



**Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales
Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación
Universidad Pública de Navarra**

Tesis Doctoral:

**Análisis y modelización de los parámetros de
influencia en la electroerosión por penetración
de materiales de baja mecanizabilidad**

Doctoranda:

Alexia Torres Salcedo

Directores:

**Dr. Ignacio Puertas Arbizu
Dr. Carmelo Javier Luis Pérez**

Pamplona, abril de 2016

A Eduardo, por su apoyo, generosidad y paciencia.

Agradecimientos

Es difícil entender la importancia de los agradecimientos de una Tesis Doctoral hasta que no se ha terminado. Es, en ese momento, cuando te das cuenta de cuánto tienes que agradecer a tanta gente. Algunas de esas personas ya formaban parte de mi vida y, otras, me siento afortunada de haberlas conocido a lo largo de estos tres años.

De manera muy especial, me gustaría agradecer al Dr. Carmelo Luis Pérez y al Dr. Ignacio Puertas Arbizu, directores de la presente Tesis Doctoral, su dedicación, sus conocimientos, sus sabios consejos y su infinita paciencia. Ha sido un privilegio poder aprender de ellos.

También me gustaría dar las gracias a todos los miembros del grupo de Investigación de Ingeniería de Materiales y Fabricación de la Universidad Pública de Navarra que me acogieron desde el primer día y, cuyo apoyo, ha hecho que este proyecto haya sido más fácil. Gracias a: Carmelo, Iñaki, Dani, JuanPa, Javier y Rodrigo. Gracias por aguantarme y escucharme. Asimismo, gracias a Santos, con quien he compartido tantas horas en el taller, por su ayuda y compañía.

No puedo olvidar a mi familia: a mi madre, a mis hermanas y a mi querida tía Elena que siempre han estado ahí y que siempre han tenido palabras de ánimo. No puedo tener más suerte de tener la familia que tengo.

Y finalmente, gracias a Eduardo, la persona que me animó a emprender este proyecto y que no dudó que pudiera sacarlo adelante. Gracias por enseñarme que todo trabajo requiere un esfuerzo, y que todo esfuerzo, al final, tiene su recompensa. Gracias.

Resumen	v
Lista de símbolos	vii
Lista de figuras	ix
Lista de tablas.....	xv
1. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS	3
2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.....	9
2.1. El proceso de electroerosión por penetración (EDM)	9
2.1.1. Fundamentos del proceso.....	10
2.1.2. Equipos empleados	10
2.1.3. Aplicaciones industriales	12
2.1.4. Variantes del proceso.....	15
2.1.5. Alternativas de mecanizado	18
2.2. Materiales de difícil mecanizabilidad.....	20
2.3. Factores de influencia en el mecanizado por EDM	24
2.3.1. Influencia de la polaridad en la EDM	24
2.3.2. Influencia del dieléctrico.....	26
2.3.3. Influencia de los electrodos.....	28
2.3.4. Influencia de los parámetros eléctricos en las variables de respuesta.....	32
2.3.5. Características de las superficies electroerosionadas	36
2.4. Tendencias futuras	37
2.5. Recapitulación	38
3. PLANIFICACIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN	43
3.1. Diseño de la experimentación	43
3.2. Equipos empleados.....	46
3.3. Materiales	52
3.4. Electrodos.....	57
4. ANÁLISIS DEL MECANIZADO POR EDM DEL INCONEL® 600.....	63
4.1. Mecanizado con electrodo de cobre	64
4.1.1. Análisis y discusión de resultados para la tasa de eliminación de material	66
4.1.2. Análisis y discusión de resultados para el desgaste volumétrico del electrodo	71
4.1.3. Análisis y discusión de resultados para los parámetros de rugosidad superficial	75
4.1.3.1. Análisis de los parámetros de amplitud	75
4.1.3.2. Análisis de los parámetros de espaciamento.....	85
4.1.4. Análisis mediante microscopía electrónica de barrido.....	92
4.2. Mecanizado con electrodo de grafito	98
4.2.1. Análisis y discusión de resultados para la tasa de eliminación de material	101
4.2.2. Análisis y discusión de resultados para el desgaste del electrodo.....	105

4.2.3. Análisis y discusión de resultados para los parámetros de rugosidad superficial ..	109
4.2.3.1. Análisis de los parámetros de amplitud	110
4.2.3.2. Análisis de los parámetros de espaciamento.....	117
4.2.4. Análisis mediante microscopía electrónica de barrido	123
4.3. Mecanizado con electrodo de cobre-grafito	129
4.3.1. Análisis y discusión de resultados para la tasa de eliminación de material	132
4.3.2. Análisis y discusión de resultados para el desgaste del electrodo	136
4.3.3. Análisis y discusión de resultados para los parámetros de rugosidad superficial ..	140
4.3.3.1. Análisis de los parámetros de amplitud	140
4.3.3.2. Análisis de los parámetros de espaciamento.....	148
4.3.4. Análisis mediante microscopía electrónica de barrido	154
4.4. Recapitulación	159
5. ANÁLISIS DEL MECANIZADO POR EDM DEL DIBORURO DE TITANIO (TiB₂)	167
5.1. Análisis y discusión de resultados para la tasa de eliminación de material.....	169
5.2. Análisis y discusión de resultados para el desgaste volumétrico del electrodo	172
5.3. Análisis y discusión de resultados para los parámetros de rugosidad superficial	175
5.3.1. Análisis de los parámetros de amplitud	175
5.3.2. Análisis de los parámetros de espaciamento.....	180
5.4. Análisis mediante microscopía electrónica de barrido	183
5.5. Recapitulación	186
6. ANÁLISIS DEL MECANIZADO POR EDM DEL CARBURO DE SILICIO (SiSiC)	191
6.1. Análisis y discusión de resultados para la tasa de eliminación de material.....	194
6.2. Análisis y discusión de resultados para el desgaste volumétrico del electrodo	197
6.3. Análisis y discusión de resultados para los parámetros de rugosidad superficial	199
6.3.1. Análisis de los parámetros de amplitud	199
6.3.2. Análisis de los parámetros de espaciamento.....	204
6.4. Análisis mediante microscopía electrónica de barrido	208
6.5. Recapitulación	211
7. MODELIZACIÓN DEL PROCESO	215
7.1. Modelización y análisis de la densidad de energía.....	215
7.1.1. Desarrollo de la modelización	215
7.1.2. Análisis y discusión de resultados	218
7.1.3. Recapitulación	229
7.2. Desarrollo de las tablas tecnológicas	230
7.2.1. Propuesta de una metodología para el desarrollo de las tablas tecnológicas.....	230
7.2.2. Desarrollo de las tablas tecnológicas del Inconel® 600	236
7.2.3. Desarrollo de las tablas tecnológicas del TiB ₂	247

7.2.4. Desarrollo de las tablas tecnológicas del SiSiC	249
7.2.5. Recapitulación	250
8. CONCLUSIONES	255
8.1. Conclusiones generales	255
8.2. Conclusiones particulares	256
8.3. Desarrollos futuros	261
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	265

Resumen

En la presente Tesis Doctoral se realiza un análisis y una modelización de los parámetros de mayor influencia en la electroerosión por penetración de tres materiales de baja mecanizabilidad. En concreto, el estudio se centra en la aleación Inconel® 600 (*Special Metals Corporation*) y en las cerámicas: diboruro de titanio (TiB_2) y carburo de silicio infiltrado con silicio ($SiSiC$). Actualmente, estos materiales resultan de gran interés para aplicaciones industriales en los sectores aeronáutico, nuclear y automotriz, debido a la combinación de buenas propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y extremada dureza a altas temperaturas.

Para llevar a cabo dicho estudio, se emplean metodologías basadas en el Diseño de Experimentos (DOE), para la planificación y selección de los valores de los parámetros, así como para la obtención de modelos matemáticos que permitan predecir las condiciones óptimas de mecanizado. Asimismo, se determinan tablas tecnológicas, para dichos materiales, en función de los parámetros de diseño: intensidad, tiempo de impulso y rendimiento, en los rangos de estudio considerados. A partir de estas tablas, es posible predecir la obtención de una determinada rugosidad superficial en base a dos estrategias de mecanizado consistentes en maximizar la tasa de eliminación de material, o bien, en minimizar el desgaste del electrodo. Para la generación de las tablas tecnológicas, se emplean los valores experimentales y, en aquellos casos donde no sea posible disponer de datos experimentales, se emplean métodos de optimización no lineal para predecir dichos valores, utilizando los modelos matemáticos generados, en base a los resultados experimentales.

Además, se hace uso de microscopía electrónica de barrido (SEM), con objeto de obtener información relativa a la topografía de las superficies resultantes tras la EDM. Finalmente, se propone un nuevo parámetro denominado “densidad de energía” con el fin de profundizar en el estudio del proceso de EDM.

Palabras clave: EDM, Rugosidad, Electrodo, Desgaste, MRR, Modelización.

Abstract

In the present Doctoral Thesis the analysis and the modeling of the most influential parameters on the EDM of three low machinability materials are dealt with. Specifically, the study is focused on the alloy: Inconel® 600 (Special Metals Corporation) and on the ceramics: titanium diboride (TiB₂) and siliconised silicon carbide (SiSiC). Nowadays, these materials are of great interest for industrial applications in the aeronautical, nuclear and automotive sectors, due to the combination of good mechanical properties, corrosion resistance and extreme hardness at high temperatures.

To carry out this study, Design of Experiments (DOE) techniques are used in order to plan and to select the values for these parameters, as well as, to obtain mathematical models to predict the optimum machining conditions. Moreover, the technological tables for such materials are determined in function of the following design factors: current intensity, pulse time and duty cycle, in the study ranges considered. From these tables, it is possible to achieve a certain surface quality based on two machining strategies: a machining strategy that maximises the material removal rate and other that minimizes the electrode wear. To obtain the technological tables, experimental values are used and, in those cases where it is not possible to provide data, nonlinear optimization methods are employed to predict these values, by using the generated mathematical models, based on the experimental results.

Furthermore, scanning electron microscopy (SEM) is used so as to obtain information of the topography of the resulting surfaces after the EDM process. Finally, a new parameter called “energy density” is proposed for further research in the EDM process.

Keywords: EDM, Roughness, Electrode, Wear, MRR, Modelling.

Lista de símbolos

MRR: Tasa de eliminación de material

EW: Desgaste volumétrico del electrodo

SR: Rugosidad superficial

I: Intensidad

t_i: tiempo de impulso

t₀: tiempo de pausa

η: rendimiento

U₀: tensión de vacío

P: presión del dieléctrico

l_n: longitud de evaluación o longitud de medida

l_r: longitud de muestreo

n: número de trayectos de la longitud de muestreo

λ_c: cut-off

R_a: desviación media aritmética del perfil de rugosidad

R_q: desviación media cuadrática del perfil de rugosidad

R_t: altura total del perfil de rugosidad

S_m: anchura media de los elementos del perfil de rugosidad

P_c: contador de picos del perfil de rugosidad

Z_p: altura de pico del perfil de rugosidad

Z_v: profundidad de valle del perfil de rugosidad

R²: coeficiente de determinación múltiple

R²_{adj}: coeficiente de determinación múltiple ajustado con los grados de libertad

ρ_E: densidad de energía

ΔΩ: volumen total de material arrancado

Ω_e: volumen arrancado de material del electrodo

Ω_p: volumen arrancado del material de la pieza

t_m: tiempo de mecanizado

n_c: número de ciclos

ρ_p: densidad de energía en la pieza

ρ_e: densidad de energía en el electrodo

Lista de figuras

Fig. 3.1. Máquina de electroerosión por penetración ONA DATIC D-2030-S	46
Fig. 3.2. Limpieza con lanza lateral	46
Fig. 3.3. Balanza analítica Mettler Toledo XS 104.....	48
Fig. 3.4. Rugosímetro electrónico de palpador móvil ALPA SM-Rt-70.....	49
Fig. 3.5. Materiales empleados: (a) Inconel® 600, (b) TiB ₂ , (c) SiSiC	52
Fig. 3.6. Electrodo empleados: (a) Cu, (b) C, (c) Cu-C.....	58
Fig. 4.1. Diagrama de Pareto para MRR con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	68
Fig. 4.2. Efectos principales para MRR con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	69
Fig. 4.3. Efectos de interacción para MRR con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	69
Fig. 4.4. Superficie de respuesta de MRR vs. I y t _i con polaridad positiva (a) y negativa (b)	70
Fig. 4.5. Superficie de respuesta de MRR vs. I y η con polaridad positiva (a) y negativa (b)....	71
Fig. 4.6. Diagrama de Pareto para EW con polaridad positiva (a) y negativa (b)	72
Fig. 4.7. Efectos principales para EW con polaridad positiva (a) y negativa (b)	73
Fig. 4.8. Efectos de interacción para EW con polaridad positiva (a) y negativa (b)	73
Fig. 4.9. Superficie de respuesta de EW vs. I y t _i con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	74
Fig. 4.10. Superficie de respuesta de EW vs. t _i y η con polaridad positiva (a) y negativa (b)....	75
Fig. 4.11. Diagrama de Pareto para Ra con polaridad positiva (a) y negativa (b)	77
Fig. 4.12. Efectos principales para Ra con polaridad positiva (a) y negativa (b)	77
Fig. 4.13. Efectos de interacción para Ra con polaridad positiva (a) y negativa (b)	78
Fig. 4.14. Superficie de respuesta de Ra vs. I y t _i con polaridad positiva (a) y negativa (b)	79
Fig. 4.15. Superficie de respuesta de Ra vs. I y η con polaridad positiva (a) y negativa (b)	79
Fig. 4.16. Diagrama de Pareto para Rq con polaridad positiva (a) y negativa (b)	80
Fig. 4.17. Efectos principales para Rq con polaridad positiva (a) y negativa (b)	80
Fig. 4.18. Efectos de interacción para Rq con polaridad positiva (a) y negativa (b)	80
Fig. 4.19. Superficie de respuesta de Rq vs. I y t _i con polaridad positiva (a) y negativa (b)	81
Fig. 4.20. Diagrama de Pareto para Rt con polaridad positiva (a) y negativa (b)	82
Fig. 4.21. Efectos principales para Rt con polaridad positiva (a) y negativa (b)	83
Fig. 4.22. Efectos de interacción para Rt con polaridad negativa	84
Fig. 4.23. Superficie de respuesta de Rt vs. I y t _i con polaridad positiva (a) y negativa (b)	84
Fig. 4.24. Superficie de respuesta de Rt vs. I y η con polaridad positiva (a) y negativa (b)	85
Fig. 4.25. Diagrama de Pareto para Sm con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	88
Fig. 4.26. Diagrama de Pareto para Pc con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	88
Fig. 4.27. Efectos principales para Sm con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	88
Fig. 4.28. Efectos principales para Pc con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	89
Fig. 4.29. Efectos de interacción para Sm con polaridad positiva (a) y negativa (b)	89
Fig. 4.30. Efectos de interacción para Pc con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	90

Fig. 4.31. Superficie de respuesta de S_m vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)	91
Fig. 4.32. Superficie de respuesta de P_c vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)	92
Fig. 4.33. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E49 con mínimo valor de R_a y polaridad positiva a distintos aumentos (x nº aumentos)	94
Fig. 4.34. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E57 con mínimo valor de R_a y polaridad negativa a distintos aumentos (x nº aumentos).....	95
Fig. 4.35. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E40 con máximo valor de R_a y polaridad positiva a distintos aumentos (x nº aumentos)	96
Fig. 4.36. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E56 con máximo valor de R_a y polaridad negativa a distintos aumentos (x nº aumentos).....	96
Fig. 4.37. Diagrama de Pareto para MRR con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	102
Fig. 4.38. Efectos principales para MRR con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	103
Fig. 4.39. Efectos de interacción para MRR con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	103
Fig. 4.40. Superficie de respuesta de MRR vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)	104
Fig. 4.41. Superficie de respuesta de MRR vs. I y η con polaridad positiva (a) y negativa (b)	105
Fig. 4.42. Diagrama de Pareto para EW con polaridad positiva (a) y negativa (b)	106
Fig. 4.43. Efectos principales para EW con polaridad positiva (a) y negativa (b)	107
Fig. 4.44. Efectos de interacción para EW con polaridad positiva (a) y negativa (b)	107
Fig. 4.45. Superficie de respuesta de EW vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)...	109
Fig. 4.46. Superficie de respuesta de EW vs. I y η con polaridad positiva (a) y negativa (b) ..	109
Fig. 4.47. Diagrama de Pareto para R_a con polaridad positiva (a) y negativa (b)	112
Fig. 4.48. Diagrama de Pareto para R_q con polaridad positiva (a) y negativa (b)	112
Fig. 4.49. Diagrama de Pareto para R_t con polaridad positiva (a) y negativa (b)	112
Fig. 4.50. Efectos principales para R_a con polaridad positiva (a) y negativa (b)	113
Fig. 4.51. Efectos principales para R_q con polaridad positiva (a) y negativa (b)	113
Fig. 4.52. Efectos principales para R_t con polaridad positiva (a) y negativa (b)	113
Fig. 4.53. Efectos de interacción para R_a con polaridad positiva (a) y negativa (b)	114
Fig. 4.54. Efectos de interacción para R_q con polaridad positiva (a) y negativa (b)	114
Fig. 4.55. Efectos de interacción para R_t con polaridad positiva (a) y negativa (b)	115
Fig. 4.56. Superficie de respuesta de R_a vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)....	117
Fig. 4.57. Superficie de respuesta de R_q vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)....	117
Fig. 4.58. Superficie de respuesta de R_t vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	117
Fig. 4.59. Diagrama de Pareto para S_m con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	120
Fig. 4.60. Diagrama de Pareto para P_c con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	120
Fig. 4.61. Efectos principales para S_m con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	120
Fig. 4.62. Efectos principales para P_c con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	121
Fig. 4.63. Efectos de interacción para S_m con polaridad positiva (a) y negativa (b)	121
Fig. 4.64. Efectos de interacción para P_c con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	121
Fig. 4.65. Superficie de respuesta de S_m vs. t_i y η con polaridad positiva (a) y negativa (b) ..	123

Fig. 4.66. Superficie de respuesta de P_c vs. t_i y η con polaridad positiva (a) y negativa (b) ...	123
Fig. 4.67. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E1 con mínimo valor de R_a y polaridad positiva a distintos aumentos (x nº aumentos)	125
Fig. 4.68. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E5 con mínimo valor de R_a y polaridad negativa a distintos aumentos (x nº aumentos).....	126
Fig. 4.69. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E48 con máximo valor de R_a y polaridad positiva a distintos aumentos (x nº aumentos).....	127
Fig. 4.70. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E32 con máximo valor de R_a y polaridad negativa a distintos aumentos (x nº aumentos).....	128
Fig. 4.71. Superficies electroerosionadas con electrodo Cu-C y tiempo de impulso de 5 μ s ..	130
Fig. 4.72. Diagrama de Pareto para MRR con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	134
Fig. 4.73. Efectos principales para MRR con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	134
Fig. 4.74. Efectos de interacción para MRR con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	134
Fig. 4.75. Superficie de respuesta de MRR vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)	135
Fig. 4.76. Superficie de respuesta de MRR vs. I y η con polaridad positiva (a) y negativa (b)	136
Fig. 4.77. Diagrama de Pareto para EW con polaridad positiva (a) y negativa (b)	137
Fig. 4.78. Efectos principales para EW con polaridad positiva (a) y negativa (b)	138
Fig. 4.79. Efectos de interacción para EW con polaridad positiva (a) y negativa (b)	138
Fig. 4.80. Superficie de respuesta de EW vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)...	140
Fig. 4.81. Superficie de respuesta de EW vs. I y η con polaridad positiva (a) y negativa (b) ..	140
Fig. 4.82. Diagrama de Pareto para R_a con polaridad positiva (a) y negativa (b)	143
Fig. 4.83. Diagrama de Pareto para R_q con polaridad positiva (a) y negativa (b)	143
Fig. 4.84. Diagrama de Pareto para R_t con polaridad positiva (a) y negativa (b)	143
Fig. 4.85. Efectos principales para R_a con polaridad positiva (a) y negativa (b)	144
Fig. 4.86. Efectos principales para R_q con polaridad positiva (a) y negativa (b)	144
Fig. 4.87. Efectos principales para R_t con polaridad positiva (a) y negativa (b)	144
Fig. 4.88. Efectos de interacción para R_a con polaridad positiva (a) y negativa (b)	145
Fig. 4.89. Efectos de interacción para R_q con polaridad positiva (a) y negativa (b)	145
Fig. 4.90. Efectos de interacción para R_t con polaridad positiva (a) y negativa (b)	145
Fig. 4.91. Superficie de respuesta de R_a vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)....	147
Fig. 4.92. Superficie de respuesta de R_q vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)....	147
Fig. 4.93. Superficie de respuesta de R_t vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	147
Fig. 4.94. Diagrama de Pareto para S_m con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	150
Fig. 4.95. Diagrama de Pareto para P_c con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	150
Fig. 4.96. Efectos principales para S_m con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	150
Fig. 4.97. Efectos principales para P_c con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	151
Fig. 4.98. Efectos de interacción para S_m con polaridad positiva (a) y negativa (b)	151
Fig. 4.99. Efectos de interacción para P_c con polaridad positiva (a) y negativa (b).....	152
Fig. 4.100. Superficie de respuesta de S_m vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b) .	153

Fig. 4.101. Superficie de respuesta de P_c vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b) ..	153
Fig. 4.102. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E33 con mínimo valor de R_a y polaridad positiva a distintos aumentos (x n° aumentos)	156
Fig. 4.103. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E21 con mínimo valor de R_a y polaridad negativa a distintos aumentos (x n° aumentos).....	156
Fig. 4.104. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E16 con máximo valor de R_a y polaridad positiva a distintos aumentos (x n° aumentos)	158
Fig. 4.105. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E48 con máximo valor de R_a y polaridad negativa a distintos aumentos (x n° aumentos).....	159
Fig. 5.1. Diagrama de Pareto para MRR con polaridad positiva	171
Fig. 5.2. Efectos principales para MRR con polaridad positiva	171
Fig. 5.3. Efectos de interacción para MRR con polaridad positiva	171
Fig. 5.4. Superficie de respuesta de MRR vs. I y t_i con polaridad positiva	172
Fig. 5.5. Superficie de respuesta de MRR vs. I y η con polaridad positiva	172
Fig. 5.6. Diagrama de Pareto para EW con polaridad positiva.....	173
Fig. 5.7. Efectos principales para EW con polaridad positiva.....	173
Fig. 5.8. Efectos de interacción para EW con polaridad positiva	173
Fig. 5.9. Superficie de respuesta de EW vs. I y t_i con polaridad positiva	174
Fig. 5.10. Superficie de respuesta de EW vs. t_i y η con polaridad positiva	174
Fig. 5.11. Diagrama de Pareto para R_a con polaridad positiva.....	176
Fig. 5.12. Efectos principales para R_a con polaridad positiva	176
Fig. 5.13. Diagrama de Pareto para R_q con polaridad positiva.....	177
Fig. 5.14. Efectos principales para R_q con polaridad positiva	177
Fig. 5.15. Diagrama de Pareto para R_t con polaridad positiva	177
Fig. 5.16. Efectos principales para R_t con polaridad positiva	177
Fig. 5.17. Efectos de interacción para R_a con polaridad positiva.....	177
Fig. 5.18. Efectos de interacción para R_q con polaridad positiva.....	178
Fig. 5.19. Efectos de interacción para R_t con polaridad positiva.....	178
Fig. 5.20. Superficie de respuesta de R_a vs. I y t_i con polaridad positiva	179
Fig. 5.21. Superficie de respuesta de R_a vs. I y η con polaridad positiva.....	179
Fig. 5.22. Superficie de respuesta de R_q vs. I y t_i con polaridad positiva	179
Fig. 5.23. Superficie de respuesta de R_q vs. I y η con polaridad positiva.....	179
Fig. 5.24. Superficie de respuesta de R_t vs. I y t_i con polaridad positiva	179
Fig. 5.25. Superficie de respuesta de R_t vs. I y η con polaridad positiva.....	179
Fig. 5.26. Diagrama de Pareto para S_m con polaridad positiva	181
Fig. 5.27. Efectos principales para S_m con polaridad positiva	181
Fig. 5.28. Diagrama de Pareto para P_c con polaridad positiva	181
Fig. 5.29. Efectos principales para P_c con polaridad positiva	181

Fig. 5.30. Efectos de interacción para Sm con polaridad positiva.....	182
Fig. 5.31. Efectos de interacción para Pc con polaridad positiva.....	182
Fig. 5.32. Superficie de respuesta de Sm vs. I y t_i con polaridad positiva.....	183
Fig. 5.33. Superficie de respuesta de Sm vs. I y η con polaridad positiva.....	183
Fig. 5.34. Superficie de respuesta de Pc vs. I y t_i con polaridad positiva.....	183
Fig. 5.35. Superficie de respuesta de Pc vs. I y η con polaridad positiva.....	183
Fig. 5.36. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E1 con mínimo valor de Ra y polaridad positiva a distintos aumentos (x nº aumentos).....	185
Fig. 5.37. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E8 con máximo valor de Ra y polaridad positiva a distintos aumentos (x nº aumentos).....	185
Fig. 6.1. Diagrama de Pareto para MRR con polaridad negativa.....	195
Fig. 6.2. Efectos principales para MRR con polaridad negativa.....	195
Fig. 6.3. Efectos de interacción para MRR con polaridad negativa.....	196
Fig. 6.4. Superficie de respuesta de MRR vs. I y η con polaridad negativa.....	197
Fig. 6.5. Superficie de respuesta de MRR vs. t_i y η con polaridad negativa.....	197
Fig. 6.6. Diagrama de Pareto para EW con polaridad negativa.....	198
Fig. 6.7. Efectos principales para EW con polaridad negativa.....	198
Fig. 6.8. Efectos de interacción para EW con polaridad negativa.....	198
Fig. 6.9. Superficie de respuesta de EW vs. I y η con polaridad negativa.....	199
Fig. 6.10. Superficie de respuesta de EW vs. t_i y η con polaridad negativa.....	199
Fig. 6.11. Diagrama de Pareto para Ra con polaridad negativa.....	201
Fig. 6.12. Efectos principales para Ra con polaridad negativa.....	201
Fig. 6.13. Diagrama de Pareto para Rq con polaridad negativa.....	201
Fig. 6.14. Efectos principales para Rq con polaridad negativa.....	201
Fig. 6.15. Diagrama de Pareto para Rt con polaridad negativa.....	202
Fig. 6.16. Efectos principales para Rt con polaridad negativa.....	202
Fig. 6.17. Efectos de interacción para Ra con polaridad negativa.....	202
Fig. 6.18. Efectos de interacción para Rq con polaridad negativa.....	202
Fig. 6.19. Efectos de interacción para Rt con polaridad negativa.....	202
Fig. 6.20. Superficie de respuesta de Ra vs. I y η con polaridad negativa.....	204
Fig. 6.21. Superficie de respuesta de Ra vs. t_i y η con polaridad negativa.....	204
Fig. 6.22. Superficie de respuesta de Rq vs. I y η con polaridad negativa.....	204
Fig. 6.23. Superficie de respuesta de Rq vs. t_i y η con polaridad negativa.....	204
Fig. 6.24. Superficie de respuesta de Rt vs. I y η con polaridad negativa.....	204
Fig. 6.25. Superficie de respuesta de Rt vs. t_i y η con polaridad negativa.....	204
Fig. 6.26. Diagrama de Pareto para Sm con polaridad negativa.....	206
Fig. 6.27. Efectos principales para Sm con polaridad negativa.....	206

Fig. 6.28. Diagrama de Pareto para Pc con polaridad negativa.....	206
Fig. 6.29. Efectos principales para Pc con polaridad negativa.....	206
Fig. 6.30. Efectos de interacción para Sm con polaridad negativa.....	207
Fig. 6.31. Efectos de interacción para Pc con polaridad negativa.....	207
Fig. 6.32. Superficie de respuesta de Sm vs. I y η con polaridad negativa.....	208
Fig. 6.33. Superficie de respuesta de Sm vs. t_i y η con polaridad negativa.....	208
Fig. 6.34. Superficie de respuesta de Pc vs. I y t_i con polaridad negativa.....	208
Fig. 6.35. Superficie de respuesta de Pc vs. t_i y η con polaridad negativa.....	208
Fig. 6.36. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E7 con mínimo valor de Ra y polaridad negativa a distintos aumentos (x n° aumentos).....	209
Fig. 6.37. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E6 con máximo valor de Ra y polaridad negativa a distintos aumentos (x n° aumentos).....	210
Fig. 7.1. ρ_E vs. MRR para el Inconel® 600 con diferentes electrodos y polaridades.....	219
Fig. 7.2. ρ_E vs. MRR para el TiB ₂ con electrodo de Cu y polaridad positiva.....	220
Fig. 7.3. ρ_E vs. MRR para el SiSiC con electrodo de Cu-C y polaridad negativa.....	220
Fig. 7.4. ρ_E vs. EW para el Inconel® 600 con diferentes electrodos y polaridades.....	221
Fig. 7.5. ρ_E vs. EW para el TiB ₂ con electrodo de Cu y polaridad positiva.....	221
Fig. 7.6. ρ_E vs. EW para el SiSiC con electrodo de Cu-C y polaridad negativa.....	221
Fig. 7.7. ρ_E vs. Ra para el Inconel® 600 con diferentes electrodos y polaridades.....	223
Fig. 7.8. ρ_E vs. Ra para el TiB ₂ con electrodo de Cu y polaridad positiva.....	223
Fig. 7.9. ρ_E vs. Ra para el SiSiC con electrodo de Cu-C y polaridad negativa.....	223
Fig. 7.10. Distribución de la densidad de energía en el electrodo y en la pieza.....	225
Fig. 7.11. Distribución de la densidad de energía en el electrodo y en la pieza.....	225
Fig. 7.12. Distribución de la densidad de energía en el electrodo y en la pieza.....	226
Fig. 7.13. Distribución de la densidad de energía en el electrodo y en la pieza.....	226
Fig. 7.14. Distribución de la densidad de energía en el electrodo y en la pieza.....	227
Fig. 7.15. Distribución de la densidad de energía en el electrodo y en la pieza.....	227
Fig. 7.16. Distribución de la densidad de energía en el electrodo y en la pieza.....	228
Fig. 7.17. Distribución de la densidad de energía en el electrodo y en la pieza.....	229
Fig. 7.18. Procedimiento propuesto para la generación de las tablas tecnológicas.....	232
Fig. 7.19. Optimización no lineal para la estrategia de máxima MRR del TiB ₂	235

Lista de tablas

Tabla 3.1. Principales propiedades del Inconel® 600 [158]	53
Tabla 3.2. Composición química (%) del Inconel® 600 [156].....	53
Tabla 3.3. Principales propiedades del TiB ₂ [158].....	55
Tabla 3.4. Principales propiedades del SiSiC [158], [168]	56
Tabla 3.5. Principales propiedades del grafito Poco EDM1 [173].....	59
Tabla 3.6. Principales propiedades del grafito Poco EDM-C3 [173]	59
Tabla 4.1. Parámetros de diseño y niveles seleccionados para el caso de la EDM del Inconel® 600 con electrodo de cobre y polaridades positiva y negativa	65
Tabla 4.2. Resultados experimentales con electrodo de cobre para polaridad positiva y negativa	66
Tabla 4.3. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - MRR	67
Tabla 4.4. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - MRR.....	67
Tabla 4.5. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - EW.....	71
Tabla 4.6. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - EW	72
Tabla 4.7. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Ra.....	76
Tabla 4.8. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Ra	76
Tabla 4.9. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Rt.....	82
Tabla 4.10. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Rt	82
Tabla 4.11. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Sm	85
Tabla 4.12. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Sm.....	86
Tabla 4.13. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Pc	86
Tabla 4.14. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Pc.....	86
Tabla 4.15. Resultados máximos y mínimos obtenidos	98
Tabla 4.16. Factores significativos y su tendencia	98
Tabla 4.17. Parámetros de diseño y niveles seleccionados para el caso de la EDM del Inconel® 600 con electrodo de grafito y polaridades positiva y negativa	99
Tabla 4.18. Resultados experimentales con electrodo de grafito para polaridad positiva y negativa	100
Tabla 4.19. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - MRR	101
Tabla 4.20. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - MRR.....	101
Tabla 4.21. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - EW.....	105
Tabla 4.22. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - EW	106
Tabla 4.23. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Ra.....	110
Tabla 4.24. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Ra	111
Tabla 4.25. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Sm	118
Tabla 4.26. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Sm.....	118

Tabla 4.27. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Pc	118
Tabla 4.28. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Pc.....	119
Tabla 4.29. Resultados máximos y mínimos obtenidos	128
Tabla 4.30. Factores significativos y su tendencia	129
Tabla 4.31. Parámetros de diseño y niveles seleccionados para el caso de la EDM del Inconel® 600 con electrodo de Cu-C y polaridades positiva y negativa	130
Tabla 4.32. Resultados experimentales con electrodo de Cu-C para polaridad positiva y negativa	131
Tabla 4.33. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - MRR	132
Tabla 4.34. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - MRR.....	132
Tabla 4.35. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - EW.....	136
Tabla 4.36. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - EW	137
Tabla 4.37. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Ra	141
Tabla 4.38. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Ra	141
Tabla 4.39. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Sm	148
Tabla 4.40. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Sm.....	148
Tabla 4.41. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Pc	149
Tabla 4.42. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Pc.....	149
Tabla 4.43. Resultados máximos y mínimos obtenidos	159
Tabla 4.44. Factores significativos y su tendencia	159
Tabla 4.45. Resultados máximos y mínimos obtenidos	164
Tabla 4.46. Factores significativos y su tendencia	164
Tabla 5.1. Parámetros de diseño y niveles seleccionados para el caso de la EDM del TiB ₂ con electrodo de cobre y polaridad positiva	168
Tabla 5.2. Resultados experimentales para la EDM del TiB ₂ con electrodo de cobre y polaridad positiva.....	169
Tabla 5.3. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - MRR	170
Tabla 5.4. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - EW.....	172
Tabla 5.5. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Ra	175
Tabla 5.6. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Sm	180
Tabla 5.7. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Pc	180
Tabla 5.8. Resultados máximos y mínimos obtenidos	187
Tabla 5.9. Factores significativos y su tendencia	187
Tabla 6.1. Parámetros de diseño y niveles seleccionados para el caso de la EDM del SiSiC con electrodo de Cu-C y polaridad negativa	193
Tabla 6.2. Resultados experimentales para la EDM del SiSiC con electrodo de Cu-C y polaridad negativa	194

Tabla 6.3. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - MRR.....	194
Tabla 6.4. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - EW	197
Tabla 6.5. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Ra	200
Tabla 6.6. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Sm.....	205
Tabla 6.7. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Pc.....	205
Tabla 6.8. Resultados máximos y mínimos obtenidos	212
Tabla 6.9. Factores significativos y su tendencia	212
Tabla 7.1. Valores ordenados de Ra	233
Tabla 7.2. Rangos de Ra	234
Tabla 7.3. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR	234
Tabla 7.4. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR en el mecanizado del TiB ₂ con electrodo de Cu y polaridad positiva	235
Tabla 7.5. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de Cu y polaridad positiva	237
Tabla 7.6. Valores obtenidos para la estrategia de mínimo EW en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de Cu y polaridad positiva	238
Tabla 7.7. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de Cu y polaridad negativa.....	239
Tabla 7.8. Valores obtenidos para la estrategia de mínimo EW en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de Cu y polaridad negativa.....	239
Tabla 7.9. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de C y polaridad positiva	240
Tabla 7.10. Valores obtenidos para la estrategia de mínimo EW en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de C y polaridad positiva	241
Tabla 7.11. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de C y polaridad negativa.....	242
Tabla 7.12. Valores obtenidos para la estrategia de mínimo EW en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de C y polaridad negativa.....	243
Tabla 7.13. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de Cu-C y polaridad positiva	244
Tabla 7.14. Valores obtenidos para la estrategia de mínimo EW en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de Cu-C y polaridad positiva	245
Tabla 7.15. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de Cu-C y polaridad negativa.....	246
Tabla 7.16. Valores obtenidos para la estrategia de mínimo EW en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de Cu-C y polaridad negativa.....	247
Tabla 7.17. Valores obtenidos para la estrategia de mínimo EW en el mecanizado del TiB ₂ con electrodo de Cu y polaridad positiva	249

Tabla 7.18. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR en el mecanizado del SiSiC con electrodo de Cu-C y polaridad negativa 249

Tabla 7.19. Valores obtenidos para la estrategia de mínimo EW en el mecanizado del SiSiC con electrodo de Cu-C y polaridad negativa 250

CAPÍTULO 1

Planteamiento y objetivos

1. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS

La electroerosión por penetración, en inglés, *Electrical Discharge Machining* (EDM), es uno de los procesos no convencionales de mecanizado más empleados en la industria para el mecanizado de alta precisión. Dicho proceso difiere de la mayoría de procesos de mecanizado convencionales en que la herramienta de trabajo (electrodo) no hace contacto físico con la pieza para la eliminación de material, lo que posibilita el mecanizado de prácticamente cualquier tipo de material conductor, sin importar la dureza del mismo. Este hecho supone una de las principales ventajas de la EDM.

En la presente Tesis Doctoral se analiza la aplicabilidad del proceso de electroerosión por penetración para la fabricación de materiales de difícil mecanizabilidad. Concretamente, los materiales seleccionados han sido la aleación de Ni-Cr-Fe denominada como Inconel® 600 (*Special Metals Corporation*) y las cerámicas: diboruro de titanio (TiB₂) y carburo de silicio infiltrado con silicio (SiSiC). Todos ellos han sido seleccionados en base a la demanda y al gran interés que diferentes industrias presentan en este tipo de materiales, ya que la combinación de sus excelentes propiedades físicas y químicas posibilitan su uso en numerosas aplicaciones industriales. Sin embargo, estos materiales son difíciles de mecanizar por métodos convencionales por las mismas razones que los convierten en buenos materiales con alta resistencia a la corrosión, al desgaste y a las altas temperaturas, entre otras propiedades. Así, el mecanizado por EDM se presenta como una buena alternativa para su fabricación.

En la Tesis Doctoral se abordará, en primer lugar, el estudio de la mecanizabilidad de la aleación denominada como Inconel® 600, la cual se caracteriza por su buena resistencia a la oxidación y a la corrosión, incluso a altas temperaturas, y por sus buenas propiedades mecánicas, que lo convierten en un material ampliamente utilizado en las industrias nuclear, química y electrónica, entre otras. Para ello, se emplearán distintos materiales en los electrodos. En concreto, se emplearán: cobre, grafito y cobre-grafito y se utilizarán polaridades positiva y negativa, con objeto de determinar la influencia

del material de electrodo y de su polaridad en la tasa de eliminación de material (MRR), en el desgaste volumétrico del electrodo (EW) y en la rugosidad superficial (SR). Esta última será caracterizada mediante los parámetros más comúnmente empleados en la industria que son: la desviación media del perfil de rugosidad (Ra), la desviación media cuadrática del perfil de rugosidad (Rq), la altura total del perfil de rugosidad (Rt), la anchura media de los elementos del perfil de rugosidad (Sm) y el contador de picos del perfil de rugosidad (Pc).

Por otra parte, se analizará la mecanizabilidad por EDM del diboruro de titanio (TiB₂). Dicho material es una cerámica sinterizada que posee alto interés industrial debido a sus características de elevada resistencia al desgaste y alta resistencia mecánica a elevadas temperaturas, así como a su buena conductividad eléctrica y térmica. Asimismo, se analizará también la mecanizabilidad del carburo de silicio infiltrado con silicio (SiSiC), el cual es también un material cerámico con excelentes propiedades físicas y mecánicas, así como una buena resistencia a la corrosión, incluso a altas temperaturas, cuyos campos de aplicación están en constante crecimiento. En ambos casos, se estudiará qué factores influyen en el procesado de los mismos mediante EDM y se analizará dicha influencia sobre tres de las características tecnológicas del material más importantes en la industria: la rugosidad superficial (SR), la tasa de eliminación del material (MRR) y el desgaste volumétrico del electrodo (EW).

Para llevar a cabo los análisis anteriormente mencionados, se emplearán herramientas estadísticas basadas en el diseño de experimentos, en inglés, *Design Of Experiments* (DOE), junto con técnicas de regresión lineal múltiple. El empleo de dichas herramientas permite la planificación y análisis de los resultados, así como la obtención de una serie de datos y modelos matemáticos que permitirán llevar a cabo la selección de las condiciones de mecanizado óptimas.

Además, se hará uso de microscopía electrónica de barrido (SEM), con objeto de obtener información relativa de la topografía de las superficies resultantes tras el proceso de EDM.

Finalmente, se propone un nuevo parámetro denominado densidad de energía con objeto de avanzar en la modelización del proceso de EDM, así como un nuevo procedimiento para la obtención de las tablas tecnológicas para los tres materiales seleccionados, que permitan seleccionar las condiciones de operación, en función de diferentes estrategias de mecanizado, teniendo en cuenta los rangos de estudio considerados en la Tesis Doctoral. Como es sabido, dichas tablas tecnológicas existen para el caso de los aceros, no siendo así, en general, para otros tipos de materiales, como es el caso de las aleaciones de baja mecanizabilidad en las que las condiciones óptimas de operación del equipo han de determinarse, actualmente, de forma experimental.

Para la generación de dichas tablas, se emplearán los valores experimentales y, en aquellos casos donde no sea posible disponer de datos experimentales, se emplearán métodos de optimización no lineal para predecir los valores de los parámetros, utilizando los modelos matemáticos generados en base a los resultados experimentales.

CAPÍTULO 2

Revisión del estado del arte

2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo de la Tesis Doctoral se aborda una revisión del estado del arte y de los antecedentes relacionados con la EDM. Para ello, se incide en el proceso de electroerosión por penetración, en los materiales de baja mecanizabilidad y en los principales factores de influencia. Asimismo, se indican las tendencias de la EDM.

2.1. El proceso de electroerosión por penetración (EDM)

El proceso de electroerosión por penetración, más conocido como EDM (*Electrical Discharge Machining*) se desarrolló a finales de 1940 [1], por el matrimonio de científicos soviéticos B.R. y N.I. Lazarenko y la ayuda del joven investigador Zolotykh [2]. Actualmente, es uno de los procesos no convencionales de mecanizado más empleados hoy en día en la industria [3] para el mecanizado de alta precisión.

Dicho proceso se basa en la eliminación de material de la pieza por medio de la repetición de descargas eléctricas controladas, que saltan en un medio dieléctrico, entre un electrodo y la pieza de trabajo. La duración de la chispa es muy corta (suele variar típicamente entre 1 μ s y 2 ms) y, durante este periodo de tiempo, la energía eléctrica se convierte en energía térmica [4], creándose un canal de plasma entre el ánodo y el cátodo que alcanza temperaturas de entre 8000 °C y 12000 °C, pudiendo llegar a alcanzar incluso hasta 20000 °C, como se recoge en el trabajo de Ho y Newman [3]. Al producirse un calor tan localizado y con tanta rapidez, no se favorece la propagación de calor por conducción, sino que como resultado se tiene la fusión y vaporización del material, tanto de la pieza como del electrodo. Además, durante el proceso, no hay contacto directo entre el electrodo y la pieza, por lo que, en principio, el proceso puede aplicarse a cualquier material, independientemente de su dureza, siempre y cuando éste sea conductor.

2.1.1. Fundamentos del proceso

De acuerdo a Yeo et al. [5], diversas teorías se han formulado para intentar dar una explicación al proceso de EDM, aunque es la teoría termo-eléctrica la más extendida hoy en día. Basándose en esta teoría, Gostimirovic et al. [6] dividieron el proceso de una descarga eléctrica en tres fases: fase de encendido, fase de descarga y fase de expulsión. Durante la fase de encendido, se establece un fuerte campo eléctrico entre el electrodo y la pieza. Debido a la intensidad de este campo eléctrico, llega un momento en el que se supera la tensión de ruptura del dieléctrico entre los puntos más próximos entre la pieza y el electrodo, y se forma un canal de descarga de elevada conductividad, tal y como recogen en su estudio Muthuramalingam y Mohan [7]. En este momento, la diferencia de potencial alcanza su máximo valor, siendo el valor de la intensidad de corriente todavía nulo. A continuación, durante la fase de descarga, se establece el paso de la corriente eléctrica ya que el fluido deja de comportarse como aislante. Esta brusca caída de la resistencia del canal permite que la corriente alcance valores elevados y se origine un aumento de la ionización que, a su vez, crea un potente campo magnético que comprime aún más el canal de descarga, produciendo su calentamiento. Las altas temperaturas alcanzadas en la zona de descarga conducen a la fusión y vaporización del material tanto de la pieza como del electrodo [6]. Finalmente, en la fase de expulsión, tanto el valor de la corriente eléctrica como el de la diferencia de potencial disminuyen hasta cero, y se produce un enfriamiento brusco y la expulsión del material fundido al exterior. De acuerdo a Zhang et al. [8], el material de la pieza en estado de fusión que no ha sido expulsado al exterior solidifica sobre la superficie de la propia pieza, dando lugar a la formación de una capa refundida o resolidificada, denominada en inglés como *recast layer*

2.1.2. Equipos empleados

Desde el descubrimiento del mecanizado por electroerosión, los equipos de EDM han ido evolucionando de manera paralela a los avances tecnológicos

para dar respuesta a las necesidades existentes. En un principio, los progresos en los equipos iban enfocados a la mejora y estabilidad del proceso. Posteriormente, se centraron en las mejoras electrónicas, principalmente, en la automatización del movimiento de la máquina (control numérico), así como en las mejoras dimensionales cuyo principal objetivo era la obtención de geometrías con la mayor precisión posible.

Según recoge el trabajo de Dastagiri y Hemantha [9], las primeras máquinas de electroerosión surgieron en los años 50 de la mano del matrimonio de científicos soviéticos B.R. y N.I. Lazarenko cuando investigaban el efecto destructivo de las descargas eléctricas. Inicialmente, estas primeras máquinas eran todas de penetración y estaban compuestas por un circuito de relajación RC (resistencia-condensador), caracterizado por llevar algún elemento acumulador de energía para producir la descarga [10]. Dicho circuito presenta el inconveniente de que el circuito de descarga del condensador actúa como un circuito oscilante y, por tanto, se produce una inversión periódica de la tensión y la corriente hasta que la energía acumulada en el condensador se haya agotado. Esta oscilación influye de manera directa en el desgaste del electrodo, ya que la polaridad de éste con respecto a la pieza se invierte periódicamente. Asimismo, la corriente de descarga, su energía y su duración vienen impuestas por el período de oscilación y no pueden variarse sus valores de manera independiente. Con los generadores RC se obtienen tiempos de impulsos muy cortos que conducen a muy buenos acabados superficiales. Sin embargo, de acuerdo a Han et al. [11], con este tipo de generadores no se pueden mantener altas frecuencias de descarga que aumenten la capacidad de arranque de material debido al tiempo necesario que requiere la carga del condensador. Asimismo, hoy en día, Qian et al. [12] atribuyen el uso de este tipo de generadores, principalmente, al micro-mecanizado y al mecanizado de piezas que requieran un excelente acabado superficial.

Con el objetivo de aumentar la capacidad de arranque de los equipos de EDM, años más tarde surgieron los generadores de impulsos transistorizados, los cuales permiten variar de manera independiente parámetros como el tiempo de impulso, el tiempo de pausa y la intensidad. En este tipo de generadores, los

impulsos se obtienen mediante la interrupción de la corriente con un transistor, lo que permite llegar a frecuencias más altas con elevadas intensidades de corriente. Entre las principales ventajas que se consiguen con este tipo de generadores, Camprubi [10] destaca la posibilidad de obtener un bajo desgaste de electrodo, la posibilidad de variar la polaridad y otra serie de parámetros básicos, y la gran capacidad de arranque de material

Jahan et al. [13] estudiaron la influencia de diferentes parámetros del proceso de micro-EDM en la rugosidad superficial utilizando un equipo que podía funcionar tanto con generadores de relajación como transistorizados. Las superficies más finas fueron obtenidas con generadores RC a baja energía de descarga y pulsos de corta duración. Han et al. [14] desarrollaron un generador transistorizado isoenergético para el mecanizado de micro-EDM capaz de alcanzar tiempos de impulso de $0,03 \mu\text{s}$ y unas tasas de eliminación de material muy superiores a las obtenidas con un generador del tipo RC.

2.1.3. Aplicaciones industriales

Las principales aplicaciones de la electroerosión por penetración se encuentran en la fabricación de moldes para fundición, moldes para inyección, matrices para forja, en las industrias aeroespacial y automovilística [15], y en la fabricación de material quirúrgico [16], entre otras. Asimismo, nuevas aplicaciones están surgiendo como respuesta a las demandas de la industria, algunas de las cuales se describen a continuación:

Micro-EDM: Sus principales usos engloban el taladrado y perforado de micro-agujeros y micro-cavidades [17], con aplicaciones potenciales en la industria electrónica [18], en la industria óptica [19], en la instrumentación médica [19] y en piezas de motores para automóviles y turbinas de gas [20].

Otra de las aplicaciones más destacadas incluye el mecanizado de los canales de refrigeración de moldes y colectores, con el evidente problema que conlleva la mecanización de agujeros con trayectorias curvas [21]. Finalmente, la micro-

EDM por hilo también es muy utilizada en la realización de componentes 3D de formas complejas como micro-engranajes [22].

Mecanizado de materiales cerámicos avanzados: El mecanizado por electroerosión de las cerámicas avanzadas es, cada vez, más generalizado en la industria, debido a los competitivos costes de mecanizado y a sus características [3]. Puertas y Luis [23] realizaron una revisión de las aplicaciones de la EDM al mecanizado de cerámicas conductoras y destacaron las siguientes: aplicaciones que requieren resistencia al desgaste y a la corrosión, aplicaciones que requieren resistencia mecánica a alta temperatura, aplicaciones eléctricas, electrónicas y magnéticas, aplicaciones nucleares y aplicaciones nanotecnológicas.

Mecanizado de materiales compuestos avanzados: Otra de las aplicaciones más recientes del proceso de EDM es la mecanización de materiales compuestos avanzados, tal y como indican Garg et al. [24]. Así, por ejemplo, Prasad et al. [25] realizaron una revisión de las investigaciones existentes relativas al mecanizado por EDM y WEDM de los materiales compuestos avanzados. Bhaduri et al. [26] estudiaron el comportamiento del mecanizado por EDM del compuesto cerámico nitruro de titanio-óxido de aluminio ($\text{TiN-Al}_2\text{O}_3$). Hourmand et al. [27] estudiaron los efectos de varios parámetros de mecanizado en la EDM de un compuesto $\text{Al-Mg}_2\text{Si}$ con objeto de conseguir la máxima tasa de eliminación de material y el mínimo desgaste del electrodo. Gopalakannan y Senthivelan [28] utilizaron la Metodología de la Superficie de Respuesta (RSM) [29] para analizar los efectos de los parámetros de EDM en el mecanizado de un compuesto de matriz metálica de aluminio reforzado con partículas de carburo de silicio. Sidhu et al. [30] investigaron la modificación de la superficie de tres materiales compuestos (65 vol % SiC/A356,2 , 10 vol % $\text{SiC-5 vol \% cuarzo/Al}$ y 30 vol % SiC/A359) mediante un proceso de EDM con adición de polvos de cobre y de grafito en el fluido dieléctrico.

Mecanizado de materiales tratados térmicamente: Se utiliza cada vez más en las industrias de herramientas, moldes y matrices, para el mecanizado de materiales tratados térmicamente que requieren una alta precisión, formas

complejas y buenos acabados superficiales [1]. En esta línea cabe destacar el trabajo de Dhobe et al. que investigaron la influencia de aplicar un tratamiento térmico a un acero para herramientas, mediante el estudio de su topografía superficial y de sus propiedades metalúrgicas [31], y el de Choi et al. en el que observaron que los tratamientos térmicos tras el proceso de electroerosión de corte por hilo mejoran la microestructura y la rugosidad superficial [32].

Modificación de la superficie: Aunque el principal objetivo de la EDM es la eliminación de material de la pieza de trabajo, este proceso de fabricación es también utilizado como método o tratamiento para modificar una determinada superficie y obtener unas determinadas características. Entre los principales métodos, Kumar et al. [33] destacan tres: modificación de la superficie con materiales de electrodos convencionales, modificación de la superficie con electrodos obtenidos por pulvimetalurgia y modificación de la superficie con dieléctricos mezclados con aditivos en forma de polvo.

Marafona y Wykes [34] proponen una nueva metodología para incrementar la tasa de eliminación de material para una relación dada de desgaste del electrodo. Dicha metodología se divide en dos etapas. En la primera de ellas, se suministran valores bajos de corriente y altos de tiempo de impulso para crear una capa de carbono sobre la superficie del electrodo que reduzca su desgaste. A continuación, en la segunda etapa, se aumentan los valores de corriente y se acorta el tiempo de impulso para aumentar la tasa de eliminación de material, mientras que el desgaste del electrodo es inhibido por la capa de carbono formada en la anterior etapa.

Wang et al. [35] utilizan electrodos de titanio o wolframio para reparar y endurecer superficies. Las partículas eliminadas de electrodo se fusionan con las partículas de carbono provenientes del dieléctrico, creando una capa de carburo de titanio o carburo de wolframio sobre la superficie de la pieza que es tres veces más dura que el material base. Este método, denominado como EDC (*Electrical Discharge Coating*), también ha sido utilizado por Moro et al. [36], quienes lo proponen como un método alternativo al recubrimiento por deposición química de vapor (CVD) o a la deposición física de vapor (PVD).

Asimismo, Chen et al. [37] denominaron a este método EDA (*Electrical Discharge Alloying*). En su estudio observaron que las superficies electroerosionadas con electrodos semi-sinterizados de Cu-W presentaron una mayor resistencia a la corrosión y una mayor dureza que aquellas en las que se empleó electrodo de cobre.

Ming y He [38] estudiaron los efectos de la adición de diferentes polvos en el dieléctrico. Los resultados obtenidos mostraron que la adición de dichos polvos mejoró la resistencia a la corrosión, la dureza y la resistencia al desgaste. Chen et al. [39] investigaron el efecto de utilizar diferentes dieléctricos para la EDM de las aleaciones de titanio. Los resultados mostraron que si se utiliza queroseno como dieléctrico, se forma una capa de carburo de titanio (TiC) sobre la superficie de la pieza, mientras que si se utiliza agua destilada, se produce una capa de monóxido de titanio (TiO).

2.1.4. Variantes del proceso

Las diferentes variantes del proceso de EDM surgen como respuesta a la demanda de la industria de mecanizar nuevos materiales y/o de conseguir geometrías cada vez más complejas. La principal y más extendida variante de EDM es la electroerosión de corte por hilo, también conocida como WEDM (*Wire-Cut EDM*). Este proceso está basado en la utilización de un electrodo en forma de hilo que atraviesa la pieza y cuyo movimiento puede controlarse de manera muy precisa por un sistema de control numérico. El electrodo y la pieza se encuentran sumergidos en un medio dieléctrico (generalmente, agua desionizada), y entre ellos se generan pulsos eléctricos. Cuando se aplica una diferencia de potencial adecuada, el dieléctrico se ioniza y la chispa creada hace que el material de la pieza se funda. Con el corte por hilo es posible mecanizar geometrías que por otros métodos convencionales de mecanizado (torneado, fresado y rectificado) no serían posibles [40]. Sus principales campos de aplicación se encuentran en la fabricación de herramientas [41], moldes para inyección de plástico y matrices [42], y en las industrias aeroespacial, automovilística y electrónica [43].

El texturizado por electroerosión, también conocido como EDT (*Electrical Discharge Texturing*) se puede emplear para el texturizado de cilindros para la producción de láminas metálicas utilizadas en la industria del automóvil [44]. En este proceso se disponen, en un medio dieléctrico, dos electrodos muy próximos al rodillo giratorio y, a continuación, se generan pulsos eléctricos. Cuando se ioniza el dieléctrico, la corriente fluye entre el electrodo y la pieza de trabajo, y las altas temperaturas alcanzadas funden el material del rodillo y generan burbujas en el dieléctrico. Al cesar las descargas, estas burbujas se rompen bajo la acción de la presión externa e implosionan sobre la pieza [45]. El texturizado por EDT permite la obtención de rodillos con una mayor consistencia y repetitividad, y con unos valores determinados de textura y rugosidad [46].

En el rectificado por electroerosión o EDG (*Electrical Discharge Grinding*) se realiza el rectificado sin contacto directo entre la herramienta y la pieza, y el arranque de material se lleva a cabo mediante descargas eléctricas. Estas características permiten mecanizar tanto materiales de extrema dureza como materiales finos y frágiles. En el EDG, el electrodo estacionario utilizado en EDM, es sustituido por una muela conductora, generalmente fabricada en grafito, cobre, latón o acero [47].

Shih y Shu estudiaron el mecanizado por EDG de un acero para herramientas AISI D2 y obtuvieron un valor de R_t de $2 \mu\text{m}$ mediante la selección de polaridad negativa y valores bajos de intensidad de corriente y tiempo de impulso [48]. Satyarthi y Pandey compararon la tasa de eliminación de material y la rugosidad superficial de un compuesto de alúmina, carburo de silicio y carburo de titanio ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}_w\text{-TiC}$) mecanizado por EDM y EDG. Los resultados obtenidos mostraron valores de MRR cuatro veces mayores con EDG que con EDM y una mejora en el acabado superficial de hasta cincuenta veces. Asimismo ninguno de los experimentos realizados mediante EDG obtuvo una rugosidad superficial superior a $0,5 \mu\text{m}$ [49].

El proceso de EDG, a su vez, presenta una variante denominada rectificado con muela con partículas abrasivas o EDAG (*Electrical Discharge Abrasive*

Grinding), en el cual el electrodo es reemplazado por una rueda abrasiva de metal. El EDAG es un proceso termo-mecánico que tiene lugar en dos fases: la primera fase es de conducción-difusión y, en ella, el material de trabajo se calienta localmente debido a la acción de las chispas producidas, lo que conduce al ablandamiento y la eliminación parcial de material de la pieza. A continuación, en la fase abrasiva, se produce la abrasión o rectificado de la pieza debido al movimiento relativo de la pieza con respecto a una muela giratoria [50]. Mediante este proceso, Choudhury et al. obtuvieron un aumento de la tasa de eliminación de material al aumentar la intensidad de corriente y el tiempo de impulso, y una disminución de la misma al aumentar el voltaje y el rendimiento [51], mientras que Koshy et al. observaron un aumento de la resistencia al desgaste con bajos valores de potencia de descarga [52].

El taladrado de agujeros por electroerosión o EDD (*Electrical Discharge Drilling*) utiliza los mismos principios que la electroerosión convencional, y se basa en la repetición de descargas eléctricas entre el electrodo y la pieza. Como fluido dieléctrico suele emplearse agua desionizada, y la presión de la limpieza suele ser de hasta diez veces mayor que la empleada en la EDM por penetración. Los electrodos utilizados son cilíndricos y huecos, y se encuentran en constante rotación durante el proceso [53], mientras que el fluido dieléctrico es succionado a través del interior del electrodo. Este proceso realiza, básicamente, las mismas funciones que un taladro de columna, aunque la precisión alcanzada es muy superior a la que pudiera obtenerse con éste.

El mecanizado electroquímico o ECM (*Electro Chemical Machining*) es un proceso no convencional de mecanizado que puede utilizarse también, a diferencia de la EDM, con materiales no conductores como vidrio, cuarzo y cerámicas, entre otros [54]. El ECM es un proceso de arranque de material por disolución anódica, cuyos principales campos de aplicación se encuentran en las industrias automovilística y aeronáutica [55].

2.1.5. Alternativas de mecanizado

El mecanizado por micro-EDM es una tecnología enfocada, principalmente, a la fabricación de micro-piezas de geometrías complicadas y micro-cavidades, cuyas principales aplicaciones se dan en la producción de micro-motores, instrumentación quirúrgica, micro-robots, micro-moldes [56] y piezas para las industrias óptica y electrónica [57].

Las características del proceso de micro-EDM son muy similares a las de la EDM convencional en la que el arranque del material se efectúa por la repetición de descargas eléctricas controladas entre un electrodo y una pieza que se encuentran en un medio dieléctrico. La principal diferencia entre ambos procesos reside en el tamaño del radio del canal de plasma que se forma en cada descarga. En la EDM convencional, el tamaño del electrodo es de varios órdenes de magnitud mayor que el radio del canal de plasma. Asimismo, el tamaño de dicho canal puede controlarse a través de la duración del pulso, siendo éste mayor cuanto mayor es dicha duración [58]. Por otro lado, en la micro-EDM, la sección tan pequeña del electrodo presenta una capacidad limitada de conducción de calor y una masa pequeña para disipar el calor generado en la zona de descarga y, por tanto, la energía suministrada en una única descarga está muy limitada [59]. En cada descarga, el electrodo se desgasta más en proporción a la electroerosión convencional y queda debilitado, siendo la reducción de la sección efectiva proporcional a la energía de descarga. Además, en la micro-EDM, la evacuación del material eliminado resulta más difícil debido a que el tamaño del *gap* es mucho menor, pero la viscosidad del fluido dieléctrico sigue siendo la misma que en la EDM convencional.

Por otra parte, la falta de estabilidad durante el proceso de EDM conduce a la formación de arcos eléctricos y cortocircuitos que pueden repercutir en la precisión del mecanizado, así como en el acabado superficial y en la mecanizabilidad de la pieza. Una de las claves para mantener dicha estabilidad es la correcta evacuación de la zona del *gap* de los restos de material fundido, tanto de la pieza como del electrodo [60]. Cuatro estrategias se presentan

como alternativas al mecanizado de EDM convencional para mejorar la estabilidad de las condiciones de mecanizado: el empleo de un campo magnético, la rotación de la herramienta, la adición de polvos en el fluido dieléctrico y la vibración a una frecuencia ultrasónica del electrodo.

Mediante el empleo de imanes dentro de la máquina convencional de EDM, se genera un campo magnético en la zona de mecanizado que conduce los restos de material fundido fuera de la zona del *gap* y reduce los pulsos inactivos (arcos eléctricos y cortocircuitos). Además, la creación del campo magnético ayuda a la ionización del dieléctrico [61]. Todo ello, contribuye a la estabilidad del proceso y a la mejora del acabado superficial, puesto que al ser evacuado de manera efectiva el material, éste no vuelve a solidificar sobre la superficie de la pieza. Lin y Lee [60] comprobaron que mediante esta técnica, la tasa de eliminación de material obtenida fue tres veces superior a la obtenida con un proceso de EDM convencional.

La rotación de la herramienta en EDM, que da lugar a un proceso que se denomina como *Rotary EDM*, es otro de los métodos para aumentar la estabilidad de las condiciones de mecanizado en EDM [62]. Varios estudios han evidenciado que la rotación del electrodo influye en el rendimiento de EDM [63], debido a que dicha rotación mejora las condiciones de evacuación de los restos de material que han sido eliminados tanto de la pieza como del electrodo.

Asimismo, otra técnica para aumentar la estabilidad en el mecanizado por EDM es la adición de polvos en el fluido dieléctrico. En los últimos años, la electroerosión con aditivos en polvo o PMEDM (*Powder Mixed Electrical Discharge Machining*) ha aumentado su popularidad respecto al EDM convencional debido a las mejoras obtenidas. Estas mejoras incluyen el aumento de la tasa de eliminación de material, reducción del desgaste del electrodo y de la rugosidad superficial, y mejora de la topografía superficial a través de la reducción de los poros, de las grietas y de la capa refundida [64]. La adicción de polvos disminuye la rigidez dieléctrica del fluido dieléctrico y

aumenta la distancia del *gap* entre el electrodo y la pieza, lo que conduce a un proceso más estable en comparación con la EDM convencional.

Por último lugar, en el mecanizado por EDM con vibración de la herramienta a frecuencia ultrasónica, la superficie vibrante del electrodo acelera la circulación del dieléctrico, lo que reduce el tiempo de mecanizado. Asimismo, las variaciones de presión en el *gap* conducen a descargas más efectivas que eliminan mayor cantidad de material de la superficie de la pieza [65]. Abdullah y Shabgard [66] demostraron que la aplicación de esta técnica da lugar a mayores tasas de eliminación de material, especialmente en regímenes de acabado, aunque también se obtienen mayores valores de desgaste de electrodo y de rugosidad superficial en comparación con la EDM convencional.

2.2. Materiales de difícil mecanizabilidad

En este apartado se analizan los principales materiales de baja mecanizabilidad que se fabrican por EDM.

De acuerdo a Kalpakjian y Schmid [67], la mecanizabilidad de un material se define en base a cuatro factores: acabado e integridad superficial de la pieza, duración de la herramienta, requerimientos de fuerza y potencia, y control de la viruta. Materiales como las cerámicas, las aleaciones de titanio, las aleaciones Inconel o las de tantalio son difíciles de mecanizar por métodos convencionales de mecanizado y se caracterizan por su resistencia al desgaste, resistencia a altas temperaturas y resistencia a la corrosión [68]. Asimismo, el mecanizado de este tipo de materiales está asociado, generalmente, con altos costes de mecanizado y una baja productividad. Esto se debe a la excesiva generación de calor en la zona de corte y a las dificultades en la disipación del calor, debido a la relativamente baja conductividad térmica de estos materiales. La alta dureza del material, que genera mayores fuerzas en los filos de corte de las herramientas, junto con las altas temperaturas alcanzadas en la zona de corte, conducen a un desgaste excesivo de la herramienta y, por tanto, a un

acortamiento de su vida útil así como a la generación de un mal acabado superficial [69].

Las aleaciones de base níquel denominadas Inconel® poseen un contenido en níquel superior al 50 % [70] y se caracterizan por sus buenas propiedades mecánicas, su resistencia a la corrosión y su excelente estabilidad térmica [71]. En comparación con las aleaciones de titanio, estas aleaciones tienen un rango más amplio de temperaturas de mecanizado, lo que las convierte en materiales más atractivos para su uso bajo condiciones extremas de temperatura [69]. Los principales usos de estas aleaciones son: componentes para turbinas de gas de aeronaves, componentes para turbinas de vapor de centrales eléctricas, en motores alternativos (turbocompresores, válvulas de escape, tapones, etc.), en el procesamiento de metales (moldes, matrices, herramientas de trabajo, etc.), aplicaciones médicas (prótesis, medicina dental, etc.), vehículos espaciales, industria química y petroquímica, equipos de tratamiento térmico [70] e industria nuclear [72], y equipos de procesamiento de alimentos [73], entre otros.

Sin embargo, estas aleaciones tienden a incrementar su dureza cuando la temperatura de corte sobrepasa los 650 °C [69]. Esta característica, junto con su baja conductividad térmica y su alto punto de fusión, dificulta el mecanizado de dichas aleaciones por métodos convencionales. Zhu et al. [71] estudiaron el desgaste de la herramienta en el mecanizado convencional de las superaleaciones de base níquel y observaron que dicho desgaste incluye el desgaste adhesivo, el desgaste abrasivo, el desgaste por difusión y el desgaste por oxidación.

Otro grupo de materiales de baja mecanización por métodos convencionales está formado por los materiales cerámicos avanzados, los cuales están constituidos principalmente de compuestos puros o semi-puros (óxidos, carburos o nitruros) y se caracterizan por su elevado índice de dureza, por su alta resistencia al desgaste y por su buena resistencia a la corrosión química. Estos compuestos son sometidos a procesos de conformado típicos de la pulvimetalurgia (prensado en seco, prensado isostático, moldeo en pasta,

extrusión y moldeo por inyección) y, posteriormente, a procesos de sinterización a temperaturas superiores a 1000 °C [23].

Los materiales cerámicos más ampliamente utilizados en la industria son el carburo de silicio (SiC), el carburo de boro (B₄C), el diboruro de titanio (TiB₂), la alúmina (Al₂O₃) y la zirconia (ZrO₂), entre otros. Todos ellos están ganando cada vez más importancia debido a sus aplicaciones en transporte, biomedicina y energía y, por ello, son objeto de estudio de muchos investigadores.

Así por ejemplo, Zhao et al. compararon el mecanizado por EDM del SiC con el de un acero SKD11 [74]. A su vez, estos mismos autores emplearon el proceso de EDM para cortar finas láminas de SiC. Tras los experimentos, observaron que el uso de polaridad negativa y pulsos de corta duración, eran las condiciones más adecuadas para conseguir una mayor velocidad de mecanizado y un menor desgaste de la herramienta [75].

K.K. Saxena et al. estudiaron el efecto de la tensión y la capacidad en el micro-mecanizado del SiC. Las condiciones óptimas para una alta tasa de eliminación de material fueron de 150 V y 0,4 μF, mientras que para un buen acabado superficial fueron de 150 V y 0,1 μF y para un bajo desgaste de electrodo de 110 V y 0,4 μF [76].

Luis et al. observaron la influencia de los parámetros más importantes que intervienen en el proceso de EDM sobre la mecanizabilidad y el acabado superficial del carburo de silicio con silicio infiltrado (SiSiC). La intensidad y la tensión de vacío resultaron ser los factores más influyentes en MRR, mientras que para el EW fueron la intensidad, el tiempo de impulso y la presión del dieléctrico [77]. En el caso de la rugosidad superficial, la intensidad, el tiempo de impulso y el rendimiento fueron los factores más significativos [78]. Asimismo, Puertas y Luis realizaron un estudio comparativo del mecanizado por EDM de tres cerámicas conductoras: carburo de boro prensado en caliente (B₄C), carburo de silicio infiltrado con silicio (SiSiC) y carburo de wolframio en matriz metálica de cobalto (WC-Co) [79] Entre los resultados que obtuvieron cabe destacar el efecto del aumento de la intensidad en la rugosidad

superficial, provocando un empeoramiento de la superficie en el caso del SiSiC y el WC-Co y un mejor acabado superficial en el caso del B₄C.

Patel et al. [80] observaron las características de mecanizado, la integridad superficial y el mecanismo de eliminación de un compuesto de alúmina, carburo de silicio y carburo de titanio (Al₂O₃-SiC_w-TiC) mecanizado mediante EDM. Schubert et al. [81] estudiaron el mecanizado por micro-EDM de la zirconia. Ferraris et al. [82] compararon el comportamiento de dos compuestos cerámicos conductores de base alúmina y zirconia sometidos a un proceso de micro-EDM. Los resultados obtenidos fueron aplicados en el mecanizado de una matriz.

Respecto a la EDM del TiB₂, no se encuentran investigaciones de dicho material cerámico como tal, por lo que el estudio realizado en la Tesis Doctoral se considera que presenta un alto interés. Si bien en los estudios encontrados, el TiB₂ forma parte de un compuesto cerámico. Ejemplo de ello son las investigaciones de Trueman y Huddleston [83]. Dichos autores estudiaron las condiciones de mecanizado necesarias para la formación de arcos eléctricos durante la EDM de dos compuestos cerámicos: carburo de silicio y diboruro de titanio (SiC-TiB₂ (7 % vol. TiB₂)) y, sialon y nitruro de titanio (sialon-TiN (30 % vol.TiN)). El estudio presentaba la termofractura como una alternativa al mecanismo convencional de eliminación de material, basado en la fusión y vaporización del material, con el objetivo de conseguir mayores arranques de material.

Malek et al. [84] evaluaron la relación entre la microestructura y las propiedades mecánicas tras el mecanizado por EDM de los compuestos B₄C-TiB₂ mediante el estudio de su mecanizabilidad y su calidad superficial. Para ello, analizaron muestras con diferentes porcentajes de TiB₂ y observaron que un mayor contenido de TiB₂ aumenta la conductividad eléctrica, mientras que la conductividad térmica está influenciada por el tamaño medio del grano del material compuesto.

2.3. Factores de influencia en el mecanizado por EDM

En el presente apartado se analiza la influencia de los factores más importantes que intervienen en el proceso de EDM.

2.3.1. Influencia de la polaridad en la EDM

La polaridad, positiva (+) o negativa (-), determina el sentido del movimiento de la corriente eléctrica y, en general, hace referencia al electrodo. Asimismo, tal y como indican Reza et al. [85], su influencia varía según los materiales del electrodo y las piezas a mecanizar, y su elección puede tener implicaciones significativas en la velocidad, el desgaste y la estabilidad del proceso, influyendo directamente en: la tasa de eliminación de material (MRR), el desgaste del electrodo (EW) y la rugosidad superficial (SR) de la pieza de trabajo.

Debido a su importancia, algunos autores han estudiado el efecto de la polaridad en el proceso de mecanizado por electroerosión. Así por ejemplo, Gostimirovic et al. [6] recomiendan polaridad positiva cuando se quieren obtener grandes tasas de eliminación de material y un bajo desgaste del electrodo, debido a la mayor masa de los cationes frente a los electrones que fluyen en el canal de plasma.

Beri et al. [86] estudiaron el efecto de la polaridad al electroerosionar una pieza de Inconel 718 con un electrodo cilíndrico de Cu-W obtenido por pulvimetalurgia. El efecto de dicho parámetro se midió a través de MRR, EW y SR. Los resultados mostraron que con polaridad positiva se obtuvieron las mayores tasas de arranque de material de la pieza y los menores desgastes del electrodo, mientras que con polaridad negativa se consiguieron los menores valores de rugosidad superficial.

Con polaridad positiva, los cationes son emitidos desde el electrodo e inciden en la pieza de trabajo. Debido a la mayor masa de éstos respecto a los electrones cargados negativamente, se produce mayor eliminación de material en la pieza en comparación con el desgaste sufrido en el electrodo [86].

Respecto a este último, se produjo el mismo efecto para las dos polaridades: una ligera disminución de su desgaste al aumentar la intensidad hasta llegar a un valor a partir del cual éste comenzó a aumentar. Esta ligera disminución se atribuye a la formación de capas de carburo en la superficie y a la menor energía de las chispas a baja intensidad de corriente. Al aumentar la intensidad, esta energía aumenta y rompe la capa de carburo, produciéndose el aumento del desgaste relativo del electrodo. Finalmente, la rugosidad superficial aumentó al aumentar la intensidad tanto para polaridad positiva como para negativa, aunque en este último caso, fue considerablemente menor [86].

Parshuramulu et al. [87] estudiaron también el efecto de la polaridad e intensidad a través de las variables MRR, EW, SR y la topografía superficial. En este caso, mecanizaron por EDM piezas de acero inoxidable con electrodo de cobre durante 20 minutos. Los resultados obtenidos indicaron que la intensidad tuvo un efecto directo tanto en MRR como en SR, las cuales aumentaron al aumentar la intensidad para el caso de las dos polaridades. No obstante, con polaridad positiva la tasa de eliminación de material fue muy superior a la conseguida con polaridad negativa. En cuanto a la topografía superficial, se caracterizó por la heterogeneidad en el tamaño de los cráteres debido a la energía variable de las chispas y por la formación de micro-grietas y bolsas de gas. Con polaridad negativa, se obtuvieron cráteres pequeños y poco profundos, mientras que con polaridad positiva fueron de mayor tamaño.

Ji et al. [88] estudiaron el efecto de la polaridad en la EDM de un material cerámico (SiSiC) con electrodo de cobre. En su caso, los resultados obtenidos fueron opuestos a los hallados por Gostmirovic et al. [6], Beri et al. [86] y Parshuramulu et al. [87], resultando las mayores tasas de eliminación de material y de rugosidad superficial con polaridad negativa. Estos resultados son atribuidos a la menor masa que tienen los electrones frente a los iones positivos. Al ser más ligeros, éstos son acelerados e impulsados sobre la pieza con mayor velocidad, lo que conduce a un mayor arranque del material de la pieza.

Tsai et al. [4] propusieron electrodos de Cr-Cu con diferentes porcentajes de cromo y compararon los efectos de la polaridad en la tasa de eliminación de material, el desgaste del electrodo y la rugosidad superficial. Los resultados obtenidos mostraron que los mayores valores de MRR se obtuvieron siempre con polaridad positiva, independientemente de la cantidad de cromo adicionada. Sin embargo, con polaridad negativa se obtuvo un mal acabado superficial al utilizar electrodos de Cr-Cu, debido a la adhesión de partículas de cobre y de cromo sobre la superficie electroerosionada.

Wang et al. [89] comprobaron el efecto de la polaridad en la formación de la capa refundida, la cual resultó de mayor profundidad con polaridad positiva.

2.3.2. Influencia del dieléctrico

El dieléctrico es otro de los elementos que intervienen en el proceso de EDM y cuyas principales funciones son la de actuar como aislante entre el electrodo y la pieza, la de concentrar la descarga en un punto, así como la de arrastrar las partículas ya erosionadas de la zona de trabajo y la de refrigerar el electrodo y la pieza [90]. Las propiedades físico-químicas del dieléctrico tienen gran influencia en el proceso de EDM y repercuten en la productividad y la calidad de las piezas [91].

Leao y Pashby [91] clasificaron el fluido dieléctrico en tres clases: los aceites minerales (compuestos de hidrocarburos derivados del petróleo), los dieléctricos de base agua y los dieléctricos gaseosos. Para las aplicaciones de EDM por penetración, los aceites minerales son los más utilizados en EDM porque favorecen la estabilidad y eficiencia del proceso [92], mientras que para micro-EDM y WEDM el dieléctrico más empleado es el agua desionizada [91]. Este dieléctrico se considera más respetuoso con el medio ambiente si se compara con los aceites minerales, aunque su uso para EDM por penetración conduce a bajas tasas de eliminación de material y altos desgastes de los electrodos [93], siendo éstos los motivos por los que no suele usarse en dichas aplicaciones.

Por otra parte, el uso de dieléctricos gaseosos, tales como aire u oxígeno, es cada vez más generalizado en aplicaciones que requieran muy buenas precisiones dimensionales. Su principal ventaja, según Chakraborty et al. [90], es el bajo desgaste del electrodo obtenido, independientemente de la duración del pulso seleccionada. Por ejemplo, Kunieda y Yoshida [92] observaron que el rendimiento del proceso de EDM utilizando como dieléctricos aire y oxígeno puede ser mejor, bajo ciertas condiciones, que utilizando un fluido líquido como dieléctrico. Skrabalak et al. [94] observaron que el uso de gas como dieléctrico es muy apropiado para el mecanizado de microcavidades y formas complejas porque al no producirse desgaste del electrodo, la precisión del mecanizado es mayor que si se utilizase un dieléctrico líquido. Zhang et al. [95] estudiaron la influencia de diferentes dieléctricos en el mecanismo de eliminación de material. Para ello, observaron la geometría de los cráteres resultantes tras la EDM, resultando diferentes formas en función del dieléctrico seleccionado. Finalmente, los dieléctricos en estado líquido resultaron los que mayor tasa de eliminación de material obtuvieron.

Otros autores añaden al fluido dieléctrico finas partículas abrasivas de distintos materiales para mejorar el acabado superficial e incrementar la distancia del *gap* entre la pieza y el electrodo. El tipo de partículas, su concentración y su tamaño influyen de manera directa en el rendimiento del proceso [96]. Wong y Lim [97] añadieron al dieléctrico partículas de diferentes materiales (grafito, disulfuro de molibdeno, silicio, carburo de silicio, aluminio y partículas de vidrio). Los experimentos en los que utilizaron grafito y silicio fueron aquellos que mejor acabado superficial obtuvieron. Peças y Henriques [96] observaron que el uso de polvo de silicio aumentó el tiempo de pulido, lo que redujo la rugosidad superficial. Kumar et al. [98] obtuvieron mayores tasas de eliminación de material y una menor rugosidad superficial mediante la adición de polvos de aluminio que redujeron la resistencia dieléctrica del fluido dieléctrico y, por lo tanto, aumentaron la distancia entre la pieza y el electrodo.

2.3.3. Influencia de los electrodos

El material del electrodo, su geometría y el desgaste que sufre durante el proceso son los principales aspectos que influyen en el rendimiento del proceso y en la mecanizabilidad del material. A continuación, se analiza cada uno de ellos.

En la EDM, los materiales más utilizados para la fabricación de electrodos suelen ser de dos tipos: materiales metálicos y grafito. Cuando se selecciona el material del electrodo deben tenerse en cuenta factores como su coste, el tipo de acabado requerido, su desgaste, su facilidad de mecanizado y el material de la pieza que se va a mecanizar, entre otros. La elección del material resulta de gran importancia porque afecta a las condiciones de mecanizado, lo que repercute en la tasa de eliminación de material y en el acabado superficial.

Asimismo, su elección también tiene un impacto directo en los costes económicos de fabricación de la pieza, de manera que una alta tasa de eliminación de material se traduce en tiempos de mecanizado más cortos y, por lo tanto, en un menor coste de la pieza. Sin embargo, si se produce una alta tasa de desgaste, es necesaria una mayor inversión económica y la pieza, finalmente, resultaría más cara. *A priori*, si se comparan los electrodos de cobre con los de grafito, los electrodos de cobre pueden considerarse más baratos si se tiene en cuenta sólo el coste del material. Pero como se ha dicho con anterioridad, deben tenerse en cuenta más factores para poder evaluar la economía del proceso.

Kumar et al. [99] observaron que el coste total del mecanizado de una pieza de acero para herramientas AISI P20 fue menor empleando electrodos de grafito que de cobre. Klocke et al. [100] compararon, en términos económicos, diferentes procesos de desbaste de material como el fresado, la EDM y el mecanizado electroquímico. Los costes se calcularon en función de MRR, de manera que también intervinieron el coste horario de la máquina y los costes salariales. Los resultados confirmaron que para el mecanizado del Inconel 718, la EDM es el proceso más económico para la fabricación de pequeños lotes de piezas.

Los electrodos de grafito se clasifican en grados y su rendimiento depende del tamaño de grano, la densidad y las propiedades mecánicas y eléctricas [101]. En general, los grados más finos están constituidos por granos más pequeños y con menor porosidad, lo que conducen a un mejor acabado superficial, un menor desgaste del electrodo y una mayor resistencia mecánica, pero dan tasas de eliminación de material algo menores que en comparación con los de grado más grueso [101].

Aas [101] comparó dos calidades de grafito (angstrofino y ultrafino) durante el mecanizado de álabes de turbina con base de níquel. Los resultados mostraron que cuanto menor es el tamaño de partícula del grafito, menor es el desgaste de los electrodos. En contraste, el electrodo con tamaño de partícula más grande dio lugar a valores más altos de MRR y, además, con un desgaste aceptable. Klocke et al. [102] seleccionaron cinco grafitos de diferentes grados para estudiar su influencia sobre la tasa de eliminación de material y el desgaste del electrodo. Los resultados revelaron que no existe una relación directa entre las variables de respuesta seleccionadas y el tamaño de grano, y se encontró que la conductividad eléctrica fue el factor más influyente en la MRR.

Dentro de los materiales metálicos, el cobre es uno de los más utilizados debido, principalmente, a su bajo coste. Otros materiales metálicos también empleados como electrodos son el wolframio y sus aleaciones (cobre-wolframio, plata-wolframio y carburo de wolframio). El wolframio es considerado uno de los materiales más idóneos para su uso como electrodo de EDM, debido a su elevada resistencia, dureza y punto de fusión. Sin embargo, su alto coste y dificultad de mecanizado son las principales razones por las que su uso no está tan generalizado en la industria. De acuerdo a Jha et al. [103], en general, los electrodos metálicos trabajan mejor con materiales con bajo punto de fusión como aluminio, cobre o latón, mientras que el grafito es el material más empleado en la EDM de aceros y sus aleaciones. No obstante, existen excepciones y entre la literatura existente se encuentran materiales electroerosionados con diferentes materiales de electrodo. Por ejemplo, para el caso de la aleación Inconel 718, Sandhu et al. [104] utilizaron electrodos de

grafito, mientras que Dhanabalan et al. [105] y Torres et al. [106] emplearon electrodos de cobre, y Beri et al. [86] utilizaron electrodos de Cu-W.

Payal et al. [107] seleccionaron electrodos de cobre, latón y grafito, y estudiaron su influencia en la MRR y en la rugosidad superficial de una superficie de acero para herramientas EN-31. Para valores altos de intensidad, el electrodo de cobre es el que mayor MRR obtuvo, mientras que los menores valores de rugosidad superficial se obtuvieron con el electrodo de latón. Singh y Singh [108] seleccionaron electrodos de cobre, latón y cobre-wolframio para el estudio de MRR, EW y de la rugosidad superficial de una aleación de Inconel 600. La tasa máxima de eliminación de material fue obtenida con electrodos de cobre, el mínimo desgaste de electrodo se obtuvo con electrodos Cu-W y los mejores acabados superficiales con los electrodos de latón. Beri et al. [109] compararon la microdureza de una superficie de Inconel 718 electroerosionada con electrodos de cobre y electrodos de Cu-W de diferente composición. Las superficies obtenidas con electrodos CuW2080 (Cu20%W80%) son las que presentaron un mayor incremento de microdureza respecto a la superficie original. Yilmaz y Okka [110] observaron que la utilización de electrodos con varios canales produjeron superficies más finas que las obtenidas con electrodos simples, y lo atribuyen a que las partículas del electrodo con varios canales expulsan adecuadamente los restos de material, estabilizan la repetición de las descargas y controlan la resolidificación del material fundido.

Otro de los aspectos objeto de estudio en la literatura existente es la influencia de la geometría del electrodo en la mecanizabilidad y acabado superficial de las piezas. Dhanabalan et al. [105] utilizaron electrodos de sección transversal circular, cuadrada y hexagonal, y midieron su influencia en la EDM de dos aleaciones de Ni-Cr, a través de la tasa de eliminación de material, el desgaste del electrodo y las tolerancias de forma (cilindricidad, circularidad, perpendicularidad y paralelismo). Los resultados obtenidos indicaron que la mayor MRR se obtuvo con electrodos hexagonales. Barthi et al. [111] estudiaron, entre otros factores, la influencia de la forma del electrodo en MRR, EW y la rugosidad superficial de una aleación Inconel 718 y electrodo de cobre. Sólo en el caso del acabado superficial, la forma del electrodo resultó ser un

parámetro influyente, obteniéndose mejor rugosidad superficial al emplear electrodo de sección circular. Sin embargo, Sengottuvel et al. [112] obtuvieron mejores resultados con geometrías rectangulares frente al resto de geometrías. Sohani et al. [113] observaron que la mejor forma del electrodo para obtener mayores tasas de eliminación de material y menores tasas de desgaste de electrodo en la EDM de un acero al carbono EN8 fue la circular, seguida de las formas triangulares, rectangulares y cuadradas. Por otra parte, Pellicer et al. [114] obtuvieron la mayor precisión dimensional con electrodos de formas cuadradas y rectangulares, mientras que los electrodos triangulares resultaron los más ineficientes debido a que presentaron un rápido desgaste en los bordes.

Uno de los principales problemas de los electrodos es su desgaste. Asimismo, la precisión del mecanizado está limitada por el desgaste del electrodo, que es consecuencia de las chispas generadas durante el proceso que eliminan material de forma simultánea tanto de la pieza como del electrodo [115]. Se pueden considerar cuatro tipos de desgaste del electrodo: desgaste longitudinal (DL), desgaste de esquina (DE), desgaste volumétrico (EW) y desgaste lateral [116], siendo los desgastes producidos en las esquinas y en los bordes los más evidentes [117]. Mohri et al. [118] evaluaron el proceso de desgaste del electrodo con el tiempo y consideraron dos etapas: el estado de transición, etapa que se produce al inicio del mecanizado y en la cual se produce la mayor parte del desgaste de los bordes del electrodo, y el estado estacionario, etapa en la que el deterioro del electrodo se ve afectado por los materiales que componen la pieza de trabajo. En ocasiones, el peso del electrodo tras el proceso de EDM es mayor que al inicio del mismo, es decir, el electrodo ha sufrido un desgaste “positivo”. Marafona [119] atribuye dicho incremento de peso a la migración de partículas de carbono del dieléctrico sobre la superficie del propio electrodo.

El problema de desgaste del electrodo ha sido abordado por diferentes autores que proponen diferentes alternativas para reducirlo. Murray et al. [120] consideraron que el problema de desgaste podía ser solventado utilizando series de electrodos. Mohri et al. [118] afirmaron que la precipitación de

partículas de carbono sobre la superficie del electrodo le protege del desgaste. Uhlman y Roehner [121] propusieron dos nuevos materiales de electrodo: diamante policristalino (PCD) y diamante CVD dopado con boro, y compararon su comportamiento frente al desgaste con materiales más comúnmente utilizados como electrodos (cobre, grafito y cobre-wolframio). Abdulkareem et al. [122] utilizaron nitrógeno líquido (a una temperatura de $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$) como refrigerante del electrodo de cobre para minimizar su fusión durante el proceso de EDM. Tras la experimentación, se observó que superficies en las que se empleó dicho refrigerante obtuvieron un mejor acabado superficial y el desgaste del electrodo fue menor que en aquellos experimentos en los que no se utilizó nitrógeno líquido.

2.3.4. Influencia de los parámetros eléctricos en las variables de respuesta

En el proceso de EDM intervienen una amplia cantidad de parámetros eléctricos que están relacionados con las condiciones de trabajo de la máquina. De todos ellos, los más importantes son: la intensidad suministrada por el generador (I), el tiempo de impulso (t_i), el tiempo de pausa (t_0), el rendimiento (η) y la tensión de vacío (U_0) [78]. A continuación, se define cada uno de ellos brevemente:

La intensidad de corriente (I) representa los diferentes niveles de potencia que puede suministrar el generador de la máquina de EDM, y se expresa en amperios (A). Su valor medio puede ser leído con un amperímetro durante el proceso, mientras que su valor máximo o intensidad de pico está limitado por la sección del electrodo.

El tiempo de impulso (t_i) representa la duración de tiempo, por cada ciclo, en el cual se permite el paso de la corriente eléctrica. Se mide en microsegundos (μs).

El tiempo de pausa (t_0) es la duración de tiempo que transcurre entre dos descargas consecutivas. Se mide en microsegundos (μs). Durante este tiempo

se produce la solidificación del material fundido y la expulsión de las partículas de material hacia fuera de la zona del *gap*.

El rendimiento (η) es el valor del porcentaje que representa el tiempo de impulso con respecto al tiempo total del ciclo, tal y como muestra la Eq. (1).

$$\eta = \frac{t_i}{t_i + t_0} * 100 \quad (1)$$

La tensión de vacío (U_0) es el valor de la tensión eléctrica aplicada entre el electrodo y la pieza antes de que se produzca la descarga eléctrica. Se mide en voltios (V).

Asimismo, la gran influencia que los parámetros eléctricos tienen en el proceso de EDM y cuyo control es muy importante para asegurar el éxito del proceso [123] ha motivado una gran cantidad de trabajos de investigación. Muchos de ellos analizan la influencia de dichos parámetros sobre las variables de respuesta más importantes que intervienen en el proceso de EDM: tasa de eliminación de material (MRR), desgaste volumétrico del electrodo (EW) y rugosidad superficial (SR) y, a su vez, tratan de alcanzar estrategias de mecanizado que maximicen MRR, o bien, minimicen EW y SR.

Asimismo, Beri et al. [86] estudiaron la influencia de la intensidad en el proceso de EDM de una pieza de Inconel 718 con electrodo de Cu-W. El efecto de dicho parámetro se midió a través de la tasa de eliminación de material, el desgaste relativo del electrodo y la rugosidad superficial de la pieza y del electrodo. Los resultados mostraron un aumento de MRR y de SR al aumentar la intensidad, debido al incremento de la energía de las chispas. Respecto a EW, se produjo una ligera disminución del desgaste al aumentar la intensidad hasta llegar a un valor a partir del cual éste comenzó a aumentar.

Caydas y Hasçalik [124] analizaron la influencia del tiempo de impulso, tiempo de pausa e intensidad de corriente en el desgaste del electrodo y en el espesor de la capa blanca de una pieza de Inconel 718. Los resultados indicaron que la

intensidad de corriente fue el factor más influyente en ambas variables de respuesta.

Puertas y Luis [125] estudiaron el mecanizado por EDM de varias cerámicas conductoras y, para ello, analizaron la influencia de la intensidad, el tiempo de impulso, el rendimiento, la tensión de vacío y la presión del líquido dieléctrico en la rugosidad superficial, la tasa de eliminación de material y el desgaste volumétrico del electrodo.

Dhanabalan et al. [105] analizaron la influencia de la intensidad de pico, el tiempo de impulso y el tiempo de pausa en la mecanizabilidad por EDM de las aleaciones Inconel 718 e Inconel 625. Kuppan et al. [53] observaron que la tasa de eliminación de material aumentaba al aumentar la intensidad y el rendimiento, mientras que la rugosidad superficial empeoraba al aumentar la intensidad y el tiempo de impulso. Aggarwal et al. [126] utilizaron la metodología de la superficie de respuesta para desarrollar modelos empíricos que permitiesen predecir la velocidad de arranque y la rugosidad superficial de una aleación Inconel 718, bajo distintas condiciones de tiempo de impulso, tiempo de pausa e intensidad de pico, entre otras. Chakravorty et al. [127] estudiaron la correlación entre dos variables de respuesta (MRR y EW) y determinaron las condiciones óptimas del proceso.

Vikas et al. [128] seleccionaron distintos valores del tiempo de impulso, tiempo de pausa, intensidad y tensión para comparar la mecanizabilidad (MRR) de dos aceros: EN19 y EN41. Nikalje et al. [129] determinaron la influencia del tiempo de impulso, el tiempo de pausa y la intensidad en la MRR, EW y SR de un acero maraging MDN 300. Keskin et al. [130] evaluaron los efectos de diferentes parámetros en la rugosidad superficial y observaron una gran influencia de la duración de la descarga debida, principalmente, al incremento de la energía liberada durante ese tiempo y a la expansión del canal de descarga.

Hourmand et al. [131] analizaron la influencia del tiempo de impulso, la intensidad, el rendimiento y la tensión en la tasa de eliminación de material, en

el desgaste relativo del electrodo y en la microestructura de un compuesto de matriz metálica Al-Mg₂Si.

Asimismo, para estudiar la influencia que unos determinados factores de diseño ejercen sobre las variables de respuesta que determinan la mecanizabilidad y acabado superficial del proceso de EDM, muchos autores utilizan modelos estadísticos basados en técnicas de Diseño de Experimentos (DOE). Estas técnicas permiten, con un número reducido de experimentos, estudiar los efectos de varios parámetros de manera simultánea sobre una variable de respuesta y, además, cuantificar dicha influencia. Entre los principales modelos que se encuentran en la literatura destacan el diseño de experimentos factorial, el método Taguchi y la Metodología de la Superficie de Respuesta (RSM), entre otros.

Así, por ejemplo, Luis et al. utilizaron el diseño de experimentos factorial para la planificación de los experimentos y para el análisis de la rugosidad superficial [78], la tasa de eliminación de material y el desgaste del electrodo [77] de una cerámica SiSiC mecanizada mediante EDM. Dastagiri y Kumar seleccionaron un diseño factorial 2³ con tres puntos centrales para el estudio de la MRR, EW y SR de un acero inoxidable EN41b [132], y Newton et al. un diseño factorial 2⁴ para determinar los factores más influyentes en la formación de la capa refundida de una aleación Inconel 718 [133].

Por otra parte, Pushpendra et al. emplearon el método Taguchi en su investigación sobre las características de mecanizado del Inconel 718 durante un proceso de EDM con electrodo de cobre [111]. Asimismo, dicho método también fue utilizado por Ghewade y Nipanikar para el diseño de la matriz de experimentos, el análisis de los parámetros de EDM y para predecir los valores óptimos de mecanizado [134].

Finalmente, la metodología de superficie de respuesta fue seleccionada por Çaydas y Hasçalik para la modelización y el análisis del desgaste del electrodo y del espesor de la capa blanca de un compuesto de titanio, aluminio y vanadio mecanizado mediante EDM [124]. Otros autores utilizaron dicha metodología en sus estudios sobre la mecanizabilidad de la aleación 718 por EDM. Así, por

ejemplo, Aggarwal et al. [126] observaron la influencia de diferentes parámetros de mecanizado en la rugosidad superficial y en la tasa de eliminación de un proceso de WEDM. Rajesha et al. [135] discutieron el efecto de la intensidad, el rendimiento, el *gap* y la presión del dieléctrico sobre la tasa de eliminación de material y la rugosidad superficial. Mohanty et al. [136] observaron que el material del electrodo, la intensidad y el tiempo de impulso fueron los factores más influyentes en MRR y en la rugosidad superficial y, además, propusieron un algoritmo para la optimización de dichas respuestas.

2.3.5. Características de las superficies electroerosionadas

Las superficies resultantes tras el proceso de electroerosión se caracterizan por la disposición aleatoria de cráteres, micro-grietas y gotas resolidificadas [110], y en ellas, se pueden distinguir tres capas: la capa superficial “salpicada” de gotas resolidificadas, la capa blanca y la capa afectada por el calor, también denominada HAZ (*Heat-Affected Zone*) [33]. Muchos autores han centrado sus investigaciones en el estudio de la topografía superficial y de la microestructura de las superficies electroerosionadas. Entre ellas, cabe destacar la de Ay et al. [137], que estudiaron la topografía superficial de una aleación de Inconel 718 tras el proceso de EDM. Dicha superficie se caracterizaba por la aparición de grietas y gotas fundidas de material, y observaron que este fenómeno podría reducirse disminuyendo la intensidad de corriente y acortando el tiempo de impulso.

Rajendran et al. [138] analizaron la formación de grietas y la forma esférica de la capa resolidificada de una superficie de acero para herramientas. Encontraron que la formación de grietas fue debida, principalmente, a las propiedades del material base, al desgaste de los electrodos y a la capa resolidificada. Rajesha et al. [139] observaron que las propiedades del material base, la composición de la capa blanca y los parámetros del proceso tuvieron una influencia significativa en la formación y propagación de grietas, e identificaron grietas alrededor de cráteres y picos y una mayor propagación de éstas en el sentido perpendicular a la dirección del electrodo.

Newton et al. [140] descubrieron que la energía de las chispas, la corriente máxima de descarga y su duración fueron los parámetros más influyentes en la formación de la capa refundida. Resultados similares fueron obtenidos por Ay et al. [137] durante la micro-EDM de una aleación de Inconel 718, en la cual observaron que la disminución de la corriente de descarga y el acortamiento de la duración del pulso pueden reducir grietas y daños de las superficies electroerosionadas.

Pradhan et al. [141] encontraron que el aumento de la intensidad de corriente y del tiempo de impulso provocaban un deterioro de la topografía superficial y un aumento del espesor de la capa blanca. Al aumentar la duración del tiempo de impulso, el calor penetró en la subsuperficie a una mayor profundidad, lo que produjo una mayor fusión de material y, en consecuencia, un espesor mayor de la capa blanca. Conforme se redujo la energía de descarga, la capa blanca fue más continua, uniforme y más fina [142]. Carvalho [143] afirmaba que la capa blanca posee una alta dureza y resistencia al desgaste debido al efecto del enfriamiento del dieléctrico y de la penetración de carbono durante el proceso. Además, consideraba que la integridad y uniformidad de dicha capa dependen, en gran medida, del material del electrodo y de los parámetros eléctricos, dando como resultado una mayor transformación de la superficie cuanto mayor es la energía de descarga.

2.4. Tendencias futuras

En los últimos años, el proceso de EDM ha sufrido numerosas mejoras que lo han posicionado como uno de los procesos de fabricación más populares en el mecanizado de materiales de extrema dureza y geometrías complejas. Asimismo, el desarrollo e implantación en las industrias de nuevos materiales y aleaciones, así como la necesidad de fabricar componentes de formas cada vez más complicadas, hacen que este método de fabricación esté en constante desarrollo.

Algunos autores señalan que el futuro de la electroerosión sigue dos tendencias. La primera de ellas busca aumentar la productividad del proceso con mayor potencia por chispa y con mayor fiabilidad, y la segunda, está encaminada a la micro-mecanización de formas geométricas (micro-EDM). Por otra parte, Rajurkar [144] indica como futuras tendencias la mecanización de materiales avanzados, la obtención de superficies con acabado tipo espejo mediante la adición al dieléctrico de aditivos en polvo, el mecanizado por EDM con vibración de la herramienta a frecuencia ultrasónica y, por último, el control y automatización del proceso. Para Mohd Abbas et al. [145], los trabajos de investigación futuros tratarán acerca de mejorar la capacidad de rendimiento del mecanizado, obtener un mejor producto de salida, desarrollar técnicas para la mecanización de nuevos materiales y conseguir mejores condiciones de trabajo. Asimismo, Ho y Newman [3] recogen todo lo anterior y dividen los futuros desarrollos de la EDM en cuatro áreas de investigación, las cuales son: optimización de las variables del proceso (parámetros eléctricos, parámetros no eléctricos y diseño y fabricación de electrodos), control y monitorización del proceso, mejora del rendimiento del proceso tratando de maximizar la tasa de eliminación de material y minimizar el desgaste del electrodo y la rugosidad superficial y, finalmente, el desarrollo de nuevas variantes del proceso y nuevos materiales.

2.5. Recapitulación

En el presente capítulo se ha realizado una revisión de los principales aspectos relacionados con el proceso de electroerosión por penetración. A modo de recapitulación se puede remarcar que:

- El proceso de EDM presenta un alto interés para el mecanizado de materiales de difícil mecanizabilidad. Debido a la naturaleza del proceso, el arranque de material se produce por efecto del calor, de modo que es independiente de la dureza del material, no siendo así de sus propiedades eléctricas y térmicas.

- El generador es uno de los elementos más importantes de la máquina de electroerosión, siendo los generadores de relajación y los transistorizados los más utilizados hoy en día. Los primeros permiten la obtención de tiempos de impulsos muy cortos por lo que se emplean, principalmente, en micromecanizado o cuando se requieren muy buenos acabados superficiales [12]. Sin embargo, presentan el inconveniente de que no se pueden mantener altas frecuencias de descarga que aumenten la capacidad de arranque de material debido al tiempo necesario que requiere la carga del condensador [11]. Este problema se solventa con los generadores transistorizados, que son los más utilizados, en la actualidad, para la EDM convencional.
- Tradicionalmente, las principales aplicaciones industriales de la EDM se encuentran en el mecanizado de moldes y matrices [15]. Asimismo, a estas aplicaciones se añaden otras “nuevas” fruto del desarrollo tecnológico de las industrias aeroespacial, automovilística [15] y quirúrgica [16]. Estas nuevas aplicaciones incluyen el micro-mecanizado y el mecanizado de nuevos materiales como los materiales cerámicos avanzados, los materiales compuestos avanzados y los materiales tratados térmicamente, entre otros [3].
- La falta de estabilidad durante el proceso de EDM puede llegar a producir arcos eléctricos y cortocircuitos que influyan en la precisión y el rendimiento del mecanizado [60]. Por ello, se plantean diferentes estrategias para mejorar dicha estabilidad entre las que destacan el empleo de un campo magnético [61], la rotación de la herramienta [62], la adición de polvos en el fluido dieléctrico [64], y la vibración del electrodo en el rango de los ultrasonidos [65].
- La influencia de la polaridad varía según los materiales del electrodo y las piezas a mecanizar, y su elección puede tener implicaciones significativas en la velocidad, el desgaste y la estabilidad del proceso [85].

- En la EDM convencional, los dieléctricos más ampliamente utilizados son los aceites minerales compuestos de hidrocarburos derivados del petróleo porque favorecen la estabilidad y eficiencia del proceso [92], mientras que para micro-EDM y WEDM el dieléctrico más ampliamente utilizado es el agua desionizada [91].
- El material, la forma, el coste y el desgaste son algunos de los factores más importantes a tener en cuenta cuando se selecciona un electrodo, porque dicha elección afecta a las condiciones de mecanizado así como al coste final del producto [103].
- Las superficies resultantes tras el proceso de electroerosión se caracterizan por la disposición aleatoria de cráteres, micro-grietas y gotas resolidificadas como resultado de las descargas eléctricas producidas durante dicho proceso [110].
- El principal objetivo de la EDM es la eliminación de material de una determinada pieza. Sin embargo, también se está utilizando para modificar las superficies y obtener unas determinadas características. Para ello, se proponen tres métodos: modificación de la superficie con materiales de electrodo convencionales, modificación de la superficie con electrodos obtenidos por pulvimetalurgia y modificación de la superficie con dieléctricos mezclados con polvos en suspensión [33].

CAPÍTULO 3

Planificación de la experimentación

3. PLANIFICACIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN

En el presente capítulo se describe la metodología empleada para la planificación y ejecución de los experimentos, así como los factores de diseño y variables de respuesta seleccionadas para el estudio de la mecanizabilidad y del acabado superficial de los materiales seleccionados. Además, se describen los equipos, los materiales y los electrodos utilizados en la experimentación.

3.1. Diseño de la experimentación

Para el diseño de la experimentación se van a emplear técnicas estadísticas basadas en el diseño de experimentos, en inglés, *Design Of Experiments* (DOE). Los modelos de dichos diseños son modelos estadísticos cuyo objetivo es averiguar, con un número reducido de experimentos, si unos determinados factores influyen en una variable de interés y cuantificar dicha influencia.

Como se ha comentado anteriormente, en la presente Tesis Doctoral se estudia la aplicabilidad del proceso de electroerosión por penetración para la fabricación de materiales de difícil mecanizabilidad. Para ello, se estudia el efecto de los factores de diseño más importantes que intervienen en dicho proceso, sobre unas variables de respuesta previamente determinadas. En general, para este tipo de experimentación los diseños factoriales resultan ser los diseños de experimentos más eficientes [29] ya que permiten conocer simultáneamente qué efecto tienen k factores sobre una respuesta y descubrir si existe interacción entre ellos. Además, estos experimentos están planteados de forma que se varían simultáneamente varios factores pero se evita que se cambien siempre en la misma dirección. Al no haber factores correlacionados, se evitan experimentos redundantes. Además, los experimentos se complementan de tal modo que la información buscada se obtiene combinando las respuestas de todos ellos.

Los parámetros de diseño considerados en la presente Tesis Doctoral son: la intensidad suministrada por el generador (I), el tiempo de impulso (t_i), el rendimiento (η) y la polaridad, ya que son los factores más ampliamente

utilizados y de mayor importancia en el campo de la electroerosión por penetración [78]. Tal y como se ha mostrado en el Apartado 2.3.4. de la Tesis Doctoral, la intensidad suministrada por el generador (I (A)) se define como el valor correspondiente a la intensidad de pico que se aplica entre el electrodo y la pieza de trabajo. El tiempo de impulso (t_i (μs)) es la duración que se deja actuar la corriente por ciclo, y finalmente, el rendimiento de ciclo (η) representa el tanto por ciento del tiempo de impulso respecto al tiempo total de ciclo. Asimismo, el tiempo total de ciclo se calcula como la suma del tiempo de impulso y el tiempo de pausa.

Finalmente, la polaridad es la designación del potencial eléctrico positivo o negativo al electrodo. Su influencia varía según los materiales del electrodo y las piezas a mecanizar, y su elección influye en la velocidad, el desgaste y la estabilidad del proceso, como se recoge en el trabajo de Reza et al. [146]. Todos estos factores se controlan desde la máquina de electroerosión y se irán variando en función de las condiciones de mecanizado seleccionadas.

Por otra parte, la tensión de vacío (U_0 (V)), definida como el valor de la tensión aplicada entre la pieza de trabajo y el electrodo justo antes de que se produzca la descarga, y la presión del dieléctrico (P (kPa)), se mantendrán constantes en 200 V y 30 kPa, respectivamente, durante todos los experimentos. Estos valores son los que comúnmente se emplean en el proceso de electroerosión y han sido seleccionados en base a ensayos previos, tomando como referencia las experiencias de otros autores como las de Torres et al. en el mecanizado de aleaciones Inconel [106] y las de Luis et al. en el mecanizado de materiales cerámicos [147].

Las condiciones seleccionadas son las que determinarán las características tecnológicas del material, que en este caso son: la rugosidad superficial (SR), la tasa de eliminación de material (MRR) y el desgaste volumétrico del electrodo (EW). Estas dos últimas se calculan de acuerdo a la Eq. (2) y la Eq. (3), respectivamente.

$$MRR = \frac{\text{Volumen de material eliminado de la pieza}}{\text{tiempo de mecanizado}} \quad (2)$$

$$EW = \frac{\text{Volumen de material eliminado del electrodo}}{\text{Volumen de material eliminado de la pieza}} * 100 \quad (3)$$

Para el caso de estudio de la aleación Inconel® 600 con diferentes materiales de electrodo y polaridades, se ha seleccionado un diseño factorial 4^3 , con 3 factores de diseño (intensidad, tiempo de impulso y rendimiento) y con 4 niveles cada uno, dando un total de 64 experimentos. Estos mismos 64 experimentos se realizarán tanto para polaridad positiva como para negativa, y para cada uno de los materiales de electrodo seleccionados (Cu, C y Cu-C). Los niveles de los factores seleccionados para cada pareja de materiales pieza-electrodo y para cada una de las polaridades quedan recogidos en el capítulo 4 de la presente Tesis Doctoral.

Por otra parte, para los materiales cerámicos TiB_2 y $SiSiC$, el diseño seleccionado ha sido un diseño factorial 2^3 con cuatro puntos centrales, siendo 3 el número de factores de diseño (intensidad, tiempo de impulso y rendimiento), y cada uno de ellos con dos niveles de variación, dando un total de 12 experimentos. Asimismo, para el modelo de segundo orden se han añadido seis puntos estrella adicionales (dos puntos estrella por cada factor), dando un total de 18 experimentos. En el caso de los materiales cerámicos se ha estudiado, previamente a la realización de los experimentos, la polaridad que ha conducido a una mayor estabilidad del proceso, que para el TiB_2 ha sido positiva, mientras que para el $SiSiC$ ha sido negativa. En este último caso, la polaridad seleccionada coincide con la empleada por Puertas et al. en sus estudios sobre la mecanizabilidad [77] y sobre la rugosidad superficial [78] de la EDM de la citada cerámica con electrodo de cobre. Los niveles de los factores seleccionados para cada uno de los materiales se recogen en el capítulo 5 y en el capítulo 6, respectivamente.

3.2. Equipos empleados

El equipo empleado para llevar a cabo la EDM de los diferentes materiales seleccionados en la presente Tesis Doctoral es una máquina convencional de electroerosión por penetración del tipo ONA DATIC D-2030-S (ver Fig. 3.1). Las condiciones de ensayo de este tipo de máquinas así como la terminología y designación de ejes queda definida en la norma UNE 15600-1:2005 [148] y en su equivalente, la norma internacional ISO 11090-1:2014 [149].

Para asegurar la correcta limpieza y evacuación de las partículas procedentes de la erosión de ambos electrodos, se ha utilizado una lanza lateral articulada, tal y como puede observarse en la Fig. 3.2. El dieléctrico empleado para todos los experimentos planificados ha sido aceite mineral, con una presión de de 30 kPa.



Fig. 3.1. Máquina de electroerosión por penetración ONA DATIC D-2030-S

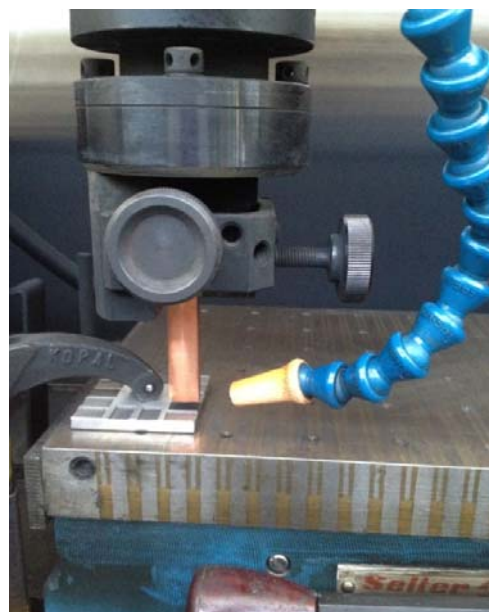


Fig. 3.2. Limpieza con lanza lateral

Cada experimento ha consistido en un proceso de mecanizado simple en el que el electrodo penetra en la pieza de manera repetida. Para el caso de la EDM del Inconel® 600, se ha programado el proceso siguiendo el siguiente criterio: o bien alcanzar una profundidad máxima de mecanizado de 1 mm, o bien, alcanzar una duración de tiempo máximo de 3 horas. Asimismo, para los materiales cerámicos TiB_2 y $SiSiC$, se ha seleccionado una profundidad

máxima de 0,5 mm, o bien, una duración máxima de 2 horas. La duración de los experimentos ha sido seleccionada en base a experiencias previas que permitieron comprobar que dicho espacio de tiempo es suficiente para la evaluación de MRR, EW y SR. Por otra parte, la selección de la profundidad máxima es debida al espesor de los diferentes materiales.

Como se ha comentado anteriormente, cada uno de los experimentos se ha realizado de acuerdo a unos valores previamente establecidos de intensidad, tiempo de impulso y rendimiento que han sido diferentes para cada una de las parejas de material y de polaridad seleccionadas, tal y como se recoge en los capítulos 4, 5 y 6 de la presente Tesis Doctoral. En el caso de los valores de tiempo de impulso y de rendimiento, éstos han sido seleccionados tanto en base a la experiencia propia y a la de otros investigadores, como en base a la realización de pruebas previas. Para el caso de la intensidad, los valores han sido seleccionados en función del tamaño del electrodo, tal y como recomienda el fabricante de la máquina de electroerosión utilizada en la realización de los experimentos. De acuerdo a la información facilitada por dicho fabricante, la intensidad máxima admisible no debe superar 10 A/cm^2 . En este caso, los electrodos empleados han tenido una sección transversal de 8 mm x 12 mm y la intensidad máxima admisible no debía ser superior, por tanto, a 9,60 A.

Antes y después de la realización de cada experimento, se han recogido los datos de los pesos tanto de la pieza como del electrodo. Para la medida del peso se ha utilizado una balanza analítica electrónica Mettler Toledo XS 104, tal y como puede observarse en la Fig. 3.3. Dicha balanza tiene una precisión de $0,04 \text{ mg} + 2 \cdot 10^{-7} \cdot \text{peso}$. La balanza dispone de una pantalla LCD que permite la lectura directa del peso con una precisión de hasta cuatro decimales y unos cristales protectores que aíslan la pieza de cualquier corriente de aire, permitiendo una mayor precisión.



Fig. 3.3. Balanza analítica Mettler Toledo XS 104

Se ha seguido el mismo procedimiento de medida del peso para todos los experimentos, de manera que se han realizado tres mediciones de cada pieza y cada electrodo, antes y después de cada experimento y, posteriormente, se ha calculado la media aritmética de los tres. La pérdida de peso medio de ambos materiales se ha utilizado para calcular la tasa de eliminación de material (MMR) y el desgaste volumétrico del electrodo (EW), de acuerdo a la Eq. (2) y la Eq. (3), respectivamente.

Una vez realizados todos los experimentos y calculado las variables de tasa de eliminación de material y desgaste volumétrico del electrodo, se ha medido la rugosidad superficial de cada una de las huellas resultantes tras el proceso de EDM. Se han realizado, de cada huella, cinco mediciones paralelas y equidistantes a lo largo del área y, se ha calculado la media aritmética de las cinco.

Para la medición de los parámetros de rugosidad se ha utilizado un rugosímetro de palpador móvil ALPA SM-Rt-70, con una precisión del 5 %, tal y como se observa en la Fig. 3.4.

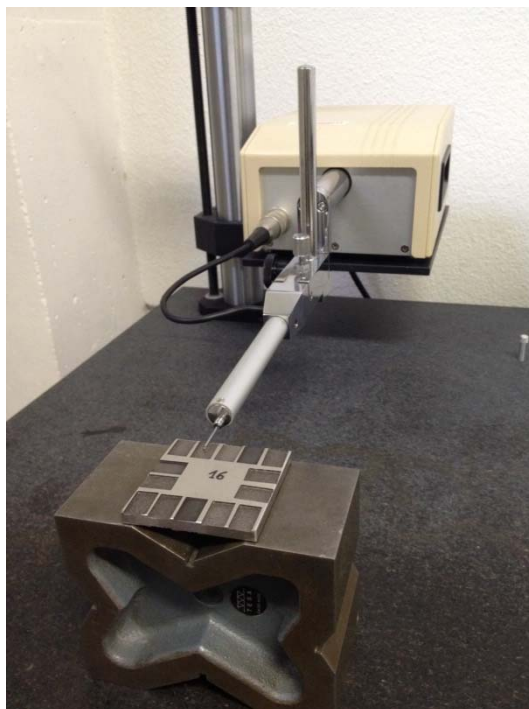


Fig. 3.4. Rugosímetro electrónico de palpador móvil ALPA SM-Rt-70

El rugosímetro explora la superficie mediante un palpador que ejerce una fuerza de 0,12 mN y en cuya punta hay un cono de diamante, que forma un ángulo de 90° y tiene un radio en su extremo de 3 μm. La velocidad de avance de la unidad a la hora de realizar la medición ha sido de 1 mm/s, mientras que la velocidad de retorno ha sido de 2 mm/s.

Previo a la medición de la rugosidad superficial, es necesario definir la longitud de evaluación o longitud de medida (l_n) que se calcula de acuerdo a la Eq. (4).

$$l_n = n * l_r \quad (4)$$

Donde, l_r es la longitud de muestreo y n es el número de trayectos de la longitud de muestreo. Según se recoge en la norma UNE-EN ISO 4287:1999 [150], el valor de la longitud de muestreo del perfil de rugosidad es igual en valor numérico al valor adoptado para el cut-off (λ_c), que en este caso, y de acuerdo a las normas UNE 82305-2:1991 [151] e ISO 2632-2:1985 [152], es de 0,8 mm. En el caso del número de trayectos de la longitud de muestreo la norma recomienda seleccionar un valor de 5, con lo que la longitud de medida

ha sido de 4 mm. En lo que respecta al filtro, se ha empleado un filtro gaussiano cuyas características se describen en la norma UNE-EN ISO 16610-21 [153].

Los parámetros de rugosidad que se han estudiado en la presente Tesis Doctoral son: la desviación media aritmética del perfil de rugosidad (R_a), la desviación media cuadrática del perfil de rugosidad (R_q), la altura total del perfil de rugosidad (R_t), la anchura media de los elementos del perfil (S_m) y, finalmente, el contador de picos (P_c), ya que son los parámetros de rugosidad más importantes y que más comúnmente se emplean, actualmente, en la industria. Todos estos parámetros quedan definidos en base a las normas UNE-EN-ISO 4287:1999 [150] y UNE-EN-ISO 4287:1999/A1:2010 [154]. Los tres primeros parámetros se denominan parámetros de amplitud y son los parámetros más importantes para caracterizar la topografía superficial. Se utilizan para medir las características verticales de las desviaciones de la superficie. Por otra parte, S_m y P_c se denominan parámetros de espaciamiento y se basan en medidas horizontales. Mediante el control de los parámetros de espaciamiento es posible obtener una mejor delimitación de acabados y unos acabados más uniformes de los recubrimientos [155].

Asimismo, se define R_a , según la Eq. (5), como la media aritmética de los valores absolutos de las ordenadas “ $Z(x)$ ” comprendidas en una longitud de muestreo “ l_r ”, donde “ $Z(x)$ ” es la altura del perfil evaluado en una posición cualquiera “ x ” [150]. Este parámetro es considerado como el parámetro de rugosidad superficial más universalmente utilizado para controles de calidad.

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (5)$$

El parámetro R_q se define, según la Eq. (6), como la media cuadrática de los valores de las ordenadas “ $Z(x)$ ” que están comprendidas en una longitud de muestreo [150].

$$Rq = \frac{1}{lr} \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^2(x) dx} \quad (6)$$

Se define el parámetro Rt , según la Eq. (7), como la suma de la mayor altura de pico (Zp) y de la mayor profundidad de valle (Zv) del perfil, comprendidas en la longitud de evaluación " ln " [150]. Cabe destacar que a diferencia de los otros dos parámetros de amplitud Ra y Rq , el parámetro Rt no es un parámetro promediado, y además, tal y como se ha indicado en su definición, se mide sobre la longitud de evaluación y no sobre la longitud de muestreo como Ra y Rq .

$$Rt = \text{máx} (Zp + Zv) \quad (7)$$

El parámetro Sm se define, según la Eq. (8), como el valor medio de las anchuras de los elementos del perfil " Xs ", comprendidas en una longitud de muestreo [150].

$$Sm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i \quad (8)$$

Y, finalmente, el parámetro Pc o número de picos se define, según la Eq. (9), como el número de las anchuras medias de los elementos del perfil " Sm " en una longitud de referencia " L " [154]. Pc queda determinado por dos líneas paralelas a la línea central a una distancia del 5 % el valor del máximo pico o valle. Cada ciclo del perfil entre intersecciones del perfil y la línea media, en los que un pico cae por encima de la línea de recuento superior y un valle adyacente cae por debajo de la línea de recuento inferior, se cuenta como un pico.

$$Pc = \frac{L}{Sm} \quad (9)$$

3.3. Materiales

Los materiales utilizados en los experimentos de electroerosión han sido la aleación níquel-cromo denominada como Inconel® 600 y las cerámicas diboruro de titanio (TiB_2) y carburo de silicio infiltrado con silicio ($SiSiC$). Todos estos materiales, que se muestran en la Fig. 3.5, se caracterizan por sus buenas propiedades mecánicas, por su resistencia a la corrosión y por su extrema dureza a altas temperaturas. Asimismo, el comportamiento durante el mecanizado de cada uno de ellos varía considerablemente, debido tanto a sus propiedades físicas como a la naturaleza química del material y al proceso que se lleva a cabo durante su fabricación, lo que obliga a su estudio individualizado. La selección de estos materiales se ha realizado en base a la demanda y el gran interés que diferentes industrias presentan en este tipo de materiales, debido a sus buenas propiedades físicas y químicas que posibilitan su uso en numerosas aplicaciones industriales. A continuación, se describen las propiedades y características de cada uno de ellos.

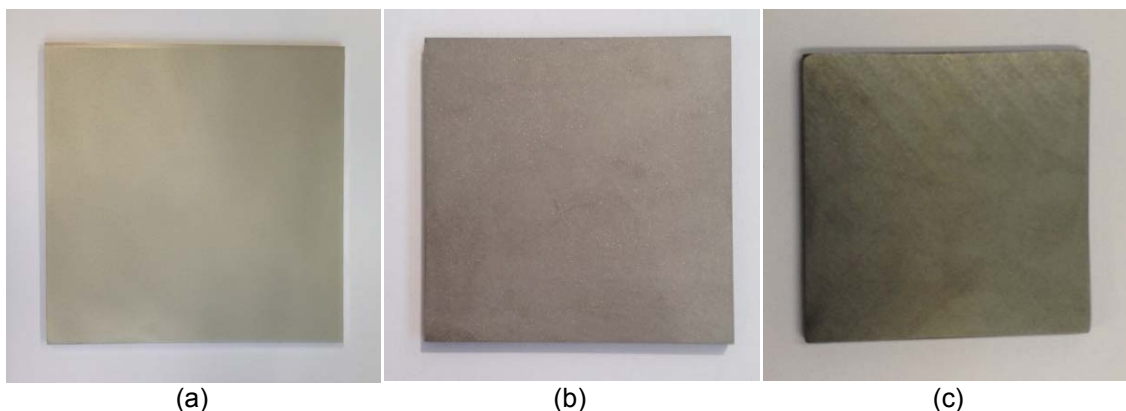


Fig. 3.5. Materiales empleados: (a) Inconel® 600, (b) TiB_2 , (c) $SiSiC$

Como ya se ha indicado, la aleación Ni-Cr-Fe denominada como Inconel® 600 es una marca registrada de *Special Metals Corporation*. Esta aleación se caracteriza por su buena resistencia a la oxidación y a la corrosión, incluso a altas temperaturas, y por sus buenas propiedades mecánicas [156], que quedan detalladas en la Tabla 3.1. Además, su alto contenido en níquel proporciona a dicha aleación una buena resistencia a las soluciones corrosivas, mientras que el cromo le confiere resistencia a las condiciones oxidantes a

altas temperaturas. En la Tabla 3.2 se muestra la composición química del Inconel® 600. Como puede observarse, el cromo es el principal aleante, y como se ha comentado, su presencia es importante para garantizar la resistencia a la corrosión a altas temperaturas. El resto de aleantes son necesarios para garantizar la resistencia a altas temperaturas, especialmente la resistencia a la fluencia [157]. Asimismo, el Inconel® 600 se puede utilizar en una gran variedad de aplicaciones que van desde temperaturas criogénicas a temperaturas por encima de 1000 °C [156].

Propiedades físicas	Densidad	8,47 g/cm ³
	Punto de fusión	1643 K-1698 K (1370 °C-1425 °C)
Propiedades mecánicas	Alargamiento	< 50 %
	Dureza Brinell	120-290
	Módulo de elasticidad	157 GPa
	Resistencia a cizalladura	420 MPa-570 MPa
	Resistencia a tracción	600 MPa-1200 MPa
Propiedades eléctricas	Resistividad eléctrica	103·10 ⁻⁸ Ωm
Propiedades térmicas	Calor específico a 293 K (23 °C)	444 J/kgK
	Coefficiente de dilatación térmica	11,5·10 ⁻⁶ K ⁻¹ -13,3·10 ⁻⁶ K ⁻¹
	Conductividad térmica a 293 K (23 °C)	14,8 W/mK

Tabla 3.1. Principales propiedades del Inconel® 600 [158]

Ni (+ Co)	Cr	Fe	C	Mn	S	Si	Cu
72 mín.	14 - 17	6 - 10	0,15	1	0,015	0,50	0,50

Tabla 3.2. Composición química (%) del Inconel® 600 [156]

Sin embargo, estas aleaciones son difíciles de mecanizar por las mismas razones que las hacen buenos materiales para resistir altas temperaturas. Sus características metalúrgicas como la presencia de partículas abrasivas en su microestructura y su elevado valor de endurecimiento por deformación, son algunas de las características que dificultan su mecanizado por procesos convencionales [159]. Además, la baja conductividad térmica [160] de este tipo

de aleaciones hace que sea difícil dispersar con eficacia el calor generado durante el mecanizado [161]. La dureza de las aleaciones de níquel se incrementa por encima de 650 °C, es decir, la pieza aumenta su dureza al aumentar la temperatura durante el proceso de corte [162]. Por todo ello, el mecanizado por electroerosión por penetración es uno de los procesos más adecuados para su fabricación.

Asimismo, todas estas propiedades lo convierten, hoy en día, en un material único con gran demanda en las industrias aeronáutica, química, médica y nuclear, entre otras [70]. Se utiliza, principalmente, en componentes de hornos, en procesos químicos y de alimentación, en la ingeniería nuclear [158] y, en general, en aplicaciones donde se requiera resistencia a altas temperaturas [163].

El diboruro de titanio (TiB_2) es un material cerámico de elevada dureza que se caracteriza por su alta resistencia al desgaste y su alta resistencia mecánica a temperaturas elevadas, así como por su buena conductividad térmica y eléctrica [164]. Las principales propiedades del TiB_2 se recogen en la Tabla 3.3. No obstante, estas propiedades dependen de su proceso de fabricación, de la pureza en el proceso de síntesis y de la porosidad de la pieza final. El diboruro de titanio tiene un punto de fusión muy elevado (2980 °C) [158] y es resistente a la oxidación en aire hasta, aproximadamente, los 1000 °C. A altas temperaturas, es un buen conductor, conduciendo a temperaturas mayores que 1800 °C en el vacío y a 1900 °C en atmósfera inerte. Su buena conductividad eléctrica es debida a los electrones libres de red que transportan la carga eléctrica de manera similar a los materiales metálicos [23].

Además, posee una alta densidad, que combinada con una resistencia a la compresión y un módulo de elasticidad elevados, conducen a su utilización en elementos de blindaje. Asimismo, resiste a la mayoría de los reactivos y tiene una excelente humectabilidad y estabilidad en metales líquidos como el aluminio o el zinc. Esto, combinado con su alta conductividad eléctrica conducen a su uso en células Hall-Héroult para la producción de aluminio [158].

Sin embargo, los costes económicos asociados a las altas temperaturas de sinterización (2000 °C) necesarias para alcanzar su densidad teórica han limitado sus aplicaciones [165]. Actualmente, su uso está limitado a aplicaciones especializadas como elementos de blindaje, herramientas de corte, crisoles [166], piezas resistentes al desgaste y recubrimientos, entre otros [167].

Propiedades físicas	Densidad	4,5 g/cm ³
	Punto de fusión	3253 K (2980 °C)
Propiedades mecánicas	Dureza Vickers	30 GPa
	Módulo de tracción	520 GPa-570 GPa
	Resistencia a cizalladura	300 MPa-600 MPa
Propiedades eléctricas	Resistividad eléctrica a 298 K (25 °C)	15 · 10 ⁻² Ωm
Propiedades térmicas	Coefficiente de dilatación térmica	6 · 10 ⁻⁶ K ⁻¹ -7 · 10 ⁻⁶ K ⁻¹
	Conductividad térmica a 293 K (20 °C)	50 W/mK-70 W/mK

Tabla 3.3. Principales propiedades del TiB₂ [158]

El tercero de los materiales que se estudian en la presente Tesis Doctoral es el carburo de silicio infiltrado con silicio (SiSiC) y obtenido por reacción REFEL F®, que es su marca registrada más común. Esta cerámica es considerada como uno de los materiales cerámicos más prometedores en el campo de la ingeniería debido a su combinación de excelentes propiedades físicas y mecánicas tales como baja densidad (3,1 g/cm³), alta dureza, y muy buena resistencia a la corrosión incluso a altas temperaturas [168]. Además, su elevada conductividad térmica (150 W/mK-200 W/mK) combinada con un coeficiente de dilatación térmica bajo [169] (4,3 · 10⁻⁶ K⁻¹-4,6 · 10⁻⁶ K⁻¹) permite una buena resistencia al impacto térmico [78]. Las principales propiedades del SiSiC se recogen en la Tabla 3.4.

El principal inconveniente de los materiales cerámicos es que la mayoría de ellos no son suficientemente conductores para ser mecanizados por EDM. De acuerdo a Luis et al. [77], la resistividad eléctrica de las cerámicas debe ser menor de 100 Ωcm-300 Ωcm para que puedan ser electroerosionadas. Como

la mayoría de las cerámicas sinterizadas, el carburo de silicio presenta una alta resistividad eléctrica ($10^3 \Omega\text{cm}$ - $10^5 \Omega\text{cm}$) que impide ser mecanizada por EDM. Sin embargo, la infiltración de silicio consigue disminuir la resistividad eléctrica del material hasta $10 \Omega\text{cm}$ sin afectar las propiedades mecánicas del mismo [168].

Su proceso de fabricación consiste en la infiltración de silicio en un bloque preformado de polvo de carburo de silicio y carbono, que es sometido posteriormente a un proceso de curado. Esto produce aproximadamente un 10 % de silicio libre, que rellena los poros. La microestructura resultante tiene una porosidad baja y un grano muy fino [170].

Sus principales aplicaciones incluyen componentes destinados a soportar altas temperaturas como intercambiadores de calor, componentes de motores [168], elementos de turbinas de gas, hornos, cojinetes y juntas de alta temperatura, entre otros [171]. También es muy generalizado su uso en la industria biomédica, en la industria electrónica y en la industria óptica para la fabricación de espejos para telescopios [169]. Todas estas excelentes propiedades que lo han convertido en un material muy versátil para innumerables aplicaciones industriales, así como la dificultad que su mecanización conlleva por métodos convencionales, son las principales razones que han motivado su estudio.

Propiedades físicas	Densidad	3,1 g/cm ³
Propiedades mecánicas	Dureza Vickers	25 GPa-35 GPa
	Módulo de tracción	410 GPa
	Resistencia a la compresión	2000 MPa-3500 MPa
Propiedades eléctricas	Resistividad de volumen a 298 K (25 °C)	$10 \cdot 10^{-2} \Omega\text{m}$
Propiedades térmicas	Coefficiente de dilatación térmica	$4,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ - $4,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
	Conductividad térmica a 293 K (20 °C)	150 WmK-200 W/mK

Tabla 3.4. Principales propiedades del SiSiC [158], [168]

Para la realización de toda la experimentación, se han empleado placas de 50 mm x 50 mm x 5 mm en todos los casos, a excepción del diboruro de titanio, cuyas dimensiones han sido de 50 mm x 50 mm x 3 mm.

3.4. Electrodo

Los materiales utilizados como electrodos para electroerosión son, generalmente, de grafito, cobre y aleaciones de cobre, debido a que estos materiales tienen una alta temperatura de fusión y una excelente conductividad térmica y eléctrica [4]. Estas propiedades definen la idoneidad del material para ser utilizado como electrodo, ya que de ellas depende, en buena parte, el desgaste que el electrodo pueda sufrir durante el proceso de EDM. Asimismo, en términos generales, puede establecerse que, cuanto mayor es el punto de fusión del material, menor es su desgaste. Por otro lado, como el calor se produce de manera localizada, una buena conductividad térmica permite que éste se difunda rápidamente por el resto del electrodo y, por tanto, no se alcancen temperaturas tan elevadas.

En la presente Tesis Doctoral los electrodos seleccionados para la EDM del Inconel® 600 son: cobre (Cu), grafito (C) y grafito con cobre infiltrado (Cu-C). Para la electroerosión del diboruro de titanio y del carburo de silicio infiltrado con silicio se han seleccionado como materiales el cobre y el grafito con cobre infiltrado, respectivamente. La elección de dichos materiales se ha realizado en base a pruebas preliminares en las cuales se vio que eran los que mejor se comportaban y daban lugar a procesos estables de mecanizado.

En todos los casos, se han utilizado electrodos con forma prismática de dimensiones 8 mm x 12 mm, tal y como muestra la Fig. 3.6. A continuación, se describen las propiedades y características más importantes de cada uno de electrodos seleccionados.

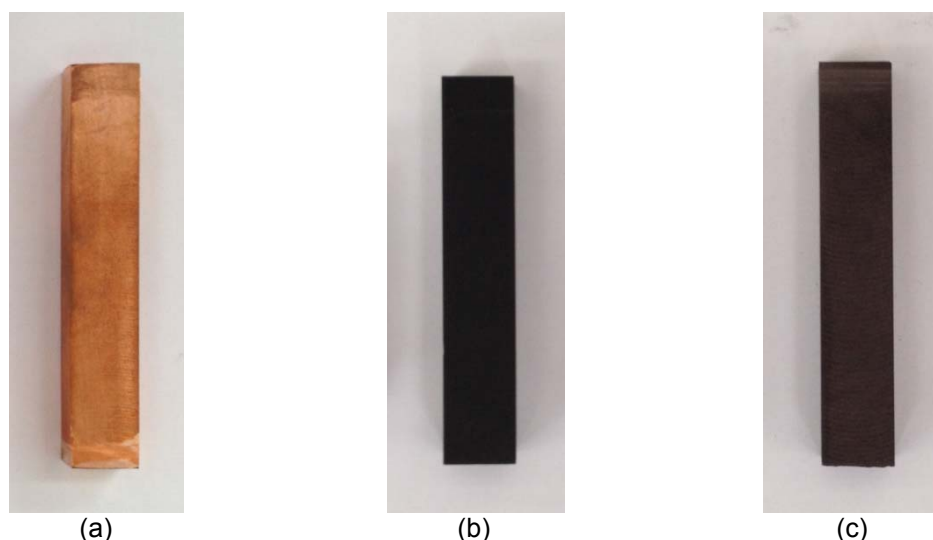


Fig. 3.6. Electrodo empleados: (a) Cu, (b) C, (c) Cu-C

El cobre electrolítico es uno de los materiales más utilizados como material de electrodo debido a su buena resistividad eléctrica ($1,7 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$), principalmente, a su bajo precio en relación con otros materiales y a su facilidad para ser pulido [108]. Sin embargo, tiene un punto de fusión bajo ($1083 \text{ }^\circ\text{C}$) y un coeficiente de dilatación térmica ($16 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) superior al del grafito. Su densidad es de $8,96 \text{ g/cm}^3$. Debido a su integridad estructural, el cobre puede producir acabados superficiales muy finos. Esta misma integridad estructural también hace a los electrodos de cobre altamente resistentes a la formación de arcos eléctricos cuando la limpieza es insuficiente [99].

El grafito es también uno de los materiales más empleados como electrodo. De hecho, cerca del 95 % de las aplicaciones de EDM en USA utilizan grafito como material de electrodo [172]. Sin embargo, en Europa y Japón suelen preferir el cobre debido a su mayor “limpieza”, aunque actualmente el uso del grafito está aumentando [172]. En la presente Tesis Doctoral, se han utilizado electrodos de grafito POCO EDM1®, una marca registrada de *Poco Graphite, Inc.* El grafito EDM1 es un grafito de grano ultrafino con un tamaño medio de partícula menor a $5 \mu\text{m}$, que proporciona una buena resistencia al desgaste, velocidad y acabado. Su densidad es de $1,66 \text{ g/cm}^3$ y tiene una temperatura de sublimación muy alta ($3600 \text{ }^\circ\text{C}$ - $3700 \text{ }^\circ\text{C}$). Las principales propiedades de dichos electrodos se muestran en la Tabla 3.5.

Tamaño medio de las partículas	< 5 μm
Resistencia a la flexión	68,2 MPa
Resistencia a la compresión	99,8 MPa
Dureza Shore	69 Shore
Resistividad eléctrica	$19,3 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$

Tabla 3.5. Principales propiedades del grafito Poco EDM1 [173]

Finalmente, el último material de electrodo seleccionado es el grafito con cobre infiltrado, concretamente se han utilizado electrodos de grafito POCO EDM-C3®, una marca registrada de *Poco Graphite*, Inc. El grafito EDM-C3 es un grafito de alta calidad y grano ultrafino con un tamaño medio de partícula menor a 5 μm . El fabricante recomienda utilizar este tipo de electrodo para compensar la inexperiencia del operador o cuando las condiciones de flujo de dieléctrico no son buenas. Además, el EDM-C3 proporciona una buena resistencia al desgaste y grandes tasas de arranque de material con buenos acabados superficiales. Su densidad es de 3,05 g/cm³ y tiene una temperatura de sublimación muy alta (3600 °C-3700 °C). Las principales propiedades de dichos electrodos se muestran en la Tabla 3.6.

Tamaño medio de las partículas	< 5 μm
Resistencia a la flexión	14,27 MPa
Resistencia a la compresión	19,93 MPa
Dureza Shore	66 Shore
Resistividad eléctrica	$3,2 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$

Tabla 3.6. Principales propiedades del grafito Poco EDM-C3 [173]

Una vez que se han definido las principales características de los materiales a electroerosionar y de los electrodos empleados, se procederá a analizar los resultados obtenidos tras la realización de los experimentos.

CAPÍTULO 4

Análisis del mecanizado por EDM del Inconel® 600

4. ANÁLISIS DEL MECANIZADO POR EDM DEL INCONEL® 600

En este capítulo se aborda el estudio del mecanizado mediante electroerosión por penetración (EDM) de la aleación de Ni-Cr-Fe denominada como Inconel® 600. Esta aleación es una marca registrada de *Special Metals Corporation* que se caracteriza por su buena resistencia a la oxidación y a la corrosión, incluso a altas temperaturas, y por sus buenas propiedades mecánicas que lo convierten en un material ampliamente utilizado en las industrias nuclear, química y electrónica, entre otras [156].

El presente capítulo recoge los resultados obtenidos al emplear tanto distintos materiales en los electrodos (cobre, grafito y cobre-grafito), como polaridades positiva y negativa. Además, se ha determinado la influencia del material de electrodo y de su polaridad en: la tasa de eliminación de material (MRR), el desgaste volumétrico del electrodo (EW) y la rugosidad superficial (SR). Esta última se ha caracterizado mediante los parámetros más comúnmente empleados en la industria que son: Ra, Rq, Rt, Sm y Pc. A partir de lo anterior, el trabajo realizado engloba tanto el estudio de la mecanizabilidad de la aleación Inconel® 600, al variar el tipo del electrodo y su polaridad, como la calidad superficial obtenida en dicha aleación, aspectos cuyo conocimiento se considera que pueden resultar de gran interés para aplicaciones industriales. A su vez, todos estos parámetros han sido estudiados en función de tres de los factores de diseño que generalmente se emplean en este tipo de procesos: intensidad suministrada por el generador (I), tiempo de impulso (t_i) y rendimiento de ciclo (η). El control de estos parámetros permitirá establecer las condiciones óptimas de mecanizado, dentro del rango de variación considerado.

El análisis llevado a cabo en el presente capítulo se ha considerado de interés, debido a que existe un reducido número de trabajos en la literatura relacionados con el mecanizado por EDM de la presente aleación. Los resultados que se recogen en este capítulo han sido ya objeto de difusión en publicaciones especializadas: [175] y [176]. Dichas publicaciones muestran la influencia, tanto de la polaridad como la de los citados parámetros, en la EDM

de una aleación Inconel® 600 en la que se ha empleado electrodo de cobre [175] y electrodo de grafito [176].

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los electrodos y polaridades que se han relacionado anteriormente.

4.1. Mecanizado con electrodo de cobre

En el presente apartado se aborda, en primer lugar, el estudio de la electroerosión del Inconel® 600, empleando electrodos de cobre y polaridades positiva y negativa. Para determinar los valores de los factores de diseño que se analizan en este apartado y que se recogen en la Tabla 4.1, se han realizado diversos ensayos previos sobre el material con objeto de determinar qué condiciones conducían a la estabilización del proceso, ya que se determinó que no era posible emplear cualquier régimen de mecanizado debido a la presencia de cortocircuitos y arcos eléctricos que provocaban un mal acabado superficial. Asimismo, se ha tenido en cuenta las experiencias previas de otros autores como Ghewade y Nipanikar [134], y Barathi et al. [177] en la EDM de otras aleaciones de Inconel, como por ejemplo el Inconel 718, a pesar de no ser coincidentes con el presente caso de estudio. En dichos trabajos, se ha estudiado la influencia de diversos factores de diseño en la mecanizabilidad y la rugosidad superficial de la citada aleación.

Cabe destacar que los valores de intensidad están limitados por la sección del electrodo, tal y como se ha indicado en el capítulo 3 dedicado a la planificación de la experimentación. En la Tabla 4.1 se muestran los valores de los parámetros de diseño y los niveles seleccionados. Como puede observarse, se han utilizado los mismos valores para las dos polaridades, debido a que conducen a regímenes estables en el proceso de EDM.

Parámetro de diseño	Unidad	Niveles y valores							
		Polaridad positiva				Polaridad negativa			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Intensidad	A	2	4	6	8	2	4	6	8
Tiempo de impulso	µs	50	200	350	500	50	200	350	500
Rendimiento		0,4	0,6	0,8	0,9	0,4	0,6	0,8	0,9
Tensión	V	200							
Presión del dieléctrico	kPa	30							

Tabla 4.1. Parámetros de diseño y niveles seleccionados para el caso de la EDM del Inconel® 600 con electrodo de cobre y polaridades positiva y negativa

Para llevar a cabo los experimentos, se han utilizado técnicas de Diseño de Experimentos (DOE), concretamente se ha empleado un modelo factorial 4³. Los valores medios de los resultados experimentales obtenidos para ambas polaridades quedan recogidos en la Tabla 4.2.

E	Polaridad positiva (+)							Polaridad negativa (-)						
	MRR (mm ³ /min)	EW (%)	Ra (µm)	Rq (µm)	Rt (µm)	Sm (µm)	Pc (1/cm)	MRR (mm ³ /min)	EW (%)	Ra (µm)	Rq (µm)	Rt (µm)	Sm (µm)	Pc (1/cm)
1	0,1563	2,79	1,23	1,54	9,88	67,60	151,40	0,0188	41,61	2,76	3,53	20,23	104,40	95,20
2	3,5308	0,86	4,37	5,38	30,89	105,60	95,80	0,0407	28,79	1,85	2,34	13,91	98,60	102,00
3	5,8814	0,90	4,93	6,08	35,81	108,80	92,00	0,0566	23,77	1,79	2,31	14,86	97,00	105,20
4	9,1398	1,22	6,01	7,55	41,09	108,80	92,80	0,0842	62,82	2,19	2,73	14,72	122,00	90,20
5	0,1306	1,75	1,57	2,01	13,10	77,40	131,00	0,0308	32,87	1,48	1,90	12,98	91,80	111,40
6	2,4925	-0,10	4,82	6,04	34,04	146,00	71,80	0,2321	17,79	2,48	3,19	19,66	124,40	83,60
7	5,7680	0,13	6,40	8,03	45,12	237,40	59,80	0,3377	17,54	3,28	4,17	24,77	198,00	65,60
8	10,4006	-0,05	7,77	9,68	50,88	187,00	57,00	0,4971	17,52	3,39	4,36	25,98	167,80	64,20
9	0,1116	2,05	1,68	2,11	12,40	72,80	147,40	0,0324	32,44	1,52	1,97	13,46	82,40	122,80
10	1,5043	0,23	3,88	5,05	29,67	175,40	59,40	0,2706	13,85	2,44	3,16	19,42	128,20	86,20
11	3,6742	-0,04	5,40	6,81	37,37	233,60	56,40	0,4253	13,94	3,03	3,90	23,01	183,00	66,60
12	7,6308	-0,05	7,64	9,56	49,97	234,40	54,20	0,5102	16,21	4,34	5,54	32,75	199,80	50,80
13	0,1020	2,12	1,83	2,30	14,87	71,80	140,00	0,0400	29,89	1,62	2,06	14,06	99,20	102,00
14	0,9081	-0,06	2,79	3,64	23,21	219,00	57,60	0,3239	11,24	3,30	4,19	25,83	119,00	83,80
15	2,0160	-0,10	4,29	5,33	28,06	206,00	49,40	0,4204	11,98	3,09	3,91	24,84	165,60	73,00
16	5,6939	-0,13	7,05	8,78	48,12	191,20	52,00	0,5840	13,64	4,00	5,20	31,39	150,80	70,60
17	0,2117	2,68	1,39	1,74	10,35	66,40	149,60	0,0128	59,42	2,47	3,14	18,11	95,80	104,80
18	4,8347	0,83	4,18	5,19	30,14	102,40	99,00	0,0630	28,74	1,77	2,20	13,04	105,00	95,80
19	8,8715	0,83	5,32	6,61	36,16	116,40	86,60	0,0674	28,66	1,94	2,48	14,72	109,20	92,20
20	16,0638	0,99	6,32	7,98	45,10	125,20	81,40	0,1041	19,64	2,28	2,81	16,32	126,60	81,60
21	0,0936	2,27	1,51	1,95	12,58	71,40	141,00	0,0633	30,34	1,56	1,99	14,02	81,60	122,80
22	6,3133	0,00	4,57	5,68	31,25	142,40	74,60	0,3287	17,81	2,77	3,49	20,76	134,60	77,00
23	6,7386	0,12	6,37	7,84	38,73	168,00	63,80	0,5698	15,79	2,86	3,57	19,77	162,40	68,40
24	12,7257	0,08	7,55	9,37	48,98	178,60	59,60	0,6508	18,01	3,57	4,54	25,18	197,20	64,00
25	0,1216	1,29	1,53	1,99	12,77	73,00	138,60	0,0458	37,14	1,67	2,16	14,33	93,20	106,60
26	1,8990	-0,18	4,90	6,29	39,27	182,60	62,40	0,3459	14,07	2,59	3,29	20,28	143,60	80,80
27	4,7358	-0,13	6,47	8,00	42,47	205,20	55,00	0,5140	14,40	2,88	3,70	23,14	163,60	77,00
28	11,0685	-0,12	7,72	9,56	52,18	241,20	51,60	0,7483	15,91	4,46	5,75	34,80	189,20	55,60
29	0,0599	1,41	1,90	2,40	15,49	80,20	136,60	0,0544	39,06	1,80	2,33	15,02	100,20	106,20
30	1,1022	-0,14	2,85	3,72	23,23	161,80	67,20	0,4004	11,47	2,80	3,48	20,48	131,40	81,20
31	2,7238	-0,14	4,11	5,47	33,61	215,40	55,40	0,5876	12,60	3,35	4,29	26,54	167,20	68,60
32	7,6553	-0,17	7,20	8,94	44,86	237,60	49,80	0,8181	13,88	3,89	5,07	30,43	145,60	69,80
33	0,2812	3,69	1,22	1,53	9,69	61,60	162,40	0,0361	44,28	2,16	2,76	15,30	94,40	106,40
34	6,5588	0,62	4,36	5,46	33,63	97,80	103,00	0,0757	28,13	1,75	2,22	14,44	105,20	95,40
35	12,0178	0,60	4,74	5,94	34,09	102,40	97,60	0,0666	26,26	2,10	2,76	18,26	100,20	98,80

36	16,7905	0,72	5,91	7,27	38,30	123,40	81,40	0,1067	27,60	2,47	3,05	17,52	160,00	75,00
37	0,1221	1,28	1,45	1,85	12,63	74,20	136,40	0,0838	30,83	1,48	1,93	15,14	84,00	126,40
38	3,8520	0,04	4,84	6,09	34,19	138,40	81,00	0,4410	17,33	3,08	3,81	22,05	122,20	81,80
39	7,8351	0,13	5,88	7,35	37,95	154,60	69,40	0,7018	16,08	3,48	4,54	29,78	156,00	71,60
40	15,8770	0,02	7,81	9,54	49,05	156,00	60,20	0,9546	16,86	3,54	4,43	24,77	197,40	56,00
41	0,1342	0,89	1,58	2,00	12,03	81,60	122,40	0,0285	48,75	1,45	1,88	13,63	81,40	123,20
42	2,3022	-0,05	4,12	5,29	32,11	205,40	62,60	0,4120	15,67	2,93	3,77	25,24	140,20	78,80
43	6,0178	0,00	5,65	7,00	38,57	227,80	53,60	0,6277	14,45	3,41	4,33	25,78	184,60	65,40
44	12,9930	0,02	7,33	9,29	51,17	207,60	55,60	1,0480	16,45	4,01	5,02	28,67	188,60	56,00
45	0,9161	0,16	1,68	2,12	13,84	79,00	127,00	0,0368	39,10	1,64	2,08	13,59	95,80	105,00
46	1,1955	-0,09	3,12	4,09	25,43	196,40	59,40	0,4883	11,78	2,74	3,55	24,12	124,20	85,20
47	3,1665	-0,07	4,25	5,56	34,34	206,20	56,40	0,6888	12,82	3,17	4,05	23,64	147,60	78,80
48	8,7553	0,01	6,07	7,73	44,18	224,40	49,80	1,8621	7,40	4,07	5,30	34,41	183,40	62,60
49	0,2404	3,80	1,11	1,39	8,80	62,80	159,60	0,0759	41,24	1,84	2,31	12,85	87,80	113,20
50	6,6884	0,59	4,74	5,90	32,52	106,20	94,00	0,1050	23,59	2,58	3,33	23,72	115,40	87,80
51	12,3593	0,59	5,57	7,00	40,88	139,40	77,80	0,0756	26,09	2,16	2,79	17,75	129,40	81,60
52	22,4729	0,75	5,56	7,04	40,42	123,00	82,20	0,1311	27,44	2,51	3,24	20,07	142,80	76,60
53	0,1887	1,33	1,36	1,72	10,46	68,40	148,20	0,0779	30,09	1,58	2,01	13,32	92,80	110,40
54	4,6843	0,01	5,00	6,24	36,16	160,40	70,60	0,5330	15,85	3,30	3,93	23,77	138,60	74,80
55	8,6889	0,00	5,64	7,03	36,71	193,20	66,40	0,7966	14,22	4,22	5,31	29,40	205,00	61,00
56	17,5732	0,01	6,75	8,46	45,30	155,40	64,40	1,0433	14,66	4,70	5,92	35,79	201,40	51,60
57	0,1441	0,83	1,59	2,03	13,55	77,40	130,20	0,0397	35,93	1,33	1,75	12,28	79,40	126,60
58	2,3914	-0,12	3,87	4,94	30,50	154,80	64,00	0,4896	14,49	2,61	3,35	20,92	140,20	84,40
59	11,1059	-0,04	5,32	6,73	39,31	195,40	58,60	0,7567	14,06	3,65	4,61	26,09	154,20	66,20
60	13,8904	-0,19	6,57	8,07	47,68	218,80	50,00	1,2224	14,33	4,16	5,36	31,78	178,20	54,60
61	0,1712	0,38	1,48	1,88	12,49	92,00	109,40	0,0364	36,90	1,85	2,33	14,24	107,00	97,40
62	1,3530	-0,11	2,94	3,80	23,17	226,00	57,80	0,5122	12,25	2,84	3,59	21,60	144,20	69,80
63	3,3349	-0,22	4,13	5,57	36,05	302,00	50,60	0,7464	12,25	3,37	4,41	27,92	150,60	64,60
64	8,9152	-0,09	6,61	8,36	43,50	225,80	46,60	1,0891	13,01	4,38	5,57	35,71	283,00	55,40

Tabla 4.2. Resultados experimentales con electrodo de cobre para polaridad positiva y negativa

A continuación, y a partir del DOE planteado, se analizan los resultados obtenidos para cada una de las variables de respuesta, obteniendo los modelos que caracterizan el comportamiento de los distintos parámetros considerados en esta Tesis Doctoral. Con objeto de determinar dichos modelos, se ha seleccionado el modelo con mayor valor de R^2_{adj} .

4.1.1. Análisis y discusión de resultados para la tasa de eliminación de material

A partir del diseño de experimentos y de los resultados experimentales obtenidos, que se han mostrado en la Tabla 4.2, se pueden obtener las tablas ANOVA para la tasa de eliminación de material, las cuales se recogen en la Tabla 4.3, para polaridad positiva, y en la Tabla 4.4 para polaridad negativa. Como se puede observar, los factores que presentan P-valores inferiores a 0,05 influyen en la variable de respuesta para un nivel de confianza del 95 %. Estos resultados se han representado gráficamente en la Fig. 4.1 y en la

Fig. 4.2, que muestran el diagrama de Pareto y las gráficas de efectos principales, respectivamente.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	1172,94	1	1172,94	983,89	0,0000
B: Tiempo de impulso	189,57	1	189,57	159,01	0,0000
C: Rendimiento	100,39	1	100,39	84,21	0,0000
AA	30,64	1	30,64	25,70	0,0000
AB	82,78	1	82,78	69,44	0,0000
AC	65,77	1	65,77	55,17	0,0000
BB	1,28	1	1,28	1,07	0,3052
BC	16,56	1	16,56	13,89	0,0005
Error total	65,57	55	1,19		
Total (corr.)	1837,62	63			

Tabla 4.3. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - MRR

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	3,40	1	3,40	166,33	0,0000
B: Tiempo de impulso	1,51	1	1,51	73,92	0,0000
C: Rendimiento	0,63	1	0,63	30,83	0,0000
AB	0,94	1	0,94	45,88	0,0000
AC	0,32	1	0,32	15,83	0,0002
BB	0,40	1	0,40	19,48	0,0000
BC	0,09	1	0,09	4,40	0,0404
Error total	1,15	56	0,02		
Total (corr.)	8,90	63			

Tabla 4.4. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - MRR

Como se puede observar en la Fig. 4.1 (a), para polaridad positiva, y en la Fig. 4.1 (b), para polaridad negativa, la intensidad es el factor que más influye en la tasa de eliminación de material, de manera que cuanto mayor sea la intensidad, mayor será la tasa de eliminación de material. *A priori*, éste es el resultado esperado ya que un aumento de la intensidad provoca que las chispas tengan mayor energía y sean capaces de eliminar mayor cantidad de material de la pieza electroerosionada. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Barthi et al. [111] y por Ghewade y Nipanikar [134] que dicen que la intensidad es el factor más influyente en la tasa de eliminación de material de una aleación Inconel 718 electroerosionada con electrodo de cobre. No obstante, con polaridad positiva, los valores obtenidos de eliminación de material son mucho mayores que los obtenidos con polaridad negativa. De acuerdo a Beri et al. [86], esta diferencia puede ser debida a la mayor masa de los cationes que inciden sobre la pieza arrancando más material, respecto a la

de los electrones que golpean levemente la superficie del electrodo. Por ejemplo, en el caso de una intensidad de 8 A, MRR con polaridad positiva puede llegar a superar los 22 mm³/min, mientras que con polaridad negativa los valores son próximos a 1,86 mm³/min.

El segundo factor que presenta más influencia es el tiempo de impulso. A diferencia del anterior, el comportamiento de MRR difiere según la polaridad seleccionada. Con polaridad positiva, el valor de MRR aumenta al disminuir el tiempo de impulso. Además, valores altos de intensidad combinados con tiempos de impulso cortos dan lugar a grandes arranques. Por ejemplo, se han obtenido tasas de eliminación de material de 16,7905 mm³/min y de 22,4729 mm³/min en los experimentos E36 y E52, respectivamente. En ambos casos, el valor de la intensidad es el máximo (8 A) y el del tiempo de impulso es el mínimo (50 μs) de los valores considerados en el presente estudio. Por el contrario, al seleccionar polaridad negativa, se observa que cuanto mayor es el tiempo de impulso, mayor es MRR. Esta tendencia se mantiene hasta un valor del tiempo de impulso de 350 μs, aproximadamente, con el cual MRR alcanza su máximo. A partir de dicho valor, MRR disminuye al incrementar t_i .

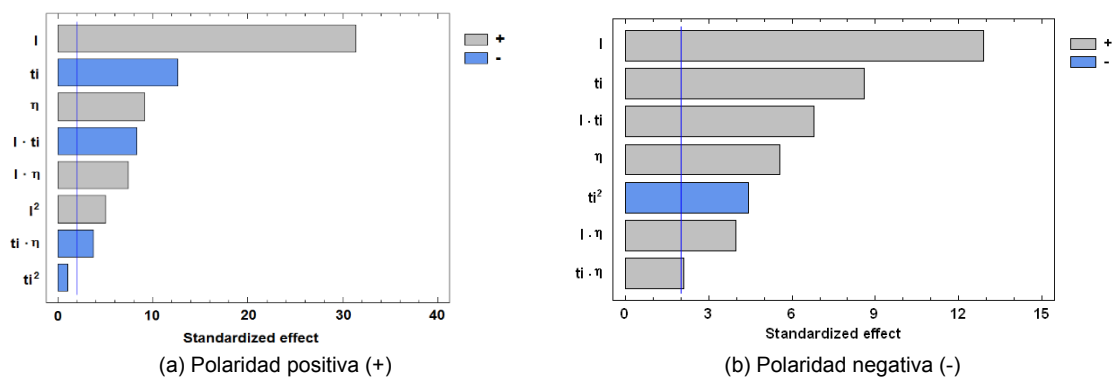


Fig. 4.1. Diagrama de Pareto para MRR con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Respecto al rendimiento, en ambas polaridades, MRR incrementa cuando este factor aumenta. Ello puede justificarse por el hecho de que el aumento del rendimiento conduce a una disminución del tiempo de pausa, lo que da lugar a un mayor número de impulsos por unidad de tiempo, que a su vez, contribuyen a eliminar más material de la pieza. Sin embargo, si el tiempo de pausa fuera

muy corto, MRR también sufriría una disminución, ya que es necesario un tiempo de pausa suficiente que permita la evacuación del material eliminado.

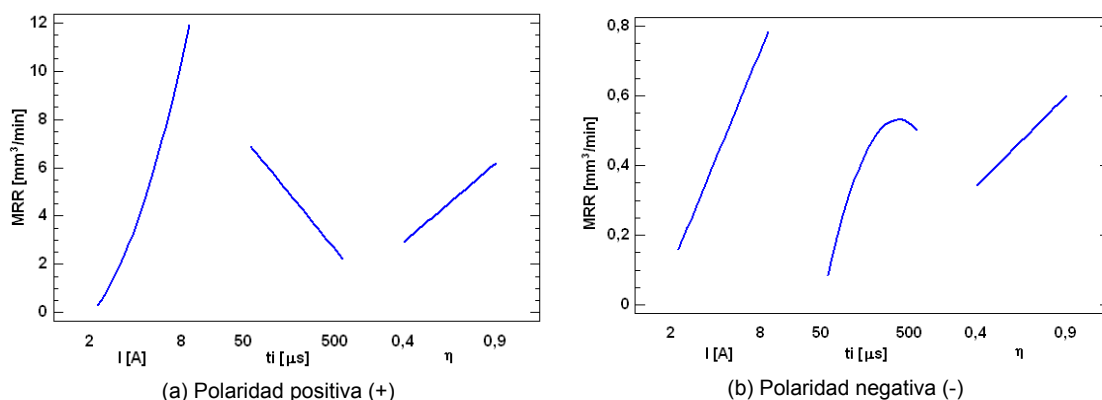


Fig. 4.2. Efectos principales para MRR con polaridad positiva (a) y negativa (b)

La Fig. 4.3 muestra el efecto de interacción que cada pareja de factores tiene sobre la tasa de eliminación de material. En ambas polaridades, las parejas de factores intensidad-tiempo de impulso e intensidad-rendimiento son las que mayor interacción presentan.

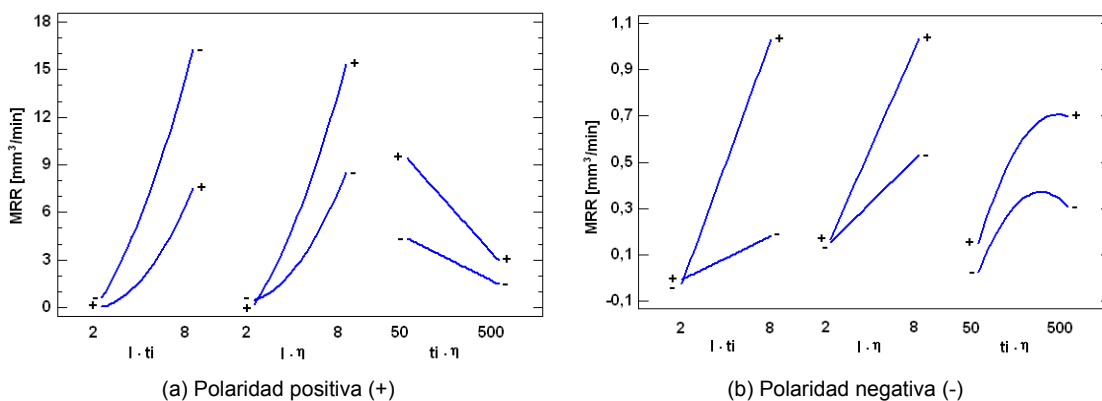


Fig. 4.3. Efectos de interacción para MRR con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Para los experimentos con polaridad positiva, el coeficiente de determinación múltiple R^2 tiene un valor de 0,9643, lo que indica que el modelo representa el 96,43 % de la variabilidad de MRR, mientras que el valor de R^2_{adj} es de 95,91 %. La ecuación simplificada del modelo se muestra en la Eq. (10):

$$MRR = -1,7851 - 0,4998 * I + 0,0185 * t_i - 0,9384 * \eta + 0,1730 * I^2 - 0,0031 * I * t_i + 2,3609 * I * \eta - 0,0001 * t_i^2 - 0,0158 * t_i * \eta \quad (10)$$

Por otra parte, los experimentos con polaridad negativa tienen un R^2 y un R^2_{adj} de 87,14 % y de 85,53 %, respectivamente. La Eq. (11) muestra el modelo simplificado para MRR:

$$MRR = 0,2865 - 0,0925 * I + 0,0005 * t_i - 0,6317 * \eta + 0,0003 * I * t_i + 0,1657 * I * \eta - 0,0001 * t_i^2 + 0,0012 * t_i * \eta \quad (11)$$

La Fig. 4.4 representa la superficie de respuesta de MRR en función de la intensidad y el tiempo de impulso, para ambas polaridades. Como se ha comentado anteriormente, para el caso de polaridad positiva los mayores valores de eliminación de material se alcanzan con valores altos de intensidad (8 A) y valores bajos de tiempo de impulso (50 μ s). Sin embargo, con polaridad negativa el valor del tiempo de impulso debe ser alto para conseguir tasas altas de arranque.

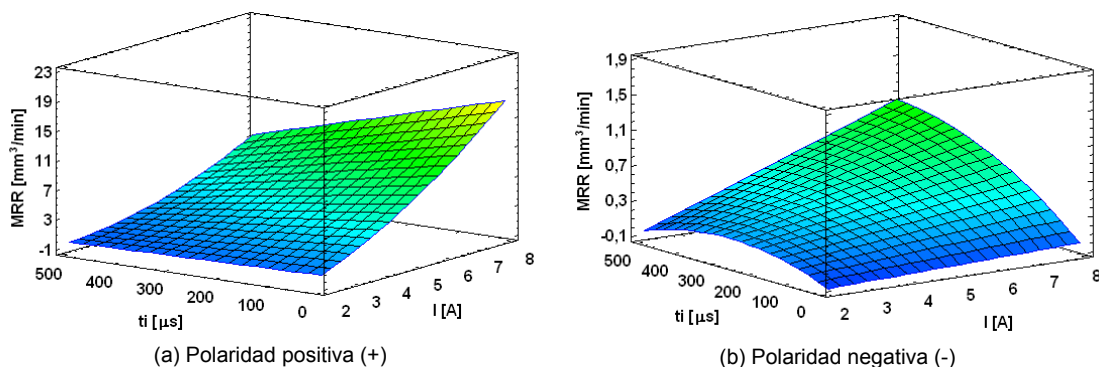


Fig. 4.4. Superficie de respuesta de MRR vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)

La Fig. 4.5 representa la superficie de respuesta de MRR en función de la intensidad y rendimiento, para las dos polaridades. En ambos casos se aprecia una tendencia de subida de la variable MRR al aumentar la intensidad, siendo MRR mayor a su vez, para un determinado valor de intensidad, al aumentar el rendimiento.

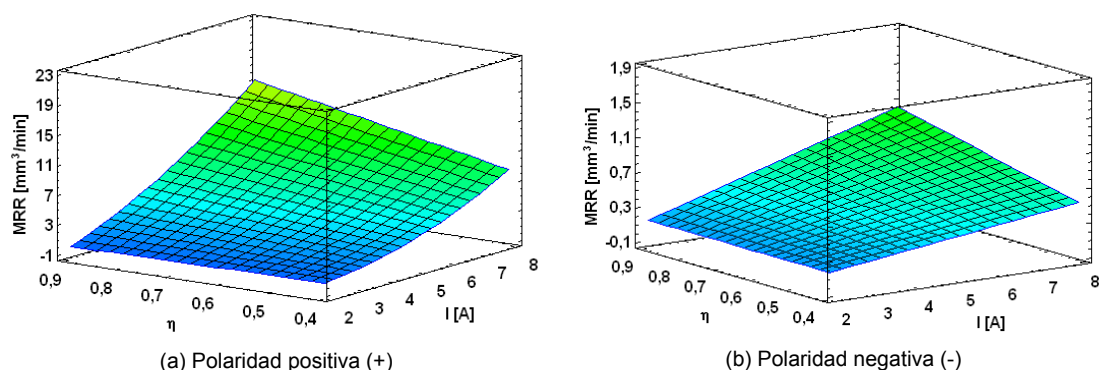


Fig. 4.5. Superficie de respuesta de MRR vs. I y η con polaridad positiva (a) y negativa (b)

4.1.2. Análisis y discusión de resultados para el desgaste volumétrico del electrodo

Análogamente al estudio realizado para MRR, a partir del diseño de experimentos y de los resultados experimentales obtenidos que se muestran en la Tabla 4.2, se pueden obtener las tablas ANOVA para el desgaste volumétrico del electrodo, las cuales se recogen en la Tabla 4.5, para polaridad positiva, y en la Tabla 4.6 para polaridad negativa. Como puede observarse, en los dos casos, el principal efecto es la intensidad de corriente seguido del tiempo de impulso, así como de sus efectos cuadráticos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	18,80	1	18,80	117,82	0,0000
B: Tiempo de impulso	11,19	1	11,19	70,11	0,0000
C: Rendimiento	0,61	1	0,61	3,83	0,0554
AA	11,26	1	11,26	70,58	0,0000
AB	1,32	1	1,32	8,29	0,0057
AC	0,34	1	0,34	2,12	0,1512
BB	2,98	1	2,98	18,67	0,0001
BC	0,35	1	0,35	2,22	0,1416
Error total	8,78	55	0,16		
Total (corr.)	56,02	63			

Tabla 4.5. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - EW

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	2292,74	1	2292,74	65,64	0,0000
B: Tiempo de impulso	1807,29	1	1807,29	51,74	0,0000
C: Rendimiento	40,11	1	40,11	1,15	0,2886
AA	2110,37	1	2110,37	60,42	0,0000
AB	161,61	1	161,61	4,63	0,0359
AC	141,39	1	141,39	4,05	0,0491
BB	460,48	1	460,48	13,18	0,0006
BC	154,72	1	154,72	4,43	0,0399

Error total	1921,10	55	34,93		
Total (corr.)	9174,97	63			

Tabla 4.6. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - EW

Los datos recogidos en las tablas ANOVA se muestran, asimismo, de forma gráfica en la Fig. 4.6 y en la Fig. 4.7, que corresponden al diagrama de Pareto y la gráfica de efectos principales, respectivamente. Como puede observarse en la Fig. 4.6, la intensidad y el tiempo de impulso son los dos factores que más influyen en EW, tanto para polaridad positiva como para negativa. Además, en ambos casos tienen el mismo efecto, de tal manera que cuanto mayor es su valor, menor es el desgaste que se produce en el electrodo.

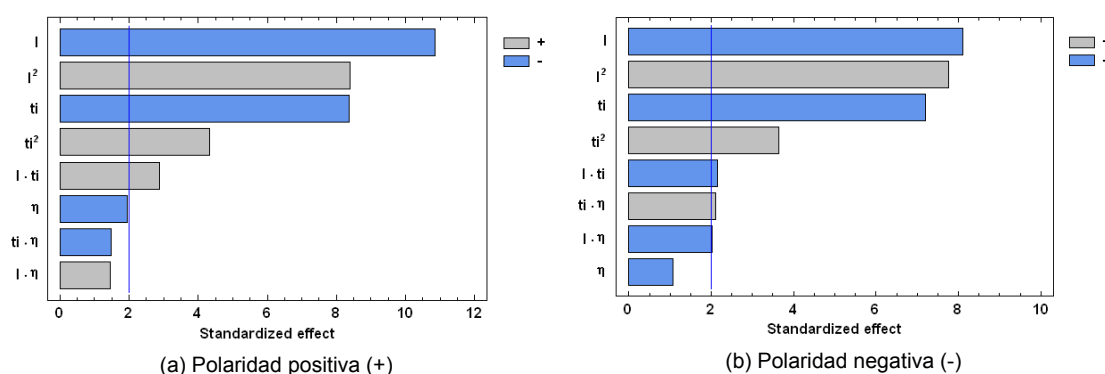


Fig. 4.6. Diagrama de Pareto para EW con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Por otra parte, en la Fig. 4.7, se observa que el valor de EW disminuye de manera importante al aumentar el valor de la intensidad, hasta un punto situado aproximadamente en 6 A, a partir del cual comienza a subir. Respecto al tiempo de impulso, el efecto es similar, provocando una disminución del desgaste del electrodo al aumentar su valor hasta un punto a partir del cual comienza a incrementar. Esta disminución inicial puede atribuirse a la formación de capas de carburo sobre la superficie de la herramienta y a la baja energía de las chispas con dichos valores de intensidad. Al aumentar la intensidad a 6 A, las descargas eléctricas tienen energía suficiente para romper la capa de carburos formada y el desgaste del electrodo aumenta. Por otro lado, el factor rendimiento no resultó ser significativo en ninguna de las dos polaridades. Además, con polaridad positiva, los valores obtenidos de desgaste

en el electrodo son muy inferiores a los obtenidos con polaridad negativa. De acuerdo con la Tabla 4.2, al seleccionar polaridad positiva, el máximo valor alcanzado de desgaste en el electrodo es del 3,80 %, mientras que con polaridad negativa se ha alcanzado un desgaste del 62,82 %.

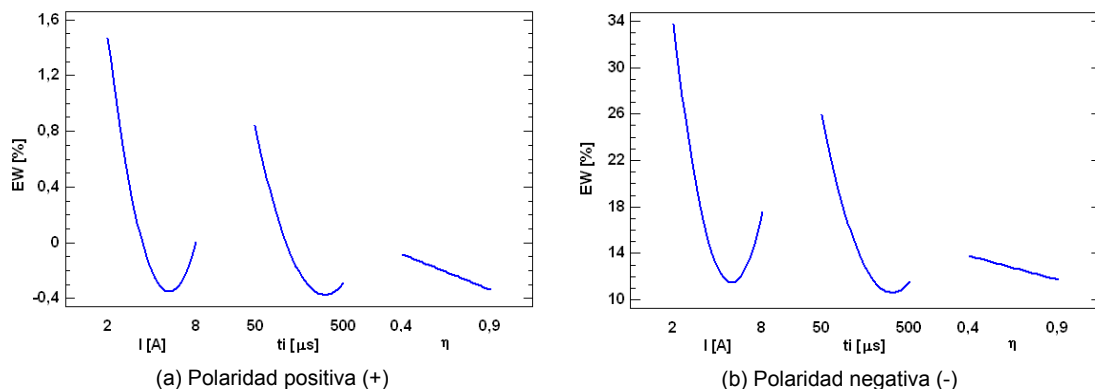


Fig. 4.7. Efectos principales para EW con polaridad positiva (a) y negativa (b)

La Fig. 4.8 muestra los efectos de interacción. Como puede observarse, las parejas intensidad-tiempo de impulso y tiempo de impulso-rendimiento, son las que mayor interacción presentan y, por tanto, las que tienen mayor influencia en EW.

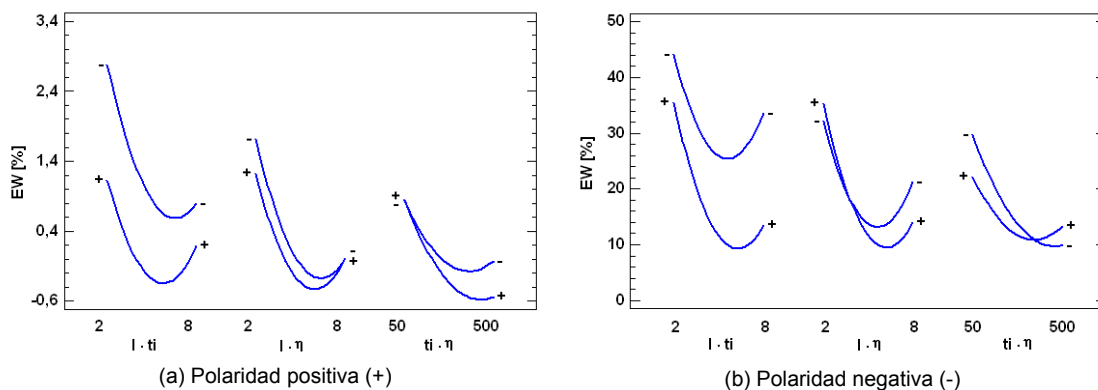


Fig. 4.8. Efectos de interacción para EW con polaridad positiva (a) y negativa (b)

En el caso de polaridad positiva, se obtiene un valor de R^2 de 84,33 % y de R^2_{adj} de 82,05 %. Para el caso de polaridad negativa, los valores de R^2 y de R^2_{adj} son de 79,06 % y de 76,02 %, respectivamente. Las ecuaciones de los

modelos ajustados de EW para polaridad positiva y negativa se muestran en la Eq. (12) y en la Eq. (13), respectivamente.

$$EW = 6,0468 - 1,5087 * I - 0,0082 * t_i - 0,7195 * \eta + 0,1049 * I^2 + 0,0004 * I * t_i + 0,1693 * I * \eta + 0,0001 * t_i^2 - 0,0023 * t_i * \eta \quad (12)$$

$$EW = 74,1671 - 13,6399 * I - 0,1077 * t_i - 0,0923 * \eta + 1,4356 * I^2 - 0,0042 * I * t_i - 3,4615 * I * \eta + 0,0001 * t_i^2 + 0,0482 * t_i * \eta \quad (13)$$

En la Fig. 4.9 se puede observar la superficie de respuesta de EW en función de los factores de diseño intensidad y tiempo de impulso para ambas polaridades. En ambos casos, se aprecia que los menores valores de EW se obtienen cuando tanto la intensidad como el tiempo de impulso tienen valores próximos a los valores medios de sus respectivos rangos de variación. Asimismo, se observa que para un valor dado de la intensidad, el desgaste disminuye al aumentar el tiempo de impulso. Con frecuencias bajas de energía, o lo que es lo mismo, con valores altos del tiempo de impulso, el desgaste del electrodo es muy bajo, llegando incluso a alcanzar valores negativos cuando el electrodo tiene polaridad positiva. Este hecho puede ser debido a la deposición de partículas de carbono sobre el electrodo durante el proceso de electroerosión.

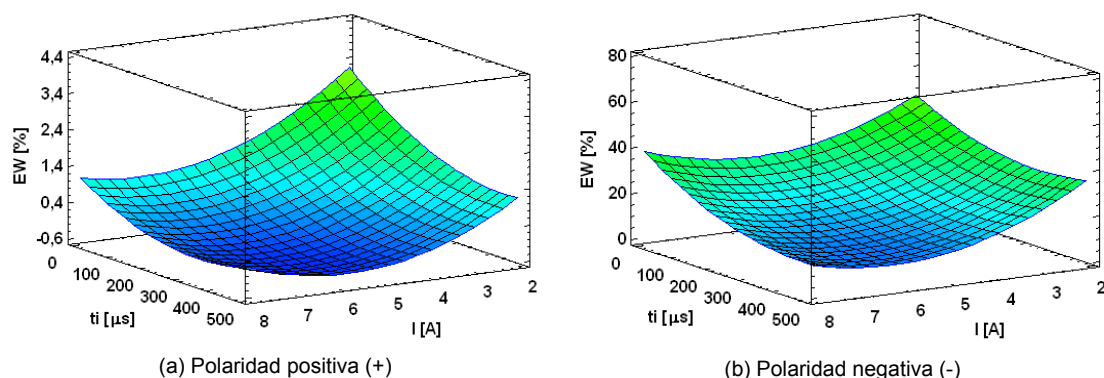


Fig. 4.9. Superficie de respuesta de EW vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Por otra parte, la Fig. 4.10 representa la superficie de respuesta de EW en función del tiempo de impulso y del rendimiento mientras que el factor

intensidad se mantiene constante en su valor central. Tal y como se observa, hay una tendencia de subida del parámetro EW al disminuir el tiempo de impulso para ambas polaridades.

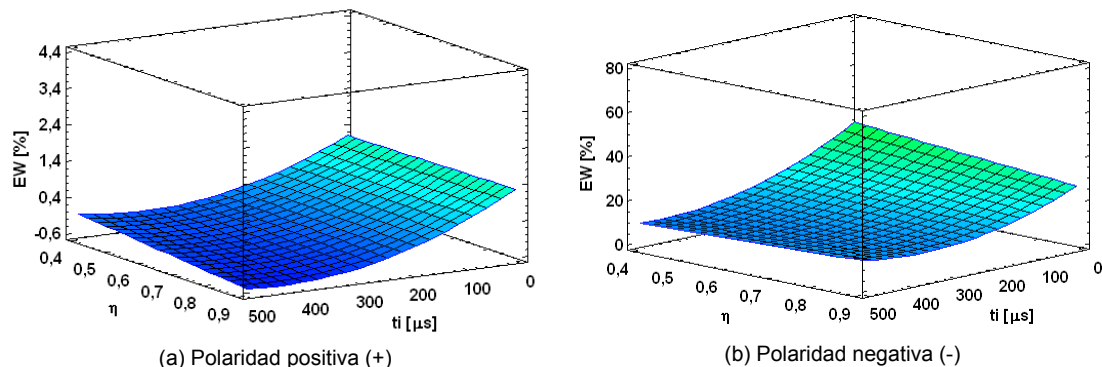


Fig. 4.10. Superficie de respuesta de EW vs. t_i y η con polaridad positiva (a) y negativa (b)

4.1.3. Análisis y discusión de resultados para los parámetros de rugosidad superficial

Como se ha indicado anteriormente, se va a caracterizar la rugosidad superficial a partir de los parámetros: Ra, Rq, Rt, Sm y Pc. Estos parámetros han sido seleccionados en base a su importancia y uso generalizado en la industria. Los tres primeros parámetros, denominados parámetros de amplitud, son medidas de las características verticales de las desviaciones de la superficie, mientras que Sm y Pc se basan en medidas horizontales y se denominan parámetros de espaciamento. Estos parámetros quedan definidos en base a las normas UNE-EN-ISO 4287:1999 [150] y UNE-EN-ISO 4287:1999/A1:2010 [154]. Sus descripciones detalladas se recogen en el capítulo 3 dedicado a la planificación de la experimentación.

4.1.3.1. Análisis de los parámetros de amplitud

Al igual que en los estudios anteriores, a partir de los resultados experimentales recogidos en la Tabla 4.2 se obtienen las tablas ANOVA de los modelos simplificados de Ra, para ambas polaridades, las cuales se muestran en la Tabla 4.7, para polaridad positiva, y en la Tabla 4.8, para polaridad

negativa. Como puede observarse, para polaridad positiva, tres de los efectos tienen P-valores inferiores a 0,05, lo que indica que influyen en la variable Ra para un nivel de confianza del 95 %. Estos efectos, dispuestos de mayor a menor importancia son: la intensidad, el efecto cuadrático del tiempo de impulso y el efecto cuadrático de la intensidad. Sin embargo, en el caso de polaridad negativa, cuatro son los efectos estadísticamente significativos. Estos efectos son: la intensidad, el efecto de interacción entre la intensidad y el tiempo de impulso, el tiempo de impulso y su efecto cuadrático.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	237,46	1	237,46	749,29	0,0000
B: Tiempo de impulso	1,01	1	1,01	3,20	0,0790
C: Rendimiento	0,58	1	0,58	1,83	0,1819
AA	3,92	1	3,92	12,37	0,0009
AC	0,46	1	0,46	1,46	0,2313
BB	9,99	1	9,99	31,51	0,0000
CC	0,47	1	0,47	1,49	0,2277
Error total	17,74	56	0,32		
Total (corr.)	272,898	63			

Tabla 4.7. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Ra

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	26,94	1	26,94	147,41	0,0000
B: Tiempo de impulso	4,90	1	4,90	26,79	0,0000
C: Rendimiento	0,55	1	0,55	3,03	0,0875
AA	0,18	1	0,18	1,01	0,3189
AB	5,35	1	5,35	29,30	0,0000
AC	0,45	1	0,45	2,49	0,1205
BB	1,80	1	1,80	9,83	0,0028
CC	0,23	1	0,23	1,26	0,2674
Error total	10,05	55	0,18		
Total (corr.)	51,82	63			

Tabla 4.8. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Ra

Los resultados obtenidos en la Tabla 4.7 y la Tabla 4.8 se representan gráficamente en la Fig. 4.11 que muestra el diagrama de Pareto para ambas polaridades. Como puede observarse, en los dos casos, la intensidad es el factor que más influye en la respuesta Ra, e influye de tal manera que su valor aumenta al incrementar el valor de la intensidad. *A priori*, los resultados son los esperados ya que al aumentar la energía suministrada por cada pulso eléctrico, se arranca más material de la superficie de la pieza (mayor MRR) y los cráteres

resultantes son, en consecuencia, de mayor tamaño y profundidad, lo que conduce a valores mayores de la rugosidad superficial y, por tanto, a un empeoramiento de Ra. Además, en el caso de polaridad negativa, el acabado superficial también se ve influenciado por el tiempo de impulso, de tal manera que el aumento en la duración de las descargas contribuye a un peor acabado superficial. Cuando el tiempo de impulso alcanza un valor aproximado de 350 μs , Ra comienza a decrecer al aumentar t_i , tal y como puede observarse en la gráfica de efectos principales de la Fig. 4.12 (b).

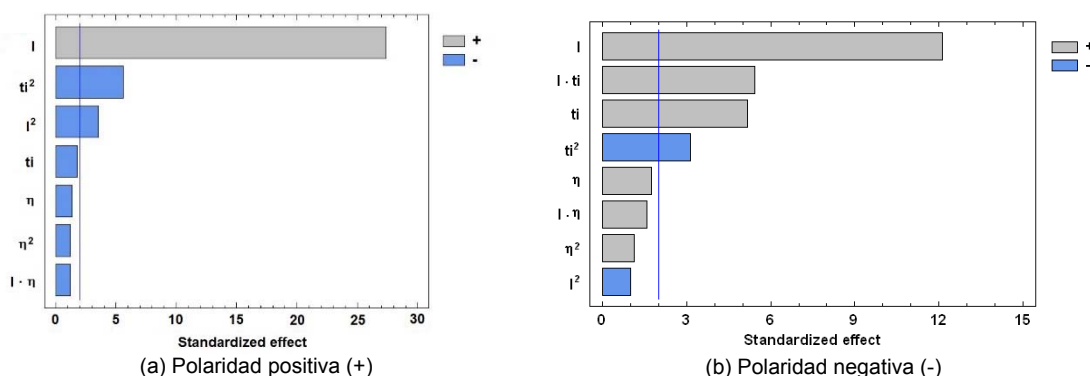


Fig. 4.11. Diagrama de Pareto para Ra con polaridad positiva (a) y negativa (b)

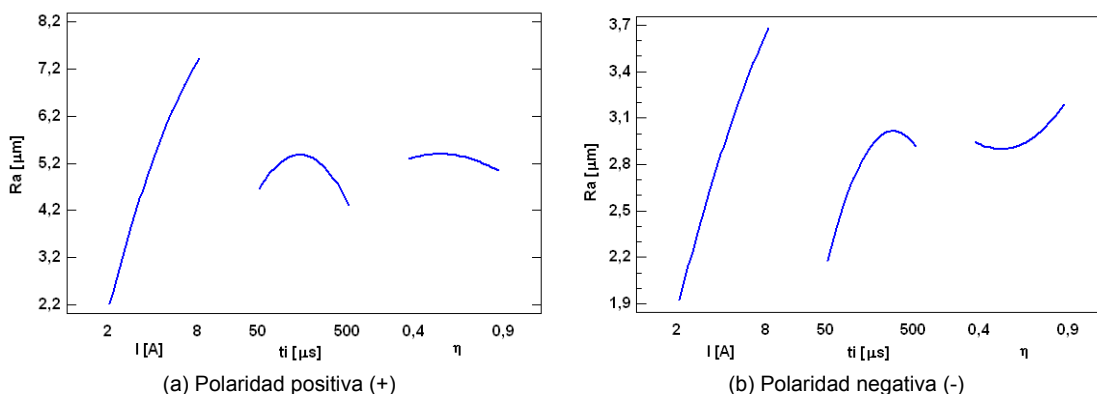


Fig. 4.12. Efectos principales para Ra con polaridad positiva (a) y negativa (b)

La Fig. 4.13 representa los efectos de interacción para Ra con polaridad positiva y negativa. Tal y como se observa, la pareja de factores intensidad-rendimiento es la que mayor interacción presenta para ambas polaridades y, en el caso de polaridad negativa, la interacción entre la intensidad y el tiempo de impulso también se considera significativa.

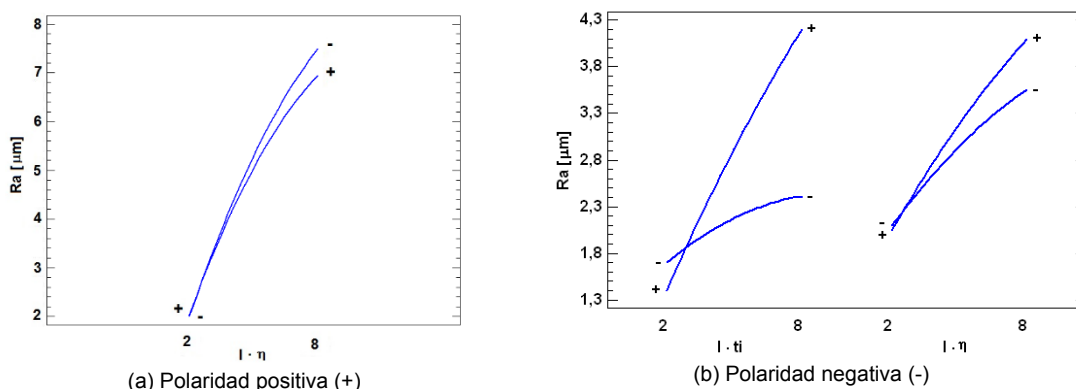


Fig. 4.13. Efectos de interacción para Ra con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Para los experimentos con polaridad positiva, se obtienen unos valores de R^2 y de R^2_{adj} de 93,50 % y de 92,68 %, respectivamente, lo que indica que el modelo es estadísticamente válido para caracterizar la relación entre Ra y los parámetros de EDM. La Eq. (14) muestra el modelo simplificado para Ra:

$$Ra = -3,3564 + 1,6164 * I + 0,0089 * t_i + 4,7922 * \eta - 0,0619 * I^2 - 0,1983 * I * \eta - 0,0001 * t_i^2 - 3,3047 * \eta^2 \quad (14)$$

Para polaridad negativa, los valores de los estadísticos R^2 y R^2_{adj} obtenidos son de 80,60 % y de 77,78 %, respectivamente. La ecuación simplificada del modelo se muestra en la Eq. (15):

$$Ra = 2,4667 + 0,0872 * I + 0,0019 * t_i - 3,4935 * \eta - 0,0134 * I^2 + 0,0008 * I * t_i + 0,1963 * I * \eta - 0,0001 * t_i^2 + 2,3050 * \eta^2 \quad (15)$$

La Fig. 4.14 y la Fig. 4.15 representan las gráficas de superficie de respuesta para Ra, para las dos polaridades. Como se observa en la Fig. 4.14 (a), para un determinado valor de intensidad al aumentar el tiempo de impulso, Ra aumenta hasta un punto situado aproximadamente en 250 µs a partir del cual disminuye. A su vez, se observa que para un determinado tiempo de impulso, Ra aumenta al aumentar la intensidad. Con polaridad negativa, tal y como se observa en la Fig. 4.14 (b), los valores más altos de rugosidad se consiguen cuando tanto el tiempo de impulso como la intensidad se encuentran en sus valores máximos (500 µs y 8 A). En la Fig. 4.15 se muestra que Ra tiende a

empeorar al aumentar los valores de intensidad. Por ejemplo, los experimentos E37 y E40 se realizaron bajo las mismas condiciones de polaridad (positiva), tiempo de impulso (200 μs) y rendimiento (0,8), pero con diferentes valores de intensidad. En el caso de E37, la intensidad seleccionada fue de 2 A, obteniéndose un valor de Ra de 1,45 μm , mientras que para E40 la intensidad se incrementó hasta 8 A, dando como resultado un valor de Ra de 7,81 μm .

Además, comparando la Fig. 4.14 y la Fig. 4.15 se observa que con polaridad negativa se consiguen mejores acabados superficiales, lo que coincide con la menor tasa de eliminación de material obtenida al seleccionar dicha polaridad.

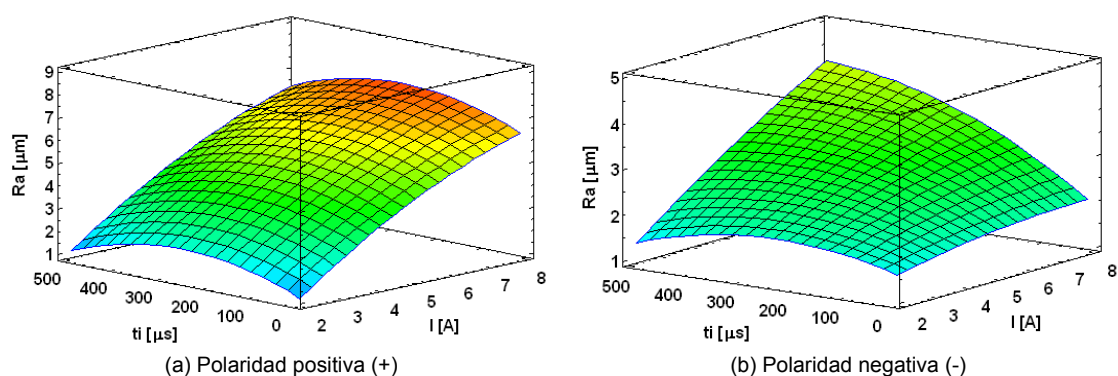


Fig. 4.14. Superficie de respuesta de Ra vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)

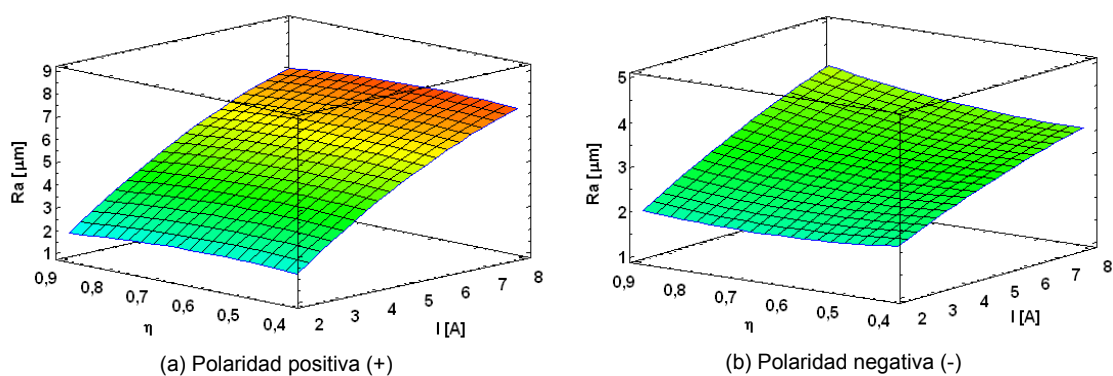


Fig. 4.15. Superficie de respuesta de Ra vs. I y η con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Los resultados obtenidos para Rq siguen la misma tendencia que los obtenidos para Ra, tal y como puede observarse en las Fig. 4.16-Fig. 4.19. Al igual que en Ra, la intensidad es el factor más influyente para ambas polaridades, de manera que el incremento de este factor provoca un aumento en la rugosidad

superficial. Además, en el caso de polaridad negativa, el tiempo de impulso también influye significativamente en R_q , de tal manera que su valor aumenta hasta un máximo situado aproximadamente en $350 \mu s$, a partir del cual disminuye.

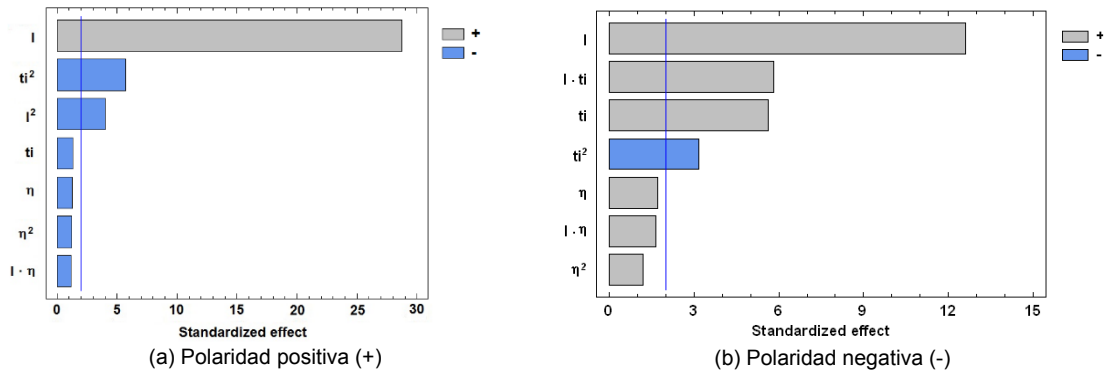


Fig. 4.16. Diagrama de Pareto para R_q con polaridad positiva (a) y negativa (b)

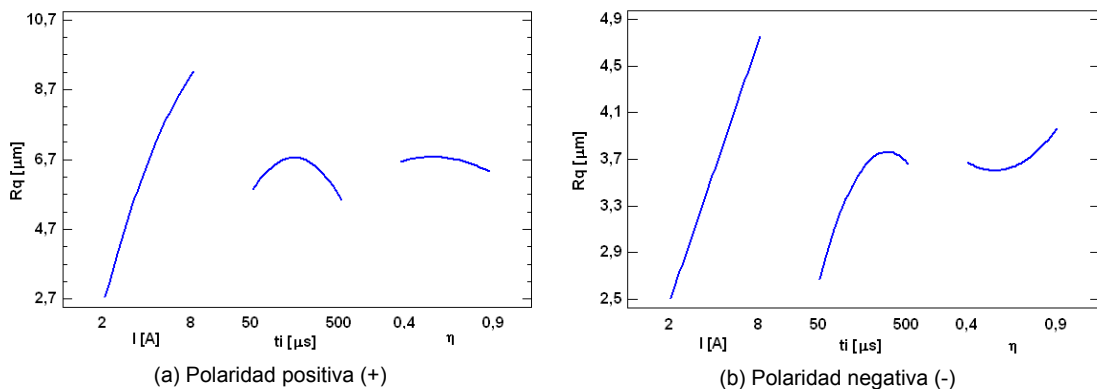


Fig. 4.17. Efectos principales para R_q con polaridad positiva (a) y negativa (b)

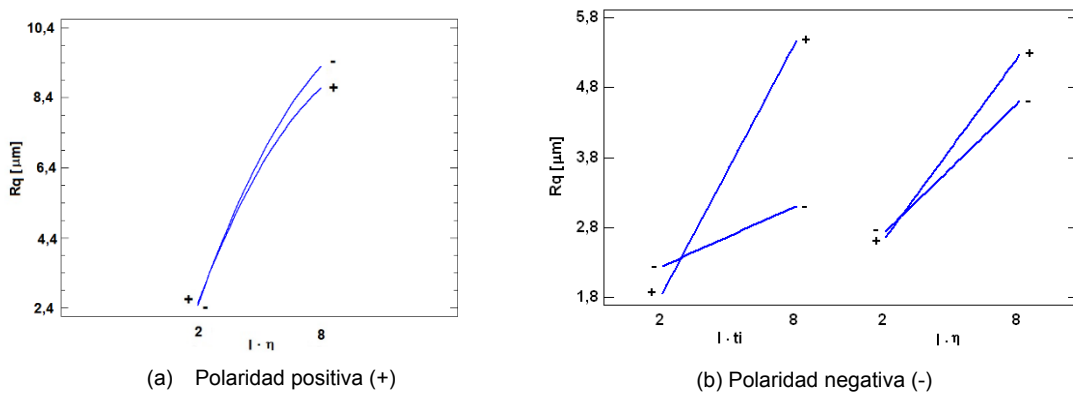


Fig. 4.18. Efectos de interacción para R_q con polaridad positiva (a) y negativa (b)

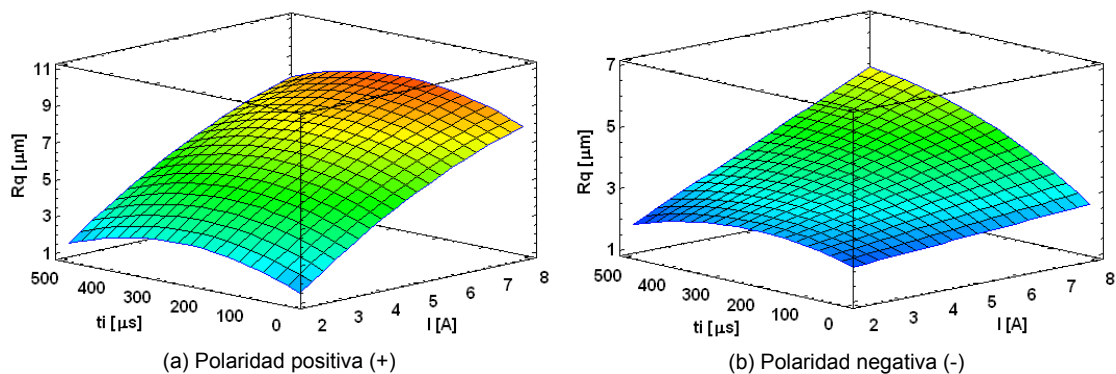


Fig. 4.19. Superficie de respuesta de Rq vs. I y ti con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Para Rq y polaridad positiva se obtiene un valor de R^2 de 94,06 %. Asimismo, R^2_{adj} tiene un valor de 93,31 %. Para el caso de polaridad negativa, los valores de R^2 y de R^2_{adj} son de 81,68 % y de 79,39 %, respectivamente. Las ecuaciones de los modelos ajustados de Rq se muestran en la Eq. (16) para polaridad positiva y en la Eq. (17) para polaridad negativa.

$$Rq = -4,2007 + 2,0647 * I + 0,0109 * t_i + 5,7235 * \eta - 0,0836 * I^2 - 0,2300 * I * \eta - 0,0001 * t_i^2 - 3,9439 * \eta^2 \quad (16)$$

$$Rq = 3,5620 - 0,0684 * I + 0,0021 * t_i - 4,5471 * \eta + 0,0010 * I * t_i + 0,2487 * I * \eta - 0,0001 * t_i^2 + 2,9870 * \eta^2 \quad (17)$$

Con los resultados experimentales mostrados en la Tabla 4.2 y el DOE seleccionado, se obtienen la Tabla 4.9 y la Tabla 4.10 que representan las tablas ANOVA del modelo simplificado de Rt para polaridad positiva y negativa, respectivamente. Con polaridad positiva, se observa que los mismos efectos significativos obtenidos en Ra se obtienen también en Rt. Estos efectos son: la intensidad y los efectos cuadráticos de la intensidad y el tiempo de impulso. En el caso de polaridad negativa, hay cinco efectos significativos, que ordenados de mayor a menor significancia son: la intensidad, el tiempo de impulso, el efecto de interacción entre la intensidad y el tiempo de impulso, el efecto cuadrático del tiempo de impulso y, finalmente, el rendimiento. Todos estos efectos, exceptuando el rendimiento, también fueron estadísticamente significativos en el caso de Ra.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	9497,93	1	9497,93	755,99	0,0000
AA	346,57	1	346,57	27,58	0,0000
BB	288,79	1	288,79	22,99	0,0000
Error total	753,82	60	12,56		
Total (corr.)	10887,10	63			

Tabla 4.9. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Rt

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	1301,29	1	1301,29	145,28	0,0000
B: Tiempo de impulso	410,51	1	410,51	45,83	0,0000
C: Rendimiento	44,85	1	44,85	5,01	0,0293
AA	11,11	1	11,11	1,24	0,2703
AB	338,65	1	338,65	37,81	0,0000
AC	33,47	1	33,47	3,74	0,0584
BB	83,45	1	83,45	9,32	0,0035
CC	17,67	1	17,67	1,97	0,1658
Error total	492,64	55	8,96		
Total (corr.)	2809,69	63			

Tabla 4.10. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Rt

La Fig. 4.20 y la Fig. 4.21 muestran el diagrama de Pareto y la gráfica de efectos principales para la respuesta Rt. Al igual que en los resultados obtenidos en Ra y en Rq, la intensidad es el factor que más influye en Rt para las dos polaridades. Cuando los valores de intensidad y tiempo de impulso son altos, se generan cráteres más profundos y más grandes en la superficie debido a un aumento de los fenómenos de fusión y vaporización y, por tanto, la diferencia pico-valle (Rt) aumenta.

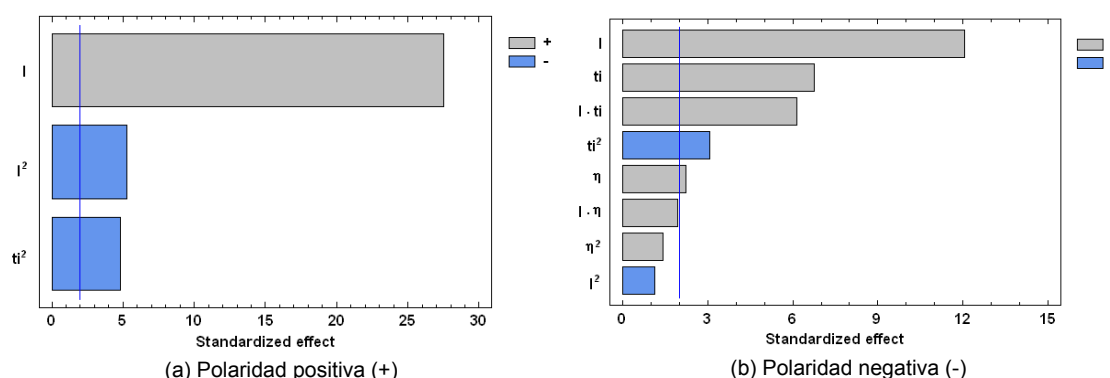


Fig. 4.20. Diagrama de Pareto para Rt con polaridad positiva (a) y negativa (b)

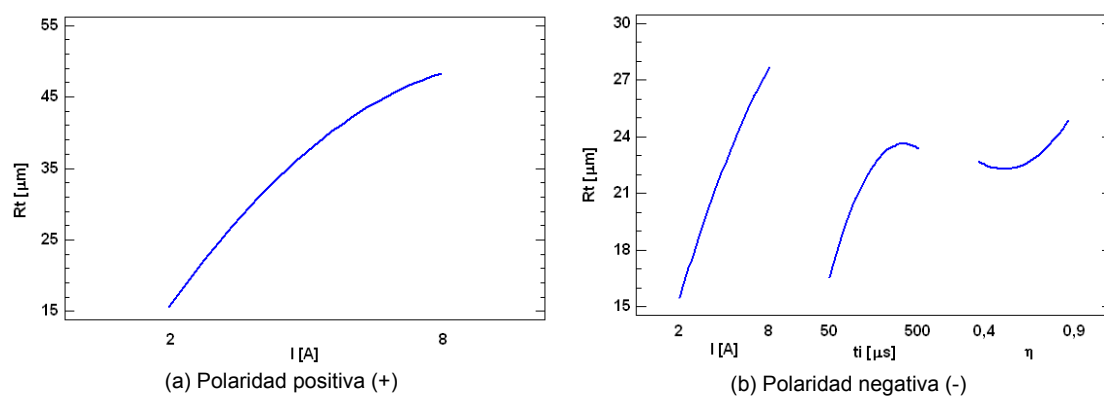


Fig. 4.21. Efectos principales para R_t con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Con polaridad positiva, R^2 tiene un valor de 93,07 % mientras que el valor de R^2_{adj} es de 92,73 %. La ecuación simplificada del modelo se muestra en la Eq. (18).

$$Rt = -11,7918 + 11,2656 * I + 0,0519 * t_i - 0,5818 * I^2 - 0,0001 * t_i^2 \quad (18)$$

Por otra parte, los experimentos con polaridad negativa tienen un R^2 y un R^2_{adj} de 82,47 % y de 79,92 %, respectivamente. La ecuación simplificada del modelo se muestra en la Eq. (19):

$$Rt = 21,3811 + 0,2934 * I + 0,0123 * t_i - 30,3571 * \eta - 0,1041 * I^2 + 0,0061 * I * t_i + 1,6841 * I * \eta - 0,0001 * t_i^2 + 20,2289 * \eta^2 \quad (19)$$

La Fig. 4.22 representa los efectos de interacción para R_t con polaridad negativa. Tal y como se observa, la pareja de factores intensidad-tiempo de impulso son los que mayor interacción presentan. En el caso de polaridad positiva no hay efectos de interacción.

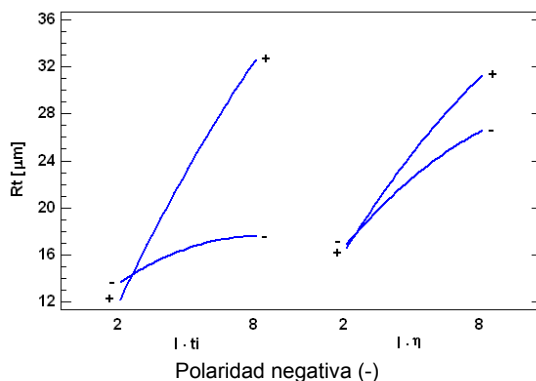


Fig. 4.22. Efectos de interacción para R_t con polaridad negativa

La Fig. 4.23 muestra la superficie de respuesta de R_t en función de la intensidad y el tiempo de impulso para ambas polaridades. Con polaridad positiva, se observa que para un determinado valor de intensidad, al aumentar el tiempo de impulso, R_a aumenta hasta un punto situado aproximadamente en $250 \mu s$ a partir del cual disminuye. Sin embargo, con polaridad negativa los mayores valores de R_t se alcanzan cuando se combinan valores altos tanto de intensidad como de tiempo de impulso. En ese caso, deben disminuirse los valores de ambos factores para conseguir buenos acabados superficiales. Por otra parte, la Fig. 4.24 representa la superficie de respuesta de R_t en función de la intensidad y el rendimiento. Con ambas polaridades se aprecia una tendencia de subida del parámetro R_t conforme aumenta la intensidad.

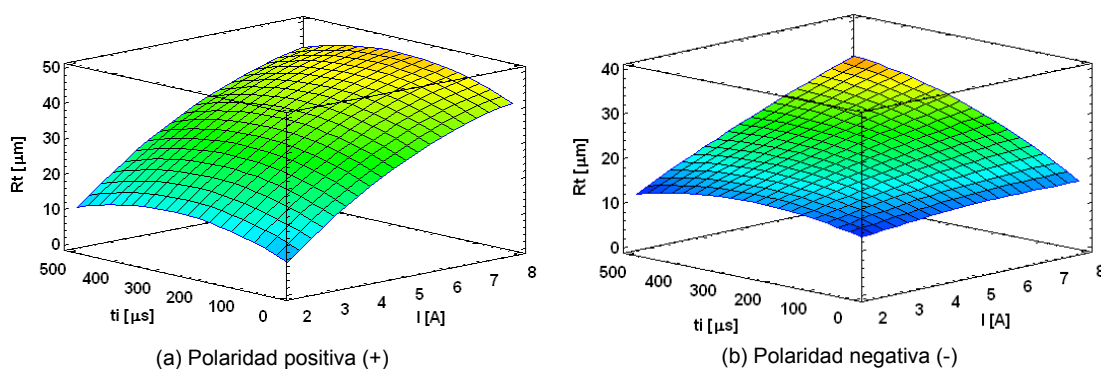


Fig. 4.23. Superficie de respuesta de R_t vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)

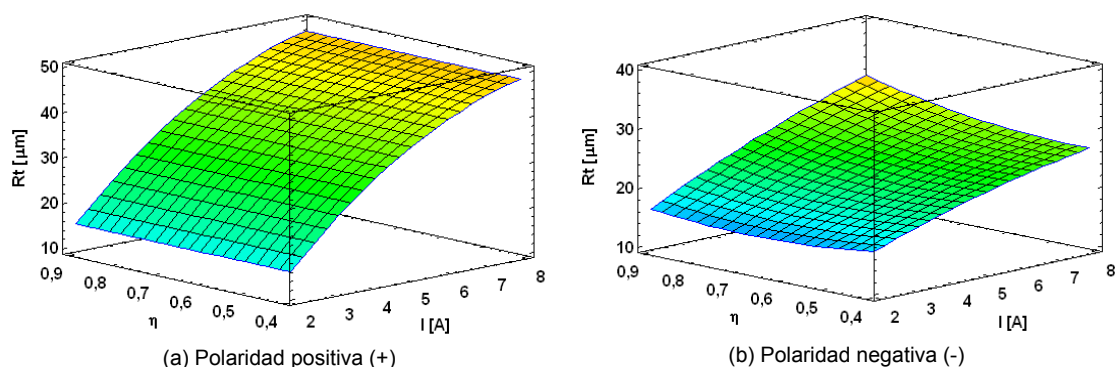


Fig. 4.24. Superficie de respuesta de R_t vs. I y η con polaridad positiva (a) y negativa (b)

4.1.3.2. Análisis de los parámetros de espaciamento

Análogamente al estudio realizado de los parámetros de amplitud, y a partir de los resultados experimentales obtenidos que se muestran en la Tabla 4.2, se analizan, a continuación, los parámetros de espaciamento S_m y P_c .

Las tablas ANOVA de ambos parámetros se recogen en las Tabla 4.11-Tabla 4.14. Como puede observarse, en el caso de S_m , cinco efectos para polaridad positiva y cuatro efectos para polaridad negativa, influyen en la respuesta S_m para un nivel de confianza del 95 %. En ambos casos, la intensidad y el tiempo de impulso son los efectos más significativos. Asimismo, para el parámetro P_c y para ambas polaridades, los efectos: intensidad, tiempo de impulso y sus correspondientes efectos cuadráticos tienen P-valores inferiores a 0,05.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	104170,00	1	104170,00	225,59	0,0000
B: Tiempo de impulso	58420,00	1	58420,00	126,51	0,0000
AA	31346,70	1	31346,70	67,88	0,0000
AB	9181,47	1	9181,47	19,88	0,0000
BB	4610,41	1	4610,41	9,98	0,0025
BC	878,07	1	878,07	1,90	0,1734
CC	744,19	1	744,19	1,61	0,2095
Error total	25859,00	56	461,77		
Total (corr.)	238096,00	63			

Tabla 4.11. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - S_m

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	60981,50	1	60981,50	140,53	0,0000
B: Tiempo de impulso	7388,17	1	7388,17	17,03	0,0001

C: Rendimiento	1188,47	1	1188,47	2,74	0,1036
AA	526,70	1	526,70	1,21	0,2754
AB	2438,38	1	2438,38	5,62	0,0213
AC	1548,61	1	1548,61	3,57	0,0642
BB	5191,20	1	5191,20	11,96	0,0011
CC	495,40	1	495,40	1,14	0,2900
Error total	23866,50	55	433,93		
Total (corr.)	107199,00	63			

Tabla 4.12. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Sm

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	46542,00	1	46542,00	627,63	0,0000
B: Tiempo de impulso	9221,67	1	9221,67	124,36	0,0000
AA	15338,80	1	15338,80	206,85	0,0000
BB	1354,24	1	1354,24	18,26	0,0001
BC	121,54	1	121,54	1,64	0,2056
Error total	4301,03	58	74,16		
Total (corr.)	77315,60	63			

Tabla 4.13. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Pc

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	16905,30	1	16905,30	196,40	0,0000
B: Tiempo de impulso	1412,88	1	1412,88	16,41	0,0002
C: Rendimiento	189,72	1	189,72	2,20	0,1432
AA	1072,56	1	1072,56	12,46	0,0008
AB	293,09	1	293,09	3,41	0,0703
AC	234,92	1	234,92	2,73	0,1041
BB	526,70	1	526,70	6,12	0,0164
Error total	4820,26	56	86,077		
Total (corr.)	26269,20	63			

Tabla 4.14. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Pc

Los resultados obtenidos en las tablas ANOVA se han representado gráficamente en las Fig. 4.25-Fig. 4.28. Tal y como se observa, la intensidad y el tiempo de impulso son los dos factores que más influyen en Sm y Pc para ambas polaridades. No obstante, su influencia sobre los parámetros de espaciado es totalmente opuesta. En el caso de Sm y polaridad positiva, cuanto mayor es la intensidad, mayor es Sm. Esta tendencia se mantiene hasta un valor de intensidad de 6 A, aproximadamente, con el cual Sm alcanza su máximo. A partir de dicho valor, Sm disminuye al incrementar la intensidad. Por el contrario, el comportamiento de Pc sigue la tendencia contraria, es decir, disminuye, al aumentar la intensidad, hasta un mínimo, situado aproximadamente también en 6 A, a partir del cual comienza a incrementar. A

priori, los resultados son los esperados ya que al aumentar la intensidad, la mayor energía adquirida por las chispas causa un menor número de cráteres en la superficie pero, a su vez, éstos son de mayor diámetro (mayores valores de S_m) y, por tanto, se encuentran más espaciados los unos de los otros. Este mayor espaciamiento se traduce en un menor número de picos en la superficie de la pieza, es decir, en valores más pequeños de P_c .

Respecto al comportamiento del tiempo de impulso, con polaridad positiva, el valor de S_m aumenta al aumentar el tiempo de impulso, mientras que el valor de P_c disminuye, tal y como puede observarse en la Fig. 4.27 (a) y la Fig. 4.28 (a), respectivamente. Con polaridad negativa, el valor de S_m aumenta al aumentar el tiempo de impulso hasta un máximo, situado aproximadamente en 350 μs , a partir del cual comienza a decrecer, tal y como puede observarse en la gráfica de efectos principales de la Fig. 4.27 (b). Por el contrario, como se ha comentado anteriormente, el comportamiento de P_c sigue la tendencia opuesta como puede observarse en la Fig. 4.28 (b).

Por ejemplo, para polaridad positiva, en el experimento E49 con el que se obtuvo el menor valor de R_a (1,11 μm) y uno de los menores valores de arranque de material (0,2404 mm^3/min), el valor de S_m fue de 62,80 μm , mientras que el de P_c fue de 159,60 1/cm. En este caso, tanto el valor de la intensidad como el del tiempo de impulso fue mínimo (2 A y 50 μs). Al aumentar el valor de ambos factores, se produce un aumento significativo de S_m y una disminución de P_c , tal y como se observa en E40 (8 A y 200 μs) con el que se obtuvo el mayor valor de R_a (7,81 μm) y una de las mayores tasas de eliminación de material (15,8770 mm^3/min). En este caso, los valores de S_m y P_c fueron de 156 μm y 60,20 1/cm, respectivamente.

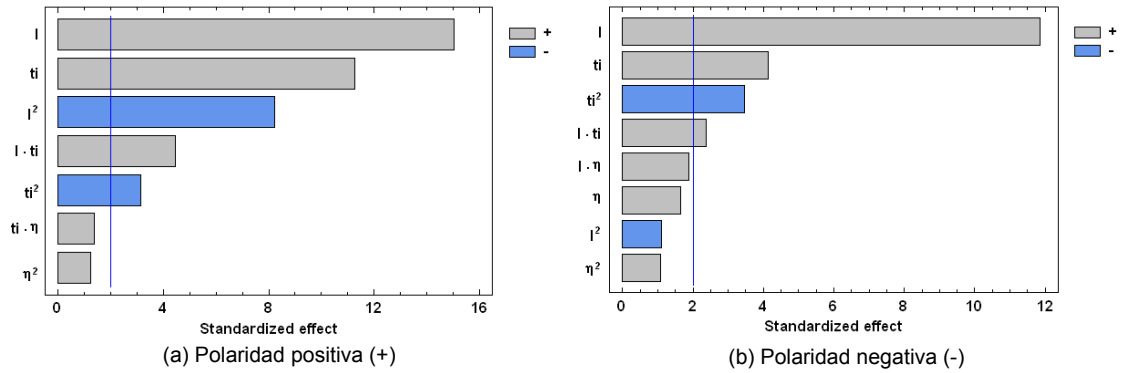


Fig. 4.25. Diagrama de Pareto para Sm con polaridad positiva (a) y negativa (b)

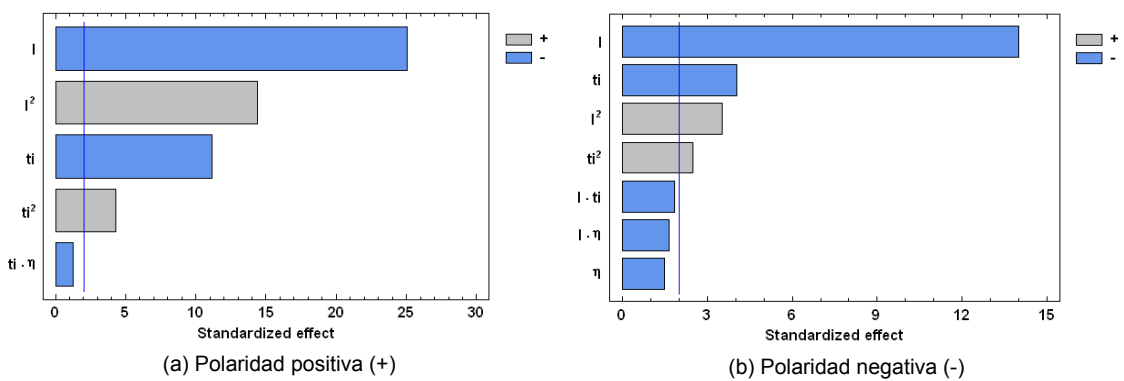


Fig. 4.26. Diagrama de Pareto para Pc con polaridad positiva (a) y negativa (b)

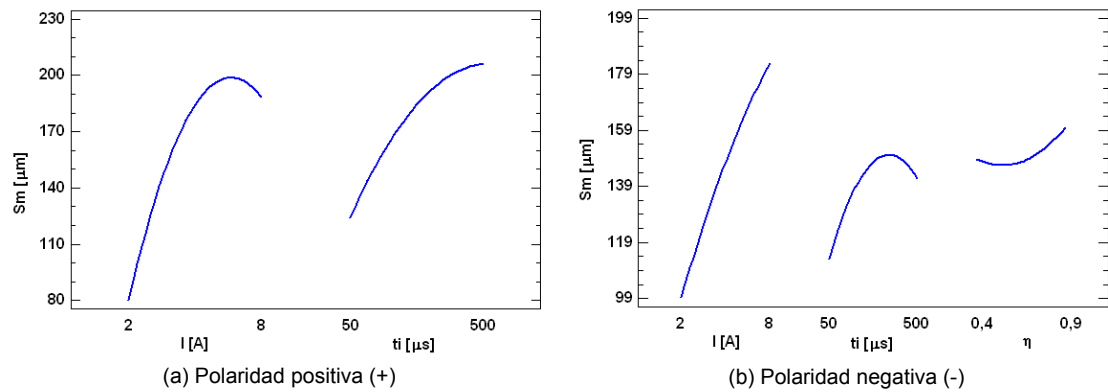


Fig. 4.27. Efectos principales para Sm con polaridad positiva (a) y negativa (b)

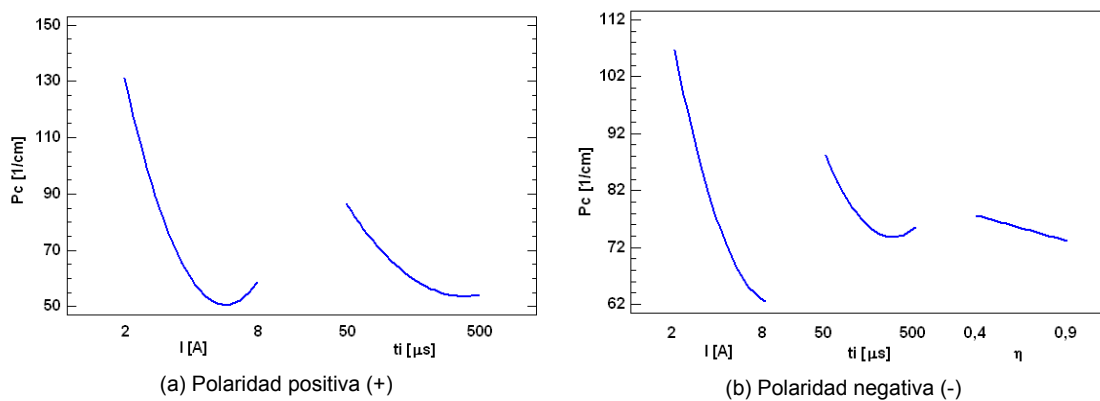


Fig. 4.28. Efectos principales para Pc con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Asimismo, el factor rendimiento no resultó ser significativo para ninguno de los parámetros de espaciamiento ni de las dos polaridades.

Los efectos de interacción se muestran en la Fig. 4.29, para Sm, y en la Fig. 4.30 para Pc. Como puede observarse, la pareja intensidad-tiempo de impulso es la que mayor influencia presenta sobre Sm para ambas polaridades. Asimismo, para Pc, las parejas tiempo de impulso-rendimiento e intensidad-tiempo de impulso son las que mayor interacción presentan para polaridad positiva y negativa, respectivamente.

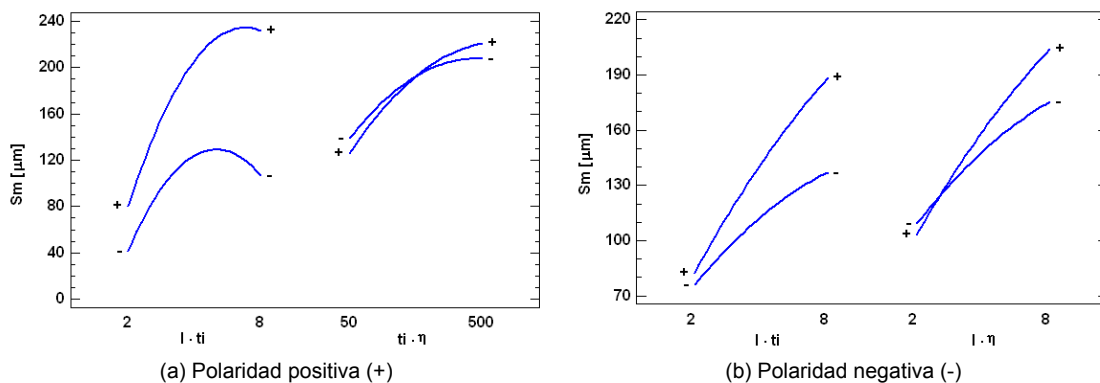


Fig. 4.29. Efectos de interacción para Sm con polaridad positiva (a) y negativa (b)

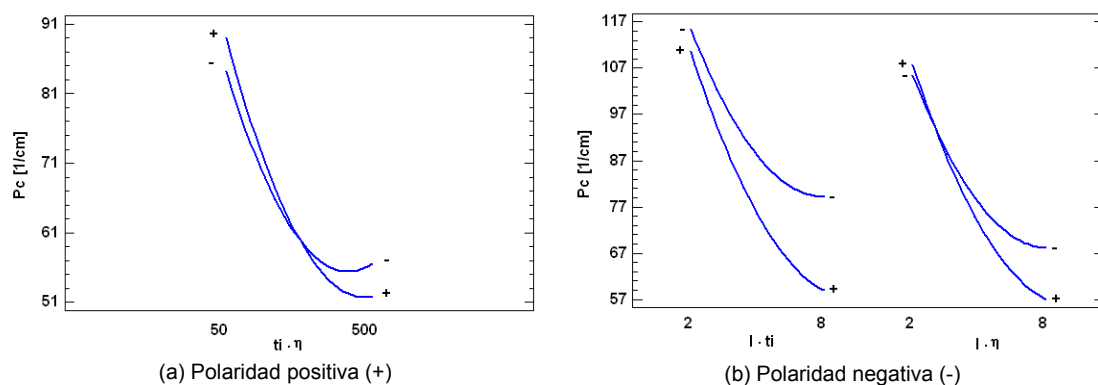


Fig. 4.30. Efectos de interacción para Pc con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Para Sm, en el caso de polaridad positiva se obtiene un valor de R^2 de 89,14 % mientras que el valor de R^2_{adj} es de 87,78 %. Para el caso de polaridad negativa los valores de R^2 y de R^2_{adj} son de 77,74 % y de 74,50 %, respectivamente. La Eq. (20) muestra la ecuación del modelo ajustado de Sm para polaridad positiva y la Eq. (21) para polaridad negativa:

$$Sm = -2,9830 + 64,5871 * I + 0,1547 * t_i - 202,2550 * \eta - 5,5328 * I^2 + 0,0319 * I * t_i - 0,0004 * t_i^2 + 0,1150 * t_i * \eta + 131,2500 * \eta^2 \quad (20)$$

$$Sm = 102,7720 + 9,1201 * I + 0,2020 * t_i - 174,0880 * \eta - 0,7172 * I^2 + 0,0165 * I * t_i + 11,4559 * I * \eta - 0,0004 * t_i^2 + 107,1200 * \eta^2 \quad (21)$$

Por otra parte, para Pc, en el caso de polaridad positiva el valor de R^2 es de 94,44 % y el valor de R^2_{adj} es de 93,96 %. Asimismo, para polaridad negativa los valores de R^2 y de R^2_{adj} son de 81,65 % y de 79,36 %, respectivamente. Las ecuaciones de los modelos ajustados de Pc para ambas polaridades se muestran a continuación en la Eq. (22) y en la Eq. (23):

$$Pc = 244,7560 - 50,7631 * I - 0,1568 * t_i + 11,7675 * \eta + 3,8703 * I^2 + 0,0002 * t_i^2 - 0,0428 * t_i * \eta \quad (22)$$

$$Pc = 138,4570 - 13,0945 * I - 0,0696 * t_i + 13,3432 * \eta + 1,0234 * I^2 - 0,0057 * I * t_i - 4,4619 * I * \eta + 0,0001 * t_i^2 \quad (23)$$

La Fig. 4.31 muestra la superficie de respuesta de S_m en función de la intensidad y el tiempo de impulso para ambas polaridades. Con polaridad positiva, para un determinado valor de tiempo de impulso, al aumentar la intensidad, S_m aumenta hasta un punto situado aproximadamente en 5 A a partir del cual disminuye ligeramente. A su vez, se observa que para una determinada intensidad, S_m aumenta al aumentar el tiempo de impulso. Con polaridad negativa, tal y como se observa en la Fig. 4.31 (b), se aprecia una ligera tendencia de subida de la variable S_m al aumentar la intensidad.

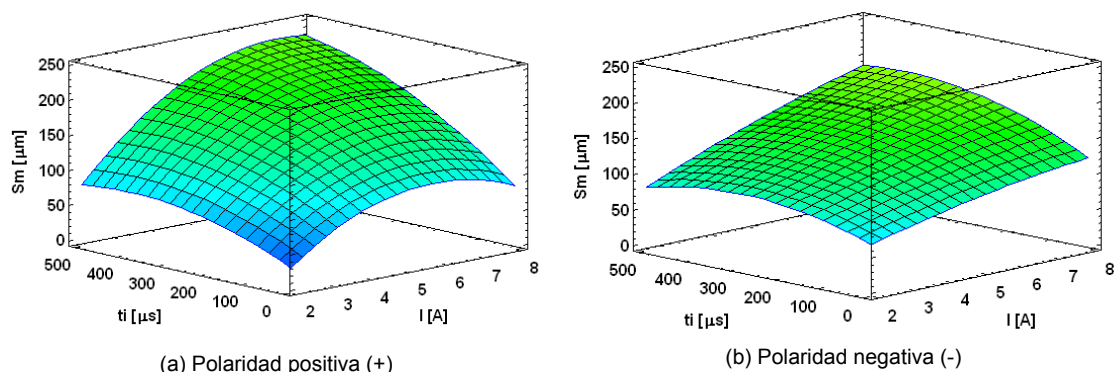


Fig. 4.31. Superficie de respuesta de S_m vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Por otra parte, la Fig. 4.32 representa la superficie de respuesta de P_c en función de la intensidad y el tiempo de impulso. Tal y como se observa, tanto para polaridad positiva como negativa los valores más altos de P_c se consiguen cuanto el tiempo de impulso y la intensidad se encuentran en sus valores mínimos ($50 \mu s$ y 2 A). Además, en la Fig. 4.32 (a) se observa que para un determinado valor de tiempo de impulso, al aumentar la intensidad, P_c disminuye hasta un punto situado aproximadamente en 6,5 A a partir del cual aumenta. Asimismo, para una determinada intensidad, P_c aumenta al disminuir el tiempo de impulso.

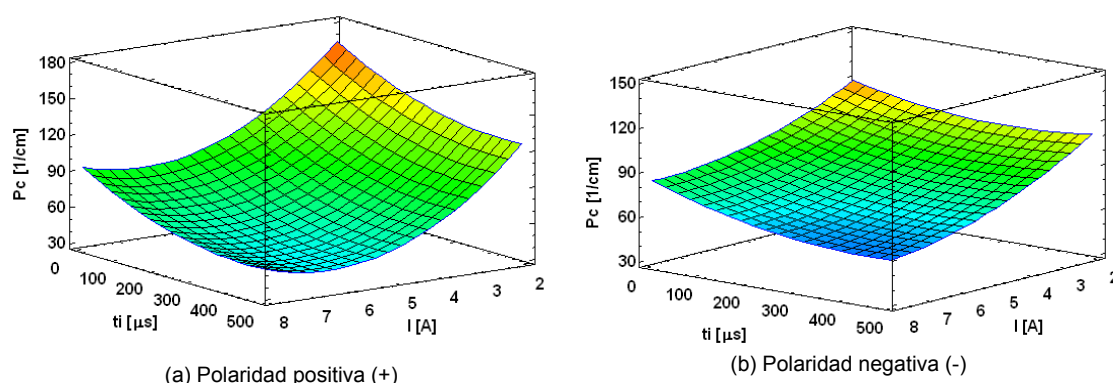


Fig. 4.32. Superficie de respuesta de P_c vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)

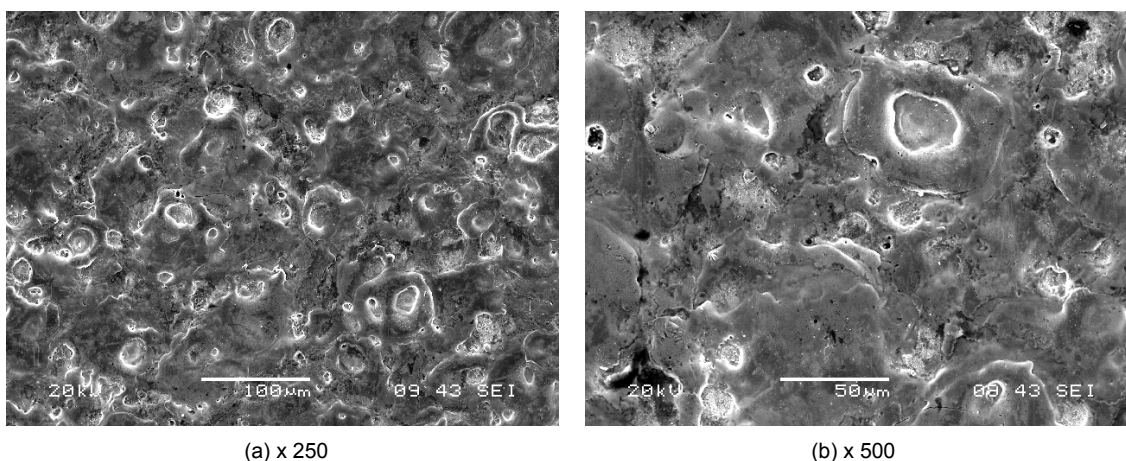
4.1.4. Análisis mediante microscopía electrónica de barrido

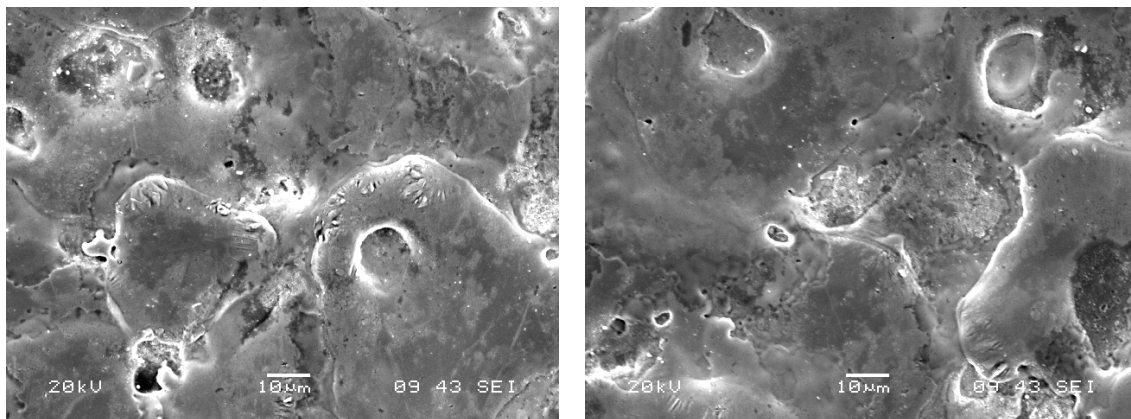
Las superficies resultantes tras el proceso de electroerosión han sido analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Para realizar el estudio, se han seleccionado, de entre los experimentos realizados, aquellos que han conducido a valores máximos y mínimos de R_a en ambas polaridades. Para el caso de polaridad positiva, los experimentos analizados han sido el E49 ($I = 2$ A, $t_i = 50$ μ s y $\eta = 0,9$), con el que se ha obtenido el valor mínimo de R_a de $1,11$ μ m, y el experimento E40 ($I = 8$ A, $t_i = 200$ μ s y $\eta = 0,8$), con el que se ha obtenido el valor máximo de R_a de $7,81$ μ m. Por otra parte, los experimentos con polaridad negativa analizados han sido el E57 ($I = 2$ A, $t_i = 350$ μ s y $\eta = 0,9$) y el E56 ($I = 8$ A, $t_i = 200$ μ s y $\eta = 0,9$), que han conducido a un valor mínimo de R_a de $1,33$ μ m y a un valor máximo de $4,70$ μ m, respectivamente. Todos estos resultados se muestran en la Tabla 4.2 correspondiente a los valores experimentales del Inconel® 600 con electrodo de cobre y polaridades positiva y negativa.

A continuación, se realiza el estudio comparativo de las superficies seleccionadas anteriormente. En primer lugar, se analizan y establecen las diferencias entre las superficies electroerosionadas atendiendo a su polaridad. Esta comparativa se realiza tanto para los experimentos de mínimo R_a como para los de máximo R_a . Tras ello, se realiza una comparativa de las superficies en función de los parámetros que han sido seleccionados para su mecanizado (I , t_i y η).

Las micrografías de las superficies electroerosionadas bajo las diferentes condiciones seleccionadas se muestran en las Fig. 4.33-Fig. 4.36. Estas superficies se caracterizan por la presencia de cráteres superpuestos, microgrietas, poros y gotas de material fundido y posteriormente resolidificado. Además, debido a las altas temperaturas que se alcanzan durante el proceso de EDM, pueden llegar a producirse transformaciones metalúrgicas y tensiones internas en el material. La Fig. 4.33 y la Fig. 4.34 muestran las micrografías a diferentes aumentos de los experimentos E49 y E57 (Tabla 4.2). Como puede observarse en las Fig. 4.33 (a)-Fig. 4.33 (d), al emplear polaridad positiva, las superficies presentan un aspecto homogéneo con predominio de formas redondeadas resultantes de la fusión del propio material de la pieza. Asimismo, en algunas zonas se aprecian mayores irregularidades que pueden ser atribuidas a una rápida resolidificación del material. Sin embargo, no se aprecian grietas a pesar de dichas irregularidades. Por otra parte, las superficies del experimento E57 en el que se empleó polaridad negativa, presentan un aspecto más dañado, caracterizado por la presencia de grietas en toda la superficie, tal y como se muestra en la Fig. 4.34 (b) y en la Fig. 4.34 (c).

En la Fig. 4.34 (a) se han empleado electrones retrodispersados y se observa que la superficie presenta diferentes tonalidades debidas a la cantidad de carbono retenido procedente del dieléctrico. Así, en las zonas más oscuras, existe una importante cantidad de carbono, que incluso llega a superar a la cantidad de níquel. Conforme la cantidad de carbono disminuye, la superficie presenta un aspecto más claro.

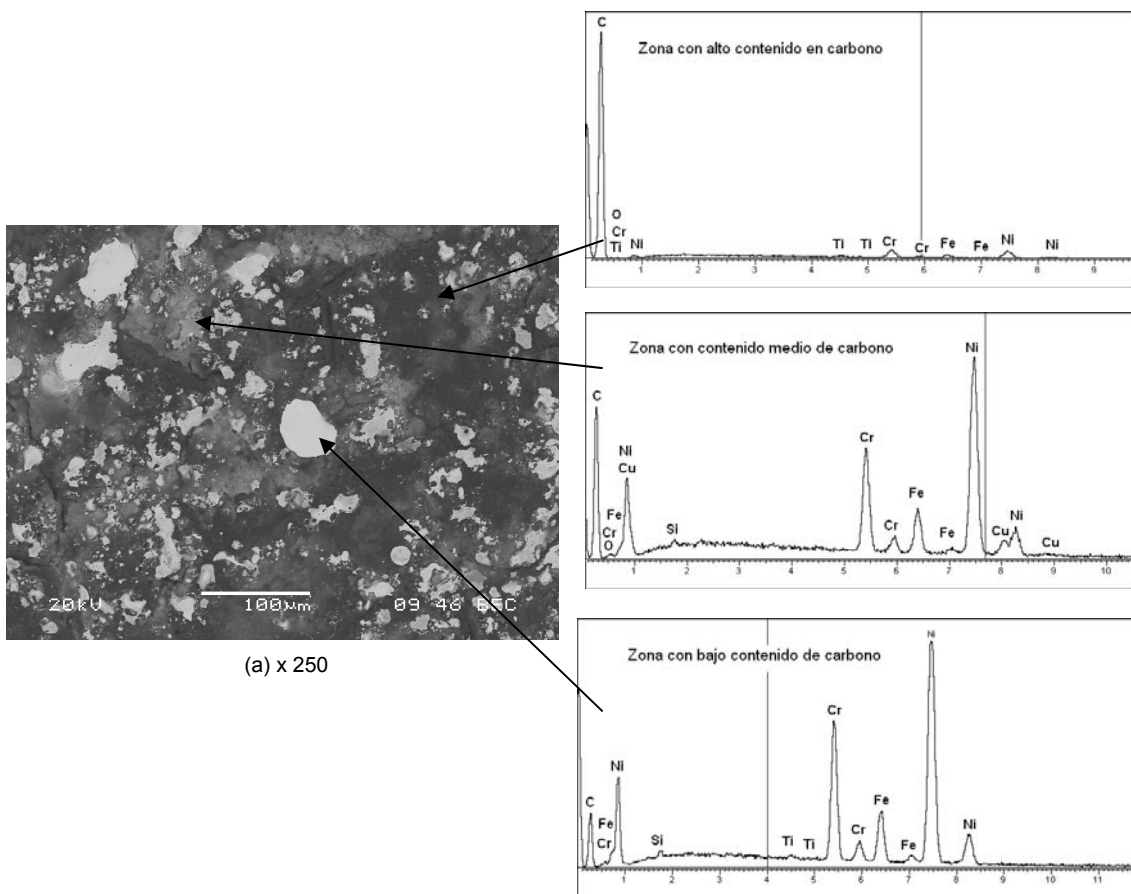




(c) x 1000

(d) x 1000

Fig. 4.33. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E49 con mínimo valor de Ra y polaridad positiva a distintos aumentos (x nº aumentos)



(a) x 250

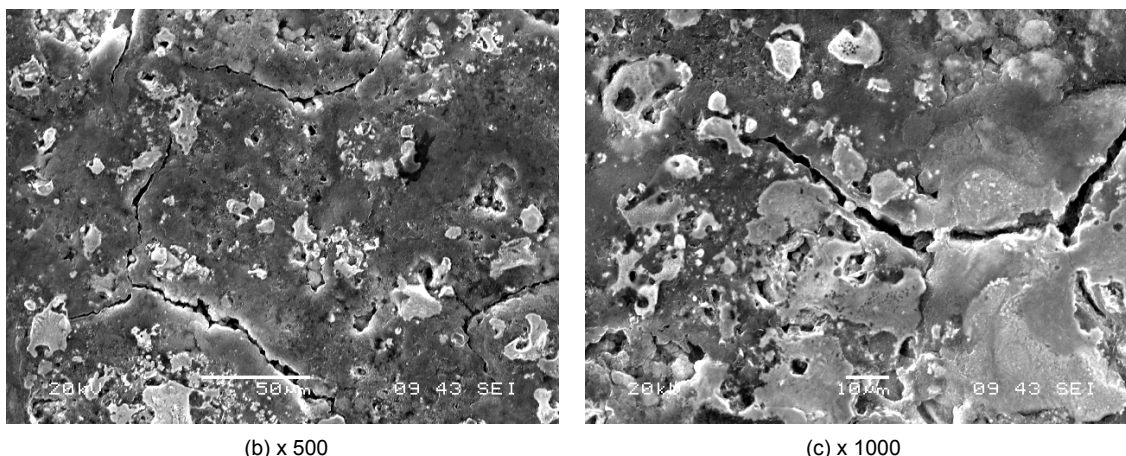
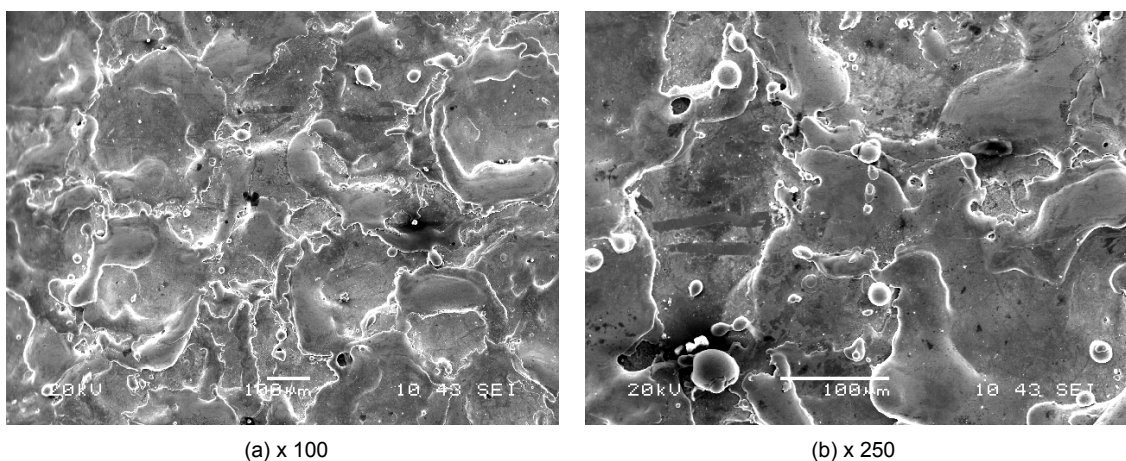
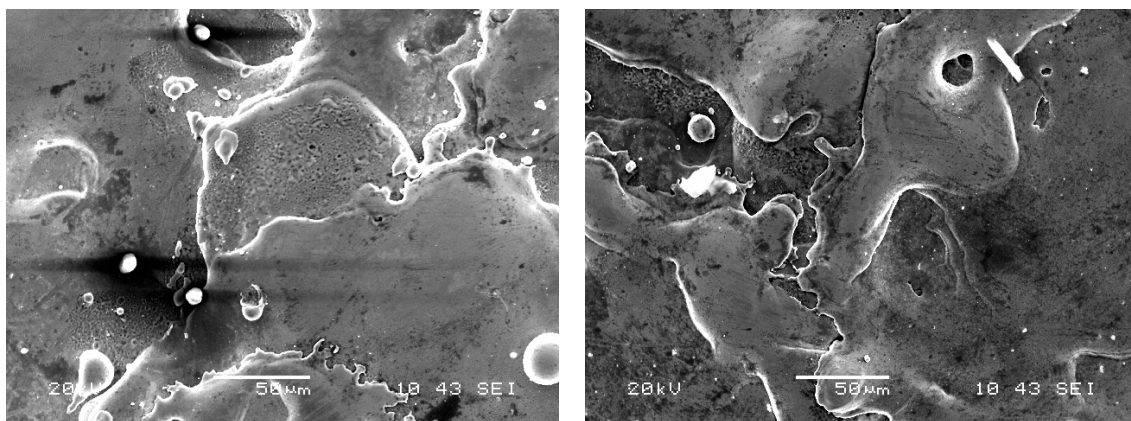


Fig. 4.34. Micrográficas electrónicas de barrido del experimento E57 con mínimo valor de Ra y polaridad negativa a distintos aumentos (x nº aumentos)

La Fig. 4.35 y la Fig. 4.36 muestran las micrográficas electrónicas de barrido con diferentes aumentos de los experimentos con polaridad positiva y negativa, respectivamente, con los que se obtuvo el peor acabado superficial. Como se ha indicado anteriormente, con polaridad positiva el experimento E40 obtuvo un valor de Ra de 7,81 μm y con polaridad negativa el experimento E56 tuvo un Ra de 4,70 μm (Tabla 4.2). No obstante, a pesar de obtenerse mayor Ra con polaridad positiva, la superficie presenta un aspecto menos dañado y no se aprecian grietas evidentes (Fig. 4.35). Sin embargo, con polaridad negativa la superficie resultante está muy cuarteada y las fisuras son muy pronunciadas (Fig. 4.36). Además, cabe destacar que en el experimento E57 se observa la aparición de partículas de carbono procedentes del dieléctrico, lo que provoca un oscurecimiento visual de la superficie.

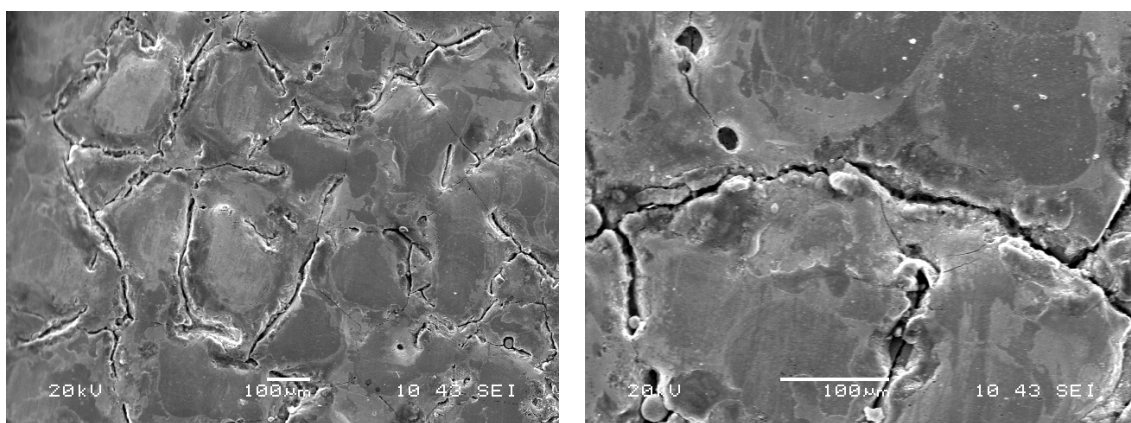




(c) x 500

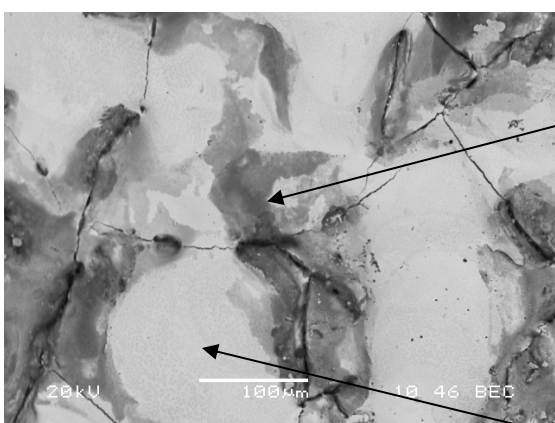
(d) x 1000

Fig. 4.35. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E40 con máximo valor de Ra y polaridad positiva a distintos aumentos (x nº aumentos)



(a) x 100

(b) x 250



(c) x 250

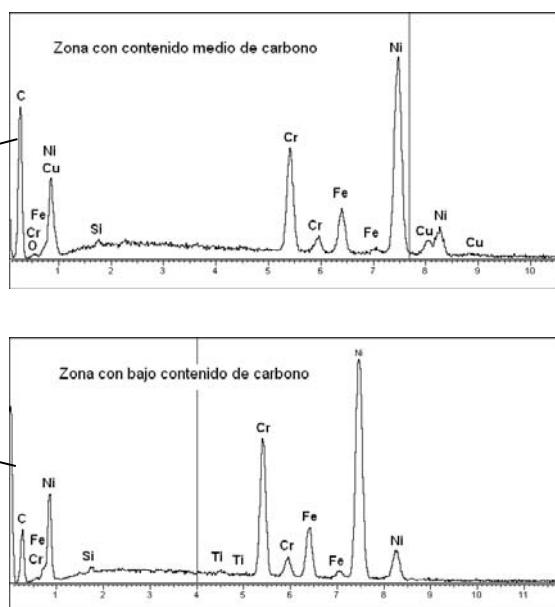


Fig. 4.36. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E56 con máximo valor de Ra y polaridad negativa a distintos aumentos (x nº aumentos)

De acuerdo a los resultados experimentales analizados anteriormente, se puede concluir que los factores que más influyen en la rugosidad superficial son la intensidad y el tiempo de impulso, los cuales determinan la energía de cada descarga. La Fig. 4.33 representa una superficie electroerosionada en condiciones de baja energía ($I = 2 \text{ A}$ y $t_i = 50 \mu\text{s}$) y polaridad positiva. Como puede observarse, la superficie se caracteriza por cráteres poco profundos y por la aparición de pequeñas burbujas, cuya formación puede atribuirse al hecho de que el calor no se ha disipado de una manera uniforme [178]. Al incrementar el valor de la intensidad y el tiempo de impulso, las chispas tienen mayor energía para fundir el material y las burbujas que se forman se colapsan entre sí, dando como resultado una superposición más aleatoria de los cráteres. Este hecho puede observarse en la Fig. 4.35 que muestra una superficie electroerosionada en condiciones de alta energía ($I = 8 \text{ A}$ y $t_i = 200 \mu\text{s}$) y polaridad positiva.

Por otra parte, en el caso de polaridad negativa, el efecto de la intensidad sobre la rugosidad superficial es el mismo que con polaridad positiva, produciendo superficies más dañadas cuanto mayor es el valor de la intensidad, tal y como puede observarse en la Fig. 4.34 y en la Fig. 4.36.

Respecto al rendimiento, su efecto no influye de forma significativa en la rugosidad superficial ya que en los casos analizados en este apartado (máxima y mínima rugosidad) el rendimiento se corresponde con valores próximos a los máximos (0,8 y 0,9). Estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos en el análisis de R_a que se ha mostrado en el apartado 4.1.3.1.

De manera resumida, se muestran la Tabla 4.15 y la Tabla 4.16 en las que quedan representados de manera simplificada y esquemática los resultados obtenidos. Asimismo, la Tabla 4.15 recoge los valores máximos y mínimos obtenidos con cada una de las polaridades seleccionadas, mientras que la Tabla 4.16 muestra esquemáticamente los factores más significativos para cada una de las variables cuando aumentan de su valor inferior a su valor superior dentro del rango definido para cada uno de ellos, donde \uparrow significa que aumenta, \downarrow indica que disminuye, $\uparrow\downarrow$ significa que, en principio, se produce un

aumento pero, llegado a un valor, disminuye y, finalmente, ↓↑ indica la tendencia contraria a la anterior.

Variable	MRR (mm ³ /min)				EW (%)				Ra (μm)			
	+		-		+		-		+		-	
Nivel	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
	22,4729	0,0599	1,8621	0,0128	3,80	-0,19	62,82	7,40	7,81	1,11	4,70	1,33

Tabla 4.15. Resultados máximos y mínimos obtenidos

Variable	MRR						EW						Ra					
	+			-			+			-			+			-		
Factor	l	t _i	η	l	t _i	η	l	t _i	η	l	t _i	η	l	t _i	η	l	t _i	η
	↑	↓	↑	↑	↑↓	↑	↓↑	↓↑		↓↑	↓↑		↑			↑	↑↓	

Tabla 4.16. Factores significativos y su tendencia

4.2. Mecanizado con electrodo de grafito

Tras el estudio de la electroerosión del Inconel® 600 empleando electrodos de cobre y polaridades positiva y negativa, a continuación, se analiza el comportamiento de dicha aleación utilizando electrodos de grafito y ambas polaridades. Tal y como se comentó en el apartado 3 de planificación de la experimentación, para llevar a cabo los experimentos se han utilizado electrodos de grafito Poco, concretamente el grafito EDM1 que posee un grano ultrafino con un tamaño medio de partícula menor de 5 μm.

Para la selección de los valores de los factores de diseño, se ha procedido de manera análoga al estudio anterior. Se realizaron diversos ensayos previos teniendo como punto de partida las experiencias previas de otros investigadores, como Aas [101] y Mohanty et al. [136], en la electroerosión de aleaciones Inconel con electrodo de grafito, así como las propias experiencias anteriormente descritas en la EDM de Inconel® 600 con electrodo de cobre, y que quedan detalladas en el apartado 4.1 de la presente Tesis Doctoral. Sin embargo, con dichos ensayos se observó que, a pesar de ser el mismo material de la pieza, no se pueden aplicar los mismos valores de los

parámetros utilizados en el mecanizado de Inconel® 600 con electrodo de cobre que con electrodo de grafito. Asimismo, se encontró que cuando se utilizan electrodos de grafito, valores altos de rendimiento y tiempo de impulso conducen a un proceso poco estable. Además, también se observó que el proceso de EDM está influenciado por la polaridad y, por tanto, para conseguir las condiciones de mecanizado óptimas se han seleccionado diferentes valores para cada polaridad. Dichos valores y los niveles seleccionados se muestran en la Tabla 4.17.

Parámetro de diseño	Unidad	Niveles y valores							
		Polaridad positiva				Polaridad negativa			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Intensidad	A	2	4	6	8	2	4	6	8
Tiempo de impulso	µs	5	25	50	75	25	50	75	100
Rendimiento		0,4	0,5	0,6	0,7	0,3	0,4	0,5	0,6
Tensión	V	200							
Presión del dieléctrico	kPa	30							

Tabla 4.17. Parámetros de diseño y niveles seleccionados para el caso de la EDM del Inconel® 600 con electrodo de grafito y polaridades positiva y negativa

Para predecir las variables de respuesta de antemano y seleccionar las condiciones óptimas de mecanizado con un número relativamente pequeño de experimentos, se han utilizado técnicas de Diseño de Experimentos (DOE). Concretamente, se ha empleado un modelo factorial 4³. Los valores medios de los resultados experimentales obtenidos para ambas polaridades quedan recogidos en la Tabla 4.18.

E	Polaridad positiva (+)							Polaridad negativa (-)						
	MRR (mm ³ /min)	EW (%)	Ra (µm)	Rq (µm)	Rt (µm)	Sm (µm)	Pc (1/cm)	MRR (mm ³ /min)	EW (%)	Ra (µm)	Rq (µm)	Rt (µm)	Sm (µm)	Pc (1/cm)
1	0,2630	-701,04	0,94	1,18	7,41	51,60	195,00	0,5699	74,00	1,52	1,91	12,08	76,60	129,80
2	1,3698	-20,37	1,58	2,00	13,65	56,40	177,00	4,2734	15,29	3,32	4,19	27,39	81,20	124,40
3	1,8063	-152,80	1,67	2,10	13,28	59,40	171,40	6,4156	3,88	3,66	4,57	25,68	88,40	113,60
4	2,2672	-120,67	1,81	2,29	14,93	65,40	154,80	9,1041	31,14	4,35	5,45	32,22	100,80	100,80
5	0,8402	-122,90	1,49	1,90	12,39	83,40	122,40	0,4520	115,07	1,38	1,77	12,91	71,00	141,60
6	3,9692	6,57	3,09	3,93	23,11	86,80	116,20	6,2260	20,59	4,49	5,75	37,12	98,00	104,40
7	6,0860	6,97	3,50	4,43	26,27	94,80	106,00	10,0696	48,21	5,43	6,74	36,97	105,80	95,20
8	8,6599	-49,80	4,11	5,19	32,25	100,40	98,40	15,0825	14,50	6,51	8,17	45,59	114,40	87,60
9	0,1597	-1312,9	1,27	1,64	11,87	70,80	142,20	0,5014	49,29	1,54	1,98	14,22	78,00	129,60
10	3,2433	-503,10	3,96	4,92	27,56	103,80	97,20	7,4782	16,97	5,60	6,97	39,23	111,40	90,00
11	5,9645	-147,68	4,54	5,66	33,02	123,20	83,20	11,6262	31,87	5,99	7,49	43,79	126,00	84,00
12	9,3896	-59,24	5,21	6,55	36,94	135,00	83,60	13,8073	34,44	7,27	8,90	48,23	134,40	76,60

13	0,1133	-378,39	2,06	2,63	16,60	107,80	103,80	0,4596	272,79	2,28	2,89	17,96	182,20	95,40
14	2,8290	-73,21	4,11	5,05	27,73	110,00	89,80	9,0158	42,67	6,61	8,14	44,31	119,60	85,60
15	5,0238	-25,41	4,93	6,17	36,96	114,80	88,20	13,6966	32,05	7,19	8,88	49,36	128,80	77,20
16	8,5609	-18,30	5,54	6,97	38,96	124,40	81,20	17,5804	38,25	8,20	10,15	55,05	139,40	71,60
17	0,3487	1,65	0,98	1,23	8,05	47,60	212,00	0,7383	178,10	1,45	1,84	12,10	75,20	134,40
18	1,8884	13,54	1,68	2,14	14,28	59,60	167,80	6,3300	45,94	3,47	4,32	25,38	86,00	117,00
19	2,5261	-5,22	1,80	2,27	15,37	66,00	152,00	9,4129	50,20	4,10	5,13	30,70	97,60	103,60
20	6,8815	18,61	2,05	2,58	16,75	73,20	137,20	12,1597	39,28	4,45	5,53	33,46	96,00	104,80
21	0,2367	-116,12	1,37	1,71	9,78	73,80	138,60	0,6534	190,52	1,48	1,86	11,32	75,40	131,40
22	4,2895	-26,72	3,24	4,08	24,36	81,40	123,20	7,0263	8,94	4,38	5,46	32,17	97,20	103,20
23	6,9907	-4,41	3,63	4,58	27,69	89,00	111,20	10,6470	19,19	4,92	6,20	36,08	114,00	88,40
24	11,1679	6,49	4,43	5,58	34,05	103,60	97,40	16,2725	26,61	5,72	7,11	39,44	115,20	90,20
25	0,1805	-18,07	1,40	1,76	10,37	73,20	137,80	0,4946	269,61	1,55	1,94	12,73	77,60	132,00
26	3,8065	-32,73	3,92	4,94	30,19	103,00	102,20	7,6945	70,61	4,42	5,48	29,75	112,80	90,20
27	7,0656	7,15	4,65	5,80	31,75	109,00	92,80	10,7480	74,17	6,01	7,45	41,64	125,00	81,40
28	10,7288	-71,32	5,41	6,80	36,30	127,20	82,80	18,2591	60,49	6,88	8,58	44,37	144,60	80,40
29	0,1401	16,17	1,54	1,95	12,08	73,60	137,00	0,2452	379,31	1,74	2,19	14,31	87,20	115,60
30	3,4051	-54,61	3,84	4,70	25,35	105,80	95,20	9,0114	66,82	6,25	7,73	40,99	118,40	85,00
31	6,0046	-24,40	4,76	5,96	32,59	116,00	86,00	13,8703	3,29	7,47	9,11	45,98	134,00	73,60
32	10,7382	-27,18	5,29	6,67	36,35	120,60	82,40	22,2854	2,79	8,58	10,53	55,24	141,80	71,60
33	0,4284	-106,36	0,97	1,22	7,57	46,20	217,20	0,9174	188,10	1,57	2,00	13,71	82,20	123,00
34	2,2679	-22,58	1,91	2,43	16,33	63,80	157,20	8,1018	18,61	3,23	4,09	25,08	85,00	118,20
35	3,3842	32,92	2,33	2,95	18,28	76,20	132,40	12,4988	98,86	3,58	4,56	29,21	88,20	115,20
36	4,2485	27,71	2,40	3,05	19,02	85,20	118,60	16,4842	84,07	4,32	5,41	31,70	96,00	105,40
37	0,1997	-101,15	1,28	1,61	10,24	66,80	150,40	0,6855	236,28	1,47	1,87	12,51	71,00	139,60
38	5,5242	-4,14	3,40	4,31	25,62	85,80	117,00	8,6770	6,60	4,43	5,49	29,49	101,40	100,20
39	8,5604	-14,28	3,54	4,44	24,97	94,00	108,00	13,7997	0,31	5,40	6,61	35,67	141,20	84,40
40	14,3936	-0,49	4,51	5,68	34,82	103,40	96,60	21,0595	19,99	5,99	7,45	41,06	126,60	85,20
41	0,1739	-93,98	1,54	1,92	12,06	79,20	127,60	0,5471	259,97	1,50	1,87	11,46	75,80	131,40
42	4,7279	-29,69	4,10	5,09	28,45	102,00	99,20	9,6962	31,20	5,19	6,41	36,70	106,20	95,20
43	7,8201	1,03	4,74	5,90	32,15	110,60	91,60	16,0767	34,35	6,17	7,73	44,06	119,40	84,20
44	14,2499	5,27	5,21	6,45	36,78	134,40	80,40	21,6569	26,72	7,12	8,85	48,71	143,20	73,00
45	0,1672	-214,73	1,59	2,03	14,57	76,20	132,80	0,4953	204,89	1,74	2,18	13,59	87,40	117,20
46	3,5819	-10,80	4,44	5,59	31,13	113,00	89,80	9,1541	50,65	5,69	7,13	39,36	113,00	90,20
47	7,1846	-4,59	5,17	6,34	33,11	126,00	80,80	14,8040	25,95	7,23	9,12	51,62	131,20	76,60
48	11,5018	2,38	5,85	7,26	41,20	129,60	77,40	21,5842	25,65	7,68	9,52	49,03	142,20	74,20
49	0,4747	57,09	1,01	1,34	10,15	50,80	200,20	1,1121	196,01	1,54	1,96	12,98	80,80	124,40
50	2,6933	11,27	2,46	3,09	18,84	83,00	121,80	11,0088	52,37	3,60	4,53	27,02	93,60	108,40
51	3,5792	8,83	2,72	3,29	20,31	84,80	119,20	15,3751	43,77	4,13	5,10	27,33	99,40	104,60
52	4,4981	6,04	3,31	4,13	23,70	108,80	93,80	21,2896	45,10	4,60	5,73	32,36	107,40	95,60
53	0,2049	-49,00	1,34	1,69	11,54	69,80	143,60	0,8547	185,51	1,55	1,95	11,91	77,60	128,60
54	5,9116	-42,16	3,31	4,21	25,92	83,00	121,80	11,0923	17,11	4,49	5,60	30,60	100,80	99,80
55	6,3113	7,79	3,70	4,72	27,35	91,60	109,80	15,1724	120,05	5,47	6,80	38,01	117,40	88,80
56	13,7783	-0,13	3,99	5,06	28,25	109,20	92,00	21,0225	33,37	5,81	7,40	42,02	115,60	87,80
57	0,1836	-111,88	1,65	2,10	14,16	87,80	113,80	0,6251	340,79	1,50	1,89	11,95	72,60	136,60
58	5,3840	16,41	4,16	5,16	29,42	103,20	97,60	10,5310	51,81	5,42	6,73	37,27	106,40	93,40
59	9,5963	-28,13	4,63	5,81	33,09	108,40	93,80	15,7846	49,22	5,58	6,90	37,19	113,00	89,00
60	15,3602	8,56	5,19	6,63	40,39	111,40	89,60	20,9951	31,42	5,78	7,24	40,71	117,40	86,40
61	0,1659	-153,13	1,71	2,25	15,63	83,80	121,60	0,5253	282,35	1,75	2,20	14,17	88,60	115,40
62	4,2820	-21,52	4,38	5,46	31,79	104,60	96,20	11,3584	51,46	5,82	7,13	36,15	128,60	81,20
63	8,3928	-11,39	5,20	6,44	35,90	130,60	81,60	17,0805	34,65	6,26	7,66	42,21	130,20	78,00
64	14,4956	510,24	5,64	6,99	35,97	164,60	77,80	21,8990	29,43	7,61	9,42	52,29	130,80	75,60

Tabla 4.18. Resultados experimentales con electrodo de grafito para polaridad positiva y negativa

A continuación, y de manera análoga al estudio realizado en el apartado 4.1 para el electrodo de cobre, se analizan los resultados obtenidos de las variables de respuesta para el electrodo de grafito.

4.2.1. Análisis y discusión de resultados para la tasa de eliminación de material

A partir de los resultados experimentales mostrados en la Tabla 4.18 se obtienen las tablas ANOVA de los modelos simplificados de MRR, las cuales se recogen en la Tabla 4.19, para polaridad positiva, y en la Tabla 4.20, para polaridad negativa. Como puede observarse, seis efectos, para polaridad positiva, y siete efectos, para polaridad negativa, son estadísticamente significativos. En ambos casos, la intensidad es el factor que más influye en MRR, e influye de tal manera que un aumento de su valor produce un aumento en la tasa de arranque. Con valores bajos de intensidad, se genera una pequeña cantidad de calor. Parte de este calor es absorbido por la pieza, el electrodo y el dieléctrico, y el resto se emplea en la fusión del material de la pieza. Al aumentar la intensidad, el calor generado es mayor y las chispas son más energéticas, lo que conduce a una mayor y más eficiente eliminación de material.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	820,70	1	820,70	476,40	0,0000
B: Tiempo de impulso	59,86	1	59,86	34,75	0,0000
C: Rendimiento	43,28	1	43,28	25,13	0,0000
AB	49,92	1	49,92	28,98	0,0000
AC	24,73	1	24,73	14,36	0,0004
BB	78,12	1	78,12	45,35	0,0000
BC	3,15	1	3,15	1,83	0,1815
Error total	96,47	56	1,72		
Total (corr.)	1155,32	63			

Tabla 4.19. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - MRR

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	2601,47	1	2601,47	2084,10	0,0000
B: Tiempo de impulso	69,89	1	69,90	55,99	0,0000
C: Rendimiento	177,75	1	177,75	142,40	0,0000
AA	29,34	1	29,34	23,51	0,0000
AB	42,75	1	42,75	34,25	0,0000
AC	60,50	1	60,50	48,47	0,0000
BC	23,82	1	23,82	19,08	0,0001
Error total	69,90	56	1,25		
Total (corr.)	3075,42	63			

Tabla 4.20. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - MRR

Los resultados obtenidos en la Tabla 4.19 y en la Tabla 4.20 se representan en la Fig. 4.37, que muestra el diagrama de Pareto para ambas polaridades. Como puede observarse, la intensidad es el factor que más influye en MRR, tanto para polaridad positiva como para polaridad negativa. Además, en ambos casos tiene el mismo efecto, siendo mayor la tasa de material eliminada cuanto mayor es su valor.

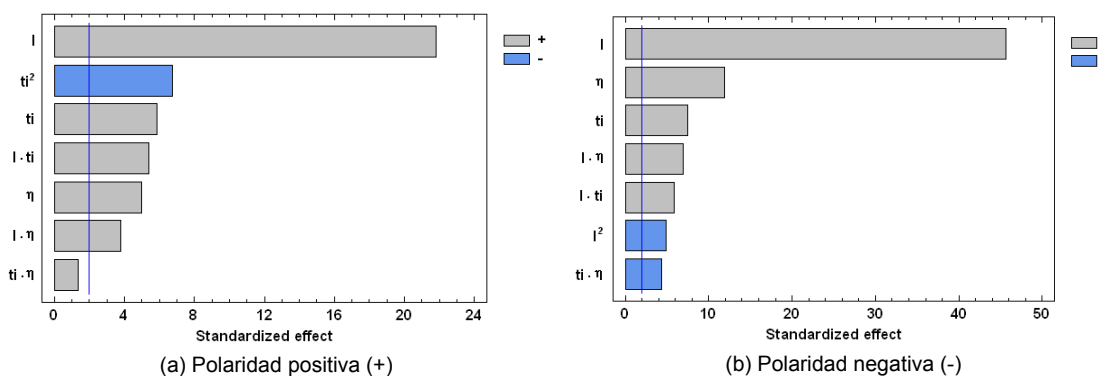


Fig. 4.37. Diagrama de Pareto para MRR con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Por otra parte, como puede observarse en la Fig. 4.38 que muestra los efectos principales para MRR, la intensidad y el rendimiento siguen la misma tendencia para ambas polaridades. En ambos casos, al aumentar su valor, la tasa de eliminación aumenta. Al disminuir el valor del rendimiento, el tiempo de pausa aumenta y se produce una mayor pérdida de calor, lo que conduce a una caída en la temperatura de la pieza antes de que comience la siguiente chispa y, por tanto, una disminución de MRR [179]. Sin embargo, respecto al comportamiento del tiempo de impulso, éste difiere de una polaridad a otra. Con polaridad positiva, MRR tiende a incrementar al aumentar el tiempo de impulso hasta un máximo, situado aproximadamente en 50 μ s, a partir del cual comienza a decrecer, mientras que con polaridad negativa, MRR aumenta al aumentar el tiempo de impulso.

Por otra parte, de manera opuesta a los resultados obtenidos de MRR con electrodo de cobre, cabe destacar que con polaridad negativa los valores de MRR son ligeramente superiores a los obtenidos con polaridad positiva. Ji et al. [88] atribuyen este hecho a la menor masa de los electrones frente a los

cationes, lo que provoca que los primeros sean acelerados e impulsados sobre la superficie de la pieza con mayor velocidad y arranquen mayor cantidad de material. Asimismo, las tasas de eliminación de material máxima y mínima obtenidas con polaridad negativa han sido de 22,2854 mm³/min y 0,2452 mm³/min, respectivamente, mientras que con polaridad positiva se obtuvieron valores de 15,3602 mm³/min y 0,1133 mm³/min.

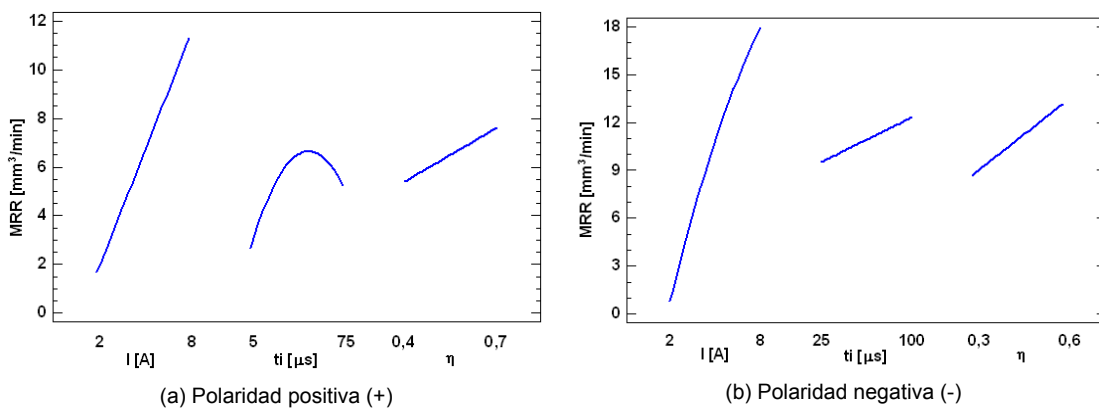


Fig. 4.38. Efectos principales para MRR con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Los efectos de interacción de MRR se muestran en la Fig. 4.39. Como puede observarse, la parejas intensidad-tiempo de impulso e intensidad-rendimiento son las que mayor influencia presentan sobre MRR para ambas polaridades.

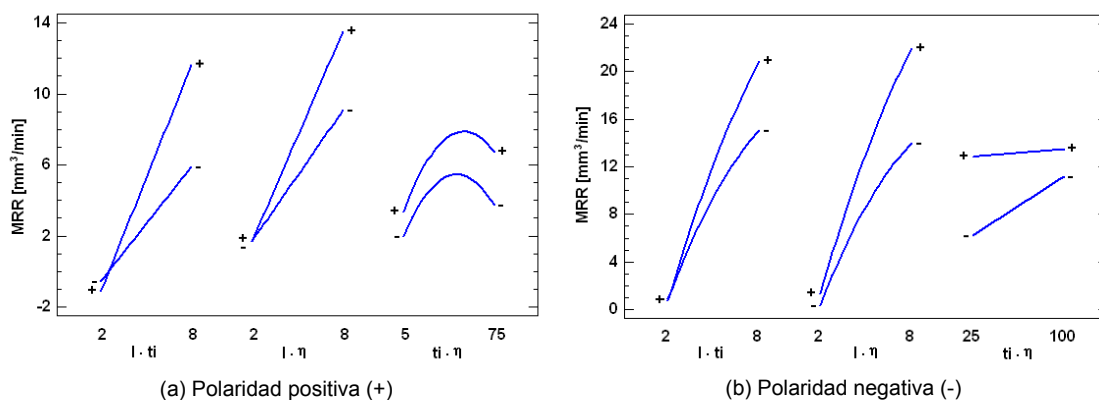


Fig. 4.39. Efectos de interacción para MRR con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Para los experimentos con polaridad positiva, se obtienen unos valores de R² y de R²_{adj} de 91,65 % y de 90,61 %, respectivamente, mientras que para polaridad negativa, R² es 97,73 % y R²_{adj} es 97,44 %. Esto indica que los

modelos son estadísticamente válidos para caracterizar la relación entre MRR y los parámetros de EDM. La ecuación simplificada del modelo para polaridad positiva se muestra en la Eq. (24) y para polaridad negativa en la Eq. (25):

$$MRR = 1,1413 - 0,3648 * I + 0,0860 * t_i - 8,0873 * \eta + 0,0150 * I * t_i + 2,4866 * I * \eta - 0,0021 * t_i^2 + 0,0755 * t_i * \eta \quad (24)$$

$$MRR = -9,2750 + 1,9767 * I + 0,0599 * t_i + 7,6624 * \eta - 0,1693 * I^2 + 0,0131 * I * t_i + 3,8890 * I * \eta - 0,1952 * t_i * \eta \quad (25)$$

La Fig. 4.40 y la Fig. 4.41 representan las gráficas de superficie de respuesta de MRR, para las dos polaridades. Como se observa en la Fig. 4.40 (a) para un determinado valor de intensidad, al aumentar el tiempo de impulso, MRR aumenta hasta un punto situado aproximadamente en 40 μ s a partir del cual disminuye. A su vez, se observa que para un determinado tiempo de impulso, MRR aumenta al aumentar la intensidad. Esta tendencia es ligeramente más pronunciada con valores altos de tiempo de impulso (de 40 μ s a 75 μ s). Con polaridad negativa, tal y como se observa en la Fig. 4.40 (b), los valores más altos de MRR se consiguen cuando tanto el tiempo de impulso como la intensidad se encuentran en sus valores máximos (100 μ s y 8 A). Por otro lado, en la Fig. 4.41, se observa que las tasas más altas de eliminación de material para ambas polaridades se consiguen con valores máximos de intensidad y rendimiento (8 A y 0,7).

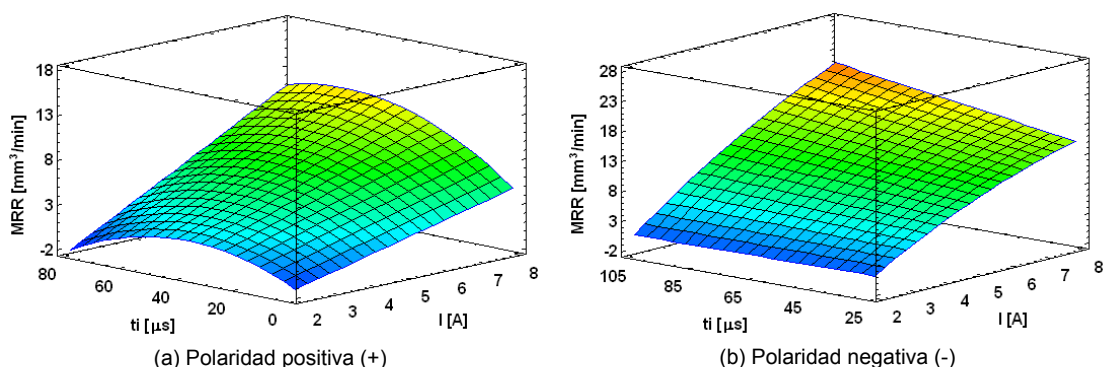


Fig. 4.40. Superficie de respuesta de MRR vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)

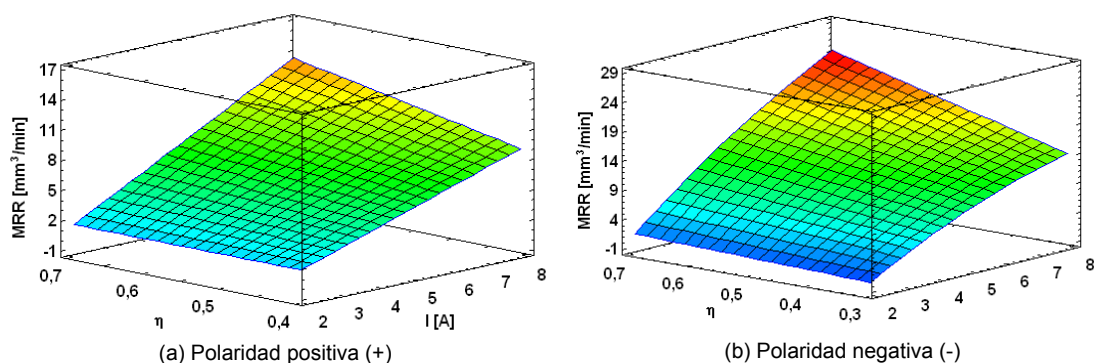


Fig. 4.41. Superficie de respuesta de MRR vs. I y η con polaridad positiva (a) y negativa (b)

4.2.2. Análisis y discusión de resultados para el desgaste del electrodo

A partir de los resultados experimentales obtenidos que se muestran en la Tabla 4.18, se pueden obtener las tablas ANOVA para el desgaste volumétrico del electrodo para ambas polaridades. Como puede observarse en la Tabla 4.21, la intensidad y el rendimiento son los únicos efectos significativos en la respuesta EW con polaridad positiva. Sin embargo, con polaridad negativa, tal y como se observa en la Tabla 4.22, cuatro efectos influyen en EW. Estos efectos, ordenados de mayor a menor influencia, son: la intensidad, el efecto cuadrático de la intensidad, el efecto de interacción entre la intensidad y el tiempo de impulso y, finalmente, el rendimiento.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	416596,00	1	416596,00	14,17	0,0004
C: Rendimiento	408076,00	1	408076,00	13,88	0,0005
AA	63703,90	1	63703,90	2,17	0,1466
AB	49931,40	1	49931,40	1,70	0,1978
AC	99415,80	1	99415,80	3,38	0,0712
BB	42411,90	1	42411,90	1,44	0,2347
CC	106667,00	1	106667,00	3,63	0,0619
Error total	1,65E6	56	29395,80		
Total (corr.)	2,82E6	63			

Tabla 4.21. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - EW

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	227679,00	1	227679,00	105,84	0,0000
B: Tiempo de impulso	7077,45	1	7077,45	3,29	0,0752
C: Rendimiento	12457,00	1	12457,00	5,79	0,0195
AA	116296,00	1	116296,00	54,06	0,0000
AB	26539,80	1	26539,00	12,34	0,0009

AC	7765,05	1	7765,05	3,61	0,0627
BC	2658,49	1	2658,49	1,24	0,2711
CC	2408,85	1	2408,85	1,12	0,2946
Error total	118312,00	55	2151,13		
Total (corr.)	521194,00	63			

Tabla 4.22. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - EW

Los datos recogidos en las tablas ANOVA se muestran, asimismo, de forma gráfica en la Fig. 4.42 y en la Fig. 4.43 que corresponden al diagrama de Pareto y la gráfica de efectos principales, respectivamente. Como puede observarse en la Fig. 4.42, la intensidad es el factor que más influye en EW para ambas polaridades. Sin embargo, presenta un comportamiento totalmente opuesto al variar la polaridad. Con polaridad positiva, EW tiende a aumentar al aumentar la intensidad hasta un máximo, situado aproximadamente en 7 A, a partir del cual comienza a disminuir, mientras que con polaridad negativa disminuye al aumentar la intensidad hasta un valor de 7 A, a partir del cual tiende a aumentar.

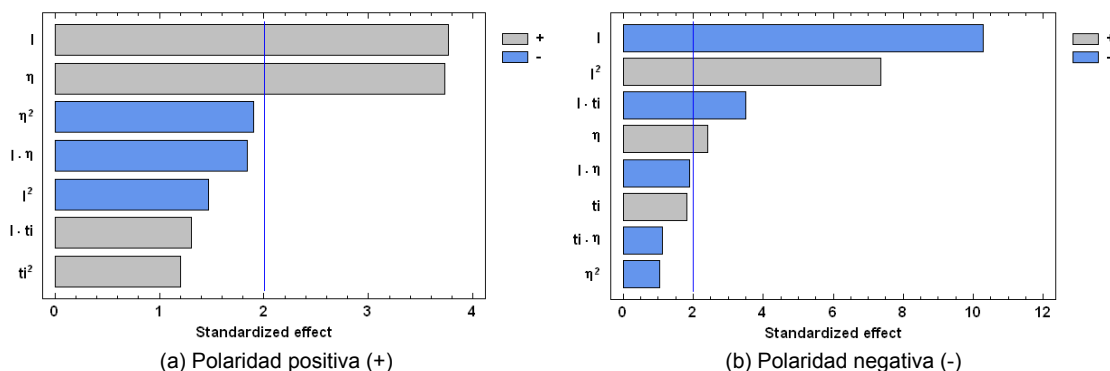


Fig. 4.42. Diagrama de Pareto para EW con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Por otra parte, en la Fig. 4.43 se observa que el valor de EW aumenta al aumentar el valor del rendimiento, hasta un punto situado aproximadamente en 0,6 para polaridad positiva y en 0,5 para polaridad negativa, a partir del cual comienza a disminuir.

Además, cabe destacar que los valores de desgaste alcanzados con polaridad positiva son mucho más bajos que con negativa. Esto puede atribuirse al hecho de que durante el proceso de EDM la presión del dieléctrico no es suficiente

para expulsar todos los restos de material fundido y una parte de éstos se depositan sobre la superficie del electrodo, donde finalmente resolidifican. Este aumento en el peso del electrodo es más pronunciado para valores bajos de intensidad y de rendimiento, tal y como muestra la Fig. 4.43 (a). De acuerdo con la Tabla 4.18, al seleccionar polaridad positiva, el mínimo valor alcanzado de EW es del -1312,96 %, mientras que con polaridad negativa es de 0,31 %. Cabe destacar que el valor obtenido de EW con polaridad positiva se debe a la gran diferencia del volumen de material arrancado de la pieza ($0,0190 \text{ cm}^3$) frente al arrancado del electrodo ($0,2492 \text{ cm}^3$), que en este caso es muy superior debido a la deposición de carbono sobre su superficie.

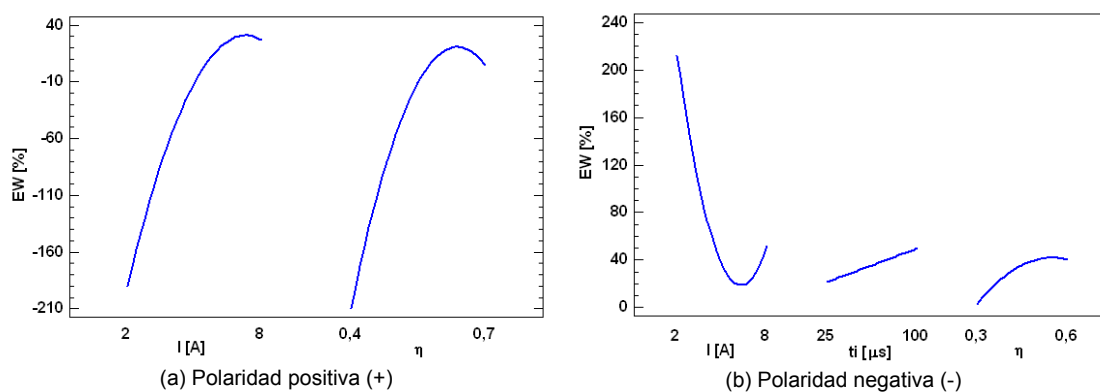


Fig. 4.43. Efectos principales para EW con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Los efectos de interacción de EW se muestran en la Fig. 4.44. Como puede observarse, la pareja intensidad-tiempo de impulso es la que mayor influencia presenta sobre EW para ambas polaridades.

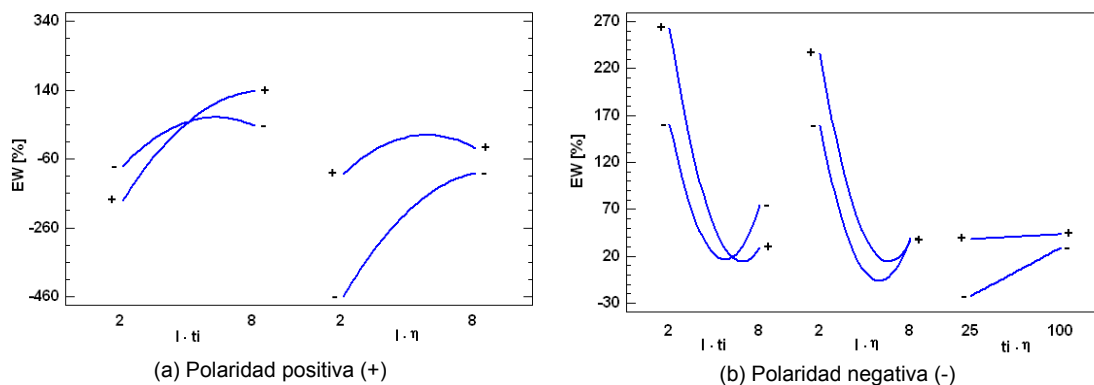


Fig. 4.44. Efectos de interacción para EW con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Para EW y polaridad positiva, se obtiene un valor de R^2 de 41,63 % mientras que R^2_{adj} tiene un valor de 34,34 %. Para el caso de polaridad negativa, los valores de R^2 y de R^2_{adj} son de 77,30 % y de 74,00 %, respectivamente. Debido a la gran variabilidad de los resultados obtenidos para EW y que se muestran en la Tabla 4.18, los valores obtenidos para el modelo ajustado de EW son muy inferiores a los obtenidos para MRR y los parámetros de rugosidad superficial. Además, esta tendencia es incluso mayor en el caso de polaridad positiva debido a la gran cantidad de material depositado sobre la superficie del electrodo y que da valores negativos de desgaste. No obstante, aunque aparentemente no haya desgaste en el electrodo, este efecto no es deseado porque se deposita material de la pieza sobre el electrodo y el proceso de EDM ya no se realiza entre la pareja de materiales establecida inicialmente (Inconel® 600-grafito), con lo que éste puede verse alterado.

Las ecuaciones de los modelos ajustados para EW se muestran en la Eq. (26) para polaridad positiva y en la Eq. (27) para polaridad negativa.

$$EW = -2277,3200 + 182,7130 * I - 6,2371 * t_i + 5993,2000 * \eta - 7,8874 * I^2 + 0,4748 * I * t_i - 157,6510 * I * \eta + 0,0483 * t_i^2 - 4082,4800 * \eta^2 \quad (26)$$

$$EW = -27,3786 - 93,0527 * I + 2,9334 * t_i + 1026,1400 * \eta + 10,6570 * I^2 - 0,3258 * I * t_i - 44,0598 * I * \eta - 2,0624 * t_i * \eta - 613,5000 * \eta^2 \quad (27)$$

La Fig. 4.45 representa la superficie de respuesta de EW en función de los factores de diseño intensidad y tiempo de impulso para ambas polaridades. Con polaridad positiva, para un determinado valor de tiempo de impulso, al aumentar la intensidad, EW aumenta. Esta tendencia de subida es más pronunciada para valores altos de tiempo de impulso. A su vez, se observa que para una determinada intensidad, EW disminuye al aumentar el tiempo de impulso hasta un punto situado aproximadamente en 50 μ s, a partir del cual aumenta ligeramente. Con polaridad negativa, se observan los mayores valores de desgaste con valores bajos de intensidad (de 2 A a 4 A).

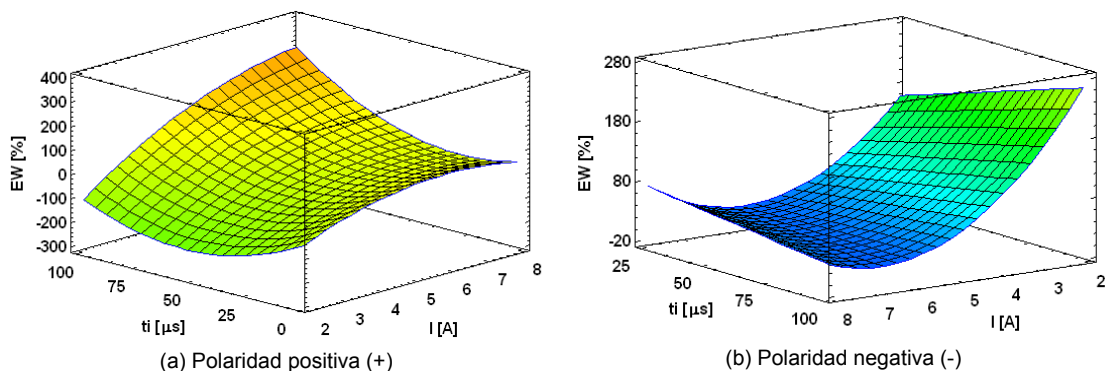


Fig. 4.45. Superficie de respuesta de EW vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Por otra parte, la Fig. 4.46 representa la gráfica de superficie de respuesta de EW en función de la intensidad y el rendimiento, para las dos polaridades. Con polaridad positiva, tal y como se observa en la Fig. 4.46 (a), los menores valores de desgaste se alcanzan combinando valores bajos tanto de intensidad como de rendimiento. Sin embargo con polaridad negativa, se aprecia una tendencia de subida de EW al disminuir la intensidad, obteniendo el máximo valor de EW con $I = 2$ A y $\eta = 0,7$.

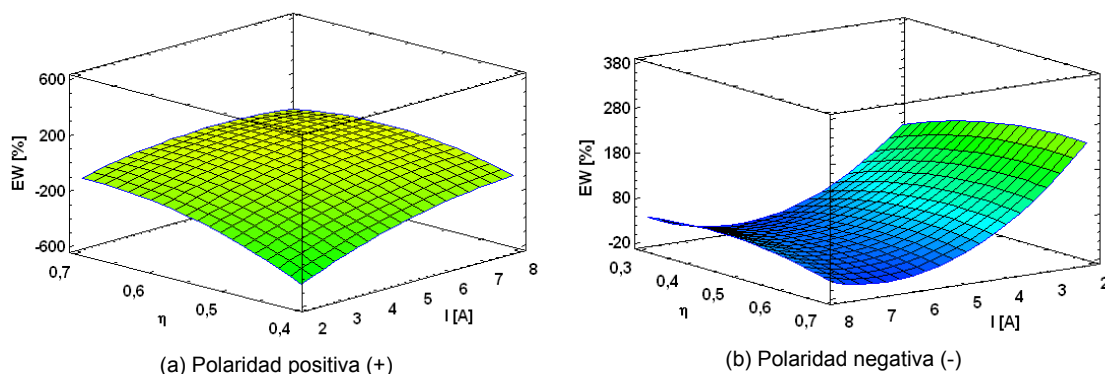


Fig. 4.46. Superficie de respuesta de EW vs. I y η con polaridad positiva (a) y negativa (b)

4.2.3. Análisis y discusión de resultados para los parámetros de rugosidad superficial

En este apartado, se analizan los resultados obtenidos de los parámetros de rugosidad superficial obtenidos mediante el proceso de EDM con electrodo de grafito. De manera análoga al estudio realizado en el apartado 4.1.3. de la rugosidad superficial obtenida con electrodo de cobre, primero se analizan los

parámetros de amplitud Ra, Rq y Rt y, posteriormente, los parámetros de espaciado Sm y Pc.

4.2.3.1. Análisis de los parámetros de amplitud

Con objeto de simplificar el análisis, y dado que los resultados obtenidos de los tres parámetros de amplitud siguen la misma tendencia, este apartado se centra en el estudio de Ra puesto que es el parámetro más ampliamente utilizado en la industria. Tal y como se observa en la Tabla 4.23, que muestra la tabla ANOVA para polaridad positiva, seis de los efectos influyen en Ra. Estos efectos, ordenados por orden de importancia, son: la intensidad, el tiempo de impulso, el efecto cuadrático de la intensidad, el efecto de interacción entre la intensidad y el tiempo de impulso, el efecto cuadrático del tiempo de impulso y, finalmente, el rendimiento.

Por otra parte, la Tabla 4.24 indica que cinco efectos son significativos para Ra con polaridad negativa. Estos efectos son: la intensidad y su efecto cuadrático, el tiempo de impulso, y el efecto de interacción entre la intensidad y el tiempo de impulso, y entre el rendimiento y el tiempo de impulso.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	73,55	1	73,55	613,10	0,0000
B: Tiempo de impulso	44,87	1	44,87	374,05	0,0000
C: Rendimiento	0,82	1	0,82	6,86	0,0114
AA	8,27	1	8,27	68,90	0,0000
AB	6,89	1	6,89	57,47	0,0000
AC	0,15	1	0,15	1,26	0,2657
BB	5,17	1	5,17	43,11	0,0000
BC	0,36	1	0,36	3,03	0,0871
Error total	6,60	55	0,12		
Total (corr.)	144,22	63			

Tabla 4.23. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Ra

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	177,18	1	177,18	842,88	0,0000
B: Tiempo de impulso	49,79	1	49,79	236,88	0,0000
C: Rendimiento,	0,60	1	0,60	2,85	0,0968
AA	23,24	1	23,24	110,58	0,0000
AB	10,59	1	10,59	50,40	0,0000
AC	0,29	1	0,29	1,39	0,2428
BC	1,11	1	1,11	5,27	0,0255

Error total	11,77	56	0,21		
Total (corr.)	274,58	63			

Tabla 4.24. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Ra

A partir de los resultados en las tablas ANOVA, se obtienen el diagrama de Pareto y la gráfica de efectos principales de los parámetros de rugosidad Ra, Rq y Rt, con polaridad positiva y negativa, tal y como se muestra en las Fig. 4.47-Fig. 4.52. Como puede observarse, la intensidad y el tiempo de impulso son los dos factores que más influyen en los parámetros de amplitud para ambas polaridades, e influyen de tal manera que al aumentar su valor se produce un empeoramiento de la superficie.

Por ejemplo, el experimento E1 (2 A y 5 μ s) para polaridad positiva, y el E5 (2 A y 50 μ s) para polaridad negativa, con valores de Ra de 0,94 μ m y 1,38 μ m, respectivamente, son los que mejor acabado superficial presentan. En ambos casos, los valores tanto de intensidad como de tiempo de impulso son bajos dentro del rango seleccionado para cada una de las polaridades. Sin embargo, el E48 (8 A y 75 μ s) para polaridad positiva, y el E32 (8 A y 100 μ s), para polaridad negativa, se realizaron bajo condiciones de alta de energía y el valor de Ra aumentó hasta 5,85 μ m y 8,58 μ m, respectivamente. Este empeoramiento es el resultado, por un lado, de los profundos cráteres formados en la superficie de la pieza como consecuencia de la mayor energía de las descargas producidas al aumentar la intensidad. Por otro lado, de acuerdo a [180], cuando se aumenta el tiempo de impulso, el diámetro del canal de plasma se hace mayor y tanto la densidad de energía como la fuerza impulsiva se reducen. En consecuencia, los restos de material fundido no pueden ser expulsados a causa de la disminución de la fuerza impulsiva y se forman pequeñas gotas esféricas de material que resolidifican en la superficie de la pieza y, por tanto, empeoran la rugosidad de su superficie

Asimismo en las Fig. 4.50-Fig. 4.52 se observa que los mayores valores de rugosidad superficial se obtienen cuando se selecciona polaridad negativa. Estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos en el apartado 4.2.1 en los que las mayores tasas de MRR también se obtuvieron con polaridad

negativa, llegando a alcanzar una MRR máxima de 22,2854 mm³/min y un Ra de 8,58 μm, mientras que con polaridad positiva la máxima tasa de eliminación de material fue de 15,3602 mm³/min con un Ra de 8,19 μm.

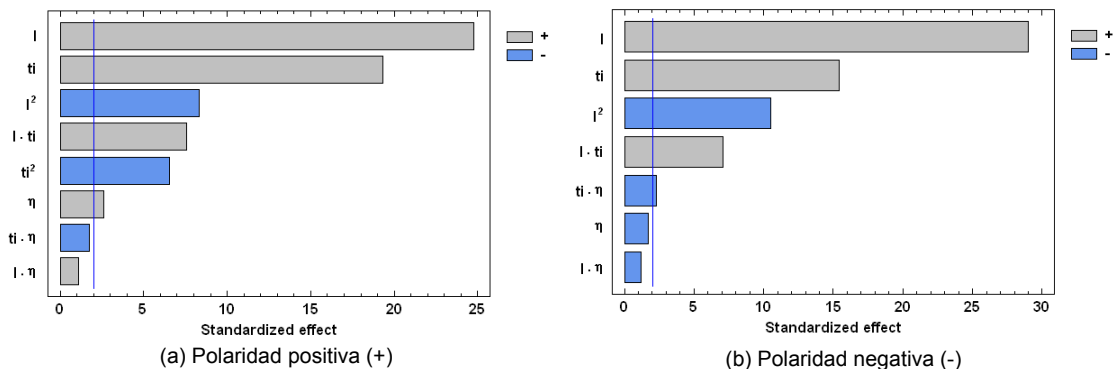


Fig. 4.47. Diagrama de Pareto para Ra con polaridad positiva (a) y negativa (b)

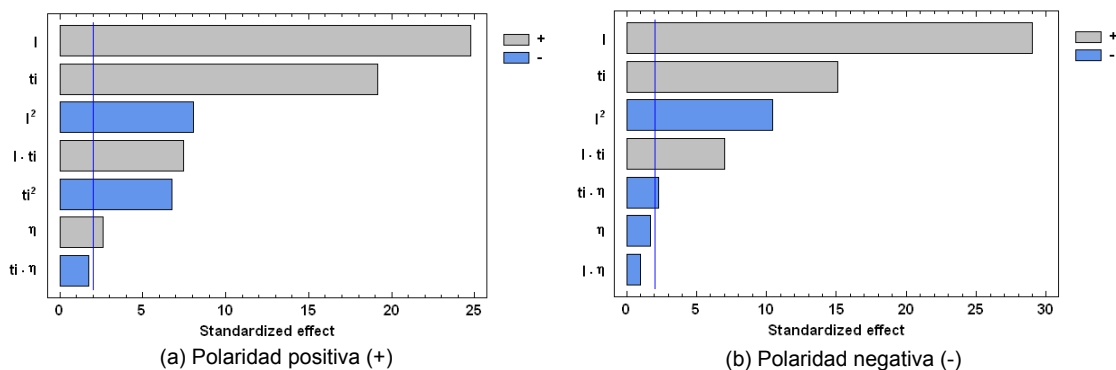


Fig. 4.48. Diagrama de Pareto para Rq con polaridad positiva (a) y negativa (b)

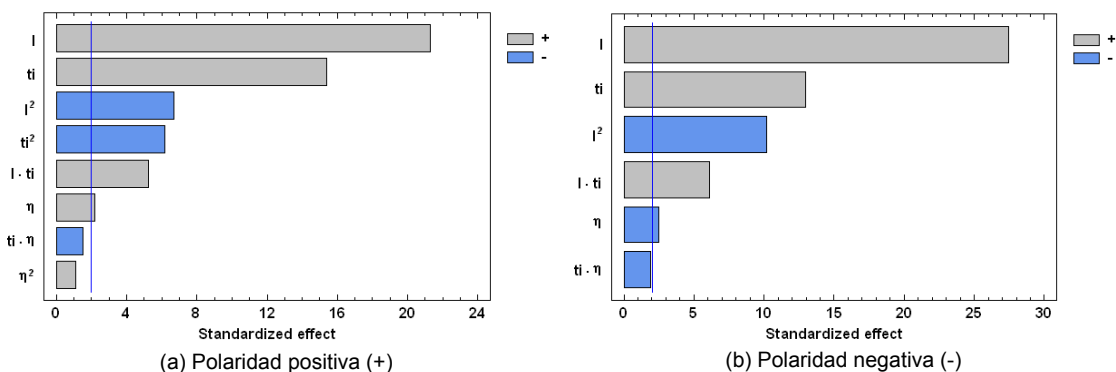


Fig. 4.49. Diagrama de Pareto para Rt con polaridad positiva (a) y negativa (b)

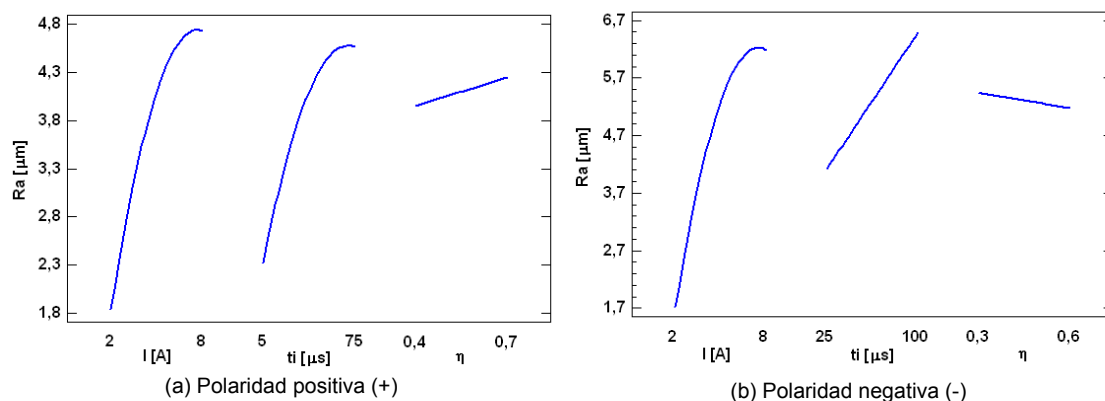


Fig. 4.50. Efectos principales para R_a con polaridad positiva (a) y negativa (b)

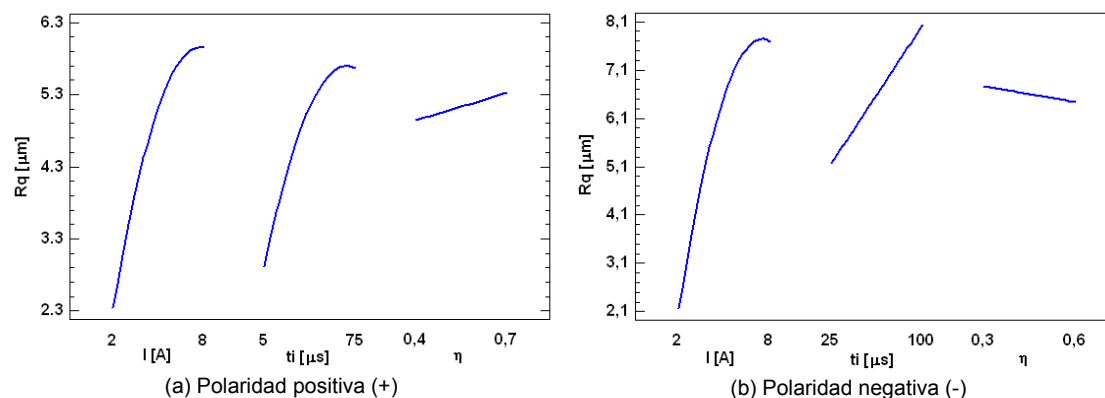


Fig. 4.51. Efectos principales para R_q con polaridad positiva (a) y negativa (b)

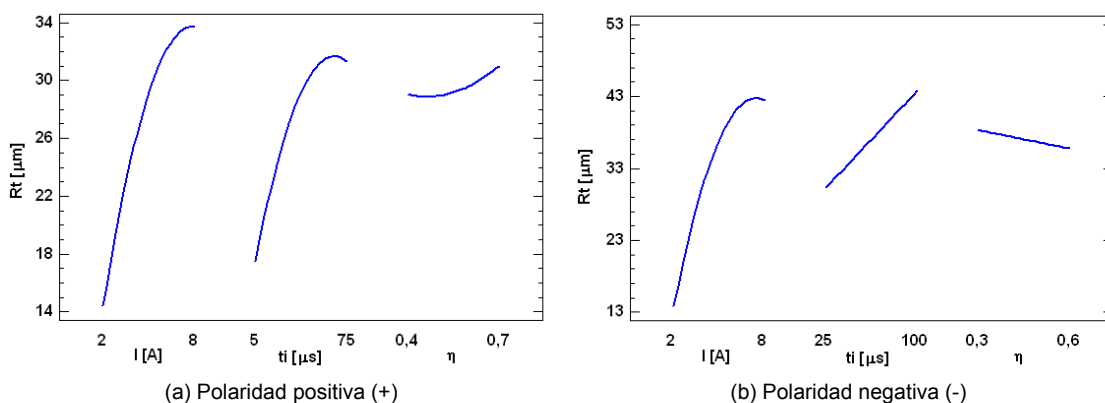


Fig. 4.52. Efectos principales para R_t con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Por otro lado, cabe destacar que el factor rendimiento sólo influye en los parámetros de rugosidad R_a , R_q y R_t , en el caso de polaridad positiva. En los

tres casos, el aumento del valor de este factor, produce un empeoramiento en la rugosidad superficial.

Las Fig. 4.53-Fig. 4.55 representan los efectos de interacción para los parámetros de amplitud con polaridad positiva y negativa. Tal y como se observa, la pareja de factores intensidad-tiempo de impulso es la que mayor interacción presenta.

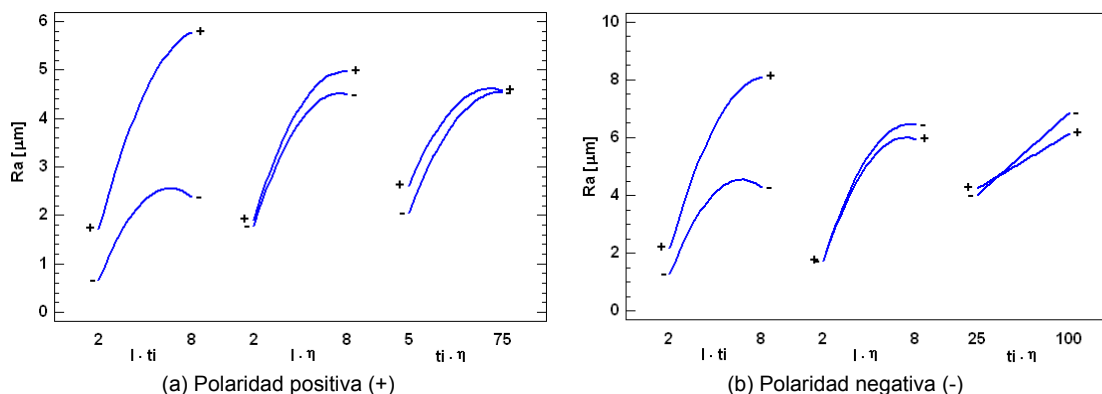


Fig. 4.53. Efectos de interacción para Ra con polaridad positiva (a) y negativa (b)

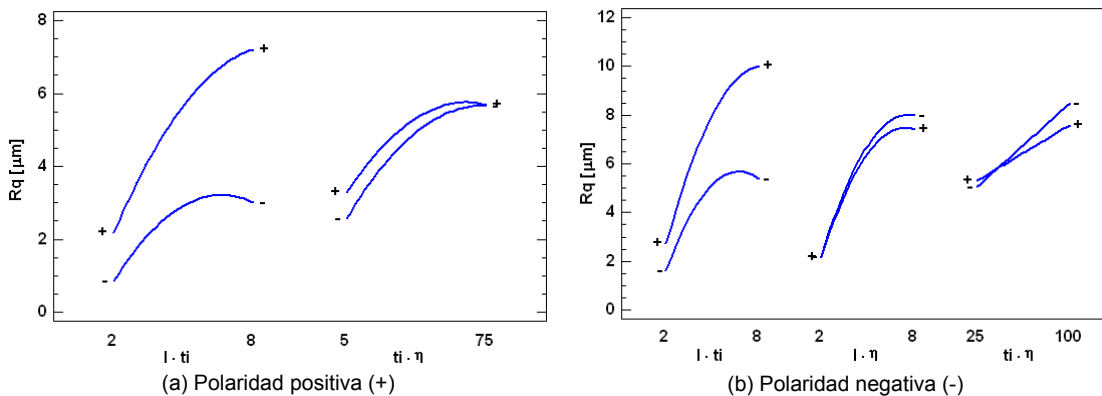


Fig. 4.54. Efectos de interacción para Rq con polaridad positiva (a) y negativa (b)

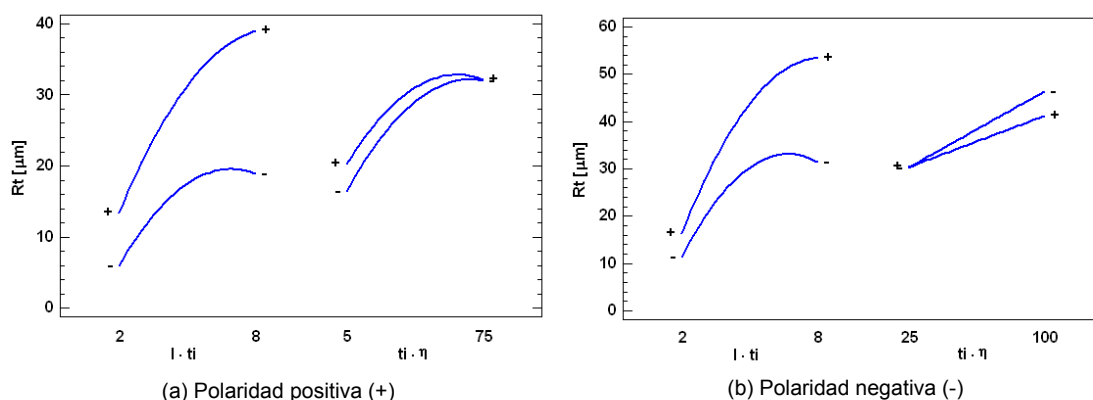


Fig. 4.55. Efectos de interacción para R_t con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Para R_a , con polaridad positiva, se obtiene un valor de R^2 de 95,42 %. Asimismo, R^2_{adj} tiene un valor de 94,75 %. Con polaridad negativa, los valores de R^2 y de R^2_{adj} son de 95,71 % y de 95,18 %, respectivamente. Las ecuaciones de los modelos ajustados de R_a para polaridad positiva y negativa se muestran en la Eq. (28) y en la Eq. (29), respectivamente.

$$R_a = -2,1476 + 1,0481 * I + 0,0607 * t_i + 1,0673 * \eta - 0,0898 * I^2 + 0,0056 * I * t_i + 0,1948 * I * \eta - 0,0005 * t_i^2 - 0,0256 * t_i * \eta \quad (28)$$

$$R_a = -3,5214 + 1,9657 * I + 0,0180 * t_i + 3,1181 * \eta - 0,1507 * I^2 + 0,0065 * I * t_i - 0,2706 * I * \eta - 0,0421 * t_i * \eta \quad (29)$$

Para R_q y polaridad positiva, R^2 explica el 95,31 % de la variabilidad de R_q . Asimismo, R^2_{adj} tiene un valor de 94,72 %. Para el caso de polaridad negativa, los valores de R^2 y de R^2_{adj} son de 95,67 % y de 95,13 %, respectivamente. Las ecuaciones de los modelos ajustados de R_q se muestran en la Eq. (30) para polaridad positiva y en la Eq. (31) para polaridad negativa.

$$R_q = -3,2835 + 1,4150 * I + 0,0774 * t_i + 2,5426 * \eta - 0,1091 * I^2 + 0,0069 * I * t_i - 0,0007 * t_i^2 - 0,0321 * t_i * \eta \quad (30)$$

$$R_q = -4,1620 + 2,4092 * I + 0,0217 * t_i + 3,5788 * \eta - 0,1854 * I^2 + 0,0079 * I * t_i - 0,2910 * I * \eta - 0,0513 * t_i * \eta \quad (31)$$

Por otra parte, para R_t , en el caso de polaridad positiva, el valor de R^2 es de 93,55 % y el valor de R^2_{adj} es de 92,61 %. Asimismo, para polaridad negativa, los valores de R^2 y de R^2_{adj} son de 94,96 % y de 94,42 %, respectivamente. Las ecuaciones de los modelos ajustados de R_t para ambas polaridades se muestran a continuación en la Eq. (32) y en la Eq. (33):

$$R_t = -5,3617 + 7,6580 * I + 0,4543 * t_i - 27,1956 * \eta - 0,5652 * I^2 + 0,0301 * I * t_i - 0,0039 * t_i^2 - 0,1742 * t_i * \eta + 37,0781 * \eta^2 \quad (32)$$

$$R_t = -13,4624 + 12,2356 * I + 0,0949 * t_i + 6,0138 * \eta - 0,9848 * I^2 + 0,0379 * I * t_i - 0,2327 * t_i * \eta \quad (33)$$

Las Fig. 4.56 (a)-Fig. 4.58 (a) representan las superficies de respuesta de los parámetros de amplitud en función de la intensidad y el tiempo de impulso, con polaridad positiva. Como se aprecia, para un determinado valor de intensidad, al aumentar el tiempo de impulso, R_a , R_q y R_t aumentan. Esta tendencia es más evidente para valores de intensidad de 6 A a 8 A. A su vez, se observa que para un determinado valor de tiempo de impulso, R_a , R_q y R_t aumentan al aumentar la intensidad. Esto es debido al aumento de la energía de las chispas que causan cráteres de mayor profundidad. En consecuencia, si se desea obtener buena calidad superficial, tanto la intensidad como el tiempo de impulso deben establecerse en sus niveles más bajos, aunque como se comentó anteriormente, esta combinación conduce a una MRR baja.

Con polaridad negativa, tal y como se observa en las Fig. 4.56 (b)-Fig. 4.58 (b), los valores más altos de R_a se consiguen cuando tanto el tiempo de impulso como la intensidad se encuentran en sus valores máximos (100 μ s y 8 A).

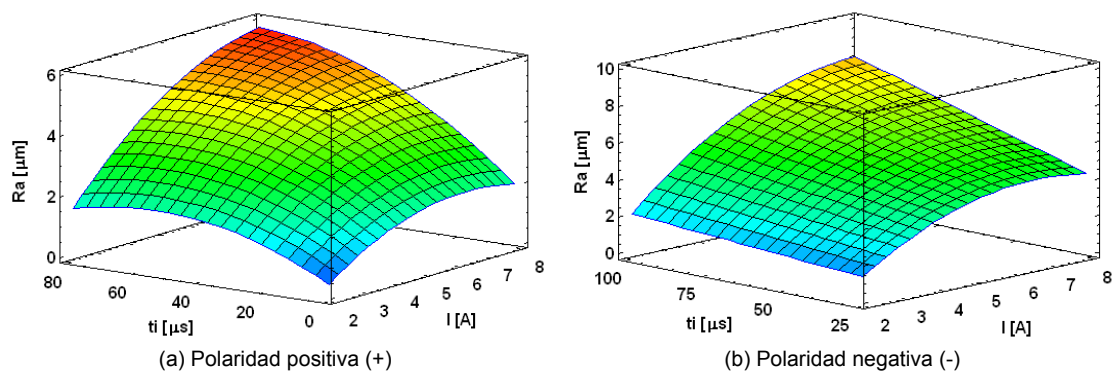


Fig. 4.56. Superficie de respuesta de Ra vs. I y ti con polaridad positiva (a) y negativa (b)

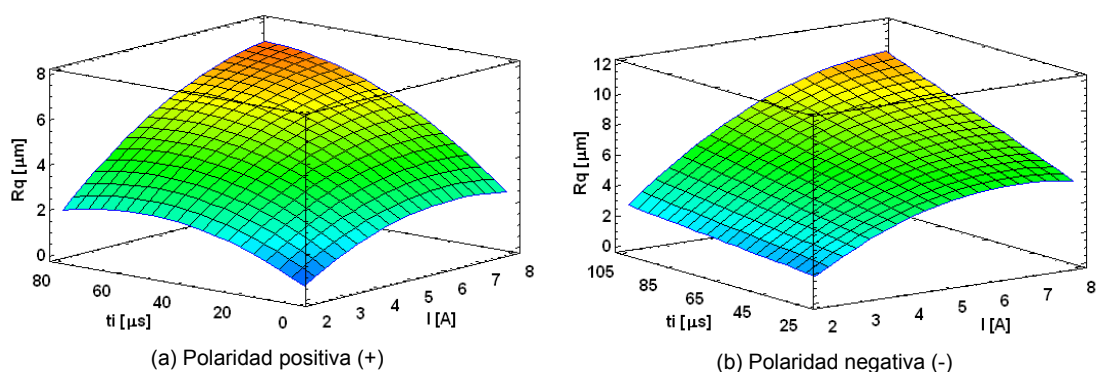


Fig. 4.57. Superficie de respuesta de Rq vs. I y ti con polaridad positiva (a) y negativa (b)

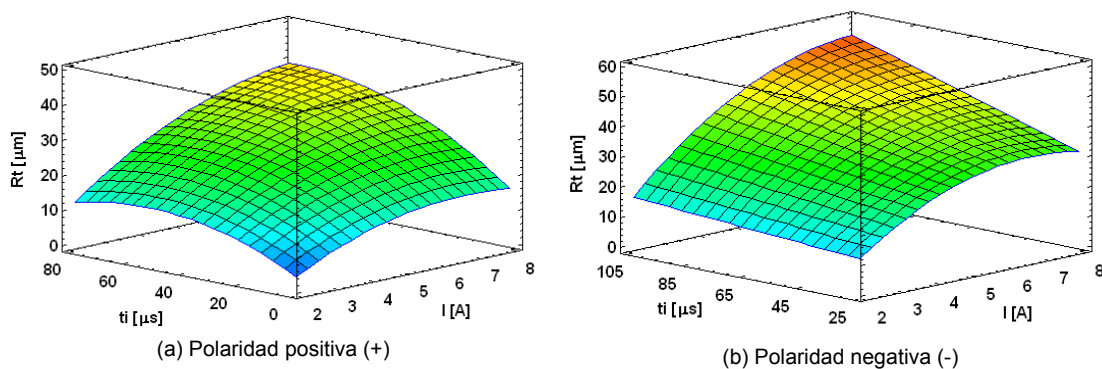


Fig. 4.58. Superficie de respuesta de Rt vs. I y ti con polaridad positiva (a) y negativa (b)

4.2.3.2. Análisis de los parámetros de espaciamiento

A continuación, se analizan los parámetros de espaciamiento de manera similar al estudio realizado de los parámetros de amplitud. Como puede observarse en las Tabla 4.25-Tabla 4.28, que muestran las tablas ANOVA de Sm y Pc, en el

caso de Sm, siete efectos para polaridad positiva y tres efectos para polaridad negativa influyen en la respuesta Sm, para un nivel de confianza del 95 %. Asimismo para el parámetro Pc, con polaridad positiva, siete efectos son estadísticamente significativos mientras que, con polaridad negativa, cuatro son los efectos que influyen en Pc. Además, cabe destacar que tanto para Pc como Sm, en ambas polaridades, la intensidad y el tiempo de impulso son los efectos más significativos. Sin embargo, con polaridad positiva es el tiempo de impulso el factor más influyente, mientras que con polaridad negativa es la intensidad.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	14146,60	1	14146,60	193,26	0,0000
B: Tiempo de impulso	18329,60	1	18329,60	250,40	0,0000
C: Rendimiento	319,38	1	319,38	4,36	0,0415
AA	158,76	1	158,76	2,17	0,1466
AB	492,07	1	492,07	6,72	0,0122
AC	536,39	1	536,39	7,33	0,0091
BB	1147,76	1	1147,76	15,68	0,0002
BC	197,61	1	197,61	2,70	0,1062
CC	344,10	1	344,10	4,70	0,0346
Error total	3952,84	54	73,20		
Total (corr.)	39260,70	63			

Tabla 4.25. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Sm

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	12748,70	1	12748,70	75,32	0,0000
B: Tiempo de impulso	10444,70	1	10444,70	61,71	0,0000
AA	589,28	1	589,28	3,48	0,0671
AC	268,47	1	268,47	1,59	0,2129
BC	1204,44	1	1204,44	7,12	0,0099
Error total	9816,97	58	169,26		
Total (corr.)	35072,60	63			

Tabla 4.26. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Sm

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	22575,50	1	22575,50	169,82	0,0000
B: Tiempo de impulso	32197,50	1	32197,50	242,19	0,0000
C: Rendimiento	648,59	1	648,59	4,88	0,0315
AA	2056,62	1	2056,62	15,47	0,0002
AB	963,99	1	963,99	7,25	0,0094
AC	422,71	1	422,71	3,18	0,0802
BB	6298,02	1	6298,02	47,37	0,0000
BC	1339,97	1	1339,97	10,08	0,0025
CC	342,25	1	342,25	2,57	0,1144
Error total	7178,82	54	132,94		
Total (corr.)	74073,20	63			

Tabla 4.27. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Pc

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	14127,30	1	14127,30	342,43	0,0000
B: Tiempo de impulso	6306,58	1	6306,58	152,86	0,0000
AA	2122,91	1	2122,91	51,46	0,0000
AB	141,02	1	141,02	3,42	0,0696
BC	293,95	1	293,95	7,13	0,0098
Error total	2392,85	58	41,26		
Total (corr.)	25384,60	63			

Tabla 4.28. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Pc

Estos resultados se muestran en el diagrama de Pareto y las gráficas de efectos principales que están representadas en las Fig. 4.59-Fig. 4.62. Como se puede observar, la intensidad y el tiempo de impulso son los dos factores que más influyen en los parámetros de espaciamiento. Sin embargo, ambos factores siguen tendencias totalmente opuestas, de tal manera que al aumentar la intensidad y el tiempo de impulso, aumenta Sm y disminuye Pc. Estos resultados coinciden con los obtenidos en el mecanizado de Inconel® 600 con electrodo de cobre y, tal y como se explicó en el apartado 4.1.3.2, al aumentar la intensidad, las chispas producen un menor número de cráteres en la superficie, pero a su vez éstos son de mayor diámetro (mayores valores de Sm) y, por lo tanto, se encuentran más espaciados los unos de los otros (menores valores de Pc). Por ejemplo, con polaridad positiva, el E49, con el que se obtuvo el menor valor de Ra ($0,94 \mu\text{m}$) y uno de los menores valores de arranque de material ($0,2630 \text{ mm}^3/\text{min}$), el valor de Sm fue de $51,60 \mu\text{m}$, mientras que el de Pc fue de $195,00 \text{ 1/cm}$. En este caso, tanto el valor de la intensidad como el del tiempo de impulso fue mínimo (2 A y $5 \mu\text{s}$). Al aumentar el valor de ambos factores, se produce un aumento significativo de Sm y una disminución de Pc, tal y como se observa en el E48 (8 A y $75 \mu\text{s}$), con el que se obtuvo el mayor valor de Ra ($5,85 \mu\text{m}$) y una de las mayores tasas de eliminación de material ($11,5018 \text{ mm}^3/\text{min}$). En este caso, los valores de Sm y Pc fueron $129,60 \mu\text{m}$ y $77,40 \mu\text{m}$, respectivamente.

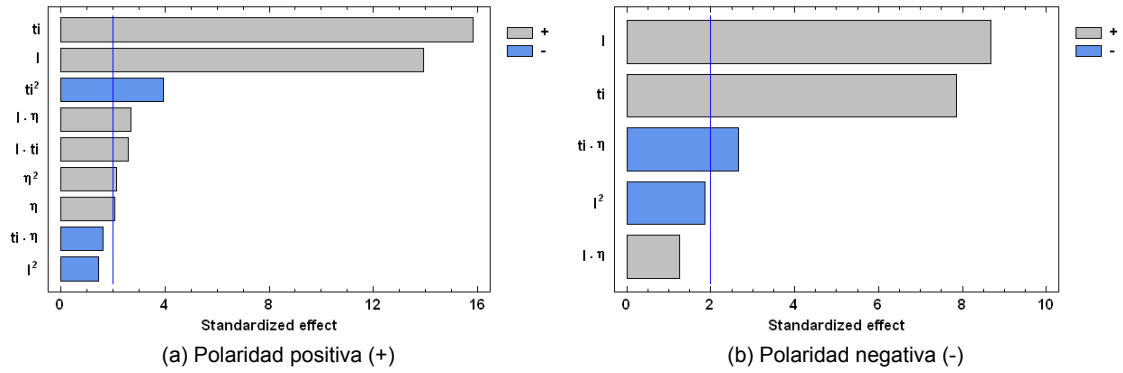


Fig. 4.59. Diagrama de Pareto para Sm con polaridad positiva (a) y negativa (b)

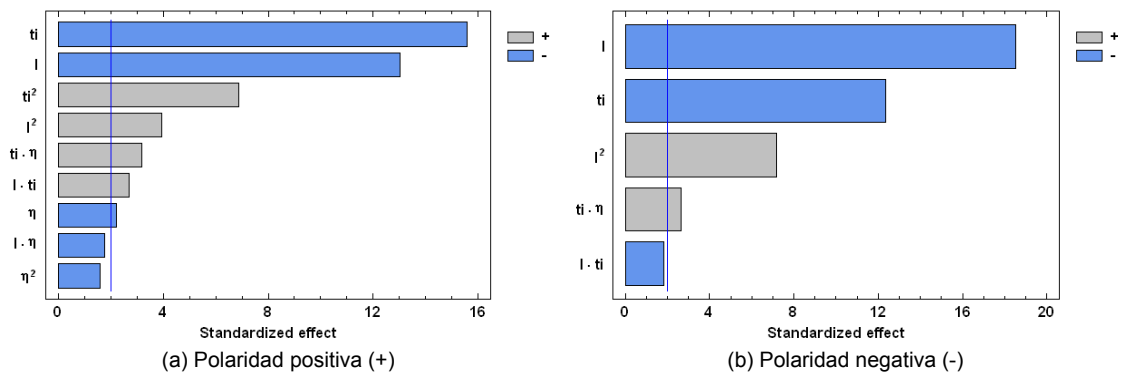


Fig. 4.60. Diagrama de Pareto para Pc con polaridad positiva (a) y negativa (b)

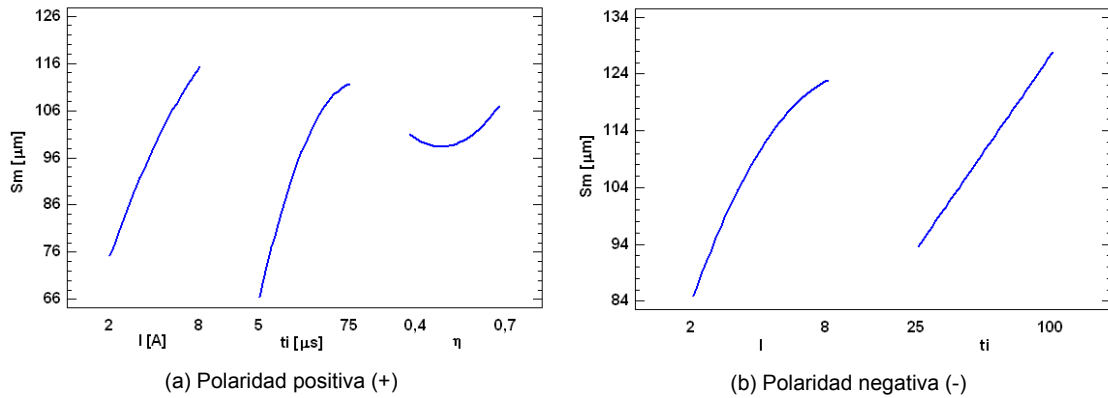


Fig. 4.61. Efectos principales para Sm con polaridad positiva (a) y negativa (b)

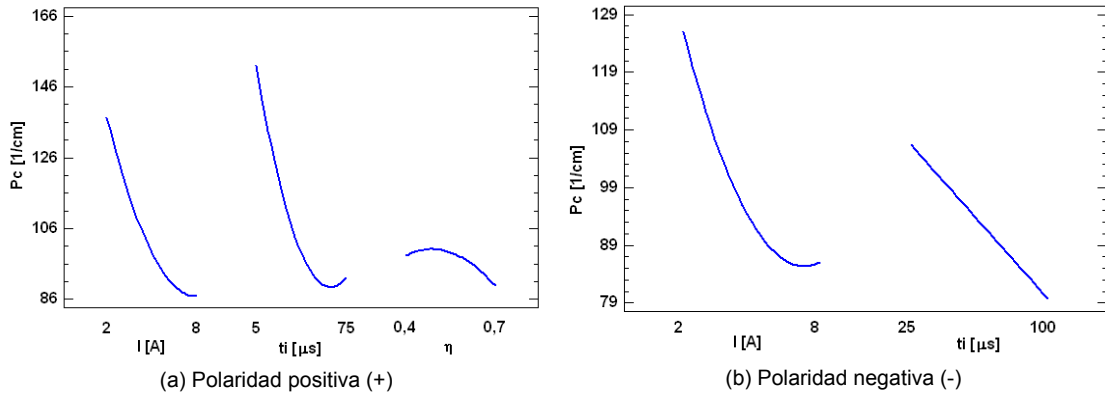


Fig. 4.62. Efectos principales para Pc con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Los efectos de interacción de los parámetros de espaciamiento se muestran en la Fig. 4.63, para Sm, y en la Fig. 4.64, para Pc.

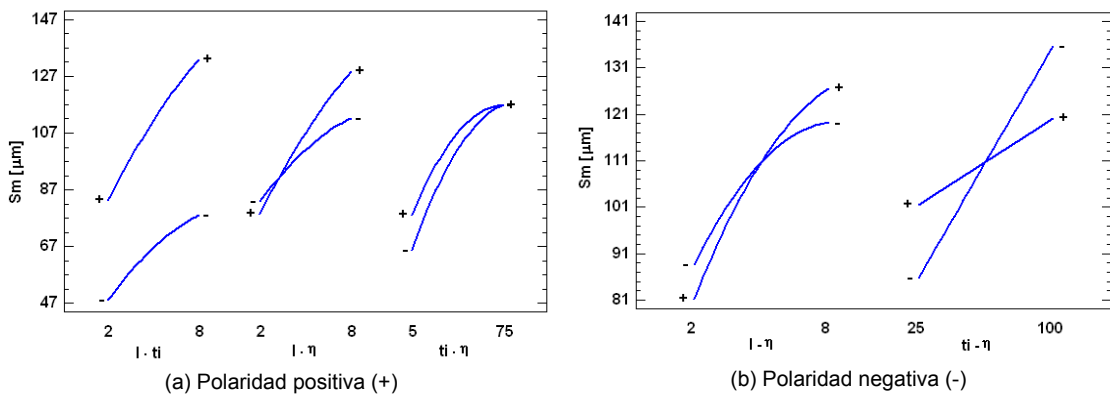


Fig. 4.63. Efectos de interacción para Sm con polaridad positiva (a) y negativa (b)

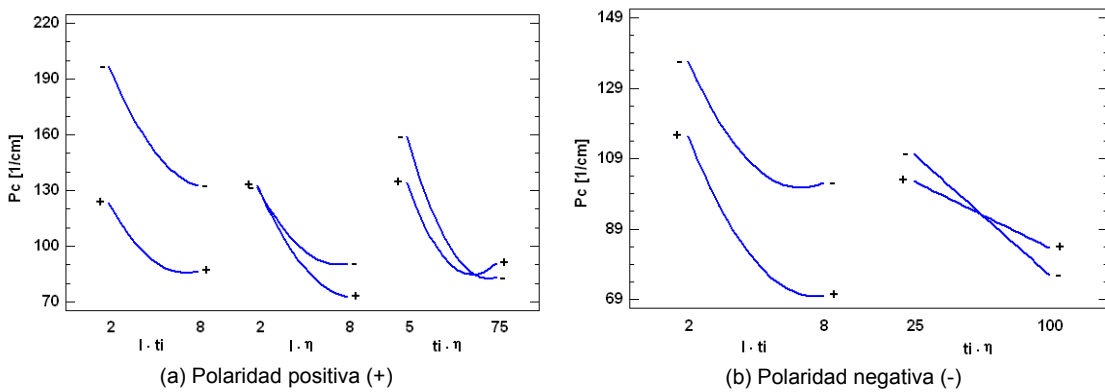


Fig. 4.64. Efectos de interacción para Pc con polaridad positiva (a) y negativa (b)

En el caso de polaridad positiva, se obtiene un valor de R^2 de 89,93 % mientras que R^2_{adj} tiene un valor de 88,25 %. Para el caso de polaridad negativa, los valores de R^2 y de R^2_{adj} son de 72,01 % y de 69,60 %, respectivamente. Las ecuaciones de los modelos ajustados de S_m para polaridad positiva y negativa se muestran en la Eq. (34) y en la Eq. (35), respectivamente.

$$S_m = 104,4960 + 2,3396 * I + 1,3719 * t_i - 269,0640 * \eta - 0,3938 * I^2 + 0,0471 * I * t_i + 11,5800 * I * \eta - 0,0079 * t_i^2 - 0,5974 * t_i * \eta + 231,8750 * \eta^2 \quad (34)$$

$$S_m = 11,0337 + 10,2112 * I + 1,0817 * t_i + 45,8000 * \eta - 0,7586 * I^2 + 8,1925 * I * \eta - 1,3882 * t_i * \eta \quad (35)$$

Por otra parte, para P_c y polaridad positiva el modelo explica el 90,31 % de la variabilidad de P_c , mientras que R^2_{adj} tiene un valor de 88,69 %. Con polaridad negativa, los valores de R^2 y de R^2_{adj} son de 90,57 % y de 89,76 %, respectivamente. Las ecuaciones de los modelos ajustados de P_c se muestran en la Eq. (36), para polaridad positiva, y en la Eq. (37), para polaridad negativa.

$$P_c = 205,5150 - 19,5655 * I - 3,5271 * t_i + 215,0460 * \eta + 1,4172 * I^2 + 0,0660 * I * t_i - 10,2800 * I * \eta + 0,0186 * t_i^2 + 1,5555 * t_i * \eta - 231,2500 * \eta^2 \quad (36)$$

$$P_c = 196,3480 - 19,5584 * I - 0,5450 * t_i - 42,8625 * \eta + 1,4398 * I^2 - 0,0238 * I * t_i + 0,6858 * t_i * \eta \quad (37)$$

La Fig. 4.65 representa la superficie de respuesta de S_m en función del tiempo de impulso y el rendimiento, para ambas polaridades. Como se observa en la Fig. 4.65 (a), para un determinado valor de rendimiento, al aumentar el tiempo de impulso S_m también aumenta. A su vez, para un determinado tiempo de impulso, S_m tiende a aumentar ligeramente al aumentar el rendimiento.

Con polaridad negativa, tal y como muestra la Fig. 4.65 (b), los valores más altos de S_m se consiguen cuando el valor del tiempo de impulso es máximo (100 μs) y el valor del rendimiento es mínimo (0,3).

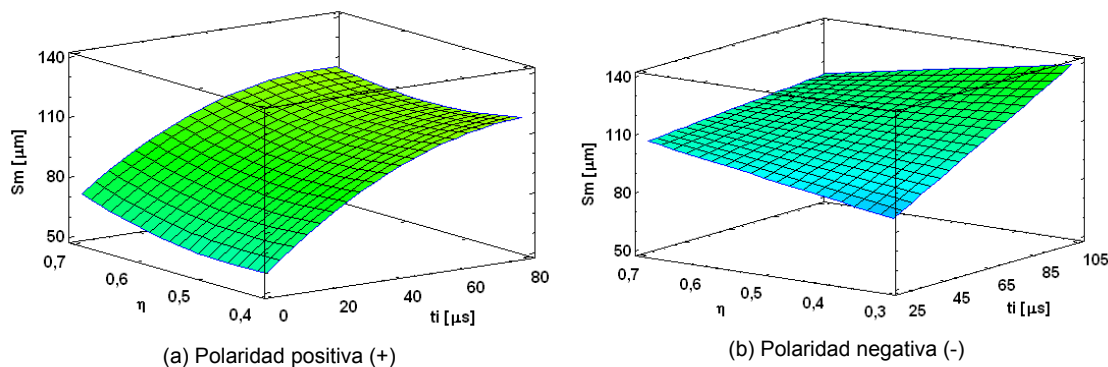


Fig. 4.65. Superficie de respuesta de S_m vs. t_i y η con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Asimismo en la Fig. 4.66 se puede observar la superficie de respuesta de P_c en función del tiempo de impulso y el rendimiento para ambas polaridades. En ambos casos, se aprecia que los mayores valores de P_c se obtienen con valores muy bajos de tiempo de impulso (5 μs -25 μs) y de rendimiento (0,3-0,4).

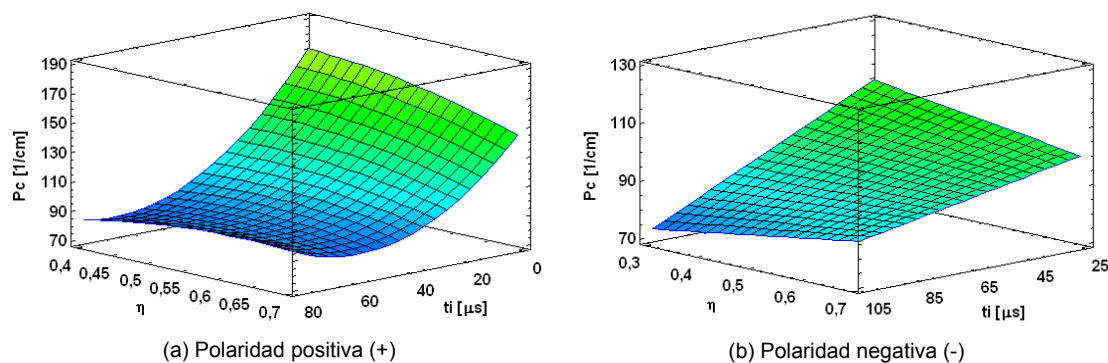


Fig. 4.66. Superficie de respuesta de P_c vs. t_i y η con polaridad positiva (a) y negativa (b)

4.2.4. Análisis mediante microscopía electrónica de barrido

En este apartado se analizan y comparan las superficies resultantes tras el proceso de electroerosión mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Para ello, se han establecido las diferencias entre las superficies electroerosionadas en función de su polaridad y, a continuación, en función de

los parámetros seleccionados para su mecanizado (I , t_i , η). Además, el estudio se ha realizado de la misma manera a como se realizó el de EDM de Inconel® 600 con electrodo de cobre y se han seleccionado aquellos experimentos que han conducido a los valores máximos y mínimos de R_a en ambas polaridades, y cuyos valores se muestran en la Tabla 4.18. Para el caso de polaridad positiva, los experimentos analizados han sido el E1 ($I = 2$ A, $t_i = 50$ μ s y $\eta = 0,4$), con el que se ha obtenido el valor mínimo de R_a de $0,94$ μ m, y el experimento E48 ($I = 8$ A, $t_i = 75$ μ s y $\eta = 0,6$), con el que se ha obtenido el valor máximo de R_a de $5,85$ μ m. Por otra parte, los experimentos con polaridad negativa analizados han sido el E5 ($I = 2$ A, $t_i = 50$ μ s y $\eta = 0,3$) y el E32 ($I = 8$ A, $t_i = 100$ μ s y $\eta = 0,4$), que han conducido a un valor de R_a mínimo de $1,38$ μ m y a un valor máximo de $8,58$ μ m, respectivamente.

Las micrografías de las superficies electroerosionadas bajo las diferentes condiciones seleccionadas se muestran en las Fig. 4.67-Fig. 4.70. Al examinar las características de dichas superficies, cabe destacar dos puntos importantes. En primer lugar, las superficies se caracterizan por la superposición de gotas fundidas de material y cráteres que se distribuyen al azar sobre la superficie, cuya profundidad y tamaño depende de la energía de descarga, tal y como se explica detalladamente en el apartado 4.2.3. En segundo lugar, las altas temperaturas alcanzadas durante el proceso de EDM pueden producir transformaciones metalúrgicas en la superficie que, a su vez, pueden derivar en la formación de pequeñas grietas. Estas microgrietas son más propensas a aparecer en condiciones de alta energía, debido al efecto producido por las tensiones térmicas de la nueva capa formada tras el enfriamiento del material [135].

La Fig. 4.67 y la Fig. 4.68 muestran las micrografías a diferentes aumentos de los experimentos que condujeron al menor valor de R_a con polaridad positiva y negativa, respectivamente. Como puede observarse en las Fig. 4.67 (a)-Fig. 4.67 (d), al emplear polaridad positiva, las superficies presentan una textura basada en pequeños cráteres superpuestos. Por otra parte, con polaridad negativa, la superficie presenta un aspecto heterogéneo y “terroso”,

con presencia de grietas evidentes que se extienden en toda la superficie, tal y como puede observarse en la Fig. 4.68 (c) y en la Fig. 4.68 (d). Este agrietamiento puede ser debido a las tensiones internas causadas durante el proceso, en el cual el material sufre cambios bruscos de temperaturas de manera repetida a altas frecuencias de trabajo. Además, estas fisuras están más abiertas que en el E32 porque el tamaño de las irregularidades es más pequeño y, por tanto, son más evidentes.

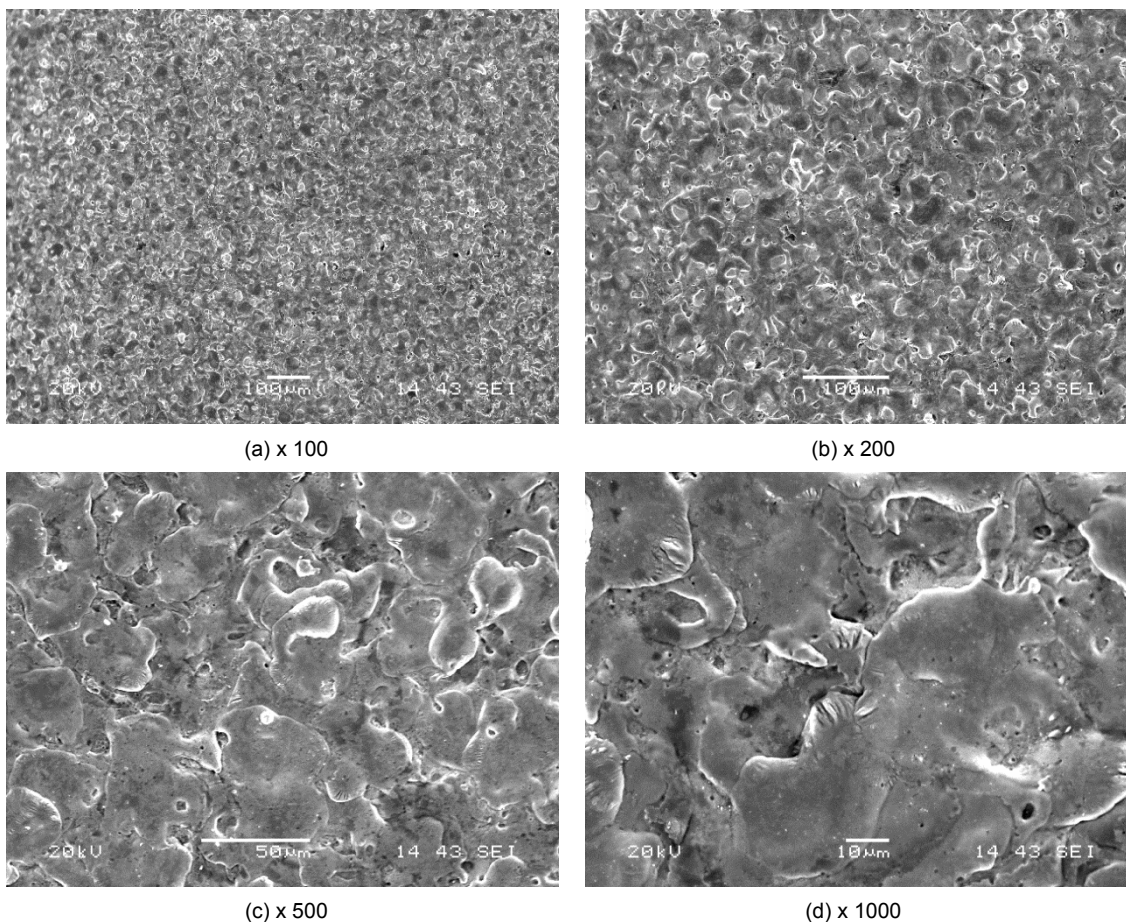


Fig. 4.67. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E1 con mínimo valor de Ra y polaridad positiva a distintos aumentos (x nº aumentos)

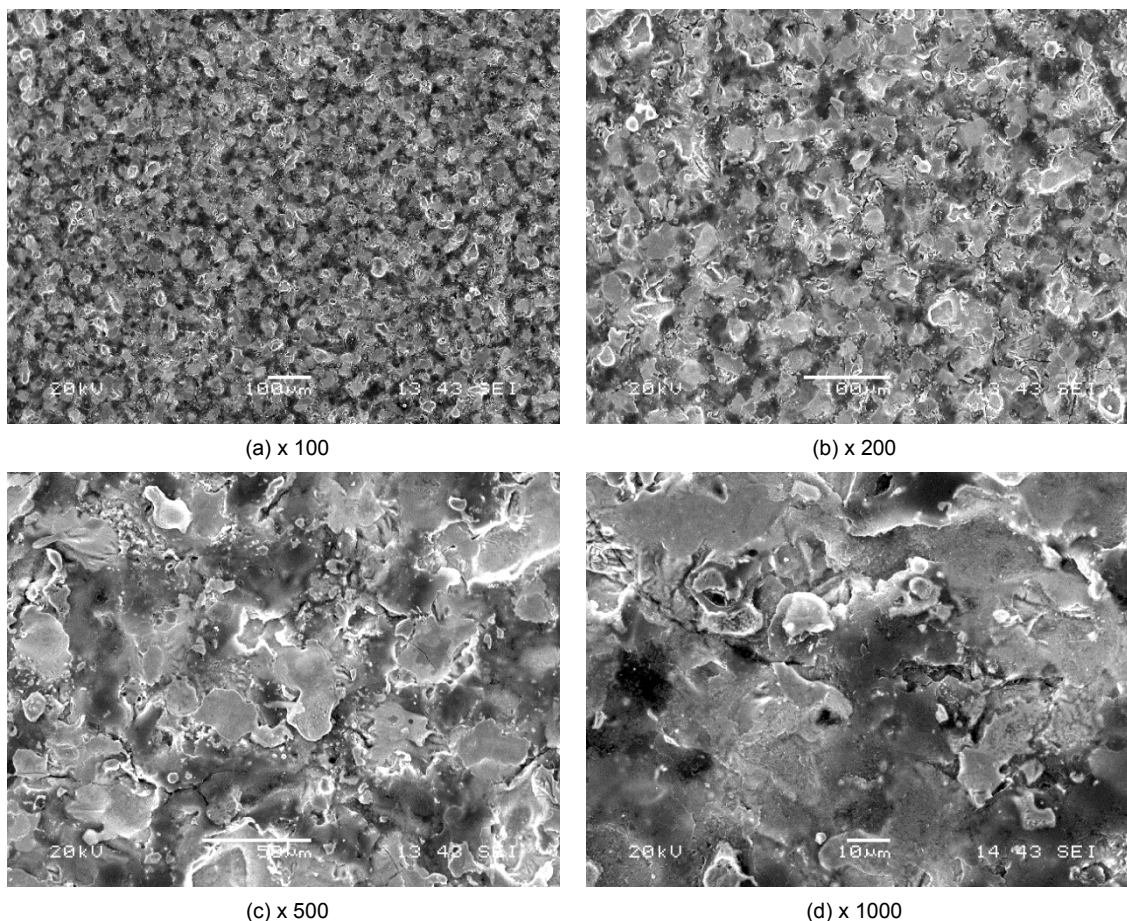


Fig. 4.68. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E5 con mínimo valor de Ra y polaridad negativa a distintos aumentos (x nº aumentos)

Las micrografías de las superficies con las que se obtuvo el peor acabado superficial y que corresponden a los experimentos E48 y E32 (Tabla 4.18), se muestran en la Fig. 4.69, para polaridad positiva, y en la Fig. 4.70, para polaridad negativa. Tal y como se observa, con polaridad positiva, las superficies presentan un aspecto más homogéneo y suave que sus homólogas con polaridad negativa. El material está fundido de manera regular y los picos y valles resultantes no son tan pronunciados. Además, no se aprecian fisuras en la superficie, sino capas superpuestas de material fundido formando pequeños pliegues. Por otra parte, cabe destacar que con polaridad negativa las superficies presentan una composición heterogénea, en las que el contenido de carbono procedente del dieléctrico varía de unas zonas a otras, tal y como puede observarse en la Fig. 4.70 (c). Así, en las zonas más oscuras existe una importante cantidad de carbono retenido, mientras que en las más claras la

cantidad de carbono disminuye enormemente. Sin embargo, con polaridad positiva no se han encontrado restos de carbono en la superficie.

Asimismo, en comparación con las superficies de los experimentos E1 y E5, que fueron electroerosionadas en condiciones de baja energía, la topografía de las superficies de E48 y E32 (Tabla 4.18) difieren en cuanto a las dimensiones y espaciado de las irregularidades y de los cráteres formados. Al aumentar la intensidad de corriente (de 2 A a 8 A), la superficie se vuelve más irregular y el aumento de la energía térmica produce un aumento en la cantidad de material fundido, lo que conduce a un menor número de cráteres, pero, a su vez, de mayor profundidad y tamaño. Estos resultados son congruentes con los obtenidos en el análisis de MRR y SR y que quedan explicados en los apartados 4.2.1 y 4.2.3, respectivamente.

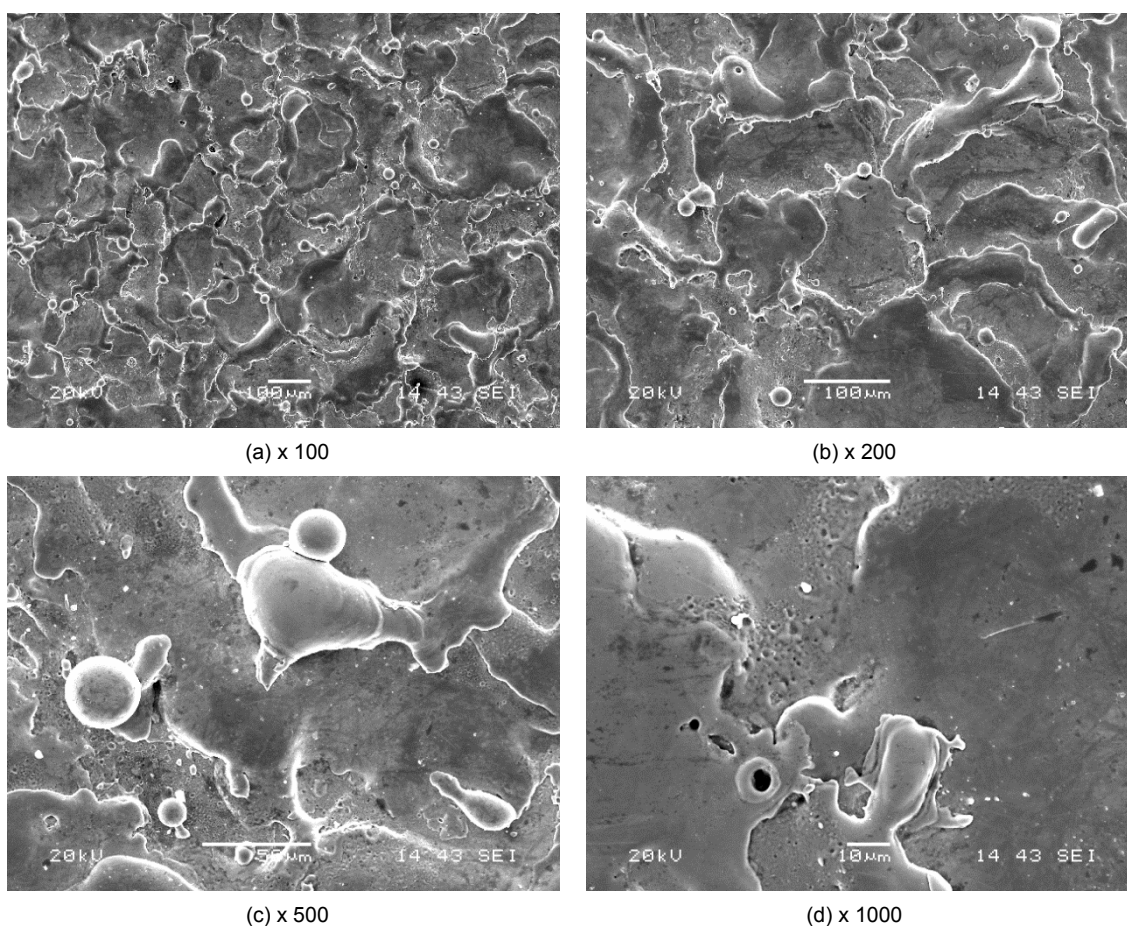


Fig. 4.69. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E48 con máximo valor de Ra y polaridad positiva a distintos aumentos (x nº aumentos)

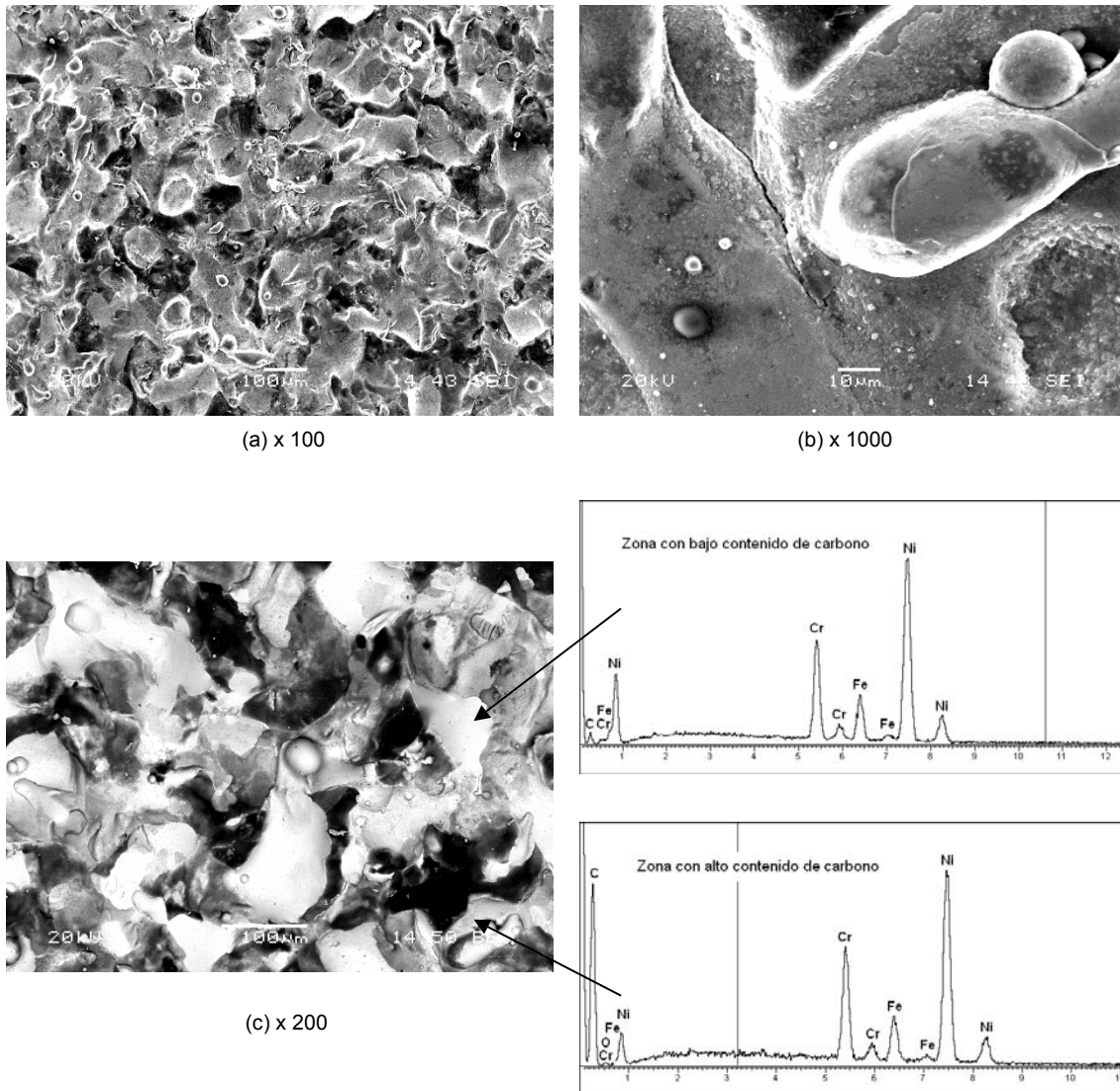


Fig. 4.70. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E32 con máximo valor de Ra y polaridad negativa a distintos aumentos (x nº aumentos)

A modo de resumen, se muestran la Tabla 4.29 y la Tabla 4.30 que recogen los valores máximos y mínimos obtenidos y los factores más significativos para cada una de las variables, respectivamente.

Variable	MRR (mm ³ /min)				EW (%)				Ra (µm)			
	+		-		+		-		+		-	
Nivel	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
	15,3602	0,1133	22,2854	0,2452	510,24	-1312,96	379,31	0,31	5,85	0,94	8,58	1,38

Tabla 4.29. Resultados máximos y mínimos obtenidos

Variable	MRR						EW						Ra					
Polaridad	+			-			+			-			+			-		
Factor	I	t _i	η	I	t _i	η	I	t _i	η	I	t _i	η	I	t _i	η	I	t _i	η
	↑	↑↓	↑	↑	↑	↑	↑		↑↓	↓↑		↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑

Tabla 4.30. Factores significativos y su tendencia

4.3. Mecanizado con electrodo de cobre-grafito

Por último, en el presente apartado se analiza el proceso de electroerosión de la aleación Inconel® 600 empleando electrodos de grafito con cobre infiltrado, y polaridades positiva y negativa. Tal y como se comentó en el capítulo 3 de la presente Tesis Doctoral, para llevar a cabo los experimentos, se han utilizado electrodos EDM-C3 de Poco que poseen un grano ultrafino con un tamaño medio de partícula menor de 5 μm.

Este estudio se ha realizado de manera análoga al estudio de esta aleación con electrodos de cobre y de grafito, y que se detallan en los apartados 4.1 y 4.2, respectivamente. En primer lugar, se han establecido los valores de los factores de diseño para ambas polaridades que conducen a un proceso estable y a la obtención de diferentes calidades superficiales y, en función de dichos valores, se ha diseñado la matriz del diseño de experimentos. Debido a la falta de experiencias previas de otros investigadores en la electroerosión de aleaciones de Inconel con electrodo de Cu-C, se realizaron pruebas preliminares tomando como referencia los valores utilizados en el mecanizado de dicha aleación con electrodo de grafito. Tras la realización de las mismas, se observó que tiempos muy bajos de impulso, fuera cual fuera la intensidad y el rendimiento, producían cráteres macroscópicos en la superficie de la pieza. Este fenómeno puede observarse en la Fig. 4.71 que muestra dos huellas electroerosionadas con valor de tiempo de impulso de 5 μs, rendimiento de 0,5 e intensidades de 4 A y 6 A, respectivamente. Además, tal y como se observó en la EDM de Inconel® 600 con electrodo de grafito, también se encontró que cuando se seleccionan valores altos de rendimiento y tiempo de impulso, el proceso se vuelve inestable.

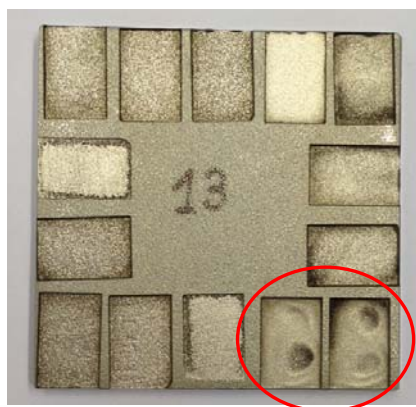


Fig. 4.71. Superficies electroerosionadas con electrodo Cu-C y tiempo de impulso de 5 μ s

Los valores de los parámetros de diseño y los niveles seleccionados se muestran en la Tabla 4.31. Como puede observarse, se han utilizado los mismos valores para las dos polaridades.

Parámetro de diseño	Unidad	Niveles y valores							
		Polaridad positiva				Polaridad negativa			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Intensidad	A	2	4	6	8	2	4	6	8
Tiempo de impulso	μ s	25	50	75	100	25	50	75	100
Rendimiento		0,3	0,4	0,5	0,6	0,3	0,4	0,5	0,6
Tensión	V	200							
Presión del dieléctrico	kPa	30							

Tabla 4.31. Parámetros de diseño y niveles seleccionados para el caso de la EDM del Inconel® 600 con electrodo de Cu-C y polaridades positiva y negativa

Para llevar a cabo los experimentos, se han utilizado técnicas de Diseño de Experimentos (DOE) y, concretamente, se ha empleado un modelo factorial 4^3 que es el mismo modelo adoptado en el estudio de la presente aleación con electrodos de cobre y de grafito. Los valores medios de los resultados experimentales obtenidos para ambas polaridades quedan recogidos en la Tabla 4.32.

E	Polaridad positiva (+)							Polaridad negativa (-)						
	MRR (mm ³ /min)	EW (%)	Ra (μ m)	Rq (μ m)	Rt (μ m)	Sm (μ m)	Pc (1/cm)	MRR (mm ³ /min)	EW (%)	Ra (μ m)	Rq (μ m)	Rt (μ m)	Sm (μ m)	Pc (1/cm)
1	0,1778	35,81	1,39	1,76	11,73	63,80	154,60	0,4961	96,67	1,57	1,98	12,77	88,00	113,60
2	3,0897	10,66	3,34	4,20	25,64	80,20	124,00	4,7944	28,23	3,59	4,59	29,47	78,20	129,60

3	5,0825	11,69	3,66	4,62	27,82	89,80	111,80	6,6012	25,90	4,29	5,34	31,54	90,20	112,20
4	7,4984	11,68	4,22	5,47	31,84	95,20	106,60	10,4203	21,09	4,76	5,98	34,88	91,40	110,20
5	0,1331	20,74	1,57	1,99	13,80	77,60	130,00	0,3048	158,27	1,31	1,67	12,65	78,80	127,60
6	3,7383	9,14	4,20	5,21	29,30	103,40	98,00	7,4086	25,33	5,43	6,83	38,82	108,80	92,20
7	6,3535	8,58	4,70	5,84	31,67	106,60	94,80	10,3921	22,60	5,84	7,27	39,85	115,60	90,40
8	6,6319	11,26	4,71	5,90	32,27	97,80	102,40	14,3346	19,05	6,77	8,39	47,74	160,60	78,00
9	0,0846	0,44	2,01	2,52	14,75	102,80	97,40	0,3060	181,88	1,39	1,74	10,56	82,40	124,00
10	3,3606	4,32	5,01	6,25	35,81	112,80	88,60	7,7107	19,97	5,47	6,79	36,22	118,60	84,00
11	6,4197	6,76	5,84	7,26	42,50	139,40	79,00	11,5521	20,97	6,90	8,52	48,39	139,40	75,00
12	9,8827	3,92	6,57	8,02	38,78	127,00	79,40	17,7658	18,06	7,44	9,14	47,64	156,00	72,40
13	0,0884	3,02	2,73	3,45	19,80	146,60	76,00	0,3257	197,44	1,58	2,01	13,21	95,00	110,40
14	2,8219	3,21	5,01	6,38	38,54	147,40	76,60	9,9400	20,35	6,24	7,88	49,50	118,60	84,60
15	6,7786	0,84	6,18	7,69	39,75	138,40	76,60	16,1073	19,36	7,36	9,18	51,42	142,20	75,80
16	10,0405	0,81	7,41	9,36	52,38	168,40	74,40	20,0082	16,99	8,04	9,99	55,15	143,20	71,40
17	0,2297	37,33	1,34	1,70	10,01	65,40	154,20	0,5149	104,63	1,62	2,06	13,00	90,20	111,80
18	3,6482	16,26	3,12	3,87	22,15	86,20	117,20	6,2876	30,88	3,82	4,91	31,61	82,00	123,80
19	6,3632	11,44	3,72	4,66	28,67	87,00	116,40	10,5888	25,27	4,53	5,83	33,10	97,20	102,80
20	9,9951	9,80	4,24	5,32	30,58	98,20	103,60	13,1696	22,11	4,83	6,06	35,15	99,60	101,40
21	0,1520	18,76	1,88	2,34	13,20	94,60	106,00	0,4136	158,90	1,28	1,63	10,73	76,20	131,40
22	4,0843	8,58	4,28	5,47	33,29	92,40	108,40	9,7806	24,26	4,90	6,17	36,33	105,00	96,40
23	7,2087	8,92	5,37	6,74	36,99	106,20	93,80	12,7843	22,21	6,06	7,42	38,97	123,00	84,60
24	11,9972	5,72	5,57	6,97	38,35	113,20	89,00	22,1590	21,45	6,30	7,93	45,18	114,00	90,80
25	0,1169	4,80	1,75	2,29	15,21	91,00	109,20	0,3693	181,61	1,28	1,61	9,73	73,40	137,00
26	4,2463	6,15	4,79	5,86	30,99	115,60	86,80	9,2448	23,96	5,51	6,93	38,90	110,40	91,60
27	7,6840	6,31	5,81	7,24	41,13	131,40	80,80	13,5873	20,01	6,26	7,78	43,49	122,80	84,60
28	12,2552	6,47	6,56	8,12	43,91	130,20	77,00	21,4791	17,64	7,27	8,90	47,49	136,20	76,00
29	0,1056	9,32	2,91	3,67	22,72	140,40	79,80	0,3159	224,40	1,36	1,74	11,20	81,60	124,00
30	3,3520	2,52	4,95	6,26	35,76	129,60	77,40	11,3532	23,00	6,24	7,78	43,13	142,40	78,80
31	6,9094	1,13	6,65	8,32	46,59	139,60	73,40	17,2709	21,05	6,93	8,71	50,84	129,00	76,60
32	12,7827	1,63	6,78	8,50	48,05	156,40	70,80	22,7672	16,83	7,90	9,90	52,99	150,20	70,60
33	0,2650	42,84	1,17	1,48	9,24	60,60	164,80	0,6719	107,46	1,70	2,14	14,24	96,40	105,60
34	4,2338	15,45	3,15	3,94	23,92	78,80	129,00	7,9205	29,72	3,66	4,65	30,47	82,20	123,40
35	7,7099	9,61	3,78	4,80	30,09	88,20	115,00	12,5716	25,79	4,26	5,30	30,98	97,60	102,80
36	11,5649	9,31	4,18	5,35	33,14	92,40	108,60	18,9419	21,67	5,23	6,47	35,32	106,20	95,60
37	0,1792	14,94	1,46	1,82	11,22	68,60	146,00	0,4777	154,88	1,31	1,66	10,14	82,20	122,20
38	4,8556	10,68	4,52	5,57	31,08	98,00	103,80	9,5215	27,75	4,56	5,69	32,58	104,00	96,80
39	9,1444	7,93	5,12	6,41	35,29	110,00	93,80	15,1031	21,94	5,52	6,99	40,84	112,20	89,40
40	14,5645	6,77	5,62	7,05	39,63	129,40	86,20	19,9893	19,59	7,10	8,80	48,10	142,00	76,20
41	0,1332	41,45	1,47	1,86	11,98	75,40	132,60	0,3882	221,58	1,36	1,75	12,16	78,00	130,20
42	4,6985	8,08	4,83	5,97	33,03	107,40	92,80	11,3645	26,01	5,49	6,84	38,01	110,20	92,00
43	8,5279	6,41	5,31	6,56	36,78	121,00	85,00	16,7606	21,72	6,49	8,04	44,14	153,00	76,00
44	13,6608	3,21	6,35	7,93	43,29	128,40	77,80	23,8823	18,76	7,76	9,56	50,56	158,60	70,40
45	0,0852	16,31	3,11	3,94	22,90	134,80	79,60	0,2949	263,67	1,33	1,69	11,25	79,00	127,60
46	3,9846	0,43	5,19	6,52	37,14	136,20	84,20	12,3596	24,44	5,90	7,40	42,46	125,00	79,80
47	7,3741	0,30	5,96	7,33	40,81	149,60	75,40	19,5421	297,77	7,23	9,12	53,75	143,40	74,80
48	13,8606	2,32	6,80	8,53	48,95	140,40	74,40	23,8906	16,04	8,33	10,15	50,30	195,80	63,80
49	0,2907	42,54	1,33	1,68	10,48	67,80	148,60	0,3546	245,89	1,29	1,60	9,30	92,40	109,40
50	5,1434	15,52	3,17	4,01	24,73	79,00	127,20	11,8064	29,33	3,80	4,73	27,75	93,80	106,80
51	9,0528	12,44	3,85	4,84	28,81	91,00	110,80	18,7034	24,92	4,33	5,56	36,20	89,00	112,00
52	13,1599	7,44	4,21	5,33	31,65	99,00	101,20	30,3120	21,93	5,24	6,50	37,10	107,20	92,80
53	0,1808	17,86	1,37	1,72	11,00	67,60	149,00	0,3144	291,16	1,33	1,66	9,64	94,00	114,00
54	5,7782	11,63	4,36	5,44	31,88	102,80	97,60	12,7525	26,09	5,06	6,27	35,23	109,60	92,80
55	10,4558	8,42	4,94	6,13	33,58	105,80	94,60	19,7280	21,70	5,86	7,35	42,24	132,20	89,00
56	15,6323	5,04	5,41	6,90	40,23	128,40	87,20	30,4760	19,38	6,50	8,03	41,24	121,40	83,40
57	0,1328	5,19	1,62	2,03	12,66	78,20	128,20	0,3561	248,44	1,30	1,68	11,19	74,80	135,40
58	5,3637	5,90	4,69	5,93	35,19	107,80	94,20	12,7624	26,15	5,35	6,71	38,74	119,80	88,00
59	9,8216	3,60	5,21	6,58	37,68	129,60	83,40	21,7225	21,94	6,27	7,78	43,47	126,00	81,40
60	19,1347	4,39	6,23	7,72	41,01	143,40	70,20	24,9210	19,47	6,99	8,65	46,62	149,40	73,60
61	0,1031	2,05	1,90	2,39	13,26	95,00	105,00	0,2823	320,70	1,39	1,77	11,35	81,80	123,40
62	3,9857	5,15	5,10	6,42	39,39	132,80	74,40	13,5013	25,88	6,16	7,87	48,66	139,40	79,00
63	8,4132	1,30	6,33	7,97	42,26	142,20	75,60	23,2371	171,94	7,52	9,31	49,89	175,80	72,00
64	15,3894	0,37	7,08	8,80	45,01	146,40	71,60	30,4894	17,49	7,83	9,67	49,65	141,60	71,00

Tabla 4.32. Resultados experimentales con electrodo de Cu-C para polaridad positiva y negativa

A partir del DOE planteado y de los resultados obtenidos tras la experimentación, se analizan cada una de las variables de respuesta obteniendo los modelos que caracterizan el comportamiento de los distintos parámetros considerados en esta Tesis Doctoral.

4.3.1. Análisis y discusión de resultados para la tasa de eliminación de material

La Tabla 4.33 y la Tabla 4.34 muestran las tablas ANOVA para MRR obtenidas a partir de los resultados experimentales que se muestran en la Tabla 4.32. Como se puede observar, con polaridad positiva seis de los efectos tienen P-valores inferiores a 0,05, lo que indica que influyen en la variable MRR. En el caso de polaridad negativa, siete efectos se consideran estadísticamente significativos. Además, en ambas polaridades, el efecto de la intensidad, el del rendimiento y su efecto de interacción son los que adoptan mayor importancia. Estos resultados se muestran gráficamente en la Fig. 4.72 y en la Fig. 4.73.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	1294,81	1	1294,81	2226,32	0,0000
B: Tiempo de impulso	2,84	1	2,84	4,88	0,0313
C: Rendimiento	83,31	1	83,31	143,25	0,0000
AA	1,83	1	1,83	3,15	0,0816
AB	9,39	1	9,39	16,14	0,0002
AC	56,53	1	56,53	97,19	0,0000
BB	8,29	1	8,29	14,25	0,0004
BC	1,05	1	1,05	1,80	0,1854
Error total	31,99	55	0,58		
Total (corr.)	1490,04	63			

Tabla 4.33. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - MRR

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	3810,20	1	3810,20	1512,62	0,0000
B: Tiempo de impulso	138,90	1	138,90	55,14	0,0000
C: Rendimiento	408,04	1	408,04	161,99	0,0000
AA	44,84	1	44,84	17,80	0,0001
AB	44,81	1	44,81	17,79	0,0001
AC	198,41	1	198,41	78,77	0,0000
BC	23,18	1	23,18	9,20	0,0037
CC	9,318	1	9,318	3,70	0,0596
Error total	138,54	55	2,52		
Total (corr.)	4816,23	63			

Tabla 4.34. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - MRR

Como se puede observar en la Fig. 4.72 (a) y la Fig. 4.73 (a), para polaridad positiva, y en la Fig. 4.72 (b) y la Fig. 4.73 (b), para polaridad negativa, la intensidad es el factor que más influye en la tasa de eliminación de material. MRR aumenta al incrementar el valor de la intensidad debido a que cada pulso adquiere mayor energía, lo que provoca que la temperatura aumente y el material de la pieza se funda más rápidamente. Asimismo, el segundo factor más influyente en MRR es el rendimiento, e igual que el factor anterior, al aumentar su valor, la tasa de eliminación de material también aumenta, debido a un mayor número de impulsos por unidad de tiempo. Además, también se aprecia que con polaridad negativa los valores obtenidos de MRR son mayores que los obtenidos con polaridad positiva. Con polaridad negativa, se ha obtenido un MRR máximo de 30,4894 mm³/min mientras que con positiva, el MRR máximo ha sido de 19,1347 mm³/min. En ambos casos, el valor de la intensidad ha sido de 8 A y el del rendimiento de 0,6, siendo ambos los valores máximos considerados en este caso de estudio. Estos resultados son similares a los obtenidos en la EDM de Inconel® 600 con electrodo de grafito, con el que se alcanzaron mayores tasas de eliminación también con polaridad negativa. Sin embargo, son opuestos a los obtenidos al seleccionar electrodo de cobre, con el que se dieron mayores tasas con polaridad positiva. De esta manera, se puede concluir que la influencia de la polaridad en el proceso de electroerosión depende, principalmente, del material de la pareja pieza-electrodo.

Por otra parte, se observa de los resultados experimentales de la Tabla 4.18, para el electrodo de grafito, y de la Tabla 4.32 para el electrodo Cu-C que, con los mismos valores de intensidad, tiempo de impulso y rendimiento, los valores obtenidos de MRR con electrodo de Cu-C son, en general, superiores a los obtenidos con electrodo de grafito, lo que indica que la adición de cobre favorece la fusión del material de la pieza. Además, este aumento de MRR se hace más evidente con valores altos de intensidad. Por ejemplo, con las mismas condiciones de mecanizado ($I = 8 \text{ A}$, $t_i = 75 \text{ } \mu\text{s}$, $\eta = 0,6$) la tasa de eliminación de material con electrodo de Cu-C fue casi de 20 mm³/min, mientras que con electrodo de grafito la tasa fue de 11,5018 mm³/min.

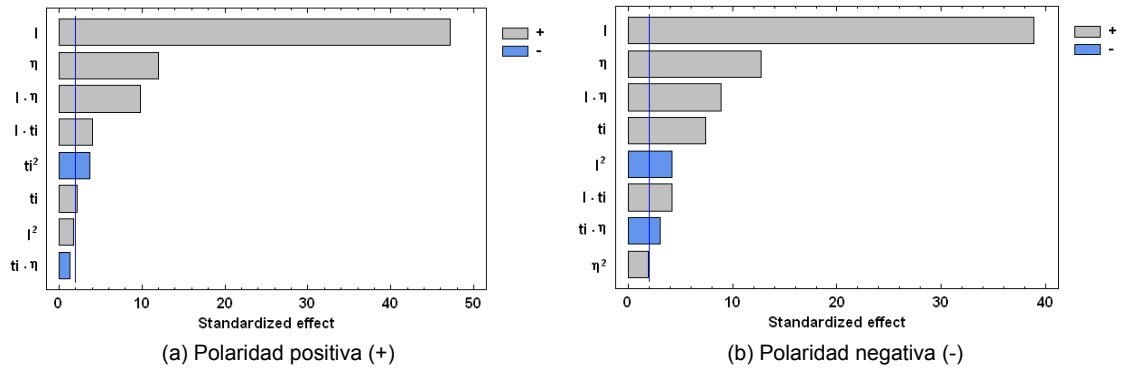


Fig. 4.72. Diagrama de Pareto para MRR con polaridad positiva (a) y negativa (b)

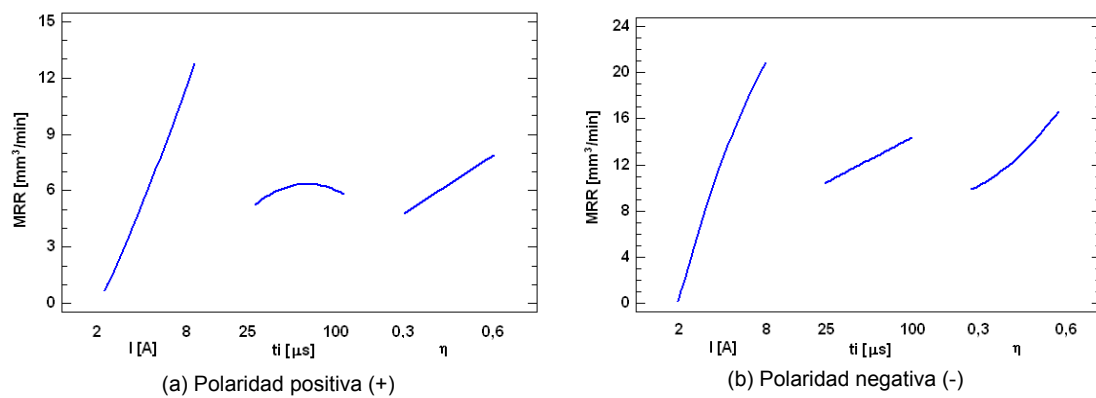


Fig. 4.73. Efectos principales para MRR con polaridad positiva (a) y negativa (b)

La Fig. 4.74 muestra la gráfica de efectos de interacción. En ambas polaridades, las parejas de factores intensidad-tiempo de impulso e intensidad-rendimiento son las que mayor interacción presentan.

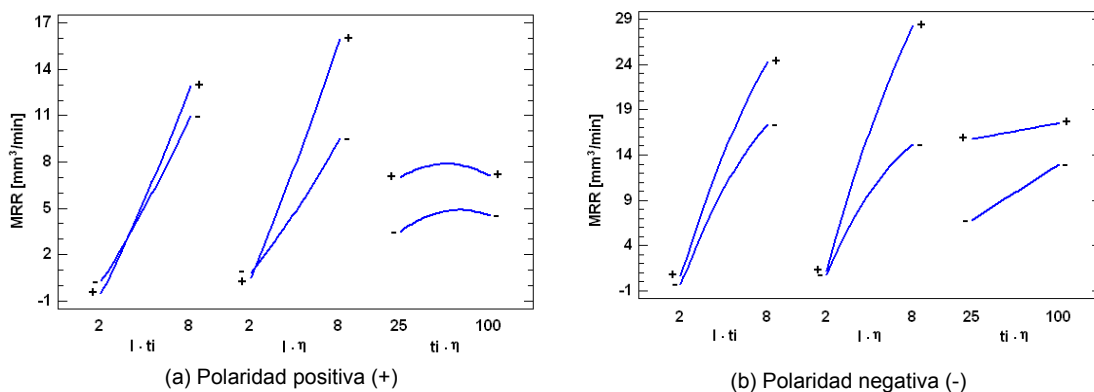


Fig. 4.74. Efectos de interacción para MRR con polaridad positiva (a) y negativa (b)

En el caso de polaridad positiva, se obtiene un valor de R^2 de 97,85 % mientras que R^2_{adj} tiene un valor de 97,54 %. Para el caso de polaridad negativa, los valores de R^2 y de R^2_{adj} son de 97,12 % y de 96,71 %, respectivamente. Las ecuaciones de los modelos ajustados de MRR para polaridad positiva y negativa se muestran en la Eq. (38) y en la Eq. (39), respectivamente.

$$MRR = -0,7553 - 0,4860 * I + 0,0673 * t_i - 6,0339 * \eta + 0,0423 * I^2 + 0,0061 * I * t_i + 3,7592 * I * \eta - 0,0005 * t_i^2 - 0,0409 * t_i * \eta \quad (38)$$

$$MRR = -1,2191 + 1,5371 * I + 0,0724 * t_i - 34,9372 * \eta - 0,2093 * I^2 + 0,0134 * I * t_i + 7,0430 * I * \eta - 0,1926 * t_i * \eta + 38,1577 * \eta^2 \quad (39)$$

La Fig. 4.75 representa la superficie de respuesta de MRR en función de la intensidad y el tiempo de impulso, para ambas polaridades. Como puede observarse, en los dos casos hay una tendencia de subida de MRR, al aumentar la intensidad. Además, con polaridad negativa, como se ha indicado anteriormente, las tasas de eliminación de material alcanzadas son mayores que si se selecciona polaridad positiva. Por otra parte, la Fig. 4.76 representa la superficie de respuesta de MRR en función de la intensidad y el rendimiento. Con ambas polaridades la variable MRR tiende a aumentar, al aumentar la intensidad, siendo MRR mayor a su vez, para un determinado valor de intensidad, al aumentar el rendimiento.

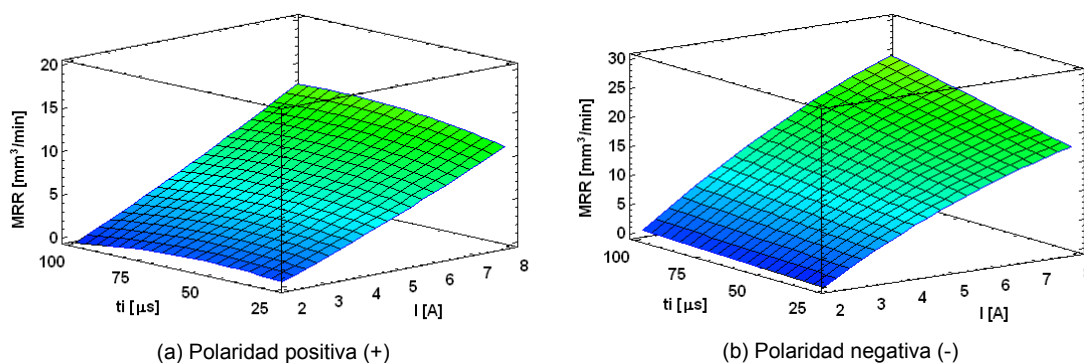


Fig. 4.75. Superficie de respuesta de MRR vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)

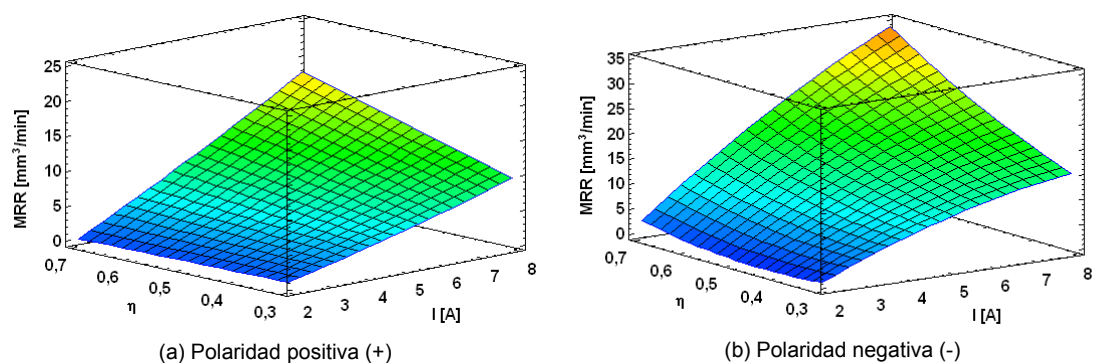


Fig. 4.76. Superficie de respuesta de MRR vs. I y η con polaridad positiva (a) y negativa (b)

4.3.2. Análisis y discusión de resultados para el desgaste del electrodo

Las tablas ANOVA para el desgaste volumétrico del electrodo se muestran en la Tabla 4.35, para polaridad positiva, y en la Tabla 4.36, para polaridad negativa. Como puede observarse, con ambas polaridades cuatro efectos son estadísticamente significativos. Para el caso de polaridad positiva, estos efectos, ordenados de mayor a menor influencia, son: el tiempo de impulso, la intensidad, el efecto de interacción entre la intensidad y el tiempo de impulso y, finalmente, el efecto cuadrático de la intensidad. Asimismo para polaridad negativa, los efectos significativos son: la intensidad, el efecto cuadrático de la intensidad, el tiempo de impulso y el rendimiento.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	1521,55	1	1521,55	48,07	0,0000
B: Tiempo de impulso	2024,58	1	2024,58	63,96	0,0000
AA	421,173	1	421,173	13,31	0,0006
AB	507,443	1	507,443	16,03	0,0002
AC	75,7683	1	75,7683	2,39	0,1275
BB	52,8529	1	52,8529	1,67	0,2016
CC	55,2421	1	55,2421	1,75	0,1919
Error total	1772,61	56	31,6538		
Total (corr.)	6431,22	63			

Tabla 4.35. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - EW

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	208915,	1	208915,	78,26	0,0000
B: Tiempo de impulso	19549,8	1	19549,8	7,32	0,0090
C: Rendimiento	16264,0	1	16264,0	6,09	0,0167
AA	80421,2	1	80421,2	30,13	0,0000
AB	6260,33	1	6260,33	2,35	0,1313

AC	8895,08	1	8895,08	3,33	0,0733
BB	2705,43	1	2705,43	1,01	0,3184
Error total	149490,	56	2669,46		
Total (corr.)	492500,	63			

Tabla 4.36. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - EW

Los datos recogidos en las tablas ANOVA se muestran, asimismo, en la Fig. 4.77, que representa el diagrama de Pareto, y en la Fig. 4.78, que corresponde a la gráfica de efectos principales. Como puede observarse, la intensidad es el factor que más influye en EW con polaridad negativa y el segundo factor más influyente con polaridad positiva. No obstante, en ambos casos sigue la misma tendencia, de tal manera que EW tiende a disminuir al aumentar la intensidad hasta un mínimo, situado aproximadamente en 7 A, a partir del cual comienza a aumentar. Este comportamiento coincide con el obtenido al seleccionar electrodo de cobre, sea cual sea su polaridad, tal y como se observó en la Fig. 4.7, y también coincide con el visto en la Fig. 4.43 (b), que corresponde a la gráfica de efectos principales de EW con polaridad negativa y electrodo de grafito. Sin embargo, es totalmente opuesto al obtenido con polaridad positiva y electrodo de grafito (Fig. 4.43 (a)).

Respecto al tiempo de impulso, es el factor que más influye en EW con polaridad positiva, y el tercer factor más influyente en EW con polaridad negativa. Además, presenta un comportamiento totalmente opuesto al variar la polaridad. Con positiva, EW tiende a disminuir al aumentar el tiempo de impulso como puede observarse en la Fig. 4.78 (a), mientras que con negativa la tendencia es la contraria, tal y como muestra la Fig. 4.78 (b).

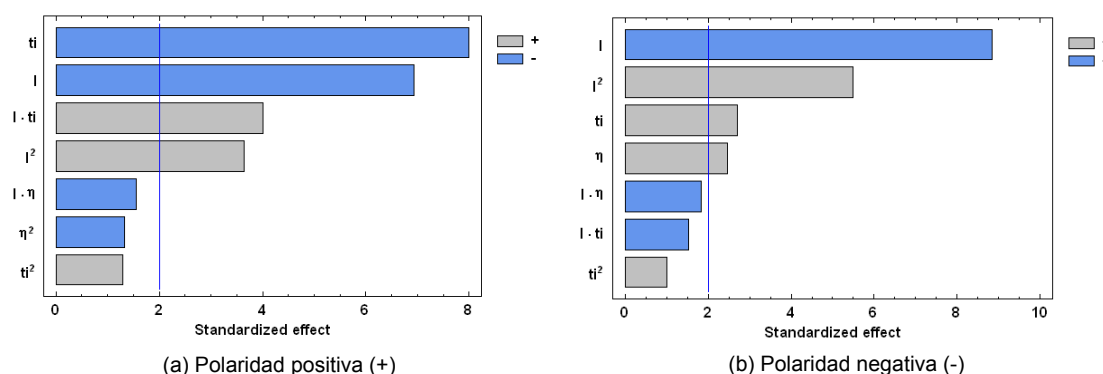


Fig. 4.77. Diagrama de Pareto para EW con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Por otra parte, respecto al factor del rendimiento, sólo se considera significativo en la respuesta EW con polaridad negativa, en cuyo caso, al aumentar su valor, aumenta el desgaste, tal y como se observa en la Fig. 4.78 (b).

Además, cabe destacar que los valores de desgaste alcanzados con polaridad positiva son muy inferiores a los obtenidos con negativa. Así, con polaridad positiva el máximo valor alcanzado de EW es de 42,84 %, mientras que, con polaridad negativa, se ha alcanzado un valor de 320,70 %. Estos resultados coinciden con los obtenidos en la EDM de Inconel® 600 con electrodo de grafito, y que están analizados en el apartado 4.2.2. de la presente Tesis Doctoral.

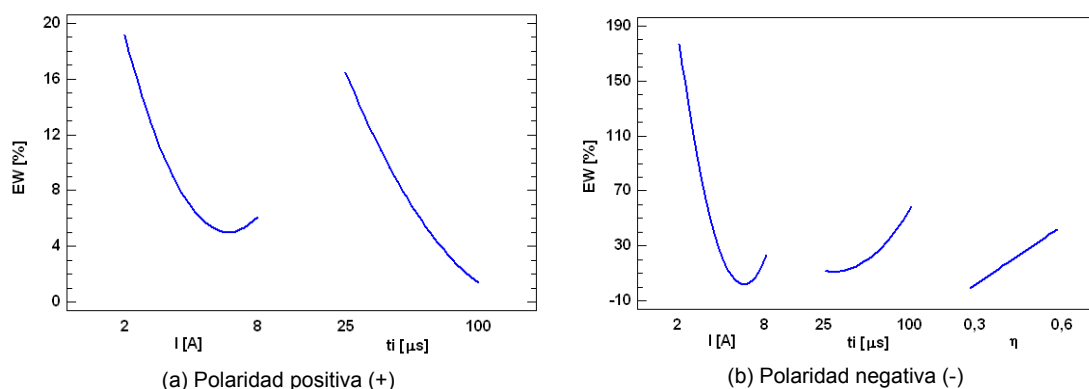


Fig. 4.78. Efectos principales para EW con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Los efectos de interacción de EW se muestran en la Fig. 4.79. Como puede observarse, las parejas intensidad-tiempo de impulso e intensidad-rendimiento son las que mayor influencia presentan sobre EW para ambas polaridades.

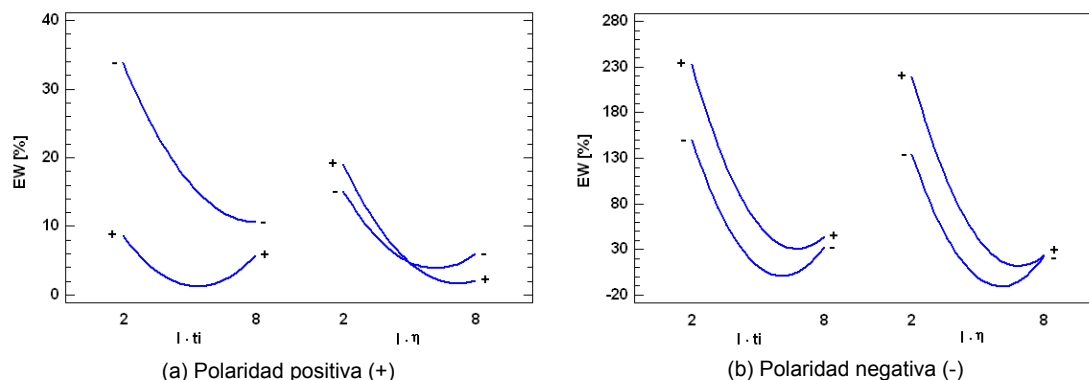


Fig. 4.79. Efectos de interacción para EW con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Por otra parte, para EW y polaridad positiva se obtiene un valor de R^2 de 72,44 % mientras que R^2_{adj} tiene un valor de 68,99 %. Para el caso de polaridad negativa los valores de R^2 y de R^2_{adj} son de 69,65 % y de 65,85 %, respectivamente. Como puede observarse, los valores obtenidos para el modelo ajustado de EW son inferiores a los obtenidos para la variable MRR y los parámetros de rugosidad superficial. Este hecho también se observó en los valores obtenidos para el modelo de EW con electrodo de grafito y tal y como se explicó, puede atribuirse a la gran variabilidad de los resultados obtenidos. Las ecuaciones de los modelos ajustados para EW se muestran en la Eq. (40), para polaridad positiva, y en la Eq. (41), para polaridad negativa.

$$EW = 37,5293 - 9,4511 * I - 0,6082 * t_i + 105,3770 * \eta + 0,6413 * I^2 + 0,0451 * I * t_i - 4,3523 * I * \eta + 0,0015 * t_i^2 - 92,9062 * \eta^2 \quad (40)$$

$$EW = 151,5450 - 83,0609 * I + 0,1162 * t_i + 378,3670 * \eta + 8,8621 * I^2 - 0,1582 * I * t_i - 47,1569 * I * \eta + 0,0104 * t_i^2 \quad (41)$$

En la Fig. 4.80 y en la Fig. 4.81 se muestran las superficies de respuesta de EW. Con polaridad positiva, tal y como muestra la Fig. 4.80 (a), los mayores valores de desgaste se alcanzan cuando tanto el valor de la intensidad como el del tiempo de impulso son mínimos (2 A y 25 μ s). Sin embargo, con polaridad negativa el máximo desgaste se obtiene combinando valores bajos de intensidad con valores altos de tiempo de impulso (2 A y 100 μ s), tal y como se observa en la Fig. 4.80 (b).

Por otra parte, en la Fig. 4.81 (a) se observa que, con polaridad positiva, los mayores valores de desgaste se obtienen con valores bajos de intensidad (2 A). Asimismo en la Fig. 4.81 (b) puede apreciarse que, con polaridad negativa, para un determinado valor del rendimiento, al aumentar la intensidad, EW disminuye. Esta tendencia de disminución es más pronunciada para valores altos de rendimiento. A su vez, se observa que para una determinada intensidad, EW disminuye ligeramente al disminuir el rendimiento.

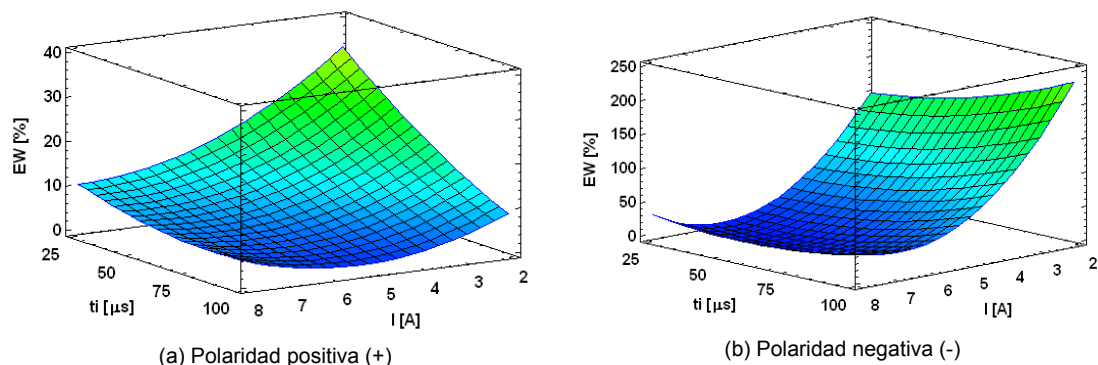


Fig. 4.80. Superficie de respuesta de EW vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)

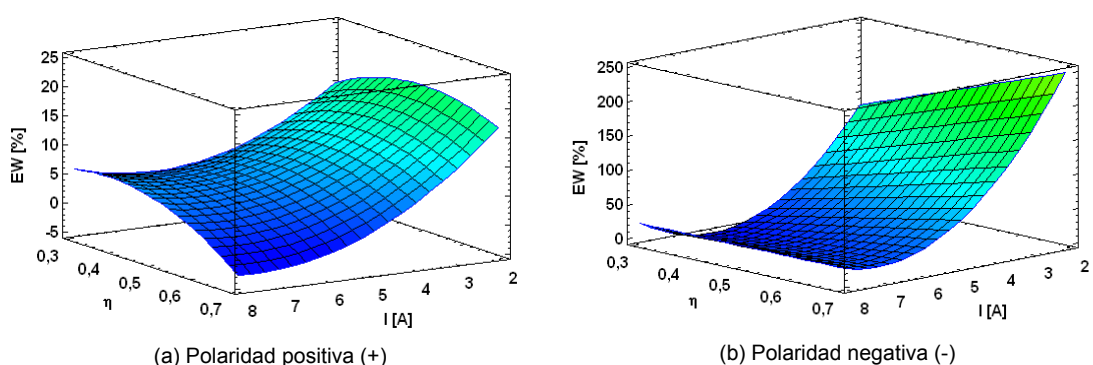


Fig. 4.81. Superficie de respuesta de EW vs. I y η con polaridad positiva (a) y negativa (b)

4.3.3. Análisis y discusión de resultados para los parámetros de rugosidad superficial

A continuación, se analizan los resultados obtenidos de los parámetros de rugosidad superficial obtenidos mediante el proceso de EDM con electrodo de grafito con cobre infiltrado. Al igual que en los estudios anteriores, en primer lugar se analizan los parámetros de amplitud y, posteriormente, los parámetros de espaciamento.

4.3.3.1. Análisis de los parámetros de amplitud

A partir de los resultados experimentales recogidos en la Tabla 4.32, se obtienen las tablas ANOVA de los modelos simplificados de Ra, para ambas polaridades, las cuales se muestran en la Tabla 4.37, para polaridad positiva, y en la Tabla 4.38, para polaridad negativa. Como puede observarse, para

polaridad positiva, cuatro de los efectos tienen P-valores inferiores a 0,05. Estos efectos, dispuestos de mayor a menor importancia son: la intensidad, el tiempo de impulso, el efecto cuadrático de la intensidad y, finalmente, el efecto de interacción entre la intensidad y el tiempo de impulso.

Por otra parte, en el caso de polaridad negativa, cinco efectos son considerados estadísticamente significativos. Estos efectos son los mismos cuatro efectos que influyen en Ra para polaridad positiva y, además, el efecto cuadrático del tiempo de impulso.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	126,90	1	126,90	1078,15	0,0000
B: Tiempo de impulso	38,94	1	38,94	330,86	0,0000
C: Rendimiento	0,15	1	0,15	1,28	0,2623
AA	15,20	1	15,20	129,15	0,0000
AB	3,21	1	3,21	27,29	0,0000
BB	0,42	1	0,42	3,55	0,0648
BC	0,17	1	0,17	1,43	0,2368
Error total	6,59	56	0,12		
Total (corr.)	191,58	63			

Tabla 4.37. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Ra

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	231,44	1	231,44	1053,86	0,0000
B: Tiempo de impulso	35,02	1	35,02	159,46	0,0000
AA	33,26	1	33,26	151,47	0,0000
AB	10,20	1	10,20	46,45	0,0000
BB	0,95	1	0,95	4,33	0,0419
Error total	12,74	58	0,22		
Total (corr.)	323,61	63			

Tabla 4.38. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Ra

Las Fig. 4.82-Fig. 4.87 muestran el diagrama de Pareto y la gráfica de efectos principales de los parámetros de rugosidad Ra, Rq y Rt, con polaridad positiva y negativa. Como puede observarse, la intensidad y el tiempo de impulso son los dos factores más influyentes para ambas polaridades. Asimismo, la calidad del acabado superficial es mejor cuando se aplican numerosas descargas eléctricas a baja energía y de corta duración. Bajo estas condiciones, se producen cavidades de pequeño tamaño distribuidas homogéneamente sobre la superficie resultante.

Los experimentos E33 (2 A y 25 μ s), para polaridad positiva, y E21 (2 A y 50 μ s), para polaridad negativa, con valores de Ra de 1,17 μ m y 1,28 μ m, respectivamente, son aquellos experimentos con los que se obtuvo el mejor acabado superficial. En ambos casos, el valor de la intensidad fue mínimo y el del tiempo de impulso fue bajo, dentro del rango seleccionado para cada una de las polaridades. Por otra parte, los experimentos E16 (8 A y 100 μ s), para polaridad positiva, y E48 (8 A y 100 μ s), para polaridad negativa, se realizaron con los máximos valores tanto de intensidad como de tiempo de impulso, dando como resultado un Ra de 7,41 μ m y de 8,33 μ m, respectivamente. Como se ha comentado anteriormente, este empeoramiento es producido por la mayor energía de las descargas que produce cráteres de mayor tamaño y profundidad. Estos resultados son congruentes con los obtenidos para MRR y que quedan detallados en el capítulo 5.3.1. En el caso de máxima Ra, se obtuvo un MRR de 10,0405 mm³/min, para polaridad positiva, y de 23,8906 mm³/min, para polaridad negativa, mientras que con el mínimo Ra obtenido, las tasas de eliminación de material fueron de 0,2650 mm³/min y 0,4136 mm³/min para polaridad positiva y negativa, respectivamente. Además, a partir de estos resultados, y tal y como se observa en las Fig. 4.85-Fig. 4.87, los mayores valores de rugosidad superficial se obtienen cuando se emplea polaridad negativa.

Por otra parte, análogamente al análisis de MRR, se observa que con los mismos valores de intensidad, tiempo de impulso y rendimiento, los valores obtenidos de Ra con electrodo de Cu-C son, en general, superiores a los obtenidos con electrodo de grafito, lo que indica que la adición de cobre conduce a una mayor fusión del material y, por tanto, a la formación de cráteres más profundos en la superficie. Además, tal y como sucede con MRR, este aumento se hace más evidente con valores altos de intensidad. Siguiendo con el mismo ejemplo propuesto para MRR ($I = 8$ A, $t_i = 75$ μ s, $\eta = 0,6$), el valor de Ra con electrodo de Cu-C fue de 6,23 μ m, mientras que con electrodo de grafito fue de 5,85 μ m.

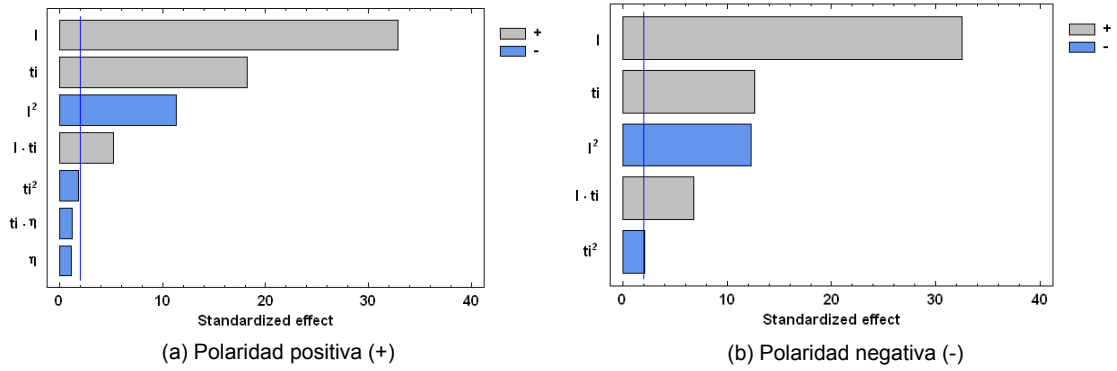


Fig. 4.82. Diagrama de Pareto para Ra con polaridad positiva (a) y negativa (b)

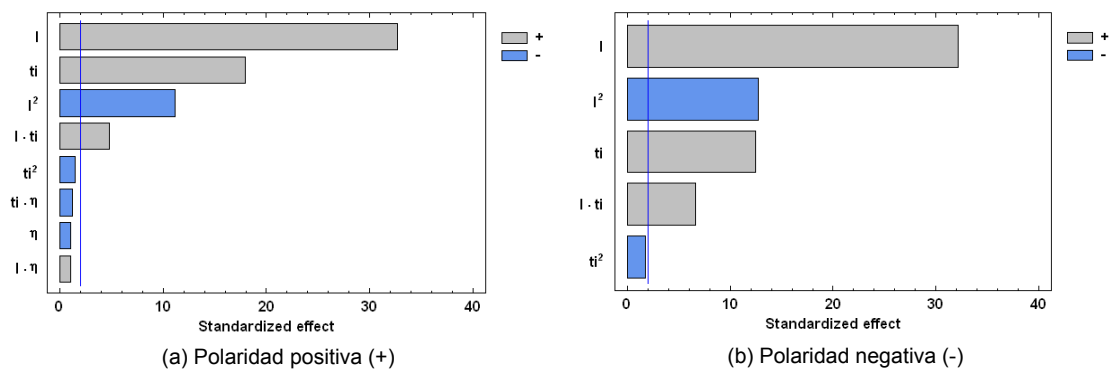


Fig. 4.83. Diagrama de Pareto para Rq con polaridad positiva (a) y negativa (b)

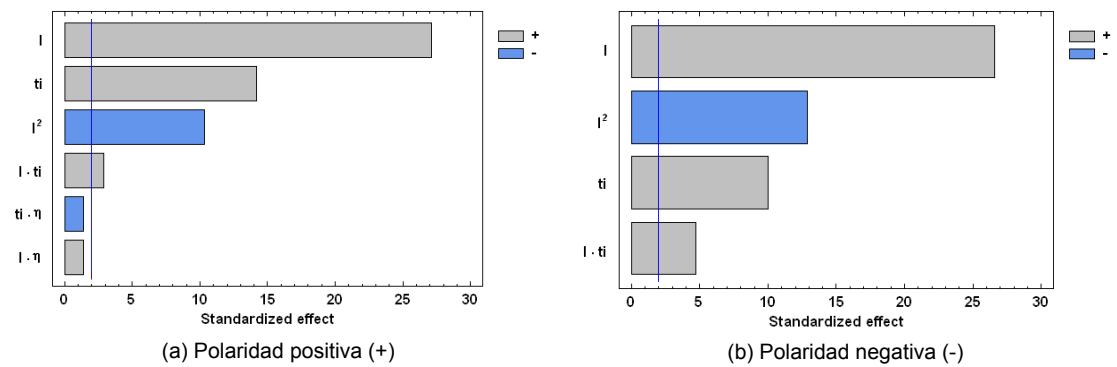


Fig. 4.84. Diagrama de Pareto para Rt con polaridad positiva (a) y negativa (b)

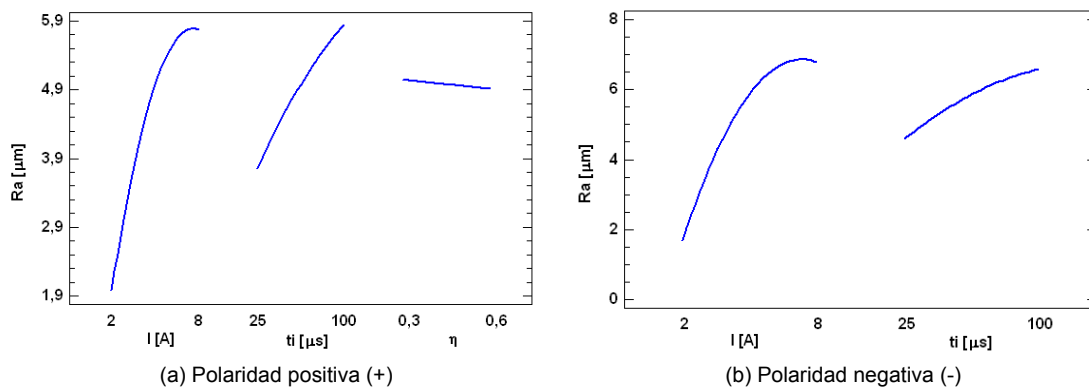


Fig. 4.85. Efectos principales para Ra con polaridad positiva (a) y negativa (b)

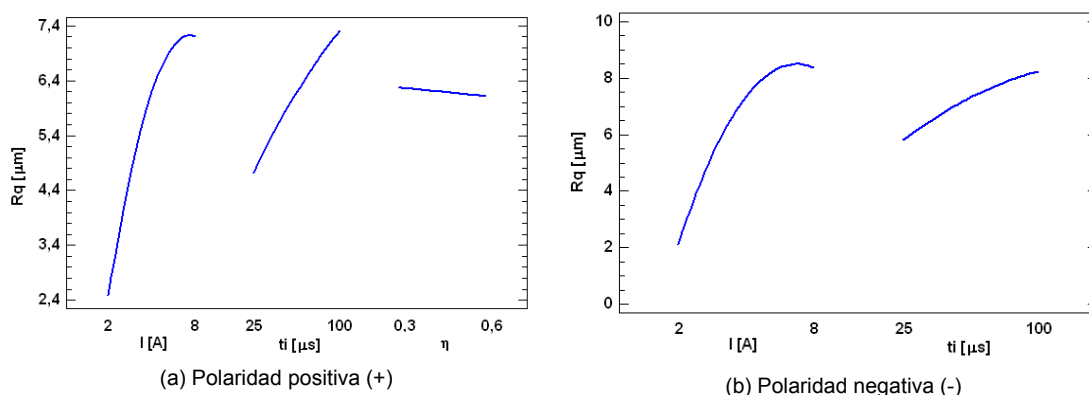


Fig. 4.86. Efectos principales para Rq con polaridad positiva (a) y negativa (b)

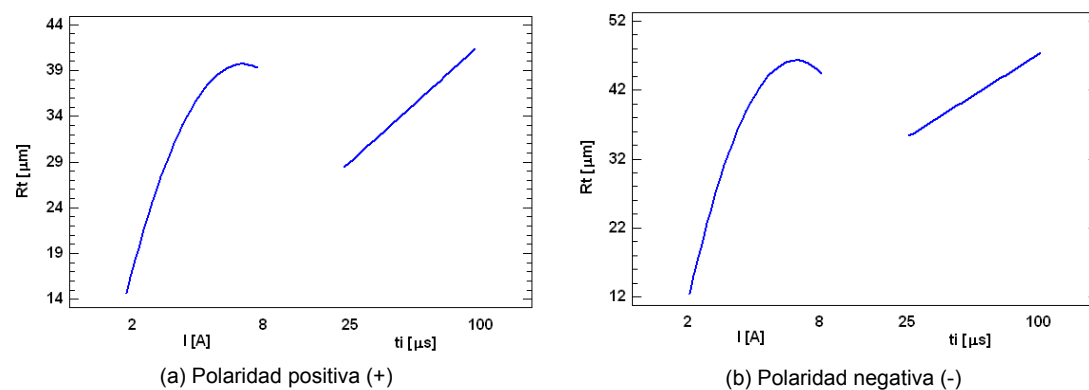


Fig. 4.87. Efectos principales para Rt con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Las Fig. 4.88-Fig. 4.90 representan los efectos de interacción para los parámetros de amplitud con polaridad positiva y negativa. Como puede

observarse, la pareja de factores intensidad-tiempo de impulso es la que mayor interacción presenta en Ra, Rq y Rt, para las dos polaridades seleccionadas.

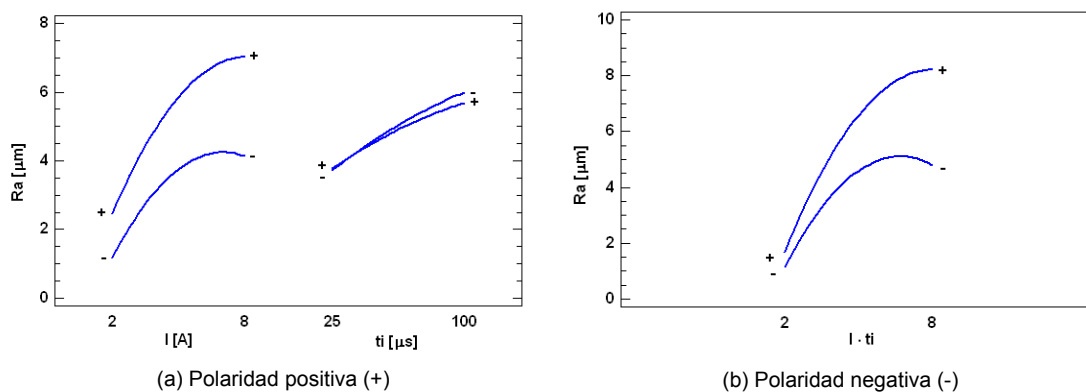


Fig. 4.88. Efectos de interacción para Ra con polaridad positiva (a) y negativa (b)

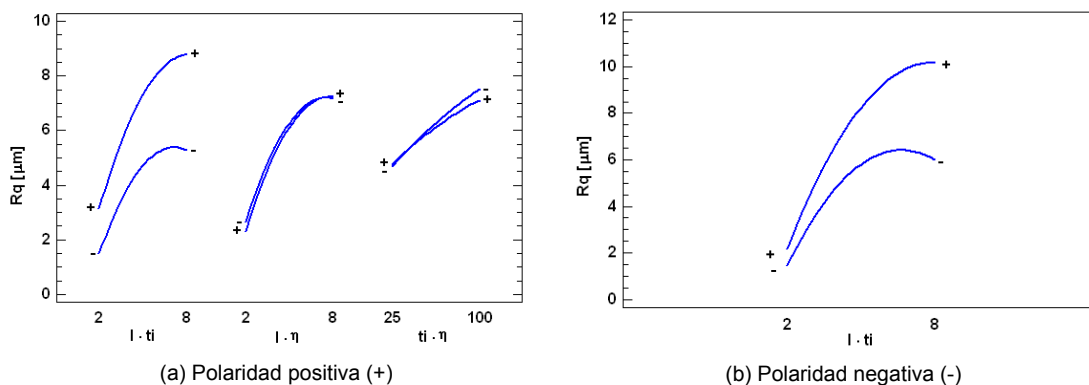


Fig. 4.89. Efectos de interacción para Rq con polaridad positiva (a) y negativa (b)

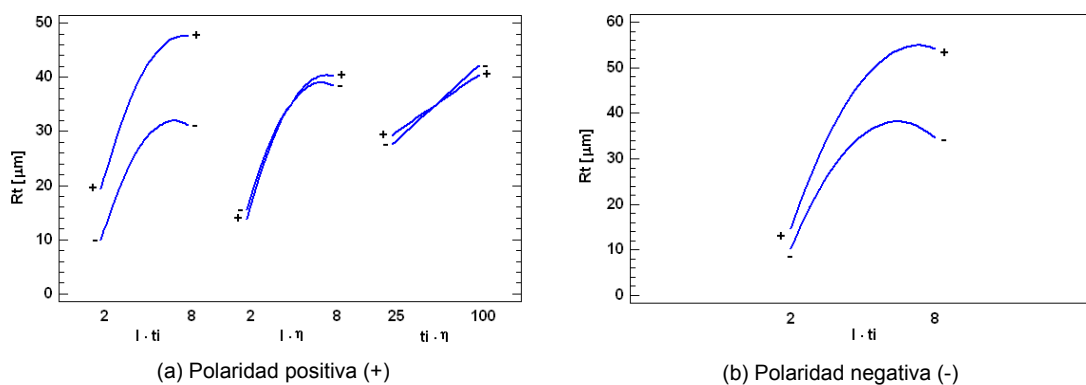


Fig. 4.90. Efectos de interacción para Rt con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Para el parámetro Ra, con polaridad positiva, los valores de R² y de R²_{adj} son de 96,56 % y de 96,13 %, mientras que con polaridad negativa, R² y R²_{adj} tienen valores de 96,06 % y de 95,72 %, respectivamente. Las ecuaciones de los modelos ajustados de Ra para polaridad positiva y negativa se muestran en la Eq. (42) y en la Eq. (43), respectivamente.

$$Ra = -2,6123 + 1,6241 * I + 0,0335 * t_i + 0,5913 * \eta - 0,1218 * I^2 + 0,0036 * I * t_i - 0,0001 * t_i^2 - 0,0164 * t_i * \eta \quad (42)$$

$$Ra = -3,3191 + 2,2535 * I + 0,0189 * t_i - 0,1802 * I^2 + 0,0064 * I * t_i - 0,0002 * t_i^2 \quad (43)$$

Para Rq y polaridad positiva, el valor de R² es de 96,55 % y el de R²_{adj} de 96,05 %. Con polaridad negativa, los valores de R² y de R²_{adj} son de 96,02 % y de 95,68 %, respectivamente. Las ecuaciones de los modelos ajustados de Rq se muestran en la Eq. (44), para polaridad positiva, y en la Eq. (45), para negativa.

$$Rq = -2,6793 + 1,9227 * I + 0,0391 * t_i - 0,3550 * \eta - 0,1499 * I^2 + 0,0042 * I * t_i + 0,2288 * I * \eta - 0,0002 * t_i^2 - 0,0210 * t_i * \eta \quad (44)$$

$$Rq = -4,1191 + 2,8712 * I + 0,0200 * t_i - 0,2306 * I^2 + 0,0077 * I * t_i - 0,0002 * t_i^2 \quad (45)$$

Por otra parte, para Rt, en el caso de polaridad positiva, el valor de R² es de 94,87 % y el valor de R²_{adj} es de 94,33 %. Asimismo, para polaridad negativa los valores de R² y de R²_{adj} son de 94,41 % y de 94,03 %, respectivamente. Las ecuaciones de los modelos ajustados de Rt para ambas polaridades se muestran a continuación en la Eq. (46) y en la Eq. (47):

$$Rt = -13,7018 + 11,0933 * I + 0,1636 * t_i + 0,2363 * \eta - 0,8798 * I^2 + 0,0157 * I * t_i + 1,8779 * I * \eta - 0,1540 * t_i * \eta \quad (46)$$

$$Rt = -20,7919 + 17,6217 * I - 0,0088 * t_i - 1,4405 * I^2 + 0,0339 * I * t_i \quad (47)$$

Las Fig. 4.91 (a)-Fig. 4.93 (a), para polaridad positiva, y las Fig. 4.91 (b)-Fig. 4.93 (b), para polaridad negativa, representan las superficies de respuesta de los parámetros de amplitud en función de la intensidad y el tiempo de impulso. Como se observa, con ambas polaridades, para un determinado valor de intensidad, al aumentar el tiempo de impulso, Ra, Rq y Rt aumentan, alcanzando los mayores valores de rugosidad con $I = 8 \text{ A}$ y $t_i = 100 \mu\text{s}$.

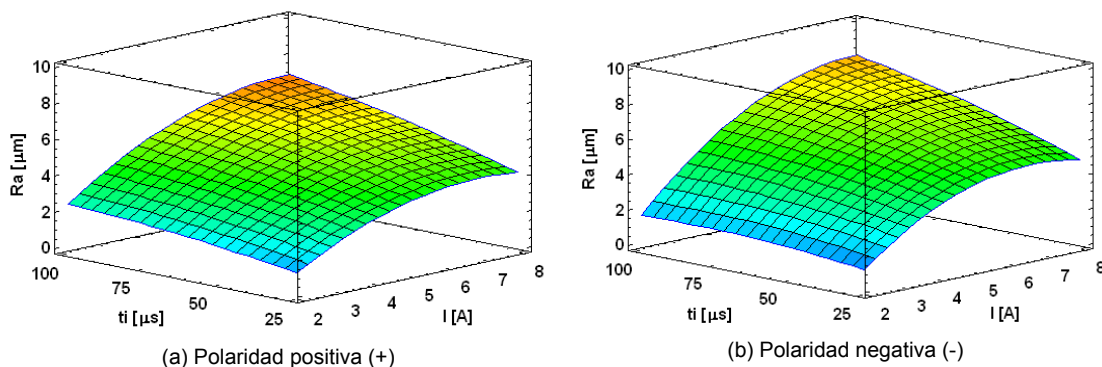


Fig. 4.91. Superficie de respuesta de Ra vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)

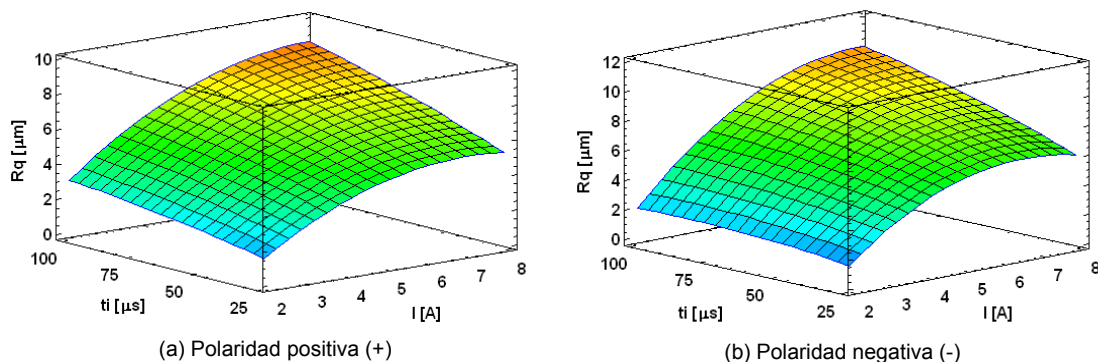


Fig. 4.92. Superficie de respuesta de Rq vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)

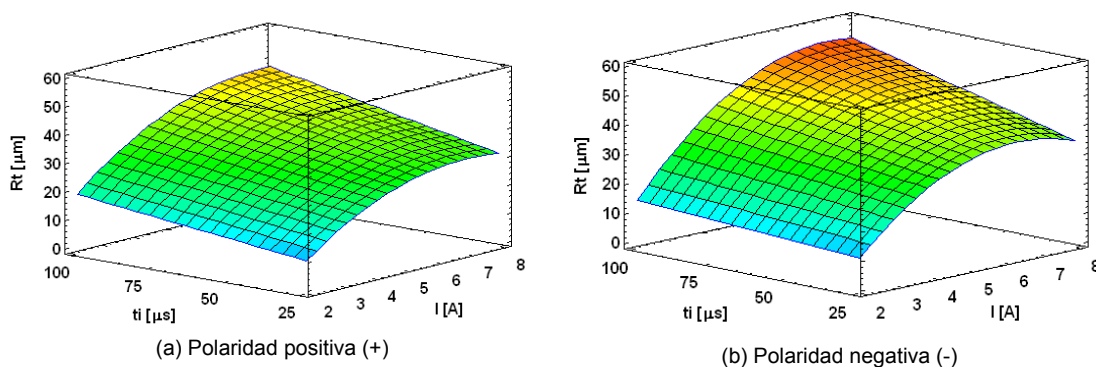


Fig. 4.93. Superficie de respuesta de Rt vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)

4.3.3.2. Análisis de los parámetros de espaciamento

Tras el estudio de los parámetros de amplitud Ra, Rq y Rt, y a partir de los resultados experimentales obtenidos que se muestran en la Tabla 4.32, a continuación, se analizan los parámetros de espaciamento Sm y Pc. Asimismo, las tablas ANOVA de la variable Sm se recogen en la Tabla 4.39 y en la Tabla 4.40, para ambas polaridades. Como puede observarse, cinco efectos para polaridad positiva y cuatro efectos para polaridad negativa, tienen P-valores inferiores a 0,05, indicando que influyen en la variable Sm. En ambos casos, la intensidad y el tiempo de impulso son los efectos más significativos. Además, estos dos mismos efectos son también los más significativos para Pc, tal y como puede observarse en la Tabla 4.41 y la Tabla 4.42, que representan las tablas ANOVA con ambas polaridades de dicha variable.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	10781,00	1	10781,00	149,63	0,0000
B: Tiempo de impulso	28196,30	1	28196,30	391,35	0,0000
C: Rendimiento	280,13	1	280,13	3,89	0,0536
AA	409,05	1	409,05	5,68	0,0206
AC	882,39	1	882,39	12,25	0,0009
BB	236,39	1	236,39	3,28	0,0755
BC	571,93	1	571,93	7,94	0,0067
Error total	4034,75	56	72,05		
Total (corr.)	45392,00	63			

Tabla 4.39. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Sm

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	23259,60	1	23259,60	140,46	0,0000
B: Tiempo de impulso	11720,10	1	11720,10	70,77	0,0000
C: Rendimiento	205,12	1	205,12	1,24	0,2704
AA	749,39	1	749,39	4,53	0,0377
AB	4444,22	1	4444,22	26,84	0,0000
BB	236,39	1	236,39	1,43	0,2371
Error total	9439,22	57	165,60		
Total (corr.)	50054,00	63			

Tabla 4.40. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Sm

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	10832,20	1	10832,20	204,47	0,0000
B: Tiempo de impulso	18963,60	1	18963,60	357,96	0,0000
C: Rendimiento	196,88	1	196,88	3,72	0,0591

AA	1415,64	1	1415,64	26,72	0,0000
AB	1366,41	1	1366,41	25,79	0,0000
AC	866,41	1	866,41	16,35	0,0002
BB	143,40	1	143,40	2,71	0,1056
BC	70,31	1	70,31	1,33	0,2543
Error total	2913,74	55	52,98		
Total (corr.)	36768,50	63			

Tabla 4.41. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Pc

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	13652,90	1	13652,90	168,45	0,0000
B: Tiempo de impulso	4308,58	1	4308,58	53,16	0,0000
AA	1464,98	1	1464,98	18,07	0,0001
AB	1675,67	1	1675,67	20,67	0,0000
BB	128,26	1	128,26	1,58	0,2135
BC	188,65	1	188,65	2,33	0,1326
Error total	4619,97	57	81,05		
Total (corr.)	26039,00	63			

Tabla 4.42. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Pc

Los resultados obtenidos en las tablas ANOVA se han representado gráficamente en las Fig. 4.94-Fig. 4.97. Como puede observarse, la intensidad y el tiempo de impulso son los dos factores que más influyen en Sm y Pc para ambas polaridades. Además, su influencia sobre los parámetros de espaciamiento es contraria, y al aumentar la intensidad y el tiempo de impulso, Sm aumenta mientras que Pc disminuye. En principio, esta tendencia es la esperada y coincide con las obtenidas en el análisis de la EDM con electrodo de cobre y grafito. Asimismo, tal y como se explicó anteriormente, este hecho es debido a que al aumentar la energía y duración de las descargas, el número de cráteres resultantes es menor (menor Pc) y, por lo tanto, la distancia entre ellos aumenta debido a su mayor diámetro (mayor Sm). De acuerdo a los resultados experimentales obtenidos que se muestran en la Tabla 4.32, el experimento E33, con polaridad positiva, y el E21, con polaridad negativa, con los que se obtuvieron el menor valor de Ra, alcanzaron valores de Sm de 60,60 μm y 76,20 μm , mientras que los valores de Pc fueron 164,80 1/cm y 131,40 1/cm, respectivamente. En ambos casos, tanto la intensidad como el tiempo de impulso fueron bajos. Sin embargo, conforme se aumenta su valor, Sm aumenta y Pc disminuye, tal y como puede comprobarse en el E16, para polaridad positiva, y en el E48, para polaridad negativa, con los que se

obtuvieron valores de S_m de 168,40 μm y 195,80 μm y valores de P_c de 74,40 1/cm y 63,80 1/cm.

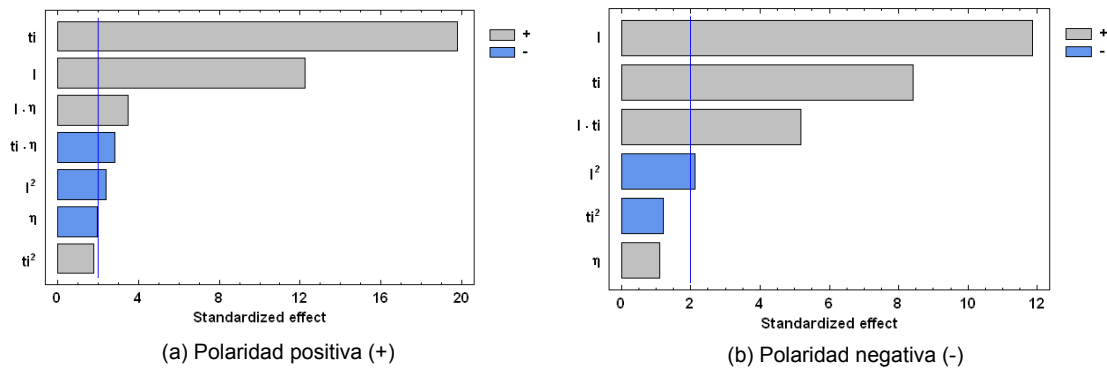


Fig. 4.94. Diagrama de Pareto para S_m con polaridad positiva (a) y negativa (b)

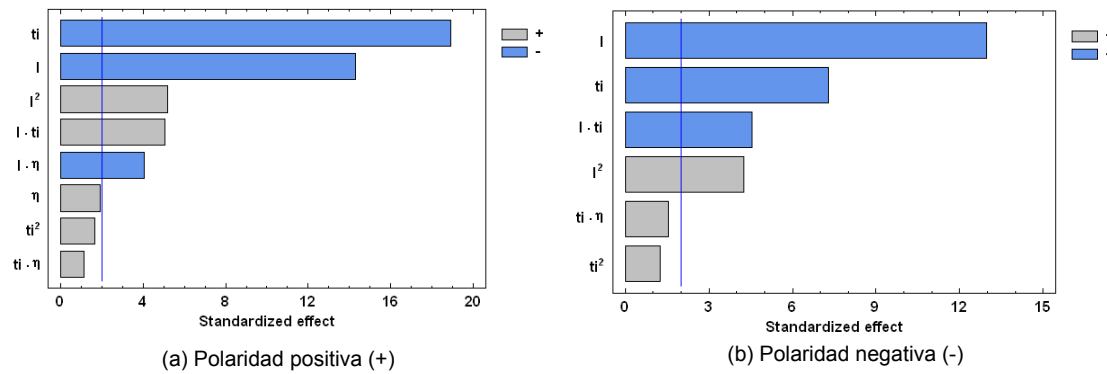


Fig. 4.95. Diagrama de Pareto para P_c con polaridad positiva (a) y negativa (b)

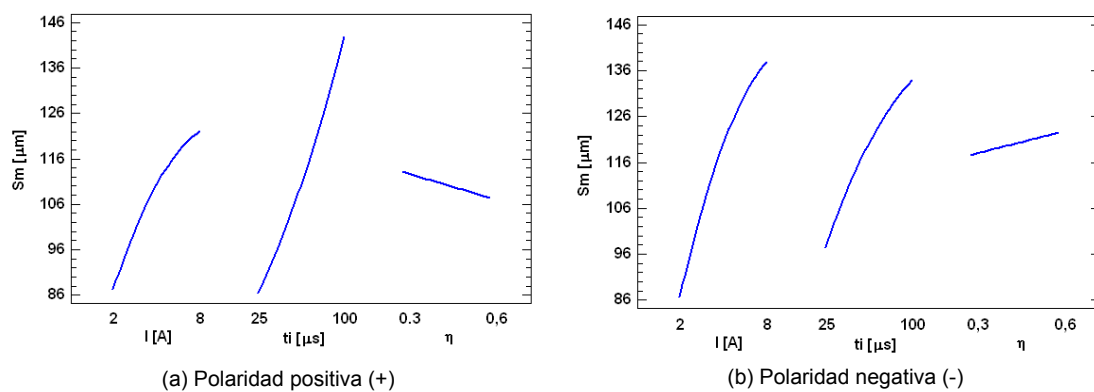


Fig. 4.96. Efectos principales para S_m con polaridad positiva (a) y negativa (b)

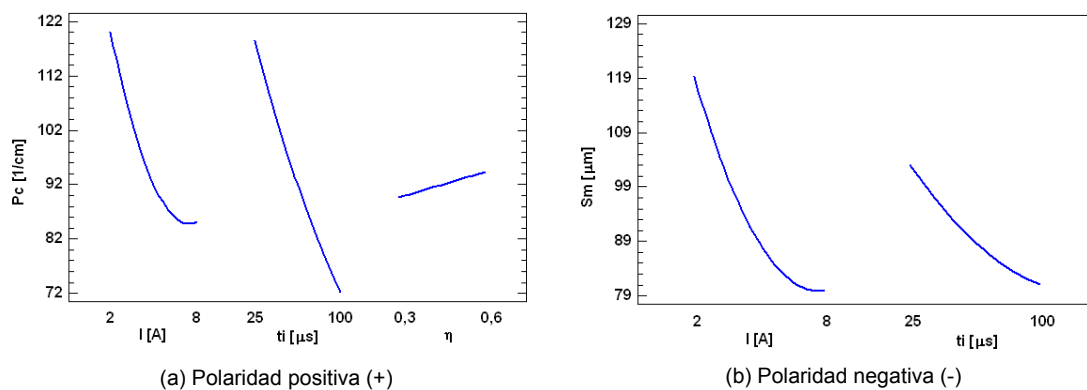


Fig. 4.97. Efectos principales para Pc con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Los efectos de interacción de los parámetros de espaciamiento se muestran en la Fig. 4.98, para Sm, y en la Fig. 4.99 para Pc. Como puede observarse, la pareja intensidad-rendimiento es la que mayor influencia presenta sobre Sm con polaridad positiva, mientras que con polaridad negativa la pareja intensidad-tiempo de impulso presenta una interacción mayor. Asimismo, para Pc, la pareja intensidad-tiempo de impulso es la que mayor interacción presenta para ambas polaridades.

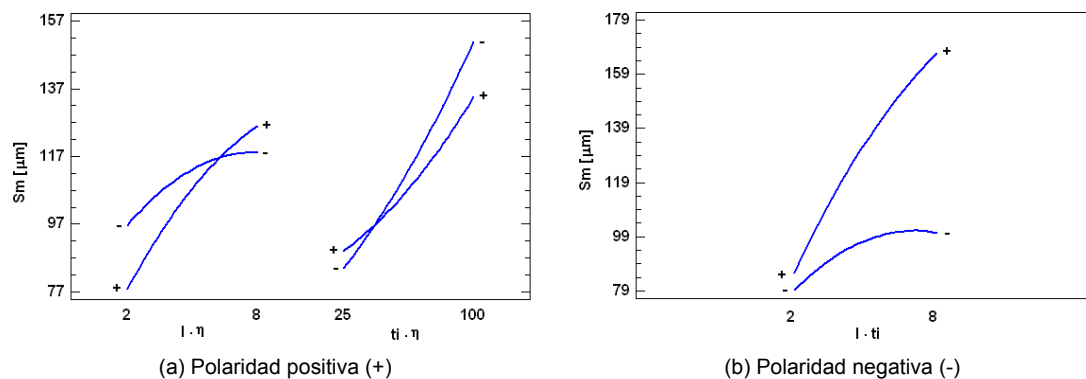


Fig. 4.98. Efectos de interacción para Sm con polaridad positiva (a) y negativa (b)

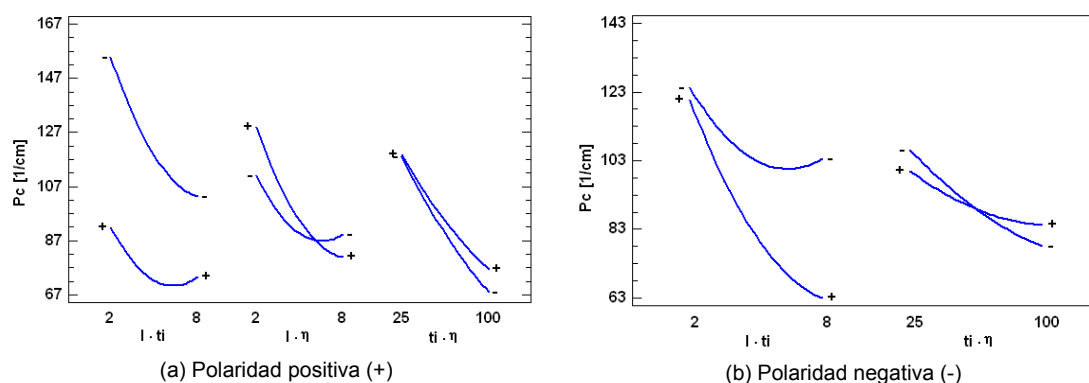


Fig. 4.99. Efectos de interacción para Pc con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Para Sm, en el caso de polaridad positiva, se obtiene un valor de R^2 de 91,11 % mientras que el valor de R^2_{adj} es 90,00 %. Para el caso de polaridad negativa, los valores de R^2 y de R^2_{adj} son de 81,14 % y de 79,16 %, respectivamente. La Eq. (48) muestra la ecuación del modelo ajustado de Sm para polaridad positiva y la Eq. (49), para polaridad negativa:

$$Sm = 45,4875 + 5,4411 * I + 0,7970 * t_i - 33,1875 * \eta - 0,6320 * I^2 + 14,8525 * I * \eta + 0,0031 * t_i^2 - 0,9566 * t_i * \eta \quad (48)$$

$$Sm = 48,2006 + 8,7472 * I + 0,2019 * t_i + 16,0125 * \eta - 0,8555 * I^2 + 0,1333 * I * t_i - 0,0031 * t_i^2 \quad (49)$$

Para Pc y polaridad positiva, el valor de R^2 es de 92,08 % y el valor de R^2_{adj} es de 90,92 %. Asimismo, con polaridad negativa, los valores de R^2 y de R^2_{adj} son de 82,26 % y de 80,39 %, respectivamente. Las ecuaciones de los modelos ajustados de Pc para ambas polaridades se muestran a continuación en la Eq. (50) y en la Eq. (51):

$$Pc = 190,6590 - 15,5737 * I - 1,4358 * t_i + 68,3125 * \eta + 1,1758 * I^2 + 0,0739 * I * t_i - 14,7175 * I * \eta + 0,0024 * t_i^2 + 0,3354 * t_i * \eta \quad (50)$$

$$Pc = 168,5020 - 13,3759 * I - 0,4146 * t_i - 34,3375 * \eta + 1,1961 * I^2 - 0,0819 * I * t_i + 0,0023 * t_i^2 + 0,5494 * t_i * \eta \quad (51)$$

La Fig. 4.100 muestra la superficie de respuesta de S_m en función de la intensidad y el tiempo de impulso con polaridad positiva y negativa. Como se puede observar en la Fig. 4.100 (a), con polaridad positiva, hay una tendencia de subida de la variable S_m al aumentar el tiempo de impulso para cualquier valor de intensidad, alcanzando los mayores valores de rugosidad con valores altos tanto de intensidad como de tiempo de impulso (8 A y 100 μ s). Asimismo, con polaridad negativa, tal y como muestra la Fig. 4.100 (b), los valores más altos de S_m también se alcanzan cuando ambos factores se mantienen en sus valores más altos.

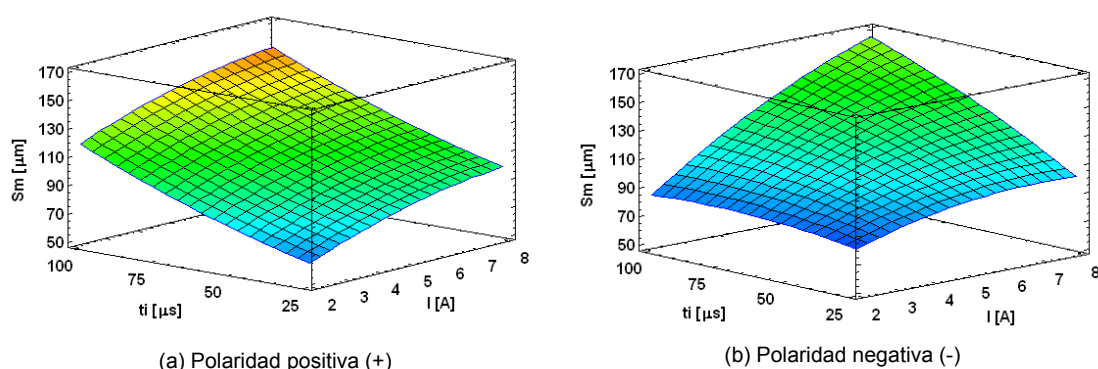


Fig. 4.100. Superficie de respuesta de S_m vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)

Por otra parte, la Fig. 4.101 representa la superficie de respuesta de P_c en función de la intensidad y el tiempo de impulso, resultando los valores más bajos de P_c , para ambas polaridades, cuando tanto el tiempo de impulso como la intensidad alcanzan valores altos (100 μ s y 8 A).

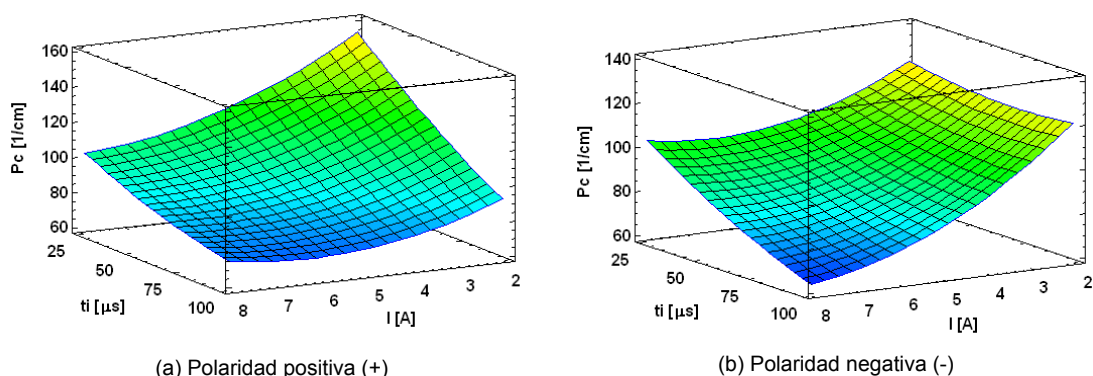


Fig. 4.101. Superficie de respuesta de P_c vs. I y t_i con polaridad positiva (a) y negativa (b)

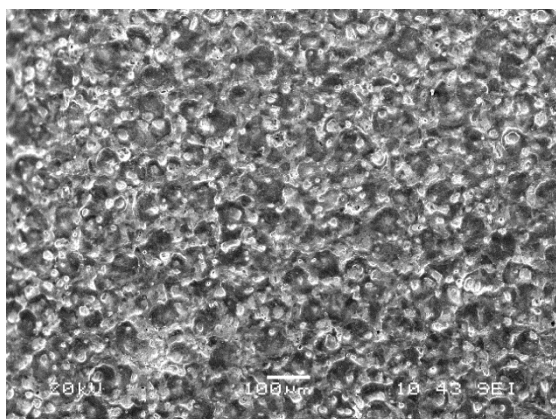
4.3.4. Análisis mediante microscopía electrónica de barrido

En el presente apartado se analizan, mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), las superficies resultantes tras el proceso de electroerosión con las que se ha obtenido el mayor y menor valor de Ra para ambas polaridades. De manera similar a los estudios anteriormente realizados de las superficies electroerosionadas con electrodos de cobre y grafito, en primer lugar, se analizan las superficies resultantes atendiendo a su polaridad y, posteriormente, en función de los parámetros de diseño I , t_i y η . Para el caso de polaridad positiva, los experimentos analizados han sido el E33 ($I = 2$ A, $t_i = 25$ μ s y $\eta = 0,5$), con el que se ha obtenido el valor mínimo de Ra de $1,17$ μ m, y el experimento E16 ($I = 8$ A, $t_i = 100$ μ s y $\eta = 0,3$), con el que se ha obtenido el valor máximo de Ra de $7,41$ μ m. Por otra parte, los experimentos con polaridad negativa analizados han sido el E21 ($I = 2$ A, $t_i = 50$ μ s y $\eta = 0,4$) y el E48 ($I = 8$ A, $t_i = 100$ μ s y $\eta = 0,5$), que han conducido a un valor de Ra mínimo de $1,28$ μ m y a un valor máximo de $8,33$ μ m, respectivamente. Todos estos resultados se muestran en la Tabla 4.32 correspondiente a los valores experimentales del Inconel® 600 con electrodo de cobre-grafito y polaridades positiva y negativa.

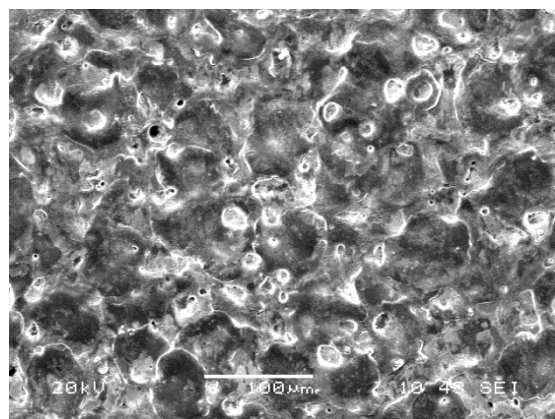
Las micrografías de las superficies electroerosionadas bajo las diferentes condiciones seleccionadas se muestran en las Fig. 4.102-Fig. 4.105. Como puede observarse, todas ellas presentan un aspecto superficial mate en forma de pequeños cráteres superpuestos, característicos de este tipo de procesos. Asimismo, el número, tamaño, y profundidad de éstos depende de las condiciones seleccionadas en cada uno de los experimentos, tal y como se explica a continuación.

Las micrografías de la Fig. 4.102 y de la Fig. 4.103 muestran las superficies, a diferentes aumentos, de los experimentos que condujeron al menor valor de Ra con polaridad positiva y negativa, respectivamente. Como puede observarse en las Fig. 4.102 (a)-Fig. 4.102 (d), al emplear polaridad positiva, las superficies presentan un aspecto plano y homogéneo, aunque con presencia de pequeños defectos superficiales como poros y fisuras resultantes de las contracciones

producidas durante el proceso de EDM. Asimismo, las fisuras, tal y como se aprecia en la Fig. 4.102 (c) y en la Fig. 4.102 (d), rodean los pliegues del material resolidificado. Por otra parte, con polaridad negativa, a pesar de haber obtenido un valor de Ra parecido al de E33, electroerosionado con polaridad positiva, a nivel microscópico la superficie está mucho más dañada y se encuentra llena de grietas de mayor profundidad y tamaño. Estas grietas, además, ya no rodean los “granos”, sino que los atraviesan, lo que hace que su presencia en el material sea más peligrosa e indeseable. Asimismo, el análisis EDS de la superficie que se muestra en la Fig. 4.103 (c), determina que las zonas más claras son zonas con bajo contenido en carbono, mientras que en las zonas más oscuras hay una presencia importante tanto de carbono como de cobre. De hecho, la presencia de cobre se asocia con la de carbono debido a que ambos elementos son los principales componentes del electrodo. Además, como puede observarse en la micrografía, el cobre y el carbono están en forma de manchas adheridas a la superficie, siendo el propio carbono el que atrapa las partículas de cobre y provoca su adherencia a la superficie de la pieza.



(a) x 100



(b) x 250

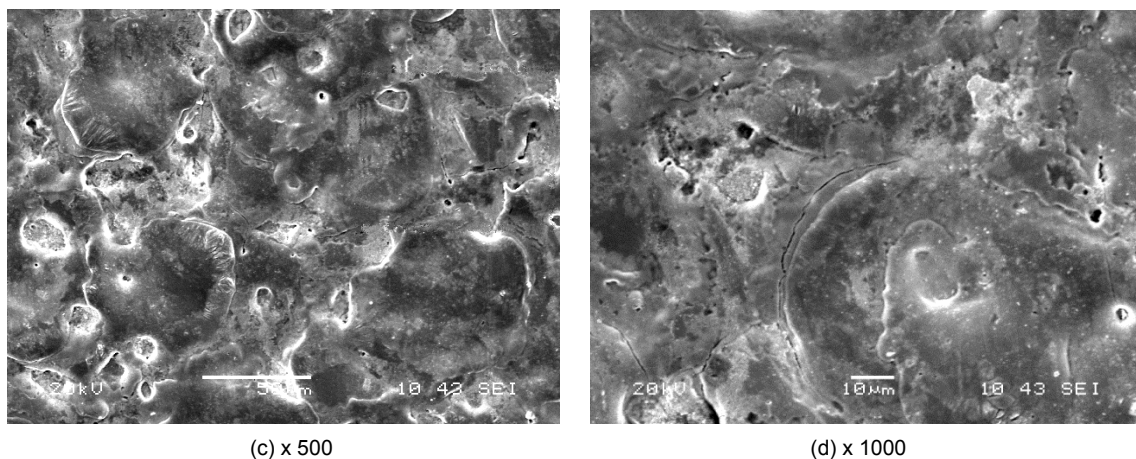


Fig. 4.102. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E33 con mínimo valor de Ra y polaridad positiva a distintos aumentos (x nº aumentos)

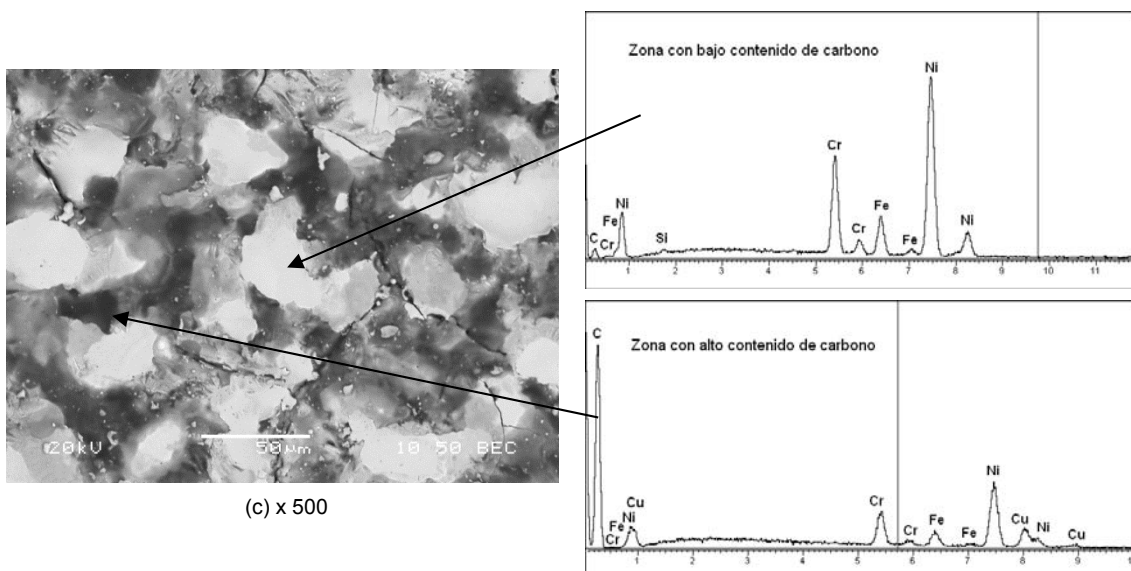
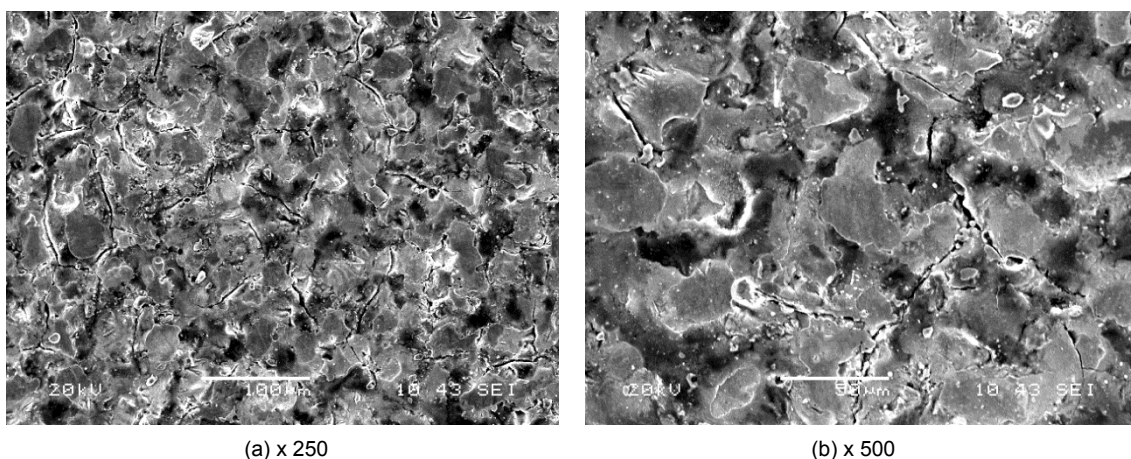


Fig. 4.103. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E21 con mínimo valor de Ra y polaridad negativa a distintos aumentos (x nº aumentos)

Por otra parte, las micrográficas de la Fig. 4.104 y de la Fig. 4.105 muestran las superficies, a diferentes aumentos, de los experimentos que condujeron al mayor valor de Ra con polaridad positiva y negativa, respectivamente. Como puede observarse, con polaridad positiva, la superficie resultante es bastante homogénea, y la cantidad de material fundido es, en este caso, mucho mayor que para el caso correspondiente al del valor de menor rugosidad superficial obtenida. Esto puede ser debido al aumento del tiempo de impulso, que disminuye la frecuencia de los pulsos, y al aumento de la intensidad que genera chispas más energéticas. Sin embargo, a diferencia de éste, no se aprecian fisuras en la superficie sino pequeñas esferas y partículas sueltas. Además, respecto a su composición, también presenta gran homogeneidad, como puede observarse en la Fig. 4.104 (a), en la que se han empleado electrones secundarios, y en la Fig. 4.104 (b), en la que se han utilizado electrones retrodispersados. Ambas micrográficas corresponden a la misma zona de la superficie. Como puede observarse en la Fig. 4.104 (b), la superficie presenta la misma tonalidad, lo que indica que su composición es homogénea, y que ha sido el propio material de la pieza el que ha resolidificado sobre ella durante el proceso.

Con polaridad negativa, tal y como muestra la Fig. 4.105, el aspecto superficial es más grosero que el obtenido con polaridad positiva y, además, presenta una composición más heterogénea, caracterizada por la presencia de carbono y cobre adherido en algunas zonas de la superficie. Sin embargo, debe señalarse que la superficie no está tan dañada, como *a priori* cabría esperar, tras haber analizado la superficie correspondiente al experimento en el que se obtuvo el menor valor de Ra con polaridad negativa. En este caso, tal y como se ha comentado anteriormente, la presencia de grandes grietas transgranulares es muy evidente a lo largo de toda la superficie. De este modo, se podría establecer que para la pareja de materiales seleccionados (Inconel® 600-Cu-C) y polaridad negativa, tiempos de impulsos bajos conducen a la aparición de grandes fisuras sobre la superficie, mientras que con mayores tiempos de impulso se produce una mayor fusión del material y la superficie resultante presenta cráteres de mayor tamaño y profundidad.

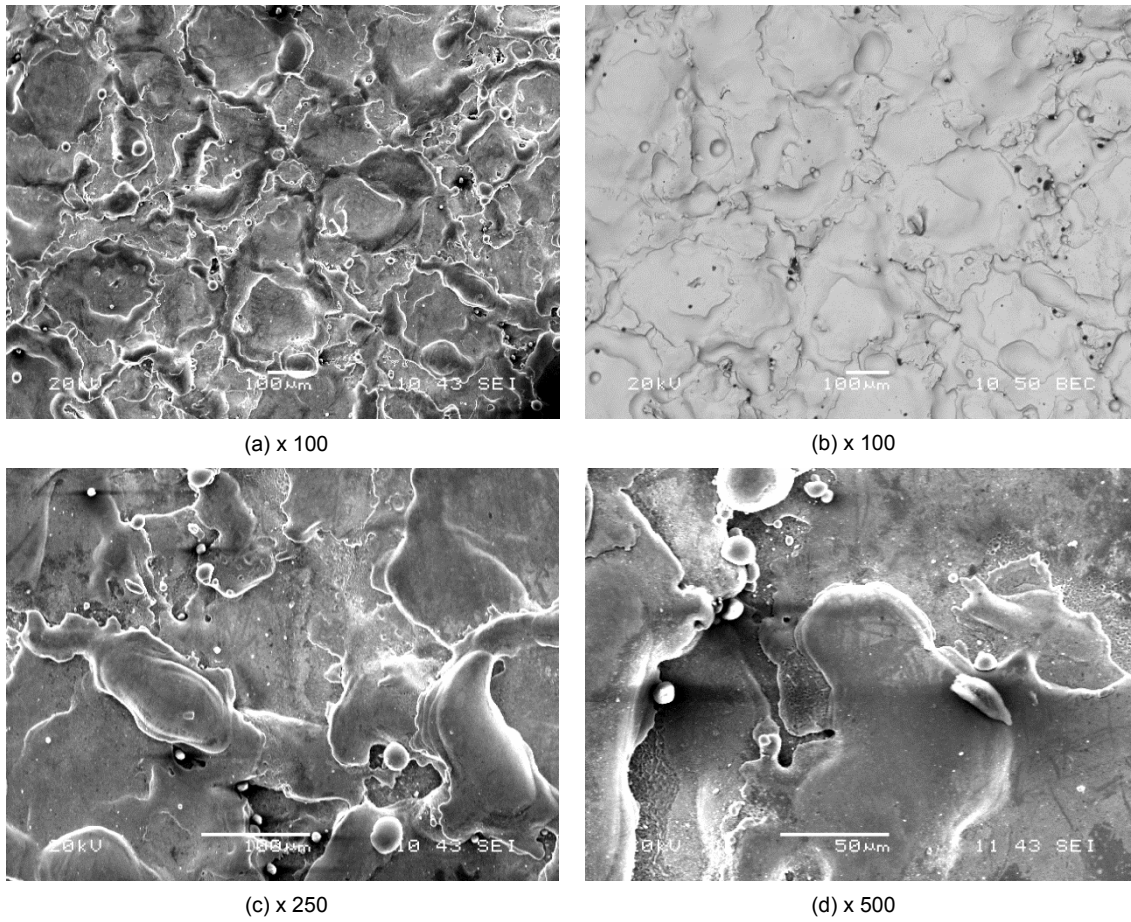
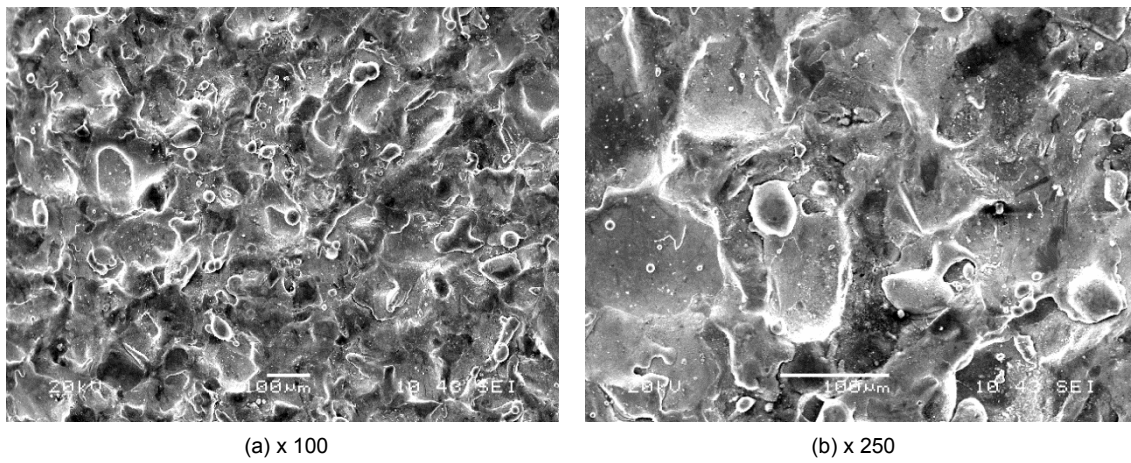


Fig. 4.104. Micrográficas electrónicas de barrido del experimento E16 con máximo valor de Ra y polaridad positiva a distintos aumentos (x nº aumentos)



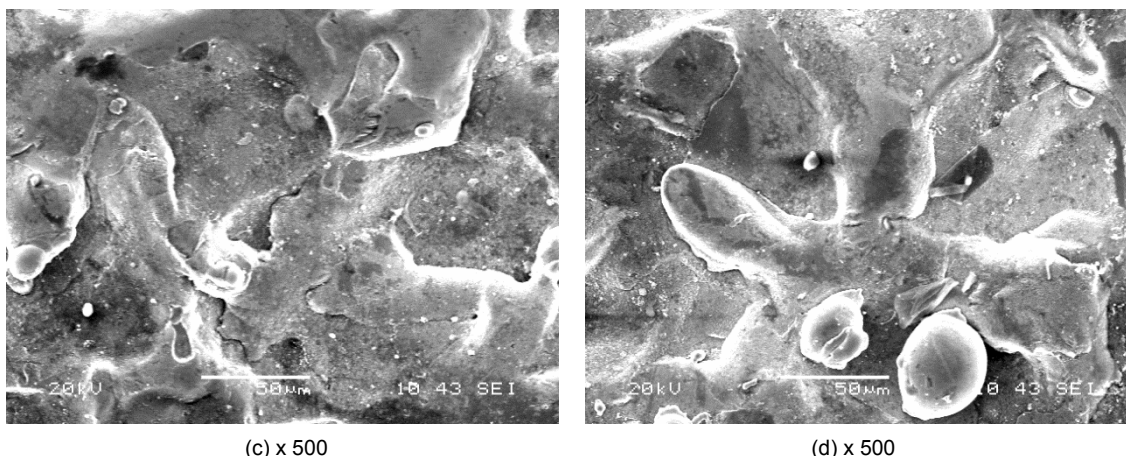


Fig. 4.105. Micrográficas electrónicas de barrido del experimento E48 con máximo valor de Ra y polaridad negativa a distintos aumentos (x nº aumentos)

Finalmente, la Tabla 4.43 y la Tabla 4.44 representan de manera simplificada los resultados obtenidos. Asimismo, la Tabla 4.43 recoge los valores máximos y mínimos obtenidos, mientras que la Tabla 4.44 muestra los factores más significativos para cada una de las variables cuando aumentan de su valor inferior a su valor superior dentro del rango definido para cada uno de ellos.

Variable	MRR (mm ³ /min)				EW (%)				Ra (µm)			
	+		-		+		-		+		-	
Nivel	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
	19,1347	0,0846	30,4894	0,2823	42,84	0,30	320,70	16,04	7,41	1,17	8,33	1,28

Tabla 4.43. Resultados máximos y mínimos obtenidos

Variable	MRR						EW						Ra					
	+			-			+			-			+			-		
Factor	l	t _i	η	l	t _i	η	l	t _i	η	l	t _i	η	l	t _i	η	l	t _i	η
	↑	↑↓	↑	↑	↑	↑	↓↑	↓		↓↑	↑	↑	↑	↑		↑	↑	

Tabla 4.44. Factores significativos y su tendencia

4.4. Recapitulación

En este capítulo se ha realizado un estudio del mecanizado mediante EDM de la aleación Inconel® 600 para el caso de tres materiales de electrodo (cobre,

grafito y cobre-grafito), y para polaridades positiva y negativa. Además, el estudio engloba tanto el estudio de la mecanizabilidad de la aleación Inconel® 600 como la rugosidad superficial obtenida en dicha aleación.

- Para el caso de mecanizado con electrodo de cobre, se obtuvieron los mayores valores de arranque de material ($22,4729 \text{ mm}^3/\text{min}$) con polaridad positiva), siendo éstos muy superiores a los obtenidos con polaridad negativa cuyo valor máximo de MRR fue próximo a $1,86 \text{ mm}^3/\text{min}$. En ambos casos, la intensidad resultó ser el factor con mayor influencia en la tasa de eliminación de material, de manera que al aumentar su valor, las descargas adquirieron mayor energía y, en consecuencia, arrancaron más material de la pieza. Asimismo, el tiempo de impulso fue el segundo factor más influyente en MRR para las dos polaridades pero, a diferencia de la intensidad, su influencia fue diferente según la polaridad seleccionada. Con polaridad positiva, el valor de MRR aumentó al disminuir el tiempo de impulso, mientras que con polaridad negativa al aumentar el tiempo de impulso, MRR aumentó hasta un máximo situado aproximadamente en $350 \mu\text{s}$, a partir del cual comenzó a disminuir.
- Respecto al desgaste volumétrico del electrodo, los menores desgastes se obtuvieron con polaridad positiva cuyo valor máximo fue de $3,80 \%$, frente al desgaste máximo de $62,82 \%$ obtenido con polaridad negativa. Además, cabe destacar que, con polaridad positiva, se encontraron casos de desgaste negativo, debidos a la deposición de partículas de carbono sobre el electrodo durante el proceso. Asimismo, con ambas polaridades los menores valores de EW se obtuvieron cuando tanto la intensidad como el tiempo de impulso alcanzaron valores próximos a los valores medios de sus respectivos rangos de variación ($4 \text{ A} - 6 \text{ A}$ y $200 \mu\text{s} - 350 \mu\text{s}$).
- En el caso de la rugosidad superficial, con polaridad positiva se consiguieron los mayores valores de R_a , lo que coincidió con la mayor tasa de eliminación de material obtenida al seleccionar dicha polaridad. Asimismo, el experimento E40 ($I = 8 \text{ A}$, $t_i = 200 \mu\text{s}$ y $\eta = 0,8$), llevado a cabo con polaridad positiva, obtuvo un R_a de $7,81 \mu\text{m}$, mientras que, con polaridad negativa, el

experimento E56 ($I = 8 \text{ A}$, $t_i = 200 \text{ } \mu\text{s}$ y $\eta = 0,9$) tuvo un Ra de $4,70 \text{ } \mu\text{m}$. No obstante, mediante microscopía electrónica de barrido se observó que estas superficies presentaban un aspecto menos dañado y con menor número de grietas que las obtenidas con polaridad negativa, las cuales presentaron un aspecto muy cuarteado, así como una composición heterogénea en la que se encontraron partículas de carbono adheridas a la superficie procedentes del fluido dieléctrico. Por otra parte, con ambas polaridades, la intensidad resultó ser el factor más significativo, de tal manera que al aumentar la energía suministrada por cada pulso eléctrico, se arrancó más material de la superficie de la pieza (mayor MRR) y los cráteres resultantes fueron, en consecuencia, de mayor tamaño y profundidad, lo que condujo a valores mayores de rugosidad superficial

- Para el caso de mecanizado con electrodo de grafito, no se pudieron mantener los valores seleccionados para el electrodo de cobre porque se observó que, con dicho electrodo, valores altos de rendimiento y de tiempo de impulso no conducían a un proceso estable. Por otra parte, atendiendo a la polaridad, se obtuvieron valores de MRR ligeramente superiores con polaridad negativa que con positiva, cuyas tasas de eliminación de material máxima y mínima fueron de $22,2854 \text{ mm}^3/\text{min}$ y $0,2452 \text{ mm}^3/\text{min}$ con polaridad negativa, respectivamente, mientras que con polaridad positiva, se obtuvieron valores de $15,3602 \text{ mm}^3/\text{min}$ y $0,1133 \text{ mm}^3/\text{min}$. Además, para ambas polaridades, la intensidad y el rendimiento fueron los factores más significativos, de tal manera que el aumento de sus valores condujo a un aumento de MRR.
- En cuanto a EW, con polaridad positiva, se alcanzaron valores de desgaste mucho más bajos que con polaridad negativa, llegando incluso a alcanzar en muchos casos valores negativos, debido a la gran cantidad de material depositado sobre la superficie del electrodo. Sin embargo, cabe destacarse que este efecto no es deseado porque el proceso de EDM ya no se realiza entre la pareja de materiales establecida inicialmente (Inconel® 600-grafito), con lo que éste puede verse alterado. Por otro lado, se obtuvo que la

intensidad fue el factor que más influyó en EW para ambas polaridades, aunque su efecto fue totalmente opuesto al variar la polaridad. Los valores mínimos de desgaste alcanzados fueron del -1312,96 %, para polaridad positiva, y del 0,31 %, para negativa.

- Por otra parte, con respecto a la rugosidad superficial, se obtuvieron valores de Ra superiores con polaridad negativa que con positiva. Además, con ambas polaridades, la intensidad y el tiempo de impulso fueron los dos factores que más influyeron en Ra e influyeron de tal manera que al aumentar su valor, el acabado superficial claramente empeoró. El experimento E1 (2 A y 5 μ s), para polaridad positiva, y el E5 (2 A y 50 μ s), para polaridad negativa, con valores de Ra de 0,94 μ m y 1,38 μ m, respectivamente, fueron los que mejor acabado superficial presentaron. En ambos casos, el valor tanto de intensidad como de tiempo de impulso fueron bajos dentro del rango seleccionado para cada una de las polaridades. Sin embargo, el E48 (8 A y 75 μ s), para polaridad positiva, y el E32 (8 A y 100 μ s), para polaridad negativa, se realizaron bajo condiciones de alta de energía y el valor de Ra aumentó hasta 5,85 μ m y 8,58 μ m, respectivamente.
- Finalmente, para el caso de mecanizado de Inconel® 600 con electrodo de grafito con cobre infiltrado, los valores más altos de MRR se correspondieron con los obtenidos con polaridad negativa, con la cual se obtuvo una tasa máxima de material de 30,4894 mm³/min mientras que con polaridad positiva el MRR máximo fue de 19,1347 mm³/min. En ambos casos, los valores de intensidad (8 A) y de rendimiento (0,6) fueron los valores máximos considerados en este caso de estudio. Estos resultados siguieron la misma tendencia que los obtenidos en la EDM de Inconel® 600 con electrodo de grafito. Sin embargo, fueron, en general, superiores debido a la adición de cobre. Esta diferencia se hizo más evidente con valores altos de intensidad.
- Respecto al desgaste volumétrico del electrodo, con polaridad positiva, el máximo valor alcanzado de desgaste en el electrodo fue de 42,84 %, mientras que con polaridad negativa se alcanzó un valor de desgaste

máximo de 320,70 %. Por tanto, se observó que los valores obtenidos con polaridad positiva fueron muy inferiores a los obtenidos con negativa. Esta tendencia también fue similar a la obtenida con el electrodo de grafito.

- Respecto a la rugosidad superficial, los mayores valores de Ra se obtuvieron cuando se empleó polaridad negativa. Asimismo, para ambas polaridades, la intensidad y el tiempo de impulso fueron los dos factores que más influyeron en Ra, provocando un empeoramiento de la superficie al aumentar su valor. Los experimentos E33 (2 A y 25 μ s), para polaridad positiva, y E21 (2 A y 50 μ s), para polaridad negativa, con valores de Ra de 1,17 μ m y 1,28 μ m, respectivamente, fueron aquellos experimentos con los que se obtuvo el mejor acabado superficial. En ambos casos, el valor de la intensidad fue mínimo y el del tiempo de impulso fue bajo dentro del rango seleccionado para cada una de las polaridades. Además, a nivel microscópico, las superficies electroerosionadas con polaridad positiva presentaron un aspecto plano y homogéneo, aunque con pequeñas fisuras superficiales que rodeaban los granos. Sin embargo, con polaridad negativa, la superficie resultó mucho más dañada y aparecieron grietas más pronunciadas que atravesaban los granos. Composicionalmente, se observaron zonas con contenido de carbono y cobre procedente del propio electrodo.

De manera resumida, se muestran la Tabla 4.45 y la Tabla 4.46 en las que quedan representados de manera simplificada y esquemática los resultados obtenidos. Asimismo, la Tabla 4.45 recoge los valores máximos y mínimos obtenidos con cada uno de los electrodos y polaridades seleccionadas en el presente estudio, mientras que la Tabla 4.46 muestra los factores más significativos para cada una de las variables cuando aumentan de su valor inferior a su valor superior dentro del rango definido para cada uno de ellos.

Variable	MRR (mm ³ /min)				EW (%)				Ra (μm)			
Polaridad	+		-		+		-		+		-	
Nivel	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.
Cu	22,4729	0,0599	1,8621	0,0128	3,80	-0,19	62,82	7,40	7,81	1,11	4,70	1,33
C	15,3602	0,1133	22,2854	0,2452	510,24	-1312,96	379,31	0,31	5,85	0,94	8,58	1,38
Cu-C	19,1347	0,0846	30,4894	0,2823	42,84	0,30	320,70	16,04	7,41	1,17	8,33	1,28

Tabla 4.45. Resultados máximos y mínimos obtenidos

Variable	MRR						EW						Ra					
Polaridad	+			-			+			-			+			-		
Factor	l	t _i	η	l	t _i	η	l	t _i	η	l	t _i	η	l	t _i	η	l	t _i	η
Cu	↑	↓	↑	↑	↑↓	↑	↓↑	↓↑		↓↑	↓↑		↑			↑	↑↓	
C	↑	↑↓	↑	↑	↑	↑	↑		↑↓	↓↑		↑	↑	↑	↑	↑	↑	
Cu-C	↑	↑↓	↑	↑	↑	↑	↓↑	↓		↓↑	↑	↑	↑	↑		↑	↑	

Tabla 4.46. Factores significativos y su tendencia

CAPÍTULO 5

Análisis del mecanizado por EDM del diboruro de titanio (TiB₂)

5. ANÁLISIS DEL MECANIZADO POR EDM DEL DIBORURO DE TITANIO (TiB₂)

En el presente capítulo, se aborda el estudio del mecanizado mediante electroerosión por penetración (EDM) del diboruro de titanio (TiB₂), empleando electrodos de cobre y polaridad positiva. La selección de esta cerámica de difícil mecanizabilidad es debida a que, recientemente, ha atraído el interés de la industria, debido a sus propiedades de alta dureza y elevada resistencia al desgaste, así como a su buena conductividad eléctrica y térmica [164]. Sus principales aplicaciones incluyen herramientas de corte [166], piezas resistentes al desgaste y material de blindaje [167], entre otras. Además, su alta conductividad eléctrica conduce a su uso como material de cátodo para la producción de aluminio [165].

El interés del estudio de este proceso de fabricación no convencional aplicado al mecanizado del TiB₂ se debe principalmente a dos razones: en primer lugar y desde el punto de vista tecnológico, porque en la actualidad el mecanizado por EDM es una tecnología que se aplica a este tipo de cerámicas, debido a la dificultad que conlleva su mecanizado por métodos convencionales. En segundo lugar, debido a la inexistencia de trabajos y estudios que abordan el mecanizado por EDM de la presente cerámica.

El estudio se ha realizado de manera similar al realizado para la aleación Inconel® 600. Para ello, se han analizado la tasa de eliminación de material (MRR), el desgaste volumétrico del electrodo (EW) y la rugosidad superficial (SR). Asimismo, todos estos parámetros han sido estudiados en función de: la intensidad suministrada por el generador (I), el tiempo de impulso (t_i) y el rendimiento de ciclo (η). Además, se han utilizado técnicas de Diseño de Experimentos (DOE) combinadas con técnicas de regresión lineal, con las cuales se han obtenido una serie de modelos matemáticos que permiten seleccionar las condiciones óptimas de mecanizado.

Para determinar los valores de los factores de diseño que se analizan en este apartado y que se recogen en la Tabla 5.1, se han realizado diversos ensayos previos sobre el material, con objeto de determinar las condiciones que

conducen a un proceso estable. Asimismo, también se han tenido en cuenta las experiencias previas de Puertas y Luis relativas a la EDM de otras cerámicas conductoras como el carburo de silicio [77], [78], a pesar de no ser coincidentes con el presente caso de estudio. En ambos casos, se observó que para el mecanizado de este tipo de materiales cerámicos, deben seleccionarse tiempos de impulso y rendimientos bajos. Por otra parte, se ha constatado experimentalmente que es preferible el uso de polaridad positiva para el electrodo, ya que se consigue un proceso más estable.

A continuación, en la Tabla 5.1, se muestran los valores de los parámetros de diseño y los niveles seleccionados. En el caso de la intensidad, tal y como se ha indicado en el capítulo 3 dedicado a la planificación de la experimentación, los valores están limitados por la sección del electrodo.

Parámetro de diseño	Unidad	Niveles y valores		
		Polaridad positiva		
		1	2	3
Intensidad	A	2	4	6
Tiempo de impulso	μs	5	25	45
Rendimiento		0,4	0,5	0,6
Tensión	V	200		
Presión del dieléctrico	kPa	30		

Tabla 5.1. Parámetros de diseño y niveles seleccionados para el caso de la EDM del TiB₂ con electrodo de cobre y polaridad positiva

En el presente caso de estudio, se ha seleccionado un diseño factorial 2³ con cuatro puntos centrales, siendo 3 el número de factores de diseño, cada uno de ellos con dos niveles de variación, dando un total de 12 experimentos. Asimismo, para el modelo de segundo orden, se ha empleado un diseño central compuesto al que se han añadido seis puntos estrella (dos puntos estrella por cada factor), dando lugar a un total de 18 experimentos. La matriz de diseño, así como los valores medios de los resultados experimentales obtenidos, quedan recogidos en la Tabla 5.2.

	E	Polaridad positiva (+)									
		I (A)	t _i (μs)	η (%)	MRR (mm ³ /min)	EW (%)	Ra (μm)	Rq (μm)	Rt (μm)	Sm (μm)	Pc (1/cm)
2 ^k	1	2	5	0,4	0,1851	16,94	1,11	1,38	8,39	52,60	190,60
	2	6	5	0,4	2,0216	5,38	2,11	2,65	17,13	67,40	149,60
	3	2	45	0,4	0,1607	1,50	1,70	2,14	14,05	64,00	157,00
	4	6	45	0,4	1,8639	1,10	3,68	4,65	28,49	91,00	110,80
	5	2	5	0,6	0,2824	15,82	1,16	1,45	9,43	55,80	179,80
	6	6	5	0,6	3,0400	4,27	2,44	3,08	20,26	70,60	140,80
	7	2	45	0,6	0,1805	2,88	1,57	2,00	13,12	58,40	171,40
	8	6	45	0,6	2,6139	0,96	3,96	4,99	30,52	94,40	107,20
P.E.	9	2	25	0,5	0,1798	3,80	1,41	1,77	11,39	56,60	178,40
	10	6	25	0,5	2,7385	1,71	3,41	4,26	24,33	81,00	124,60
	11	4	5	0,5	1,9467	6,31	2,14	2,70	17,86	66,60	151,00
	12	4	45	0,5	1,7438	0,95	3,39	4,24	24,32	83,60	120,00
	13	4	25	0,4	1,5727	1,54	2,80	3,51	21,59	71,80	140,60
	14	4	25	0,6	2,4747	1,30	3,21	4,06	26,12	80,20	125,00
P.C.	15	4	25	0,5	2,0190	1,71	3,29	4,15	27,33	85,60	117,80
	16	4	25	0,5	1,9932	1,80	3,16	3,95	25,00	78,00	129,20
	17	4	25	0,5	1,9770	1,86	3,09	3,94	23,83	83,60	119,80
	18	4	25	0,5	1,9463	2,31	2,90	3,67	22,19	74,40	135,40

Tabla 5.2. Resultados experimentales para la EDM del TiB₂ con electrodo de cobre y polaridad positiva

A continuación, y a partir del DOE planteado, se analizan los resultados obtenidos para cada una de las variables de respuesta, obteniendo los modelos que caracterizan el comportamiento de los distintos parámetros. Para decidir qué modelo es más adecuado para su análisis, se emplea un test de falta de ajuste además de los valores obtenidos para el coeficiente de determinación múltiple (R^2) y el coeficiente de determinación múltiple ajustado (R^2_{adj}). Este análisis se realiza para cada una de las variables previo al análisis de los resultados. Para el caso concreto de estudio, todas las variables han sido analizadas siguiendo modelos de segundo orden.

5.1. Análisis y discusión de resultados para la tasa de eliminación de material

Como se puede observar en la Tabla 5.3, que representa la tabla ANOVA para MRR, seis efectos tienen P-valores inferiores a 0,05. Estos efectos, ordenados por orden de importancia, son: la intensidad, el efecto cuadrático de la intensidad, el rendimiento, el efecto de interacción entre el rendimiento y la intensidad, el tiempo de impulso y, en último lugar, el efecto cuadrático del tiempo de impulso.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	12,75	1	12,75	819,39	0,0000
B: Tiempo de impulso	0,08	1	0,08	5,36	0,0431
C: Rendimiento	0,78	1	0,78	49,96	0,0000
AA	0,92	1	0,92	59,22	0,0000
AB	0,03	1	0,03	1,68	0,2238
AC	0,34	1	0,34	21,91	0,0009
BB	0,08	1	0,08	5,04	0,0486
Error total	0,16	10	0,02		
Total (corr.)	15,98	17			

Tabla 5.3. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - MRR

Estos resultados se han representado gráficamente en la Fig. 5.1 y en la Fig. 5.2, que muestran el diagrama de Pareto y la gráfica de efectos principales, respectivamente. Como se puede observar en ambas, el valor de MRR aumenta de manera importante al aumentar la intensidad debido al incremento de calor y energía que funde y vaporiza el material de la pieza. Por ejemplo, en el presente caso de estudio, con una intensidad de 2 A se obtuvo una tasa mínima de eliminación de material de 0,1607 mm³/min. Al aumentar la intensidad hasta 6 A se alcanzó una tasa máxima de eliminación de material de 3,04 mm³/min.

El segundo factor más significativo es el rendimiento y, de manera similar al efecto de la intensidad, cuanto mayor es su valor, mayor es la tasa de eliminación de material. Así, altos valores de corriente conducen a grandes valores de *gap* entre la pieza y el electrodo que, combinados con una mayor frecuencia de descarga, produce un mayor número de descargas efectivas por unidad de tiempo. Asimismo, la mayor tasa de eliminación de material obtenida se produjo con el valor máximo de rendimiento dentro del rango seleccionado (0,6).

Respecto al tiempo de impulso, tal y como se observa en la Fig. 5.2, cuanto mayor es su valor, mayor es la tasa de eliminación de material. Esta tendencia se mantiene hasta un valor del tiempo de impulso de 20 μs, aproximadamente, con el cual MRR alcanza su máximo. A partir de dicho valor, la tasa de eliminación disminuye al incrementar el tiempo de impulso.

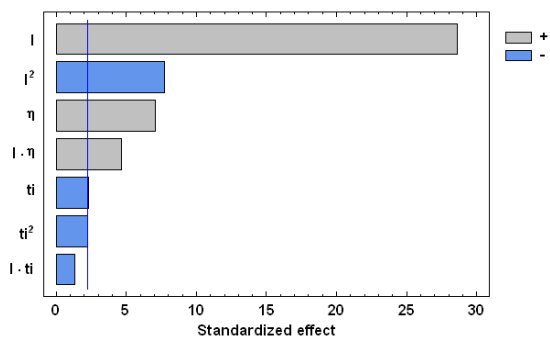


Fig. 5.1. Diagrama de Pareto para MRR con polaridad positiva

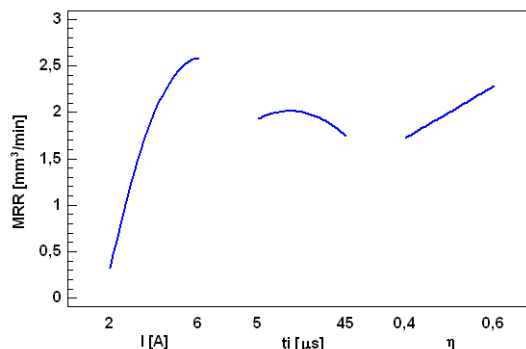


Fig. 5.2. Efectos principales para MRR con polaridad positiva

La Fig. 5.3 muestra el efecto de interacción que cada pareja de factores tiene sobre la tasa de eliminación de material. Como puede observarse, la pareja de factores intensidad-rendimiento es la que mayor interacción presenta en MRR.

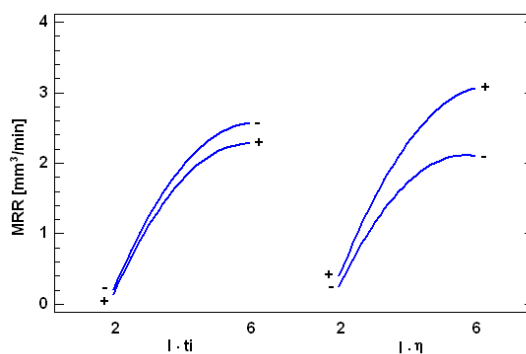


Fig. 5.3. Efectos de interacción para MRR con polaridad positiva

Por otro lado, el coeficiente de determinación múltiple R^2 tiene un valor de 99,03 % mientras que el valor de R^2_{adj} es 98,35 %. La ecuación del modelo simplificado se muestra en la Eq. (52):

$$MRR = -2,0462 + 1,1744 * I + 0,0210 * t_i - 1,3408 * \eta - 0,1363 * I^2 - 0,0014 * I * t_i + 1,0321 * I * \eta - 0,0004 * t_i^2 \quad (52)$$

La Fig. 5.4 y la Fig. 5.5 representan la superficie de respuesta de MRR en función de la intensidad y el tiempo de impulso, así como en función de la intensidad y el rendimiento, respectivamente. Como puede observarse en

ambas, hay una tendencia de subida de la variable MRR al aumentar la intensidad, para cualquier valor del tiempo de impulso y del rendimiento. No obstante, esta subida es más pronunciada con valores altos de rendimiento, tal y como se aprecia en la Fig. 5.5, debido a la existencia de un efecto de interacción entre la intensidad y el rendimiento.

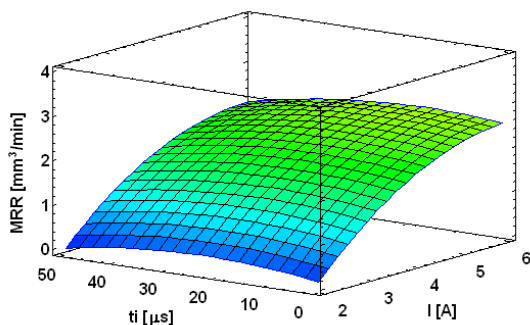


Fig. 5.4. Superficie de respuesta de MRR vs. I y ti con polaridad positiva

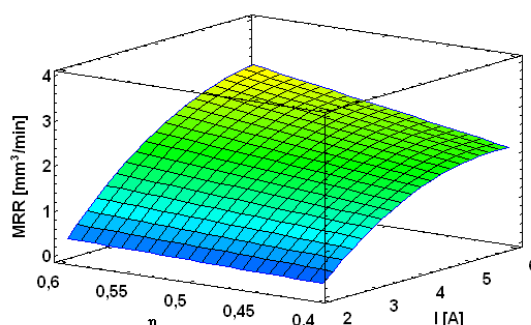


Fig. 5.5. Superficie de respuesta de MRR vs. I y η con polaridad positiva

5.2. Análisis y discusión de resultados para el desgaste volumétrico del electrodo

A continuación, se analiza la variable EW de manera homóloga al análisis de MRR. Como puede observarse en la tabla ANOVA representada en la Tabla 5.4, cinco efectos influyen en el desgaste volumétrico del electrodo para un nivel de confianza del 95 %. Estos efectos, ordenados de mayor a menor importancia, son: el tiempo de impulso, la intensidad, el efecto de interacción entre el tiempo de impulso y la intensidad y, en último lugar, los efectos cuadráticos de ambos. Estos resultados quedan representados gráficamente en la Fig. 5.6 y la Fig. 5.7.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	75,74	1	75,74	53,67	0,0000
B: Tiempo de impulso	170,82	1	170,82	121,05	0,0000
AA	9,63	1	9,63	6,83	0,0241
AB	54,03	1	54,03	38,29	0,0001
BB	21,57	1	21,57	15,28	0,0024
BC	1,51	1	1,51	1,07	0,3239
Error total	15,52	11	1,41		
Total (corr.)	385,07	17			

Tabla 5.4. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - EW

Como puede apreciarse en la Fig. 5.7, el valor de EW disminuye al aumentar el valor del tiempo de impulso. En general, una mayor duración del tiempo de impulso tiende a aumentar la probabilidad de la deposición de carbono sobre la superficie del electrodo. Esta nueva capa formada actúa como capa resistente al desgaste y reduce, por tanto, el desgaste del electrodo. Respecto a la intensidad, al aumentar su valor, se producen mayores arranques de material, lo que suele conducir a EW más pequeños. De acuerdo con los resultados obtenidos, el mínimo valor de EW fue de 0,95 % y se obtuvo en el experimento E12, cuyo valor de intensidad fue de 4 A y de tiempo de impulso de 45 μ s. Asimismo, el E1, con un valor de 16,94 %, fue el experimento con máximo EW, cuyos valores de intensidad y tiempo de impulso fueron los mínimos dentro del rango seleccionado para el presente caso de estudio (2 A y 5 μ s).

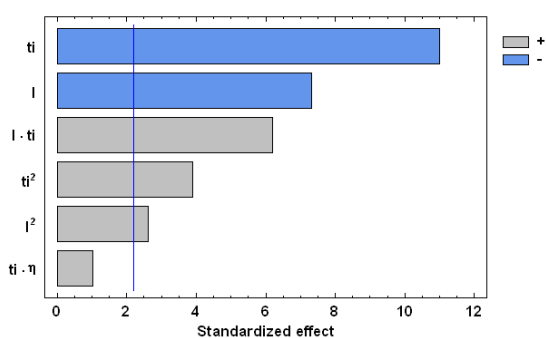


Fig. 5.6. Diagrama de Pareto para EW con polaridad positiva

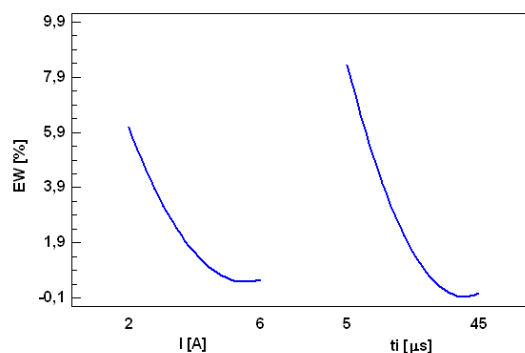


Fig. 5.7. Efectos principales para EW con polaridad positiva

Por otro lado, como puede observarse en la Fig. 5.8, la pareja intensidad-tiempo de impulso es la que mayor interacción presenta.

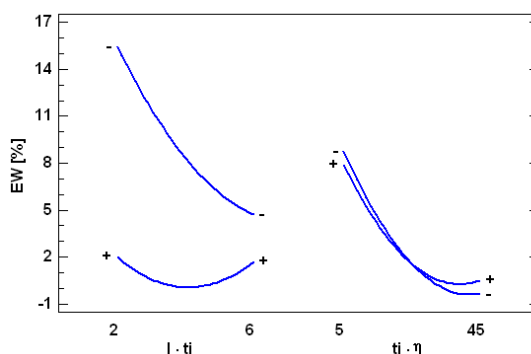


Fig. 5.8. Efectos de interacción para EW con polaridad positiva

Asimismo, para el modelo ajustado de segundo orden el valor de R² es de 95,97 % mientras que el valor de R²_{adj} es de 93,77 %. La ecuación simplificada del modelo se muestra en la Eq. (53):

$$EW = 32,6136 - 6,5257 * I - 0,9047 * t_i - 5,4219 * \eta + 0,4407 * I^2 + 0,0650 * I * t_i + 0,0066 * t_i^2 + 0,2169 * t_i * \eta \quad (53)$$

La Fig. 5.9 muestra la superficie de respuesta de EW en función de los factores intensidad y tiempo de impulso. En este caso, se observa que los mayores valores de EW se obtienen cuando, tanto la intensidad como el tiempo de impulso, tienen valores muy bajos. Asimismo, para un valor dado de la intensidad, EW tiende a aumentar al disminuir el tiempo de impulso. Esta tendencia es más pronunciada para valores bajos de intensidad.

Por otra parte, la Fig. 5.10 representa la superficie de respuesta de EW en función del tiempo de impulso y del rendimiento. Tal y como se observa, para un valor determinado del rendimiento, hay una tendencia de subida de la variable EW al disminuir el tiempo de impulso. Al disminuir el tiempo de impulso, aumenta la frecuencia de chispas que hace aumentar el EW.

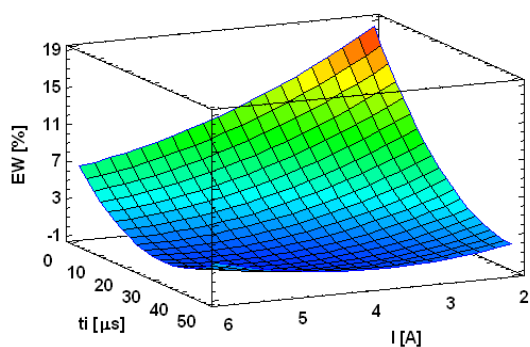


Fig. 5.9. Superficie de respuesta de EW vs. I y t_i con polaridad positiva

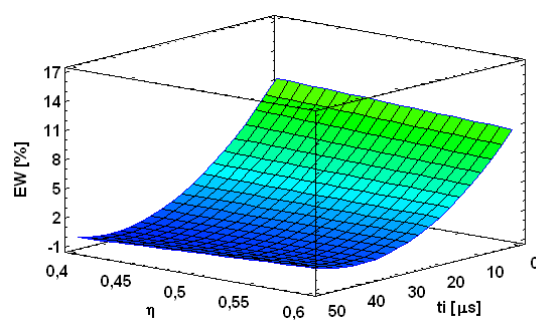


Fig. 5.10. Superficie de respuesta de EW vs. t_i y η con polaridad positiva

5.3. Análisis y discusión de resultados para los parámetros de rugosidad superficial

A continuación, se analizan los resultados obtenidos de los parámetros de rugosidad superficial obtenidos mediante el proceso de EDM con electrodo de cobre y polaridad positiva. De manera similar al estudio realizado en el capítulo 4 del mecanizado del Inconel® 600, en primer lugar, se analizan los parámetros Ra, Rq y Rt y, posteriormente, Sm y Pc.

5.3.1. Análisis de los parámetros de amplitud

Como en casos anteriores, el estudio de los parámetros de amplitud Ra, Rq y Rt se centra en el análisis de Ra, dado que los tres parámetros siguen la misma tendencia. Tal y como se observa en la Tabla 5.5, que muestra la tabla ANOVA para polaridad positiva, cinco de los efectos tienen P-valores inferiores a 0,05. Estos efectos, dispuestos por orden de importancia, son: la intensidad, el tiempo de impulso, el efecto cuadrático de la intensidad, el efecto de interacción entre la intensidad y el tiempo de impulso y, finalmente, el efecto cuadrático del tiempo de impulso.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	7,48	1	7,48	355,70	0,0000
B: Tiempo de impulso	2,85	1	2,85	135,56	0,0000
C: Rendimiento	0,09	1	0,09	4,20	0,0676
AA	1,13	1	1,13	53,94	0,0000
AB	0,55	1	0,55	25,96	0,0005
AC	0,06	1	0,06	2,83	0,1235
BB	0,19	1	0,19	9,21	0,0126
Error total	0,21	10	0,02		
Total (corr.)	13,88	17			

Tabla 5.5. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Ra

El diagrama de Pareto y la gráfica de efectos principales de los parámetros de amplitud, se muestran en las Fig. 5.11-Fig. 5.16. Como puede observarse, la intensidad es el factor que más influye en los tres parámetros, resultando un empeoramiento de la superficie al aumentar su valor. Esta tendencia se mantiene hasta un valor de 5 A, a partir del cual, el valor de los parámetros de amplitud disminuye. El experimento E1 (2 A y 5 μ s), con el que mejor acabado

superficial se obtuvo, dio como resultado unos valores de Ra, Rq y Rt de 1,11 μm, 1,38 μm y 8,39 μm, respectivamente. En dicho caso, tanto el valor de la intensidad como el del tiempo de impulso, fue el mínimo dentro del rango seleccionado. Asimismo, al aumentar ambos parámetros, la rugosidad superficial empeora claramente, tal y como se observa en el experimento E8 (6 A y 45 μs), con el que se obtuvo el peor acabado superficial y cuyos valores de Ra, Rq y Rt fueron: 3,96 μm, 4,99 μm y 30,52 μm, respectivamente. En este caso, tanto el valor de la intensidad como el del tiempo de impulso, fueron los más altos dentro del rango seleccionado en el presente caso de estudio. Como se viene explicando a lo largo del análisis de resultados, al aumentar ambos factores se produce un aumento en la energía de las chispas que inciden sobre la superficie de la pieza, así como un aumento en la duración de las descargas, lo que produce cavidades de mayor tamaño y profundidad (mayor valor de Ra, Rq y Rt). Estos resultados de rugosidad superficial son congruentes con los obtenidos de MRR, siendo 0,1851 mm³/min y 2,6139 mm³/min, las tasas obtenidas de los experimentos E1 y E8, respectivamente.

Por otro lado cabe destacar que, aunque el factor rendimiento no se considera significativo en las variables Ra, Rq y Rt, al aumentar su valor, los valores de estas tres variables también aumentan ligeramente.

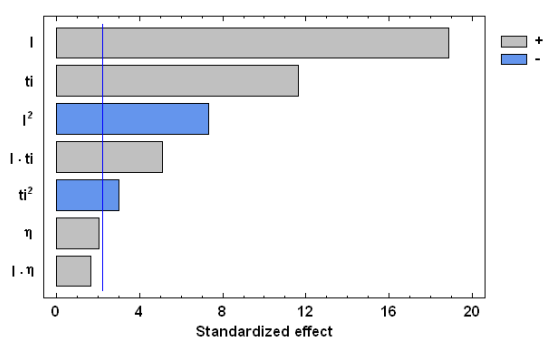


Fig. 5.11. Diagrama de Pareto para Ra con polaridad positiva

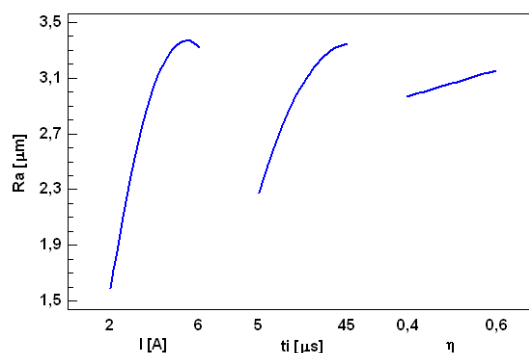


Fig. 5.12. Efectos principales para Ra con polaridad positiva

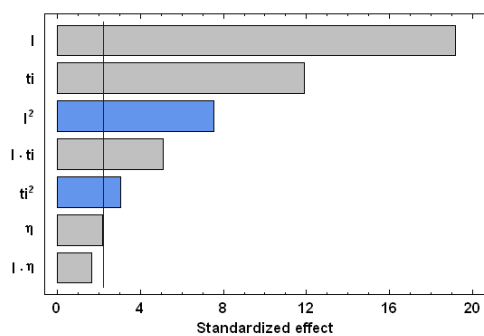


Fig. 5.13. Diagrama de Pareto para Rq con polaridad positiva

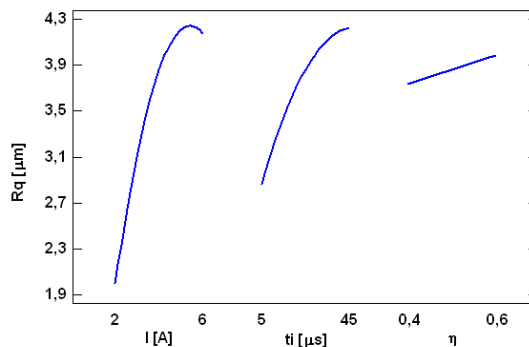


Fig. 5.14. Efectos principales para Rq con polaridad positiva

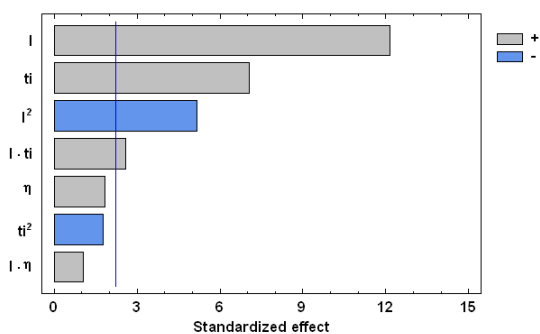


Fig. 5.15. Diagrama de Pareto para Rt con polaridad positiva

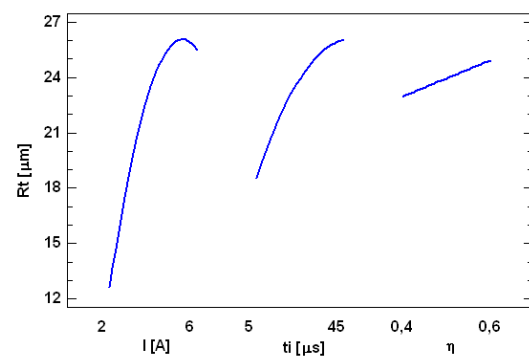


Fig. 5.16. Efectos principales para Rt con polaridad positiva

Las Fig. 5.17-Fig. 5.19 representan los efectos de interacción para los parámetros de amplitud.

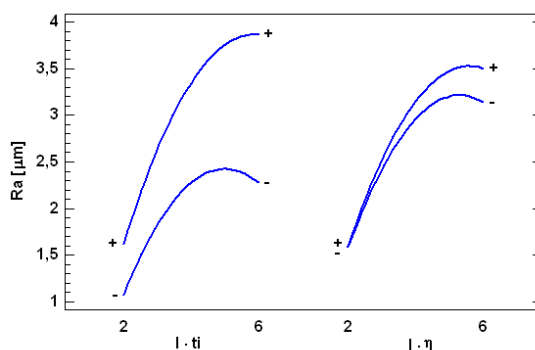


Fig. 5.17. Efectos de interacción para Ra con polaridad positiva

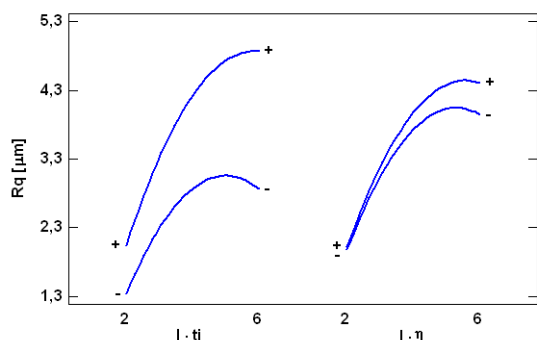


Fig. 5.18. Efectos de interacción para Rq con polaridad positiva

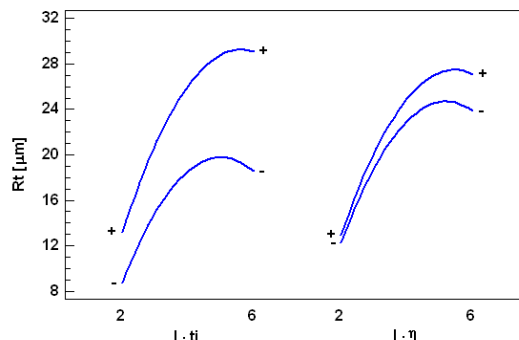


Fig. 5.19. Efectos de interacción para Rt con polaridad positiva

Para la variable Ra, se obtiene un valor de R^2 de 98,48 %. Asimismo, R^2_{adj} tiene un valor de 97,42 %. La ecuación del modelo ajustado de Ra se muestra en la Eq. (54):

$$Ra = -1,1025 + 1,2636 * I + 0,0318 * t_i - 0,7850 * \eta - 0,1513 * I^2 + 0,0065 * I * t_i + 0,4313 * I * \eta - 0,0006 * t_i^2 \quad (54)$$

Asimismo, para Rq, el valor de R^2 es de 98,54 % mientras que R^2_{adj} tiene un valor de 97,51 %. Para Rt, el valor de R^2 es de 96,37 % y el de R^2_{adj} es de 93,83 %. Las ecuaciones de los modelos ajustados se muestran en la Eq. (55), para Rq, y en la Eq. (56), para Rt.

$$Rq = -1,4920 + 1,6153 * I + 0,0406 * t_i - 0,8500 * \eta - 0,1921 * I^2 + 0,0081 * I * t_i + 0,5250 * I * \eta - 0,0008 * t_i^2 \quad (55)$$

$$Rt = -10,5655 + 10,4814 * I + 0,2427 * t_i - 2,8250 * \eta - 1,2251 * I^2 + 0,0383 * I * t_i + 3,1563 * I * \eta - 0,0042 * t_i^2 \quad (56)$$

Por otra parte, la Fig. 5.20, la Fig. 5.22 y la Fig. 5.24 representan las superficies de respuesta de los parámetros de amplitud en función de la intensidad y el tiempo de impulso. Como puede observarse, los valores más altos de los parámetros de amplitud se dan cuando, tanto el tiempo de impulso como la intensidad alcanzan sus valores máximos dentro del rango seleccionado.

La Fig. 5.21, la Fig. 5.23 y la Fig. 5.25 representan las superficies de respuesta en función de la intensidad y el rendimiento. En ellas, se observa una tendencia de subida de las variables Ra, Rq y Rt al aumentar la intensidad, sea cual sea el valor del rendimiento. Esta subida es ligeramente mayor para valores altos de rendimiento.

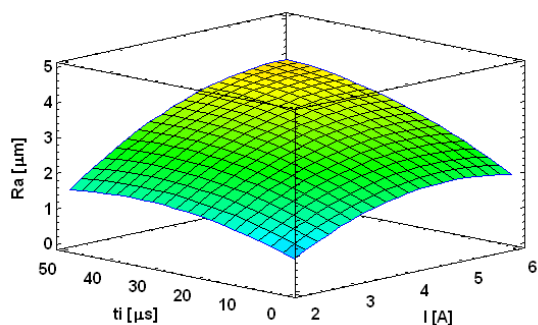


Fig. 5.20. Superficie de respuesta de Ra vs. I y t_i con polaridad positiva

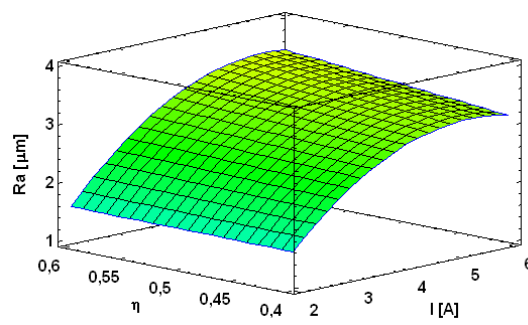


Fig. 5.21. Superficie de respuesta de Ra vs. I y η con polaridad positiva

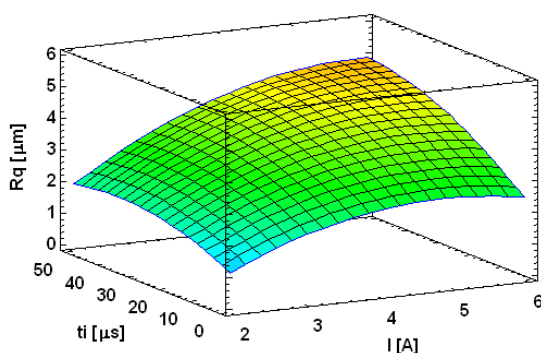


Fig. 5.22. Superficie de respuesta de Rq vs. I y t_i con polaridad positiva

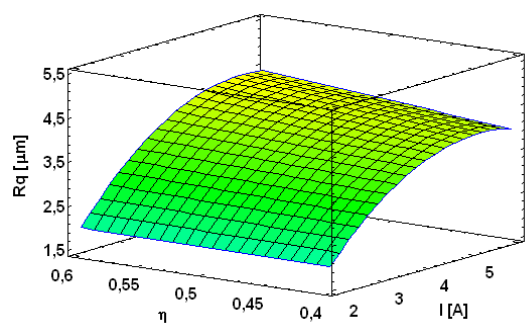


Fig. 5.23. Superficie de respuesta de Rq vs. I y η con polaridad positiva

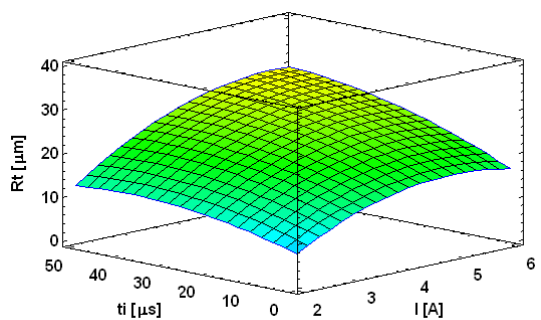


Fig. 5.24. Superficie de respuesta de Rt vs. I y t_i con polaridad positiva

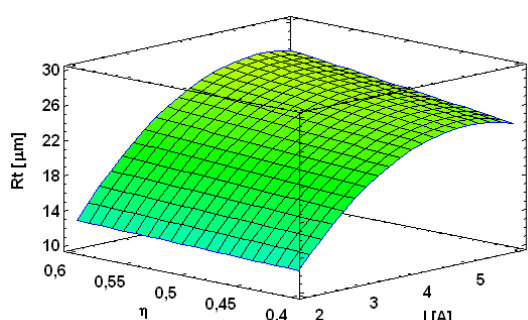


Fig. 5.25. Superficie de respuesta de Rt vs. I y η con polaridad positiva

5.3.2. Análisis de los parámetros de espaciamiento

La Tabla 5.6 y la Tabla 5.7 recogen las tablas ANOVA de Sm y Pc, respectivamente, obtenidas a partir de los resultados experimentales. Para el caso de Sm, cuatro de los efectos influyen en dicha variable, siendo éstos: la intensidad, el tiempo de impulso, el efecto cuadrático de la intensidad y el efecto de interacción entre la intensidad y el tiempo de impulso. Asimismo, en el caso de Pc, tres son los efectos estadísticamente significativos. Estos efectos son: la intensidad, el tiempo de impulso y el efecto cuadrático de la intensidad.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	1368,90	1	1368,90	91,22	0,0000
B: Tiempo de impulso	614,66	1	614,66	40,96	0,0000
C: Rendimiento	15,88	1	15,88	1,06	0,3240
AA	343,79	1	343,79	22,91	0,0004
AB	139,45	1	139,45	9,29	0,0101
Error total	180,07	12	15,01		
Total (corr.)	2662,74	17			

Tabla 5.6. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Sm

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	5963,36	1	5963,36	123,59	0,0000
B: Tiempo de impulso	2114,12	1	2114,12	43,82	0,0000
C: Rendimiento	59,54	1	59,54	1,23	0,2903
AA	1991,86	1	1991,86	41,28	0,0000
AB	115,52	1	115,52	2,39	0,1501
BC	115,52	1	115,52	2,39	0,1501
Error total	530,76	11	48,25		
Total (corr.)	10890,70	17			

Tabla 5.7. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad positiva - Pc

Los resultados anteriormente obtenidos en las tablas ANOVA se muestran gráficamente en el diagrama de Pareto y en las gráficas de efectos principales que están representadas en las Fig. 5.26-Fig. 5.29. Como se puede observar, la intensidad y el tiempo de impulso son los dos factores que más influyen en los parámetros de espaciamiento. Además, ambos factores siguen tendencias totalmente opuestas, de tal manera que al aumentar la intensidad y el tiempo de impulso, aumenta Sm, pero el valor de Pc disminuye. Estas tendencias son similares a las obtenidas en el análisis del Inconel® 600 con los distintos

materiales de electrodo seleccionados y, como se comentó entonces, se debe a que el aumento en la energía de descarga produce un mayor arranque de material, dando lugar a cráteres de mayor diámetro y a una mayor distancia de separación. Así, el experimento E1 con el que se obtuvo el menor valor de Ra (1,11 μm) y uno de los menores valores de arranque de material (0,1851 mm^3/min), el valor de Sm fue de 52,60 μm , mientras que el de Pc fue de 190,60 $1/\text{cm}$. En este caso, tanto el valor de la intensidad (2 A) como el del tiempo de impulso (5 μs), fueron los valores mínimos dentro del rango seleccionado. Al aumentar el valor de ambos factores, Sm aumenta significativamente mientras que Pc disminuye, tal y como se observa en E8 (6 A y 45 μs), con el que se obtuvo el mayor valor de Ra (3,96 μm) y una de las mayores tasas de eliminación de material (2,6139 mm^3/min). En este caso, el valor de Sm aumentó hasta 94,40 μm y el valor de Pc disminuyó hasta 107,20 $1/\text{cm}$.

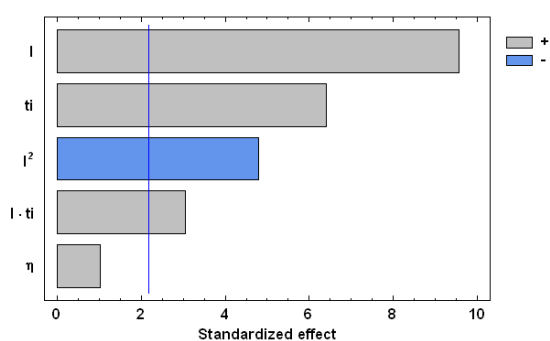


Fig. 5.26. Diagrama de Pareto para Sm con polaridad positiva

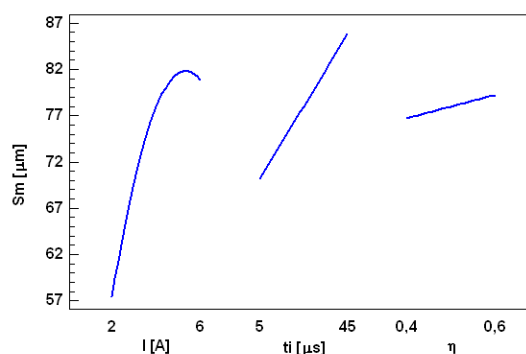


Fig. 5.27. Efectos principales para Sm con polaridad positiva

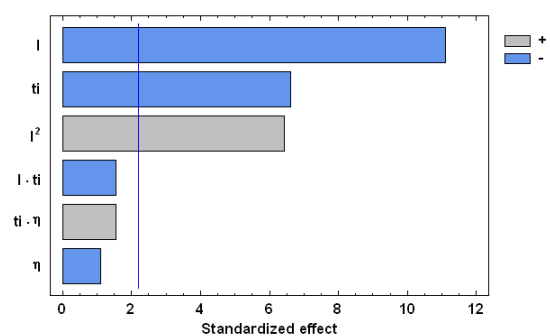


Fig. 5.28. Diagrama de Pareto para Pc con polaridad positiva

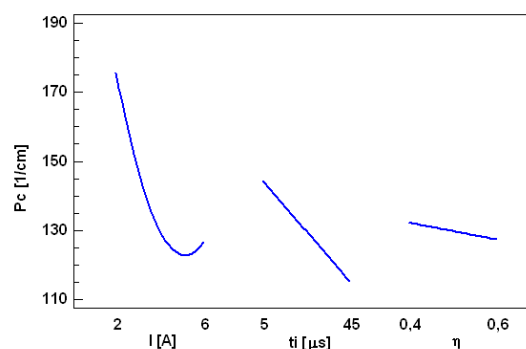


Fig. 5.29. Efectos principales para Pc con polaridad positiva

Los efectos de interacción de Sm y Pc se muestran en la Fig. 5.30 y en la Fig. 5.31, respectivamente. Como puede observarse, la pareja intensidad-tiempo de impulso es la que mayor interacción presenta sobre los dos parámetros de espaciamiento.

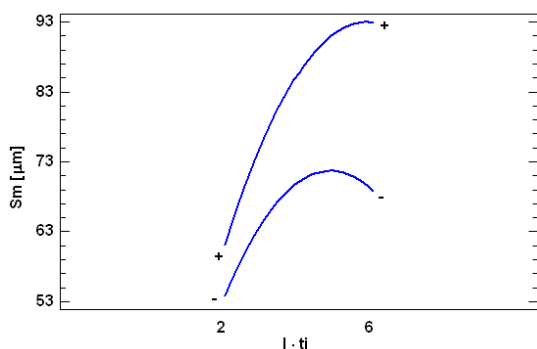


Fig. 5.30. Efectos de interacción para Sm con polaridad positiva

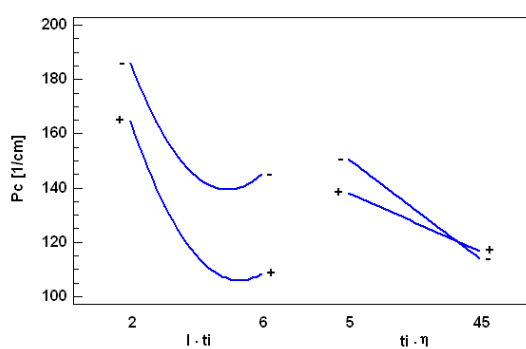


Fig. 5.31. Efectos de interacción para Pc con polaridad positiva

En el caso de Sm, los valores de R^2 y de R^2_{adj} son de 93,24 % y de 90,42 %, mientras que para Pc, los valores de R^2 y de R^2_{adj} son de 95,13 % y de 92,47 %, respectivamente. Las ecuaciones de los modelos ajustados se muestran en la Eq. (57), para Sm, y en la Eq. (58), para Pc.

$$Sm = 13,7325 + 20,8306 * I - 0,0255 * t_i + 12,6000 * \eta - 2,1988 * I^2 + 0,1044 * I * t_i \quad (57)$$

$$Pc = 307,9950 - 52,1750 * I - 1,2970 * t_i - 71,9000 * \eta + 5,2925 * I^2 - 0,0950 * I * t_i + 1,9000 * t_i * \eta \quad (58)$$

Las Fig. 5.32-Fig. 5.35 representan diversas superficies de respuesta de Sm y Pc. Como se observa en la Fig. 5.32, para un determinado valor de intensidad al aumentar el tiempo de impulso, Sm aumenta, alcanzándose los mayores valores de Sm con $t_i = 45 \mu s$ e $I = 6 A$. Asimismo, en la Fig. 5.33 se observa una tendencia de subida de la variable Sm al aumentar la intensidad, para cualquier valor del rendimiento. En el caso de la variable Pc, tal y como

muestra la Fig. 5.34, para un determinado valor de la intensidad, al disminuir el tiempo de impulso, Pc aumenta. A su vez, en la Fig. 5.35 se aprecia que para un determinado valor del rendimiento, Pc disminuye al aumentar la intensidad, hasta un mínimo situado aproximadamente en 5 A, a partir del cual Pc aumenta al aumentar la intensidad.

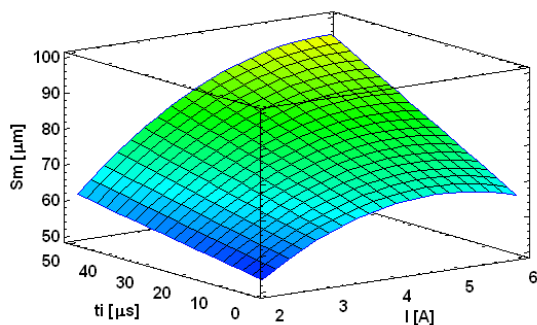


Fig. 5.32. Superficie de respuesta de Sm vs. I y ti con polaridad positiva

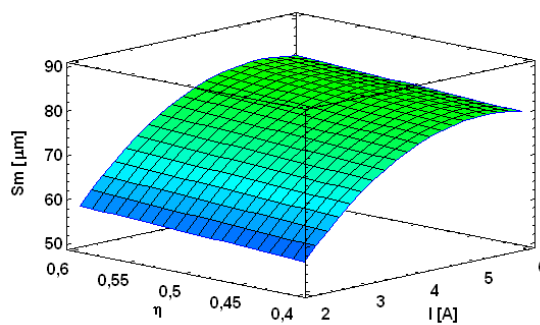


Fig. 5.33. Superficie de respuesta de Sm vs. I y η con polaridad positiva

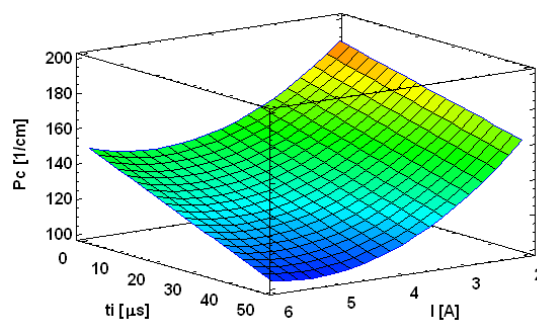


Fig. 5.34. Superficie de respuesta de Pc vs. I y ti con polaridad positiva

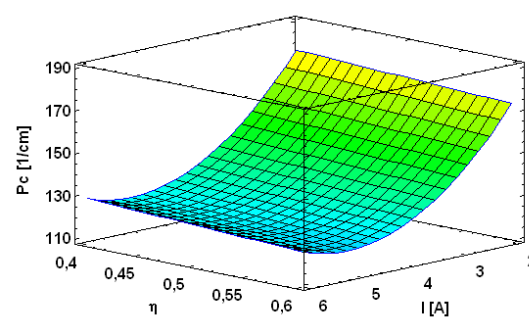


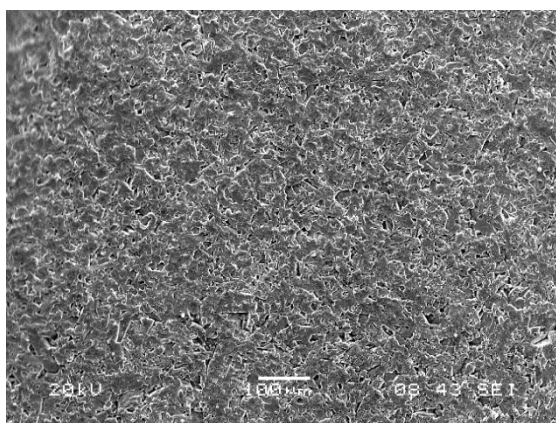
Fig. 5.35. Superficie de respuesta de Pc vs. I y η con polaridad positiva

5.4. Análisis mediante microscopía electrónica de barrido

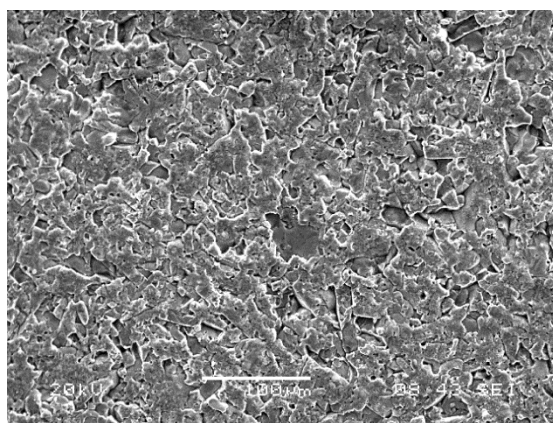
La topografía de las superficies electroerosionadas se ha analizado mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). De manera similar al análisis del Inconel® 600, se han seleccionado, de entre los experimentos realizados, aquellos con los que se han obtenido el valor máximo y mínimo de Ra, que corresponden a los experimentos E1 (I = 2 A, ti = 5 μs, η = 0,4) y E8 (I = 6 A, ti = 45 μs, η = 0,6), respectivamente. Todos estos resultados se muestran en la Tabla 5.2 correspondiente a los valores experimentales del TiB₂ con electrodo de cobre y polaridad positiva.

Como puede observarse en la Fig. 5.36, que muestra las micrográficas a diferentes aumentos del experimento E1 con el cual se obtuvo un Ra de 1,11 μm , la superficie presenta una geometría de aristas vivas en la que se aprecia de manera muy marcada los bordes de grano resultantes tras la resolidificación del material. Asimismo, también es evidente la presencia de pequeñas grietas y fisuras superficiales, así como de pequeñas cavidades, cuya formación puede atribuirse a la retención del fluido dieléctrico durante el enfriamiento brusco de la superficie.

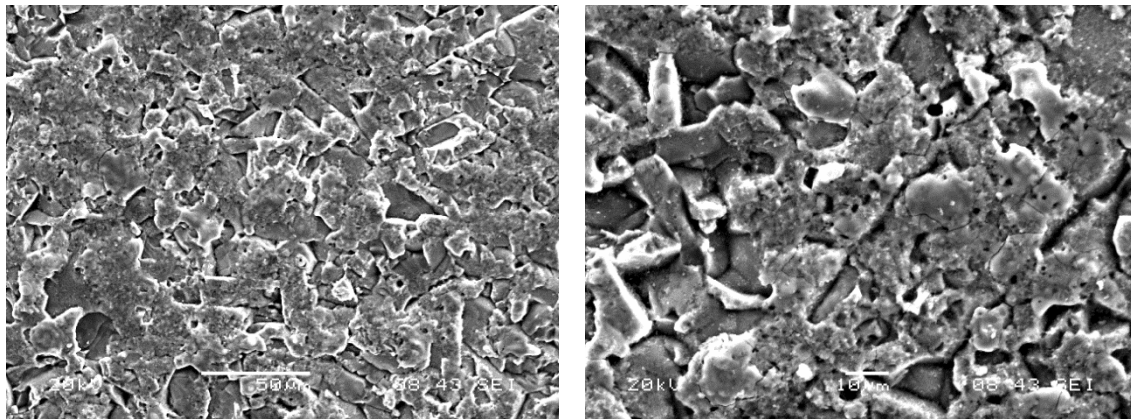
Por otra parte, en la Fig. 5.37 se muestran las micrográficas del experimento E8 cuyo valor de Ra fue de 3,96 μm . Debido a las condiciones de alta energía seleccionadas en dicho experimento, el efecto térmico es mayor que el obtenido en E1 y la cantidad de material eliminado de la pieza también es superior. Como consecuencia de esta mayor fusión de material, la topografía de la superficie es más abrupta y tortuosa que en E1, y el tamaño de las gotas resolidificadas es claramente mayor. Sin embargo, también pueden apreciarse pequeñas grietas que, al igual que en E1, son de pequeño tamaño y no tienen continuidad, lo que indica que son superficiales.



(a) x 120



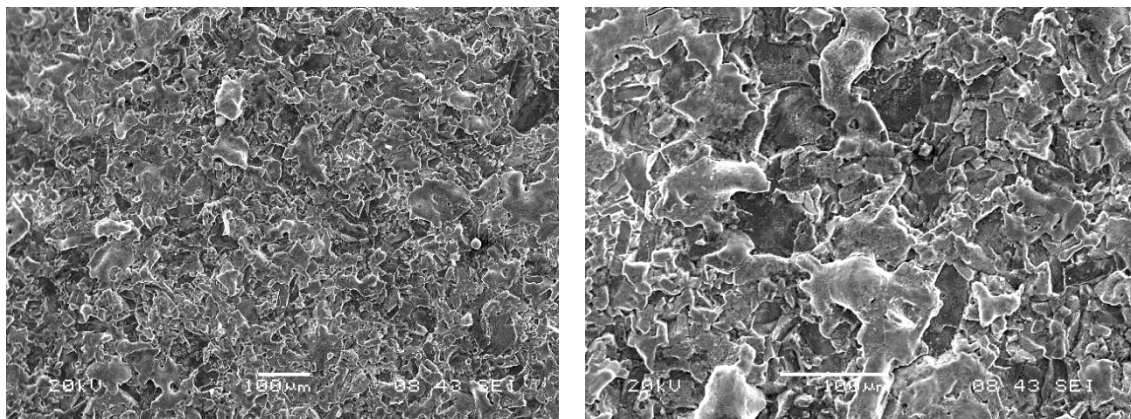
(b) x 250



(c) x 500

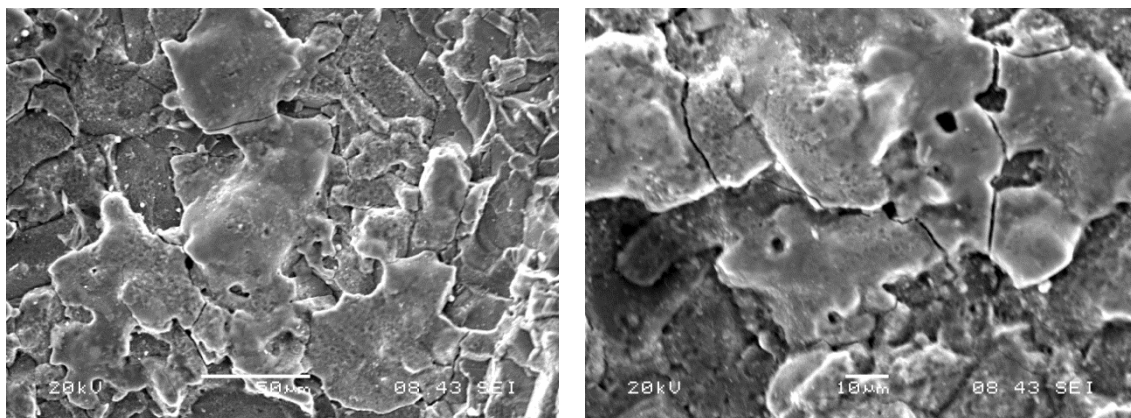
(d) x 1000

Fig. 5.36. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E1 con mínimo valor de Ra y polaridad positiva a distintos aumentos (x nº aumentos)



(a) x 120

(b) x 250



(c) x 500

(d) x 1000

Fig. 5.37. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E8 con máximo valor de Ra y polaridad positiva a distintos aumentos (x nº aumentos)

5.5. Recapitulación

En este capítulo se ha realizado un estudio del mecanizado mediante EDM del diboruro de titanio (TiB₂) con electrodo de cobre y polaridad positiva. Para ello, se han analizado tres de los parámetros tecnológicos más importantes en este tipo de procesos: tasa de eliminación de material, desgaste volumétrico del electrodo y rugosidad superficial. Asimismo, el estudio de dicha cerámica se ha centrado en regímenes de acabado, de manera que la selección de los valores de los parámetros y de la polaridad se ha realizado en base a ello. Por otra parte, todas las variables han sido analizadas siguiendo modelos de segundo orden.

- Con respecto a la variable MRR, la intensidad y el rendimiento resultaron ser los dos parámetros más influyentes en la tasa de eliminación de material, de tal manera que el aumento de ambos condujo a mayores valores de MRR. Asimismo, la máxima MRR fue de 3,0400 mm³/min ($I = 6 \text{ A}$, $\eta = 0,6$), mientras que el mínimo valor fue de 0,1607 mm³/min ($I = 2 \text{ A}$, $\eta = 0,4$).
- En el caso del desgaste volumétrico del electrodo, los factores tiempo de impulso e intensidad resultaron ser los más influyentes en EW. Así, una mayor duración del tiempo de impulso aumentó la probabilidad de deposición de carbono sobre la superficie del electrodo, que redujo el desgaste del mismo. Así, el mínimo valor de EW fue de 0,95 % ($I = 4 \text{ A}$, $t_i = 45 \text{ }\mu\text{s}$), mientras que el máximo valor fue de 16,94 % ($I = 2 \text{ A}$, $t_i = 5 \text{ }\mu\text{s}$).
- Los resultados obtenidos de rugosidad superficial fueron congruentes con los obtenidos de tasa de eliminación de material, de manera que el aumento del factor intensidad produjo un empeoramiento de la rugosidad superficial como consecuencia del mayor arranque de material producido. Con condiciones de baja energía (2 A y 5 μs), los cráteres resultantes fueron poco profundos y la superficie presentó un aspecto homogéneo. En este caso, el mínimo valor de Ra fue de 1,11 μm . Asimismo, al aumentar ambos parámetros, la superficie empeoró claramente como resultado de la mayor energía de los pulsos de intensidad, siendo el máximo valor de Ra de 3,96 μm .

Por último, la Tabla 5.8 y la Tabla 5.9 muestran de manera simplificada los resultados máximos y mínimos obtenidos, así como los factores más significativos para cada una de las variables cuando aumentan de su valor inferior a su valor superior dentro del rango definido para cada uno de ellos.

Variable	MRR (mm ³ /min)		EW (%)		Ra (μm)	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
	3,0400	0,1607	16,94	0,95	3,96	1,11

Tabla 5.8. Resultados máximos y mínimos obtenidos

Variable	MRR (mm ³ /min)			EW (%)			Ra (μm)		
	l	t _i	η	l	t _i	η	l	t _i	η
	↑	↑↓	↑	↓	↓		↑↓	↑	

Tabla 5.9. Factores significativos y su tendencia

CAPÍTULO 6

Análisis del mecanizado por EDM del carburo de silicio infiltrado con silicio (SiSiC)

6. ANÁLISIS DEL MECANIZADO POR EDM DEL CARBURO DE SILICIO (SiSiC)

En el presente capítulo se aborda el estudio del mecanizado mediante electroerosión por penetración (EDM) del carburo de silicio infiltrado con silicio (SiSiC), obtenido por reacción REFEL F®, que es su marca registrada más común. Esta cerámica es considerada como uno de los materiales cerámicos más prometedores en el campo de la ingeniería, debido a su combinación de excelentes propiedades físicas y mecánicas, tales como baja densidad ($3,1 \text{ g/cm}^3$), alta dureza y muy buena resistencia a la corrosión, incluso a altas temperaturas [168]. Además, su elevada conductividad térmica (150 W/mK - 200 W/mK), junto con un coeficiente de dilatación térmica bajo ($4,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ - $4,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), permiten una buena resistencia al impacto térmico [78]. Sus principales aplicaciones incluyen componentes destinados a soportar altas temperaturas tales como intercambiadores de calor, componentes de motores [168], elementos de turbinas de gas, cojinetes y juntas de alta temperatura y hornos, entre otros [171]. También es muy generalizado su uso en la industria biomédica, en la industria electrónica y en la industria óptica para la fabricación de espejos para telescopios [169]. Todas estas excelentes propiedades, que lo han convertido en un material muy útil y versátil para innumerables aplicaciones industriales, así como la dificultad que su mecanización conlleva por métodos convencionales, son las principales razones que motivan el presente estudio.

Por otra parte, para llevar a cabo los experimentos se han seleccionado electrodos de grafito con cobre infiltrado EDM-C3, de la marca *Poco Graphite*, con un tamaño medio de partícula menor de $5 \mu\text{m}$. La selección de este material para el mecanizado por EDM del SiSiC es una de las novedades más interesantes del presente estudio, puesto que entre la bibliografía existente no se encuentran apenas investigaciones que relacionen ambos materiales, siendo el cobre el material más comúnmente utilizado para este tipo de procesos. Así por ejemplo, Puertas et al. [78] y Luis et al. [77] estudian la influencia de algunos de los parámetros más importantes de EDM en la rugosidad superficial y en MRR y EW, respectivamente. Ji et al. [169] utilizan el

taladrado por EDM para el mecanizado de la citada cerámica y, además, estudian su mecanizabilidad por un proceso híbrido de taladrado y rectificado por EDM [171]. Asimismo, Ali Mahdavinejad [181] busca la optimización de MRR y SR mediante el estudio de la influencia de la intensidad, tiempo de impulso y tiempo de pausa.

El presente estudio se ha realizado de manera análoga a cómo se realizaron los estudios de la aleación Inconel® 600 y del material cerámico TiB₂. Asimismo, se han analizado la tasa de eliminación de material (MRR), el desgaste volumétrico del electrodo (EW) y la rugosidad superficial (SR). Todos estos parámetros han sido estudiados en función de la intensidad suministrada por el generador (I), el tiempo de impulso (t_i) y el rendimiento de ciclo (η). Además, para la planificación y análisis de los experimentos se han utilizado técnicas de Diseño de Experimentos (DOE) combinadas con técnicas de regresión lineal, que permiten seleccionar las condiciones óptimas de mecanizado para obtener un valor determinado de MRR, EW y SR.

Para determinar los valores de los factores de diseño que se analizan en este apartado y que se recogen en la Tabla 6.1, se han realizado diversos ensayos previos sobre el material con objeto de determinar las condiciones que conducen a un proceso estable. Asimismo, también se han tenido en cuenta las experiencias previas que existen en la EDM del SiSiC, como por ejemplo las de Clijsters et al. [168] y las de Puertas et al. [182] en cuyos trabajos emplearon electrodos de grafito con cobre infiltrado y electrodos de cobre, respectivamente.

Además, para la cerámica seleccionada (SiSiC), se ha comprobado experimentalmente que es preferible el uso de polaridad negativa para conseguir un proceso de mecanizado estable y evitar la formación de arcos eléctricos y cortocircuitos. Sin embargo, cabe recordar que en el caso del TiB₂ se seleccionó polaridad positiva, aun cuando los valores de los parámetros de diseño fueron los mismos que los seleccionados para la EDM del SiSiC. Este hecho vuelve a constatar que la estabilidad del proceso depende, principalmente, de la pareja de materiales pieza-electrodo.

En la Tabla 6.1 se muestran los valores de los parámetros de diseño y los niveles seleccionados para el presente caso de estudio. Como se ha comentado anteriormente, son los mismos valores que se seleccionaron para el mecanizado de TiB₂ con electrodo de cobre.

Parámetro de diseño	Unidad	Niveles y valores		
		Polaridad negativa		
		1	2	3
Intensidad	A	2	4	6
Tiempo de impulso	μs	5	25	45
Rendimiento		0,4	0,5	0,6
Tensión	V	200		
Presión del dieléctrico	kPa	30		

Tabla 6.1. Parámetros de diseño y niveles seleccionados para el caso de la EDM del SiSiC con electrodo de Cu-C y polaridad negativa

Análogamente al estudio realizado para el TiB₂, se ha seleccionado un diseño factorial 2³ con cuatro puntos centrales, siendo 3 el número de factores de diseño, cada uno de ellos con dos niveles de variación, dando un total de 12 experimentos. Asimismo, para el modelo de segundo orden (diseño central compuesto) se han añadido seis puntos estrella adicionales (dos puntos estrella por cada factor), dando un total de 18 experimentos. La matriz de diseño, así como los valores medios de los resultados experimentales obtenidos, quedan recogidos en la Tabla 6.2.

	E	Polaridad negativa (-)									
		I (A)	t _i (μs)	η (%)	MRR (mm ³ /min)	EW (%)	Ra (μm)	Rq (μm)	Rt (μm)	Sm (μm)	Pc (1/cm)
2 ^k	1	2	5	0,4	0,2685	80,26	1,06	1,35	9,22	60,80	166,00
	2	6	5	0,4	0,6244	102,40	1,29	1,73	12,25	62,00	161,20
	3	2	45	0,4	0,0890	466,19	0,83	1,19	9,85	67,00	149,40
	4	6	45	0,4	0,3906	309,88	1,37	1,76	12,04	107,20	92,80
	5	2	5	0,6	0,3356	127,37	1,21	1,58	11,45	68,20	147,00
	6	6	5	0,6	0,5237	132,36	1,79	2,81	20,62	181,00	125,80
	7	2	45	0,6	0,2000	299,33	0,82	1,08	7,79	71,40	143,60
	8	6	45	0,6	0,4230	478,08	1,37	1,76	12,05	106,60	93,40
P.E.	9	2	25	0,5	0,2157	197,69	0,95	1,23	7,81	66,40	151,60
	10	6	25	0,5	0,4927	255,51	1,56	2,01	13,79	105,20	95,60
	11	4	5	0,5	0,6155	118,80	1,17	1,52	11,37	61,20	163,40
	12	4	45	0,5	0,3633	408,61	1,41	1,81	12,14	96,80	104,20
	13	4	25	0,4	0,3636	255,55	1,55	2,02	12,86	105,60	95,60
	14	4	25	0,6	0,4590	308,32	1,42	1,80	11,53	95,40	106,80
P.C.	15	4	25	0,5	0,4370	273,51	1,46	1,91	13,87	111,00	98,00
	16	4	25	0,5	0,3995	299,36	1,38	1,81	12,11	99,60	97,40

17	4	25	0,5	0,3903	328,64	1,55	2,00	12,81	104,40	94,60
18	4	25	0,5	0,3959	318,24	1,38	1,73	10,80	126,00	94,20

Tabla 6.2. Resultados experimentales para la EDM del SiSiC con electrodo de Cu-C y polaridad negativa

A partir del DOE planteado y de los resultados obtenidos tras la ejecución de los experimentos, se obtienen los modelos de primer y segundo orden de cada una de las variables de respuesta. El modelo analizado es aquél que conduce a los mayores valores del P-valor del test de falta de ajuste así como de los estadísticos R^2 y R^2_{adj} . Para el caso concreto de estudio, las variables MRR, EW, Ra y Pc han sido analizadas siguiendo modelos de segundo orden, mientras que, en el resto de los casos, se han empleado modelos de primer orden.

6.1. Análisis y discusión de resultados para la tasa de eliminación de material

La tabla ANOVA para la tasa de eliminación de material, obtenida a partir del diseño de experimentos y de los resultados experimentales, se muestra en la Tabla 6.3. Como se puede observar, cinco efectos influyen en la variable de respuesta para un nivel de confianza del 95 %. Estos efectos, ordenados por orden de importancia, son: la intensidad, el tiempo de impulso, el efecto cuadrático de la intensidad, el efecto de interacción entre el rendimiento y la intensidad y, finalmente, el efecto cuadrático del tiempo de impulso. Estos resultados se muestran de manera gráfica en la Fig. 6.1 y en la Fig. 6.2.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	0,18	1	0,18	157,18	0,0000
B: Tiempo de impulso	0,08	1	0,08	70,60	0,0000
C: Rendimiento	0,01	1	0,01	3,66	0,0882
AA	0,02	1	0,02	16,80	0,0027
AC	0,01	1	0,01	6,59	0,0304
BB	0,01	1	0,01	6,05	0,0362
BC	0,01	1	0,01	3,40	0,0983
CC	0,01	1	0,01	1,77	0,2165
Error total	0,01	9	0,01		
Total (corr.)	0,32	17			

Tabla 6.3. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - MRR

Como se puede apreciar en la Fig. 6.2, el valor de MRR aumenta de manera importante al aumentar la intensidad. Este resultado coincide con los obtenidos por Luis y Puertas en [77] y en [182], que dicen que el aumento de la intensidad produce pulsos más energéticos que conducen a valores más altos de MRR.

El segundo factor que presenta más influencia es el tiempo de impulso y, a diferencia de la intensidad, al aumentar su valor, la tasa de eliminación de material disminuye. Este hecho indica que para operaciones de desbaste es más efectivo aplicar numerosas chispas de corta duración (frecuencias elevadas) frente a un menor número de descargas de mayor duración (frecuencias bajas). Este comportamiento queda constatado en los resultados obtenidos en los experimentos. Por ejemplo, la tasa mínima de eliminación de material alcanzada fue de 0,0890 mm³/min y se obtuvo con el mínimo valor de intensidad (2 A) y el máximo valor de tiempo de impulso (45 μs). Por otra parte, al seleccionar los valores extremos opuestos tanto de intensidad (8 A) como de tiempo de impulso (5 μs), se obtuvo la mayor tasa de eliminación de material que fue de 0,6244 mm³/min.

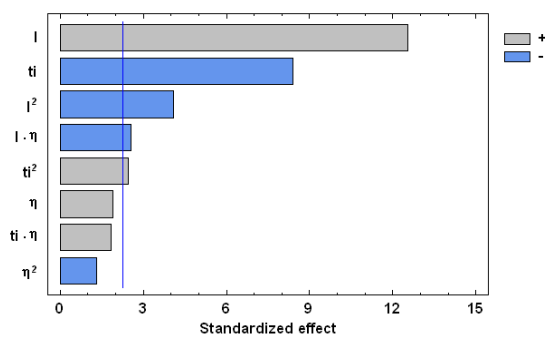


Fig. 6.1. Diagrama de Pareto para MRR con polaridad negativa

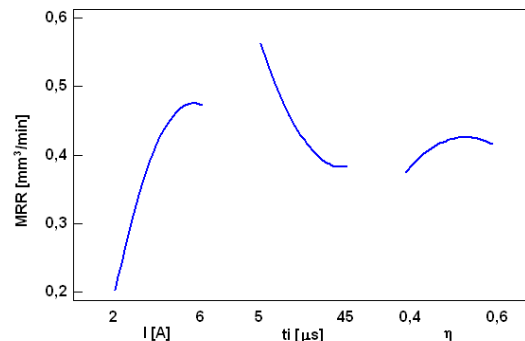


Fig. 6.2. Efectos principales para MRR con polaridad negativa

La Fig. 6.3 muestra la gráfica de efectos de interacción para MRR, en la cual, la interacción entre la intensidad y el rendimiento es el efecto más significativo.

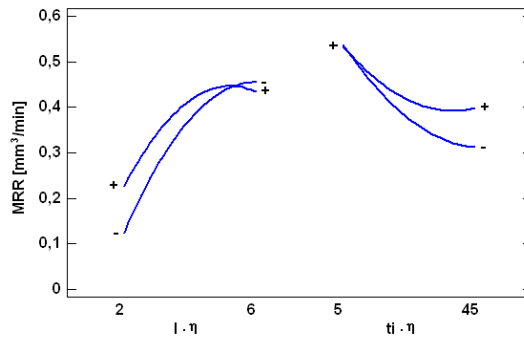


Fig. 6.3. Efectos de interacción para MRR con polaridad negativa

Por otro lado, R^2 y R^2_{adj} tienen un valor de 96,75 % y de 93,85 %, respectivamente, lo que indica que el modelo es estadísticamente válido para caracterizar la relación entre MRR y los parámetros de EDM. La ecuación de dicho modelo se muestra en la Eq. (59):

$$MRR = -0,9504 + 0,3133 * I - 0,0164 * t_i + 3,2850 * \eta - 0,0211 * I^2 - 0,1540 * I * \eta + 0,0001 * t_i^2 + 0,0111 * t_i * \eta - 2,7404 * \eta^2 \quad (59)$$

La Fig. 6.4 y la Fig. 6.5 representan la superficie de respuesta de MRR en función de la intensidad y el rendimiento, así como en función del tiempo de impulso y del rendimiento, respectivamente. Como puede observarse en ambas, hay una tendencia de subida de la variable MRR al aumentar la intensidad y disminuir el tiempo de impulso, sea cual sea el valor del rendimiento. Además, tal y como se observa en la Fig. 6.4, los valores más bajos de tasa de eliminación de material se obtienen combinando valores bajos tanto de intensidad como de rendimiento.

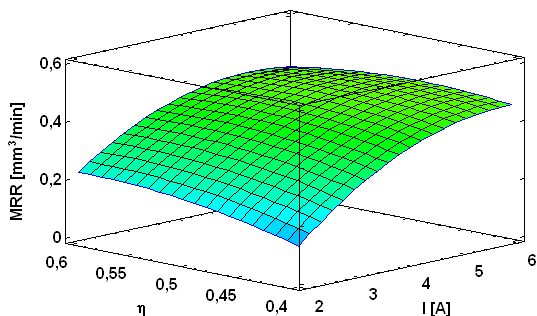


Fig. 6.4. Superficie de respuesta de MRR vs. I y η con polaridad negativa

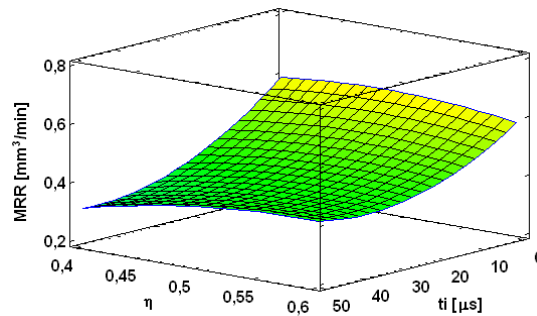


Fig. 6.5. Superficie de respuesta de MRR vs. t_i y η con polaridad negativa

6.2. Análisis y discusión de resultados para el desgaste volumétrico del electrodo

A continuación, se analiza el desgaste volumétrico del electrodo de forma similar al realizado para MRR. Para ello, se obtiene la tabla ANOVA a partir de los resultados experimentales, la cual se recoge en la Tabla 6.4. Como puede observarse, tres efectos influyen en EW. Estos efectos, ordenados por orden de importancia, son: el tiempo de impulso, el efecto de interacción entre el tiempo de impulso y el rendimiento, y el efecto cuadrático de la intensidad.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
B: Tiempo de impulso	196252,00	1	196252,00	108,11	0,0000
AA	8593,40	1	8593,40	4,73	0,0472
AC	12633,30	1	12633,30	6,96	0,0195
Error total	25414,50	14	1815,32		
Total (corr.)	242893,00	17			

Tabla 6.4. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - EW

Los resultados recogidos en la tabla ANOVA se muestran, de manera gráfica, en la Fig. 6.6 y la Fig. 6.7. Como puede observarse en ambas, el tiempo de impulso es, claramente, el factor más influyente en la respuesta EW e influye de tal manera que al aumentar su valor, el valor de desgaste aumenta de manera muy importante. Además, cabe destacar que los valores alcanzados de desgaste son extremadamente elevados en comparación con los obtenidos por Luis y Puertas [77], en la electroerosión de SiSiC con electrodo de cobre siendo en este último caso el máximo valor de EW de 19,82 % frente al valor de 478,08 % alcanzado en el presente estudio. No ocurre así, sin embargo, con

los valores obtenidos de MRR que en el caso de ambos electrodos se consiguen tasas similares de arranque.

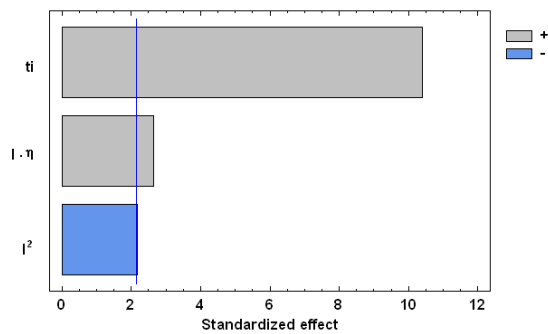


Fig. 6.6. Diagrama de Pareto para EW con polaridad negativa

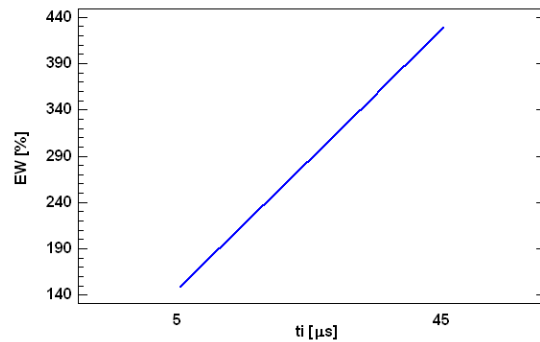


Fig. 6.7. Efectos principales para EW con polaridad negativa

Asimismo, en la Fig. 6.8 se aprecia que la pareja intensidad-rendimiento es la que mayor interacción presenta.

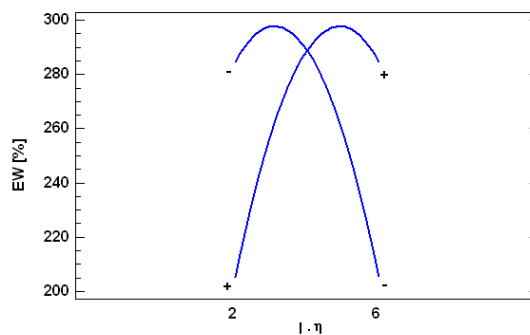


Fig. 6.8. Efectos de interacción para EW con polaridad negativa

Para el modelo ajustado de segundo orden, el valor de R^2 es de 89,54 % mientras que el valor de R^2_{adj} es de 87,29 %. La ecuación simplificada del modelo se muestra en la Eq. (60):

$$EW = 335,2670 - 11,4034 * I + 7,0045 * t_i - 794,7750 * \eta - 10,9929 * I^2 + 198,6940 * I * \eta \quad (60)$$

La Fig. 6.9 muestra la superficie de respuesta de EW en función de los factores de diseño intensidad y rendimiento. Como puede observarse, cuando el valor de la intensidad es mínimo (2 A), EW disminuye al aumentar el rendimiento. Sin

embargo, conforme el valor de la intensidad aumenta, EW tiende a aumentar al aumentar el rendimiento.

Por otra parte, la Fig. 6.10 representa la superficie de respuesta de EW en función del tiempo de impulso y del rendimiento. Tal y como se observa, para un valor determinado del rendimiento, hay una tendencia importante de subida de la variable EW al aumentar el tiempo de impulso, lo cual no concuerda con la experiencia que se tiene en el caso de los materiales metálicos.

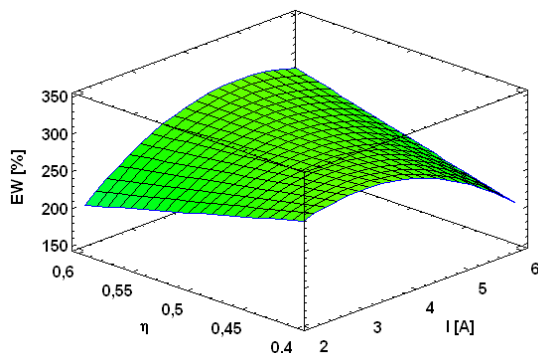


Fig. 6.9. Superficie de respuesta de EW vs. I y η con polaridad negativa

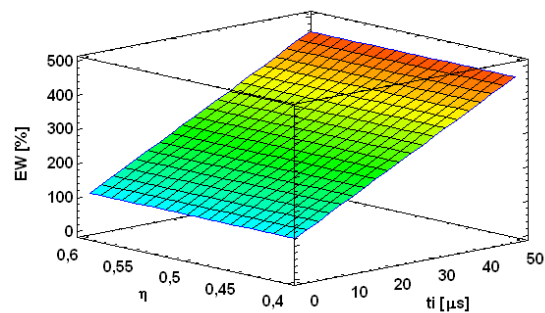


Fig. 6.10. Superficie de respuesta de EW vs. ti y η con polaridad negativa

6.3. Análisis y discusión de resultados para los parámetros de rugosidad superficial

Los resultados obtenidos de los parámetros de rugosidad superficial obtenidos mediante el proceso de EDM con electrodo de Cu-C y polaridad negativa se analizan, a continuación, de forma análoga a los estudios realizados en el capítulo 4 y en el capítulo 5 del mecanizado del Inconel® 600 y del TiB₂, respectivamente.

6.3.1. Análisis de los parámetros de amplitud

Como se comentó anteriormente, para el estudio de Ra se ha empleado un modelo de segundo orden, mientras que en el caso de Rq y Rt el modelo de primer orden es suficiente para explicar el comportamiento de ambos.

Como se observa en la Tabla 6.5, que muestra la tabla ANOVA del modelo simplificado de Ra, sólo el efecto de la intensidad tiene un P-valor inferior a 0,05. Además, tal y como se ve en la Fig. 6.11 y la Fig. 6.12, que muestran el diagrama de Pareto y la gráfica de efectos principales, respectivamente, al aumentar el valor de la intensidad, el valor de Ra también aumenta, lo que conduce a un empeoramiento de la rugosidad superficial de la pieza.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	0,63001	1	0,63001	33,23	0,0001
B: Tiempo de impulso	0,05184	1	0,05184	2,73	0,1264
C: Rendimiento	0,02601	1	0,02601	1,37	0,2662
AA	0,0564975	1	0,0564975	2,98	0,1122
BB	0,031	1	0,031	1,64	0,2273
BC	0,05445	1	0,05445	2,87	0,1182
Error total	0,20854	11	0,0189582		
Total (corr.)	1,16229	17			

Tabla 6.5. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Ra

El diagrama de Pareto y la gráfica de efectos principales de los parámetros Rq y Rt se muestran en las Fig. 6.13-Fig. 6.16. Como puede observarse, la intensidad es el factor que más influye en ambos parámetros e influye de tal manera que al aumentar su valor, también aumentan los valores de Rq y Rt, alcanzando los valores más altos de rugosidad con una intensidad de 6 A. Esta tendencia es la misma que la seguida por el parámetro Ra y, coincide con lo esperado porque cuanto mayor es la energía de las descargas que inciden en la superficie, mayores son las cavidades e irregularidades producidas. Además, a diferencia de Ra, en el caso de Rq y Rt, el factor tiempo de impulso también es significativo en el comportamiento de ambos parámetros. En este caso, cuanto menor es el valor del tiempo de impulso, peor es el acabado superficial, por lo que cuando sean necesarias superficies de acabado, es conveniente la selección de pulsos de baja intensidad y de larga duración, es decir, valores altos de tiempo de impulso. El experimento E7 (2 A y 45 μ s), con el que mejor acabado superficial se obtuvo, dio como resultado unos valores de Ra, Rq y Rt de 0,82 μ m, 1,08 μ m y 7,79 μ m, respectivamente. En dicho caso, el valor de la intensidad fue mínimo y el del tiempo de impulso fue máximo, dentro de los rangos seleccionados. Asimismo, al aumentar la intensidad y disminuir el tiempo de impulso, la rugosidad superficial empeora, tal y como se aprecia en

el experimento E6 (6 A y 5 μ s), con el que se obtuvo el peor acabado superficial y cuyos valores de Ra, Rq y Rt fueron: 1,79 μ m, 2,81 μ m y 20,62 μ m, respectivamente. Estos resultados de rugosidad superficial están en línea con los obtenidos de MRR, siendo 0,2000 mm³/min y 0,5237 mm³/min, las tasas obtenidas para los experimentos E7 y E6, respectivamente.

Por otro lado, cabe destacar que aunque el factor rendimiento no se considera significativo en las variables Ra, Rq y Rt, al aumentar su valor, los valores de estas tres variables también aumentan ligeramente.

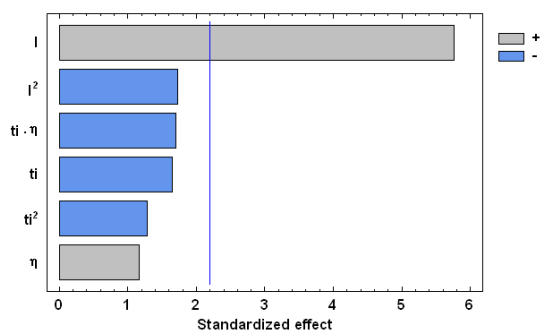


Fig. 6.11. Diagrama de Pareto para Ra con polaridad negativa

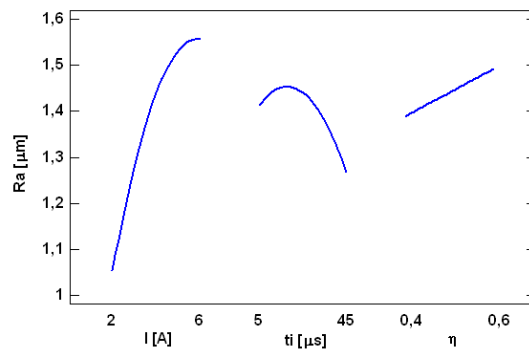


Fig. 6.12. Efectos principales para Ra con polaridad negativa

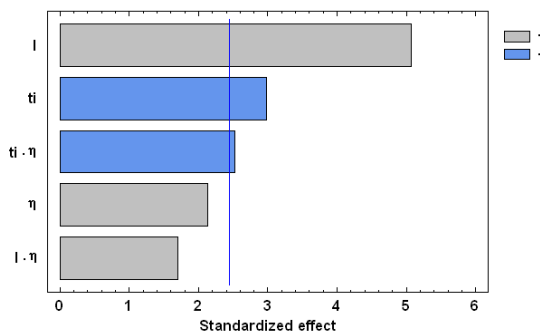


Fig. 6.13. Diagrama de Pareto para Rq con polaridad negativa

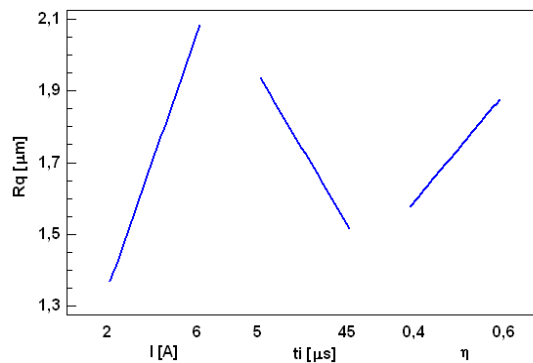


Fig. 6.14. Efectos principales para Rq con polaridad negativa

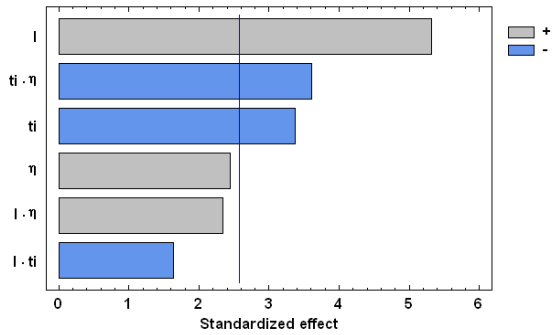


Fig. 6.15. Diagrama de Pareto para R_t con polaridad negativa

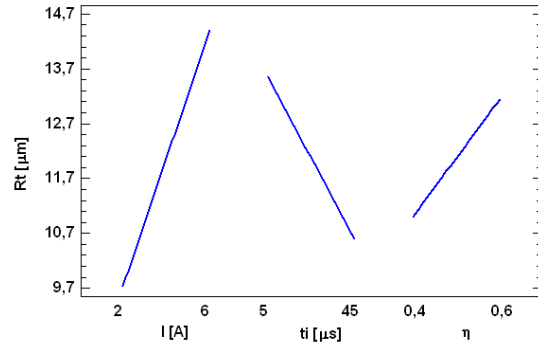


Fig. 6.16. Efectos principales para R_t con polaridad negativa

Las Fig. 6.17-Fig. 6.19 representan los efectos de interacción para los parámetros de amplitud. Tal y como se observa, en los tres casos la pareja de factores tiempo de impulso-rendimiento es la que mayor interacción presenta en R_a , R_q y R_t .

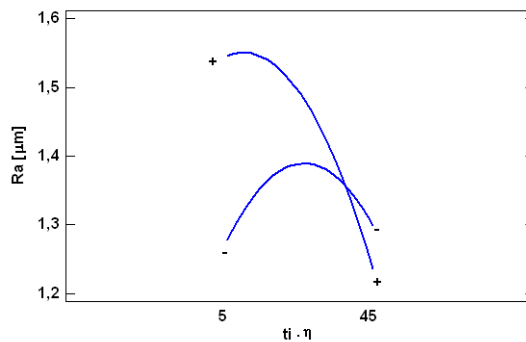


Fig. 6.17. Efectos de interacción para R_a con polaridad negativa

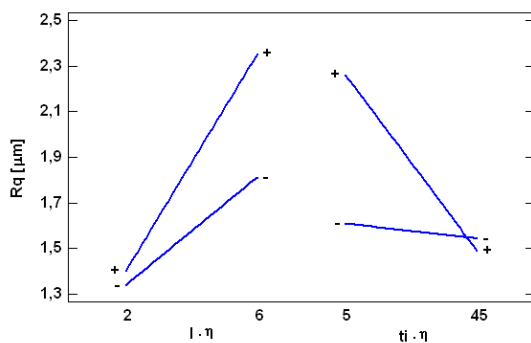


Fig. 6.18. Efectos de interacción para R_q con polaridad negativa

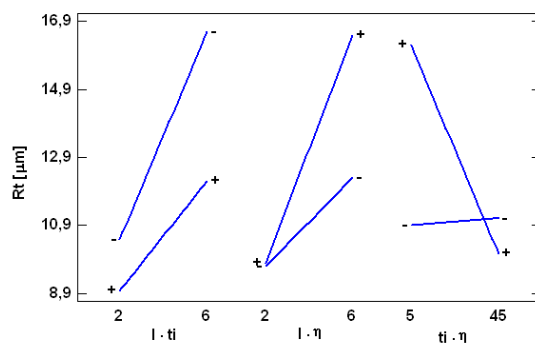


Fig. 6.19. Efectos de interacción para R_t con polaridad negativa

Para la variable Ra, se obtienen unos valores de R² y de R²_{adj} de 82,06% y de 72,27 %, respectivamente. La ecuación del modelo ajustado de Ra se muestra en la Eq. (61):

$$Ra = -0,4389 + 0,3955 * I + 0,0295 * t_i + 1,5413 * \eta - 0,0338 * I^2 - 0,0003 * t_i^2 - 0,0413 * t_i * \eta \quad (61)$$

Por otra parte, para Rq, el valor de R² es de 88,98 %, mientras que R²_{adj} tiene un valor de 79,79 %. Para Rt, el valor de R² es de 93,04 % y el de R²_{adj} es de 84,68 %. Las ecuaciones de los modelos ajustados se muestran en la Eq. (62), para Rq, y en la Eq. (63), para Rt.

$$Rq = 0,6140 - 0,1213 * I + 0,0339 * t_i + 1,3188 * \eta + 0,6000 * I * \eta - 0,0888 * t_i * \eta \quad (62)$$

$$Rt = 2,4935 - 0,9508 * I + 0,3934 * t_i + 9,9281 * \eta - 0,0180 * I * t_i + 5,1313 * I * \eta - 0,7906 * t_i * \eta \quad (63)$$

La Fig. 6.20, la Fig. 6.22 y la Fig. 6.24 representan las superficies de respuesta de Ra, Rq y Rt en función de la intensidad y el rendimiento. Como puede observarse, hay una tendencia de subida de los parámetros de amplitud al aumentar la intensidad y para cualquier valor de rendimiento.

Por otra parte, la Fig. 6.21, la Fig. 6.23 y la Fig. 6.25 representan las superficies de respuesta de Ra, Rq y Rt en función del tiempo de impulso y el rendimiento. Como se observa en la Fig. 6.21, para un determinado valor de rendimiento al aumentar el tiempo de impulso, Ra aumenta hasta un punto situado aproximadamente en 30 μs a partir del cual disminuye. A su vez, se observa que para valores altos de tiempo de impulso (40 μs-50 μs), Ra disminuye ligeramente al aumentar el rendimiento. Sin embargo, lo contrario ocurre con valores bajos de tiempo de impulso. Además, en la Fig. 6.23 y en la Fig. 6.25 se aprecian los mayores valores de Rq y Rt, respectivamente, con tiempos de impulso bajos y rendimientos altos.

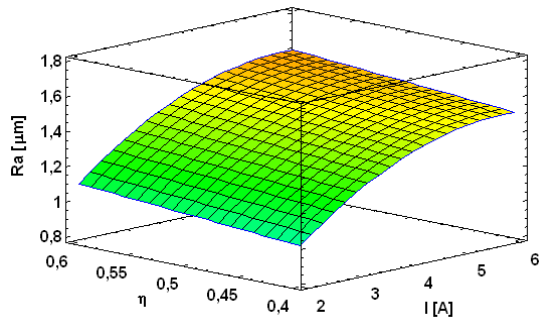


Fig. 6.20. Superficie de respuesta de Ra vs. I y η con polaridad negativa

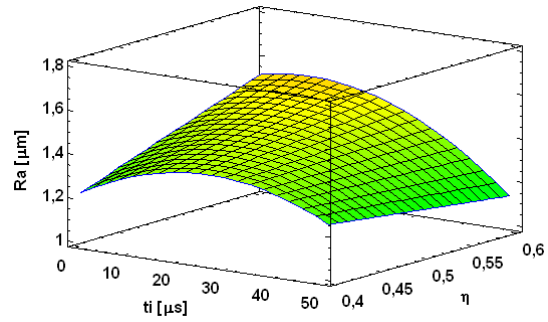


Fig. 6.21. Superficie de respuesta de Ra vs. ti y η con polaridad negativa

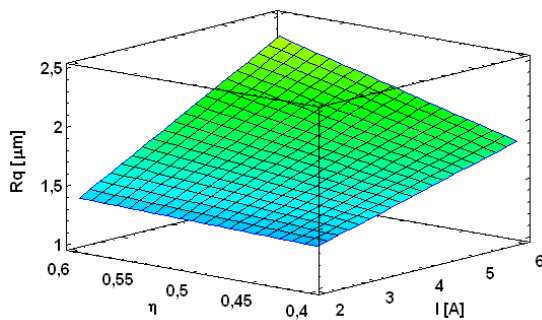


Fig. 6.22. Superficie de respuesta de Rq vs. I y η con polaridad negativa

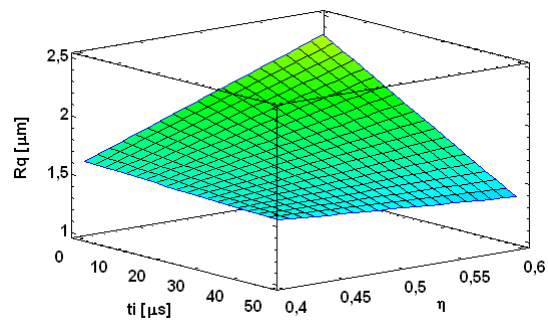


Fig. 6.23. Superficie de respuesta de Rq vs. ti y η con polaridad negativa

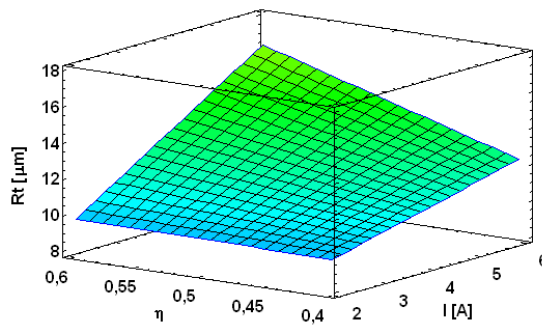


Fig. 6.24. Superficie de respuesta de Rt vs. I y η con polaridad negativa

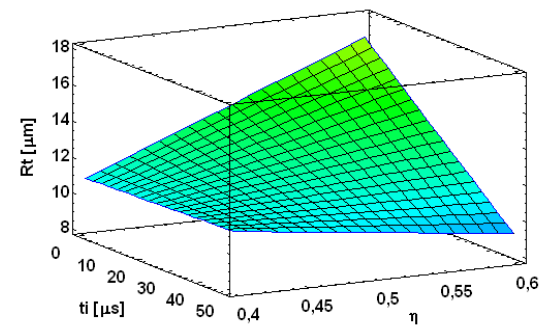


Fig. 6.25. Superficie de respuesta de Rt vs. ti y η con polaridad negativa

6.3.2. Análisis de los parámetros de espaciamento

A continuación, se analizan los resultados obtenidos de los parámetros de espaciamento. En el caso de Sm, se ha empleado un modelo de primer orden, mientras que para la variable Pc, el modelo con mayor P-valor del test de falta

de ajuste, así como valores más altos de R^2 y R^2_{adj} , fue el de segundo orden, y por tanto, el que se ha seleccionado para su análisis.

A partir de los resultados experimentales obtenidos, se obtienen las tablas ANOVA de Sm y Pc, las cuales quedan recogidas en la Tabla 6.6 y en la Tabla 6.7, respectivamente. Como puede observarse, en el caso de Sm, sólo el efecto de la intensidad influye en la variable Sm para un nivel de confianza del 95 %. Asimismo, en el caso de Pc, cuatro son los efectos estadísticamente significativos. Estos efectos, ordenados de mayor a menor significancia, son: la intensidad, el tiempo de impulso, el efecto cuadrático del tiempo de impulso y el efecto de interacción entre el tiempo de impulso y la intensidad. Estos resultados se representan gráficamente en las Fig. 6.26-Fig. 6.29.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A: Intensidad	4484,05	1	4484,05	9,32	0,0185
C: Rendimiento	2119,01	1	2119,01	4,40	0,0740
AC	1420,44	1	1420,44	2,95	0,1295
BC	1878,85	1	1878,85	3,90	0,0887
Error total	3368,50	7	481,21		
Total (corr.)	13270,80	11			

Tabla 6.6. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Sm

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P-Valor
A:I	3564,54	1	3564,54	25,20	0,0005
B:ti	3240,00	1	3240,00	22,91	0,0007
C:rto	234,26	1	234,26	1,66	0,2271
AA	529,37	1	529,37	3,74	0,0818
AB	816,08	1	816,08	5,77	0,0372
BB	1678,30	1	1678,30	11,87	0,0063
BC	302,58	1	302,58	2,14	0,1743
Error total	1414,42	10	141,44		
Total (corr.)	14223,50	17			

Tabla 6.7. Análisis de varianza. Tabla ANOVA para polaridad negativa - Pc

Como se puede observar, tanto en los diagramas de Pareto como en las gráficas de efectos principales, la intensidad es el factor que más influye en los parámetros de espaciamiento. Una vez más, esta influencia es opuesta, de forma que el aumento de la intensidad produce el aumento de Sm, pero la disminución de Pc. Además, en el caso de Pc, el tiempo de impulso también se considera significativo. Como puede observarse en la Fig. 6.29, al aumentar el

tiempo de impulso, P_c disminuye hasta un mínimo, situado aproximadamente en $30 \mu s$, a partir del cual comienza a aumentar.

Como ya se comentó anteriormente en el análisis de Inconel® 600 y del TiB_2 , estas tendencias son *a priori* las esperadas puesto que al aumentar la intensidad, las chispas producen cráteres de mayor diámetro (mayores valores de S_m) y, por tanto, se encuentran más espaciados los unos de los otros (menores valores de P_c). Por ejemplo, para el experimento E7, con el que se obtuvo el menor valor de R_a ($0,82 \mu m$), el valor de S_m fue de $71,40 \mu m$, mientras que el de P_c fue de $143,60$ 1/cm. En este caso, el valor de la intensidad fue de 2 A y el del tiempo de impulso de $45 \mu s$. Sin embargo, para el E6 (6 A y $5 \mu s$), el valor de S_m aumentó hasta $181,00 \mu m$ y el valor de P_c disminuyó hasta $125,80$ 1/cm.

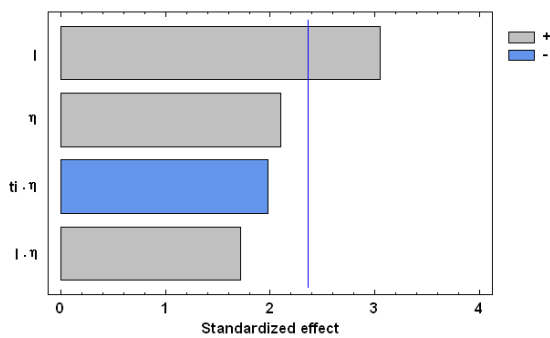


Fig. 6.26. Diagrama de Pareto para S_m con polaridad negativa

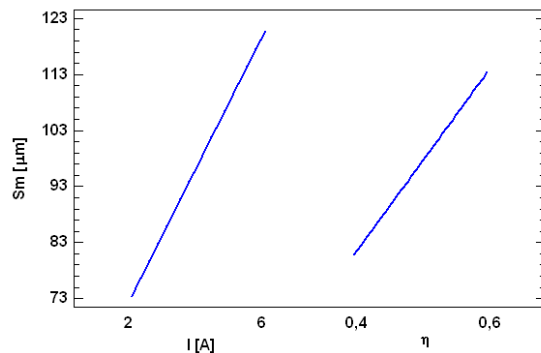


Fig. 6.27. Efectos principales para S_m con polaridad negativa

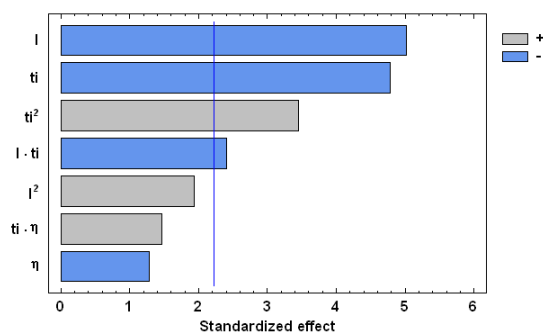


Fig. 6.28. Diagrama de Pareto para P_c con polaridad negativa

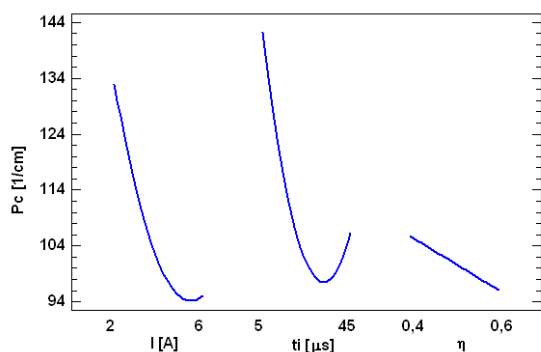


Fig. 6.29. Efectos principales para P_c con polaridad negativa

Los efectos de interacción se muestran en la Fig. 6.30 para Sm y en la Fig. 6.31 para Pc. Como puede apreciarse, la pareja tiempo de impulso-rendimiento y la pareja intensidad-tiempo de impulso son las que mayor interacción presentan sobre Sm y Pc, respectivamente.

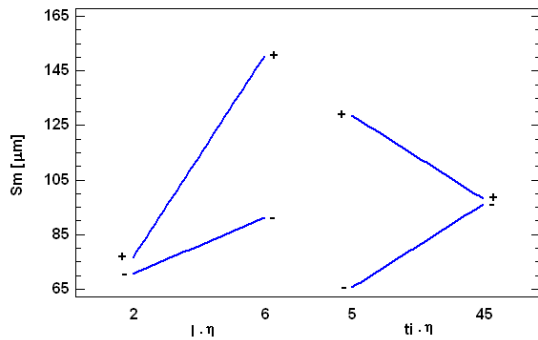


Fig. 6.30. Efectos de interacción para Sm con polaridad negativa

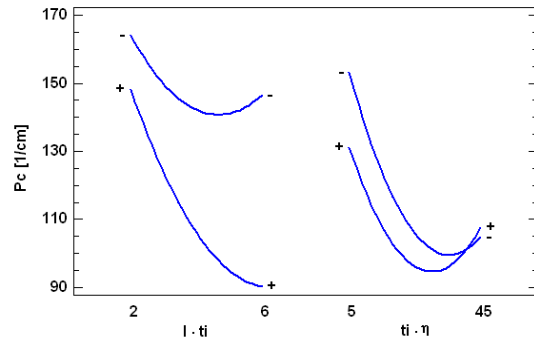


Fig. 6.31. Efectos de interacción para Pc con polaridad negativa

En el caso de Sm, se obtiene un valor de R^2 de 74,62 %. Asimismo, R^2_{adj} tiene un valor de 60,11 %. En el caso de la variable Pc, los valores de R^2 y de R^2_{adj} son de 90,06 % y de 83,09 %, respectivamente. Las ecuaciones de los modelos ajustados se muestran en la Eq. (64), para Sm, y en la Eq.(65), para Pc.

$$Sm = 5,8438 - 21,4750 * I + 3,8313 * t_i + 87,8125 * \eta + 66,6250 * I * \eta - 7,6625 * t_i * \eta \quad (64)$$

$$Pc = 287,2320 - 29,2630 * I - 4,3360 * t_i - 125,2750 * \eta + 3,2670 * I^2 - 0,2525 * I * t_i + 0,0582 * t_i^2 + 3,0750 * t_i * \eta \quad (65)$$

Las Fig. 6.32-Fig. 6.35 representan la superficie de respuesta de Sm y Pc. Como se observa en la Fig. 6.32, para un determinado valor de rendimiento al aumentar la intensidad, Sm aumenta, alcanzándose los mayores valores de Sm con $\eta = 0,6$ e $I = 6$ A. Asimismo, en la Fig. 6.33 se observan los mayores valores de Sm con $\eta = 0,6$ y $t_i = 5 \mu s$. En el caso de la variable Pc, tal y como muestra la Fig. 6.34, para un determinado valor de la intensidad al aumentar el tiempo de impulso, Pc disminuye hasta un punto situado aproximadamente en

40 μs , a partir del cual comienza a aumentar. Asimismo, en la Fig. 6.35 se observan los valores más altos de P_c con valores bajos de tiempo de impulso y de rendimiento (5 μs y 0,4).

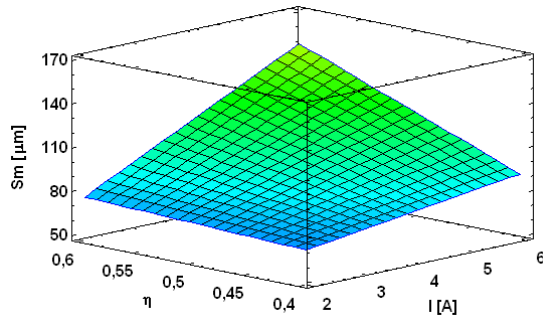


Fig. 6.32. Superficie de respuesta de S_m vs. I y η con polaridad negativa

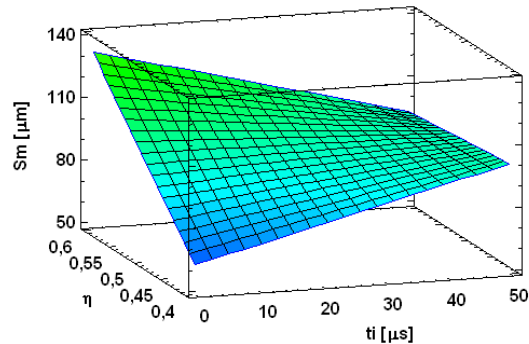


Fig. 6.33. Superficie de respuesta de S_m vs. t_i y η con polaridad negativa

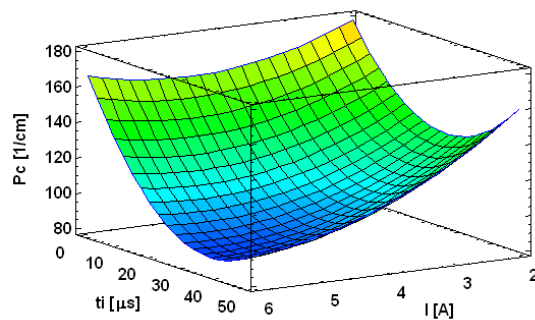


Fig. 6.34. Superficie de respuesta de P_c vs. I y t_i con polaridad negativa

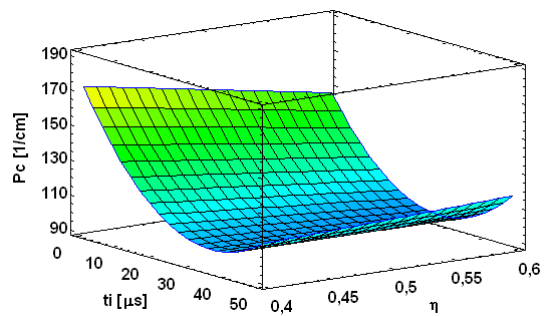


Fig. 6.35. Superficie de respuesta de P_c vs. t_i y η con polaridad negativa

6.4. Análisis mediante microscopía electrónica de barrido

En el presente apartado se analiza, mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), la topografía de las superficies de aquellos experimentos que han conducido al valor máximo y mínimo de R_a . De entre los experimentos realizados, el E7 ($I = 2 \text{ A}$, $t_i = 45 \mu\text{s}$, $\eta = 0,6$) es aquél con el que se ha obtenido un valor mínimo de R_a de $0,82 \mu\text{m}$ y el E6 ($I = 6 \text{ A}$, $t_i = 5 \mu\text{s}$, $\eta = 0,6$), con el que se ha obtenido un valor máximo de R_a de $1,79 \mu\text{m}$. Todos estos resultados se muestran en la Tabla 6.2 correspondiente a los valores experimentales del SiSiC con electrodo de cobre-grafito y polaridad negativa.

La Fig. 6.36 y la Fig. 6.37 muestran las imágenes SEM de las superficies mecanizadas por EDM de los experimentos E7 y E6, respectivamente. Dichas superficies presentan una textura porosa con presencia de microcavidades, que aumentan en número y tamaño al aumentar el valor de la intensidad. Así, la superficie E6 es más irregular, con defectos superficiales más profundos, debido a que la energía suministrada ha fundido mayor cantidad de material.

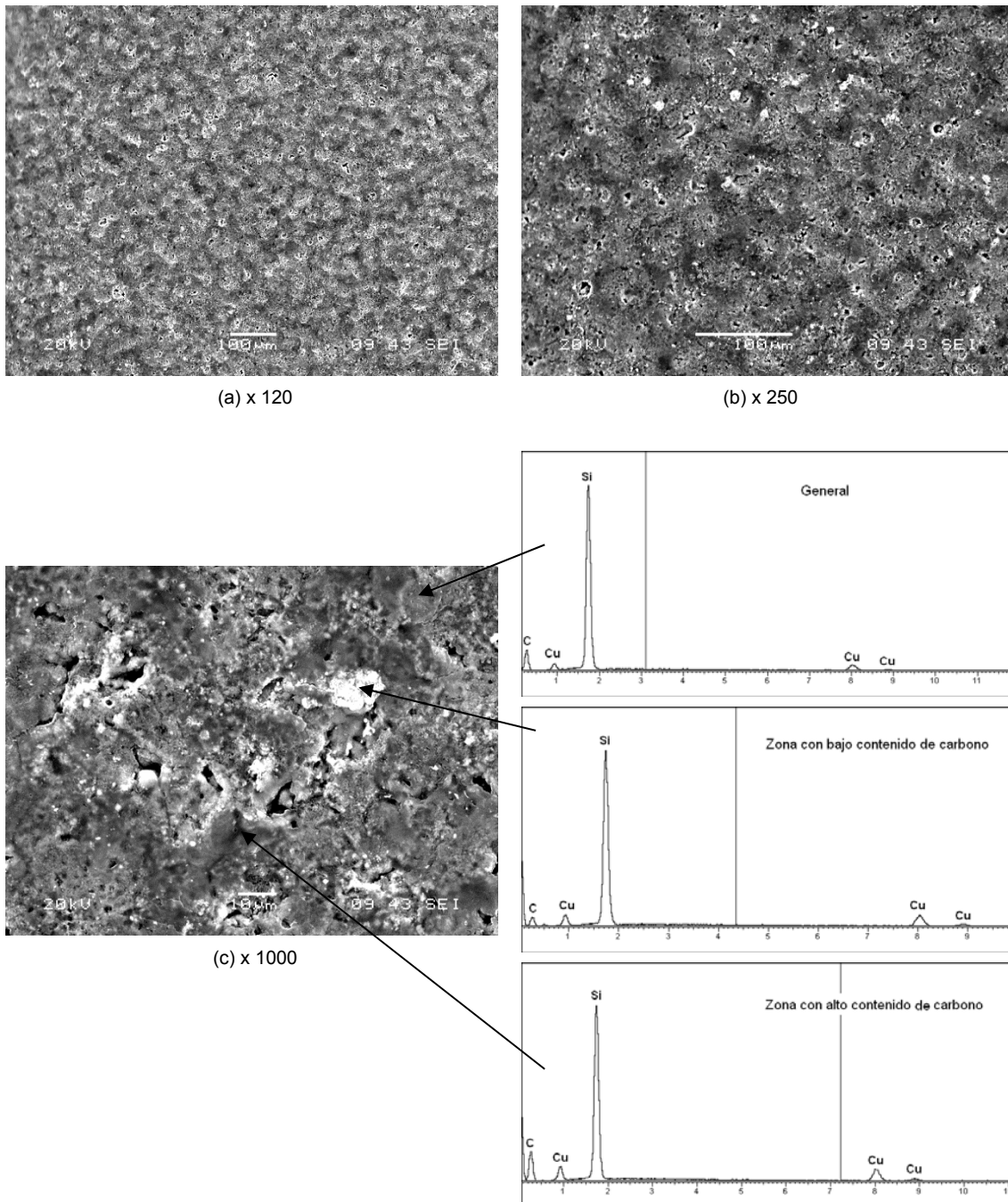


Fig. 6.36. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E7 con mínimo valor de Ra y polaridad negativa a distintos aumentos (x nº aumentos)

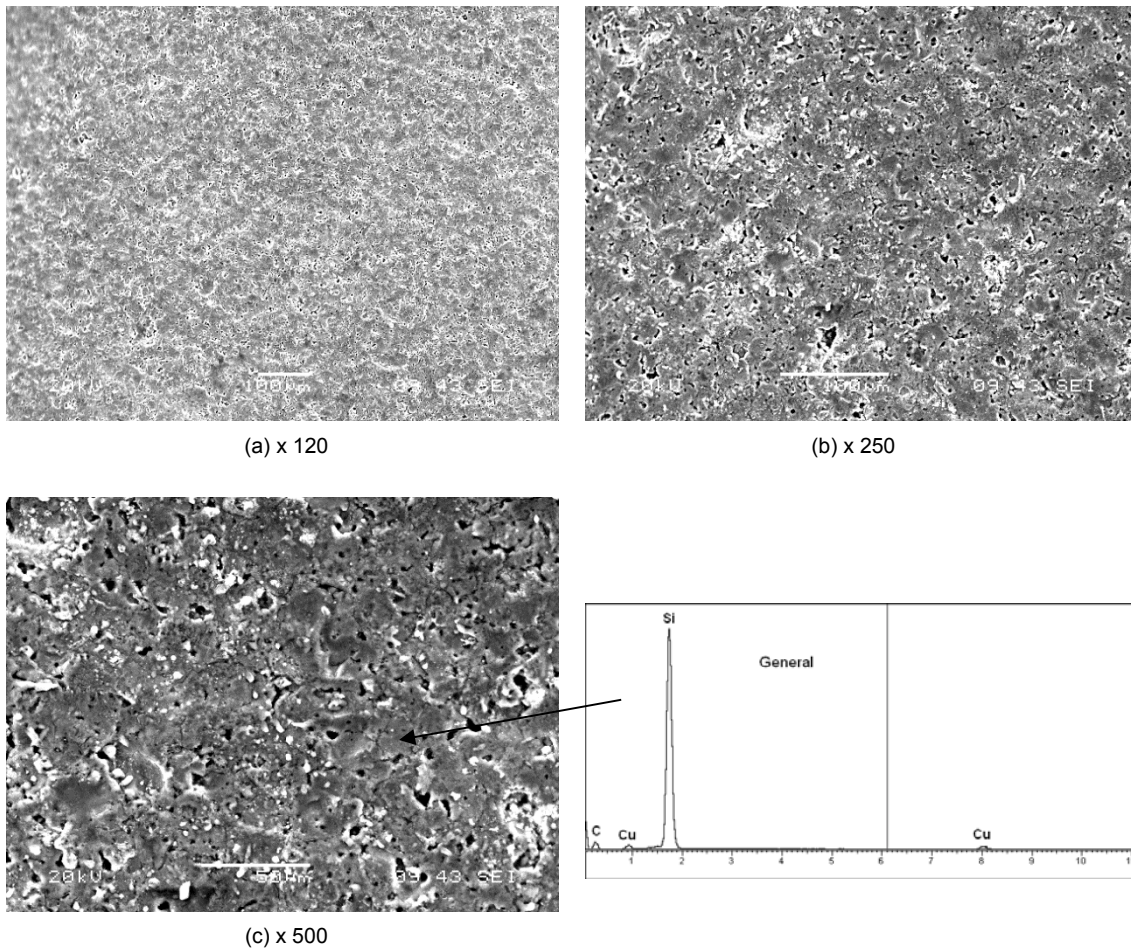


Fig. 6.37. Micrografías electrónicas de barrido del experimento E6 con máximo valor de Ra y polaridad negativa a distintos aumentos (x nº aumentos)

Otra consecuencia del proceso de EDM es la formación de cráteres a lo largo de toda la superficie y cuya forma redondeada se atribuye a la explosión de las burbujas de gas que han quedado retenidas durante el proceso. Para este caso en particular, con las condiciones seleccionadas, no se ha alcanzado una gran diferencia en el valor de la rugosidad entre los experimentos de mayor y menor Ra, por lo que la diferencia en el tamaño y profundidad de los cráteres no es muy apreciable.

Por otra parte, la Fig. 6.36 (c) muestra los resultados del análisis de EDS de diferentes zonas de la superficie del experimento E6. Como puede observarse, el contenido de carbono es mayor en aquellas zonas que presentan un color

más oscuro, mientras que la presencia de cobre y de silicio aumenta en las zonas más claras. El cobre se atribuye a la migración de restos del material del electrodo que se han fundido y, posteriormente, se han resolidificado de manera conjunta con partículas del propio material de la pieza. Asimismo, la concentración de cobre es comparativamente inferior en la superficie del experimento E6 que en la del E7, tal y como se muestra en la Fig. 6.37 (c).

6.5. Recapitulación

En el presente capítulo, se ha realizado un estudio del mecanizado mediante EDM del carburo de silicio (SiSiC) con electrodo de grafito infiltrado con cobre y sujeto a polaridad negativa. Asimismo, dicho estudio se ha centrado en regímenes de acabado. Por otra parte, las variables MRR, EW, Ra y Pc han sido analizadas siguiendo modelos de segundo orden, mientras que, en el resto de los casos, se han empleado modelos de primer orden.

- Con respecto a la variable MRR, la intensidad y el tiempo de impulso resultaron ser los parámetros más influyentes en la tasa de eliminación de material, de manera que los mayores valores de MRR se alcanzaron aplicando pulsos de intensidad energéticos y de alta frecuencia, o lo que es lo mismo, con valores altos de intensidad y valores bajos de tiempo de impulso. Asimismo, el mínimo valor de MRR fue de $0,0890 \text{ mm}^3/\text{min}$ ($I = 2 \text{ A}$, $t_i = 45 \text{ }\mu\text{s}$), mientras que el máximo valor fue de $0,6244 \text{ mm}^3/\text{min}$ (6 A y $5 \text{ }\mu\text{s}$).
- En el caso del desgaste volumétrico del electrodo, el tiempo de impulso fue el único factor influyente en EW, de manera que un aumento del mismo condujo a mayores desgastes. No obstante, cabe destacar que los valores obtenidos de EW bajo estas condiciones fueron muy elevados, siendo el máximo desgaste del 478,08 %.
- En el caso de la rugosidad superficial, la intensidad fue el factor más influyente en Ra, Rq, Rt, Sm y Pc. Asimismo, se observó que para conseguir buenos acabados superficiales, es recomendable la selección de pulsos de

intensidad poco energéticos pero de larga duración, es decir, con valores bajos de intensidad y valores altos de tiempo de impulso. Asimismo, el mínimo valor de Ra fue de $0,82 \mu\text{m}$ ($I = 2 \text{ A}$, $t_i = 45 \mu\text{s}$), mientras que el máximo valor fue de $1,79 \mu\text{m}$ ($I = 6 \text{ A}$, $t_i = 5 \mu\text{s}$). Estos resultados de rugosidad superficial fueron congruentes con los obtenidos de MRR, siendo $0,2000 \text{ mm}^3/\text{min}$ y $0,5237 \text{ mm}^3/\text{min}$, las tasas obtenidas para ambos experimentos.

Finalmente, la Tabla 6.8 y la Tabla 6.9 muestran de manera simplificada los resultados máximos y mínimos obtenidos, así como los factores más significativos para cada una de las variables cuando aumentan de su valor inferior a su valor superior dentro del rango definido para cada uno de ellos.

Variable	MRR (mm^3/min)		EW (%)		Ra (μm)	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
	3,0400	0,1607	16,94	0,95	3,96	1,11

Tabla 6.8. Resultados máximos y mínimos obtenidos

Variable	MRR (mm^3/min)			EW (%)			Ra (μm)		
	I	t_i	η	I	t_i	η	I	t_i	η
	↑	↓			↑		↑		

Tabla 6.9. Factores significativos y su tendencia

CAPÍTULO 7

Modelización del proceso

7. MODELIZACIÓN DEL PROCESO

En este capítulo se propone, por una parte, la modelización de un nuevo parámetro denominado densidad de energía que permite analizar la influencia del proceso de EDM sobre los diferentes materiales objeto de estudio. Una vez desarrollada la modelización, se realiza el análisis de dicho parámetro frente a las variables MRR, EW y rugosidad superficial. Por otra parte, se incluye el desarrollo de las tablas tecnológicas de los diferentes materiales estudiados con el objetivo de facilitar la programación CNC de los equipos de electroerosión que conduzcan a una determinada rugosidad superficial a partir de la optimización de MRR o de EW.

7.1. Modelización y análisis de la densidad de energía

En el presente apartado se propone un nuevo parámetro que se ha denominado densidad de energía (ρ_E) y se analiza su influencia en el proceso de EDM de los materiales seleccionados en la Tesis Doctoral. Dicho parámetro se ha definido como la cantidad de energía que es necesaria invertir por unidad de volumen de material arrancado, y se puede calcular a partir de la Eq. (66).

$$\rho_E = \frac{U_0 \cdot I \cdot \eta}{MRR (1 + EW)} \quad (66)$$

7.1.1. Desarrollo de la modelización

Para determinar ρ_E se ha considerado que durante el proceso de EDM, se elimina material tanto de la pieza como del electrodo, tal y como muestra la Eq. (67), que representa el volumen total de material arrancado ($\Delta\Omega$) durante el proceso,

$$\Delta\Omega = \Delta\Omega_e + \Delta\Omega_p \quad (67)$$

donde Ω_e y Ω_p son el volumen (mm^3) de material del electrodo y de la pieza, respectivamente, que se han eliminado por fusión y vaporización.

A partir de las definiciones de MRR y EW que se indican en la Eq. (2) y en la Eq. (3), respectivamente, del capítulo 3 de la Tesis, $\Delta\Omega$ puede reescribirse según la Eq. (68), donde t_m es el tiempo de mecanizado. MRR viene expresada en mm^3/min y EW en tanto por uno.

$$\Delta\Omega = t_m \cdot MRR (1 + EW) \quad (68)$$

Por otro lado, la densidad de energía definida como un cociente entre energía y volumen, y expresada en kJ/mm^3 , puede definirse según la Eq. (69), tal y como se muestra a continuación. Para simplificar, se ha supuesto que toda la energía se gasta en la eliminación de material, por lo que la energía perdida por disipación de calor no se ha tenido en cuenta.

$$\rho_E = \frac{U_0 \cdot I \cdot t_m}{\Delta\Omega} \quad (69)$$

Además, dado que todo el trabajo de arranque se realiza durante el tiempo de impulso, es decir, no se produce trabajo durante el tiempo de pausa, el término t_m puede ser reemplazado por el producto del tiempo de impulso (t_i) y el número de ciclos (n_c) tal y como muestra la Eq. (70).

$$\rho_E = \frac{U_0 \cdot I \cdot t_i \cdot n_c}{\Delta\Omega} \quad (70)$$

A su vez, $\Delta\Omega$ puede sustituirse por la Eq. (68), de manera que la densidad de energía queda definida según la Eq. (71) mostrada a continuación.

$$\rho_E = \frac{U_0 \cdot I \cdot t_i \cdot n_c}{t_m \cdot MRR (1 + EW)} \quad (71)$$

Por otra parte, el número de ciclos (n_c) y el rendimiento (η) pueden definirse según la Eq. (72) y la Eq. (73), respectivamente.

$$n_c = \frac{t_m}{(t_i + t_o)} \quad (72)$$

$$\eta = \frac{t_i}{(t_i + t_o)} \quad (73)$$

Sustituyendo en la Eq. (71) el tiempo de mecanizado por la Eq. (72), y reorganizando términos teniendo en cuenta la definición de η de la Eq. (73), se obtiene la expresión final de la densidad de energía en función de las variables de diseño, tal y como muestra la Eq (66).

$$\rho_E = \frac{U_0 \cdot I \cdot \eta}{MRR (1 + EW)} \quad (66)$$

Considerando que una parte de esa densidad de energía se emplea en el arranque de material de la pieza y la otra en el arranque de material del electrodo, ρ_E puede descomponerse en la densidad de energía en la pieza (ρ_p) y en el electrodo (ρ_e). A su vez, ambos términos pueden calcularse como un cociente entre energía y volumen, tal y como se muestra en la Eq. (74) y la Eq. (75).

$$\rho_p = \frac{U_0 \cdot I \cdot t_i \cdot n_c}{\Omega_p} = \frac{U_0 \cdot I \cdot t_i \cdot n_c}{MRR \cdot t_m} = \frac{U_0 \cdot I \cdot t_i \cdot n_c}{MRR \cdot n_c \cdot (t_i + t_o)} = \frac{U_0 \cdot I \cdot \eta}{MRR} \quad (74)$$

$$\begin{aligned} \rho_e &= \frac{U_0 \cdot I \cdot t_i \cdot n_c}{\Omega_e} = \frac{U_0 \cdot I \cdot t_i \cdot n_c}{EW \cdot \Omega_p} = \frac{U_0 \cdot I \cdot t_i \cdot n_c}{EW \cdot MRR \cdot t_m} = \\ &= \frac{U_0 \cdot I \cdot t_i \cdot n_c}{EW \cdot MRR \cdot n_c \cdot (t_i + t_o)} = \frac{U_0 \cdot I \cdot \eta}{EW \cdot MRR} \end{aligned} \quad (75)$$

En consecuencia, la Eq. (66), la Eq. (74) y la Eq. (75) pueden expresarse como la igualdad mostrada en la Eq. (76).

$$\frac{MRR (1 + EW)}{U_0 \cdot I \cdot \eta} = \frac{MRR}{U_0 \cdot I \cdot \eta} + \frac{EW \cdot MRR}{U_0 \cdot I \cdot \eta} \quad (76)$$

Finalmente, la Eq. (76) puede reescribirse como la Eq. (77).

$$\frac{1}{\rho_E} = \frac{1}{\rho_p} + \frac{1}{\rho_e} \quad (77)$$

7.1.2. Análisis y discusión de resultados

A continuación, se analizan los resultados obtenidos del parámetro densidad de energía de los distintos materiales seleccionados en la presente Tesis Doctoral (Inconel® 600, TiB₂ y SiSiC). Asimismo, para el caso del Inconel® 600, se analizarán tanto los resultados obtenidos al emplear los distintos materiales de electrodo (Cu, C y Cu-C) como las polaridades positiva y negativa.

Para llevar a cabo el análisis, en primer lugar, se estudiará el comportamiento de la densidad de energía total frente a MRR, EW y al parámetro Ra de rugosidad superficial. En segundo lugar, se analizará la proporción de densidad de energía invertida en el electrodo respecto a la invertida en la pieza.

Las Fig. 7.1-Fig. 7.3 muestran los valores de la densidad de energía total del proceso de EDM de los distintos materiales en función de MRR. Como puede apreciarse en la Fig. 7.1, el valor de la densidad de energía tiende a disminuir al aumentar la tasa de eliminación de material. Es decir, se necesita una cantidad menor de energía cuando el volumen de material arrancado es mayor. Asimismo, de acuerdo a esta figura (Fig. 7.1) y a los resultados experimentales obtenidos y que se detallan en el capítulo 4, se aprecia que todos los experimentos realizados con un valor de intensidad de 2 A son los que mayores valores de densidad de energía han obtenido, siendo, además dichos valores, muy superiores a los obtenidos con el resto de intensidades. *A priori*, estos resultados son lógicos puesto que, como se ha indicado, cuanto menor es la energía de las descargas eléctricas, menor es el arranque de material y, en consecuencia, mayor es la densidad de energía invertida en la pieza. Esta tendencia se mantiene para el caso de todos los materiales de electrodo y polaridades.

Además, en la Fig. 7.1 (b) se observan los mayores valores de ρ_E en el caso de la EDM con electrodo de cobre y polaridad negativa, lo que puede atribuirse al hecho de que, bajo dichas condiciones, se obtuvieron muy bajas tasas de

arranque de material en un tiempo de mecanizado muy superior al empleado en el resto de los casos. De esta manera, el consumo de energía por unidad de volumen arrancado es mayor. En condiciones de desbaste, el principal objetivo es eliminar la mayor cantidad de material posible en el mínimo tiempo y, por ello, los parámetros se programan para que el consumo de energía sea el menor posible y se consiga un elevado rendimiento del proceso. En este caso, la densidad de energía es baja debido a que el volumen de material arrancado de la pieza respecto del volumen total es alto.

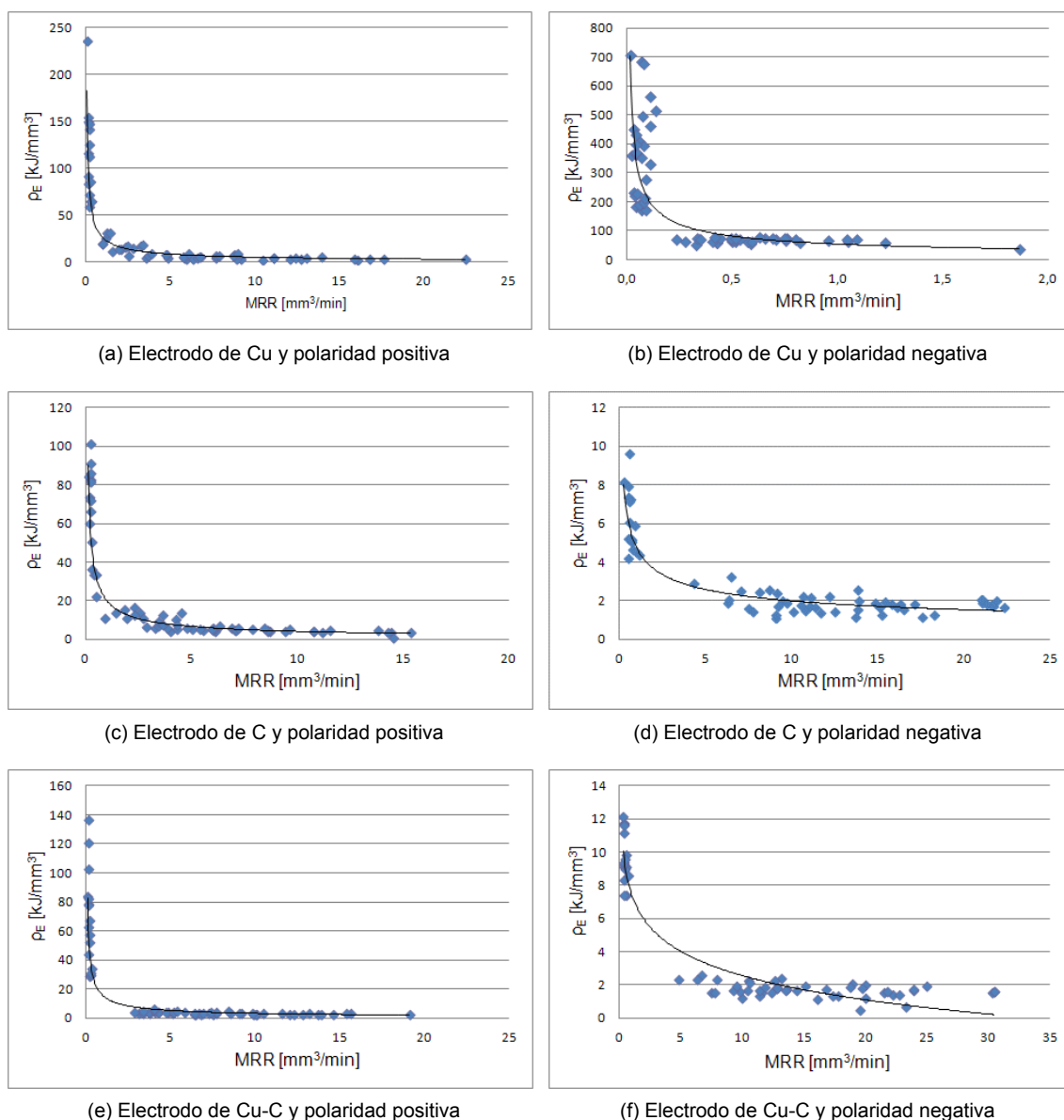


Fig. 7.1. ρ_E vs. MRR para el Inconel® 600 con diferentes electrodos y polaridades

Asimismo, tal y como se observa en la Fig. 7.2, el comportamiento de la densidad de energía frente a MRR de la cerámica TiB₂ sigue la misma tendencia que el obtenido en el caso del Inconel® 600. Con ambos materiales, es posible arrancar altas tasas de volumen de material empleando valores bajos de densidad de energía. Sin embargo, de acuerdo a la Fig. 7.3, en el caso de la cerámica SiSiC no hay una tendencia claramente definida de la relación entre ambos parámetros. Este hecho puede atribuirse a que el ajuste del modelo es peor en comparación con el de los otros casos de estudio.

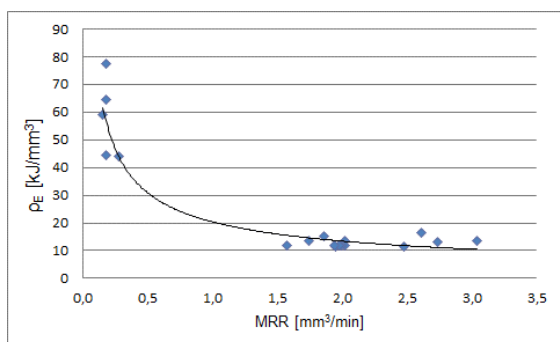


Fig. 7.2. ρ_E vs. MRR para el TiB₂ con electrodo de Cu y polaridad positiva

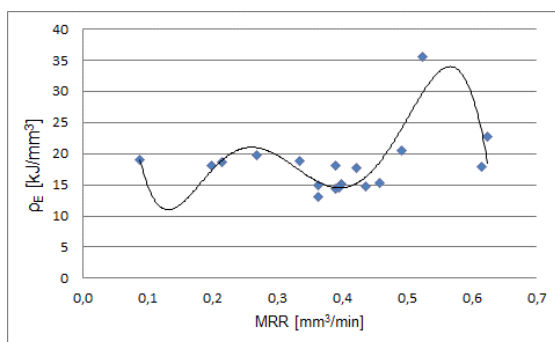


Fig. 7.3. ρ_E vs. MRR para el SiSiC con electrodo de Cu-C y polaridad negativa

Por otra parte las Fig. 7.4-Fig. 7.6 representan, para los diferentes casos de estudio, el parámetro densidad de energía total del proceso frente al desgaste volumétrico del electrodo. Como puede observarse, para cada material, electrodo y polaridad, ρ_E tiene un comportamiento diferente. Asimismo, cabe destacar que, debido a la variabilidad de los resultados obtenidos de EW, los ajustes de los modelos son inferiores a los obtenidos en MRR y Ra.

Por un lado, como se observa en la Fig. 7.4 (b), la Fig. 7.4 (d) y la Fig. 7.4 (f), el valor de la densidad de energía tiende a aumentar al aumentar el desgaste volumétrico del electrodo. Este resultado es congruente con el obtenido de densidad de energía frente a MRR y, en principio, es el esperado. Cuando el arranque de material en la pieza es muy bajo, el desgaste del electrodo tiende a ser muy elevado debido a que se produce mayor fusión del material en él. En consecuencia, la energía invertida en fundir dicho material es, comparativamente, mayor a la invertida en la pieza.

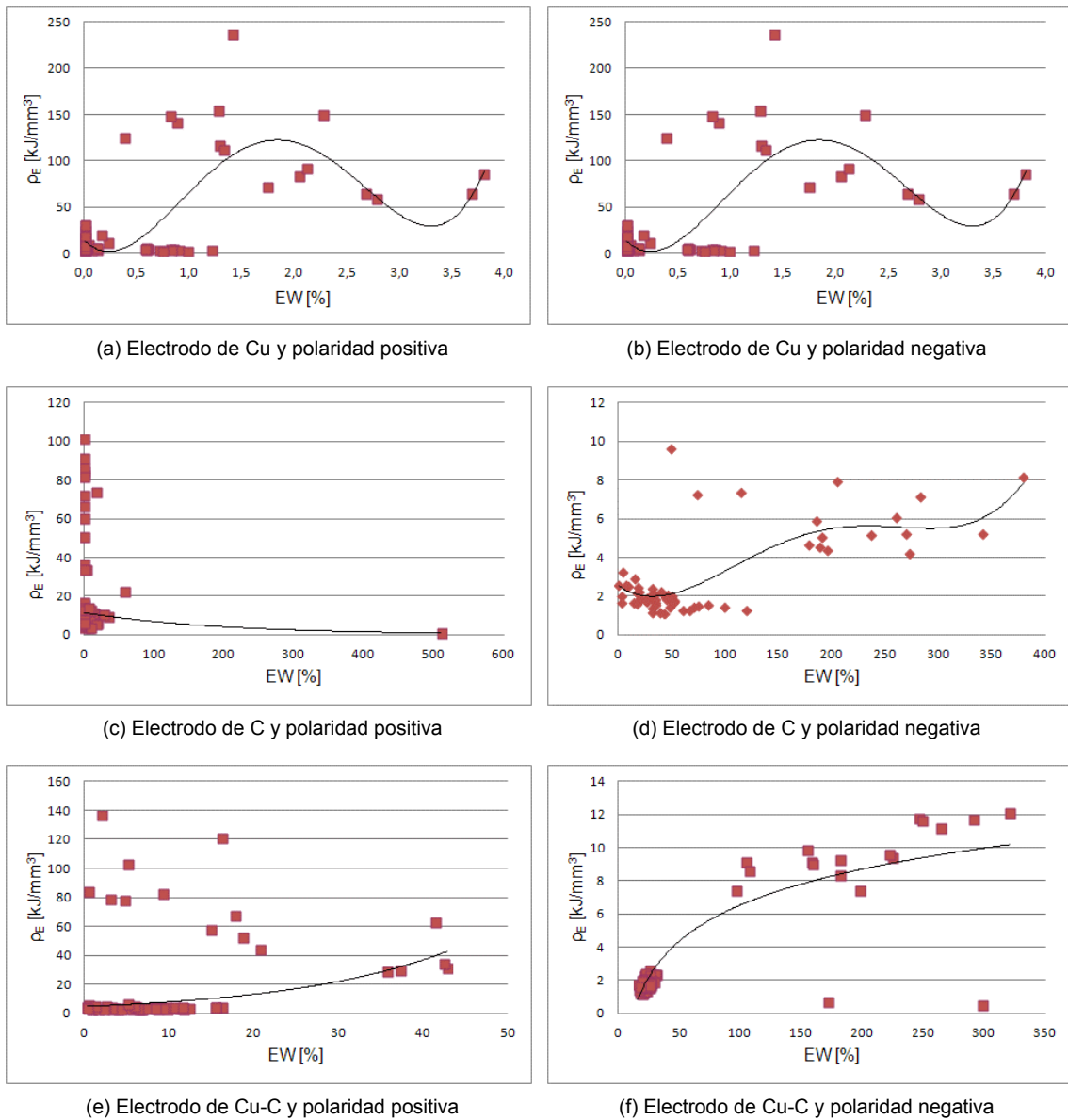


Fig. 7.4. ρ_E vs. EW para el Inconel® 600 con diferentes electrodos y polaridades

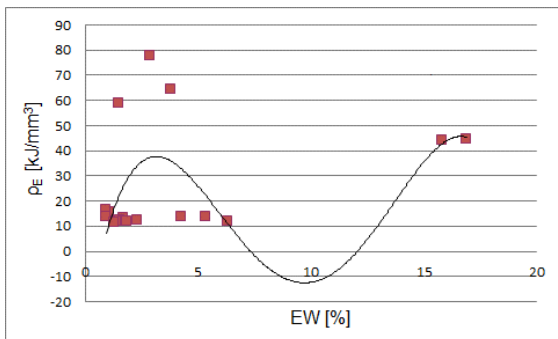


Fig. 7.5. ρ_E vs. EW para el TiB₂ con electrodo de Cu y polaridad positiva

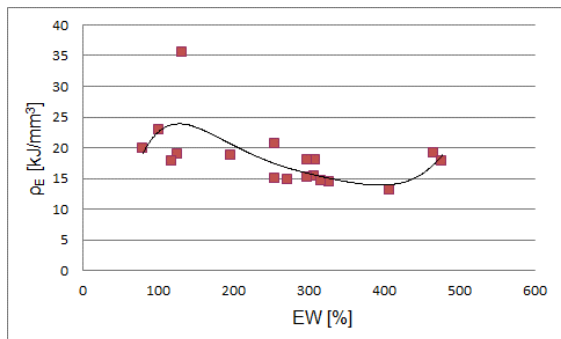
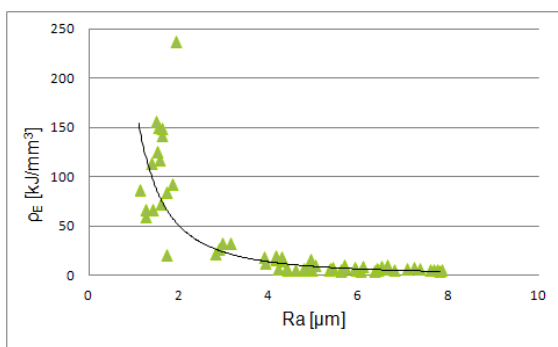
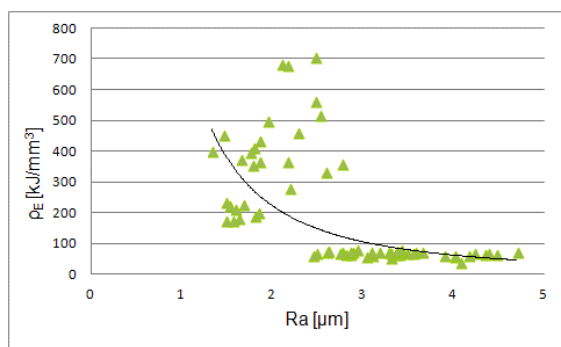


Fig. 7.6. ρ_E vs. EW para el SiSiC con electrodo de Cu-C y polaridad negativa

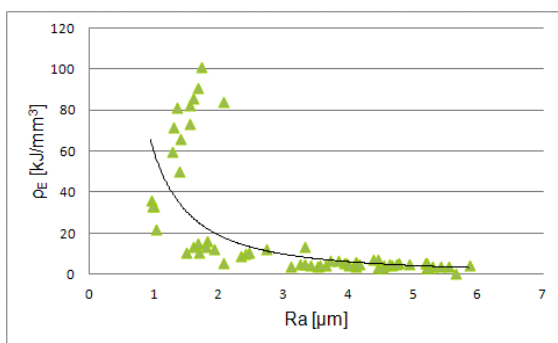
La Fig. 7.7 representa la densidad de energía en función del parámetro de rugosidad Ra, para el Inconel® 600, al emplear los diferentes materiales de electrodo y polaridades positiva y negativa. Tal y como se aprecia, el valor de la densidad de energía es menor al aumentar el valor de Ra. Este resultado coincide con el obtenido en la Fig. 7.1 ya que, como se ha comentado anteriormente, el aumento de la tasa de eliminación de material conduce al aumento de la rugosidad superficial. En condiciones de acabado, el objetivo que se persigue es conseguir que la rugosidad superficial sea buena y que el desgaste del electrodo, que en este tipo de procesos suele ser muy elevado, se minimice lo máximo posible. Para ello, se invierte mucha energía en conseguir una baja tasa de material que deje una superficie homogénea y lisa. En este caso, el tiempo invertido es muy alto y la densidad de energía elevada debido a que el volumen arrancado de material de la pieza respecto del volumen total es bajo.



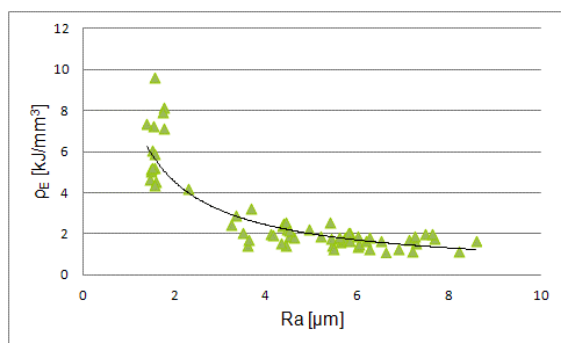
(a) Electrodo de Cu y polaridad positiva



(b) Electrodo de Cu y polaridad negativa



(c) Electrodo de C y polaridad positiva



(d) Electrodo de C y polaridad negativa

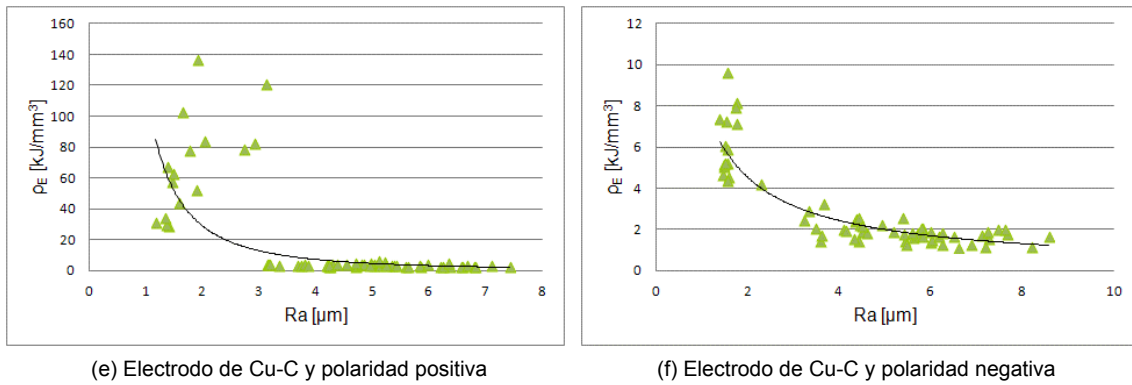


Fig. 7.7. p_E vs. R_a para el Inconel® 600 con diferentes electrodos y polaridades

Por otra parte, la Fig. 7.8 y la Fig. 7.9 representan para el TiB_2 y el $SiSiC$, respectivamente, el parámetro densidad de energía frente a R_a . Como puede apreciarse, en el caso del TiB_2 , el comportamiento de p_E es similar al obtenido en el Inconel® 600 en donde la densidad de energía tendía a disminuir al empeorar el acabado superficial (mayores valores de R_a). Sin embargo, tal y como se muestra en la Fig. 7.9, en el caso del $SiSiC$ se produce la tendencia contraria, incrementándose el valor de la densidad de energía al aumentar la rugosidad superficial. Esta diferencia podría atribuirse tanto a la diferencia de polaridad empleada en cada caso como a las propias propiedades de cada material, que producen diferentes comportamientos en el proceso de EDM.

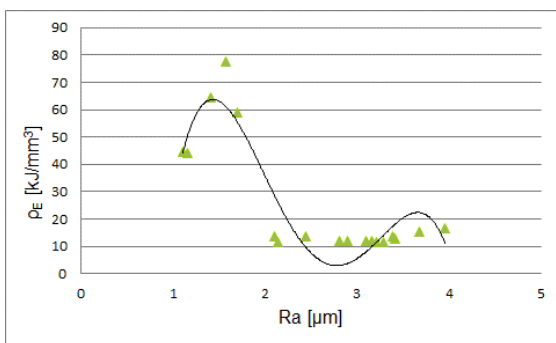


Fig. 7.8. p_E vs. R_a para el TiB_2 con electrodo de Cu y polaridad positiva

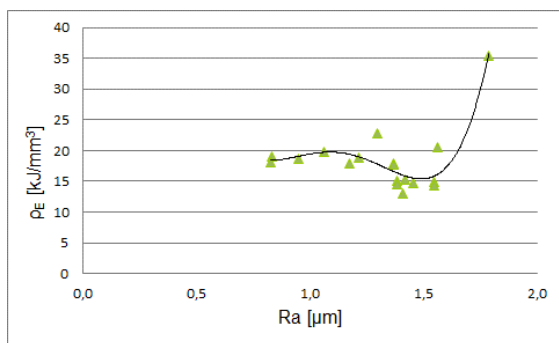


Fig. 7.9. p_E vs. R_a para el $SiSiC$ con electrodo de Cu-C y polaridad negativa

Si se relacionan los resultados obtenidos de densidad de energía frente a R_a con los factores de diseño (I , t_i y η) puede establecerse que la intensidad es el parámetro que mayor influencia presenta en dicha relación. Asimismo, para

cualquier material de electrodo y polaridad seleccionada, todos los experimentos llevados a cabo con un valor de intensidad de 2 A son los que han invertido una mayor densidad de energía en el proceso y aquellos cuya superficie resultante presenta cráteres de menor tamaño y profundidad. El resto de parámetros no presentan una tendencia clara en el comportamiento de ρ_E .

Hasta ahora, el término densidad de energía (ρ_E) analizado es el correspondiente al total del proceso, en el cual intervienen tanto la densidad de energía invertida en el arranque de material de la pieza (ρ_p) como la empleada en el arranque de material del electrodo (ρ_e), y cuyas expresiones quedan definidas en la Eq. (74) y la Eq. (75), respectivamente. Asimismo, dichas ecuaciones quedan relacionadas en la Eq. (76). Las Fig. 7.10-Fig. 7.17 representan, para cada uno de los experimentos realizados, la proporción de densidad de energía destinada al arranque del material de la pieza y la destinada al arranque del material del electrodo.

En vista de los resultados obtenidos con el Inconel® 600, se aprecia que los experimentos llevados a cabo con polaridad negativa presentan una proporción mayor de densidad de energía invertida en el electrodo respecto a los efectuados con polaridad positiva. Además, cabe señalarse que, de estos experimentos, los realizados con un valor de intensidad de 2 A son los que mayores valores de densidad de energía en el electrodo han alcanzado, en comparación con sus homólogos de intensidades 4 A, 6 A y 8 A, tal y como puede observarse en la Fig. 7.11, la Fig. 7.13 y la Fig. 7.15.

Por otra parte, como se aprecia en la Fig. 7.10, que muestra los resultados obtenidos con electrodo de cobre y polaridad positiva, la mayor parte de la densidad de energía se destina en el arranque de material de la pieza, siendo la proporción empleada en el electrodo casi imperceptible.

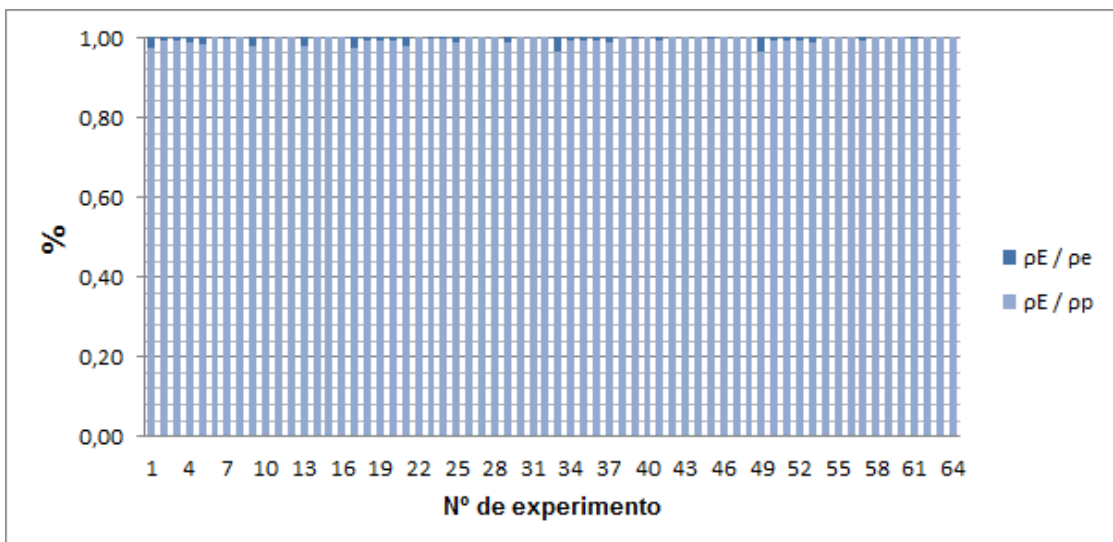


Fig. 7.10. Distribución de la densidad de energía en el electrodo y en la pieza (Experimentos realizados para el Inconel® 600 con electrodo de Cu y polaridad positiva)

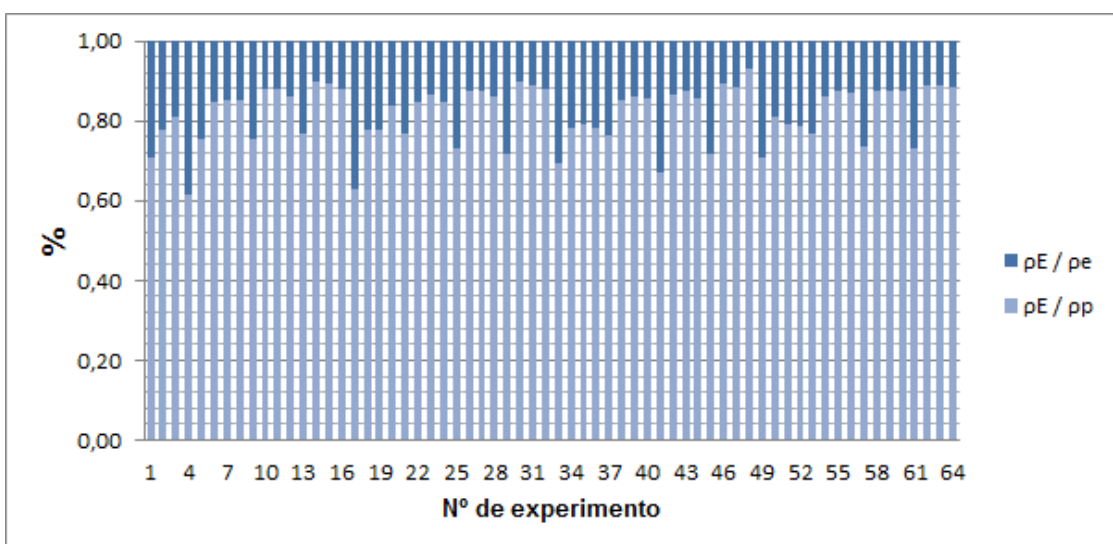


Fig. 7.11. Distribución de la densidad de energía en el electrodo y en la pieza (Experimentos realizados para el Inconel® 600 con electrodo de Cu y polaridad negativa)

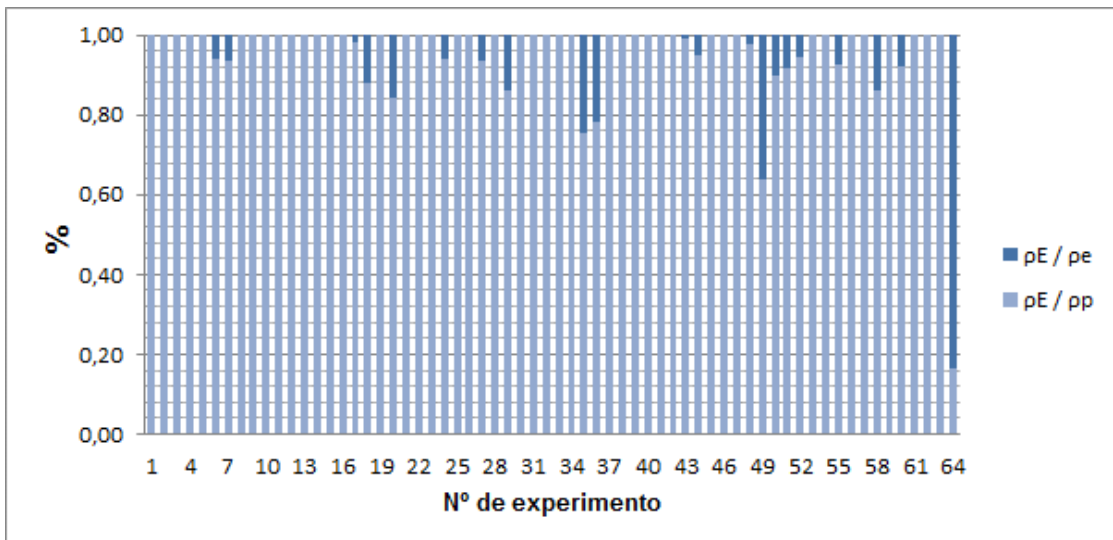


Fig. 7.12. Distribución de la densidad de energía en el electrodo y en la pieza (Experimentos realizados para el Inconel® 600 con electrodo de C y polaridad positiva)

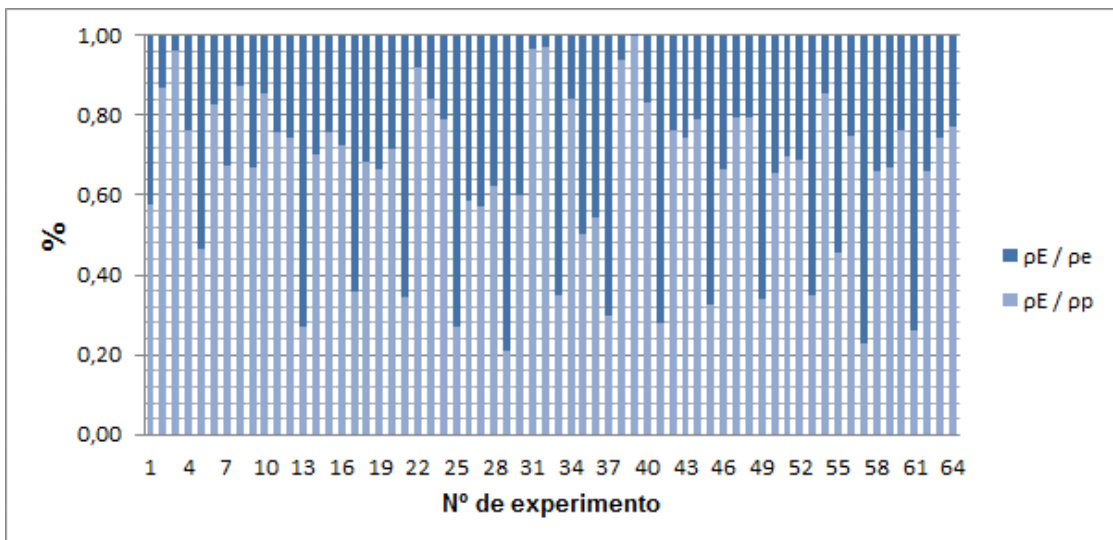


Fig. 7.13. Distribución de la densidad de energía en el electrodo y en la pieza (Experimentos realizados para el Inconel® 600 con electrodo de C y polaridad negativa)

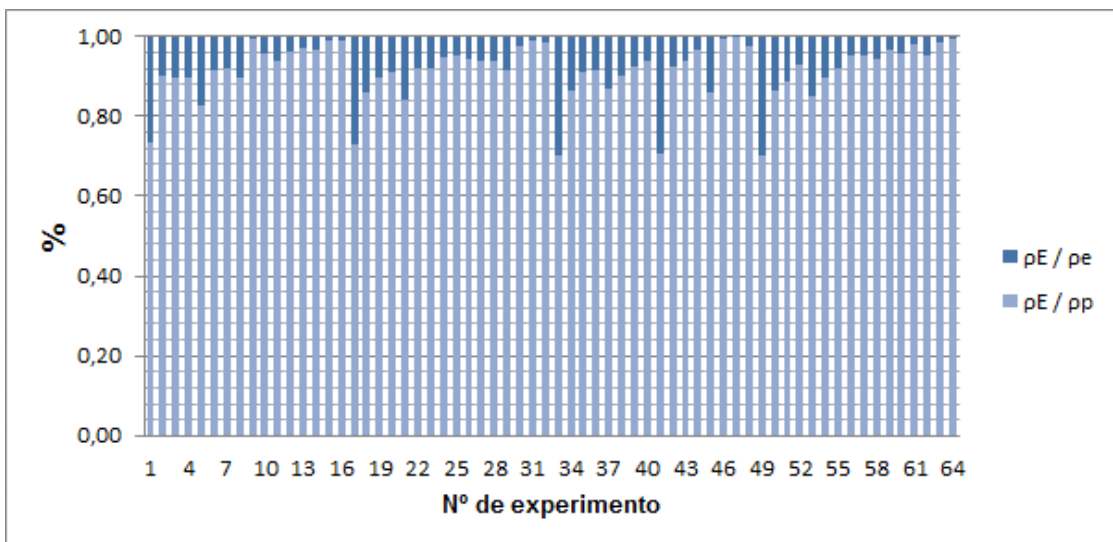


Fig. 7.14. Distribución de la densidad de energía en el electrodo y en la pieza (Experimentos realizados para el Inconel® 600 con electrodo de Cu-C y polaridad positiva)

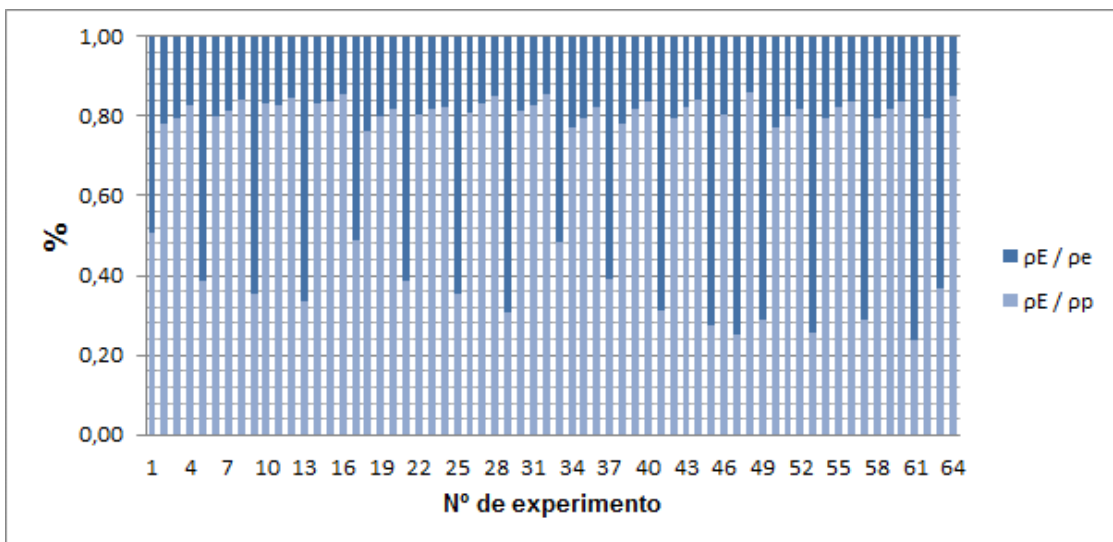


Fig. 7.15. Distribución de la densidad de energía en el electrodo y en la pieza (Experimentos realizados para el Inconel® 600 con electrodo de Cu-C y polaridad negativa)

Por otro lado, como se ha visto en el análisis del Inconel® 600, para el caso de las cerámicas (TiB_2 y $SiSiC$), también se cumple que la densidad de energía invertida en el electrodo respecto a la invertida en la pieza es mayor con polaridad negativa que con polaridad positiva. Este hecho se aprecia en la Fig. 7.16 y la Fig. 7.17 correspondientes a la distribución de la densidad de energía para el TiB_2 y el $SiSiC$, respectivamente.

Asimismo, como se observa en la Fig. 7.16, en el caso del TiB_2 los experimentos llevados a cabo con un valor de intensidad de 2 A presentan mayores valores de densidad de energía en el electrodo que sus respectivos efectuados a 8 A. Además, también se aprecia que los experimentos efectuados con un tiempo de impulso de 5 μs invirtieron mayor densidad de energía en el electrodo respecto a los de 45 μs . Estos hechos hacen suponer que al disminuir la energía y duración de los pulsos (2 A y 5 μs), aumenta la densidad de energía en el electrodo.

Respecto a la cerámica SiSiC, el efecto de la intensidad no presenta una tendencia clara en la relación densidad de energía electrodo-pieza, mientras que el del tiempo de impulso es el opuesto al obtenido en el TiB_2 . En este caso, la densidad de energía en el electrodo aumenta al aumentar el tiempo de impulso, llegando incluso a ser mayor su proporción respecto a la de la pieza con valores iguales y superiores a 25 μs .

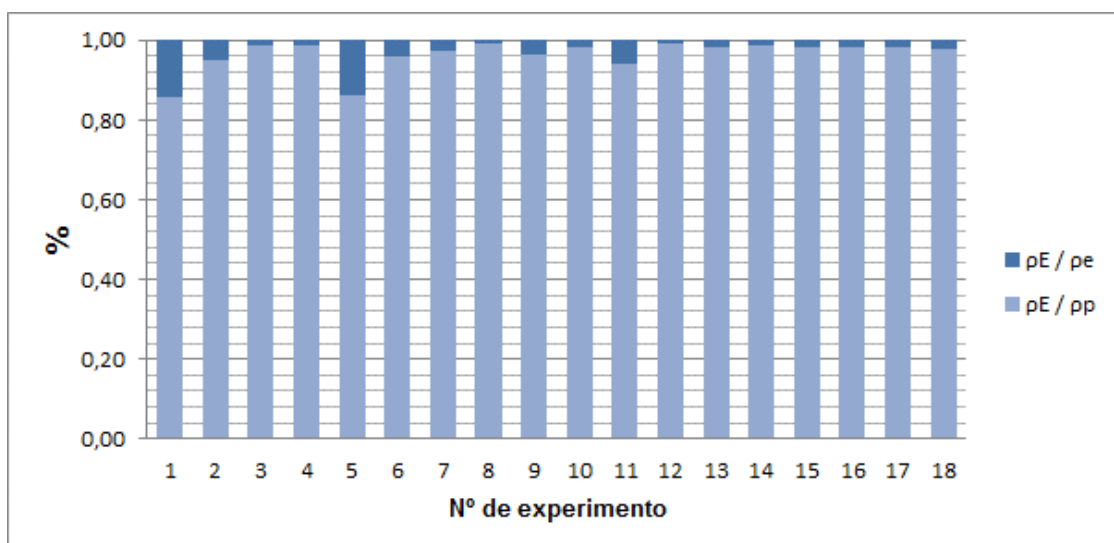


Fig. 7.16. Distribución de la densidad de energía en el electrodo y en la pieza (Experimentos realizados para el TiB_2 con electrodo de Cu y polaridad positiva)

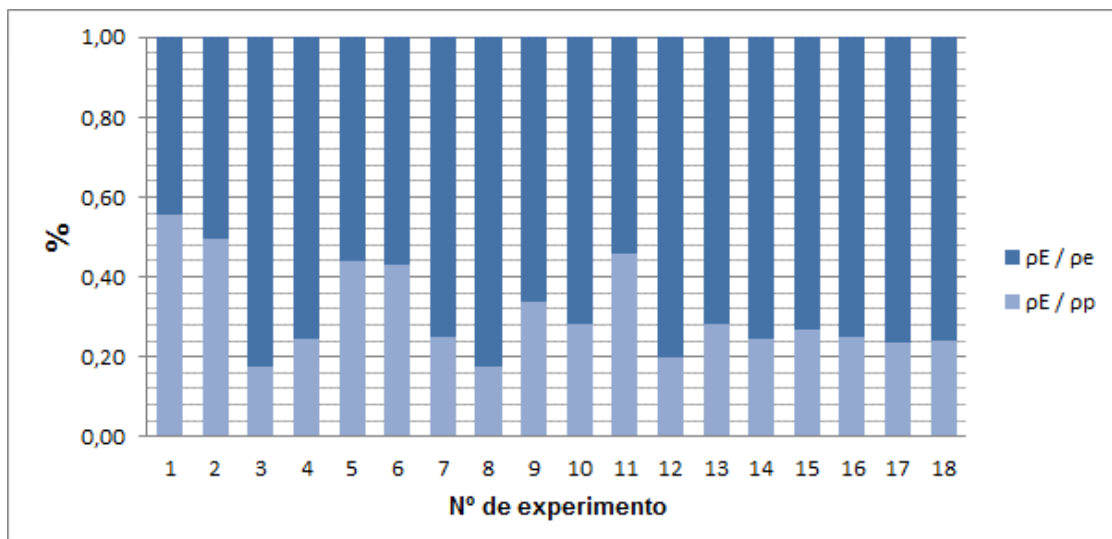


Fig. 7.17. Distribución de la densidad de energía en el electrodo y en la pieza (Experimentos realizados para el SiSiC con electrodo de Cu-C y polaridad negativa)

7.1.3. Recapitulación

En el presente apartado, se ha propuesto un nuevo parámetro denominado densidad de energía (ρ_E) y se ha analizado su influencia frente a MRR, EW y la rugosidad superficial de los materiales estudiados en la presente Tesis Doctoral.

- Los resultados obtenidos, tanto para el Inconel® 600 como para el TiB₂, mostraron que el valor de la densidad de energía total del proceso disminuyó al aumentar la tasa de eliminación de material y, en consecuencia, la rugosidad superficial. Asimismo, se observó que en los experimentos realizados con una intensidad de 2 A se obtuvieron valores de densidad de energía muy superiores a los obtenidos con el resto de intensidades. En el caso del SiSiC, no se obtuvo una tendencia clara de dicho parámetro respecto a MRR, lo que se atribuyó al menor ajuste del modelo en comparación con el resto de los casos estudiados. Respecto a Ra, se observó la tendencia opuesta a la obtenida con el resto de materiales, es decir, se produjo un aumento de ρ_E al aumentar la rugosidad superficial.

- Por otra parte, respecto al desgaste volumétrico del electrodo ρ_E presentó un comportamiento diferente en función del material, electrodo y polaridad. Asimismo, a pesar de la variabilidad de los resultados y de los bajos ajustes de los modelos, se apreció que, en líneas generales, la ρ_E aumentó al aumentar el desgaste volumétrico del electrodo.
- Finalmente, cabe destacar que los experimentos llevados a cabo con polaridad negativa, sea cuales sean los materiales seleccionados, presentaron una distribución de la densidad de energía en el electrodo mayor respecto a los realizados con polaridad positiva.

7.2. Desarrollo de las tablas tecnológicas

Con la finalidad de optimizar las condiciones del proceso de EDM de manera que conduzca a un determinado acabado superficial, a un determinado desgaste del electrodo o a una tasa de eliminación de material se suelen emplear las tablas tecnológicas, lo cual se abordará en el presente capítulo una vez que se ha realizado previamente la experimentación.

Dichas tablas tecnológicas existen fundamentalmente para el caso de los aceros, no siendo así, en líneas generales, para otros tipos de materiales, como es el caso de las aleaciones de baja mecanizabilidad en las que las condiciones óptimas de operación del equipo han de determinarse de forma experimental.

Es por ello que resulta de gran interés industrial el desarrollo de tablas tecnológicas que faciliten al fabricante o usuario de los equipos de EDM la programación del equipo para obtener una serie de propiedades determinadas.

7.2.1. Propuesta de una metodología para el desarrollo de las tablas tecnológicas

En la presente Tesis Doctoral, se propone un procedimiento para la obtención de las tablas tecnológicas de los diferentes materiales estudiados a partir de las

cuales es posible obtener una determinada rugosidad superficial en base a dos estrategias de mecanizado:

1. Maximizar la tasa de eliminación de material.
2. Minimizar el desgaste del electrodo.

Cabe destacar que, con objeto de simplificar el estudio, se ha decidido caracterizar la rugosidad superficial con el parámetro Ra puesto que, en la actualidad, es el parámetro más ampliamente utilizado en el sector industrial. No obstante, la metodología empleada para dicho parámetro es también aplicable al resto de parámetros de rugosidad estudiados (Rq, Rt, Sm y Pc) en el presente documento.

El procedimiento seguido para la generación de las tablas tecnológicas se ha realizado a partir de los valores experimentales obtenidos durante la experimentación y, en aquellos casos donde no se disponía de datos, se ha empleado programación no lineal. En este último caso, se han utilizado los modelos matemáticos generados en base a los resultados experimentales. Estos modelos, obtenidos mediante técnicas de regresión lineal múltiple, definen el comportamiento de las variables estudiadas (tasa de eliminación de material, desgaste volumétrico del electrodo y rugosidad superficial) en función de la intensidad, el tiempo de impulso y el rendimiento. Los resultados experimentales, así como las ecuaciones de cada modelo, quedan detalladas en el capítulo 4 para el caso del Inconel® 600, en el capítulo 5 para el TiB₂ y en el capítulo 6 para el SiSiC.

A continuación, se describe el procedimiento propuesto para la generación de las tablas tecnológicas. Para el cálculo de dichas tablas a partir de los resultados experimentales, en primer lugar, se han ordenado los valores de Ra de menor a mayor y se han establecido los límites superior e inferior. Dicho intervalo se ha clasificado en rangos con un paso determinado. Después, de cada rango, se han seleccionado las condiciones con las cuales se han obtenido, por un lado, el mayor valor de tasa de eliminación de material y, por otro lado, el menor valor de desgaste del electrodo.

En aquellos materiales en los que en determinados rangos no constan datos de los valores de rugosidad, las condiciones de mecanizado se han generado mediante optimización no lineal utilizando el software *MATLAB® R2015a*. Para ello, se ha fijado la función objetivo cuyo valor se quiere bien maximizar (en el caso de MRR) o bien minimizar (en el caso de EW). A continuación, se han establecido las restricciones a las cuales está condicionada la optimización no lineal. En concreto, se establecen el mínimo y el máximo valor de variación de Ra, la cual a su vez es una función no lineal obtenida mediante los modelos que se recogen en la presente Tesis Doctoral. A partir de ello, se han determinado las tablas tecnológicas en rangos de variación de Ra de 0,25 µm. Cabe destacar que se podrían haber fijado otros rangos de variación de Ra o de cualquier otro parámetro de rugosidad, de entre los estudiados en esta Tesis Doctoral, sin pérdida de generalidad de la presente metodología. Finalmente, se han fijado los límites de variación de los parámetros (I , t_i , η) a los que está sujeta la función objetivo (MRR o EW), los cuales vienen determinados por el diseño de experimentos que se ha seleccionado.

La Fig. 7.18 muestra esquemáticamente el procedimiento seguido para la obtención de cada una de las tablas tecnológicas, utilizando tanto los valores experimentales obtenidos como la programación no lineal.

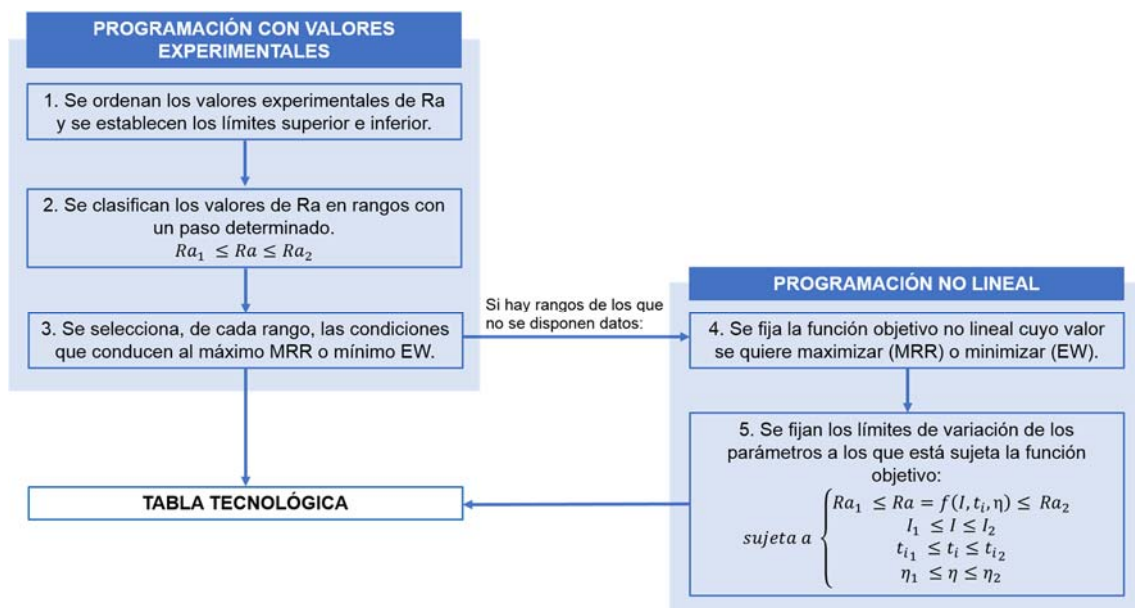


Fig. 7.18. Procedimiento propuesto para la generación de las tablas tecnológicas

A continuación, a modo de ejemplo, se desarrolla el procedimiento propuesto para la generación de la tabla tecnológica de máxima MRR de la cerámica diboruro de titanio empleando electrodo de cobre y polaridad positiva. Se ha seleccionado dicho material para el ejemplo debido al menor número de experimentos realizados, lo que permite simplificar y facilitar la explicación. No obstante, la metodología seguida para el resto de materiales y polaridades ha sido exactamente la misma.

Como se ha indicado anteriormente, y tal y como se observa en la Tabla 7.1, en primer lugar, se han ordenado los valores de Ra de menor a mayor, y se han establecido los límites inferior y superior, que en este caso son de 1 μm y 4 μm, respectivamente.

E	I (A)	t _i (μs)	η	MRR (mm ³ /min)	Ra (μm)
1	2	5	0,4	0,1851	1,11
5	2	5	0,6	0,2824	1,16
9	2	25	0,5	0,1798	1,41
7	2	45	0,6	0,1805	1,57
3	2	45	0,4	0,1607	1,70
2	6	5	0,4	2,0216	2,11
11	4	5	0,5	1,9467	2,14
6	6	5	0,6	3,0400	2,44
13	4	25	0,4	1,5727	2,80
18	4	25	0,5	1,9463	2,90
17	4	25	0,5	1,9770	3,09
16	4	25	0,5	1,9932	3,16
14	4	25	0,6	2,4747	3,21
15	4	25	0,5	2,0190	3,29
12	4	45	0,5	1,7438	3,39
10	6	25	0,5	2,7385	3,41
4	6	45	0,4	1,8639	3,68
8	6	45	0,6	2,6139	3,96

Tabla 7.1. Valores ordenados de Ra

A continuación, el intervalo establecido en $1 \mu\text{m} \leq Ra \leq 4 \mu\text{m}$ se subdivide en rangos con un paso de 0,25 μm, tal y como muestra la Tabla 7.2.

Ra ₁ < (μm)	Ra	< Ra ₂ (μm)
1,00		1,25
1,25		1,50

1,50		1,75
1,75		2,00
2,00		2,25
2,25		2,50
2,50		2,75
2,75		3,00
3,00		3,25
3,25		3,50
3,50		3,75
3,75		4,00

Tabla 7.2. Rangos de Ra

Una vez establecidos los rangos, se seleccionan, de cada uno de ellos, las condiciones (valores de I , t_i y η) que conducen a la máxima MRR. Dichos valores se muestran en la Tabla 7.3.

I (A)	t_i (μs)	η	$Ra_1 <$ (μm)	Ra (μm)	$< Ra_2$ (μm)	MRR (mm^3/min)
2,00	5,00	0,60	1,00	1,16	1,25	0,2824
2,00	25,00	0,50	1,25	1,41	1,50	0,1798
2,00	45,00	0,60	1,50	1,57	1,75	0,1805
6,00	5,00	0,40	2,00	2,11	2,25	2,0216
6,00	5,00	0,60	2,25	2,44	2,50	3,0400
4,00	25,00	0,50	2,75	2,90	3,00	1,9463
4,00	25,00	0,60	3,00	3,21	3,25	2,4747
6,00	25,00	0,50	3,25	3,41	3,50	2,7385
6,00	45,00	0,40	3,50	3,68	3,75	1,8639
6,00	45,00	0,60	3,75	3,96	4,00	2,6139

Tabla 7.3. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR

Como puede observarse, para el rango $1,75 \mu m < Ra < 2,00 \mu m$ y el rango $2,50 \mu m < Ra < 2,75 \mu m$, denominados en la Fig. 7.19 “rango 1” y “rango 2”, respectivamente, no se obtuvieron valores experimentales, por lo que se empleará optimización no lineal para su cálculo.

La Fig. 7.19 muestra los pasos seguidos para su obtención, para los cuales se han utilizado las ecuaciones de los modelos de MRR y Ra correspondientes a las ecuaciones (52) y (54), respectivamente.

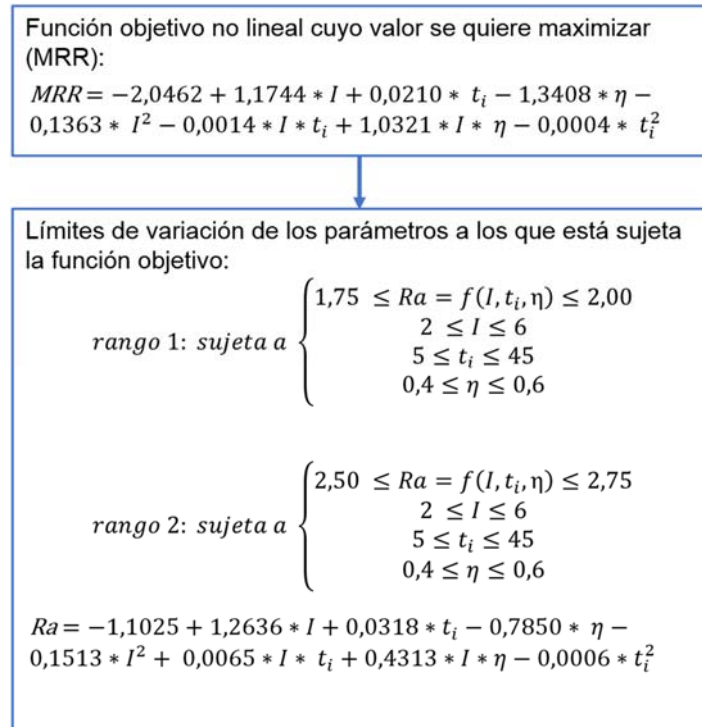


Fig. 7.19. Optimización no lineal para la estrategia de máxima MRR del TiB₂

Finalmente, con los valores generados a partir de la optimización no lineal se completan los rangos de valores desiertos mostrados en la Tabla 7.3 y se obtiene la tabla tecnológica correspondiente a la estrategia de máxima MRR y cuyos resultados se muestran en la Tabla 7.4. En dicha tabla, los valores obtenidos por optimización no lineal están resaltados en negrita.

I (A)	t _i (μs)	η	Ra ₁ < (μm)	Ra (μm)	< Ra ₂ (μm)	Máx. MRR (mm ³ /min)
2,00	5,00	0,60	1,00	1,16	1,25	0,2824
2,00	25,00	0,50	1,25	1,41	1,50	0,1798
2,00	45,00	0,60	1,50	1,57	1,75	0,1805
3,20	5,00	0,60	1,75	2,00	2,00	1,5701
6,00	5,00	0,40	2,00	2,11	2,25	2,0216
6,00	5,00	0,60	2,25	2,44	2,50	3,0400
6,00	9,78	0,60	2,50	2,75	2,75	3,0888
4,00	25,00	0,50	2,75	2,90	3,00	1,9463
4,00	25,00	0,60	3,00	3,21	3,25	2,4747
6,00	25,00	0,50	3,25	3,41	3,50	2,7385
6,00	45,00	0,40	3,50	3,68	3,75	1,8639
6,00	45,00	0,60	3,75	3,96	4,00	2,6139

Tabla 7.4. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR en el mecanizado del TiB₂ con electrodo de Cu y polaridad positiva

7.2.2. Desarrollo de las tablas tecnológicas del Inconel® 600

De la Tabla 7.5 a la Tabla 7.16 se muestran los valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR y mínimo EW correspondientes al Inconel® 600 empleando diferentes materiales para el electrodo y polaridades positiva y negativa. Dichas tablas se han obtenido a partir de los resultados experimentales mostrados en el capítulo 4 y siguiendo la metodología anteriormente descrita. Asimismo, los rangos resaltados en negrita han sido generados a partir de optimización no lineal y sus valores, tal y como ocurría con el TiB₂, son superiores a los obtenidos en la experimentación. Esta variabilidad es debida al gran rango de variación de los límites tomados de los factores de diseño ($2 A \leq I \leq 8 A$, $50 \mu s \leq t_i \leq 500 \mu s$, $0,4 \leq \eta \leq 0,9$). A continuación, se comentan los resultados obtenidos.

La Tabla 7.5 muestra los valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de cobre y polaridad positiva. Como puede observarse en dicha tabla, la intensidad es el principal factor que influye en Ra, diferenciándose cuatro rangos en función de dicho factor: para una intensidad de 2 A se obtiene un rango de $1,00 \mu m \leq Ra \leq 2,00 \mu m$, para valores cercanos a 3 A y 4 A se obtiene un rango de $2,00 \mu m < Ra \leq 4,50 \mu m$, para valores aproximados de 6 A se obtiene un rango de $4,50 \mu m < Ra \leq 5,50 \mu m$ y, finalmente, para una intensidad de 8 A el rango es de $5,50 \mu m < Ra \leq 8,00 \mu m$. Asimismo, respecto al tiempo de impulso, cuyo valor varía de 50 μs a 500 μs , se aprecia, en general, un aumento de su valor al aumentar el valor de Ra para los cuatro intervalos definidos.

I (A)	t _i (μs)	η	Ra ₁ < (μm)	Ra (μm)	< Ra ₂ (μm)	Máx. MRR (mm ³ /min)
2,00	50,00	0,80	1,00	1,22	1,25	0,2812
2,00	50,00	0,60	1,25	1,39	1,50	0,2117
2,00	500,00	0,80	1,50	1,68	1,75	0,9161
2,00	500,00	0,40	1,75	1,83	2,00	0,1020
2,83	50,00	0,90	2,00	2,25	2,25	3,1152
3,06	50,00	0,90	2,25	2,50	2,50	3,6952
3,30	50,00	0,90	2,50	2,75	2,75	4,3110
4,00	500,00	0,90	2,75	2,94	3,00	1,3530
4,00	500,00	0,80	3,00	3,12	3,25	1,1955
4,06	50,00	0,90	3,25	3,50	3,50	6,4074

4,33	50,00	0,90	3,50	3,75	3,75	7,2037
4,00	350,00	0,90	3,75	3,87	4,00	2,3914
4,00	50,00	0,60	4,00	4,18	4,25	4,8347
4,00	50,00	0,80	4,25	4,36	4,50	6,5588
6,00	50,00	0,80	4,50	4,74	4,75	12,0178
6,00	50,00	0,40	4,75	4,93	5,00	5,8814
6,25	50,00	0,90	5,00	5,25	5,25	13,5321
6,00	350,00	0,90	5,25	5,32	5,50	11,1059
8,00	50,00	0,90	5,50	5,56	5,75	22,4729
8,00	50,00	0,80	5,75	5,91	6,00	16,7905
8,00	50,00	0,40	6,00	6,01	6,25	9,1398
8,00	50,00	0,60	6,25	6,32	6,50	16,0638
8,00	350,00	0,90	6,50	6,57	6,75	13,8904
8,00	200,00	0,90	6,75	6,75	7,00	17,5732
8,00	500,00	0,60	7,00	7,20	7,25	7,6553
8,00	350,00	0,80	7,25	7,33	7,50	12,9930
8,00	200,00	0,60	7,50	7,55	7,75	12,7257
8,00	200,00	0,80	7,75	7,81	8,00	15,8770

Tabla 7.5. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de Cu y polaridad positiva

En la Tabla 7.6 correspondiente a la estrategia de mínimo desgaste de electrodo, se aprecia, de nuevo, la influencia de la intensidad sobre Ra. Asimismo, a excepción del rango $1,00 \mu\text{m} \leq \text{Ra} \leq 1,25 \mu\text{m}$, para el resto de rangos de Ra los mínimos desgastes se dan con valores altos de tiempo de impulso, sean cuales sean los valores de intensidad y rendimiento.

I (A)	t _i (μs)	η	Ra ₁ < (μm)	Ra (μm)	< Ra ₂ (μm)	Mín. EW (%)
2,00	50,00	0,40	1,00	1,23	1,25	2,79
2,00	500,00	0,90	1,25	1,48	1,50	0,38
2,00	500,00	0,80	1,50	1,68	1,75	0,16
2,00	500,00	0,60	1,75	1,90	2,00	1,41
3,14	500,00	0,90	2,00	2,25	2,25	0,03
3,38	500,00	0,90	2,25	2,50	2,50	-0,09
3,63	500,00	0,90	2,50	2,75	2,75	-0,19
4,00	500,00	0,60	2,75	2,85	3,00	-0,14
4,00	500,00	0,80	3,00	3,12	3,25	-0,09
4,43	500,00	0,90	3,25	3,50	3,50	-0,45
4,72	500,00	0,90	3,50	3,75	3,75	-0,51
4,00	350,00	0,90	3,75	3,87	4,00	-0,12
6,00	500,00	0,90	4,00	4,13	4,25	-0,22
6,00	500,00	0,40	4,25	4,29	4,50	-0,10
4,00	200,00	0,60	4,50	4,57	4,75	0,00

4,00	350,00	0,60	4,75	4,90	5,00	-0,18
5,69	422,34	0,90	5,00	5,09	5,25	-0,63
6,00	350,00	0,40	5,25	5,40	5,50	-0,04
6,00	350,00	0,80	5,50	5,65	5,75	0,00
6,00	200,00	0,80	5,75	5,88	6,00	0,13
8,00	500,00	0,80	6,00	6,07	6,25	0,01
6,00	350,00	0,60	6,25	6,47	6,50	-0,13
8,00	350,00	0,90	6,50	6,57	6,75	-0,19
8,00	200,00	0,90	6,75	6,75	7,00	0,01
8,00	500,00	0,60	7,00	7,20	7,25	-0,17
8,00	350,00	0,80	7,25	7,33	7,50	0,02
8,00	350,00	0,60	7,50	7,72	7,75	-0,12
8,00	200,00	0,40	7,75	7,77	8,00	-0,05

Tabla 7.6. Valores obtenidos para la estrategia de mínimo EW en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de Cu y polaridad positiva

La Tabla 7.7 y la Tabla 7.8 muestran los valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR y mínimo EW, respectivamente, en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de cobre y polaridad negativa. Como puede observarse, todos los valores se han obtenido a partir de los valores experimentales y no ha sido necesario emplear programación no lineal.

De acuerdo a la Tabla 7.7 se aprecian las tasas más bajas de MRR en el intervalo $1,25 \mu\text{m} \leq Ra \leq 2,25 \mu\text{m}$, no llegando a superar el valor de $0,1 \text{ mm}^3/\text{min}$. De los cuatro rangos definidos dentro de ese intervalo, los tres primeros presentan un valor de intensidad de 2 A y valores altos de rendimiento, mientras que el cuarto intervalo presenta una intensidad de 8 A y un rendimiento de 0,4. Respecto al tiempo de impulso, se obtienen valores bajos de t_i ($50 \mu\text{s}$) para conseguir el máximo arranque en el intervalo $1,75 \mu\text{m} \leq Ra \leq 2,25 \mu\text{m}$, mientras que en el resto de los casos el valor del tiempo de impulso se mantiene elevado.

I (A)	t_i (μs)	η	$Ra_1 < (\mu\text{m})$	Ra (μm)	$< Ra_2 (\mu\text{m})$	Máx. MRR (mm^3/min)
2,00	200,00	0,80	1,25	1,48	1,50	0,0838
2,00	200,00	0,90	1,50	1,58	1,75	0,0779
2,00	50,00	0,90	1,75	1,84	2,00	0,0759
8,00	50,00	0,40	2,00	2,19	2,25	0,0842
4,00	350,00	0,40	2,25	2,44	2,50	0,2706
4,00	350,00	0,90	2,50	2,61	2,75	0,4896

6,00	200,00	0,60	2,75	2,86	3,00	0,5698
6,00	500,00	0,80	3,00	3,17	3,25	0,6888
6,00	500,00	0,90	3,25	3,37	3,50	0,7464
8,00	200,00	0,80	3,50	3,54	3,75	0,9546
8,00	500,00	0,60	3,75	3,89	4,00	0,8181
8,00	500,00	0,80	4,00	4,07	4,25	1,8621
8,00	500,00	0,90	4,25	4,38	4,50	1,0891
8,00	200,00	0,90	4,50	4,70	4,75	1,0433

Tabla 7.7. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de Cu y polaridad negativa

En la Tabla 7.8 se observa una disminución de EW y un aumento de Ra al aumentar el valor de la intensidad para el rango $1,25 \mu\text{m} \leq \text{Ra} \leq 3,50 \mu\text{m}$. Asimismo, para valores mayores de Ra de $2,50 \mu\text{m}$, el valor del tiempo de impulso se mantiene en torno a valores altos sea cual sea el intervalo de variación.

I (A)	t _i (μs)	η	Ra ₁ < (μm)	Ra (μm)	< Ra ₂ (μm)	Mín. EW (%)
2,00	200,00	0,80	1,25	1,48	1,50	30,83
4,00	50,00	0,80	1,50	1,75	1,75	28,13
6,00	50,00	0,40	1,75	1,79	2,00	23,77
6,00	50,00	0,90	2,00	2,16	2,25	26,09
4,00	350,00	0,40	2,25	2,44	2,50	13,85
4,00	500,00	0,80	2,50	2,74	2,75	11,78
4,00	500,00	0,60	2,75	2,80	3,00	11,47
6,00	500,00	0,40	3,00	3,09	3,25	11,98
4,00	500,00	0,40	3,25	3,30	3,50	11,24
6,00	350,00	0,90	3,50	3,65	3,75	14,06
8,00	500,00	0,60	3,75	3,89	4,00	13,88
8,00	500,00	0,80	4,00	4,07	4,25	7,40
8,00	500,00	0,90	4,25	4,38	4,50	13,01
8,00	200,00	0,90	4,50	4,70	4,75	14,66

Tabla 7.8. Valores obtenidos para la estrategia de mínimo EW en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de Cu y polaridad negativa

La Tabla 7.9 y la Tabla 7.10 muestran los valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR y mínimo EW, respectivamente, en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de grafito y polaridad positiva. Como puede observarse, tan sólo el rango $2,75 \mu\text{m} \leq \text{Ra} \leq 3,00 \mu\text{m}$ se ha obtenido por

optimización no lineal. De nuevo, se observa la influencia de la intensidad en Ra y MRR que, en general, tienden a aumentar su valor al aumentar la intensidad. Asimismo, también se observa que para los rangos más bajos de Ra, el tiempo de impulso también es bajo, no llegando a superar los 25 μ s.

I (A)	t _i (μ s)	η	Ra ₁ < (μ m)	Ra (μ m)	< Ra ₂ (μ m)	Máx. MRR (mm ³ /min)
2,00	5,00	0,60	0,75	0,97	1,00	0,4284
2,00	5,00	0,70	1,00	1,01	1,25	0,4747
2,00	25,00	0,40	1,25	1,49	1,50	0,8402
4,00	5,00	0,50	1,50	1,68	1,75	1,8884
6,00	5,00	0,50	1,75	1,80	2,00	2,5261
8,00	5,00	0,50	2,00	2,05	2,25	6,8815
8,00	5,00	0,60	2,25	2,40	2,50	4,2485
6,00	5,00	0,70	2,50	2,72	2,75	3,5792
8,00	8,13	0,70	2,75	3,00	3,00	8,4536
4,00	25,00	0,50	3,00	3,24	3,25	4,2895
4,00	25,00	0,70	3,25	3,31	3,50	5,9116
6,00	25,00	0,60	3,50	3,54	3,75	8,5604
8,00	25,00	0,70	3,75	3,99	4,00	13,7783
8,00	25,00	0,40	4,00	4,11	4,25	8,6599
8,00	25,00	0,50	4,25	4,43	4,50	11,1679
8,00	25,00	0,60	4,50	4,51	4,75	14,3936
6,00	75,00	0,50	4,75	4,76	5,00	6,0046
8,00	50,00	0,70	5,00	5,19	5,25	15,3602
8,00	75,00	0,50	5,25	5,29	5,50	10,7382
8,00	75,00	0,70	5,50	5,64	5,75	14,4956
8,00	75,00	0,60	5,75	5,85	6,00	11,5018

Tabla 7.9. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de C y polaridad positiva

En la Tabla 7.10, en general, se observan los rangos más bajos de Ra con una intensidad de 2 A y los más altos con 8 A. Asimismo, para un valor dado de intensidad, el valor de Ra, aumenta al aumentar el tiempo de impulso.

I (A)	t _i (μ s)	η	Ra ₁ < (μ m)	Ra (μ m)	< Ra ₂ (μ m)	Mín. EW (%)
2,00	5,00	0,40	0,75	0,94	1,00	-701,04
2,00	5,00	0,70	1,00	1,01	1,25	57,09
2,00	50,00	0,40	1,25	1,27	1,50	-1312,96
2,00	75,00	0,60	1,50	1,59	1,75	-214,73
8,00	5,00	0,40	1,75	1,81	2,00	-120,67
2,00	75,00	0,40	2,00	2,06	2,25	-378,39
4,00	5,00	0,70	2,25	2,46	2,50	11,27

6,00	5,00	0,70	2,50	2,72	2,75	8,83
2,79	56,88	0,40	2,75	2,75	3,00	-384,10
4,00	25,00	0,50	3,00	3,24	3,25	-26,72
4,00	25,00	0,70	3,25	3,31	3,50	-42,16
6,00	25,00	0,60	3,50	3,54	3,75	-14,28
4,00	50,00	0,40	3,75	3,96	4,00	-503,10
4,00	75,00	0,40	4,00	4,11	4,25	-73,21
4,00	75,00	0,70	4,25	4,38	4,50	-21,52
6,00	50,00	0,40	4,50	4,54	4,75	-147,68
6,00	75,00	0,40	4,75	4,93	5,00	-25,41
8,00	50,00	0,40	5,00	5,21	5,25	-59,24
8,00	50,00	0,50	5,25	5,41	5,50	-71,32
8,00	75,00	0,40	5,50	5,54	5,75	-18,30
8,00	75,00	0,60	5,75	5,85	6,00	2,38

Tabla 7.10. Valores obtenidos para la estrategia de mínimo EW en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de C y polaridad positiva

La Tabla 7.11 y la Tabla 7.12 muestran los valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR y mínimo EW, respectivamente, en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de grafito y polaridad negativa. Los valores obtenidos por programación no lineal están resaltados en negrita. Cabe destacar el gran rango de variación de los límites de Ra obtenidos en dicha tabla, que van desde 1,25 µm a 8,75 µm.

En la Tabla 7.11 se puede observar que para conseguir el menor rango de Ra ($1,25 \mu\text{m} \leq Ra \leq 1,50 \mu\text{m}$), es necesario seleccionar el menor valor tanto de la intensidad como el del tiempo de impulso, que en este caso son: $I = 2 \text{ A}$, $t_i = 25 \mu\text{s}$. Por otra parte, para conseguir el mayor rango de Ra, el valor de ambos parámetros debe ser máximo ($I = 8 \text{ A}$, $t_i = 100 \mu\text{s}$). Asimismo, es evidente que el aumento de estos factores no sólo aumenta el valor de Ra sino también el de MRR, pasando de $0,7383 \text{ mm}^3/\text{min}$ a $22,2854 \text{ mm}^3/\text{min}$.

I (A)	t _i (µs)	η	Ra ₁ < (µm)	Ra (µm)	< Ra ₂ (µm)	Máx. MRR (mm ³ /min)
2,00	25,00	0,40	1,25	1,45	1,50	0,7383
2,00	25,00	0,60	1,50	1,54	1,75	1,1121
2,00	100,00	0,60	1,75	1,75	2,00	0,5253
2,59	25,00	0,60	2,00	2,25	2,25	4,7705
2,00	100,00	0,30	2,25	2,28	2,50	0,4596
3,04	25,00	0,60	2,50	2,75	2,75	6,4184
3,29	25,00	0,60	2,75	3,00	3,00	7,2984

4,00	25,00	0,50	3,00	3,23	3,25	8,1018
4,00	25,00	0,40	3,25	3,47	3,50	6,3300
6,00	25,00	0,50	3,50	3,58	3,75	12,4988
4,56	25,00	0,60	3,75	4,00	4,00	11,5199
6,00	25,00	0,60	4,00	4,13	4,25	15,3751
8,00	25,00	0,50	4,25	4,32	4,50	16,4842
8,00	25,00	0,60	4,50	4,60	4,75	21,2896
6,00	50,00	0,40	4,75	4,92	5,00	10,6470
4,00	75,00	0,50	5,00	5,19	5,25	9,6962
6,00	50,00	0,60	5,25	5,47	5,50	15,1724
8,00	50,00	0,40	5,50	5,72	5,75	16,2725
8,00	50,00	0,50	5,75	5,99	6,00	21,0595
6,00	75,00	0,50	6,00	6,17	6,25	16,0767
6,00	100,00	0,60	6,25	6,26	6,50	17,0805
8,00	50,00	0,30	6,50	6,51	6,75	15,0825
8,00	75,00	0,40	6,75	6,88	7,00	18,2591
8,00	75,00	0,50	7,00	7,12	7,25	21,6569
6,00	100,00	0,40	7,25	7,47	7,50	13,8703
8,00	100,00	0,60	7,50	7,61	7,75	21,8990
8,00	100,00	0,56	7,75	7,75	8,00	22,8782
8,00	100,00	0,30	8,00	8,20	8,25	17,5804
8,00	100,00	0,40	8,25	8,25	8,50	19,9217
8,00	100,00	0,40	8,50	8,58	8,75	22,2854

Tabla 7.11. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de C y polaridad negativa

Por otra parte, como muestra la Tabla 7.12, el mínimo desgaste dentro del menor rango de Ra ($1,25 \mu\text{m} \leq \text{Ra} \leq 1,50 \mu\text{m}$) se consigue con las siguientes condiciones: $I = 2 \text{ A}$, $t_i = 50 \mu\text{s}$, $\eta = 0,3$, mientras que dentro del rango mayor de Ra ($8,50 \mu\text{m} \leq \text{Ra} \leq 8,75 \mu\text{m}$) las condiciones deben ser de: $I = 8 \text{ A}$, $t_i = 100 \mu\text{s}$, $\eta = 0,4$ para conseguir un EW mínimo.

I (A)	t_i (μs)	η	$\text{Ra}_1 <$ (μm)	Ra (μm)	$< \text{Ra}_2$ (μm)	Mín. EW (%)
2,00	50,00	0,30	1,25	1,38	1,50	115,07
2,00	75,00	0,30	1,50	1,54	1,75	49,29
2,00	100,00	0,60	1,75	1,75	2,00	282,35
2,93	25,00	0,30	2,00	2,25	2,25	39,46
2,00	100,00	0,30	2,25	2,28	2,50	272,79
3,38	25,00	0,30	2,50	2,75	2,75	17,95
3,64	25,00	0,30	2,75	3,00	3,00	7,95
4,00	25,00	0,50	3,00	3,23	3,25	18,61
4,00	25,00	0,30	3,25	3,32	3,50	15,29
6,00	25,00	0,30	3,50	3,66	3,75	3,88

4,97	25,00	0,30	3,75	4,00	4,00	-22,29
6,00	25,00	0,60	4,00	4,13	4,25	43,77
4,00	50,00	0,50	4,25	4,43	4,50	6,60
8,00	25,00	0,60	4,50	4,60	4,75	45,10
6,00	50,00	0,40	4,75	4,92	5,00	19,19
4,00	75,00	0,50	5,00	5,19	5,25	31,20
6,00	50,00	0,50	5,25	5,40	5,50	0,31
4,00	75,00	0,30	5,50	5,60	5,75	16,97
8,00	50,00	0,50	5,75	5,99	6,00	19,99
6,00	75,00	0,50	6,00	6,17	6,25	34,35
6,00	100,00	0,60	6,25	6,26	6,50	34,65
8,00	50,00	0,30	6,50	6,51	6,75	14,50
8,00	75,00	0,40	6,75	6,88	7,00	60,49
6,00	100,00	0,50	7,00	7,23	7,25	25,95
6,00	100,00	0,40	7,25	7,47	7,50	3,29
8,00	100,00	0,50	7,50	7,68	7,75	25,65
6,51	93,33	0,30	7,75	7,75	8,00	3,16
8,00	100,00	0,30	8,00	8,20	8,25	38,25
6,86	100,00	0,30	8,25	8,25	8,50	5,73
8,00	100,00	0,40	8,50	8,58	8,75	2,79

Tabla 7.12. Valores obtenidos para la estrategia de mínimo EW en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de C y polaridad negativa

La Tabla 7.13 y la Tabla 7.14 muestran los valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR y mínimo EW, respectivamente, en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de cobre-grafito y polaridad positiva. En este caso, sólo el rango $2,25 \mu\text{m} \leq Ra \leq 2,50 \mu\text{m}$ ha sido generado por optimización no lineal.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 7.13, se observa que para una intensidad dada, hay una tendencia de Ra a aumentar al aumentar el valor del tiempo de impulso.

I (A)	t _i (μs)	η	Ra ₁ < (μm)	Ra (μm)	< Ra ₂ (μm)	Máx. MRR (mm ³ /min)
2,00	25,00	0,50	1,00	1,17	1,25	0,2650
2,00	25,00	0,60	1,25	1,33	1,50	0,2907
2,00	50,00	0,30	1,50	1,57	1,75	0,1331
2,00	50,00	0,40	1,75	1,88	2,00	0,1520
2,00	75,00	0,30	2,00	2,01	2,25	0,0846
3,21	25,00	0,60	2,25	2,50	2,50	2,9427
2,00	100,00	0,30	2,50	2,73	2,75	0,0884
2,00	100,00	0,40	2,75	2,91	3,00	0,1056

4,00	25,00	0,60	3,00	3,17	3,25	5,1434
4,00	25,00	0,30	3,25	3,34	3,50	3,0897
6,00	25,00	0,40	3,50	3,72	3,75	6,3632
6,00	25,00	0,60	3,75	3,85	4,00	9,0528
8,00	25,00	0,60	4,00	4,21	4,25	13,1599
4,00	50,00	0,60	4,25	4,36	4,50	5,7782
8,00	50,00	0,30	4,50	4,71	4,75	6,6319
6,00	50,00	0,60	4,75	4,94	5,00	10,4558
6,00	75,00	0,60	5,00	5,21	5,25	9,8216
8,00	50,00	0,60	5,25	5,41	5,50	15,6323
8,00	50,00	0,50	5,50	5,62	5,75	14,5645
6,00	75,00	0,40	5,75	5,81	6,00	7,6840
8,00	75,00	0,60	6,00	6,23	6,25	19,1347
8,00	75,00	0,50	6,25	6,35	6,50	13,6608
8,00	75,00	0,40	6,50	6,56	6,75	12,2552
8,00	100,00	0,50	6,75	6,80	7,00	13,8606
8,00	100,00	0,60	7,00	7,08	7,25	15,3894
8,00	100,00	0,30	7,25	7,41	7,50	10,0405

Tabla 7.13. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de Cu-C y polaridad positiva

Asimismo, en la Tabla 7.14, para obtener el mínimo desgaste, se observan, en general, valores más bajos de intensidad y tiempo de impulso en la parte alta de la tabla, correspondiente a los rangos más bajos de Ra y valores más altos en la parte baja de la tabla, que define rangos altos de Ra.

I (A)	t _i (μs)	η	Ra ₁ < (μm)	Ra (μm)	< Ra ₂ (μm)	Min. EW (%)
2,00	25,00	0,50	1,00	1,17	1,25	42,84
2,00	50,00	0,50	1,25	1,46	1,50	14,94
2,00	75,00	0,60	1,50	1,62	1,75	5,19
2,00	100,00	0,60	1,75	1,90	2,00	2,05
2,00	75,00	0,30	2,00	2,01	2,25	0,44
2,00	90,13	0,30	2,25	2,50	2,50	6,94
2,00	100,00	0,30	2,50	2,73	2,75	3,02
2,00	100,00	0,40	2,75	2,91	3,00	9,32
4,00	25,00	0,50	3,00	3,15	3,25	15,45
4,00	25,00	0,30	3,25	3,34	3,50	10,66
6,00	25,00	0,40	3,50	3,72	3,75	11,44
6,00	25,00	0,50	3,75	3,78	4,00	9,61
8,00	25,00	0,60	4,00	4,21	4,25	7,44
4,00	50,00	0,40	4,25	4,28	4,50	8,58
4,00	75,00	0,60	4,50	4,69	4,75	5,90
4,00	100,00	0,40	4,75	4,95	5,00	2,52

4,00	100,00	0,50	5,00	5,19	5,25	0,43
8,00	50,00	0,60	5,25	5,41	5,50	5,04
8,00	50,00	0,40	5,50	5,57	5,75	5,72
6,00	100,00	0,50	5,75	5,96	6,00	0,30
6,00	100,00	0,30	6,00	6,18	6,25	0,84
6,00	100,00	0,60	6,25	6,33	6,50	1,30
6,00	100,00	0,40	6,50	6,65	6,75	1,13
8,00	100,00	0,40	6,75	6,78	7,00	1,63
8,00	100,00	0,60	7,00	7,08	7,25	0,37
8,00	100,00	0,30	7,25	7,41	7,50	0,81

Tabla 7.14. Valores obtenidos para la estrategia de mínimo EW en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de Cu-C y polaridad positiva

Para finalizar el análisis del Inconel® 600, la Tabla 7.15 y la Tabla 7.16 muestran los valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR y mínimo EW en el mecanizado de dicha aleación con electrodo Cu-C y polaridad negativa. En este caso el intervalo de Ra es: $1,25 \mu\text{m} \leq Ra \leq 8,50 \mu\text{m}$. Como se comentó anteriormente los valores resaltados en negrita son los generados con programación no lineal.

Para la estrategia de máxima MRR mostrada en la Tabla 7.15 se observa que para conseguir el menor rango de Ra ($1,25 \mu\text{m} \leq Ra \leq 1,50 \mu\text{m}$) deben seleccionarse las siguientes condiciones: $I = 2 \text{ A}$, $t_i = 50 \mu\text{s}$, $\eta = 0,5$. Asimismo, para conseguir el mayor rango ($8,25 \mu\text{m} \leq Ra \leq 8,50 \mu\text{m}$) las condiciones deben ser: $I = 8 \text{ A}$, $t_i = 100 \mu\text{s}$, $\eta = 0,5$.

I (A)	t _i (μs)	η	Ra ₁ < (μm)	Ra (μm)	< Ra ₂ (μm)	Máx. MRR (mm ³ /min)
2,00	50,00	0,50	1,25	1,31	1,50	0,4777
2,00	25,00	0,50	1,50	1,70	1,75	0,6719
2,54	25,00	0,60	1,75	2,00	2,00	4,6200
2,71	25,00	0,60	2,00	2,25	2,25	5,4700
2,89	25,00	0,60	2,25	2,50	2,50	6,3500
3,08	25,00	0,60	2,50	2,75	2,75	7,2600
3,27	25,00	0,60	2,75	3,00	3,00	8,2000
3,48	25,00	0,60	3,00	3,25	3,25	9,1800
3,71	25,00	0,60	3,25	3,50	3,50	10,2000
4,00	25,00	0,50	3,50	3,66	3,75	7,9205
4,00	25,00	0,60	3,75	3,80	4,00	11,8064
4,51	25,00	0,60	4,00	4,25	4,25	13,7300
6,00	25,00	0,60	4,25	4,33	4,50	18,7034

6,00	25,00	0,40	4,50	4,53	4,75	10,5888
8,00	25,00	0,40	4,75	4,83	5,00	13,1696
8,00	25,00	0,60	5,00	5,24	5,25	30,3120
4,00	75,00	0,60	5,25	5,35	5,50	12,7624
6,00	50,00	0,50	5,50	5,52	5,75	15,1031
6,00	50,00	0,60	5,75	5,86	6,00	19,7280
4,00	100,00	0,60	6,00	6,16	6,25	13,5013
8,00	50,00	0,40	6,25	6,30	6,50	22,1590
8,00	50,00	0,60	6,50	6,50	6,75	30,4760
8,00	75,00	0,60	6,75	6,99	7,00	24,9210
8,00	50,00	0,50	7,00	7,10	7,25	19,9893
8,00	75,00	0,40	7,25	7,27	7,50	21,4791
6,00	100,00	0,60	7,50	7,52	7,75	23,2371
8,00	100,00	0,60	7,75	7,83	8,00	30,4894
8,00	100,00	0,30	8,00	8,04	8,25	20,0082
8,00	100,00	0,50	8,25	8,33	8,50	23,8906

Tabla 7.15. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de Cu-C y polaridad negativa

Por otra parte, como puede apreciarse en la Tabla 7.16 las condiciones de intensidad y tiempo de impulso necesarias para obtener el mínimo desgaste dentro del menor rango de Ra son las mismas que las seleccionadas para el electrodo de grafito y polaridad negativa mostradas en la Tabla 7.12.

I (A)	t _i (μs)	η	Ra ₁ < (μm)	Ra (μm)	< Ra ₂ (μm)	Min. EW (%)
2,00	50,00	0,50	1,25	1,31	1,50	154,88
2,00	25,00	0,30	1,50	1,57	1,75	96,67
2,54	25,00	0,30	1,75	2,00	2,00	74,62
2,71	25,00	0,30	2,00	2,25	2,25	65,31
2,89	25,00	0,30	2,25	2,50	2,50	56,13
3,08	25,00	0,30	2,50	2,75	2,75	47,11
3,27	25,00	0,30	2,75	3,00	3,00	38,26
3,48	25,00	0,30	3,00	3,25	3,25	29,63
3,71	25,00	0,30	3,25	3,50	3,50	21,25
4,00	25,00	0,30	3,50	3,59	3,75	28,23
4,00	25,00	0,60	3,75	3,80	4,00	29,33
4,51	25,00	0,30	4,00	4,25	4,25	-1,55
6,00	25,00	0,60	4,25	4,33	4,50	24,92
6,00	25,00	0,40	4,50	4,53	4,75	25,27
8,00	25,00	0,30	4,75	4,76	5,00	21,09
8,00	25,00	0,50	5,00	5,23	5,25	21,67
4,00	75,00	0,30	5,25	5,47	5,50	19,97
6,00	50,00	0,50	5,50	5,52	5,75	21,94

6,00	50,00	0,60	5,75	5,86	6,00	21,70
4,00	100,00	0,30	6,00	6,24	6,25	20,35
6,00	75,00	0,40	6,25	6,26	6,50	20,01
8,00	50,00	0,60	6,50	6,50	6,75	19,38
8,00	50,00	0,30	6,75	6,77	7,00	19,05
8,00	50,00	0,50	7,00	7,10	7,25	19,59
8,00	75,00	0,40	7,25	7,27	7,50	17,64
6,00	100,00	0,60	7,50	7,52	7,75	171,94
8,00	100,00	0,40	7,75	7,90	8,00	16,83
8,00	100,00	0,30	8,00	8,04	8,25	16,99
8,00	100,00	0,50	8,25	8,33	8,50	16,04

Tabla 7.16. Valores obtenidos para la estrategia de mínimo EW en el mecanizado del Inconel® 600 con electrodo de Cu-C y polaridad negativa

En general, todos estos resultados coinciden con los obtenidos en el capítulo 4 correspondiente al análisis del mecanizado del Inconel® 600 con diferentes electrodos y polaridades. Tal y como se comentaba en dicho capítulo, en líneas generales, el valor de MRR y Ra está altamente influenciado por la intensidad, cuyo aumento conduce a mayores tasas de arranque y de rugosidad superficial. Asimismo, el desgaste del electrodo está influenciado tanto por la intensidad como por el tiempo de impulso, aunque su efecto difiere según el material de electrodo y polaridad seleccionada.

7.2.3. Desarrollo de las tablas tecnológicas del TiB₂

A continuación, se analizan las tablas tecnológicas correspondientes al diboruro de titanio. Asimismo, cabe recordar que la tabla tecnológica correspondiente a la estrategia de máxima MRR (Tabla 7.4) se muestra al comienzo del apartado ya que ha sido utilizada para explicar la metodología seguida para su elaboración. No obstante, se vuelve a mostrar, a continuación, para su análisis.

I (A)	t _i (μs)	η	Ra ₁ < (μm)	Ra (μm)	< Ra ₂ (μm)	Máx. MRR (mm ³ /min)
2,00	5,00	0,60	1,00	1,16	1,25	0,2824
2,00	25,00	0,50	1,25	1,41	1,50	0,1798
2,00	45,00	0,60	1,50	1,57	1,75	0,1805
3,20	5,00	0,60	1,75	2,00	2,00	1,5701

6,00	5,00	0,40	2,00	2,11	2,25	2,0216
6,00	5,00	0,60	2,25	2,44	2,50	3,0400
6,00	9,78	0,60	2,50	2,75	2,75	3,0888
4,00	25,00	0,50	2,75	2,90	3,00	1,9463
4,00	25,00	0,60	3,00	3,21	3,25	2,4747
6,00	25,00	0,50	3,25	3,41	3,50	2,7385
6,00	45,00	0,40	3,50	3,68	3,75	1,8639
6,00	45,00	0,60	3,75	3,96	4,00	2,6139

Tabla 7.4. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR en el mecanizado del TiB₂ con electrodo de Cu y polaridad positiva

Como puede observarse en dicha tabla, los rangos generados mediante optimización no lineal se han remarcado en negrita. Asimismo, debe señalarse que dichos valores son ligeramente superiores a los obtenidos por métodos experimentales y ello puede atribuirse a los ajustes de los modelos.

Por otra parte, tal y como se observa, para obtener valores de Ra dentro del rango $1,00 \mu\text{m} \leq Ra \leq 1,75 \mu\text{m}$, con el máximo arranque posible, debe seleccionarse el menor valor de intensidad (2 A) así como valores de rendimiento de 0,5 a 0,6. Asimismo, en la parte baja de la tabla, se observa que para obtener rangos de $3,25 \mu\text{m} \leq Ra \leq 4,00 \mu\text{m}$, el valor de intensidad debe ser de 6 A.

De la misma forma que se ha obtenido la tabla tecnológica correspondiente a la estrategia de máxima MRR para el TiB₂, se obtiene la de mínimo EW, cuyos resultados se muestran en la Tabla 7.17. Como puede apreciarse en dicha tabla, para el rango $1,00 \mu\text{m} \leq Ra \leq 2,00 \mu\text{m}$ el valor de la intensidad es aproximadamente 2 A. Además, en dicho rango, se produce una disminución de EW y un aumento de Ra al aumentar el valor del tiempo de impulso y disminuir el del rendimiento. Asimismo, para obtener un valor de Ra mayor de $2,00 \mu\text{m}$ con el mínimo desgaste, es necesario un valor de intensidad superior a 2,37 A. En el caso del intervalo $3,50 \mu\text{m} \leq Ra \leq 4,00 \mu\text{m}$, se requieren valores altos tanto de intensidad (6 A) como de tiempo de impulso (45 μs).

Estos resultados concuerdan con los obtenidos en el capítulo 5, en el cual la intensidad era el parámetro más influyente en MRR y Ra, y un aumento de su

valor conducía a valores más altos de ambos parámetros. Para el caso de EW, se observó que su valor disminuía al aumentar el valor del tiempo de impulso.

I (A)	t _i (μs)	η	Ra ₁ < (μm)	Ra (μm)	< Ra ₂ (μm)	Mín. EW (%)
2,00	5,00	0,60	1,00	1,16	1,25	15,82
2,00	25,00	0,50	1,25	1,41	1,50	3,80
2,00	45,00	0,40	1,50	1,70	1,75	1,50
2,37	45,00	0,40	1,75	2,00	2,00	0,93
6,00	5,00	0,40	2,00	2,11	2,25	5,38
6,00	5,00	0,60	2,25	2,44	2,50	4,27
3,22	45,00	0,40	2,50	2,75	2,75	-0,04
4,00	25,00	0,40	2,75	2,80	3,00	1,54
4,00	25,00	0,60	3,00	3,21	3,25	1,30
4,00	45,00	0,50	3,25	3,39	3,50	0,95
6,00	45,00	0,40	3,50	3,68	3,75	1,10
6,00	45,00	0,60	3,75	3,96	4,00	0,96

Tabla 7.17. Valores obtenidos para la estrategia de mínimo EW en el mecanizado del TiB₂ con electrodo de Cu y polaridad positiva

7.2.4. Desarrollo de las tablas tecnológicas del SiSiC

Para finalizar, se presentan las tablas generadas para el último de los materiales analizados en esta Tesis Doctoral y que corresponde al carburo de silicio infiltrado con silicio. Como se observa en la Tabla 7.18, que muestra los valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR, para el mínimo rango correspondiente a $0,75 \mu\text{m} \leq Ra \leq 1,00 \mu\text{m}$, debe seleccionarse el valor más bajo de intensidad (2 A), mientras que para el máximo rango ($1,75 \mu\text{m} \leq Ra \leq 2,00 \mu\text{m}$), el valor de la intensidad debe ser el máximo (6 A). Estos resultados son congruentes con los obtenidos en el capítulo 6 correspondiente al análisis del mecanizado de SiSiC, en el que se observó que tanto MRR como Ra aumentan al aumentar la intensidad.

I (A)	t _i (μs)	η	Ra ₁ < (μm)	Ra (μm)	< Ra ₂ (μm)	Máx. MRR (mm ³ /min)
2,00	25,00	0,50	0,75	0,95	1,00	0,2157
4,00	5,00	0,50	1,00	1,17	1,25	0,6155
6,00	5,00	0,40	1,25	1,29	1,50	0,6244
6,00	25,00	0,50	1,50	1,56	1,75	0,4927
6,00	5,00	0,60	1,75	1,79	2,00	0,5237

Tabla 7.18. Valores obtenidos para la estrategia de máxima MRR en el mecanizado del SiSiC con electrodo de Cu-C y polaridad negativa

Asimismo, como puede observarse en la Tabla 7.19, para el rango $0,75 \mu\text{m} \leq Ra \leq 1,25 \mu\text{m}$, el valor de la intensidad es de 2 A y se produce una disminución de EW y un aumento de Ra al disminuir tanto el tiempo de impulso como el rendimiento. Por otra parte, para $1,25 \mu\text{m} \leq Ra \leq 2,00 \mu\text{m}$, la intensidad es de 6 A y se produce un aumento de Ra al aumentar el rendimiento.

I (A)	t _i (μs)	η	Ra ₁ < (μm)	Ra (μm)	< Ra ₂ (μm)	Mín. EW (%)
2,00	25,00	0,50	0,75	0,95	1,00	197,69
2,00	5,00	0,40	1,00	1,06	1,25	80,26
6,00	5,00	0,40	1,25	1,29	1,50	102,40
6,00	25,00	0,50	1,50	1,56	1,75	255,51
6,00	5,00	0,60	1,75	1,79	2,00	132,36

Tabla 7.19. Valores obtenidos para la estrategia de mínimo EW en el mecanizado del SiSiC con electrodo de Cu-C y polaridad negativa

7.2.5. Recapitulación

En este capítulo se ha desarrollado una metodología para la generación de las tablas tecnológicas de los diferentes materiales estudiados en la presente Tesis Doctoral, a partir de las cuales es posible obtener una determinada rugosidad superficial en base a dos estrategias de mecanizado consistentes en: maximizar la tasa de eliminación de material o minimizar el desgaste de electrodo.

Asimismo, dichas tablas no existen para el caso de los materiales de difícil mecanizabilidad, por lo que resultan de gran interés industrial siendo de gran ayuda para programación de los equipos de EDM.

- Para el caso de las tablas tecnológicas del Inconel® 600, la obtención de un determinado valor de rugosidad con la máxima tasa de eliminación estuvo influenciado, principalmente, por la intensidad. En todos los casos de estudio, los menores rangos de Ra se obtuvieron con intensidades cercanas a 2 A, mientras que en los rangos con mayor valor de Ra, la intensidad fue de 6 A a 8 A.

- Asimismo, para la estrategia de mínimo desgaste, la intensidad y el tiempo de impulso fueron los factores más influyentes, aunque su efecto fue distinto según el material de electrodo y polaridad seleccionada. Así, por ejemplo, con electrodo de cobre, los rangos más bajos de Ra se dieron con valores altos de tiempo de impulso para el caso de polaridad positiva (500 μ s) y bajos (50 μ s) para el de negativa. Con electrodo de grafito y polaridad positiva, para un valor dado de intensidad, Ra aumentó al aumentar el tiempo de impulso, siendo los rangos más bajos con $I = 2$ A, y los más altos con $I = 8$ A. En el caso de electrodo de grafito y de electrodo de grafito con cobre infiltrado y polaridad negativa, las condiciones para obtener el mínimo desgaste dentro del menor rango de Ra fueron las mismas: $I = 2$ A, $t_i = 50$ μ s, $\eta = 0,3$.
- Por otra parte, en el caso del diboruro de titanio, dentro del rango $1 \mu\text{m} \leq Ra \leq 1,50 \mu\text{m}$, se dieron las mismas condiciones de intensidad (2 A) y rendimiento (0,5 a 0,6) para las dos estrategias de mecanizado propuestas. Asimismo, este hecho también sucedió para el caso del SiSiC y el rango $0,75 \mu\text{m} \leq Ra \leq 1,00 \mu\text{m}$. En este caso, las condiciones seleccionadas fueron: $I = 2$ A, $t_i = 25$ μ s y $\eta = 0,5$.

CAPÍTULO 8

Conclusiones

8. CONCLUSIONES

A continuación, se recogen las principales conclusiones obtenidas en la presente Tesis Doctoral. En primer lugar, se presentan las conclusiones generales que afectan al proceso de EDM y, en segundo lugar, las conclusiones particulares aplicadas a los materiales y condiciones seleccionadas. Para finalizar el capítulo, se recogen los desarrollos futuros.

8.1. Conclusiones generales

- La influencia de la polaridad en el proceso de electroerosión depende principalmente del binomio electrodo-pieza, siendo la polaridad un factor determinante a la hora de obtener unos determinados resultados relativos al desgaste y a la tasa de eliminación de material.
- En términos generales, puede establecerse que cuanto mayor es el punto de fusión y la conductividad eléctrica del electrodo, menor es el desgaste que experimenta. Una alta conductividad eléctrica asegura una mejor distribución de las descargas durante el proceso de EDM y una mayor distancia del *gap*, lo que reduce la formación de arcos eléctricos y cortocircuitos. A pesar de ello, es importante también tener en consideración la influencia de los parámetros eléctricos que intervienen en el proceso (intensidad, tiempo de impulso y rendimiento, entre otros).
- El desgaste “positivo” del electrodo para tipos de dieléctricos similares al utilizado en la Tesis se atribuye, principalmente, a la deposición de partículas de carbono que migran del líquido dieléctrico a la superficie del propio electrodo. Este fenómeno no es deseable puesto que el proceso de EDM ya no se da entre los materiales inicialmente seleccionados y tanto el arranque del material como la rugosidad superficial de la pieza pueden verse alterados.
- Para las aplicaciones de EDM por penetración, el líquido dieléctrico más ampliamente empleado es el aceite mineral porque su uso favorece la estabilidad y eficiencia del proceso.

- Las altas temperaturas alcanzadas durante el proceso de EDM pueden producir transformaciones metalúrgicas en la superficie de la pieza que, a su vez, pueden derivar en la formación de pequeñas grietas y defectos superficiales.
- En la actualidad, la programación de las condiciones de mecanizado en los equipos de electroerosión por penetración se realiza generalmente en base a tablas tecnológicas, que tienen optimizados los diversos parámetros del equipo de EDM. Dichas tablas tecnológicas existen fundamentalmente para el caso de los aceros no siendo así para otros tipos de materiales, como es el caso de las aleaciones de baja mecanizabilidad.

8.2. Conclusiones particulares

En lo que respecta a las conclusiones particulares, pueden destacarse las siguientes:

Con respecto al Inconel® 600:

- En el mecanizado del Inconel® 600, empleando diferentes materiales en los electrodos y diferentes polaridades, se observó que las mayores tasas de eliminación de material se obtuvieron empleando electrodo de Cu-C y polaridad negativa ($30,4894 \text{ mm}^3/\text{min}$) y empleando electrodo de cobre con polaridad positiva ($22,4729 \text{ mm}^3/\text{min}$).
- La adición de cobre en los electrodos, en general, condujo a una mayor cantidad de material fundido y a un mayor desgaste del electrodo. Se obtuvo una MRR máxima de $19,1347 \text{ mm}^3/\text{min}$ y un EW mínimo de 0,30 % con electrodo de Cu-C y polaridad positiva, mientras que con electrodo de C ambos parámetros disminuyeron hasta $15,3602 \text{ mm}^3/\text{min}$ y -1312,96 %, respectivamente. En el caso de polaridad negativa, también se observó esta tendencia y los valores obtenidos con electrodo de Cu-C fueron de $30,4894 \text{ mm}^3/\text{min}$ y 16,04 %, mientras que con electrodo de C, fueron de $22,2854 \text{ mm}^3/\text{min}$ y 0,31 %.

- Para cualquiera de los casos estudiados en el Inconel® 600, el factor que presentó una mayor influencia en la tasa de eliminación de material fue la intensidad. Las mínimas tasas de arranque se obtuvieron con una intensidad de 2 A, mientras que las máximas con un valor de 8 A. El aumento de MRR al incrementar la intensidad fue debido al aumento en la energía de las descargas eléctricas, que facilitaron la fusión y vaporización del material.
- Con electrodo de Cu y polaridad positiva, las tasas más altas de MRR se alcanzaron con valores altos de intensidad (8 A) a altas frecuencias (50 μ s), y con polaridad negativa a bajas frecuencias (500 μ s). Para los electrodos de C y Cu-C, los mayores arranques se produjeron con valores altos de intensidad (8 A) a frecuencias bajas, dentro del rango seleccionado para cada uno de ellos. En el caso del electrodo de C, fue de 50 μ s y 100 μ s para polaridades positiva y negativa, respectivamente, mientras que para el electrodo Cu-C, fue de 75 μ s y 100 μ s.
- El desgaste del electrodo estuvo altamente influenciado tanto por la intensidad como por el tiempo de impulso, aunque su efecto difirió según el material de electrodo y polaridad seleccionada, no pudiendo establecerse una regla general. Así, por ejemplo, en el caso del electrodo de Cu-C, los menores desgastes se obtuvieron con polaridad positiva, cuyo valor mínimo fue de 0,30 %, lo cual contrasta con el valor de desgaste mínimo que se obtuvo al emplear polaridad negativa, el cual fue de 16,04 %. En ambos casos, el valor de la intensidad fue alto (6 A-8 A). Sin embargo, el valor del tiempo de impulso fue alto (100 μ s) con polaridad positiva y bajo (25 μ s) con negativa. Por otra parte, al emplear electrodo de cobre, tanto con polaridad positiva como con polaridad negativa, los menores desgastes se obtuvieron cuando ambos parámetros alcanzaron valores próximos a los valores medios de sus respectivos rangos de variación (4 A-6 A y 200 μ s-350 μ s).

- Respecto a la rugosidad superficial, la intensidad y el tiempo de impulso resultaron ser los factores más significativos, de tal manera que el aumento de los dos condujo a valores altos de Ra. Dicho resultado se obtuvo para todos los electrodos seleccionados, y para ambas polaridades. El electrodo de C con polaridad positiva ($R_a = 0,94 \mu\text{m}$) fue, comparativamente, el que mejor acabado superficial presentó. Los peores acabados superficiales se obtuvieron con los electrodos de C ($R_a = 8,58 \mu\text{m}$) y Cu-C ($R_a = 8,33 \mu\text{m}$) y polaridad negativa.
- A nivel microscópico, cuando se empleó polaridad negativa, las superficies resultantes tras el proceso de EDM resultaron más dañadas y las grietas existentes fueron más evidentes. Este fenómeno se produjo en todos los casos de estudio a pesar de haber obtenido, en algunos de ellos, valores de Ra inferiores a los obtenidos con polaridad positiva. Este caso es el del electrodo de cobre con el que se obtuvo mayor Ra ($7,81 \mu\text{m}$) con polaridad positiva que con negativa ($4,70 \mu\text{m}$) y, sin embargo, la superficie electroerosionada presentó un aspecto menos dañado.
- Los resultados de los análisis por EDS de las diferentes superficies electroerosionadas de Inconel® 600 mostraron la presencia de carbono retenido procedente del dieléctrico cuando se empleó polaridad negativa.

Con respecto a las cerámicas TiB₂ y SiSiC:

- Para el mecanizado de los materiales cerámicos TiB₂ y SiSiC, se determinó que, para conseguir un proceso estable, deben seleccionarse valores bajos tanto de tiempo de impulso ($5 \mu\text{s}$ - $45 \mu\text{s}$) como de rendimiento (0,4-0,6). Asimismo, la estabilidad del proceso también estuvo condicionada por la polaridad y los materiales seleccionados. Para la pareja pieza-electrodo TiB₂-Cu, se empleó polaridad positiva,

mientras que para la pareja pieza SiSiC-electrodo Cu-C, polaridad negativa.

- Los resultados obtenidos para las dos cerámicas estudiadas indicaron que la intensidad es el factor más influyente en MRR y Ra. Se observó que los mayores valores de MRR y Ra se obtuvieron con una intensidad de 6 A, tanto para el TiB₂ (3,0400 mm³/min y 3,96 μm) como para el SiSiC (0,6244 mm³/min y 1,79 μm). Al disminuir dicho valor, ambos parámetros disminuyeron, obteniéndose los menores arranques de material (0,1607 mm³/min y 0,0890 mm³/min) y las rugosidades superficiales más bajas (1,11 μm y 0,82 μm) con 2 A.
- Respecto al desgaste del electrodo, en ambas cerámicas, el factor más significativo fue el tiempo de impulso, de tal manera que los mayores desgastes se produjeron con pulsos de corta duración (5 μs), para el caso del TiB₂, y de larga duración (45 μs) para el SiSiC.

Con respecto a la densidad de energía:

- Para los casos del Inconel® 600 y del TiB₂, el valor de la densidad de energía total del proceso disminuyó al aumentar la tasa de eliminación de material y, en consecuencia, la rugosidad superficial. En el caso del SiSiC, Ra presentó una tendencia opuesta a la obtenida con el resto de materiales, es decir, se produjo un aumento de ρ_E al aumentar la rugosidad superficial.
- Respecto a EW, la densidad de energía presentó un comportamiento diferente dependiendo del material, electrodo y polaridad. Así, por ejemplo, para el Inconel® 600 y polaridad negativa, la densidad de energía aumentó al aumentar el desgaste volumétrico del electrodo, para cualquiera de los electrodos estudiados (Cu, C y Cu-C).

- Los experimentos llevados a cabo con polaridad negativa presentaron una distribución de la densidad de energía en el electrodo mayor respecto a los realizados con polaridad positiva.

Con respecto a las tablas tecnológicas:

- La generación de las tablas tecnológicas se realizó a partir de los valores experimentales obtenidos y, en aquellos casos donde no se disponía de datos, se empleó programación no lineal para predecir dichos valores. Los resultados obtenidos a partir de programación no lineal fueron ligeramente superiores a los obtenidos con los datos experimentales debido, principalmente, al gran rango de variación de los límites tomados de los factores de diseño (I , t_i y η) y a los ajustes de los modelos.
- Para el caso de las tablas tecnológicas del Inconel® 600, el valor de MRR y Ra estuvo altamente influenciado por la intensidad, cuyo aumento condujo a mayores tasas de arranque y de rugosidad superficial. Asimismo, el desgaste del electrodo estuvo influenciado tanto por la intensidad como por el tiempo de impulso, aunque su efecto fue diferente según el material de electrodo y la polaridad seleccionada.
- En el caso del TiB₂, para obtener valores de Ra dentro del rango de 1 μm a 1,50 μm , con el máximo arranque posible y, además, con el mínimo desgaste, debe seleccionarse el menor valor de intensidad (2 A) así como valores de rendimiento de 0,5 a 0,6.
- Finalmente, en el caso del SiSiC, para obtener valores de Ra dentro del rango $0,75 \mu\text{m} \leq Ra \leq 1,00 \mu\text{m}$, con el máximo arranque posible, deben seleccionarse las siguientes condiciones: $I = 2 \text{ A}$, $t_i = 25 \mu\text{s}$ y $\eta = 0,5$. Asimismo, dentro de ese mismo rango, las condiciones deben ser las mismas para obtener el mínimo desgaste.

8.3. Desarrollos futuros

En lo que respecta a los desarrollos futuros derivados de la presente Tesis Doctoral, se pueden destacar los siguientes:

- Estudio de nuevos materiales de difícil mecanizabilidad con potenciales aplicaciones en la industria, tales como las superaleaciones de base níquel, titanio o cobalto, las cerámicas conductoras y los materiales compuestos avanzados.
- Ampliación de los rangos de estudio, tanto en condiciones de desbaste como de acabado.
- Generación de tablas tecnológicas para nuevos materiales de difícil mecanizabilidad, tanto para maximizar la tasa de eliminación de material como para minimizar el desgaste del electrodo.
- Empleo de nuevos materiales en los electrodos, con objeto de analizar la aplicabilidad de los mismos a la electroerosión de materiales de baja mecanizabilidad.

CAPÍTULO 9

Referencias bibliográficas

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Singh, S. Maheshwari, P.C. Pandey, Some investigations into the electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode materials. *Journal of Materials Processing Technology* 149 (2004) 272-277.
- [2] H. Singh, Experimental study of distribution of energy during EDM process for utilization in thermal models. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55 (2012) 5053-5064.
- [3] K.H. Ho, S.T. Newman, State of the art electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 1287-1300.
- [4] H.C. Tsai, B.H. Yan, F.Y. Huang, EDM performance of Cr/Cu-based composite electrodes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 (3) (2003) 245-252.
- [5] S.H. Yeo, W. Kurnia, P.C. Tan, Critical assessment and numerical comparison of electro-thermal models in EDM. *Journal of Materials and Processing Technology* 203 (2008) 241-251.
- [6] M. Gostimirovic, P. Kovac, B. Skoric, M. Sekulic, Effect of electrical pulse parameters on the machining performance in EDM. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* 18 (2012) 411-415.
- [7] T. Muthuramalingam, B. Mohan, A review on influence of electrical process parameters in EDM process. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 15 (2015) 87-94.
- [8] Y. Zhang, Y. Liu, R. Ji, B. Cai, Study of the recast layer of a surface machined by sinking electrical discharge machining using water-in-oil emulsion as dielectric. *Applied Surface Science* 257 (2011) 5989-5997.
- [9] M. Dastagiri, A. Hemantha Kumar, Experimental Investigation of EDM Parameters on Stainless Steel&En41b. *Procedia Engineering* 97 (2014) 1551-1564.

- [10] A. Camprubi, Electro-erosión: Fundamentos de su física y su técnica. Ed. Marcombo, Barcelona, 2007.
- [11] F. Han, L. Chen, D. Yu, X. Zhou, Basic study on pulse generator for micro-EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 33 (2007) 474-479.
- [12] J. Qian, F. Yang, J. Wang, B. Lauwers, D. Reynaerts, Material removal mechanism in low-energy micro-EDM process. *CIRP ANNALS-Manufacturing Technology* 64 (2015) 225-228.
- [13] M.P. Jahan, Y.S. Wong, M. Rahman, A study on the fine-finish die-sinking micro-EDM of tungsten carbide using different electrode materials. *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 3956-3967.
- [14] F. Han, S. Wachi, M. Kunieda, Improvement of machining characteristics of micro-EDM using transistor type isopulse generator and servo feed control. *Precision Engineering* 28 (2004) 378-385.
- [15] Y.H. Guu, AFM surface imaging of AISI D2 tool steel machined by the EDM process. *Applied Surface Science* 242 (3-4) (2005) 245-250.
- [16] G. Talla, D.K. Sahoo, S. Gangopadhyay, Modeling and multi-objective optimization of poder mixed electri discharge machining process of aluminum/alumina metal matrix composite. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 18 (2015) 369-373.
- [17] A. Kadirvel, P. Hariharan, S. Gowri, Experimental Investigation on the Electrode Specific Performance in Micro-EDM of Die-Steel. *Materials and Manufacturing Processes* 28 (2013) 390-396.
- [18] H.S. Liu, B.H. Yan, F.Y. Huang, K.H. Qiu, A study on the characterization of high nickel alloy micro-holes using micro-EDM and their applications. *Journal of Materials Processing Technology* 169 (2005) 418-426.

- [19] T.T. Öpöz, B. Ekmekci, A. Erden, An Experimental Study on the Geometry of Microholes in Microelectric Discharge Machining. *Materials and Manufacturing Processes* 24 (2009) 1236–1241.
- [20] M.Y. Ali, M.H. Hamad, A.I. Karim, Form Characterization of Microhole Produced by Microelectrical Discharge Drilling. *Materials and Manufacturing Processes* 24 (2009) 683-687.
- [21] T. Ishida, Y. Takeuchi, L-Shaped curved hole creation by means of Electrical Discharge Machining and an Electrode Curved Motion Generator. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 19 (2002) 260-265.
- [22] K. Gupta, S.K. Chaube, N.K. Jain, Exploring Wire-EDM for manufacturing the high quality meso-gears. *Procedia Materials Science* 5 (2014) 1755-1760.
- [23] I. Puertas, C.J. Luis, Revisión de las aplicaciones de la electroerosión por penetración al mecanizado de cerámicas conductoras. *Revista de metalurgia Madrid* 38 (2002) 358-372.
- [24] R.K. Garg, K.K. Singh, A. Sachdeva, V.S. Sharma, K. Ojha, S. Singh, Review of research work in sinking EDM and WEDM on metal matrix composite materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 50 (2010) 611-624.
- [25] K. Prasad, A. Mahamani, P.S. Sravani, K. Mounika, Electrical discharge machining of the composites: a literature review. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*. eISSN: 2319-1163 | pISSN: 2321.
- [26] D. Bhaduri , A.S. Kuar , S. Sarkar , S.K. Biswas, S. Mitra, Electro Discharge Machining of Titanium Nitride-Aluminium Oxide Composite for Optimum Process Criterial Yield. *Materials and Manufacturing Processes* 24 (2009) 1312-1320.
- [27] M. Hourmand, S. Farahany, A.A.D. Sarhan, M.Y. 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. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 77 (2015) 831-838.

[28] S. Gopalakannan, T. Senthilvelan, Optimization of machining parameters for EDM operations based on central composite design and desirability approach. *Journal of Mechanical Science and Technology* 28 (3) (2014) 1045-1053.

[29] D.C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*. Ed. John Wiley & Sons, 5ª Edición, Nueva York, 2001, pp. 170-217.

[30] S.S. Sidhu, A. Batish, S. Kumar, Study of surface properties in particulate-reinforced metal matrix composites (MMCs) using powder-mixed electrical discharge machining (EDM). *Materials and Manufacturing Processes* 29 (2014) 46-52.

[31] M.M. Dhobe, I.K. Chopde, C.L. Gogte, Investigations on Surface Characteristics of Heat Treated Tool Steel after Wire Electro-Discharge Machining. *Materials and Manufacturing Processes* 28 (2013) 1143–1146.

[32] K.K. Choi, W.J. Nam, Y.S. Lee, Effects of heat treatment on the surface of a die steel STD11 machined by W-EDM. *Journal of Materials Processing Technology* 201(2008) 580–584.

[33] S. Kumar, R. Singh, T.P. Singh, B.L. Sethi, Surface modification by electrical discharge machining: A review. *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 3675-3687.

[34] J. Marafona, C. Wykes, A new method of optimizing material removal rate using EDM with copper-tungsten electrodes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40 (2000) 153–164.

[35] Z.L. Wang, Y. Fang, P.N. Wu, W.S. Zhao, K. Cheng, Surface modification process by electrical discharge machining with a Ti powder green compact electrode. *Journal of Materials Processing Technology* 129 (2002) 139-142.

- [36] T. Moro, A. Goto, N. Mohri, N. Saito, K. Matsukawa, H. Miyake, Surface modification process by electrical discharge machining with TiC semi-sintered electrode. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 67 (1) (2001) 114-119.
- [37] Y.F. Chen, H.M. Chow, Y.C. Lin, C.T. Lin, Surface modification using semi-sintered electrodes on electrical discharge machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 36 (2008) 490-500.
- [38] Q.Y. Ming, L.Y. He, Powder-suspension dielectric fluid for EDM. *Journal of Materials Processing Technology* 52 (1995) 44-54.
- [39] S.L. Chen, B.H. Yan, F.Y. Huang, Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology* 87 (1999) 107-111.
- [40] I. Maher, A.A.D. Sarhan, M. Hamdi, Review of improvements in wire electrode properties for longer working time and utilization in wire EDM machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 76 (2015) 329-351.
- [41] Y. Huang, W. Ming, J. Guo, Z. Zhang, G. Liu, M. Li, G. Zhang, Optimization of cutting conditions of YG15 on rough and finish cutting in WEDM based on statistical analyses. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 69 (2013) 993-1008.
- [42] K. Kanlayasiri, S. Boonmung, Effects of wire-EDM machining variables on surface roughness of newly developed DC 53 die steel: Design of experiments and regression model. *Journal of Materials Processing Technology* 192-193 (2007) 459-464.
- [43] V.C. Reddy, N. Deepthi, N. Jayakrishna, Multiple Response Optimization of Wire EDM on Aluminium HE30 by using Grey Relational Analysis. *Materials Today: Proceedings* 2 (2015) 2548-2554.

- [44] M. Correa, J. Pamies-Teixeira, Predicción de la rugosidad superficial en texturizado por electroerosión usando reyes bayesianas. *Revista S&T* 11 (27) (2013) 77-92.
- [45] A.V. Gorbunov, V.K. Belov, D.O. Begletsov, Texturing of rollers for the production of auto-industry sheet. *Stal* 8 (2009) 50-53.
- [46] J. Simao, D. Aspinwalla, F. El-Menshawyb, K. Meadows, Surface alloying using PM composite electrode materials when electrical discharge texturing hardened AISI D2. *Journal of Materials Processing Technology* 127 (2002) 211-216.
- [47] R.N. Yadav, V. Yadava, Electrical discharge grinding (EDG): a review. *Proceedings of the National Conference on Trends and Advances in Mechanical Engineering* (2012).
- [48] H.R. Shih, K.M. Shu, A study of electrical discharge grinding using a rotary disk electrode. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 38 (2008) 59-67.
- [49] M.K. Satyarthi, P.M. Pandey, Comparison of EDG, diamond grinding and EDM processing of conductive alumina ceramic composite. *Materials and Manufacturing Processes* 28 (2013) 369-374.
- [50] M.K. Satyarthi, P.M. Pandey, Modeling of material removal rate in electric discharge grinding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 74 (2013) 65-73.
- [51] S.K. Choudhury, V.K. Jain, M. Gupta, Electrical discharge diamond grinding of high speed steel. *Machining Science and Technology* 3 (1999) 91-105.
- [52] P. Koshy, V.K. Jain, G.K. Lal, Grinding of cemented carbide with electrical spark assistance. *Journal of Materials Processing Technology* 72 (1997) 61-68.
- [53] P. Kuppan, A. Rajadurai, S. Narayanan, Influence of EDM process parameters in deep hole drilling of Inconel 718. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 38 (2008) 74-84.

- [54] B. Jiang, S. Lan, K. Wilt, J. Ni, Modeling and experimental investigation of gas film in micro-electrochemical discharge machining process. *International Journal of Machine tools & Manufacture* 90 (2015) 8-15.
- [55] N. Schubert, M. Schneider, A. Michaelis, Electrochemical Machining of cemented carbides. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 47 (2014) 54-60.
- [56] J. Jerald, S. Kumanan, S.P. Leo Kumar, H.V. Chandrakar, Experimental investigation and optimization of process parameters in micro-electrical discharge machining. *International Journal Manufacturing Technology and Management* 27 (2013) 88-100.
- [57] K. Liu, B. Lauwers, D. Reynaerts, Process capabilities of Micro-EDM and its applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 47 (2010) 11-19.
- [58] Z. Katz, C.J. Tibbles, Analysis of micro-scale EDM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 25 (2005) 923-928.
- [59] M.P. Jahan, Micro-Electrical Discharge Machining (Chapter 4) del libro *Nontraditional Machining Processes*, Editors: J. Paulo Davim ISBN: 978-1-4471-5178-4 (Print) 978-1-4471-5179-1 (Online) (2013) pp. 114.
- [60] Y.C. Lin, H.S. Lee, Optimization of machining parameters using magnetic-force-assisted EDM based on gray relational analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 42 (2009) 1052-1064
- [61] R. Teimouri, H. Baseri, Effects of magnetic field and rotary tool on EDM performance. *Journal of Manufacturing Processes* 14 (2002) 316-322.
- [62] H. Baseri, S. Sadeghian, Effects of nanopowder TiO₂-mixed dielectric and rotary on EDM tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2015). DOI 10.1007/s00170-015-7579-z

- [63] E. Aliakbari, H. Baseri, Optimization of machining parameters in rotary EDM process by using the Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 62 (2012) 1041-1053.
- [64] R. Bajaj, A.K. Tiwari, A.R. Dixit, Current trends in electric discharge machining using micro and nano powder materials: A Review. *Materials Today: Proceedings* 2 (2015) 3302-3307.
- [65] V. Srivastava, P.M. Pandey, Effect of process parameters on the performance of EDM process with ultrasonic assisted cryogenically cooled electrode. *Journal of Manufacturing Processes* 14 (2012) 393-402.
- [66] A. Abdullah, M.R. Shabgard, Effect of ultrasonic vibration of tool on electrical discharge machining of cemented tungsten carbide (WC-Co). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 38 (2008) 1137-1147.
- [67] S. Kalpakjian, S.R. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación, 4ª Edición, México, 2002, pp. 560.
- [68] Z.Y. Wang, K.P. Rajurkar. Cryogenic machining of hard-to-cut materials, *Wear* 239 (2000) 168-175.
- [69] A. Shokrani, V.Dhokia, S.T. Newman, Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 57 (2012) 83-101.
- [70] I.A. Choudhury, M.A. El-Baradie, Machinability of nickel-base super alloys: a general review. *Journal of Materials Processing Technology* 77 (1998) 278-284.
- [71] D. Zhu, X. Zhang, H. Ding, Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 64 (2013) 60-77.

- [72] A. Thakur, S. Gangopadhyay, State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based alloys. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.10.001>
- [73] J. Xiao, N. Prud'homme, N. Li, V. Ji, Influence of humidity on high temperature oxidation of Inconel 600 alloy: Oxide layers and residual stress study. *Applied Surface Science* 284 (2013) 446-452.
- [74] Y. Zhao, M. Kunieda, K. Abe, Study of EDM cutting of single crystal silicon carbide. *Precision Engineering* 38 (2014) 92-99.
- [75] Y. Zhao, M. Kunieda, K. Abe, Experimental investigations into EDM behaviours of single crystal silicon carbide. *Procedia CIRP* 6 (2013) 135-139.
- [76] K.K. Saxena, A.S. Srivastava, S. Agarwal, Experimental investigation into the micro-EDM characteristics of conductive SiC. *Ceramics International* 42 (2016) 1597-1610.
- [77] C.J. Luis, I. Puertas, G. Villa, Material removal rate and electrode wear study on the EDM of silicon carbide. *Journal of Materials Processing Technology* 164-165 (2005) 889-896.
- [78] I. Puertas, C.J. Luis, G. Villa, Spacing roughness parameters study on the EDM of silicon carbide. *Journal of Materials Processing Technology* 164 (2005) 1590-1596.
- [79] I. Puertas, C.J. Luis, A study on the electrical discharge machining of conductive ceramics. *Journal of Materials Processing Technology* 153-154 (2004) 1033-1038.
- [80] K.M. Patel, P.M. Pandey, P.V. Rao, Surface integrity and material removal mechanisms associated with the EDM of Al₂O₃ ceramic composite. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 27 (2009) 892-899.
- [81] A. Schubert, H. Zeidler, M. Hahn, M. Hackert-Oschätzchen, J. Schneider, Micro-EDM milling of electrically nonconducting zirconia ceramics. *Procedia CIRP* 6 (2013) 297-302.

- [82] E. Ferraris, D. Reynaerts, B. Lauwers, Micro-EDM process investigation and comparison performance of Al₃O₂ and ZrO₂ based ceramic composites. CIRP Annals – Manufacturing Technology 60 (2011) 235-238.
- [83] C.S. Trueman, J. Huddleston, Material removal by spalling during EDM of ceramics. Journal of the European Ceramic Society 20 (2000) 1629-1635.
- [84] O. Malek, J. Vleugels, K. Vanmeensel, S. Huang, J. Liu, S. Van den Berghe, A. Datye, K.H. Wu, B. Lauwers, Electrical discharge machining of B₄C-TiB₂ composites. Journal of the European Ceramic Society 31 (2011) 2023-2030.
- [85] M.S. Reza, M.A. Azmir, S.H. Tomadi, M.A. Hassan, R. Daud, Effects of polarity parameter on machining of tool steel workpiece using electrical discharge machining. National Conference in Mechanical Engineering Research and Postgraduate Students (2010) 621-626.
- [86] N. Beri, H. Pungotra, A. Kumar, To study the effect of polarity and current during electric discharge machining of Inconel 718 with Cu-W powder metallurgy electrode. Proceedings of the National Conference on Trends and Advances in Mechanical Engineering, YMCA University of science and technology, Faridabad, Haryana (2012).
- [87] A. Parshuramulu, K. Buschaiah, P. Laxminarayana, A study on influence of polarity on the machining characteristics of sinker EDM. International Journal of advanced research in engineering and technology 4 (3) (2013) 158–162.
- [88] R. Ji, Y. Liu, Y. Zhang, B. Cai, X. Li, High-speed end electric discharge milling of silicon carbide ceramics. Materials and Manufacturing Processes 26 (2011) 1050-1058.
- [89] C.C. Wang, H.M. Chow, L.D. Yang, C.T. Lu, Recast layer removal after electrical discharge machining via Taguchi analysis: a feasibility study. Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) 4134-4140.

- [90] S. Chakraborty, V. Dey, S.K. Ghosh, A review on the use of dielectric fluids and their effects in electrical discharge machining characteristics. *Precision Engineering* 40 (2015) 1-6.
- [91] F.N. Leao, I.R. Pashby, A review on the use of environmentally-friendly dielectric fluids in electrical discharge machining. *Journal of Materials Processing Technology* 149 (2004) 341-346.
- [92] M. Kunieda, M. Yoshida, Electrical discharge machining in gas. *Annals of the CIRP* 46 (1997) 143-146.
- [93] Y. Liu, R. Ji, Y. Zhang, H. Zhang, Investigation of emulsion for die sinking EDM. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 47 (2010) 403-409.
- [94] G. Skrabalak, J. Kozak, M. Zyburka, Optimization of dry EDM milling process. *Procedia CIRP* 6 (2013) 332-337.
- [95] 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* 214 (2014) 1052-1061.
- [96] P. Peças, E. Henriques, Influence of silicon powder-mixed dielectric on conventional electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 1465-1471.
- [97] 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* 79 (1998) 30-40.
- [98] A. Kumar, S. Maheshwari, C. Sharma, N. Beri, Analysis of machining characteristics in additive mixed electric discharge machining of nickel-based super alloy Inconel 718. *Materials and Manufacturing Processes* 26:8 (2011) 1011-1018.B.

- [99] N. Kumar, L. Kumar, H. Tewatia, R. Yadav, Comparative study for MRR on die-sinking EDM using electrode of copper and graphite. *The International Journal of Advanced Technology & Engineering Research* 2 (2012) 170-174.
- [100] F. Klocke, M. Zeis, A. Klink, D. Veselovac, Technological and economical comparison of roughing strategies via milling, sinking-EDM, wire-EDM and ECM for titanium and nickel-based blisks. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 6 (2013) 198-203.
- [101] K.L. Aas, Performance of two graphite electrode qualities in EDM of seal slots in a jet engine turbine vane. *Journal of Materials Processing Technology* 149 (2004) 152-156.
- [102] F. Klocke, M. Schwade, A. Klink, D. Veselovac, Analysis of material removal rate and electrode wear in sinking EDM roughing strategies using different graphite grades. *Procedia CIRP* 6 (2013) 163-167.
- [103] B. Jha, K. Ram, M. Rao, An overview of technology and research in electrode design and manufacturing in sinking electrical discharge machining. *Journal of Engineering Science and Technology Review* 4 (2) (2011) 118-130.
- [104] H.S. Shandu, V. Mehta, J. Manchanda, G.S. Phull, Investigation of electric discharge machining of Inconel 718 using special graphite electrode, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. E-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X.
- [105] S. Dhanabalan, K. Sivakumar, C.S. Narayanan, Analysis of form tolerances in electrical discharge machining process for Inconel 718 and 625. *Materials and Manufacturing Processes* 29 (2014) 253-259.
- [106] A. Torres, I. Puertas, C.J. Luis, Modelling of Surface finish, electrode wear and material removal rate in electrical discharge machining of hard-to-machine alloys. *Precision Engineering* 40 (2015) 33-45.
- [107] H.S. Payal, R. Choudhary, S. Singh, Analysis of electro discharge machined surfaces of EN-31 tool steel. *Journal of Scientific & Industrial Research* 67 (2008) 1072-1077.

- [108] B. Singh, M. Singh, Performance of different electrode materials in electric discharge machining (EDM) Inconel 600. Proceedings of 12th IRF International Conference. ISBN: 978-93-84209-31-5.
- [109] N. Beri, S. Maheshwari, C. Sharma, A. Kumar, Surface quality modification using powder metallurgy processed Cu-W electrode during electric discharge machining of Inconel 718. Procedia Materials Science 5 (2014) 2629-2634.
- [110] O. Yilmaz, M.A. Okka, Effect of simple and multi-channel electrodes application on EDM fast hole drilling performance. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 51 (2010) 185-194.
- [111] P.S. Bharti, S. Maheshwari, C. Sharma, Experimental investigation of Inconel 718 during die-sinking electric discharge machining. International Journal of Engineering Science and Technology 2 (11) (2010) 6464-6473.
- [112] P. Sengottuvel, S. Satishkumar, D. Dinakaran, Optimization of multiple characteristics of EDM Parameters based on desirability approach and Fuzzy modeling. Procedia Engineering 64 (2013) 1069-1078.
- [113] M.S. Sohani, V.N. Gaitonde, B. Siddeswarappa, A.S. Deshpande, Investigations into the effect of tool shapes with size factor consideration in sink electrical discharge machining (EDM) process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 45 (2009) 1131-1145.
- [114] N. Pellicer, J. Ciurana, T. Ozel, Influence of process parameters and electrode geometry on feature micro-accuracy in electro discharge machining of tool steel. Materials and Manufacturing Processes 24 (2009) 1282-1289.
- [115] Y.H. Jeong, B. Min, Geometry prediction of EDM-drilled holes and tool electrode shapes of micro-EDM process using simulation. International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) 1817-1826.
- [116] E.C. Jameson, Electrical discharge machining. Ed. Dearborn, Michigan, 2001.

- [117] Y. Qingfeng, W. Baorui, Z. Yongbin, J. Fang, L. Guangmin, Research of lower tool electrode wear in simultaneous EDM and ECM. *Journal of Materials Processing Technology* 214 (2014) 1759-1768.
- [118] N. Mohri, M. Suzuki, M. Furuya, N. Saito, Electrode wear process in electrical discharge machining. *Annals of the CIRP* 44 (1995).
- [119] J. Marafona, Black layer characterization and electrode wear ratio in electrical discharge machining (EDM). *Journal of Materials Processing Technology* 184 (2007) 27-31.
- [120] J.Murray, D. Zdebski, A.T.Clare, Workpiece debris deposition on tool electrodes and secondary discharge phenomena in micro-EDM. *Journal of Materials Processing Technology* 212 (2012) 1537-1547.
- [121] E. Uhlmann, M. Roehner, Investigations on reduction of tool electrode wear in micro-EDM using novel electrode materials. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 1 (2008) 92-96.
- [122] S. Abdulkareem, A. Ali Khan, M. Konneh, Reducing electrode wear ratio using cryogenic cooling during electrical discharge machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 45 (2009) 1146-1151.
- [123] R. Venkata Rao, V.D. Kalyankar, Optimization of modern machining process using advanced optimization techniques: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 73 (2014) 1159-1188.
- [124] U. Çaydas, A. Haşçalik, Modeling and analysis of electrode wear and white layer thickness in die-sinking EDM process through response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 38 (2008) 1148-1156.
- [125] I. Puertas, C.J. Luis, Optimization of EDM conditions in the manufacturing process of B₄C and WC-Co conductive ceramics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 59 (2012) 575-582.

- [126] V. Aggarwal, S.S. Khangura, R.K. Garg, Parametric modeling and optimization for wire electrical discharge machining of Inconel 718 using response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 79 (2015) 31-47.
- [127] R. Chakravorty, S.K. Gauri, S. Chakraborty, Optimization of correlated responses of EDM process. *Materials and Manufacturing Processes* 27 (2012) 337-347.
- [128] Vikas, Shashikant, A.K. Roy, K. Kumar, Effect and optimization of machine process parameters on MRR for EN19 & En41 materials using Taguchi. *Procedia Technology* 14 (2014) 204-210.
- [129] A.M. Nikalje, A. Kumar, K.V.S. Srinadh, Influence of parameters and optimization of EDM performance measures on MDN 300 steel using Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 69 (2013) 41-49.
- [130] Y. Keskin, H.S. Halkaci, M. Kizil, An experimental study for determination of the effects of machining parameters on surface roughness in electrical discharge machining (EDM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 28 (2006) 1118-1121.
- [131] M. Hourmand, S. Farahany, A.A.D. Sarhan, M.Y. 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. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 77 (2015) 831-838.
- [132] M. Dastagiri, A. Hemantha Kumar, Experimental investigation of EDM parameters on stainless steel EN41b. *Procedia Engineering* 97 (2014) 1551-1564.
- [133] T.R. Newton, S.N. Melkote, T.R. Watkins, R.M. Trejo, L. Reister, Investigation on the effect of process parameters on the formation and

characteristics of recast layer in wire-EDM of Inconel 718. *Materials, Science and Engineering A* 513-514 (2009) 208-215.

[134] D.V. Ghewade, S.R.Nipanikar, Experimental study of electro discharge machining for Inconel material. *Journal of Engineering Research and Studies* 2 (2) (2011) 107-112.

[135] S. Rajesha, A.K. Sharma, P. Kumar, On electro discharge machining of Inconel 718 with hollow tool. *Journal of Materials Engineering and Performance* 21 (6) (2012) 882-891.

[136] C.P. Mohanty, S.S. Mahapatra, M.R. Singh, An experimental investigation of machinability of Inconel 718 in electrical discharge machining. *Procedia Materials Science* 6 (2014) 605-611.

[137] M. Ay, U. Caydas, A. Hascalik, Optimization of micro-EDM drilling of Inconel 718 superalloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 66 (5) (2013) 1015-1023.

[138] S. Rajendran, K. Marimuthu, M. Sakthivel, Study of crack formation and resolidified layer in EDM process on T90Mn2W50Cr45 tool steel. *Materials and Manufacturing Processes* 28 (2013) 664-669.

[139] S. Rajesha, A.K. Sharma, P. Kumar, Some aspects of surface integrity study of electro discharge machined Inconel 718. *Proceedings of the 36th International MATADOR Conference* (2010) 439-444.

[140] T.W. Newton, S.N. Melkote, T.R. Watkins, R.M. Trejo, L. Reister, Investigation of the effect of process parameters on the formation and characteristics of recast layer in wire-EDM of Inconel 718. *Materials Science & Engineering A* 513-514 (2009) 208-215.

[141] B. Pradhan, M. Masanta, R. Sarkar, B. Bhattacharyya, Investigation of electro-discharge micro-machining of titanium super alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 41 (2009) 1094-1106.

- [142] L. Li, Y.B. Guo, X.T. Wei, W. Li, Surface integrity characteristics in wire-EDM of Inconel 718 at different discharge energy. *Procedia CIRP* 6 (2013) 220-225.
- [143] J. Carvalho Ferreira, A study of die helical thread cavity surface finish made by Cu-W electrodes with planetary EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 34 (2007) 1120-1132.
- [144] K.P. Rajurkar, *Handbook of Design, Manufacturing and Automation*. ISBN-0471552186 Chapter 13: Nontraditional Manufacturing Processes, Wiley, USA, 1994.
- [145] N. Mohd Abbas, D.G. Solomon, Md. Fuad Bahari, A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 (2007) 1214-1228.
- [146] M.S. Reza, M.A. Azmir, S.H. Tomadi, M.A. Hassan, R. Daud, Effects of polarity parameter on machining of tool steel workpiece using electrical discharge machining. *National Conference in Mechanical Engineering Research and Postgraduate Students* (2010) 621-626.
- [147] C.J. Luis, I. Puertas, Methodology for developing technological tables used in EDM processes of conductive ceramics. *Journal of Materials Processing Technology* 189 (2007) 301-309.
- [148] UNE 15600-1:2005, Máquinas-Herramienta. Condiciones de ensayo de máquinas de electroerosión por penetración. Vocabulario y control de la precisión. Parte 1: Máquinas con una columna (tipo bancada en cruz y tipo bancada fija). AENOR, Madrid 2005.
- [149] ISO 11090-1:2014, Test conditions for die sinking electro-discharge machines (die sinking EDM). Testing of the accuracy. Part 1: Single-column machines (cross-slide table type and fixed-table type).
- [150] UNE-EN ISO 4287:1999, Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial. AENOR, Madrid 1999.

- [151] UNE 82305-2:1991, Muestras de comparación de rugosidad. Parte 2: Superficies obtenidas por electroerosión, granallado, arenado y pulido. AENOR, Madrid 1991.
- [152] ISO 2632-2:1985, Roughness comparison specimens. Part 2: Spark-eroded, shot-blasted and grit-blasted, and polished.
- [153] UNE-EN ISO 16610-21, Especificación geométrica de productos (GPS). Filtrado. Parte 21: Filtros de perfiles lineales: Filtros gaussianos. AENOR, Madrid 2013.
- [154] UNE-EN ISO 4287:1999/A1: 2010, Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial. Modificación 1: Número de picos. AENOR, Madrid 2010.
- [155] E.S. Gadelmawla, M.M. Koura, T.M.A. Maksoud, I.M. Elewa, H.H. Soliman, Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology* 123 (2002) 133-145.
- [156] Special Metals Corporation, Inconel 600 guide (2008).
- [157] D.G. Thakur, B. Ramamoorthy, L. Vijayaraghavan, Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning. *Materials and Design* 30 (2009) 1718-1725.
- [158] www.goodfellow.com. Last access: 17-11-2015.
- [159] R. Arunachalam, M.A. Mannan, Machinability of nickel-based high temperature alloys. *Machining Science and Technology: an International Journal* 4:1 (2000) 127-168.
- [160] Z.P. Hao, Y. Lu, D. Gao, Y.H. Fan, Y.L. Chang, Cutting parameter optimization based on optimal cutting temperature in machining Inconel 718. *Materials and Manufacturing Processes* 27 (2012) 1084-1089.

- [161] F. Wang, Y. Liu, Y. Shen, R. Ji, Z. Tang, Y. Zhang, Machining performance of Inconel 718 using high current density electrical discharge milling. *Materials and Manufacturing Processes* 28 (2013) 1147-1152.
- [162] Y.S. Liao, H.M. Lin, J.H. Wang, Behaviors of end milling Inconel 718 superalloy by cemented carbide tools. *Journal of Materials Processing Technology* 201 (2008) 460-465.
- [163] E.O. Ezugwu, Z.M. Wang, A.R. Machado, The machinability of nickel-base alloys: a review. *Journal of materials processing technology* 86 (1999) 1-16.
- [164] R. Königshofer, S. Fürnsinn, P. Steinkellner, W. Lengauer, R. Haas, K. Rabitsch, M. Scheerer, Solid-state properties of hot-pressed TiB₂ ceramics. *International journal of refractory metals & hard materials* 23 (2005) 350-357.
- [165] G.B. Raju, B. Basu, A.K. Suri, Thermal and electrical properties of TiB₂-MoSi₂. *International Journal of Refractory Metals and & Hard Materials* 28 (2010) 174-179.
- [166] R.G. Munro, Materials properties of titanium diboride. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology* 105 (2000) 709-720.
- [167] G.B. Raju, B. Basu, Densification, Sintering Reactions, and Properties of Titanium Diboride with Titanium disilicide as a sintering aid. *Journal of the American Ceramic Society* 90 (11) (2007) 3415-3423.
- [168] R. S. Clijsters, K. Liu, D. Reynaerts, B. Lauwers, EDM technology and strategy development for the manufacturing of complex parts in SiSiC. *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2010) 631-641.
- [169] R. Ji, Y. Liu, Y. Zhang, X. Dong, Z. Chen, B. Cai, Experimental research on machining characteristics of SiSiC ceramic with end electric discharge milling. *Journal of Mechanical Science and Technology* 25 (6) (2011) 1535-1542

- [170] I. Puertas, C.J. Luis, Análisis de la influencia de las condiciones de proceso sobre el acabado superficial de materiales cerámicos fabricados por electroerosión. *Revista de metalurgia* 40 (2004) 447-457.
- [171] R. Ji, Y. Liu, Y. Zhang, B. Cai, X. Li, C. Zheng, Effect of machining parameters on surface integrity of silicon carbide ceramic using end electric discharge milling and mechanical grinding hybrid machining. *Journal of Mechanical Science and Technology* 27 (1) (2013) 177-183.
- [172] J. Mercer, Graphite vs. copper. *Poco EDM Technical Manual* (2014).
- [173] www.poco.com. Last access: 14-12-2015.
- [174] www.plansee.com. Last access: 14-12-2015.
- [175] A. Torres, C.J. Luis, I. Puertas, Analysis of the influence of EDM parameters on surface finish, material removal rate, and electrode wear of an INCONEL 600 alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 80 (2015) 123-140.
- [176] A. Torres, I. Puertas, C.J. Luis, EDM machinability and surface roughness analysis of INCONEL 600 using graphite electrodes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. DOI 10.1007/s00170-015-7880-x
- [177] P.S. Bharti, S. Maheswari, C. Sharma, Multi-objective optimization of electric-discharge machining process using controlled elitist NSGA-II. *Journal of mechanical science and technology* 26 (6) (2012) 1875-1883.
- [178] U.S. Yadav, V. Yadava, Parametric study on electrical discharge drilling of aerospace nickel alloy. *Materials and manufacturing processes* 29 (2014) 260-266.
- [179] M.K. Pradhan, C.K. Biswas, Modeling of machining parameters for MRR in EDM using response surface methodology. *Proceedings of NCMSTA'08 Conference* (2008).
- [180] K.M. Patel, P.M. Pandey, P.V. Rao, Determination of an optimum parametric combination using a surface roughness prediction model for EDM of

Al₂O₃/SiC_w/TiC ceramic composite. Materials and manufacturing processes 24 (2009) 675-682.

[181] R. Ali MahdaviNejad, Modeling and Optimization of Electrical Discharge Machining of SiC Parameters, Using Neural Network and Non-dominating Sorting Genetic Algorithm (NSGA II). Materials Sciences and Applications 2 (2011) 669-675.

[182] I. Puertas, C.J. Luis, Modelling the manufacturing parameters in electrical discharge machining of siliconized silicon carbide. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 217 (6) (2003) 791-803.

