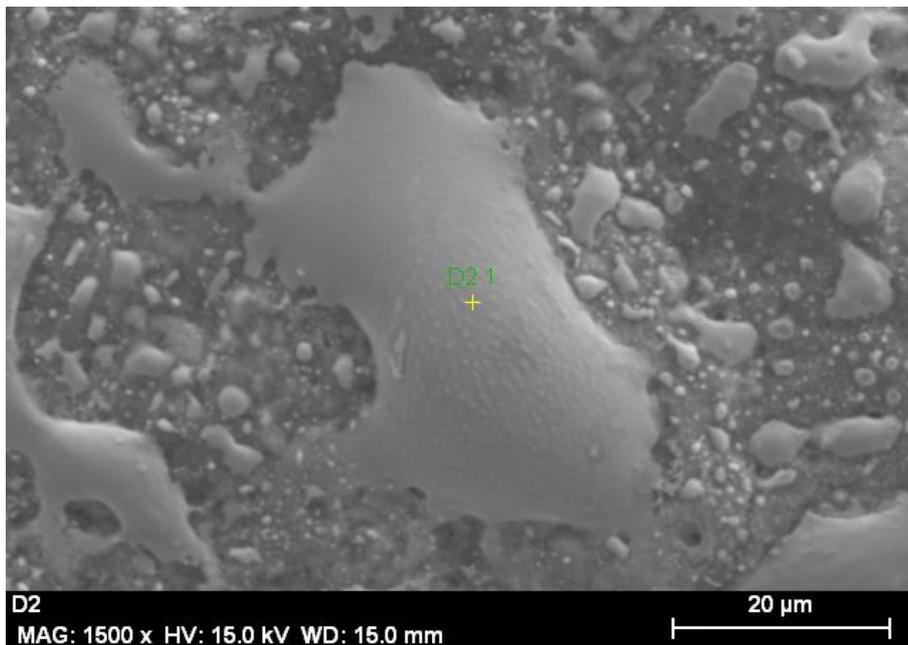


Figura 3.49 Ejemplo de microanálisis en protuberancia del electrodo para una intensidad de corriente de 8 A y profundidad de penetración de 7 mm.

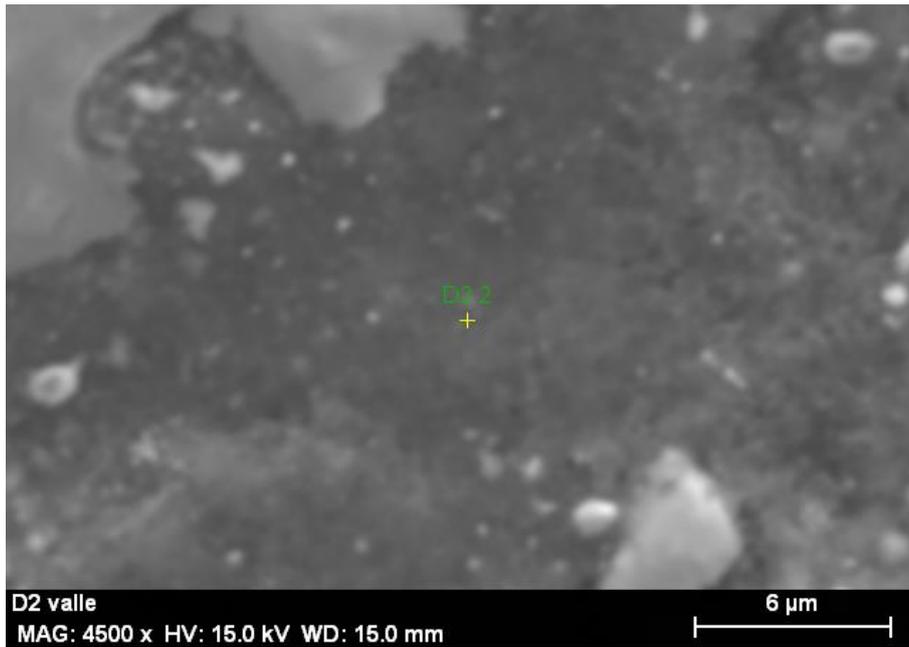


Figura 3.50 Ejemplo de microanálisis en depresión del electrodo para una intensidad de corriente de 8 A y profundidad de penetración de 7 mm.

Los resultados del microanálisis en las áreas que han sido seleccionadas en las anteriores figuras, se exhiben en la Figura 3.51 y Figura 3.52.

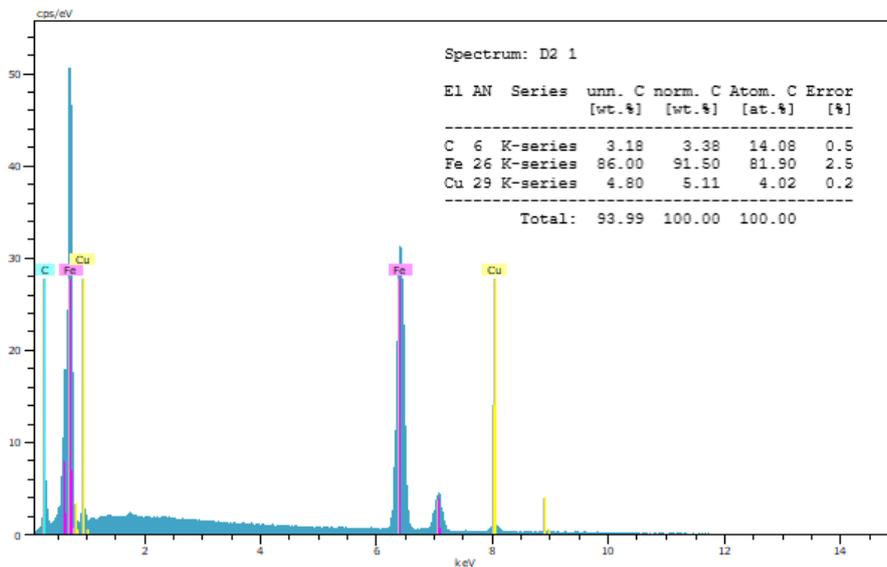


Figura 3.51 Ejemplo de composición química mediante EDS en protuberancia del electrodo para una intensidad de corriente de 8 A y profundidad de penetración de 7 mm.

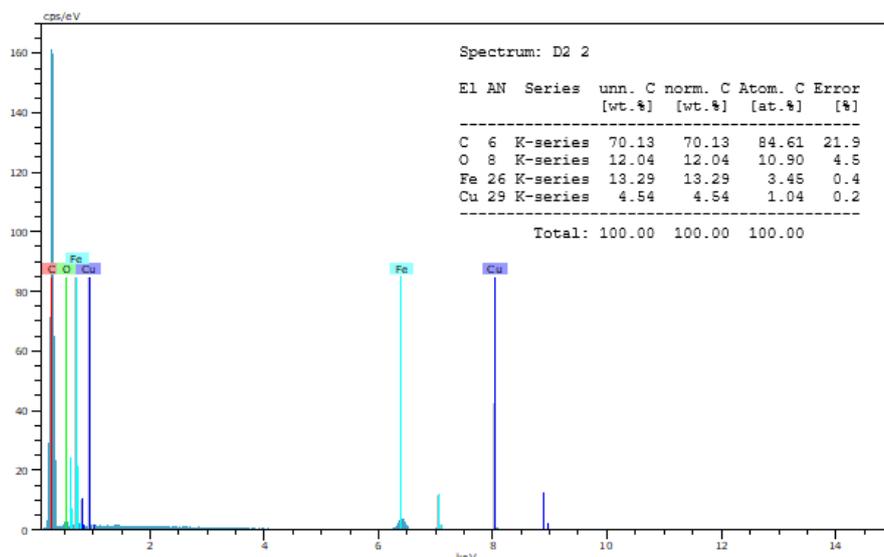


Figura 3.52 Ejemplo de composición química mediante EDS en depresión del electrodo para una intensidad de corriente de 8 A y profundidad de penetración de 7 mm.

En los espectros que se exponen en estas figuras, se reflejan los principales elementos detectados en estas áreas de la superficie del electrodo. Se advierte que las protuberancias están compuestas en su mayor parte por hierro, mientras que las depresiones revelan un detrimento del porcentaje de hierro en la composición química del material en comparación con lo que sucede en la superficie completa del electrodo.

En la Tabla 3.8 se exponen a modo de ejemplo los resultados que se obtienen a partir del análisis de estas distintas zonas de la superficie del electrodo, para algunas de las condiciones de corte que han sido consideradas en este trabajo.

Tabla 3.8 Composición superficial en superficie completa, protuberancias y depresiones de los electrodos.

Profundidad de penetración (mm)	Intensidad de corriente (A)	Área de estudio	C (%)	O (%)	Fe (%)	Cu (%)
3	8	Total	22,03	5,68	59,37	12,92
3	8	Protuberancia	3,23	1,73	91,75	3,29
3	8	Depresión	63,98	9,39	20,18	6,45
7	8	Total	20,51	3,97	58,13	17,39
7	8	Protuberancia	3,18	8,01	84,01	4,80
7	8	Depresión	70,13	12,04	13,29	4,54
7	14	Total	13,26	3,65	58,57	24,52
7	14	Protuberancia	2,10	1,01	90,95	5,94
7	14	Depresión	58,41	15,22	19,66	6,71

Los resultados que se recogen en esta tabla, denotan una enorme diferencia entre la composición química que corresponde al total de la zona afectada del electrodo, el área ocupada por las protuberancias provocadas por el material adherido a la superficie y el área de las depresiones causadas por el efecto de las descargas eléctricas sobre el material del electrodo.

El microanálisis del material de las protuberancias revela que el hierro es el elemento predominante, con una proporción entre el 80 y 90%, lo cual permite asegurar que el material adherido a la superficie del electrodo consiste en escoria procedente de la pieza de partida.

Por el contrario, en las depresiones existentes en la superficie del electrodo se advierte un porcentaje de hierro muy inferior al existente en la totalidad de la zona afectada, con valores comprendidos entre el 10 y 40% en lugar de alrededor del 60%.

Para facilitar la discusión de estos resultados, en las Figuras 3.53-3.55 se representa gráficamente los valores obtenidos para las diferentes condiciones de corte que han sido reflejadas en la tabla. En estas figuras se describe la composición química registrada en el total de la superficie del electrodo, y en ciertas áreas específicas como son las protuberancias y depresiones que aparecen en la zona afectada.

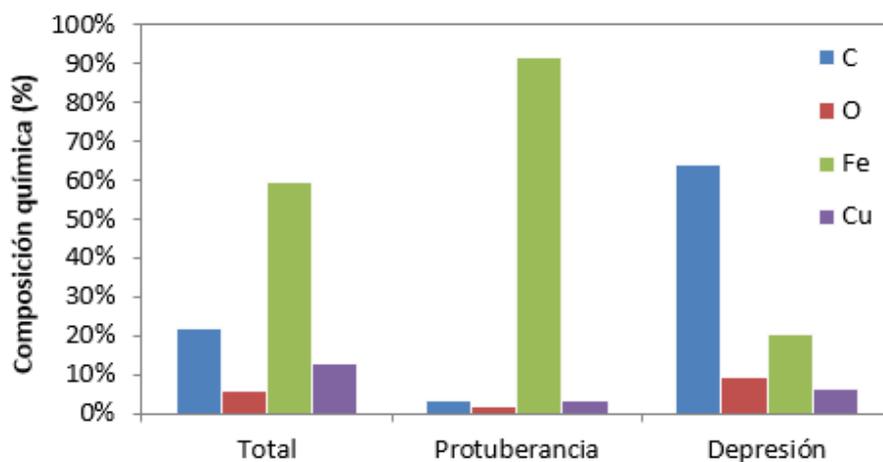


Figura 3.53 Composición química en diferentes regiones del electrodo para profundidad de penetración de 3 mm e intensidad de corriente de 8 A.

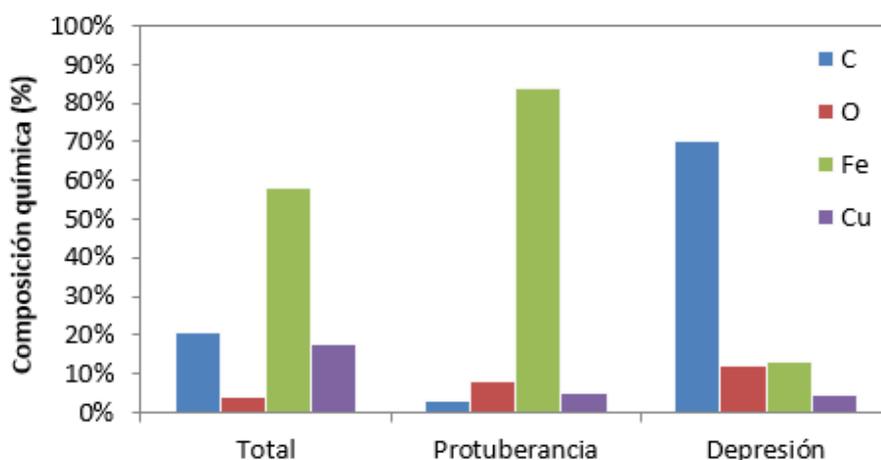


Figura 3.54 Composición química en diferentes regiones del electrodo para profundidad de penetración de 7 mm e intensidad de corriente de 8 A.

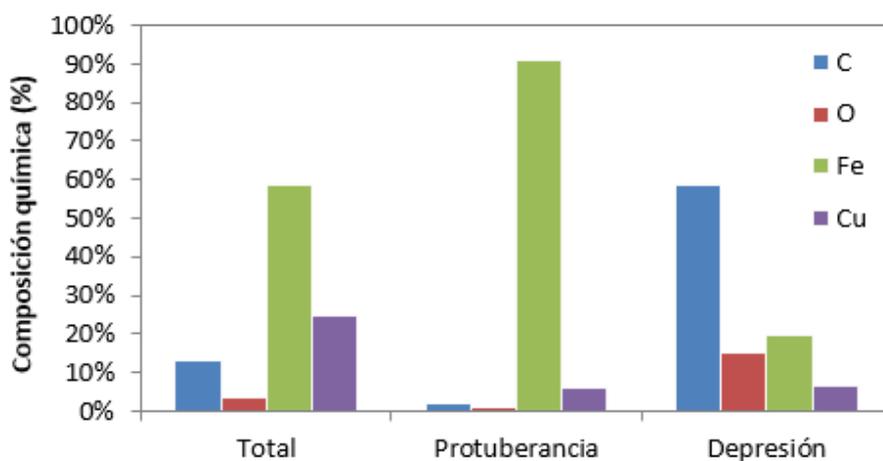


Figura 3.55 Composición química en diferentes regiones del electrodo para profundidad de penetración de 7 mm e intensidad de corriente de 14 A.

Estas figuras revelan la existencia de una composición química muy distinta en cada una de las regiones que han sido contempladas, como son la extensión completa de la zona afectada del electrodo y las áreas que corresponden a las protuberancias o depresiones que aparecen en la superficie de la herramienta.

Estas figuras presentan unos resultados similares para cada una de estas tres regiones a analizar, destacando el hierro como el elemento mayoritario en las protuberancias con un porcentaje de alrededor del 90% y en cambio desciende al 20% en las depresiones de la superficie, mientras que cuando se analiza el total de la zona activa del electrodo estos valores son aproximadamente del 60%.

Por otra parte, la proporción del cobre en la composición química presenta valores moderados de alrededor del 20% en la superficie completa del electrodo, si bien en las protuberancias y depresiones su presencia en el material de la superficie de la herramienta se reduce aproximadamente a un 5%.

En las depresiones existentes en la superficie del electrodo, destaca la relevancia del carbono, con un porcentaje de este elemento químico alrededor del 65%, mientras que su presencia en toda la superficie es aproximadamente del 15% y en las protuberancias se reduce al 3%.

Por último, la proporción de oxígeno en el material de la superficie del electrodo es siempre moderada, con valores aproximados del 10% en las áreas que corresponden a depresiones de la superficie, y en cambio son muy inferiores si se analiza la extensión completa de la zona activa del electrodo o las protuberancias que se forman durante el proceso de electroerosión.

Se comprueba nuevamente que las protuberancias de la zona afectada del electrodo se deben a la adhesión de material procedente de la pieza de partida, dada la predominancia del hierro en la composición química del material en estas regiones. La moderada presencia de cobre en la superficie completa y en las áreas que corresponden a depresiones, puede deberse a la contaminación de la superficie a causa del hierro y carbono que se aprecia en los resultados del microanálisis. Sin embargo, el sustrato que se encuentra por debajo de la superficie está formado mayoritariamente por cobre. Se advierte que estos cambios en la composición química que afectan a la superficie del electrodo podrán suponer una alteración de las propiedades eléctricas de la herramienta.

La mayor presencia de carbono y oxígeno en las depresiones de la superficie, se puede atribuir a la mayor volatilidad del fluido dieléctrico, la cual puede provocar que las fracciones que componen estos elementos químicos se adhieran a las regiones más alejadas dentro de la zona de corte, que corresponden a las depresiones o oquedades existentes en la superficie del electrodo.

Se debe tener en cuenta que las descargas eléctricas serán más proclives a producirse en las proximidades de las protuberancias que se forman en la superficie del electrodo, ya que en estas regiones resulta más sencillo que se materialice el canal de plasma al disponer de una menor distancia entre los puntos de la superficie de la pieza y el electrodo. Dado que estas protuberancias se deben a las partículas eliminadas en la pieza que se encuentran en suspensión y finalmente se adhieren a la superficie del electrodo, se considera primordial un adecuado control de la evacuación de estas partículas a través del fluido dieléctrico durante el

desarrollo del proceso de mecanizado por electroerosión. Además se debe contemplar el efecto que estos cambios en la topografía de la superficie del electrodo pueden producir sobre la generación de las descargas eléctricas.

Capítulo 4. Análisis numérico del arranque de material en la superficie mecanizada

En este capítulo se procede al estudio teórico del proceso de mecanizado por electroerosión, y los resultados obtenidos se comparan con las observaciones experimentales relativas al acabado superficial de la pieza mecanizada.

La modelización numérica que ha sido efectuada para el análisis del proceso, se centra en la estimación de la distribución de calor en la zona de corte y la eliminación de material en la superficie de la pieza.

En primer lugar, se lleva a cabo una revisión de las leyes semi-empíricas y ecuaciones teóricas existentes para la modelización de estos procesos de mecanizado, y se propone un modelo teórico simplificado que permite analizar la influencia de los parámetros del proceso que se contemplan en esta tesis doctoral.

4.1. Fundamentos del modelo teórico para procesos de electroerosión.

La modelización teórica de los procesos de mecanizado por electroerosión (EDM) permitirá llevar a cabo una predicción de los resultados alcanzables mediante este proceso de acuerdo con las condiciones de corte consideradas, para lo cual será necesario disponer de expresiones matemáticas que describan los fenómenos que se producen durante las diferentes fases del proceso. Esto servirá como herramienta para poder efectuar la optimización del proceso, ayudando a determinar las condiciones de corte que permiten minimizar las irregularidades de la superficie de la pieza y los tiempos de producción.

En este capítulo se plantea un modelo numérico simplificado que se centrará en el análisis de los parámetros del proceso que han sido contemplados en la presente tesis doctoral. Este modelo permitirá la simulación de la generación de las descargas eléctricas, y la distribución de temperaturas provocada en la pieza de trabajo, así como el perfil de la superficie que se obtiene como consecuencia del arranque de material en la superficie de la pieza.

El mecanizado por electroerosión es un proceso que se basa en la eliminación de material en la pieza de trabajo a través de la energía proporcionada por las descargas eléctricas, las cuales precipitan la fusión e incluso la vaporización del material en la zona en la que se forma el canal de plasma. Por tanto, un aspecto esencial de la modelización numérica de estos procesos consiste en la utilización de las expresiones que permitan describir la energía calorífica suministrada por las descargas eléctricas y la distribución de esta energía a lo largo de la zona de corte, así como la transferencia de calor dentro del sistema, a través del material de trabajo y el fluido dieléctrico.

En los siguientes apartados se explicarán las leyes que serán adoptadas en el modelo utilizado para la simulación numérica del proceso de mecanizado por electroerosión, y a continuación se discuten los resultados obtenidos durante el análisis del proceso para las condiciones de corte consideradas.

Este modelo teórico servirá para predecir el aporte de energía calorífica a través de las descargas eléctricas, la distribución de temperaturas que se alcanzan en la pieza y la textura obtenida como consecuencia de la eliminación de material en la pieza de partida.

4.2. Ecuaciones básicas para la modelización del proceso de electroerosión.

Para la modelización del proceso de EDM, se deberá aplicar los diferentes principios físicos y termodinámicos que intervienen en este proceso, en lo relativo a distintos aspectos tales como la generación del canal de plasma y su aporte de energía calorífica a la pieza de trabajo, la transmisión de calor en la zona de corte y la eliminación de material en determinadas zonas de la superficie de la pieza como consecuencia de la temperatura alcanzada durante el desarrollo del proceso. Por ese motivo, en este apartado se identifica las fases fundamentales en las cuales se dividen estos procesos, se remarca los aspectos de carácter termodinámico asociados a las distintas fases del proceso y por último se refleja las ecuaciones básicas que permiten estudiar los fenómenos involucrados en el proceso.

En estos procesos se puede distinguir entre dos grandes fases que incluyen una primera fase dedicada a la formación del canal de plasma y las descargas eléctricas que proporcionarán la energía calorífica necesaria para la eliminación del material, y una segunda fase en la cual se produce la transmisión de calor a lo largo de la pieza de trabajo.

El proceso de electroerosión parte de un estado de estabilidad térmica que supone que la pieza y el fluido dieléctrico se encuentran a la misma temperatura. Esta temperatura inicial T_0 se corresponderá con la temperatura ambiente, y para ella se puede adoptar, a modo de ejemplo, un valor de 24 °C.

A partir del estado de estabilidad térmica que caracteriza al sistema antes del proceso de electroerosión, el inicio de este proceso tendrá lugar cuando se produzca la primera descarga eléctrica entre el electrodo y la pieza, lo cual permitirá disponer de la energía calorífica que hace posible la eliminación de material.

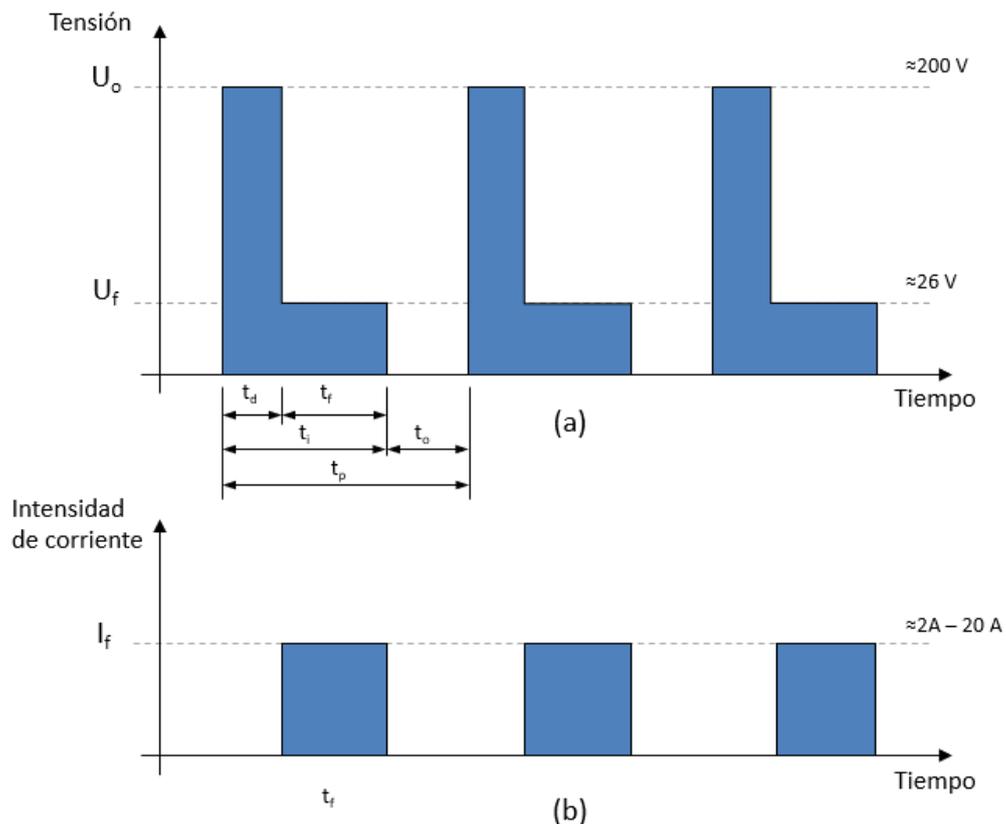


Figura 4.1 Fases del proceso de electroerosión: a) tensión; b) intensidad de corriente.

En la Figura 4.1 se representa los valores relativos a la tensión e intensidad de corriente que corresponden a las dos grandes f en las cuales se divide los procesos de electroerosión. Las dos grandes fases que han sido identificadas anteriormente, se pueden denominar del modo que se indica a continuación:

- Fase de impulso, que se caracteriza por la aplicación de una determinada tensión entre los dos electrodos, como son la herramienta y la pieza que se pretende mecanizar, y por tanto dará lugar a las descargas eléctricas que permitirán el aporte de energía calorífica a la superficie de la pieza de trabajo. A modo de ejemplo, en la Figura 4.1 se representa una determinada duración para esta fase que se define como el tiempo de impulso t_i .
- Fase de pausa, en la cual se anula el circuito eléctrico de la máquina de EDM, y de este modo se dispone del tiempo de duración de esta fase para facilitar la transferencia de calor que hará posible el enfriamiento de la pieza y del electrodo. En la Figura 4.1 se ilustra a modo de ejemplo una cierta duración para esta segunda fase del proceso que se conoce como tiempo de pausa t_o .

La fase de impulso se divide a su vez en dos subfases, como son la fase de ionización y la fase de descarga, donde la primera se encarga de generar el canal de plasma y la segunda corresponde a la estabilización del canal de plasma y la generación de las descargas eléctricas, y en realidad es en ella en la que se produce la electroerosión. En relación con la fase de ionización, en la Figura 4.1 se representa un tiempo que se denomina tiempo de ionización t_d ; mientras que la duración de la fase de descarga viene definida por el tiempo de descarga t_r . La suma del tiempo de ionización y el tiempo de descarga se denomina tiempo de impulso t_i .

Por otra parte, en la fase de pausa no se producen descargas eléctricas, y por tanto no existe el aporte de energía calorífica desde el electrodo a la pieza, sino que por el contrario se caracteriza por dedicarse a la transferencia de calor dentro de la propia pieza de partida y entre la pieza y el fluido dieléctrico. A este intervalo de tiempo se le denomina tiempo de pausa t_o .

En la Figura 4.1 también se representa la duración completa de cada ciclo del proceso, que consiste en la suma del tiempo de impulso y el tiempo de pausa. Este intervalo de tiempo se denomina período t_p .

Una vez que han sido definidas las fases en las que se divide el proceso de electroerosión, en el siguiente apartado se procederá a reflejar las ecuaciones aplicables para cada fase.

4.2.1. *Energía aportada por las descargas eléctricas.*

El proceso comienza con la generación de corriente en el circuito eléctrico de la máquina de electroerosión, lo cual esto corresponde a la fase de ionización, que en la Figura 4.1 se identifica a través del tiempo de ionización t_d . En esta fase se inicia la formación del canal de plasma entre el electrodo y la pieza

Cuando el canal de plasma se vuelve estable, da comienzo la fase de descarga, en la Figura 4.1 aparece identificada por el tiempo de descarga t_f . Durante esta fase del proceso, se lleva a cabo la transmisión de energía calorífica desde el electrodo a la pieza de trabajo, lo cual se traduce en el incremento de la temperatura en la zona afectada por el canal de plasma.

La transferencia de energía calorífica que se produce desde el canal de plasma a la superficie de la pieza, se puede estimar utilizando la siguiente expresión:

$$q(r, d) = a q_0 \exp \left(b \cdot \left(\frac{r^2 + d^2}{R_p^2} \right) \right) \quad (16)$$

donde q_0 es la energía calorífica total producida por la descarga eléctrica, R_p es el radio del canal de plasma, a y b son las constantes para el flujo de calor proporcionado por el canal de plasma, r es la distancia desde el punto central de incidencia del canal de plasma y los diversos puntos de la pieza en el eje x , mientras que d es la distancia desde el punto central de incidencia del canal de plasma y los diversos puntos de la pieza en el eje y .

La Figura 4.2 ilustra la distribución del flujo de calor sobre la superficie de la pieza de trabajo, a partir de la anterior expresión matemática. Esta figura ha sido representada en dos dimensiones, y por tanto sólo considera el efecto de la distancia a la posición central del canal de plasma. Como se observa en esta figura, los nodos más próximos al eje del plasma recibirán la mayor cantidad de energía calorífica. El flujo de calor a los demás nodos de la pieza, disminuirá de manera exponencial a medida que se incrementa la distancia radial al eje del plasma.

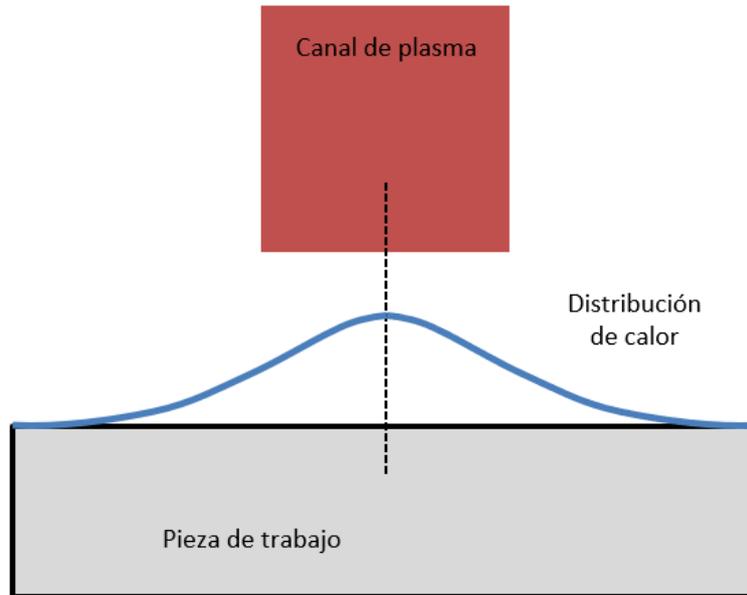


Figura 4.2 Distribución de calor en la superficie de la pieza derivada del canal de plasma.

Las constantes a y b dependen básicamente de las propiedades térmicas del material de la pieza de trabajo, y para ellas en este trabajo se asumirá los valores recomendados en la bibliografía que ha sido consultada.

La energía calorífica total producida por cada descarga eléctrica q_0 , se puede calcular mediante la siguiente expresión, en función de los parámetros eléctricos seleccionados para el proceso de EDM:

$$q_0 = \frac{F_w U I t_i}{\pi R_p^2} \quad (17)$$

donde F_w es la proporción de flujo de calor transmitido al material de la pieza de trabajo, U e I son la tensión de descarga y la intensidad de corriente a programar en la máquina de EDM, y t_i es el tiempo de impulso que el circuito eléctrico estará activo durante cada ciclo.

Para determinar el incremento de temperatura provocado por la energía calorífica que procede del canal de plasma, se puede recurrir a la siguiente ecuación:

$$(\Delta T)_{i,j,k,s} = \frac{\Delta t q(r,d)}{\Delta m c_p} \quad (18)$$

Las ecuaciones indicadas en este apartado, serán aplicadas más adelante para la simulación numérica del proceso de mecanizado por electroerosión.

4.2.2. Transmisión de calor en la pieza.

Durante la totalidad del período t_p , que define el tiempo total de duración de cada ciclo de trabajo, se producirá de manera continuada la transmisión de calor en la pieza. Se puede distinguir entre tres tipos de transmisión de calor, como son la que se producirá a lo largo de la pieza, entre la pieza y la mesa de trabajo de la máquina y entre la pieza y el fluido dieléctrico.

Las dos primeras formas de transferencia de calor se realizan mediante conducción, en el primer caso dentro de la propia pieza y en el segundo entre la pieza y los elementos de la máquina de electroerosión.

En cambio, la transmisión de calor entre la pieza y el fluido dieléctrico se llevará a cabo mediante convección.

A continuación, se describirá las expresiones que se pueden emplear para el cálculo de la transferencia de calor por conducción y por convección, lo cual será de aplicación para la simulación de los procesos de mecanizado por electroerosión.

La transmisión de calor por conducción se puede definir como un fenómeno que consiste en el flujo de calor dentro de un mismo cuerpo o en el contacto directo entre dos cuerpos, sin intercambio de materia, de manera tal que el calor se dirija desde un punto a mayor temperatura hasta otro punto a menor temperatura que se encuentre en contacto con el primero. La propiedad física de los materiales que determina su capacidad para conducir el calor es la conductividad térmica.

En el caso de las piezas a fabricar mediante EDM, los puntos que se encuentren a una elevada temperatura debido a la transferencia de energía calorífica desde el canal de plasma, cederán calor a los puntos contiguos. Este proceso se producirá a lo largo de toda la pieza hasta completar su extensión.

Al llegar al contacto entre la pieza y los elementos de la máquina, el calor se transmitirá de los puntos extremos de la pieza a la mesa de trabajo, y a partir de ahí al resto de la máquina, disipando de este modo el calor a través de la totalidad del sistema.

De acuerdo con los principios de la transmisión de calor por conducción, durante la modelización teórica del proceso de EDM se puede considerar la siguiente ecuación para estimar el incremento de temperatura debido a la transferencia de calor entre dos puntos:

$$(\Delta T_{\text{cond}})_{ij,k,s} = \frac{\Delta t \ k \ \Delta A \ (T_{i',j',k',s-1} - T_{i,j,k,s-1})}{\Delta m \ c_p \ \Delta s} \quad (19)$$

donde $\Delta T_{cond_{i,j,k,s}}$ se define como la variación de la temperatura por intercambio de calor por conducción con el nodo adyacente, en un punto en tres dimensiones de coordenadas (i,j,k) en el instante de tiempo s. Δt es el paso de tiempo para la simulación del proceso, se establecerá dependiendo de la precisión de cálculo deseada durante la simulación numérica del proceso. k es la conductividad térmica del material expresada en $W/(m K)$, como ejemplo, para el acero inoxidable AISI 316 se puede asumir el valor de $17W/(m K)$. Δm es la masa efectiva para el nodo en estudio del mallado definido. C_p es el calor específico del material. Δs es la distancia entre los dos puntos, está dependerá de la densidad del mallado definido. ΔA es el área de transferencia entre dos puntos de la malla, al igual que Δs dependerá del mallado. $T_{i,j,k,s-1}$ es la temperatura en el nodo de coordenadas (i,j,k) para el instante s-1. $T_{i',j',k',s-1}$ es la temperatura en el nodo de coordenadas (i',j',k') para el instante s-1 (nodo adyacente al nodo de cálculo).

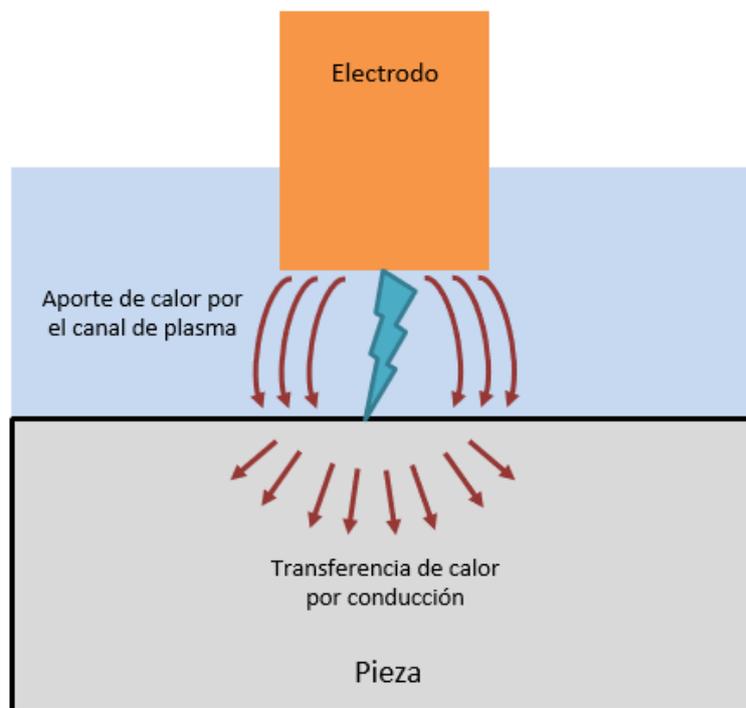


Figura 4.3 Esquema de aporte de calor por el canal de plasma y transferencia de calor por conducción en EDM.

En la Figura 4.3 se muestra un esquema acerca del aporte de calor que se produce a través del canal de plasma a la pieza de trabajo, así como la transferencia de calor por conducción que tiene lugar en el interior de la propia pieza a partir de la energía calorífica provocada por las descargas eléctricas.

Por otra parte, la transferencia de calor por convección se caracteriza por desarrollarse gracias al movimiento de un fluido que distribuye el calor entre zonas que se encuentran a diferentes temperaturas.

En el caso de los procesos de EDM, la transferencia de calor por convección se produce entre la superficie de la pieza y el fluido dieléctrico circundante. El movimiento del fluido dieléctrico se consigue mediante la bomba de alimentación de que dispone la máquina de EDM, generando un régimen turbulento sobre la zona en la cual incide este fluido de acuerdo con la orientación seleccionada para la manguera.

Los nodos de la superficie de la pieza de partida que presenten una temperatura superior a la del fluido dieléctrico, transmitirán energía calorífica a este último por convección, mientras que en el interior de la pieza la transmisión de calor tiene lugar por conducción, como se describe en la Figura 4.4.

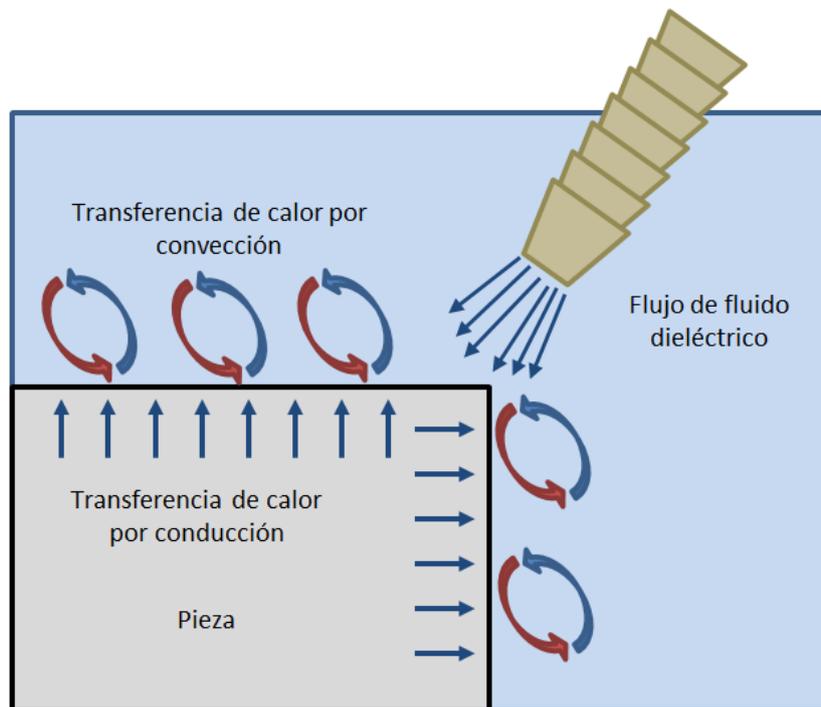


Figura 4.4 Esquema de transmisión de calor por convección y conducción en EDM.

Para estimar el incremento de temperatura que se produce mediante la transferencia de calor por convección entre la superficie de la pieza y el fluido dieléctrico, se puede aplicar la siguiente expresión matemática:

$$(\Delta T_{\text{conv}})_{i,j,k,s} = \frac{\Delta t h \Delta A (T_d - T_{i,j,k,s-1})}{\Delta m c_p} \quad (20)$$

donde, T_d es la temperatura alcanzada por el fluido dieléctrico durante el proceso de EDM, ΔA es el área de contacto para la transferencia de calor por convección entre el nodo en estudio y el fluido dieléctrico y h es el coeficiente de convección.

Las ecuaciones que han sido descritas para la transferencia de calor por conducción y por convección, así como para la energía calorífica originada por las descargas eléctricas, formarán parte de las expresiones utilizadas para la modelización teórica del sistema, como se explica en el siguiente apartado.

4.3. Mallado del proceso.

El modelo computacional que se presenta en este apartado se basa en el método de las diferencias finitas, y para su resolución se recurre al cálculo matricial. Como se ha indicado en los apartados anteriores, la electroerosión consiste en un proceso de mecanizado que se basa en el aporte de calor a la pieza de partida y su transferencia dentro del sistema, por lo que la modelización del proceso se centrará en el cálculo de la energía calorífica generada por las descargas eléctricas y el incremento de temperatura en cada nodo de la pieza durante el transcurso de este proceso de mecanizado.

No obstante, el objetivo final de la simulación numérica del proceso de electroerosión consistirá en estimar el acabado superficial de la pieza mecanizada y el tiempo requerido para efectuar el proceso. En el modelo que se plantea utilizar en este trabajo no contempla además el desgaste que se origina en la herramienta de corte, porque se centra en el análisis de los fenómenos que afectan a la pieza de trabajo.

Para poder determinar estas propiedades del proceso, en primer lugar es necesario predecir la temperatura que se alcanza en cada nodo de la pieza a mecanizar, y a partir de esta información se podrá hallar los nodos que disponen de un valor de temperatura superior a su punto de fusión y por tanto serán eliminados de la superficie de la pieza. Como consecuencia, el modelo numérico a emplear estará basado en la predicción de las matrices de temperatura que recoge la temperatura existente en cada nodo de la pieza para los sucesivos valores de tiempo de mecanizado.

Antes de proceder a la simulación computacional, es necesario definir el mallado de la zona de cálculo, lo cual condicionará las dimensiones de las matrices de temperatura y de las matrices que representan la forma de la superficie electroerosionada para distintos tiempos de mecanizado.

Para ello, a continuación se procederá en primer lugar a definir las principales características del mallado que será utilizado para el estudio de la pieza de partida.

En la Figura 4.5 se puede apreciar el mallado simplificado que se puede considerar para la simulación numérica del proceso de electroerosión en dos dimensiones. El color rojo se ha seleccionado para representar el contorno del mallado en 2D, mientras que el color blanco se reserva para los nodos que conforman la zona a mecanizar y el color azul se asigna a los nodos que resultan en el exterior de la zona de mecanizado.

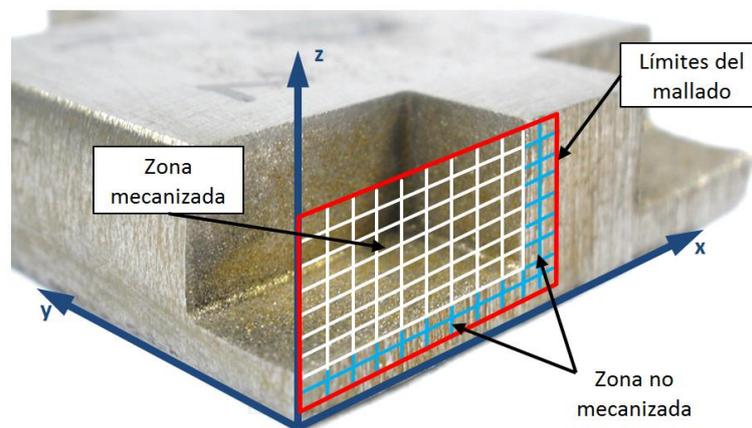


Figura 4.5 Ejemplo de mallado en pieza mecanizada.

Los nodos que se encuentran en la malla identificada con color blanco, son aquellos que sufrirán los fenómenos provocados por el proceso de electroerosión por penetración, y por tanto se trata de los nodos que irán desapareciendo de la pieza durante este proceso. Estos nodos del mallado serán los más relevantes para los resultados esperados ya que serán los responsables de definir las propiedades de la superficie resultante en la pieza de trabajo.

Por otra parte, los nodos en color azul son imprescindibles para poder definir los nodos de color blanco, ya que permiten extender el cálculo de la distribución de temperaturas a las zonas de la pieza que no se verán sujetas al arranque de material, y de este modo permiten contemplar la disipación de calor por conducción a través de la pieza de partida.

Finalmente, los nodos de color rojo configuran el contorno de la pieza, y por tanto sus propiedades dependerán de las condiciones de contorno que hayan sido establecidas, las cuales serán abordadas en un apartado posterior.

Para una correcta simulación numérica del proceso de electroerosión, se debe seleccionar una distancia entre nodos suficientemente reducida, de manera que sea posible describir con una adecuada precisión de cálculo los fenómenos involucrados en este proceso de corte. Sin embargo, si se define un mallado excesivamente fino los tiempos de computación podrían

llegar a ser inasumibles. Por ese motivo, más adelante se propondrán algunas soluciones que permitirán optimizar el tiempo requerido para completar la simulación del proceso.

Una vez que ha sido descrito el modo de proceder para llevar a cabo el mallado de la zona de estudio, en el siguiente apartado se explica el cálculo de las matrices de temperatura para los sucesivos valores de tiempo de mecanizado.

4.4. Cálculo de temperaturas.

En este apartado se explica el método que será empleado para el cálculo de la temperatura que se alcanza en cada nodo de la pieza durante los sucesivos instantes a considerar durante la simulación computacional del proceso de electroerosión por penetración.

En general, para poder llevar a cabo la simulación numérica de un proceso de carácter térmico como son los procesos de mecanizado por electroerosión, se debe contemplar el cambio de fase en cada nodo para poder determinar los nodos que se funden o se vaporizan en cada instante del proceso. Los nodos en los cuales se alcancen las condiciones que suponen la fusión o vaporización del material que se encuentra en esa zona, deberán ser eliminados de la superficie de la pieza de trabajo, y como consecuencia no seguirán figurando en la matriz de temperaturas. Sin embargo, el cálculo del cambio de fase es ciertamente complejo y presenta un elevado coste computacional, por lo que para evitar este problema generalmente se asume el concepto de temperatura equivalente.

El método de temperatura equivalente permite desestimar el calor necesario para el cambio de fase de sólido a líquido, a través de una extrapolación de la temperatura a la cual el material alcanza la fase líquida. De esta forma no es necesario operar con el calor latente de fusión o vaporización, sino que sencillamente se efectúa el cálculo de la temperatura a partir del calor específico en fase sólida.

Este método se basa en contemplar un valor específico de temperatura equivalente por encima del cual se considera que el material se funde de manera instantánea, lo cual es una aproximación que permite simplificar drásticamente el tiempo de computación. Según la bibliografía consultada, para aceros inoxidable se puede asumir un valor comprendido entre 1400 y 2000 °C [65].

En la Figura 4.6 se describe la definición de temperatura equivalente. El trazo azul representa la relación entre el aporte de calor y la temperatura provocada en el material para un acero inoxidable, mientras que en rojo se ilustra el valor que corresponde a la temperatura equivalente. De acuerdo con el concepto de temperatura equivalente, el punto que aparece con color rojo en esta figura indica el valor de temperatura al cual el material se fundiría de manera instantánea.

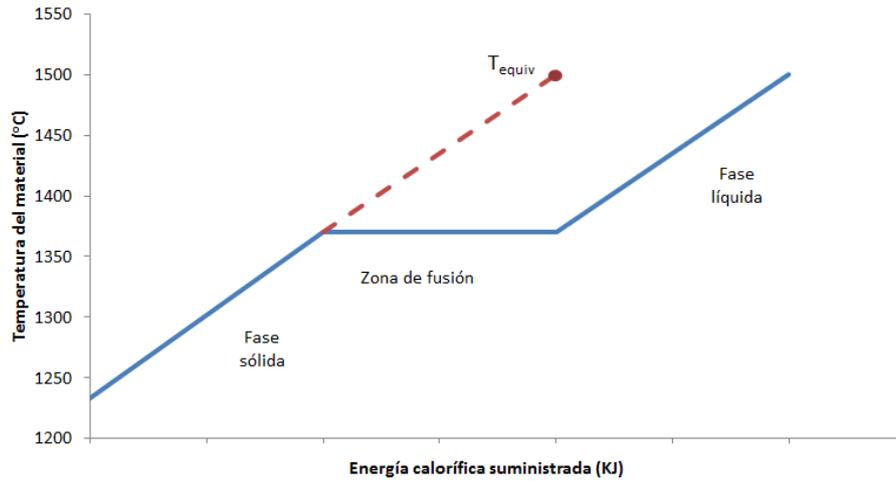


Figura 4.6 Representación esquemática de la temperatura equivalente

Cuando se recurre al método de la temperatura equivalente, el cálculo de temperaturas se efectúa mediante matrices de temperatura en lugar de matrices de calor. Por tanto, es necesario definir una ecuación que permita estimar la temperatura que se alcanza en cada nodo de la pieza con coordenadas (i, j, k) para un instante s durante el proceso de electroerosión. A continuación se facilita la expresión que se puede utilizar para determinar la temperatura en este nodo:

$$T_{i,j,k,s} = T_{i,j,k,s-1} + \Delta T_{L_{i,j,k,s}} + \Delta T_{R_{i,j,k,s}} + \Delta T_{T_{i,j,k,s}} + \Delta T_{B_{i,j,k,s}} + \Delta T_{F_{i,j,k,s}} + \Delta T_{A_{i,j,k,s}} \quad (21)$$

donde $T_{i,j,k,s-1}$ es la temperatura en el nodo de coordenadas (i,j,k) para el instante s-1 y los términos $\Delta T_{L_{i,j,k,s}}$, $\Delta T_{R_{i,j,k,s}}$, $\Delta T_{T_{i,j,k,s}}$, $\Delta T_{B_{i,j,k,s}}$, $\Delta T_{F_{i,j,k,s}}$ y $\Delta T_{A_{i,j,k,s}}$ representan el incremento de temperatura como consecuencia de la transferencia de calor desde el nodo situado a la izquierda, derecha, arriba, abajo, delante y detrás, respectivamente.

De esta ecuación se desprende que para conocer la temperatura de un nodo de coordenadas (i, j, k) en un instante s, es preciso disponer del valor de la temperatura que corresponde a ese nodo para el instante de tiempo anterior s-1.

Esta ecuación incluye todo los términos que se deben considerar en el caso de emplear un modelo 3D para la simulación del proceso de electroerosión por penetración. En cambio, si se opta por recurrir a un modelo 2D no se consideraría los términos que corresponden a los incrementos de temperatura con los nodos que se encuentran en otro plano diferente, como son los términos $\Delta T_{F_{i,j,k,s}}$, $\Delta T_{A_{i,j,k,s}}$.

La Figura 4.7 muestra un esquema que explica los términos que aparecen en esta ecuación en el caso de recurrir a un modelo bidimensional para la simulación del proceso, mientras que la Figura 4.8 representa este mismo esquema para un modelo tridimensional.

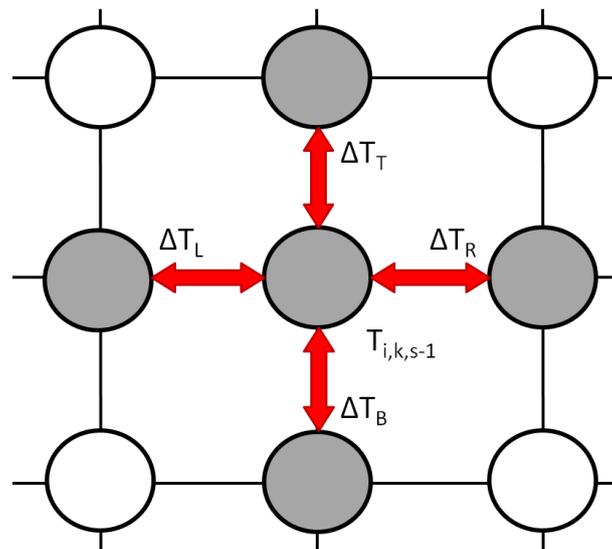


Figura 4.7 Esquema de la variación de temperaturas entre nodos del mallado en modelo 2D.

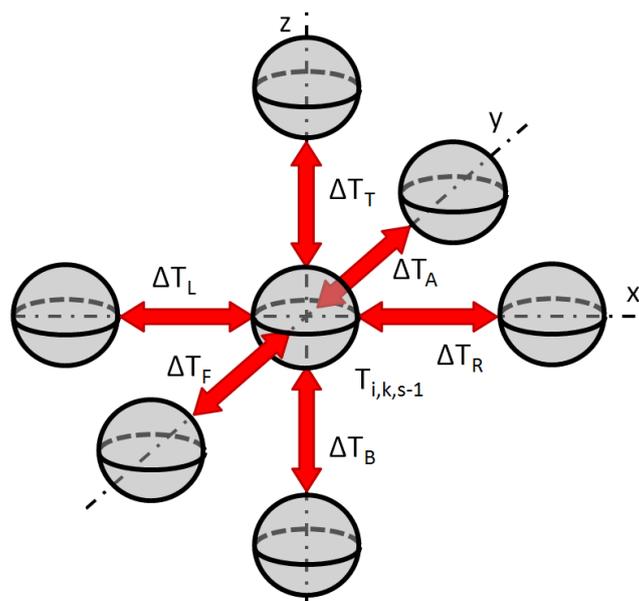


Figura 4.8 Esquema de la variación de temperaturas entre nodos del mallado en modelo 3D.

Dependiendo del nodo de que se trate entre los diferentes nodos que cubren el mallado de la pieza de partida, se puede distinguir entre tres tipos de nodos, como son los que se indica a continuación:

- Nodos de tipo 1: Se trata de nodos que se encuentran en el interior del material y únicamente están influenciados por la transferencia de calor por conducción dentro del propio material de la pieza.
- Nodos de tipo 2: Nodos localizados en la zona superficial de la pieza, que incluyen la transferencia de calor por convección con el fluido dieléctrico y la transferencia de calor por conducción con los nodos contiguos de la pieza de trabajo.
- Nodos de tipo 3: Se refiere a los nodos de la superficie de la pieza que se ven afectados por la energía proporcionada por el canal de plasma durante la descarga eléctrica. Estos nodos presentarán además transferencia de calor por conducción o por convección con los nodos contiguos o con el fluido dieléctrico, respectivamente.

La Figura 4.9 expone un esquema que representa los distintos tipos de nodos que se pueden encontrar, de acuerdo con lo que acaba de ser descrito. Las flechas que se incluyen en esta figura representan el sentido esperado para el flujo de calor en los diferentes nodos de la pieza electroerosionada. Así por ejemplo, la transferencia de calor con el canal de plasma se representa con la flecha entrante al nodo de estudio, para representar el aporte de energía desde el canal de plasma, y en cambio para la transferencia de calor por convección se considera una flecha saliente a causa de que normalmente se produce la disipación de calor desde el nodo en estudio hasta el fluido dieléctrico. Por otra parte, al flujo de calor por conducción se le asignará el sentido en el cual se considera que tendrá lugar la transferencia de calor, de acuerdo con la distribución de temperaturas existente.

No obstante, el sentido asignado a las flechas de estos flujos de calor en realidad carece de importancia, puesto que en caso de producirse la transferencia de calor en sentido contrario simplemente aparecería un signo negativo.

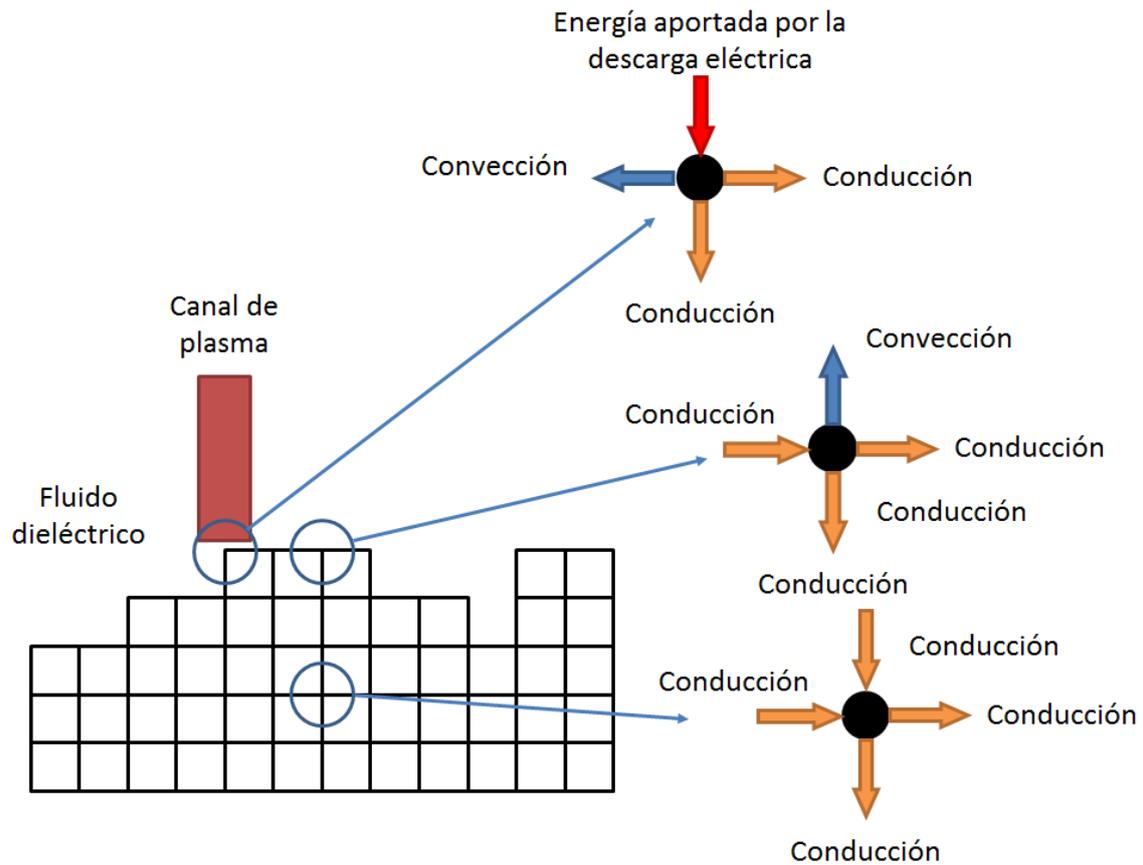


Figura 4.9 Ejemplos de transferencia de calor en distintos nodos.

El modelo numérico resolverá para cada instante de cálculo la ecuación que permite determinar la temperatura de cada nodo, utilizando las restantes expresiones para deducir el valor que corresponde a los distintos términos de esta ecuación. Se trata de un cálculo repetitivo, ya que para cada instante de cálculo se debe hallar los diferentes elementos de la matriz de temperaturas, recurriendo a las expresiones matemáticas que han sido descritas anteriormente.

Para facilitar la aplicación del modelo teórico, se utilizará una matriz de temperaturas para el instante en estudio y otra para el instante anterior. Esto permitirá agilizar el cálculo al poder calcular la temperatura para cada nodo $T_{i,j,k,s}$ a partir del valor correspondiente que habrá sido conservado previamente en la matriz de temperaturas para el instante anterior $T_{i,j,k,s-1}$.

4.5. Condiciones de contorno.

La definición de las condiciones de contorno a considerar es un aspecto fundamental en la modelización numérica del proceso. Por ello han de estudiarse cuidadosamente para poder representar correctamente los fenómenos que intervienen en el proceso.

Es importante tener en cuenta que se pueden emplear diferentes condiciones de contorno y en cambio obtener resultados muy similares. Lo más importante es que las condiciones fijadas sean coherentes y estén bien justificadas.

En los siguientes apartados se explicarán los diferentes tipos de condiciones de contorno que han sido contempladas en este trabajo.

4.5.1. *Nodos extremos del mallado.*

La ecuación que ha sido facilitada anteriormente para el cálculo de la temperatura en cada nodo de la malla, se basa en la estimación de la variación de temperatura que se deriva del flujo de calor respecto de los nodos contiguos. Una problemática que se debe atender es la que suponen los casos en que no existen nodos contiguos, como sucede en los nodos situados en los extremos del mallado.

Si el incremento de temperatura se debe a la transferencia de calor por convección o a la aplicación de la energía que proviene de las descargas eléctricas, no existe ningún problema pues se dispone de toda la información necesaria para resolver las ecuaciones correspondientes. En cambio, en el caso de los nodos que transfieren calor por conducción se requiere conocer la temperatura de los nodos contiguos y al no existir en el mallado definido es necesario fijar una condición de contorno.

En la Figura 4.10 se puede observar este tipo de nodos, que se encontrarán en la zona identificada mediante líneas amarillas en el mallado de la pieza.

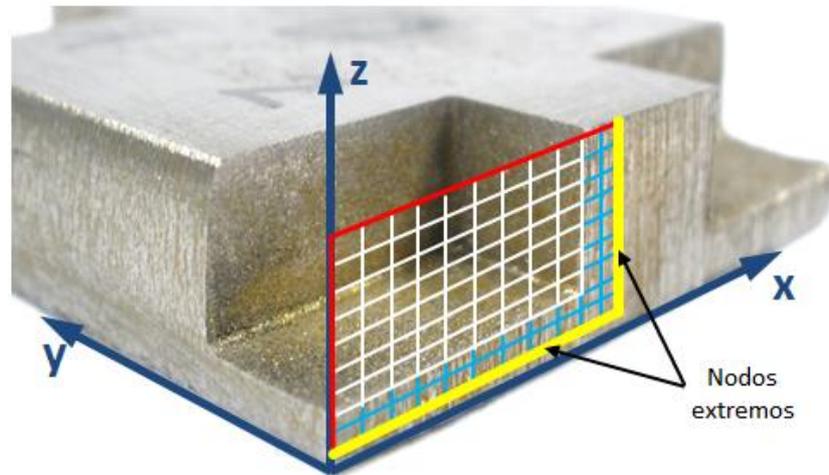


Figura 4.10 Ejemplo de nodos extremos del mallado de una pieza.

De acuerdo con la expresión de la transferencia de calor por conducción, para poder proceder a su cálculo es preciso disponer del término $T_{i',j',k',s-1}$, que corresponde a la temperatura en el nodo contiguo para el instante anterior. Al no existir más nodos que considerar en el modelo a partir de estos nodos extremos, es necesario asumir una condición de contorno como sería la siguiente: para el cálculo del flujo de calor por conducción, la temperatura en los puntos externos del mallado para el instante anterior al actual, será igual a la temperatura en el punto más próximo del mallado para dos ciclos anteriores, lo cual se puede expresar mediante la siguiente expresión:

$$T_{i',j',k',s-1} = T_{i,j,k,s-2} \quad (22)$$

De este modo, para los puntos extremos del mallado la ecuación que proporciona el incremento de temperatura debido a la transferencia de calor por conducción quedaría expresada como se indica a continuación:

$$(\Delta T)_{i,j,k,s} = \frac{\Delta t k \Delta A (T_{i,j,k,s-2} - T_{i,j,k,s-1})}{\Delta m c_p \Delta s} \quad (23)$$

Para poder hacer uso de esta ecuación, se debe incluir en el modelo una tercera matriz de temperatura en la que recoger los valores para dos instantes anteriores.

4.5.2. Número de descargas eléctricas simultáneas.

Es prácticamente imposible conocer el número de descargas que se tendrán lugar en cada impulso. En la bibliografía no se ha encontrado ningún criterio que permita predecir el número de descargas que se producirán [42]. La topografía de la superficie de la pieza y del electrodo, condicionan el número de descargas, pero no existe una ecuación que permita predecirlo.

Dada la existencia de este problema, en la presente tesis doctoral se propone un criterio que se podrá utilizar como condición de contorno a este respecto. En primer lugar, la energía transmitida a la pieza en cada impulso se dividirá por igual entre las diferentes descargas producidas de forma simultánea. Para ello, la ecuación que proporciona la energía calorífica generada por cada descarga eléctrica se vería modificada dividiendo el parámetro F_w entre el número de descargas simultáneas n_w , como se indica a continuación:

$$q_0 = \frac{\frac{F_w}{n_w} U I t_i}{\pi R_p^2} \quad (24)$$

Por otra parte, para estimar el número de descargas que se puede originar simultáneamente, es posible distinguir entre varios criterios tales como los que se indican a continuación. Se proponen tres posibles criterios a este respecto, mostrando cada uno de ellos un diferente nivel de complejidad. Los criterios más complejos podrían implicar un mayor tiempo de cálculo. Los tres niveles que se proponen son los siguientes:

- Fijar un número exacto de descargas por ciclo, que normalmente estará comprendido entre 1 y 5. La principal ventaja de optar por este criterio consiste en que reduce considerablemente la complicación de la programación y los resultados son muy satisfactorios.
- Generar una variable aleatoria con distribución uniforme que permite decidir un número de descargas comprendido entre 1 y 5 para cada ciclo de descarga. Esta opción complica el cálculo de cada ciclo, pero se trata de una opción bastante empleada.
- Generar una variable aleatoria con distribución no uniforme para decidir el número de descargas a considerar, con valores comprendidos entre 1 y 5 por cada ciclo de descarga. La posibilidad de que se produzca una sola descarga será mayor que la probabilidad de que se produzcan 5 descargas. Sin duda se trata de la opción más realista de estas tres, pero el cálculo resulta más complejo y por tanto se incrementa el tiempo de proceso.

4.5.3. Ciclos de descarga y de enfriamiento.

La duración del ciclo de descarga y ciclo de enfriamiento no tienen por qué presentar valores constantes, ni iguales entre sí, como se puede visualizar a modo de ejemplo en la Figura 4.1. Durante la utilización del modelo, se debe definir un paso de tiempo que permita ejecutar

correctamente la simulación del proceso, en esta tesis doctoral se mantendrá constante el paso de tiempo durante la simulación de la totalidad del proceso.

La duración del ciclo de cálculo t_n será un múltiplo del paso de tiempo, y no tiene por qué coincidir con la duración que corresponde a un ciclo real. La Figura 4.11 ilustra a modo de ejemplo las discrepancias que se pueden producir entre la duración de cada ciclo de cálculo, de acuerdo con el paso de tiempo que sea seleccionado, y la duración de un ciclo real.

A causa de estas discrepancias, se considera necesario comprobar primeramente al comienzo de cada ciclo de cálculo si el instante de cálculo se corresponde con una fase de impulso o de pausa.

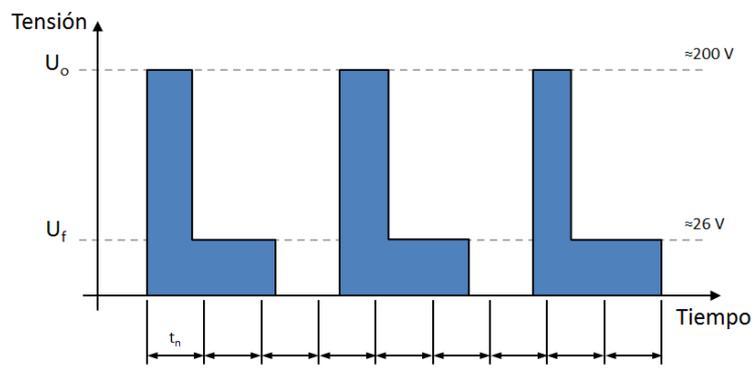


Figura 4.11 Diagrama de ciclos de impulso y ciclos de pausa en relación a la duración del ciclo de cálculo.

En la fase de impulso se tendrá que calcular el punto (o puntos) de incidencia de las descargas y la transferencia de calor producida por dichas descargas, mientras que en la fase de pausa no se producirán descargas, y por tanto toda la superficie de la pieza de trabajo disipará calor por conducción con los elementos de la máquina de EDM y por convección con el fluido dieléctrico.

Para poder determinar el número de ciclos de descarga y de enfriamiento que se desea considerar dentro de cada ciclo de cálculo, se debe adoptar algún tipo de criterio tales como los que se indican a continuación. Para seleccionar la secuencia de ciclos de descarga y de enfriamiento a considerar, se puede aplicar uno de los tres criterios siguientes:

- Serie compuesta de un ciclo de descarga y un ciclo de enfriamiento.
- Serie compuesta de un ciclo de descarga y dos ciclos de enfriamiento.
- Serie compuesta de un ciclo de descarga, un ciclo aleatorio de descarga o enfriamiento y un ciclo de enfriamiento.

La tercera opción es la más realista, pero a su vez es la que resulta más difícil de implementar en el modelo. Además de ello, se pueden emplear criterios derivados de este tercer punto, incluyendo más ciclos aleatorios de descarga o enfriamiento, siempre que exista continuidad en las fases de la descarga y enfriamiento.

Al igual que ocurría con el número de descargas simultáneas, es conveniente realizar algunos ensayos experimentales dirigidos a observar este fenómeno, para poder ajustar el criterio a adoptar del modo más conveniente para la simulación del proceso.

4.5.4. *Gap máximo de descarga.*

Las descargas eléctricas se originan en las zonas que presentan una mínima distancia, si bien no se puede afirmar que la descarga se produzca siempre exactamente entre los dos puntos más próximos de pieza y electrodo. En esta tesis doctoral se propone la utilización de un criterio que se basa en establecer un gap máximo admisible entre el electrodo y pieza a partir del cual no es posible producir la descarga.

Esto hará que no se produzcan descargas en las zonas centrales de los cráteres, y además impedirá que resulten picos excesivamente pronunciados en la superficie de la pieza. Se trata de dos fenómenos que no se advierten en los ensayos experimentales y por tanto se deben evitar durante la simulación numérica del proceso.

Como valor orientativo para el gap máximo admisible durante la simulación del proceso de electroerosión, se puede adoptar algún valor comprendido entre 50 μm y 200 μm .

4.6. Parámetros del proceso.

Para facilitar su correcta incorporación al modelo teórico, los parámetros del proceso se pueden clasificar en las tres tipologías siguientes:

- Parámetros constantes: Se fijan al inicio de la simulación numérica y mantienen constante su valor durante la totalidad del proceso.
- Parámetros aleatorios: Se trata de parámetros específicos como la posición en la cual se originará cada descarga eléctrica.
- Parámetros de salida: Son aquellos parámetros que se obtendrán como resultado de la simulación numérica del proceso.

4.6.1. *Parámetros constantes.*

Estas variables se pueden diferenciar en dos grandes grupos, tales como los parámetros propios del material que se ha seleccionado para la pieza y el electrodo, y los parámetros que son intrínsecos del proceso de electroerosión.

En relación con el material, se debe incluir todas aquellas propiedades del material que es necesario conocer porque aparecen en las ecuaciones integradas en el modelo numérico.

En la Tabla 4.1 se enumeran las principales propiedades del material de la pieza.

Tabla 4.1 Parámetros relativos a las propiedades del material.

Concepto	Unidades
Temperatura equivalente	°C
Coefficiente de transferencia de calor por convección	W/(m ² K)
Densidad del material de la pieza	kg/m ³
Calor específico	J/K Kg
Conductividad térmica	W/(m K)

Por otra parte, también es necesario introducir en el modelo numérico parámetros que son característicos del proceso de mecanizado por electroerosión. La Tabla 4.2 recoge los principales parámetros del proceso que se deben incorporar al modelo numérico.

Tabla 4.2 Parámetros relativos al proceso de EDM.

Concepto	Unidades
Dimensiones de la pieza	mm
Tensión de descarga	V
Tensión de trabajo	V
Intensidad de descarga	A
Tiempo de ionización	μs
Tiempo de descarga	μs
Tiempo de impulso	μs
Tiempo de pausa	μs
Temperatura ambiente	°C
Gap	μm
Radio del canal de plasma	μm
Temperatura del fluido dieléctrico	°C
Proporción de energía transferida a la pieza	%

Otros parámetros que permanecerán constantes son aquellos que se deba establecer dentro del modelo, entre los cuales cabe citar lo que se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Parámetros relativos al modelo numérico.

Concepto	Unidades
Dimensiones del mallado	mm
Distancia entre nodos del mallado	μm
Paso de tiempo	μs
Gap máximo de descarga	μm
Número de ciclos para visualización de resultados intermedios	

4.6.2. *Parámetros aleatorios.*

Como ha sido descrito en apartados anteriores, existe algunos parámetros que son de carácter aleatorio, como sucede por ejemplo con el número de descargas eléctricas que tienen lugar de manera simultánea o el punto de incidencia de cada descarga.

En relación al número de descargas eléctricas simultáneas, se puede elegir entre varios criterios a aplicar, siendo habitual emplear una distribución uniforme de probabilidad para elegir un valor que oscile entre 1 y 5 descargas.

Para que el modelo numérico pueda determinar el punto de incidencia de la descarga eléctrica en primer lugar se debe identificar todos los nodos que cumplen la condición de contorno definida para el gap máximo de descarga. Una vez determinado este conjunto de nodos, se puede proceder a seleccionar el punto de incidencia del canal de plasma utilizando una distribución de probabilidad uniforme para no discriminar ninguno de los nodos.

4.6.3. *Parámetros de salida.*

Existe una serie de parámetros que varían a lo largo del proceso, y por tanto han de ser determinados en cada instante de cálculo durante la simulación del proceso. Dichos parámetros describirán los resultados alcanzados mediante el proceso de mecanizado, tanto al final del proceso como en cualquier instante intermedio que sea preciso conocer.

Como ya ha sido explicado, el parámetro más relevante que se debe hallar en cada ciclo de cálculo es la temperatura que corresponde a cada nodo de la pieza. Otro de los resultados destacados de la simulación del proceso es la topografía de la superficie resultante en la pieza de trabajo, que está íntimamente relacionada con la distribución de temperatura.

La textura de la superficie de la pieza resultará de eliminar los nodos que han superado la temperatura equivalente establecida para el material a mecanizar. La superficie de la pieza

estará compuesta por todos los puntos del mallado que no han superado el umbral de la temperatura equivalente

La posición vertical del electrodo estará cambiando continuamente durante el proceso de electroerosión a medida que la pieza de trabajo es mecanizada. Se puede suponer una velocidad de avance constante para la herramienta de corte, aunque puede retroceder si se origina un cortocircuito por una excesiva proximidad a la superficie de la pieza. Si el espacio entre la pieza y la herramienta de corte es mayor que la posición del nodo más alto en la pieza de trabajo, el electrodo puede continuar su movimiento penetrando en el material de la pieza, pero en caso contrario volvería a la posición inicial del ciclo de cálculo.

Un error habitual en la simulación numérica de los procesos de electroerosión y que ha de impedirse en todo momento, consiste en el hecho de que el electrodo atraviese la pieza de trabajo, lo cual carece de sentido físico. Esto se puede evitar con la comprobación del gap mínimo que debe existir siempre entre el electrodo y la pieza.

4.7. Limitaciones de la modelización del proceso de electroerosión.

En los apartados anteriores, ha sido descrito el modelo numérico teórico que será utilizado para efectuar la simulación numérica del proceso de mecanizado por electroerosión, y se han definido los parámetros que afectan a la simulación del proceso, así como las principales condiciones de contorno que se debe considerar.

La simulación numérica de estos procesos de mecanizado tiene una enorme complejidad, debido a la naturaleza de los fenómenos involucrados en el proceso. En este apartado se recogen algunas de las limitaciones que presenta el modelo numérico, y se exponen una serie de soluciones que permiten evitar algunas de estas dificultades.

4.7.1. Modelización 2D y 3D.

Durante la simulación numérica de cualquier proceso de mecanizado, siempre se debe adoptar una primera decisión acerca de la simplificación de la geometría a analizar, y por tanto ahorro de recursos recurriendo a una modelización bidimensional, o bien la realización de una simulación más completa del proceso a través de su modelización tridimensional. Sin duda la modelización 3D resulta mucho más compleja, pero sus resultados son indiscutiblemente más completos y realistas que los proporcionados por una modelización 2D.

La simulación 3D del proceso de EDM requerirá disponer de una matriz de temperatura $T_{i,j,k}$, o lo que es lo mismo, una matriz $T_{i,k}$ para cada plano j . Sin embargo, la simulación 2D únicamente precisa una matriz $T_{i,k}$ para un plano concreto j . Por tanto, en la modelización 3D el número de matrices dependerá del tamaño de las piezas y la distancia entre nodos del mallado. Con un mallado fino y piezas de tamaño medio, los tiempos de proceso pueden resultar muy elevados, y una solución razonable puede ser la adecuación de un modelo 2D inicial para fases previas de estudio.

Si por el contrario se lleva a cabo una simulación 2D, con una única matriz $T_{i,k}$, los tiempos de proceso se reducirán considerablemente, aunque surge la problemática de no poder analizar el resto de la superficie de la pieza, y no poder contemplar las descargas que se produzcan fuera del plano de estudio.

Una posible solución en este sentido, consiste en definir un mallado 2D, pero a su vez extenderlo a toda la pieza a través de sucesivos planos paralelos que permitan simular la zona de corte completa, y combinarlo con una modelización 3D de la energía suministrada por las descargas eléctricas, para poder considerar el alcance del canal de plasma a cualquier punto de la superficie. Esta metodología proporciona una adecuada precisión y al mismo tiempo permite ahorrar en tiempo de computación.

Esta metodología consiste en utilizar un plano central de la pieza, sobre el cual se efectuará un mallado en 2D. La totalidad de los cálculos de temperaturas se realizarán en dicho plano, estudiando la transferencia de calor por convección de los puntos de la superficie con el fluido dieléctrico, y por conducción entre los nodos contiguos, con ambos cálculos limitados al plano de estudio en 2D, si bien mientras tanto se recurre a una modelización 3D para la evaluación del incremento de temperatura a causa de las descargas eléctricas.

Los diferentes planos a considerar se representan en la Figura 4.12. Se utiliza el color rojo para el plano de estudio con mallado 2D, dentro del cual se calculará la matriz de temperaturas. En cambio aparecen de color naranja el resto de planos en los cuales no se generará una matriz de temperatura, pero sí se procederá al cálculo de la energía suministrada por las descargas eléctricas donde pueden producirse dichas descargas eléctricas.

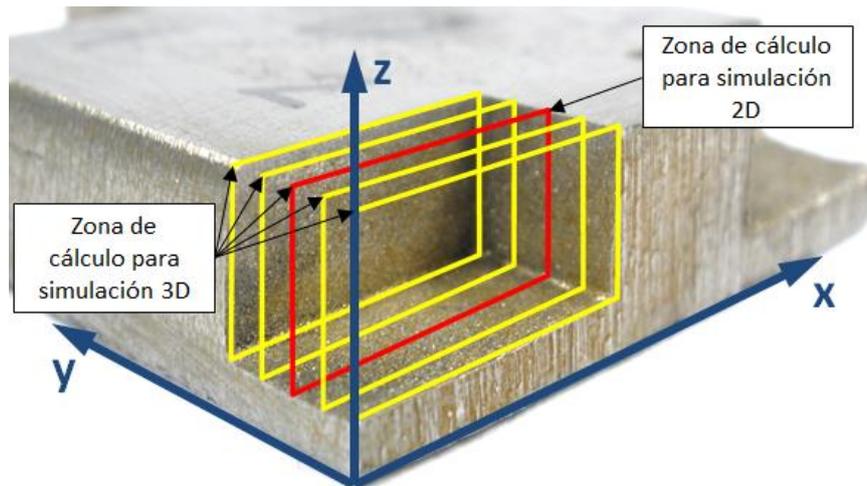


Figura 4.12 Planos definidos en una simulación 2D y 3D.

Esta metodología ofrece una situación intermedia entre la modelización 2D y la modelización 3D. De esta forma, se logra que la pieza no actúe como una placa sin espesor y se contemplan las descargas eléctricas que se producen en cualquier plano.

4.7.2. Modelización de grandes piezas (mallado progresivo).

Cuando se pretende modelizar piezas de un tamaño relevante, las dimensiones de las matrices de cálculo se pueden volver excesivamente elevadas y como consecuencia ralentizar la simulación del proceso. Sin embargo, para evitar que se disparen los tiempos de computación, se puede optar por algunas alternativas.

Una alternativa muy extendida a esta problemática es utilizar mallados adaptativos, es decir que el mallado inicial sea de una amplia distancia entre nodos del mallado, y en cambio para ciertos instantes de cálculo que resulten de interés se puede cambiar a un mallado más fino. Para realizar la transición entre el mallado grueso y el mallado fino, es necesario definir unas condiciones de transformación, donde se calcule la temperatura de los nuevos puntos definidos.

Una vez que se ha empleado un mallado más fino, se puede volver nuevamente al mallado grueso, simplificando la matriz de temperaturas. En pasos posteriores se puede volver a retomar el mallado más fino, calculando otra vez la matriz de temperaturas con un mayor número de puntos, y así sucesivamente.

Otra alternativa viable, consiste en la utilización de un mallado progresivo. Este concepto consiste en no mallar la totalidad de la pieza en la dirección en que se produce el movimiento de penetración, sino que en su lugar se lleva a cabo el mallado únicamente hasta una cierta

profundidad en la cual se comprueba que el incremento de temperatura por conducción es despreciable. Durante el transcurso de la simulación numérica, el mallado se irá desplazando junto con el electrodo, lo cual permite un mallado mucho más fino con adecuados costes de computación.

Es fácil verificar la profundidad donde la transferencia de calor por conducción es despreciable, ya que únicamente es necesario simular el proceso con un mallado grueso y comprobar la matriz de temperatura en instantes intermedios. Se podrá dejar sin abarcar por la malla toda el área en que la temperatura resulte prácticamente constante.

La Figura 4.13 muestra un ejemplo de mallado progresivo, simplificado gráficamente mediante un mallado 2D, a la vez que se visualiza la distribución de temperaturas resultante en un instante intermedio del mecanizado de la pieza. En dicha figura se puede apreciar que a una cierta profundidad la pieza de trabajo se encuentra a temperatura ambiente, y por tanto se prescinde de esa área durante la creación de la malla.

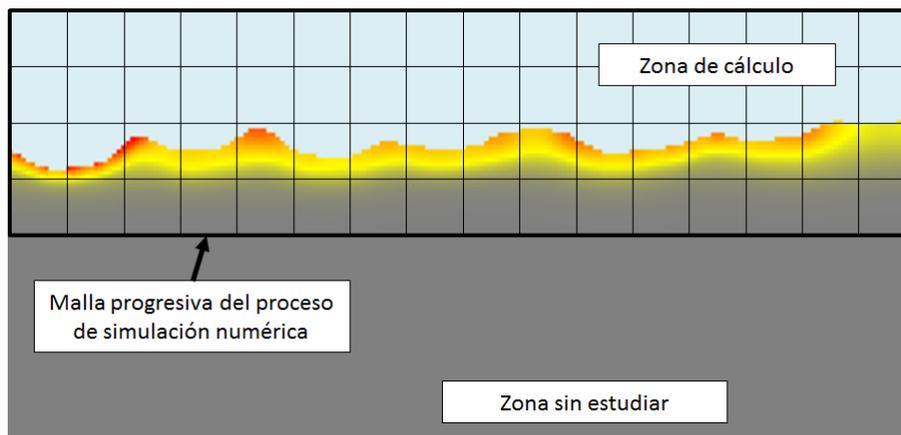


Figura 4.13 Ejemplo de mallado progresivo de la pieza durante el proceso de mecanizado.

4.7.3. Límites en la precisión del mallado.

Para mejorar la precisión del modelo teórico, podría ser conveniente disminuir el paso de tiempo Δt y el tamaño de malla (o distancia entre nodos adyacentes) Δs en la malla de simulación. Sin embargo, esta solución no es la más idónea porque un tamaño de malla muy pequeño puede provocar errores en los cálculos basados en las formulaciones básicas. La ecuación general de conducción está orientada a las distancias relevantes entre los nodos adyacentes, donde el incremento en la temperatura es una función del gradiente térmico, las propiedades del material, el paso de tiempo y la distancia entre nodos adyacentes. Se debe

utilizar un tamaño de malla adecuado, de acuerdo con la geometría, las dimensiones de la pieza y las condiciones de corte consideradas.

Asimismo, se debe evitar reducir el tamaño de malla sin reducir a la vez el paso de tiempo, ya que proporcionaría una predicción más inexacta y un tiempo de computación mayor. Por el contrario, debe mantenerse un cierto equilibrio entre el tamaño de malla y el paso de tiempo durante la simulación numérica del proceso de electroerosión por penetración.

4.7.4. Modelización del electrodo.

El presente capítulo se ha centrado en el análisis de la pieza de trabajo, debido a la especial importancia que posee el acabado superficial del producto final. No obstante, también es de interés la simulación numérica de la pérdida de material en la superficie del electrodo, si bien se ha reservado para líneas de trabajos futuros.

Para el análisis de la degradación del electrodo, se podría extender a la superficie de la herramienta un modelo similar al aplicado para la pieza de partida, aunque sería necesario particularizar algunas de las leyes que han sido incluidas en este modelo computacional, y por supuesto se debería incorporar las constantes apropiadas para la proporción de energía calorífica que accede a la superficie del electrodo, y las propiedades térmicas que corresponden al material de la herramienta.

Podría ser de interés llevar a cabo la simulación computacional de la pieza de partida y herramienta de corte simultáneamente, si bien se ha preferido desarrollar primeramente por separado un modelo teórico que puede ser utilizado para estudiar la eliminación de material y acabado superficial en la pieza de trabajo.

El desarrollo de un modelo numérico que englobe asimismo el análisis del desgaste del electrodo de manera progresiva durante el proceso de electroerosión por penetración, reviste una especial dificultad, debido a las enormes diferencias tanto en la escala entre la pérdida de material en la pieza y la superficie de la herramienta, como en la tipología de las irregularidades que caracterizan la superficie de la pieza y el electrodo.

4.8. Simulación numérica del proceso de electroerosión.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos mediante el modelo teórico que ha sido utilizado en esta tesis doctoral para el estudio de la calidad superficial de la pieza mecanizada. Para ello se ha recurrido al método de las diferencias finitas y se ha implementado las ecuaciones que permiten estudiar el aporte de calor provocado por las descargas eléctricas y la formación de cráteres en la superficie de la pieza.

La simulación numérica del proceso ha sido aplicada al mecanizado mediante electroerosión por penetración de acero inoxidable AISI 316 mediante electrodos de cobre electrolítico con intensidades de corriente de 6, 8, 12 y 14 A y una temperatura ambiente de 24 °C, lo cual se corresponde con las condiciones de corte que se han considerado durante el estudio experimental de las propiedades del proceso.

Para la modelización del proceso, se ha recurrido a un mallado progresivo asumiendo un tamaño de malla de 10 μm en las tres direcciones, y para minimizar el coste computacional el análisis se ha limitado a un volumen de material de partida de 5x5x3 mm.

El modelo simplificado que ha sido propuesto en esta tesis doctoral, permitirá conocer la distribución de temperaturas en la zona de corte, utilizando para ello una computación basada en el método de la temperatura equivalente, y de acuerdo con el estado térmico en la zona de corte se determina el perfil de la superficie mediante simulación 2D y mapas tridimensionales de la superficie mediante simulación 3D.

4.8.1. Distribución de temperaturas en la superficie mecanizada.

En primer lugar se procede a la discusión de los resultados relativos a la predicción de la distribución de temperaturas en el material de la pieza de trabajo.

El cálculo de temperaturas ha sido efectuado mediante la simulación tridimensional del arranque de material a causa del calor suministrado por el canal de plasma, si bien una vez completada la simulación del proceso se puede extraer los resultados en un plano central en forma de matriz de temperaturas bidimensional, para poder comprobar la distribución de temperaturas en una sección de la pieza.

La Figura 4.14 representa a modo de ejemplo una porción de la superficie de trabajo en la que se aprecia el diagrama de temperaturas que se obtiene para una de las combinaciones de parámetros del proceso que han sido consideradas en este trabajo. En este diagrama se puede comprobar los valores de temperatura que se alcanzan en cada nodo de la malla de cálculo.

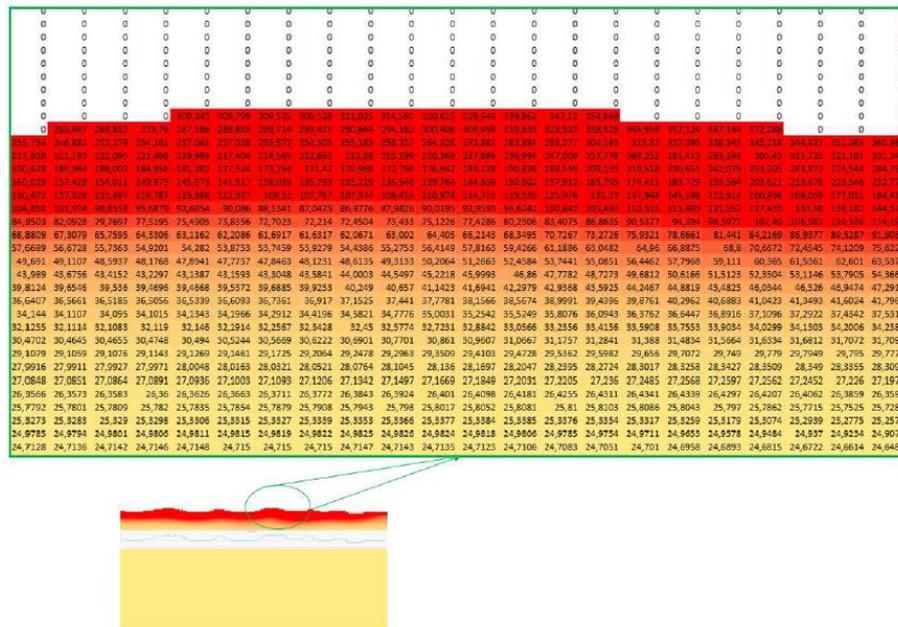


Figura 4.14 Ejemplo de diagrama de temperaturas detallado mediante simulación numérica.

Como se ilustra en esta figura, en los nodos que alcanzan un valor igual o superior a la temperatura equivalente, que representa el cambio de fase sólido a líquido, se elimina ese nodo y se asigna un valor nulo en esa celda de la matriz de temperaturas.

Además del diagrama de temperaturas que corresponde a diferentes regiones de la zona de corte, se puede visualizar una sección de la superficie de cálculo completa con el fin de comprobar la forma de la superficie electroerosionada acompañada de un mapa que describe las temperaturas alcanzadas en cada nodo del material de trabajo, como se muestra en la Figura 4.15 para una de las combinaciones de condiciones de corte que se contemplan en esta tesis doctoral.



Figura 4.15 Ejemplo de diagrama de temperaturas resultante mediante simulación numérica.

En esta figura se observa que se obtiene una distribución homogénea de temperaturas, con una gran extensión que se encuentra a la temperatura ambiente de 24 °C, lo cual permite comprobar el enorme interés del mallado progresivo para reducir drásticamente la memoria requerida y el tiempo de computación. Mientras, en la parte superior se aprecian zonas con mayores temperaturas, las cuales corresponden a los nodos más próximos al electrodo.

El diagrama que se ilustra en esta figura, presenta una superficie libre constituida por cráteres como corresponde a las piezas sometidas a mecanizado por electroerosión.

4.8.2. Perfil de la superficie en la pieza final.

El modelo numérico permite extraer separadamente el perfil de la superficie en un plano central, como se observa en la Figura 4.16. Estos perfiles revelan las irregularidades en forma de cráter que se originan en la superficie de la pieza, las cuales recuerdan el acabado típico de la superficie de la pieza. En estos perfiles se constata el aumento del tamaño del cráter en función de la intensidad de corriente.

Los perfiles que se muestran en la Figura 4.16 han sido suavizados utilizando una media móvil de 4 puntos, lo cual permite describir con mayor claridad las irregularidades que caracterizan la calidad superficial de las piezas electroerosionadas.

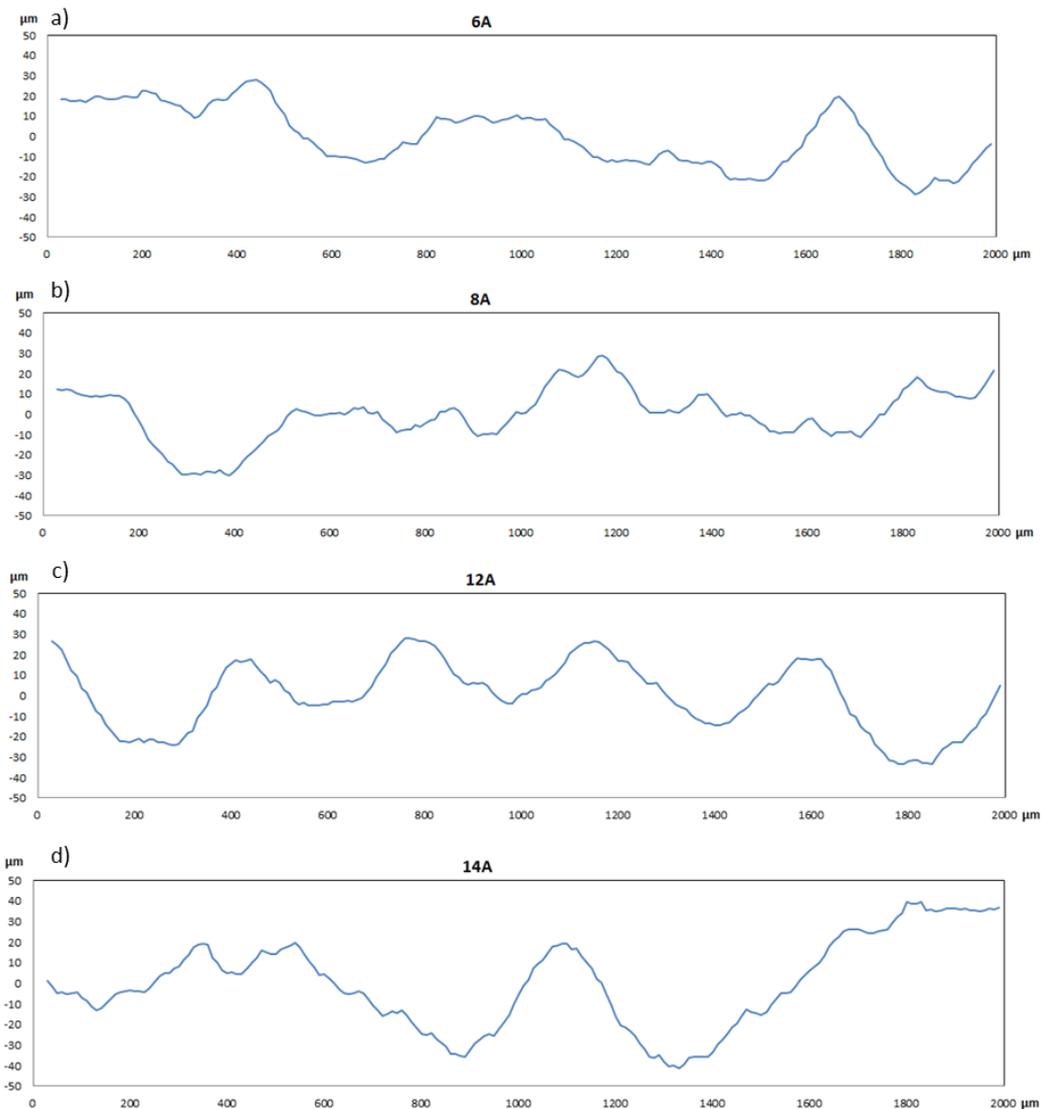


Figura 4.16 Perfil de la superficie de la pieza mediante simulación numérica: a) intensidad de corriente de 6 A, b) 8 A, c) 12 A y d) 14 A.

La simulación numérica del proceso también permite obtener mapas tridimensionales, en los cuales se aprecia fácilmente la topografía resultante en la pieza final, como se ilustra en la Figura 4.17.

En las gráficas de esta figura, se advierte nuevamente el incremento del tamaño de los cráteres a medida que aumenta la intensidad de corriente. Las zonas que se encuentran en color amarillo corresponden a los valles del perfil de la superficie, mientras que las zonas de color naranja consisten en el borde de los cráteres que se producen durante el proceso de electroerosión.

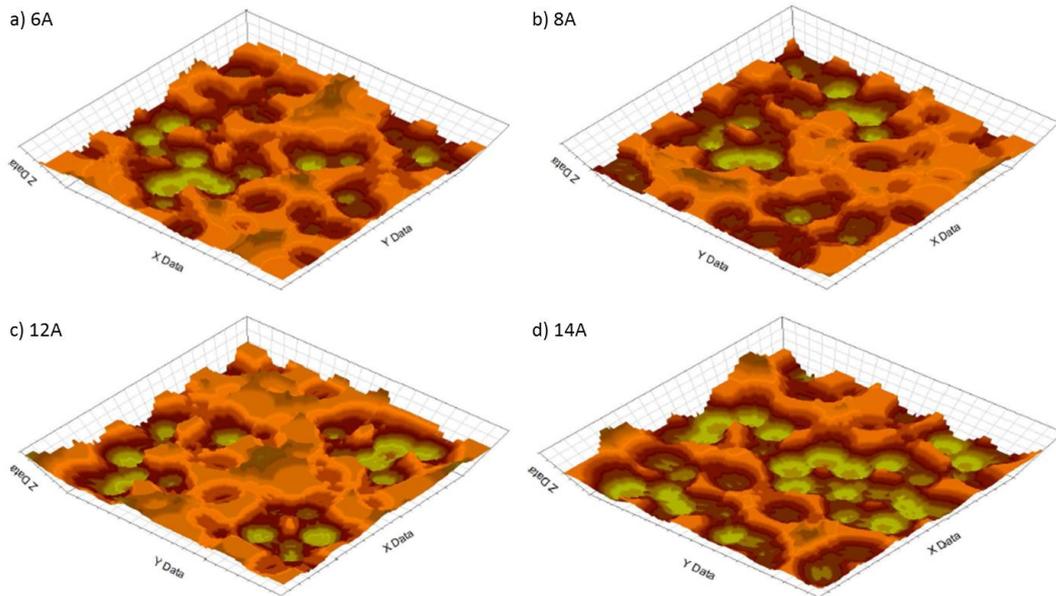


Figura 4.17 Mapa tridimensional de la superficie de la pieza mediante simulación numérica: a) intensidad de corriente de 6 A, b) 8 A, c) 12 A y d) 14 A.

4.8.3. Diámetro del cráter en la pieza final.

Una de las propiedades más características de la superficie resultante de las piezas sometidas a procesos de electroerosión consiste en el diámetro de los cráteres provocados por la acción de las descargas eléctricas. En este apartado se discuten los valores de diámetro del cráter deducidos a partir de la topografía de la superficie determinada mediante simulación numérica, y se comparan con las observaciones experimentales que se expusieron en el segundo capítulo de esta tesis doctoral. Para ello se ha recurrido a los mapas tridimensionales obtenidos mediante modelización 3D que se han mostrado en la Figura 4.17.

La Tabla 4.4 recoge los valores de diámetro del cráter registrados experimentalmente, así como los resultados proporcionados por el modelo teórico. Se puede observar que tanto los valores teóricos como los experimentales aumentan con la intensidad de corriente, y se advierte una fluctuación ligeramente más baja para las predicciones teóricas.

Tabla 4.4 Diámetro medio de cráter mediante estudio experimental y simulación numérica en función de la intensidad de corriente

Intensidad de corriente (A)	Diámetro del cráter experimental (μm)		Diámetro del cráter simulación (μm)	
	Media	Desv. tip.	Media	Desv. tip.
6	147,64	14,92	174,17	13,79
8	199,04	16,02	204,17	18,81
12	265,69	36,35	295,83	16,76
14	322,04	56,06	325,83	18,32

La Figura 4.18 representa la variación del tamaño del cráter en función de la intensidad de corriente, incluyendo los resultados teóricos y experimentales que han sido obtenidos para este parámetro. En esta figura se pone de manifiesto un claro incremento del diámetro del cráter a medida que aumenta este parámetro del proceso.

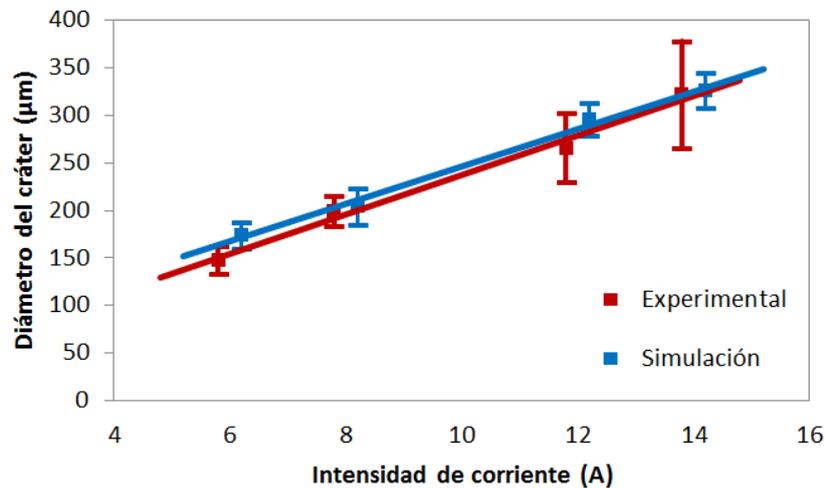


Figura 4.18 Comparativa resultados experimentales y numéricos del diámetro de los cráteres.

A partir de los resultados que muestran en esta figura, se comprueba que la curva teórica y experimental presentan una tendencia muy similar. Esto permite asegurar la validez del modelo numérico que ha sido propuesto en este capítulo para la predicción del acabado superficial de la pieza mecanizada.

El modelo simplificado que ha sido propuesto, puede ser también utilizado para analizar el mecanizado por electroerosión de otras distintas aleaciones, introduciendo para ello las constantes adecuadas en el modelo, algunas de las cuales necesitarán el estudio experimental con esos materiales. De este modo, se podría aplicar también este modelo a otros materiales empleados en la industria naval y en otras industrias para las cuales es posible recurrir al mecanizado por electroerosión.

La adopción de un coeficiente de convección constante para el fluido dieléctrico es una limitación actual de este modelo teórico, por lo cual se considera interesante la posibilidad de mejorar este modelo tras un análisis profundo acerca del efecto del coeficiente de convección. Estos trabajos futuros podrían contribuir a mejorar el cálculo de la transferencia de calor por convección en el fluido dieléctrico, lo cual podría redundar en una mayor precisión en los resultados proporcionados por el modelo.

El modelo computacional que se presenta en este capítulo, puede ser de gran utilidad para la estimación de la calidad superficial alcanzable en las piezas mecanizadas, permitiendo predecir las propiedades dimensionales en función de los valores seleccionados para los parámetros del proceso sin necesidad de incurrir en los elevados costes que supone la realización de ensayos experimentales.

Capítulo 5. Conclusiones finales y desarrollos futuros

La presente tesis doctoral se ha centrado en el estudio de los procesos de electroerosión por penetración y la aplicabilidad de estos procesos al sector naval. El principal objetivo de este trabajo ha consistido en determinar la influencia de los parámetros del proceso sobre el acabado superficial de las piezas mecanizadas y el desgaste y contaminación la superficie del electrodo, así como el análisis teórico del arranque de material en la superficie de la pieza.

Se ha procedido a la evaluación del efecto que tienen dos de los diversos parámetros del proceso, como son la intensidad de corriente y la profundidad de penetración, y se comprueba la relevancia de estos factores para la eficiencia del proceso.

En relación con la calidad de las piezas mecanizadas, se ha llevado a cabo la medición de la rugosidad superficial y se ha recurrido a microscopía electrónica de barrido (SEM) para el análisis de los fenómenos que intervienen en la eliminación de material durante la electroerosión por penetración.

Para el análisis del estado en que se encuentra el electrodo, se contempla la zona activa del mismo, como responsable de las descargas eléctricas que tienen lugar sobre la pieza y la zona no activa, la cual está alejada de la zona de corte y por tanto no se ve afectada por el canal de plasma. También se observa la superficie del electrodo mediante SEM, para comprender mejor los fenómenos que se producen.

Además del estudio experimental del efecto de los parámetros considerados en esta tesis doctoral, se procedió al análisis del proceso mediante un modelo teórico que permite describir el aporte y distribución de energía calorífica, el arranque de material y el acabado resultante en las superficies de las piezas.

Asimismo, al final del primer capítulo se procedió a identificar algunas de las aplicaciones para las que se podría recurrir a los procesos de electroerosión en los elementos fabricables en la industria naval, con el fin de facilitar la transformación de este sector mediante la incorporación de estas tecnologías productivas.

5.1. Conclusiones finales.

La presente tesis doctoral se ha centrado en el estudio del acabado superficial de la pieza mecanizada, y el desgaste y contaminación de la herramienta de corte, así como la modelización teórica del proceso de mecanizado por electroerosión, y las aplicaciones de estos procesos en la industria naval.

En los siguientes apartados se recogen las principales conclusiones extraídas a partir de los resultados obtenidos sobre estas temáticas.

5.1.1. Conclusiones sobre el acabado superficial de la pieza mecanizada.

Para el análisis de la calidad superficial alcanzable en las piezas fabricadas mediante electroerosión por penetración, en esta tesis doctoral se han contemplado tres indicadores diferentes como son la rugosidad superficial, la pendiente en la zona central de la curva de la tasa de material portante y el diámetro de los cráteres.

Se comprueba que la rugosidad superficial aumenta linealmente con la intensidad de corriente; sin embargo, no se advierte una tendencia clara en función de la profundidad de penetración.

A partir de los resultados correspondientes a la pendiente de la curva de la tasa de material portante, también se pone de manifiesto el incremento de la pendiente de la curva en función de la intensidad de corriente, y de nuevo no es posible asegurar el efecto de la profundidad de penetración, que representa la longitud total recorrida por la herramienta durante el proceso de corte.

El estudio del tamaño de los cráteres que aparecen en la superficie mecanizada permite describir con mejor claridad la influencia de la intensidad de corriente sobre la calidad superficial de la pieza. Por otra parte, se aprecia un ligero incremento en el diámetro del cráter en función de la profundidad de penetración, si bien esta tendencia no es concluyente.

Se concluye que resulta aconsejable adoptar el diámetro del cráter como indicador para describir el efecto de la intensidad de corriente, y que no existe una clara relación entre el acabado de la superficie y la profundidad de penetración seleccionada.

A partir del análisis de la variación del tiempo de mecanizado durante los ensayos de electroerosión, se observa que la tasa de eliminación de material aumenta de manera exponencial en función de la intensidad de corriente. La expresión obtenida para la tasa de eliminación puede ser utilizada para determinar la productividad del proceso, una vez establecidas las condiciones de corte que permiten respetar los requisitos de acabado de superficial y vida de la herramienta.

El aumento de la intensidad de corriente favorece la tasa de eliminación de material al reducir el tiempo de mecanizado, si bien empeora el acabado superficial de la pieza mecanizada. Las expresiones deducidas pueden servir para hallar un punto de compromiso entre la optimización del tiempo de mecanizado y el acabado superficial.

5.1.2. Conclusiones sobre el desgaste de la herramienta de corte.

Con la finalidad de identificar el efecto de los parámetros del proceso sobre la degradación de la herramienta de corte, se ha procedido al estudio de la variación originada en la rugosidad de la superficie del electrodo, en la profundidad en el tramo inicial de la curva de tasa de material portante, y además se ha registrado el tamaño del surco que aparece en la superficie del electrodo y los cambios en la composición del material de la herramienta por la transferencia de material desde la pieza de trabajo.

Se observa un cierto incremento en la rugosidad superficial en función de la intensidad de corriente y la profundidad de penetración. La intensidad de corriente tiene una influencia más evidente sobre la profundidad para un 10% de tasa de material portante, si bien no se aprecia una relación clara entre este parámetro y la profundidad de penetración seleccionada para la realización del proceso de corte.

Para razonar el efecto de las condiciones de corte sobre la morfología de la superficie mecanizada, se evalúa la variación de la geometría de la herramienta, distinguiendo entre la degradación que tiene lugar en la zona límite que corresponde al extremo de la superficie mecanizada y la zona central de la superficie del electrodo.

En la zona límite del electrodo se pone de manifiesto la aparición de una importante depresión para intensidades de corriente superiores a los 10 A, dando lugar a un surco cuya profundidad

aumenta siguiendo una expresión potencial en función de este parámetro del proceso. En cambio, la posición central del surco se mantiene constante.

Para las condiciones de corte consideradas en los ensayos de electroerosión, se advierte una relación lineal entre la profundidad del surco y la profundidad de penetración.

Para comprender los fenómenos que se originan durante el arranque de material, se efectúa el microanálisis del material de la superficie del electrodo, con el propósito de identificar las variaciones originadas en la composición del material de la herramienta a causa de la adhesión de partículas provenientes de los desechos del material de la pieza.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el incremento de la intensidad de corriente supone el descenso de la cantidad de cobre y oxígeno en la superficie del electrodo, y el aumento de la proporción de hierro y cobre en la composición del material de la herramienta.

Es posible concluir que la profundidad del surco que se origina en la superficie del electrodo es un parámetro aconsejable para caracterizar la pérdida de material que se produce en el electrodo y, por tanto, la vida útil de la herramienta.

Las expresiones recogidas en esta tesis doctoral para describir la relación existente entre las condiciones de corte y la profundidad máxima del surco, pueden servir para limitar los valores de estos parámetros con el propósito de preservar la vida de la herramienta y minimizar el tiempo de corte.

5.1.3. Conclusiones sobre la modelización teórica del proceso de electroerosión.

En esta tesis doctoral se ha revisado las leyes que permiten representar la cantidad de energía aportada a la pieza durante las descargas eléctricas, y se ha propuesto un modelo simplificado que resulta adecuado para evaluar el desgaste progresivo del electrodo.

El modelo utilizado en este trabajo contempla la distribución de la energía calorífica suministrada por el canal de plasma y la transferencia de calor por conducción y convección durante el proceso, y las predicciones teóricas se contrastan con los resultados experimentales.

La simulación numérica del proceso, ha permitido determinar la distribución de temperaturas en la zona de corte, y la textura alcanzable de la superficie de la pieza final, y de este modo se

comprueba que resulta de especial utilidad para seleccionar los parámetros que permiten optimizar el acabado superficial de la pieza final.

5.1.4. Conclusiones sobre las aplicaciones del mecanizado por electroerosión en el sector naval.

Como se expuso en el primer capítulo de esta tesis doctoral, el sector naval se caracteriza por consistir en una industria de integración, en la cual no sólo se trata de fabricar o reparar el casco de los buques, como el principal elemento resistente que forma parte de los mismos, sino que además comprende la fabricación e implementación de multitud de equipos y componentes que son cruciales para el correcto funcionamiento de las embarcaciones.

Los procesos de electroerosión representan una tecnología de mecanizado que permite la fabricación de componentes constituidos por materiales de alta resistencia y con una elevada complejidad geométrica. Como consecuencia, pueden ser adecuados para diversos componentes de la industria de la construcción naval que reúnen estas características y, por tanto, resultan difíciles de fabricar mediante procesos de mecanizado convencional.

El mecanizado de piezas de alta dureza destinadas a sistemas de alto nivel de requisitos son las más idóneas para implementar las mejoras que ofrece la electroerosión frente a otros procesos convencional. Entre las piezas que podría ser aconsejable tratar de fabricar mediante electroerosión se encuentran los cojinetes de apoyo de los timones, componentes de las aperturas en cubierta, bridas para tuberías de alta presión, componentes del núcleo de las hélices y componentes de los equipos embarcados, entre otros diversos productos.

Se concibe el mecanizado por electroerosión como una técnica que presenta importantes ventajas para determinados componentes del sector naval, por lo que el estudio de su posible implementación en las cadenas productivas y la adecuación de las máquinas a las condiciones de los astilleros resulta de interés para las empresas de este sector.

5.2. Desarrollos futuros.

Para aumentar el alcance de los estudios comprendidos en esta tesis doctoral, se pretende continuar con el estudio experimental de otros diversos parámetros que intervienen en la formación de las descargas eléctricas, la calidad de la pieza y la vida de la herramienta, con el fin de averiguar la influencia que presentan frente a los distintos aspectos de estos procesos.

El estudio de nuevos parámetros eléctricos, composición del fluido dieléctrico, materiales de trabajo, materiales del electrodo u otros distintos factores, haría posible profundizar en la relación existente entre las propiedades finales y estos parámetros, así como las interacciones existentes entre estos últimos.

Con el propósito de mejorar la predicción de los resultados, se propone continuar con el desarrollo de un modelo numérico que incluya más variables del sistema, de manera que durante la simulación del proceso se pueda controlar el efecto de otros factores que también presentan una destacada importancia para los resultados alcanzables.

Por otra parte, sería conveniente proceder al planteamiento de algoritmos matemáticos que contemplen el desgaste del electrodo, y por tanto permitan el análisis de la pérdida de material en la herramienta de corte, y la contaminación que se produce en la superficie del electrodo a causa del material procedente de la pieza de trabajo. La obtención de un modelo adecuado para la degradación de la herramienta, ayudaría a disponer de un modelo más completo para el estudio del proceso de mecanizado por electroerosión.

Por último, convendría explorar la aplicación práctica de estas tecnologías a determinados componentes de especial importancia dentro de la industria de la construcción naval, con el fin de analizar en detalle los problemas relacionados con estas aplicaciones y tratar de proponer soluciones tecnológicas que propicien una mayor competitividad a este sector de la industria.

En este sentido, sería también de un enorme interés tratar de proponer el diseño de nuevas máquinas de electroerosión que permitan el mecanizado en condiciones adversas y a bordo de las embarcaciones, para operaciones de fabricación y reparación de piezas.

Sin duda, el desarrollo de todas estas propuestas de desarrollos futuros podría resultar beneficioso para la mejora de estas tecnologías de fabricación, y la introducción de determinados avances que contribuyan al incremento de la productividad en la construcción naval.

Anexo I: Descripción de la aplicación informática desarrollada para la simulación del proceso.

En el presente anexo se procede a describir la aplicación informática que ha sido desarrollada en la presente tesis doctoral para llevar a cabo la modelización y simulación numérica de los procesos de mecanizado mediante electroerosión por penetración, el cual se ha denominado “EDM Simulator”.

Este programa ha sido desarrollado en entorno Windows, utilizando el lenguaje de programación C#, el cual ha sido seleccionado debido a la facilidad que ofrecen las librerías que contiene.

En la Figura I.1 se expone la ventana de inicio de esta aplicación informática, en cuya parte superior se puede observar los cinco menús de que dispone este programa.



Figura I.1 Ventana de inicio del programa “EDM Simulator”

Los menús que han sido introducidos en esta aplicación informática son los siguientes:

- Datos del proceso: Para introducir los datos generales relacionados con el proceso de mecanizado mediante electroerosión.
- Propiedades del material: Este menú permite seleccionar el material a mecanizar, siempre que haya sido cargado previamente en el programa, o bien especificar los datos del material a considerar.
- Parámetros del mallado: Se trata de un menú reservado a la configuración de los parámetros relacionados con el mallado.
- Análisis de rugosidad: Menú que permite definir la longitud total a penetrar en la pieza y los instantes para los cuales se desea extraer parámetros de salida.
- Ayuda: En este menú se encuentra una ayuda del programa, para aprender a manejar los diferentes comandos que contiene esta aplicación informática.

Menú “Datos del proceso”.

La ventana que corresponde a este primer menú (Figura I.2), permite introducir los parámetros del proceso, los cuales pueden ser divididos en los dos tipos siguientes:

- Parámetros que corresponden a las condiciones de corte que se deben especificar, como son la intensidad de corriente, la tensión de descarga, el coeficiente de convección del fluido dieléctrico, el gap (o distancia de separación entre la herramienta y la pieza) y la temperatura ambiente. Se trata de los parámetros del proceso típicos que se deben configurar en las máquinas de electroerosión.
- Parámetros avanzados que afectan a la energía calorífica proporcionada por las descargas eléctricas, como son los coeficientes a y b relacionados con el aporte de calor desde el canal de plasma, y el límite inferior y superior de la proporción de calor transmitido al material de la pieza F_w . En principio se desaconseja modificar estos cuatro parámetros puesto que para ello se debe conocer detalladamente las expresiones matemáticas que forman parte de este modelo.

Datos del Proceso:		
Establece los datos del proceso de mecanizado por electroerosión.		
Intensidad	12	A
Voltaje	26	V
Coefficiente de Convección	683	W / m ² K
GAP	100	µm
Temperatura Ambiente	24	° C

Mostrar Opciones Avanzadas (Distribución de calor de la chispa)		
Coefficiente a	0,173	Cons
Coefficiente b	45	Cons
Fw0	16	%
Fw1	18,8	%

Figura I.2 Ventana del menú “Datos del Proceso”

Este menú solicita los parámetros que se deben introducir en la máquina de electroerosión, además de otros parámetros opcionales sobre el modelo numérico.

Menú “Propiedades del Material”.

Este menú sirve para definir las propiedades del material de trabajo. Como se aprecia en la Figura I.3, consta de un menú desplegable donde se puede seleccionar el material deseado entre los existentes en la biblioteca, que ha de ser previamente cargada en este programa o bien permite definir manualmente las propiedades del material a mecanizar.

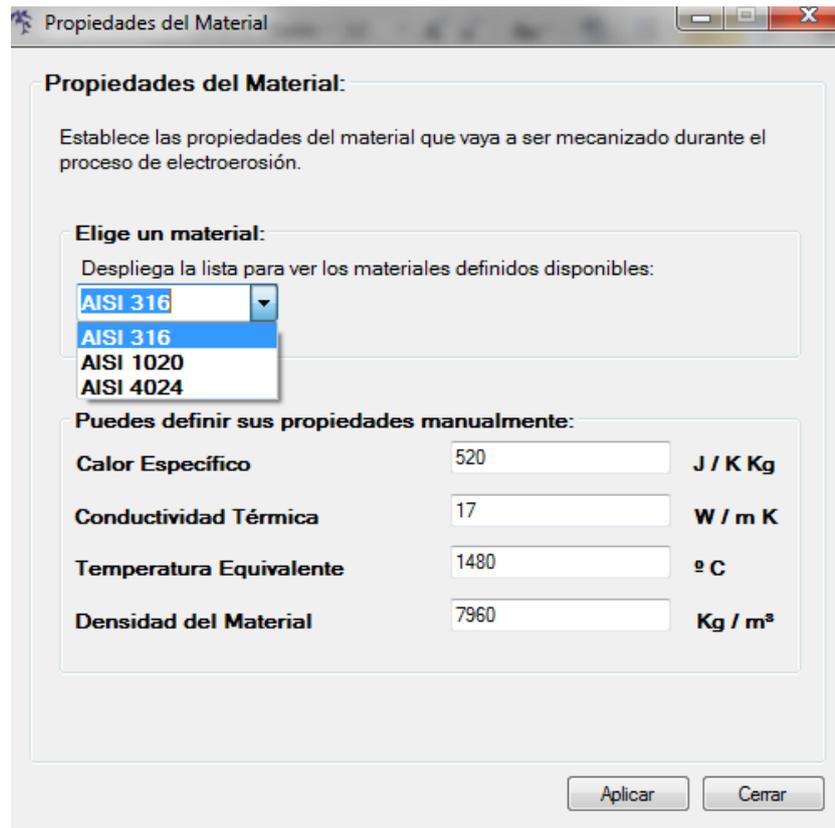


Figura I.3 Ventana del menú “Propiedades del Material”

La opción de modificar las propiedades del material, permite que este programa se pueda emplear con cualquier material de trabajo, para lo cual simplemente se debe definir las cuatro propiedades físicas que aparecen en la ventana:

- Calor específico (J / K Kg)
- Conductividad térmica (W / m K)
- Temperatura equivalente (°C)
- Densidad del material (Kg / m³)

Con la única excepción de la temperatura equivalente, se trata de propiedades básicas del material y por tanto pueden encontrarse en cualquier biblioteca especializada.

Acerca de la temperatura equivalente, se trata de un parámetro ficticio del material y por tanto se debe aproximar a partir de mediciones experimentales.

Menú “Parámetros del Mallado”.

En el menú contextual de “Parámetros del Mallado” se incluye dos tipos de parámetros, como son las dimensiones del mallado y las dimensiones de la zona a mecanizar en la pieza de trabajo (Figura I.4).

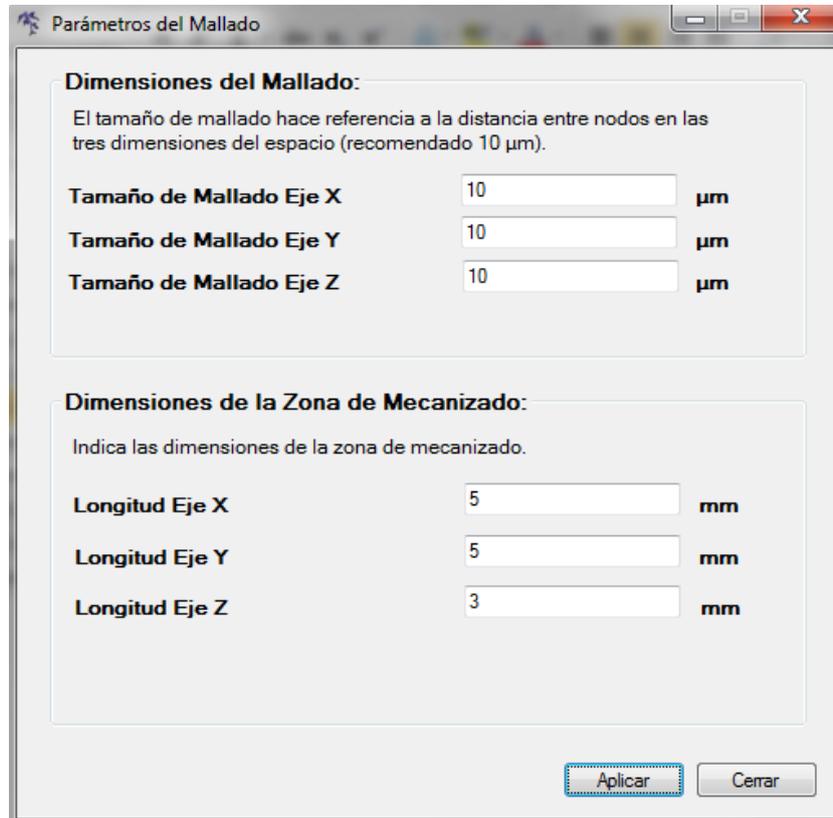


Figura I.4 Ventana del menú “Parámetros del Mallado”

Los primeros campos de esta ventana, permiten definir el tamaño de malla Δs que se desea considerar, que consiste en la distancia entre nodos contiguos en el modelo de diferencias finitas. Se recomienda un valor de 10 μm para obtener resultados con una suficiente definición para su comparación con resultados experimentales y al mismo tiempo evitar un coste de computación excesivo.

En el caso de necesitar efectuar un cálculo aproximado inicial para el cual se requiera un menor tiempo de computación, se pueden utilizar un tamaño de malla entre 20 y 50 μm . Por otra parte, se puede reducir este parámetro hasta valores comprendidos entre 2 y 5 μm para una simulación numérica con mayor grado de detalle, si bien esto supone un gran aumento en el tiempo de cálculo resultando excesivo para volúmenes de mecanizado superiores a 4 mm^3 .

Por otra parte, no se recomienda valores inferiores a 2 μm , debido a la necesidad de disminuir el paso de tiempo Δt en función del tamaño de malla Δs , lo cual implicaría excesivos tiempos

de cálculo. No obstante, en general es suficiente con un tamaño de malla de 10 μm , y por tanto no es necesario afinar más el mallado.

La parte inferior del menú de “Parámetros del Mallado” permite definir el tamaño de la zona que se desea mecanizar en la pieza de trabajo. Actualmente el programa solicita valores de longitud en los tres ejes, y por tanto sólo permite contemplar piezas prismáticas. En futuras versiones del programa se prevé incluir también otras posibles geometrías de simulación, permitiendo al usuario seleccionar la más apropiada e incluso editarla a su conveniencia.

Menú “Análisis de rugosidad”.

El cuarto menú del programa contiene la función de ejecutar la simulación del proceso de mecanizado por EDM, y como resultado proporcionará el perfil de la superficie calculado por el modelo numérico (Figura I.5).

Antes de ejecutar la simulación, se solicita al usuario definir la profundidad de penetración. Este valor puede parecer redundante respecto de la longitud en el eje z del menú anterior, pero no es así ya que el anterior parámetro define la longitud hasta la cual se va a dimensionar la matriz tridimensional de temperaturas, mientras que el parámetro de este menú se refiere a la profundidad hasta la cual penetrará la herramienta, es decir, la profundidad a la cual se detendrá el proceso de electroerosión.

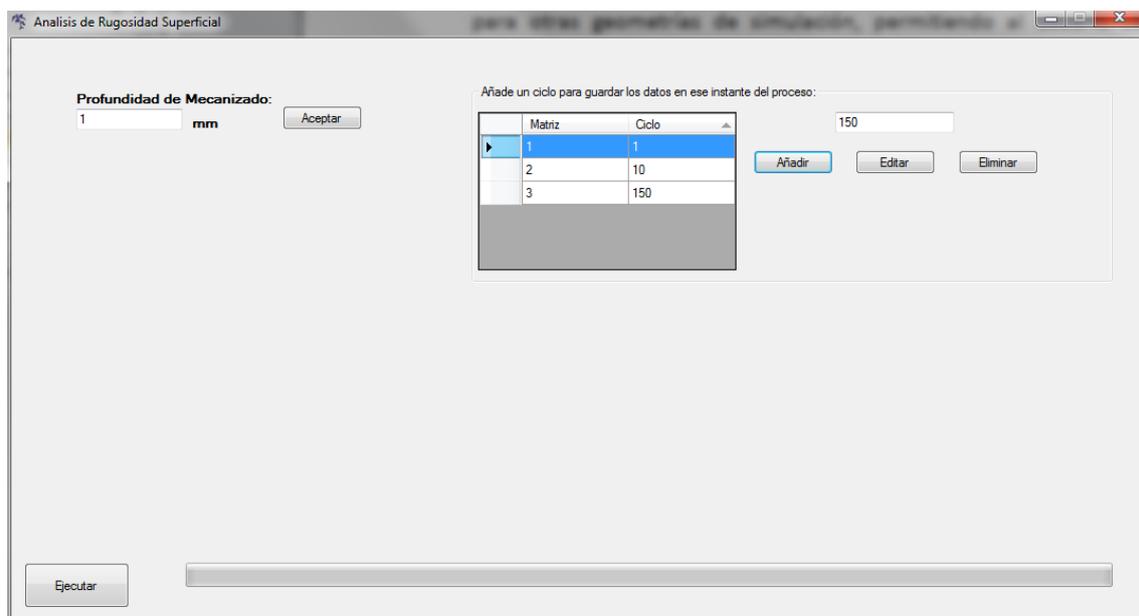


Figura I.5 Ventana del menú “Análisis de rugosidad”

Al tratarse de un proceso de mecanizado por penetración, el parámetro de profundidad de penetración es de especial relevancia. En cambio, la longitud en los ejes x e y únicamente se define en el menú de “Parámetros del Mallado”. Se puede establecer únicamente en el menú de mallado y afectará al dimensionado de la matriz de temperatura.

En la parte superior derecha de este menú, se pueden definir instantes intermedios en los que se guardará los datos relativos a la matriz de temperaturas y perfil de la superficie, pudiendo indicarse tantos como el usuario crea conveniente.

Una vez introducidos todos los datos, se pulsará el botón “Ejecutar” y la simulación del proceso comenzará. Cuando finaliza la simulación, se generará un archivo de MS Excel con diferentes pestañas en el cual se recogen los datos resultantes correspondientes a la matriz de temperatura y al perfil de la superficie, tanto en el instante final del proceso como en los instantes intermedios que hayan sido especificados.

Menú “Ayuda”.

La finalidad de este menú es permitir acceder al manual de usuario del programa, en el cual se puede encontrar toda la información necesaria para comprender el funcionamiento del programa (Figura I.6).

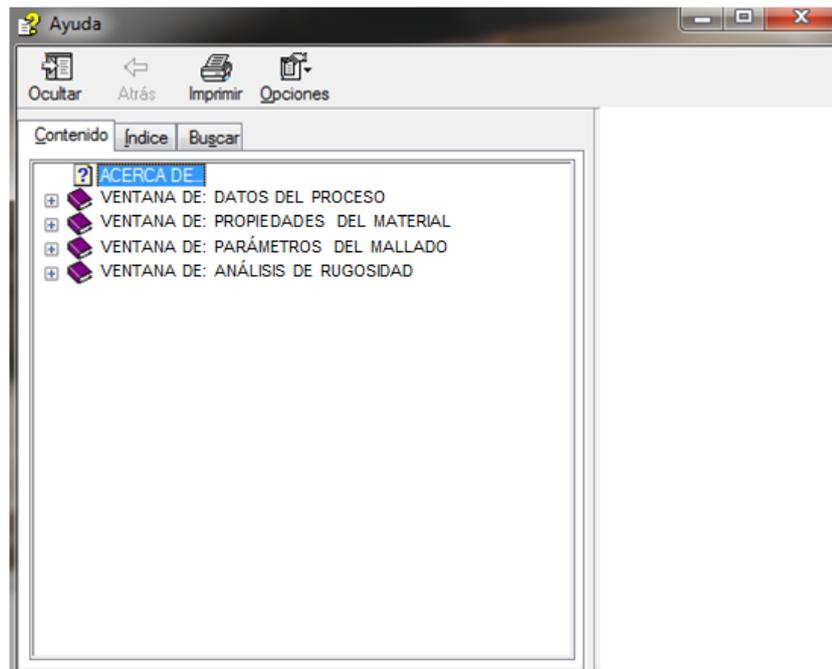


Figura I.6 Ventana del menú “Ayuda”

Bibliografía

- [1] A. Camprubi Graell, "Electro-discharge machining, fundamentals of his physics and technique", Marcombo, 2008, ISBN: 9788426714602.
- [2] ONA, "Teoría y práctica de la electroerosión", 1998,
- [3] K.H. Ho, S.T. Newman, "State of the art electrical discharge machining (EDM)", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, (2003), pp. 1287-1300. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00162-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00162-7).
- [4] Uddeholm, "Steel tool manufacturing by electrical discharge machining", Uddeholm, 2010.
- [5] S.L. Chen, M.H. Lin, S.F. Hsieh, S.Y. Chiou, "The characteristics of cutting pipe mechanism with multi-electrodes in EDM", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, (2008), pp. 461-464. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.059>.
- [6] H. Singh, "Experimental study of distribution of energy during EDM process for utilization in thermal models", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, (2012), pp. 5053-5064. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.004>.
- [7] M.H. Joudivand Sarand, M.R. Shabgard, "Investigation of the effect of thermal diffusivity coefficient of tool material on electrode-tool wear in the EDM process", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 15, (2015), pp. 806-821. doi: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2015.06.009>.
- [8] Y. Zhang, Y. Liu, Y. Shen, Z. Li, R. Ji, B. Cai, "A novel method of determining energy distribution and plasma diameter of EDM", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 75, (2014), pp. 425-432. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.082>.
- [9] M. Zhang, Q. Zhang, H. Wang, G. Liu, T. Guo, "Research on a single pulse discharge to discriminate EDM and EAM based on the plasma tunnel and crater geometry", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 219, (2015), pp. 248-256. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.12.016>.
- [10] M. Kiyak, B.E. Aldemir, E. Altan, "Effects of discharge energy density on wear rate and surface roughness in EDM", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 79, (2015), pp. 513-518. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-015-6840-9>.

- [11] T. Kitamura, M. Kunieda, "Clarification of EDM gap phenomena using transparent electrodes", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 63, (2014), pp. 213-216. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.059>.
- [12] T. Kitamura, M. Kunieda, K. Abe, "Observation of relationship between bubbles and discharge locations in EDM using transparent electrodes", *Precision Engineering*, Vol. 40, (2015), pp. 26-32. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.09.009>.
- [13] Z. Li, J. Bai, "Impulse discharge method to investigate the influence of gap width on discharge characteristics in micro-EDM", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 90, (2017), pp. 1769-1777. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9508-1>.
- [14] Q.Y. Ming, L.Y. He, "Powder-suspension dielectric fluid for EDM", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 52, (1995), pp. 44-54. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01442-4](http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136(94)01442-4).
- [15] Y.S. Wong, L.C. Lim, I. Rahuman, W.M. Tee, "Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 79, (1998), pp. 30-40. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00450-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00450-0).
- [16] X. Wang, Z. Liu, R. Xue, Z. Tian, Y. Huang, "Research on the influence of dielectric characteristics on the EDM of titanium alloy", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 72, (2014), pp. 979-987. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-5716-8>.
- [17] Y. Zhang, Y. Liu, Y. Shen, R. Ji, Z. Li, C. Zheng, "Investigation on the influence of the dielectrics on the material removal characteristics of EDM", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, (2014), pp. 1052-1061. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.12.012>.
- [18] A.K. Singh, S. Kumar, V.P. Singh, "Effect of the addition of conductive powder in dielectric on the surface properties of superalloy Super Co 605 by EDM process", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 77, (2015), pp. 99-106. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6433-z>.
- [19] M. Hourmand, S. Farahany, A.D. Sarhan, M. Noordin, "Investigating the electrical discharge machining (EDM) parameter effects on Al-Mg₂Si metal matrix composite (MMC) for high material removal rate (MRR) and less EWR-RSM approach", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 77, (2015), pp. 831-838. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6491-2>.
- [20] S. Kumar, R. Singh, T.P. Singh, B.L. Sethi, "Surface modification by electrical discharge machining: A review", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, (2009), pp. 3675-3687. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.09.032>.
- [21] L. Li, X.T. Wei, Z.Y. Li, "Surface integrity evolution and machining efficiency analysis of W-EDM of nickel-based alloy", *Applied Surface Science*, Vol. 313, (2014), pp. 138-143. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.165>.
- [22] L. Zhang, J. Du, X. Zhuang, Z. Wang, J. Pei, "Geometric prediction of conic tool in micro-EDM milling with fix-length compensation using simulation", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 89, (2015), pp. 86-94. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.11.007>.

-
- [23] T. Muthuramalingam, B. Mohan, "A review on influence of electrical process parameters in EDM process", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 15, (2015), pp. 87-94. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2014.02.009>.
- [24] A. Thakur, S. Gangopadhyay, "State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 100, (2016), pp. 25-54. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.10.001>.
- [25] S. Plaza, J.A. Sanchez, E. Perez, R. Gil, B. Izquierdo, N. Ortega, I. Pombo, "Experimental study on micro EDM-drilling of Ti6Al4V using helical electrode", *Precision Engineering*, Vol. 38, (2014), pp. 821-827. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.04.010>.
- [26] S. Dong, Z. Wang, Y. Wang, "Research on micro-EDM with an auxiliary electrode to suppress stray-current corrosion on C17200 beryllium copper alloy in deionized water", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol., (2017), pp. 1-11. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-0478-8>.
- [27] H.C. Tsai, B.H. Yan, F.Y. Huang, "EDM performance of Cr/Cu-based composite electrodes", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, (2003), pp. 245-252. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00238-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00238-9).
- [28] A. Torres, C.J. Luis, I. Puertas, "EDM machinability and surface roughness analysis of TiB2 using copper electrodes", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 690, (2017), pp. 337-347. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.110>.
- [29] S. Kumar, H.K. Dave, K.P. Desai, "Experimental investigation on performance of different tool movement strategies in EDM process for boring operation", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 87, (2016), pp. 1609-1620. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-016-8443-5>.
- [30] G. D'Urso, C. Merla, "Workpiece and electrode influence on micro-EDM drilling performance", *Precision Engineering*, Vol. 38, (2014), pp. 903-914. doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.05.007>.
- [31] B. Ekmekci, A. Sayar, "Debris and consequences in micro electric discharge machining of micro-holes", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 65, (2013), pp. 58-67. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.10.003>.
- [32] Q. Yin, B. Wang, Y. Zhang, F. Ji, G. Liu, "Research of lower tool electrode wear in simultaneous EDM and ECM", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, (2014), pp. 1759-1768. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.03.025>.
- [33] E. Uhlmann, D.C. Domingos, "Automated Dressing of Graphite Electrodes for Electrical Discharge Machining (EDM) of Seal Slots in Turbine Components", *Procedia Manufacturing*, Vol. 6, (2016), pp. 45-52. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2016.11.007>.
- [34] M.A. Habib, M. Rahman, "Performance of electrodes fabricated by localized electrochemical deposition (LECD) in micro-EDM operation on different workpiece materials", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 24, Part 1, (2016), pp. 78-89. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.08.003>.
-

- [35] R.V. Barenji, H.H. Pourasl, V.M. Khojastehnezhad, "Electrical discharge machining of the AISI D6 tool steel: Prediction and modeling of the material removal rate and tool wear ratio", *Precision Engineering*, Vol. 45, (2016), pp. 435-444. doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.01.012>.
- [36] C.K. Nirala, P. Saha, "Precise μ EDM-drilling using real-time indirect tool wear compensation", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 240, (2017), pp. 176-189. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.09.024>.
- [37] D.D. DiBitonto, P.T. Eubank, M.R. Patel, M.A. Barrufet, "Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model", *Journal of Applied Physics*, Vol. 66, (1989), pp. 4095-4103. doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.343994>.
- [38] M.R. Patel, M.A. Barrufet, P.T. Eubank, D.D. DiBitonto, "Theoretical models of the electrical discharge machining process. II. The anode erosion model", *Journal of Applied Physics*, Vol. 66, (1989), pp. 4104-4111. doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.343995>.
- [39] J.A. McGeough, H. Rasmussen, "A theoretical model of electrodischarge texturing", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 68, (1997), pp. 172-178. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)00024-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(96)00024-6).
- [40] M.T. Shervani-Tabar, A. Abdullah, M.R. Shabgard, "Numerical study on the dynamics of an electrical discharge generated bubble in EDM", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 30, (2006), pp. 503-514. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enganabound.2006.01.014>.
- [41] M. Shabgard, R. Ahmadi, M. Seyedzavvar, S.N.B. Oliaei, "Mathematical and numerical modeling of the effect of input-parameters on the flushing efficiency of plasma channel in EDM process", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 65, (2013), pp. 79-87. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.10.004>.
- [42] K.P. Somashekhar, S. Panda, J. Mathew, N. Ramachandran, "Numerical simulation of micro-EDM model with multi-spark", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 76, (2015), pp. 83-90. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-013-5319-9>.
- [43] U. Aich, S. Banerjee, "Modeling of EDM responses by support vector machine regression with parameters selected by particle swarm optimization", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 38, (2014), pp. 2800-2818. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2013.10.073>.
- [44] S. Das, M. Klotz, F. Klocke, "EDM simulation: finite element-based calculation of deformation, microstructure and residual stresses", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, (2003), pp. 434-451. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00624-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00624-1).
- [45] S. Hinduja, M. Kunieda, "Modelling of ECM and EDM processes", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 62, (2013), pp. 775-797. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.011>.
- [46] J. Pei, L. Zhang, J. Du, X. Zhuang, Z. Zhou, S. Wu, Y. Zhu, "A model of tool wear in electrical discharge machining process based on electromagnetic theory", *International Journal of*

- Machine Tools and Manufacture*, Vol. 117, (2017), pp. 31-41. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.03.001>.
- [47] G. Puthumana, G. Bissacco, H.N. Hansen, "Modeling of the effect of tool wear per discharge estimation error on the depth of machined cavities in micro-EDM milling", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 92, (2017), pp. 3253-3264. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-0371-5>.
- [48] C.-S. Lee, E.-Y. Heo, J.-M. Kim, I.-H. Choi, D.-W. Kim, "Electrode wear estimation model for EDM drilling", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 36, (2015), pp. 70-75. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.02.001>.
- [49] M. Kunieda, B. Lauwers, K.P. Rajurkar, B.M. Schumacher, "Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 54, (2005), pp. 64-87. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60020-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60020-1).
- [50] M. Hourmand, A.A.D. Sarhan, M. Sayuti, "Micro-electrode fabrication processes for micro-EDM drilling and milling: a state-of-the-art review", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 91, (2017), pp. 1023-1056. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9671-4>.
- [51] S. Zinelis, "Surface and elemental alterations of dental alloys induced by electro discharge machining (EDM)", *Dental Materials*, Vol. 23, (2007), pp. 601-607. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dental.2006.03.021>.
- [52] A. Ntasi, W.D. Mueller, G. Eliades, S. Zinelis, "The effect of Electro Discharge Machining (EDM) on the corrosion resistance of dental alloys", *Dental Materials*, Vol. 26, (2010), pp. e237-e245. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dental.2010.08.001>.
- [53] C.S. Trueman, J. Huddleston, "Material removal by spalling during EDM of ceramics", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 20, (2000), pp. 1629-1635. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0955-2219\(00\)00027-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0955-2219(00)00027-3).
- [54] Y. Shen, Y. Liu, Y. Zhang, H. Dong, W. Sun, X. Wang, C. Zheng, R. Ji, "High-speed dry electrical discharge machining", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 93, (2015), pp. 19-25. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.03.004>.
- [55] N. Mohd Abbas, D.G. Solomon, M. Fuad Bahari, "A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, (2007), pp. 1214-1228. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.08.026>.
- [56] Q.H. Zhang, R. Du, J.H. Zhang, Q.B. Zhang, "An investigation of ultrasonic-assisted electrical discharge machining in gas", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, (2006), pp. 1582-1588. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.09.023>.
- [57] V. Kumar S., P. Kumar M., "Experimental investigation of the process parameters in cryogenic cooled electrode in EDM", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, (2015), pp. 3865-3871. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-015-0832-4>.

- [58] P. Steuer, O. Weber, D. Bähre, "Structuring of wear-affected copper electrodes for electrical discharge machining using Pulse Electrochemical Machining", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 52, (2015), pp. 85-89. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2015.05.003>.
- [59] Y.J. Lu, J. Xie, X.H. Si, "Study on micro-topographical removals of diamond grain and metal bond in dry electro-contact discharge dressing of coarse diamond grinding wheel", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 88, (2015), pp. 118-130. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.09.008>.
- [60] Y.-C. Lin, J.-C. Hung, H.-M. Chow, A.C. Wang, J.-T. Chen, "Machining Characteristics of a Hybrid Process of EDM in Gas Combined with Ultrasonic Vibration and AJM", *Procedia CIRP*, Vol. 42, (2016), pp. 167-172. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.213>.
- [61] D.J. Eyres, G.J. Bruce, "Ship Construction", Butterworth-Heinemann, 2012, ISBN: 978-0-08097-239-8.
- [62] MAN, "Controllable pitch propeller", 2017.
- [63] ONA, "ONA Tecnología DATIC-F (V/5.1.2)", in, ONA, 1999, pp. 1-42.
- [64] K.D. Lawrence, R. Shanmugamani, B. Ramamoorthy, "Evaluation of image based Abbott–Firestone curve parameters using machine vision for the characterization of cylinder liner surface topography", *Measurement*, Vol. 55, (2014), pp. 318-334. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.05.005>.
- [65] B. Izquierdo, J.A. Sánchez, S. Plaza, I. Pombo, N. Ortega, "A numerical model of the EDM process considering the effect of multiple discharges", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, (2009), pp. 220-229. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.11.003>.

Biografía del autor

Carlos Mascaraque Ramírez nació en Cuenca en mayo de 1983. Cursó la titulación de Ingeniería Técnica Naval en la especialidad de Propulsión y Servicios del Buque en la Universidad de Cádiz, y continuó sus estudios con el segundo ciclo de Ingeniería Naval y Oceánica en la Universidad Politécnica de Cartagena. Realizó su Proyecto Final de Carrera en el Departamento de Tecnología Naval de Universidad Politécnica de Cartagena, que consistió en el desarrollo del anteproyecto para un buque del tipo Patrullero Oceánico.

En mayo de 2008 comenzó su carrera profesional como ingeniero en el sector naval, participando en el proyecto de construcción de submarinos de la clase Scorpene para la Armada India y desde entonces continúa trabajando dentro de este sector, actualmente dentro del proyecto de construcción de submarinos de la clase S-80 para la Armada Española.

En 2010 comenzó los estudios de Doctorado, dentro de los cuales realizó su trabajo fin de período formativo de doctorado y posteriormente la presente tesis doctoral en el Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación bajo la dirección del Dr. Patricio Franco Chumillas.

En octubre de 2014 inició su carrera docente como profesor a tiempo parcial en la Universidad Politécnica de Cartagena, durante los dos primeros cursos académicos como miembro del Área de Ingeniería de Fabricación y posteriormente en el Área de Construcciones Navales, donde actualmente desarrolla su actividad docente.

Pertenece al grupo de investigación de Construcción Naval, donde se dedica a investigar en los campos de procesos de fabricación naval, ingeniería de sistemas y gestión de proyectos navales.

Es autor de diversos trabajos científicos, siendo algunos de ellos fruto de la presente tesis doctoral. Entre los trabajos publicados cabe mencionar los que se recogen a continuación:

Artículos científicos en revistas del JCR (Journal Citation Reports):

- C. Mascaraque Ramírez, P. Franco Chumillas, “Experimental study of tool degradation in EDM processes: electrode material loss at the border and central zones”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, pp. 1 - 23. doi: 10.1007/s00170-017-1469-5.
- C. Mascaraque Ramírez, L. Para González, D. Moreno Sánchez, “Improvement of the construction project of tuna purse seine vessels through a cost and term analysis”, *Ships and Offshore Structures*, Vol. 13(1), 2018, pp. 20 - 27. doi: 10.1080/17445302.2017.1335576.

Capítulos de libro:

- C. Mascaraque Ramírez, P. Franco Chumillas, “Numerical modelling of sinker EDM processes”, *Advanced Machining Processes Innovative Modeling Techniques*. Taylor & Francis, 2017, pp. 81 – 106. ISBN: 978-1138033627.
- C. Mascaraque Ramírez, L. Para González, D. Moreno Sánchez, “Study on optimization of the tuna-fishing vessel construction project, through production oriented design”, *Project Management and Engineering Research*, Springer, 2017, pp. 1 - 13.

Comunicaciones a congresos:

- C. Mascaraque Ramírez, P. Franco Chumillas, “Experimental study of surface finish during electro-discharge machining of stainless steel”, *The Manufacturing Engineering Society International Conference MESIC 2015*, Barcelona, Spain, 22-24 July, 2015.
- C. Mascaraque Ramírez, P. Franco Chumillas, “Numerical modelling of surface quality in EDM processes”, *The Manufacturing Engineering Society International Conference MESIC 2015*, Barcelona, Spain, 22-24 July, 2015.
- C. Mascaraque Ramírez, P. Franco Chumillas, “Incremento de la productividad en técnicas avanzadas de fabricación mediante mecanizado por electroerosión”, *I*

Jornadas Doctorales en Ciencias Económicas y Empresariales, Granada, Spain, 17 June, 2013.

- C. Mascaraque Ramírez, L. Para González, “Creation of an academic team focused on the design, construction and project management of a competition powerboat”, *XXI International Congress on Project Management and Engineering - CIDIP 2017*, Cádiz, Spain, 12-14 July, 2017.
- C. Mascaraque Ramírez, L. Para González, A. E. Madrid García, “Estimation of the management margin of a ferry vessel construction project through the Montecarlo method”, *XXI International Congress on Project Management and Engineering - CIDIP 2017*, Cádiz, Spain, 12-14 July, 2017.
- C. Mascaraque Ramírez, L. Para González, P. Marco Jornet, “Production-oriented design and its application in the construction project of a ferry vessel”, *XXI International Congress on Project Management and Engineering - CIDIP 2017*, Cádiz, Spain, 12-14 July, 2017.
- C. Mascaraque Ramírez, L. Para González, A. E. Madrid García, “Herramientas para la mejora de la Gestión de Proyectos: Estudio de la construcción de un buque tipo Patrullero Oceánico”, *IV Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad: DESEi+d 2016*, Santiago de la Ribera, Spain, 16-18 November, 2016.
- C. Mascaraque Ramírez, L. Para González, D. Moreno Sánchez, “Cost and term analysis in decisions-taking for the optimization of tuna vessels projects construction”, *XX International Congress on Project Management and Engineering - CIDIP 2016*, Cartagena, Spain, 13-15 July, 2016.
- C. Mascaraque Ramírez, L. Para González, D. Moreno Sánchez, “Optimization study of a construction project of a tuna vessel through a production-oriented design”, *XX International Congress on Project Management and Engineering - CIDIP 2016*, Cartagena, Spain, 13-15 July, 2016.

Artículos sobre innovación educativa:

- C. Mascaraque Ramírez, L. Para González, “Aprendizaje vinculado a experiencias reales en el ámbito universitario: desarrollo de todas las fases del proyecto de una lancha de competición”, *Atlante. Cuadernos de Educación y Desarrollo*, Vol. 12, 2017.

- L. Para González, C. Mascaraque Ramírez, “Propuestas de mejora para la didáctica de las matemáticas en otros campos dentro del ámbito universitario”, *Revista Internacional de Investigación e Innovación en Didáctica de las Humanidades y las Ciencias*, Vol. 3, 2016, pp. 33 - 40.

Capítulos de libro sobre innovación educativa:

- C. Mascaraque Ramírez, L. Para González, “Propuestas de mejora de la asimilación de los conceptos matemáticos en asignaturas no afines al área por medio de material de apoyo”, *Evaluación e identidad del alumnado en Educación Superior*, Universidad de Murcia, 2016, pp. 385 - 390. ISBN: 978-84-608-8697-6.
- A. J. Briones Peñalver, S. Busquier Sáez, R. Carcelén González, R. Escudero de la Cañina, J. M. López Martínez, J. F. Maciá Sánchez, L. Martínez Caro, C. Mascaraque Ramírez, A. Mendoza Arracó, P. Periago Bayonas, J. V. Rodríguez Rodríguez, “Elaboración de mapas relacionales de títulos de la UPCT”, *Equipos docentes: nuevos escenarios (2015-2016)*, Universidad Politécnica de Cartagena, 2016, pp. 37 - 77. ISBN: 978-84-16325-27-6.

Congresos sobre innovación educativa:

- C. Mascaraque Ramírez, “Co-op co-op o cómo impulsar el trabajo en equipo y la innovación en el aprendizaje: aplicación en estudiantes de Ingeniería”, *I Congreso Internacional Virtual en Investigación e Innovación Educativa - CIVINEDU 2017*, on-line, 4 de octubre de 2017.
- A. J. Briones Peñalver, S. Busquier Sáez, R. Carcelén González, R. Escudero de la Cañina, J. M. López Martínez, J. F. Maciá Sánchez, L. Martínez Caro, C. Mascaraque Ramírez, A. Mendoza Arracó, P. Periago Bayonas, J. V. Rodríguez Rodríguez, “Elaboración de mapas relacionales como herramienta para la coordinación vertical de una titulación”, *XIII Foro internacional sobre evaluación de la Calidad de la Investigación y de la Educación Superior*, Granada, España, 1 de julio de 2016.
- C. Mascaraque Ramírez, L. Para González, “Propuestas de mejora de la asimilación de los conceptos matemáticos en asignaturas no afines al área por medio de material de apoyo”, *IX Congreso Iberoamericano de Docencia Universitaria - CIDU 2016*, Murcia, España, 1 de abril de 2016.

- C. Mascaraque Ramírez, L. Para González, “¿Cómo mejorar la interrelación de la docencia entre las matemáticas y las asignaturas de otras áreas? Un enfoque a los grados en ingeniería”, *IV Congreso Internacional Multidisciplinar de Investigación Educativa – CIMIE 2015*, Valencia, España, 3 de julio de 2015.

Premios y reconocimientos:

- Profesor de Referencia en el Marco del Espacio Europeo de Educación Superior en el curso 2016-2017, concedido por la Universidad Politécnica de Cartagena.
- Premio Jaume Blasco a la Innovación 2016, concedido por la Asociación Española de la Dirección e Ingeniería de Proyectos (AEIPRO) en el XX International Congress on Project Management and Engineering - CIDIP 2016.



Escuela
Internacional
de Doctorado