

# APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE SOLDADURA EN FUNCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN TÉRMICA RESULTANTE.

*Euebio Martínez<sup>P</sup>*

*Escuela de Arquitectura e Ingeniería de Edificación de UPCT*

*Manuel Estrems*

*Departamento de Materiales e Ingeniería de Fabricación de UPCT*

*Valentín Miguel*

*Escuela de Ingenieros Industriales de Albacete de UCLM*

*Antonio Garrido*

*Escuela de Arquitectura e Ingeniería de Edificación de UPCT*

*José Antonio Guillén*

*Escuela de Arquitectura e Ingeniería de Edificación de UPCT*

## **Abstract**

One of the largest difficulties traditionally found in stainless steel constructions has been the execution of welding parts in them. At the present time, the available technology permits use arc welding processes for that application with any disadvantage. Response surface methodology is used for optimizing a process in which the variables that take part in it are not related each other by a mathematical law. This way, an empiric model must be formulated. With this methodology the optimization of one selected variable may be done. In the case of welding, it allows determine the best operation conditions and minimize the probability of being defects in the joint. In this research, an optimization of TIG welding parameters is made as a function of temperature distribution into the joint: current, voltage, arc efficiency and welding speed.

**Key words:** *Response surface methodology, welding, thermal modelling, statistical design, ANOVA*

## **Resumen**

Una de las mayores dificultades encontradas tradicionalmente en la construcción de estructuras metálicas con acero inoxidable ha sido la unión de los perfiles estructurales. En la actualidad, con las tecnologías de unión disponibles, la unión por soldadura resulta totalmente aplicable con las ventajas propias de este procedimiento. La metodología de superficie de respuesta se emplea para optimizar un proceso en el que las variables que intervienen no están relacionadas a partir de un modelo matemático exacto, sino que es necesario construir un modelo empírico para aproximar su comportamiento. La principal utilidad de esta metodología es la optimización de la variable de interés. En el caso de la soldadura permite determinar las condiciones óptimas de operación para minimizar las probabilidades de aparición de defectos en el cordón. En este trabajo de investigación se realiza una optimización

de diferentes parámetros del proceso de soldeo TIG, intensidad, tensión, rendimiento y velocidad de soldeo en función de su campo de temperaturas.

**Palabras clave:** *metodología superficie de respuesta, soldadura, simulación térmica, diseño de experimentos, ANOVA*

## 1. Introducción

La metodología de superficie de respuesta (MSR), es una colección de técnicas que permite al investigador inspeccionar una respuesta, que se puede mostrar como una superficie, cuando los experimentos investigan el efecto que tiene al variar factores cuantitativos en los valores que toma una variable dependiente o respuesta (Box et al., 1951). Esto es, se trata de encontrar los valores óptimos para las variables independientes que maximizan, minimizan o cumplen ciertas restricciones en la variable respuesta. La MSR es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas que son útiles para la modelización y análisis en aplicaciones en las que una respuesta de interés es influenciada por distintas variables y el objetivo es optimizar esta respuesta (García-Díaz, 1995).

Una de las dificultades encontradas en la construcción de estructuras con acero inoxidable lo ha constituido la unión de los perfiles estructurales. En la actualidad, con las tecnologías de unión disponibles, la unión por soldadura resulta aplicable con las ventajas propias de este procedimiento. Ahora bien, las temperaturas que se alcanzan son elevadas por tratarse de procesos de unión con fusión de material, lo que puede modificar las propiedades mecánicas, químicas y estéticas del material si no se toman las precauciones adecuadas. En los procesos de soldadura con elevado flujo térmico, además de la zona de fusión, existe una afección térmica en las zonas adyacentes a aquélla, ZAT, cuyo tamaño depende del alcance de las transformaciones microestructurales que tienen lugar.

El concepto del tiempo de enfriamiento entre 800°C y 500°C, simbolizado como " $t_{8/5}$ ", es ampliamente aceptado, el factor  $t_{8/5}$  es un parámetro que se puede controlar con mayor facilidad en los procesos automáticos que en los manuales. El principio se fundamenta en que para unas determinadas condiciones de soldeo, el ciclo térmico en puntos de la zona afectada térmicamente, ZAT, tendrá diferentes valores de temperatura máxima, de acuerdo a la distancia que se encuentren con respecto al centro del cordón de soldadura, pero el tiempo de enfriamiento entre 800°C y 500°C será aproximadamente igual si se mantienen constantes los parámetros de soldeo.

En este trabajo se aplica un método matemático para conocer el campo de temperaturas de un acero inoxidable austenítico del tipo AISI 304, en el proceso de soldadura del mismo. De este modo, se pueden seleccionar los parámetros de soldeo con el objetivo de obtener el valor esperable para el parámetro  $t_{8/5}$ . Para la optimización del tiempo de enfriamiento se pueden emplear diversos métodos analíticos y, en particular, la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), que permite optimizar una función de respuesta sujeta a diferentes variables independientes. Es un objetivo de cualquier diseño experimental aplicado a la optimización de un proceso, el poder estudiar la influencia de las diferentes variables de operación (factores experimentales), tanto en lo que se refiere a la variabilidad de las respuestas como a su tendencia central, realizando siempre el mínimo de experiencias posibles. Se trata de establecer el modelo matemático teórico que los relacione realizando el menor número de experimentos posible teniendo en cuenta para ello una estrategia secuencial obteniendo en diferentes fases la máxima información con el mínimo de recursos (Montgomery, 1995).

Para determinar el campo de temperaturas en una unión soldada se puede recurrir a métodos analíticos y numéricos de resolución de las ecuaciones diferenciales que definen el proceso de difusión térmica. Los métodos analíticos presentan como ventaja, frente a los experimentales, permitir la obtención de soluciones para el ajuste de los parámetros de soldeo dirigidos a evitar efectos indeseados en la ZAT a partir de planteamientos sencillos. Los datos de temperatura considerados en el presente trabajo han sido obtenidos mediante un método numérico basado en la definición física del flujo bidimensional del calor considerando los cambios de fase y determinando la fracción líquida en cada punto del cordón (Estrems et. al, 2007). En este trabajo se han obtenido todos los valores del campo de temperaturas en puntos situados a una distancia de 5 mm del eje del cordón de soldadura.

## 2. Metodología

La metodología de superficie de respuesta usualmente se aplica junto con experimentos factoriales. El enfoque usual es utilizar el diseño de experimentos para determinar que variables están influenciando la respuesta de interés. Una vez que dichas variables son identificadas, se obtiene una estimación aproximada de la superficie de respuesta por medio de modelos factoriales especiales. Esta superficie de respuesta se usa como guía para variar gradualmente los factores controlables que afectan a la respuesta de manera tal que se mejore el valor de la respuesta. Una vez que el cambio de los factores controlables no origine una mejora predecible en la variable de la respuesta, se puede aplicar un método de experimentación más sofisticado para encontrar la superficie de respuesta operativa final del proceso de interés.

$$\eta = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (1)$$

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon \quad (3)$$

Una de las formas más sencillas de superficie de respuesta es dada por la linealidad de primer orden, donde “ $\varepsilon$ ” es el error experimental, indicado en ecuación (1), (2) y (3). (Box et al, 1951)

Donde  $x_1, x_2, \dots, x_k$  son las variables independientes y  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$  son los parámetros de regresión de la superficie estimada a partir de los datos experimentales.

## 3. Caso de estudio

Los factores que condicionan el proceso de soldeo, que influyen en la variable de respuesta son este caso, la potencia del arco eléctrico, la velocidad de soldeo y el rendimiento del procedimiento de soldeo. La respuesta del método se ve afectada al cambiar los niveles de los factores. En este trabajo la respuesta es el tiempo de enfriamiento tras el soldeo y el interés principal en la aplicación del método es optimizar dicho valor.

La función de respuesta se puede representar con una ecuación polinomial, que en el caso estudiado se ajusta a un polinomio de primer grado. En el modelo práctico aplicado en este trabajo, se ha considerado la influencia de las variables potencia del arco eléctrico, que aúna la tensión e intensidad de corriente del arco, la velocidad de soldeo y el rendimiento del proceso de soldeo. De acuerdo con la metodología de

superficie de respuesta el modelo que se obtiene es el que se indica en la ecuación (4).

$$t_{8/5} = b_0 + \sum_{i=0}^3 b_i X_i + \varepsilon \quad (4)$$

Para el caso particular de tres factores la ecuación del tiempo enfriamiento, es la indicada en la ecuación (5)

$$t_{8/5} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon \quad (5)$$

Donde los valores de  $x_1$ ,  $x_2$ , y  $x_3$  representan la potencia del arco eléctrico, la velocidad de soldeo y el rendimiento térmico del proceso de soldeo empleado, que en este caso particular ha sido el TIG, tal como se indica en la ecuación (6)

$$t_{8/5} = \beta_0 + \beta_1 P + \beta_2 v + \beta_3 \eta + \varepsilon \quad (6)$$

La relación entre los factores y niveles considerados es la indicada en la tabla 1

Factores	Niveles		
	-1	0	1
Potencia	910,00 W	1720,00 W	2530,00 W
Velocidad	3,30E-03 m/s	3,73E-03 m/s	4,16E-03 m/s
Rendimiento	0.4	0.6	0.8

Tabla 1. Niveles de las variables del proceso de soldadura por arco eléctrico

Con la combinación de los valores de las variables indicados en la tabla 1 se ha realizado la matriz de experimentos, teniendo en cuenta los valores codificados de las variables conforme a los niveles (-1, 0,1), estos niveles corresponden con los valores mínimo, medio y máximo de la potencia del arco eléctrico, la velocidad de soldeo y el rendimiento térmico del procedimiento de soldadura, estos valores se han calculado mediante el procedimiento experimental ( Miguel et al., 2008), por tanto, los valores de entrada para la simulación del mapa térmico son valores reales utilizados en los procedimientos de soldeo de estructuras metálicas. En la tabla 2 se indican los valores de la matriz de experimentos para los valores numéricos de las variables, intensidad, tensión, velocidad de soldadura y rendimiento.

Factores	Potencia	Velocidad	Rendimiento
Experimento	A	B	C
1	0	-1	1
2	0	0	0
3	1	0	1
4	0	-1	-1
5	-1	-1	0
6	-1	0	1
7	1	1	0

8	1	0	-1
9	-1	1	0
10	0	0	0
11	1	-1	0
12	0	1	-1
13	0	1	1
14	0	0	0
15	-1	0	-1

Tabla 2. Codificación de los factores –niveles

En la tabla 3, se indican los valores de intensidad, tensión de soldeo, velocidad de soldadura y rendimiento térmico del proceso para cada uno de los experimentos, de esta forma se obtiene la matriz de experimentos, donde se indican los valores de los factores para cada uno de los experimentos que se realizaron.

Experimento	Potencia (I*V)	Velocidad ( m/ seg)	Rendimiento
1	1720,00	0,0020833	0,8
2	1720,00	0,00312465	0,6
3	2530,00	0,00312465	0,8
4	1720,00	0,0020833	0,4
5	910,00	0,0020833	0,6
6	910	0,00312465	0,8
7	2530	0,004166	0,6
8	2530	0,00312465	0,4
9	910	0,004166	0,6
10	1720	0,00312465	0,6
11	2530	0,0020833	0,6
12	1720	0,004166	0,4
13	1720	0,004166	0,8
14	1720	0,00312465	0,6
15	910	0,00312465	0,4

Tabla 3. Valores de la matriz de experimentos

El MSR necesita resolver la ecuación matricial que relaciona el tiempo de enfriamiento después de la soldadura entre la temperatura de 800°C y 500°C, en función de los parámetros de soldeo utilizados para realizar los experimentos, seleccionados a partir de la matriz de experimentos indicados en la ecuación (7)

$$[t_{8/5}] = [X][\beta] \quad (7)$$

Donde la matriz [X] representa los términos independientes en el procedimiento, esto es los valores calculados v, P y η, respectivamente conforme a lo indicado en la ecuación (8)

$$t_{8/5} = aP + bv + c\eta + d \quad (8)$$

Los términos independientes a, b, c, d, son los coeficientes a calcular para cada una de las combinaciones en el diseño de experimentos, constituyendo los elementos de la matriz [β] (Suzuki et al; 1991).

Para calcular la matriz de coeficientes [β] se tiene que plantear la ecuación matricial indicada en la ecuación (9) ya que es necesario trasponer la matriz [X] y multiplicarla

por sí misma para poder resolver la ecuación. Ello se debe a que [X] no es una matriz cuadrada y, por tanto, carece de inversa.

$$[\beta] = [X^T X]^{-1} [X^T] [t_{8/5}] \quad (9)$$

Según esto, la matriz  $[t_{8/5}]$  contiene los valores del tiempo de enfriamiento calculados mediante el modelo de simulación térmica (Estrems et. al, 2008) que está basado en el método de Crank-Nicholson para la resolución de la ecuación diferencial del calor (Crank, 1947). Para calcular cada uno de estos tiempos de enfriamiento se ejecuta el programa de simulación térmica y como resultado se tiene el mapa térmico para cada unas de las condiciones de soldeo que se han establecido. Los datos geométricos del metal a soldar, son los indicados en la tabla 4.

<b>L</b>	<b>0,3</b>	<b>m</b>	<b>longitud</b>
<b>B</b>	0,075	m	ancho
<b>D</b>	0,002	m	espesor

Tabla 4. Datos geométricos

Los valores de las propiedades físicas del acero inoxidable que se han utilizado en la simulación son los indicados en la tabla 5.

<b>T0</b>	<b>20</b>	<b>°C</b>	<b>Temperatura inicial</b>
<b>k</b>	25	J/m/s/K	conductividad de Fourier
<b>Tf</b>	1400	°C	Temperatura de fusión
<b>Cp</b>	630	J/kgK	Capacidad Calórica
<b>ρ<sub>0</sub></b>	7500	kg/m <sup>3</sup>	Densidad
<b>ΔH</b>	272000	J/kg	Entalpía de cambio de fase

Tabla 5. Propiedades Físicas

El tamaño del mallado de cada uno de los nodos es el indicado en la tabla 6.

<b>Δx</b>	<b>0,0015</b>	<b>m</b>	<b>Dirección del movimiento</b>
<b>Δy</b>	0,0015	m	Dirección perpendicular al movimiento

Tabla 6. Tamaño de nodo

La medida del tiempo de enfriamiento ha sido tomada a la misma distancia del eje del cordón de soldadura, para cada una de las 15 simulaciones realizadas, esta distancia ha sido de 5 mm. En cada una de estas simulaciones han sido constantes los datos indicados en las tablas 4, 5, y 6, mientras que los valores de intensidad, tensión, velocidad y rendimiento térmico de soldeo son los indicados en la matriz de experimentos del MSR. Como ejemplo se muestra en la Figura 1, la simulación nº 12 y en la tabla 7 se indica el valor del tiempo de enfriamiento entre 800°C y 500°C para esta simulación.

<b>tiempo 800</b>	<b>34,5655305</b>
<b>tiempo 500</b>	<b>59,4095055</b>
<b>t<sub>8/5</sub></b>	<b>24,843975</b>

Tabla 7. Valor  $t_{8/5}$  en ensayo 12

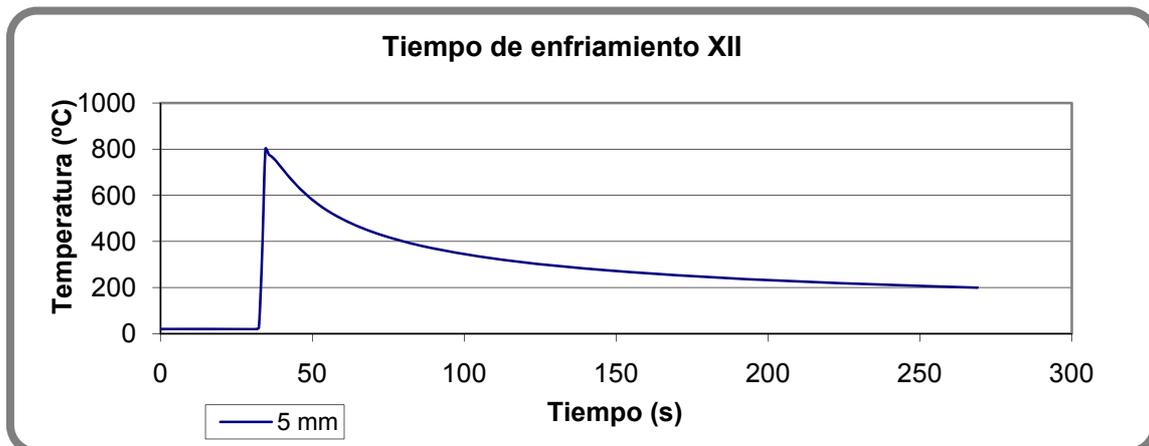


Figura 1. Distribución de temperaturas en el ensayo nº12

Análogamente se realiza lo mismo para cada uno de los experimentos, y se obtiene el valor de matriz del tiempo de enfriamiento mediante el modelo matemático.

<b>Simulación</b>	<b>Tiempo enfriamiento</b>
<b>Simulación 1</b>	265,684
<b>Simulación 2</b>	86,41
<b>Simulación 3</b>	162,63
<b>Simulación 4</b>	108
<b>Simulación 5</b>	54
<b>Simulación 6</b>	48,96
<b>Simulación 7</b>	131,78
<b>Simulación 8</b>	93,61
<b>Simulación 9</b>	16,202
<b>Simulación 10</b>	86,409
<b>Simulación 11</b>	272,164
<b>Simulación 12</b>	24,84
<b>Simulación 13</b>	95,055
<b>Simulación 14</b>	86,409
<b>Simulación 15</b>	11,52

Finalmente, la matriz de coeficientes  $[\beta]$  obtenida es la indicada en la tabla 8

a	0.08
b	-51852.3
c	209.04
d	-1.06

Tabla 8. Matriz de coeficientes

Por consiguiente, la ecuación para el tiempo de enfriamiento  $t_{3/5}$  queda modelizada como se establece en la ecuación (10). Para resolver las ecuaciones matriciales anteriores se ha empleado como apoyo de cálculo la aplicación informática MS-EXCEL 2007.

$$t_{3/5} = -1,06 + 0,08*Potencia - 51.852,30*Velocidad + 209,04*Rendimiento \quad (10)$$

## 5. Resultados

En este trabajo se realiza un análisis de variabilidad, o análisis de la varianza, para decidir si las diferencias de medias son o no estadísticamente significativas. Se estudia un método analítico para comparar las medias de varias simulaciones. Este es el método clásico que se basa en la construcción y análisis de una tabla denominada "ANOVA" (Analisis of Variance") (Prat et al, 1994).

El análisis de varianza sirve para comparar si los valores de un conjunto de datos numéricos son significativamente distintos a los valores de otro o más conjuntos de datos. El procedimiento para comparar estos valores está basado en la varianza global observada en los grupos de datos numéricos a comparar. El análisis de varianza lleva a la realización de pruebas de significación estadística, usando la denominada "distribución F" de Snedecor.

En estadística, un resultado se denomina "estadísticamente significativo" cuando no es probable que haya sido debido al azar. Una "diferencia estadísticamente significativa" solamente significa que hay evidencias estadísticas de que hay una diferencia; no significa que la diferencia sea grande o significativa.

El "nivel de significación" de un test es un concepto estadístico asociado a la "Contraste de hipótesis o verificación de una hipótesis". En pocas palabras, se define como la probabilidad de tomar la decisión de rechazar la "hipótesis nula" cuando ésta es verdadera. La decisión se toma a menudo utilizando el "valor P" o "p-valor": si el valor P es inferior al nivel de significación, entonces la hipótesis nula es rechazada. Cuanto menor sea el valor P, más significativo será el resultado. Por tanto, el nivel de significatividad de un contraste de hipótesis es una probabilidad P tal que la probabilidad de tomar la decisión de rechazar la hipótesis nula cuando esta es verdadera no es mayor que P.

El nivel de significatividad es comúnmente representado por  $\alpha$ . Son comunes los niveles de significatividad del 5%, 1% y 0.1%. Si un contraste de hipótesis proporciona un valor P inferior a  $\alpha$ , la hipótesis nula es rechazada. Tal resultado denominado como 'estadísticamente significativo'. Cuanto menor sea el nivel de significatividad, más fuerte será la evidencia de que un hecho no se debe a una mera coincidencia (Montgomery, 2000).

Con la aplicación del software "Generated using Sagata Ltd. Software" para el caso particular de primer orden, se llega a los siguientes resultados.

Análisis Regresión	Coeficiente	Error estándar	T estadístico	p-valor
constante	-1,06	63,60	-0,02	0,987
Potencia	0,08	0,02	5,00	0,000

<b>Velocidad</b>	-51852,28	12722,33	-4,08	0,002
<b>Rendimiento</b>	209,04	66,24	3,16	0,009

Tabla 9. Análisis de la regresión

Análisis Varianza	grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Cociente-F	P-valor
<b>Modelo</b>	3	72367,25	24122,42	17,18	0,000184
<b>Residuo</b>	11	15445,77	1404,16		
<b>Total</b>	14	87813,02			

Tabla 10. Análisis de la Varianza

Analizando las tablas 9 y 10 se indica el valor de salida, el valor calculado del estadístico F y su nivel de significación, que es la probabilidad de rechazar la hipótesis nula siendo cierta. El nivel de significación nos va a permitir aceptar o rechazar la hipótesis nula, es decir, independencia entre las variables, potencia, velocidad y rendimiento del procedimiento de soldeo, sin necesidad de tener que comparar el valor de la F con un valor real de las tablas estadísticas de una F de Snedecor. El valor que nos sirve de referencia para aceptar o rechazar la hipótesis nula es el nivel de significación. Si el nivel de significación es mayor que 0.05, aceptaremos la hipótesis nula de independencia entre las variables, por tanto, no existirían efectos diferenciales entre los parámetros de soldadura analizados. Pero si el nivel de significación es menor que 0.05 rechazaremos la hipótesis nula y aceptaremos la hipótesis alternativa, es decir, concluiremos que existe una relación de dependencia de las variables y en este caso podremos decir que los distintos niveles del factor si influyen sobre los valores de la variable cuantitativa.

En el caso particular estudiado, dado que el nivel de significación **p-valor= 0,000184** y este valor es menor que  **$\alpha=0.05$**  rechazaremos la hipótesis nula y aceptamos que existen diferencias entre las medias de las variables de los parámetros de soldeo analizados.

Con la ecuación (10) y los valores de cada uno de los factores en cada uno de sus niveles, se calcula un valor de  $t_{8/5}$  para cada uno de los experimentos, según se indica en la tabla 11.

Exp.	Potencia (I*V)	Velocidad ( m/ seg)	Rend.	t 8/5 simulado	t 8/5 MSR	Error
<b>1</b>	1620,00	0,0020833	0,8	265,684	187,7481034	77,94
<b>2</b>	1620,00	0,00312465	0,6	86,41	91,94371081	5,53
<b>3</b>	2530,00	0,00312465	0,8	162,73	206,5517108	43,82
<b>4</b>	1620,00	0,0020833	0,4	108	104,1321034	3,87
<b>5</b>	910,00	0,0020833	0,6	54	89,14010341	35,14
<b>6</b>	910	0,00312465	0,8	48,96	76,95171081	27,99
<b>7</b>	2530	0,004166	0,6	131,78	110,7473182	21,03
<b>8</b>	2530	0,00312465	0,4	93,61	122,9357108	29,33

<b>9</b>	<b>910</b>	<b>0,004166</b>	<b>0,6</b>	<b>16,202</b>	<b>18,8526818</b>	<b>2,65</b>
<b>10</b>	1620	0,00312465	0,6	86,409	91,94371081	5,53
<b>11</b>	2530	0,0020833	0,6	272,164	218,7401034	53,42
<b>12</b>	1620	0,004166	0,4	24,84	3,8606818	20,98
<b>13</b>	1620	0,004166	0,8	95,055	79,7553182	15,30
<b>14</b>	1620	0,00312465	0,6	86,409	91,94371081	5,53
<b>15</b>	910	0,00312465	0,4	11,52	6,664289195	4,86

Tabla 11. Análisis del error

Para realizar la optimización del tiempo de enfriamiento, se analiza la tabla 11, el valor mínimo del error en valor absoluto, por tanto, se puede afirmar que la simulación nº 9 es la que nos da un menor error. Por lo tanto, el tiempo de enfriamiento óptimo según esta metodología será de 16,202 segundos. Pero uno de los objetivos de la comunicación es optimizar los parámetros de soldeo, de esta manera, tomamos los datos de la simulación nº 9 y se tiene que los parámetros óptimos según la MSR, son los indicados en la tabla 12.

<b>Potencia (I*V)</b>	<b>910 W</b>
<b>Velocidad</b>	<b>0,004166 m/s</b>
<b>Rendimiento</b>	<b>0.6</b>
<b>Tiempo óptimo</b>	<b>16.202</b>

Tabla 12. Parámetros óptimos

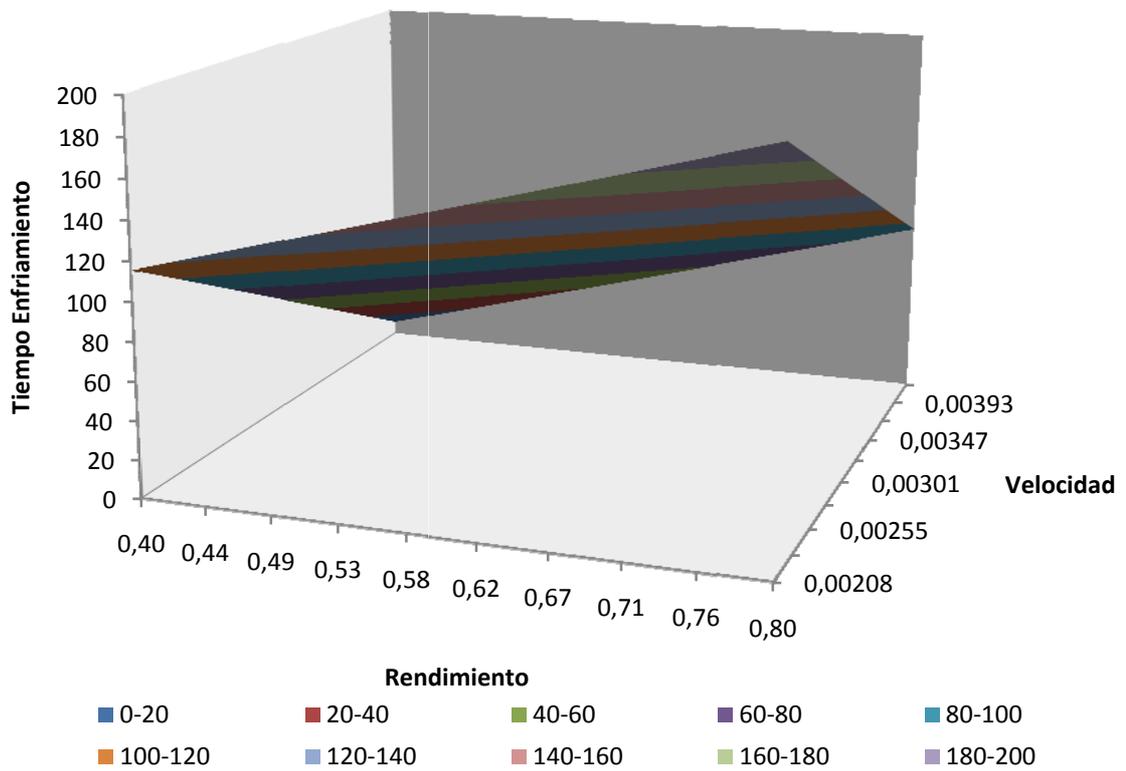


Figura 2.  $t_{8/5}$  en función de rendimiento y velocidad

En la Figura 2, se observa la superficie de respuesta del método estudiado, donde la variable de respuesta es el tiempo de enfriamiento y los factores son el rendimiento y velocidad de soldeo.

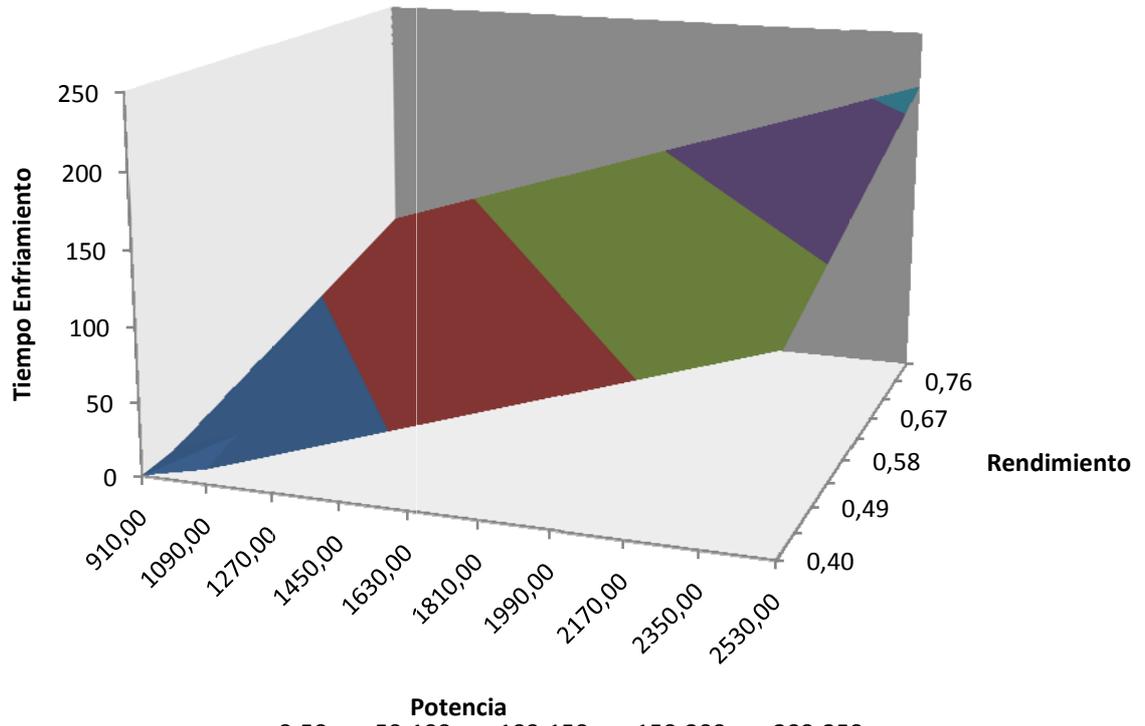


Figura 3.  $t_{8/5}$  en función de potencia y rendimiento

En la Figura 3, se indica la superficie de respuesta del método estudiado, donde la variable de respuesta es el tiempo de enfriamiento y los factores son el rendimiento y potencia de soldeo

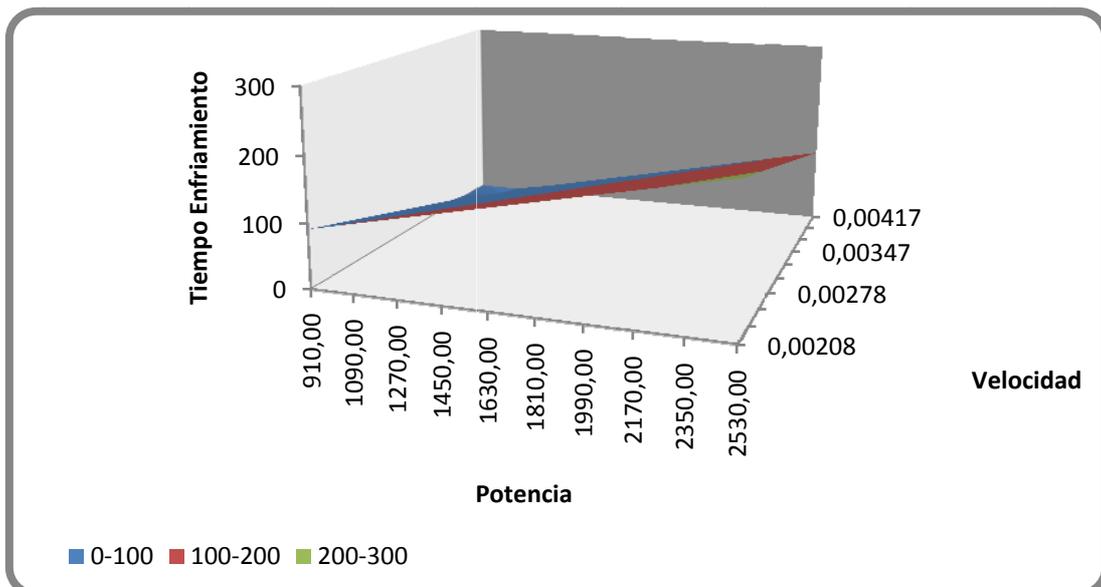


Figura 4.  $t_{8/5}$  en función de potencia y velocidad

La Figura 4, muestra la superficie de respuesta del tiempo de enfriamiento en función de los factores: potencia y velocidad de soldeo

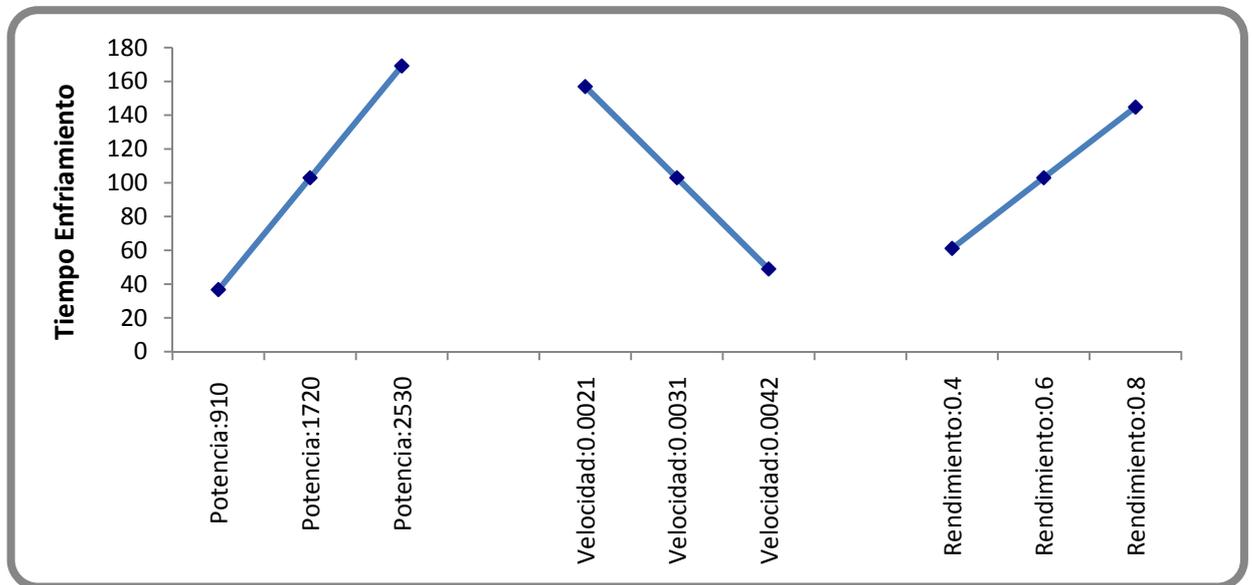


Figura 5. Relación tiempo de enfriamiento-factores

En la Figura 5 se indica una relación entre la respuesta del método, tiempo de enfriamiento y las factores analizados, potencia, velocidad y rendimiento del proceso de soldeo TIG, y se puede afirmar que conforme aumenta la potencia del arco eléctrico de la máquina de soldadura el tiempo de enfriamiento tras la soldadura aumenta. También se observa que si la velocidad de soldadura aumenta entonces el tiempo de enfriamiento disminuye y por último, si el rendimiento térmico del proceso aumenta entonces el tiempo de enfriamiento aumenta.

## 6. Conclusiones

Los resultados este estudio demuestran que el diseño estadístico de experimentos es una metodología adecuada para la optimización del tiempo de enfriamiento después de realizar la unión por soldadura TIG de dos chapas de acero inoxidable. Esta técnica estadística ha permitido la modelización del tiempo de enfriamiento en función de tres parámetros del proceso de soldeo TIG, presentando una influencia lineal de los factores potencia, velocidad y rendimiento de soldeo.

Los ciclos temperatura-tiempo durante el proceso de soldeo tienen un efecto determinante sobre las propiedades mecánicas de una unión soldada como consecuencia de la afección del proceso térmico sobre el material. El ciclo de temperatura depende de los parámetros de soldeo seleccionados, dimensiones de las piezas a unir, forma de la unión, aporte térmico, temperatura de precalentamiento.

En este trabajo se ha utilizado un método numérico para determinar el campo de temperaturas de un acero inoxidable de espesor inferior a 3 mm y poder analizar el tiempo de enfriamiento tras la soldadura del mismo. A partir de los tiempos de enfriamiento obtenidos, con el modelo matemático, se ha determinado el valor mínimo para el parámetro  $t_{8/5}$  modelizado mediante la metodología de la Superficie de

Respuesta. De este modo, se puede obtener el comportamiento de dicho parámetro en dicho entorno, en función de las variables consideradas. En este trabajo, las variables consideradas han sido la velocidad de soldeo, la potencia y rendimiento térmico del procedimiento de soldadura TIG.

El uso del presente modelo permitirá al ingeniero de soldadura realizar una simulación del tiempo de enfriamiento en la zona afectada térmicamente durante el proceso de soldeo, estableciéndose las condiciones de aporte térmico óptimas en operaciones de soldadura de metales con propiedades físicas y metalúrgicas conocidas.

Una de las limitaciones del modelo matemático es que solamente se puede aplicar a chapas delgadas de espesor inferior de 3 mm, donde el flujo de calor es bidimensional, es decir, que la conducción del calor se efectúa en las direcciones paralelas al plano de la chapa.

La validación del método presentado debe hacerse con resultados experimentales, de los valores del tiempo de enfriamiento, efectuados con los valores correspondientes de dichas variables. La aplicación del modelo para otros materiales requiere realizar su validación mediante experimentos.

## Referencias

Box, G. E. P., Wilson, K. G., "On the experimental attainment of optimum conditions", *Journal of the Royal Statistical Society*, B 13, pp. 1-45, 1951

Crank, J., Nicolson, P.A., "Practical Method for numerical Evaluation of Solutions of P.D.E. of the Heat Conduction" Type. *Proc. Cambridge Philos. Soc.* 43,1947

Estrems M., Martínez E. J, Miguel V. "Aplicación de Crack- Nicholson para el cálculo de ZAT en la soldadura TIG de una estructura metálica de acero inoxidable." En Actas del XI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. (Vigo 25-27 de Septiembre de 2007),VII, [S.I.]: [s.n.], pp. 325-335. 2007

García-Díaz, A., Phillips D.T., "Principles of Experimental Design and Analysis", Chapman & Hall; New York, 1995,

Prat A., Tort-Martorell X., Grima P., et al. "Métodos estadísticos. Control y mejora de la calidad". 1ª edición, Barcelona. Edicions UPC,pp.181-331, ISBN: 84-7653-444-2. 1994,

Miguel V., Martínez E.J., Estrems M. "Desarrollo de un procedimiento experimental para analizar el campo de temperaturas en la junta soldada de un acero inoxidable estructural." En Actas del XII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. (Zaragoza 9-11 de Julio de 2008),VII, [S.I.]: [s.n.], pp. 245-255,1991

Montgomery, D.C., R.H. Myers, "Response surface methodology: Process and product in optimization using designed experiments", John Wiley & Sons, New York, 1995

Montgomery, D.C., "Design and Analysis of Experiments", Fifth edition, John Wiley & Sons, New York, 2000

Suzuki Tamoto, "A Homogenization Method for Shape and Topology Optimization". *Comp. Methods. Appl. Mech. Eng.*, vol 93, p.291-318. 1991

## Correspondencia (Para más información contacte con):

Eusebio José Martínez Conesa

Área de Construcciones Arquitectónicas – Escuela de Arquitectura e Ingeniería de Edificación

Paseo Alfonso XIII nº 52, 30203 Cartagena

Phone: + 34 968325666

Fax: + 34 968325931

E-mail : eusebio.martinez@upct.es