

## APLICACIÓN DE MÉTODO NUMÉRICO Y OPTIMIZACIÓN DE Z.A.T EN SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

Eusebio Martínez-Conesa; Francisco Segura Quiles

*Universidad Politécnica de Cartagena*

Valentín Miguel Eguía

*Universidad de Castilla-La Mancha*

Manuel Valcuende Payá

*Universidad Politécnica de Valencia*

### Abstract

To determine the heat affected zone (HAZ) in a welded joint is resort to numerical methods of solving differential equations that define the thermal diffusion process. In this work applies a mathematical model to determine the dimension of the HAZ of an AISI 304 austenitic stainless steel in the same welding process. The temperature data considered have been obtained using this model based on the physical definition of two-dimensional heat flow considering the changes of state and determining the liquid fraction at each point of the cord. Factors considered as process variables to influence the response variable are: the power of the electric arc, the welding speed and the preheating temperature of the base metal. The response variable and object of optimization is the HAZ. Presents the relationship between the HAZ and the welding parameters used to perform the experiments, selected on the matrix of experiments. Values are obtained in the HAZ of each of the computational experiments indicated in MSR and calculated using the thermal simulation model based on the method of Cranck-Nicholson to solve the differential equation of heat.

**Keywords:** *optimization; response surface methodology (rsm); numerical methods; haz; tig*

### Resumen

Para determinar la zona afectada térmicamente (ZAT) en una unión soldada se recurren a métodos numéricos de resolución de ecuaciones diferenciales que definen el proceso de difusión térmica. En este trabajo se aplica un modelo matemático para conocer la dimensión de la ZAT de un acero inoxidable austenítico AISI 304 en el proceso de soldadura del mismo. Los datos de temperaturas considerados han sido obtenidos mediante este modelo basado en la definición física del flujo bidimensional del calor considerando los cambios de estado y determinando la fracción líquida en cada punto del cordón. Los factores considerados como variables del proceso con influencia en la variable de respuesta son: la potencia del arco eléctrico, la velocidad de soldeo y la

temperatura de precalentamiento del metal base. La variable de respuesta y objeto de optimización es la ZAT. Se plantea la relación entre la ZAT y los parámetros de soldeo utilizados para realizar los experimentos, seleccionados en la matriz de experimentos. Se obtienen los valores de la ZAT de cada uno de los experimentos computacionales indicados en MSR y calculados mediante el modelo de simulación térmica basado en el método de Cranck-Nicholson para la resolución de la ecuación diferencial del calor.

**Palabras clave:** optimización; metodología de superficie de respuesta (msr); método numérico; zat; tig

## 1. Introducción

En la soldadura por arco eléctrico existen diferentes parámetros que afectan a la calidad de la misma, como son la potencia, la velocidad de soldadura y la temperatura de precalentamiento del metal base. Por tanto, su control será esencial para garantizar una estructura de calidad. El objetivo de este trabajo es que mediante la metodología de la superficie de respuesta obtener el modelo de comportamiento de la ZAT como función de la velocidad de soldadura, la potencia y la temperatura de precalentamiento. La metodología de superficie de respuesta se utiliza para optimizar o reformular productos. Se usa principalmente para economizar dinero y reducir el tiempo de pruebas, aplicaciones y productos en procesos de ingeniería. Concretamente, el objetivo es calcular los valores óptimos para las variables que minimizan o cumplen ciertas restricciones en la variable respuesta.

## 2. Método de cálculo de la ZAT

### 2.1. Análisis de difusión de calor

Los métodos analíticos presentan como ventaja, frente a los experimentales, permiten el ajuste de los parámetros de soldeo dirigidos a evitar efectos indeseados en la ZAT a partir de planteamientos sencillos (AWS, Welding Handbook, 2001). Una de las primeras soluciones que se pueden encontrar en la literatura fue la de Suárez (Suárez, J.C.; Carrillo, E.; Molleda, F., 1991) en la que usando soluciones particulares de la ecuación de difusión bidimensional y en sólidos las aplicó con éxito a la soldadura, determinando el campo de temperaturas en el entorno del cordón. Recientemente Nguyen (Nguyen, N.T.; Ohta, A.; Matsuoka, K.; Suzuki, N.; Maeda, Y., 1999) ha presentado dos trabajos en los que partiendo de una fuente de calor de doble elipsoide, determina la forma del baño líquido y su evolución a lo largo del proceso de soldeo. Sin entrar en la complejidad de los métodos anteriormente descritos, y frente a soluciones analíticas ideales como las aportadas por Suárez (Suárez, J.C.; Carrillo, E.; Molleda, F., 1991) y Nguyen (Nguyen, N.T.; Mai, Y.W.; Simpson, S.; Ohta, A., 2004), el método presentado en este trabajo tiene en cuenta los cambios de fase determinando la fracción líquida en cada punto del cordón, además de una mayor flexibilidad en la definición de la fuente de calor. Al igual que los métodos analíticos, se va a suponer una geometría de una chapa de espesor uniforme  $D$ , con una conductividad  $k$ , un calor específico  $C_p$ , una densidad  $\rho$ , y un calor latente de fusión  $\Delta H$ . En esta primera aproximación, se desprecia la difusión por convección y las fugas de calor a través de los bordes de la chapa, la trayectoria de la soldadura es rectilínea y la soldadura se realiza en posición horizontal. Se parte de la ecuación

diferencial de la conducción de calor en flujo bidimensional que se indica a continuación (1).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{Q}{\rho C_p} \quad (1)$$

La ecuación (2) indica que  $Q$  es la suma del calor aportado y el liberado por el cambio de fase de líquido a sólido siendo  $x$  la fracción de material licuado en el intervalo de tiempo de discretización,  $\Phi$  el rendimiento térmico de la operación,  $V$  la tensión de soldeo,  $I$  intensidad de corriente y  $\Delta H$  la variación de entalpía en el cambio de fase.

$$Q = \phi IV - \rho \Delta H_x \quad (2)$$

## 2.2. Método de diferencias finitas

En el procedimiento de cálculo desarrollado, la ecuación parabólica en derivadas parciales que representa la difusión de calor se resuelve numéricamente mediante el método de diferencias finitas de Crank-Nicolson y el aporte térmico es simulado mediante un patrón de doble elipsoide. La discretización geométrica se ha realizado teniendo en cuenta el tamaño de la zona del material a modelizar, el tiempo que se desee emplear en el cálculo y la limitación de las columnas que tiene la hoja de cálculo. Si  $\Delta x$  es el tamaño del elemento discretizado, teniendo en cuenta que éste es el mismo en las dos direcciones perpendiculares, las discretizaciones en  $x$  tienen subíndice  $i$ , las de  $y$  tienen subíndice  $j$  y las de tiempo superíndice  $n$ , se obtienen las ecuaciones (3), (4) y (5) para la variación de la temperatura en el tiempo y en el plano.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{2} \left( \frac{T_{i+l,j} - T_{i-l,j}}{\Delta x} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \left( \frac{T_{i+l,j} + T_{i-l,j} - 2T_{i,j}}{\Delta x^2} \right) \quad (5)$$

Se consideran las características térmicas intrínsecas del material agrupadas en el parámetro  $\alpha$ , cuya definición aparece en la expresión (6). Si se sustituyen en la ecuación general de difusión del calor las expresiones (3), (4) y (5), e introduciendo el parámetro  $\alpha$ , se obtiene finalmente la expresión (7) que indica la temperatura en cada punto.

$$\alpha = \frac{k \Delta t}{4 \rho C_p \Delta x^2} \quad (6)$$

$$T_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{1+4\alpha} (T_{i,j}^{n+1}(1 - 4\alpha) + \alpha(T_{i-l,j}^n + T_{i+l,j}^n + T_{i,j-1}^n + T_{i,j+1}^n + T_{i-l,j}^{n+1} + T_{i+l,j}^{n+1} + T_{i,j-1}^{n+1} + T_{i,j+1}^{n+1}) - Q) \quad (7)$$

El componente Q es la suma del calor aportado menos el absorbido en la licuación de la masa del punto calculado en el intervalo de tiempo de discretización. Salvo en la zona del cordón, que es muy pequeña en comparación con toda la superficie, éste término es nulo. Las condiciones de contorno se aplican igualando en la ecuación (7) las temperaturas de dos puntos consecutivos en el borde, de modo que se obtienen ecuaciones nuevas para los puntos de contorno. Esto se basa en el hecho de que el flujo de calor entre dos puntos con la misma temperatura es nulo, siendo esta condición conocida como condición de contorno de Von Neumann.

### 2.3 Resultados método de cálculo ZAT

Las dimensiones del metal a soldar son de 0,3x0,075x0,002 m. La temperatura de fusión del acero inoxidable empleado se estima en 1400 °C. El tamaño de mallado empleado en dicha simulación es de 0,0015 m en la dirección del movimiento y la perpendicular a ésta. Con este modelo se calcula la dimensión de la ZAT, la velocidad de enfriamiento de cada punto, la cantidad de metal base fundido, y se estima la severidad del cambio en la microestructura y otras propiedades que afectan a la resistencia y calidad final de la soldadura.

### 3. Aplicación de la metodología de superficie de respuesta

Para la optimización de la ZAT 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 o factores experimentales, tanto en lo que se refiere a la variabilidad de las respuestas como a su tendencia central, realizando siempre el mínimo de experimentos posibles, se trata de establecer el modelo matemático teórico que los relacione. Para ello se realiza una estrategia secuencial obteniendo en diferentes fases la máxima información con el mínimo de recursos.

El enfoque consiste en utilizar el diseño de experimentos para determinar las variables que presentan influencias sobre 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. Esta superficie de respuesta se usa como guía para variar gradualmente los factores controlables que afectan a la respuesta, con el fin de mejorar el valor de ésta. Una de las formas más sencillas de superficie de respuesta es dada por la linealidad de segundo orden, donde “ε” es el error experimental,  $x_1, x_2, \dots, x_k$  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 indicados en la ecuación (8).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j (i < j) + \varepsilon \quad (8)$$

Los factores considerados en este trabajo como variables del proceso de soldeo con influencia en la variable de respuesta son, la potencia del arco eléctrico,  $P$ , la velocidad de soldeo,  $v$ , y la temperatura de precalentamiento del metal base,  $T$ . La respuesta del método se ve afectada al cambiar los niveles de los factores. La variable de respuesta es la dimensión de la ZAT y el objetivo perseguido es la optimización de este valor.

La función de respuesta se puede representar con una ecuación polinomial, que en el caso estudiado se ajusta a un polinomio de segundo grado. De acuerdo con la metodología de superficie de respuesta el modelo que se obtiene es el que se indica en la ecuación (9). La relación entre los factores y niveles considerados es la indicada en la tabla 1.

$$ZAT = \beta_0 + \beta_1 P + \beta_2 v + \beta_3 T + \beta_4 P^2 + \beta_5 v^2 + \beta_6 T^2 + \beta_7 P v + \beta_8 P T + \beta_9 v T + \varepsilon \quad (9)$$

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

Factores	Niveles		
	-1	0	1
<b>Potencia (W)</b>	910,00	1720,00	2530,00
<b>Velocidad (m/s)</b>	3,30E-03	3,73E-03	4,16E-03
<b>Precalentamiento (°C)</b>	20	110	200

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 a los valores mínimo, medio y máximo de la potencia del arco eléctrico, la velocidad de soldeo y la temperatura de precalentamiento del metal base y corresponden a valores utilizados experimentalmente en el soldeo de chapa de acero inoxidable de espesor inferior a 3 mm mediante el procedimiento de soldadura TIG. Por tanto, los valores de entrada para la simulación del ciclo térmico de soldeo son valores reales utilizados en los procedimientos de soldeo de estructuras metálicas. En la tabla se indican los experimentos seleccionados para la obtención de la matriz de experimentos. En la tabla 2 se especifican los valores correspondientes a cada variable en los diferentes experimentos considerados.

**Tabla 2: Valores de la matriz de experimentos**

Exp.	Potencia (W)	Velocidad (m/sg)	T. Prec. (°C)	Exp.	Potencia (W)	Velocidad (m/sg)	T. Prec. (°C)
<b>1</b>	910	0,00416	200	<b>8</b>	1720	0,00373	110
<b>2</b>	2530	0,00416	200	<b>9</b>	1720	0,00373	110
<b>3</b>	1720	0,00416	110	<b>10</b>	910	0,00416	20
<b>4</b>	2530	0,00416	20	<b>11</b>	1720	0,00373	110

<b>5</b>	1720	0,00373	110	<b>12</b>	2530	0,0033	20
<b>6</b>	910	0,00373	110	<b>13</b>	2530	0,0033	200
<b>7</b>	910	0,0033	20	<b>14</b>	1720	0,00373	20
				<b>15</b>	1720	0,00373	200

El MSR se plantea en forma matricial conforme se indica en la ecuación (10). De este modo, se plantea la relación existente entre la dimensión de la ZAT, y los parámetros de soldeo utilizados para realizar los experimentos, seleccionados a partir de la matriz de experimentos. La matriz [X] representa los términos independientes en el procedimiento, esto es los valores calculados de  $P$ ,  $v$ ,  $T$ , respectivamente conforme a lo indicado en la ecuación (11).

$$[ZAT] = [X][\beta] \quad (10)$$

$$ZAT = \beta_0 + \beta_1 P + \beta_2 v + \beta_3 T + \beta_4 P^2 + \beta_5 v^2 + \beta_6 T^2 + \beta_7 P v + \beta_8 P T + \beta_9 v T + \varepsilon \quad (11)$$

Para calcular la matriz de coeficientes  $[\beta]$  se tiene que plantear la ecuación matricial indicada en la ecuación (12) 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.

$$[\beta] = \left[ [X]^T [X] \right]^{-1} [X]^T [ZAT] \quad (12)$$

Según esto, la matriz [ZAT] contiene los valores de la dimensión de la ZAT de cada uno de los experimentos computacionales indicados en MSR y calculados mediante el modelo de simulación térmica que está basado en el método de Cranck-Nicholson para la resolución de la ecuación diferencial del calor, tal como se indica en la tabla 3.

**Tabla 3: Resultados obtenidos para la ZAT mediante simulación numérica**

<b>Simulación</b>	<b>ZAT (mm)</b>	<b>Simulación</b>	<b>ZAT (mm)</b>
<b>1</b>	11,81	<b>9</b>	20,202
<b>2</b>	30,96	<b>10</b>	7,95
<b>3</b>	17,22	<b>11</b>	16,67
<b>4</b>	16,57	<b>12</b>	18,72
<b>5</b>	10,952	<b>13</b>	40,27
<b>6</b>	9,264	<b>14</b>	9,348
<b>7</b>	13,17	<b>15</b>	24,08
<b>8</b>	23,82		

#### 4. Resultados y discusión

El MSR se plantea en forma matricial conforme se indica en la expresión (13). La resolución de dicha ecuación va dirigida a la obtención de la matriz de coeficientes,  $[\beta]$ .

$$[ZAT] = [X][B] \quad (13)$$

La ecuación matricial se ha resuelto mediante el empleo de la aplicación informática "Sagata", obteniendo como resultado de la modelización matemática entre las variables de entrada y la respuesta del método las expresiones correspondientes a las variables de salida. De esta forma, se obtiene la expresión (14). En dicha expresión  $P$  representa la potencia eléctrica,  $V$  la velocidad de soldadura y  $T$  la temperatura de precalentamiento del metal base.

$$ZAT = -8,101429 + 0,011808P + 4,003,262992V + 0,065307T + 0,000001P^2 + 0,000015T^2 - 3,153173PV + 0,000048PT - 23,275194VT \quad (14)$$

Se realiza un análisis de la varianza, para decidir si las diferencias de medias son o no estadísticamente significativas. Para ello, se lleva a cabo el procedimiento ANOVA característico. Con la aplicación del software "Generated using Sagata Ltd. Software" para el caso particular de primer orden, se llega a los resultados indicados en las tabla 4.

**Tabla 4: Análisis de la varianza ZAT**

Análisis varianza	grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Cociente- F	P-valor
<b>Modelo</b>	8	1084,47	135,56	34,61	0,000182
<b>Residuo</b>	6	23,50	3,92		
<b>Total</b>	14	1107,97			

Analizando la tabla se indica como 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 permite aceptar o rechazar la hipótesis nula, es decir, la independencia entre las variables, potencia, velocidad de soldadura y temperatura de precalentamiento, sin necesidad de tener que comparar el valor  $F$  con un valor real de las tablas estadísticas de la función de distribución de Snedecor. Si el nivel de significación es mayor que 0.05, se acepta la hipótesis nula de independencia entre las variables, indicando, por tanto, que no existen efectos diferenciales entre los parámetros de soldadura analizados. En el caso particular estudiado, dado que el nivel de significación, p- valor, es 0,000182 se acepta la hipótesis de que existe una relación de dependencia entre las variables potencia, velocidad de soldadura y temperatura de precalentamiento. A partir de la ecuación anterior y los valores de cada uno de los factores en cada uno de sus niveles, se puede calcular el valor de la ZAT correspondiente para cada uno de los experimentos considerados, según se indica en la tabla 5. En dicha tabla, se establece en forma de error la diferencia existente entre los valores de la ZAT obtenidos mediante el método numérico y los correspondientes al cálculo efectuado mediante MSR. Según se observa, el mejor ajuste de la superficie de respuesta se obtiene en términos de valor

absoluto del error para los experimentos 7 y 10. Si se tiene en cuenta el error relativo, expresado en tanto por ciento respecto del valor experimental, se obtiene en el experimento 7, correspondiente a la potencia mínima, a la velocidad de soldadura mínima y a la temperatura de precalentamiento máxima, es decir, de 200°C.

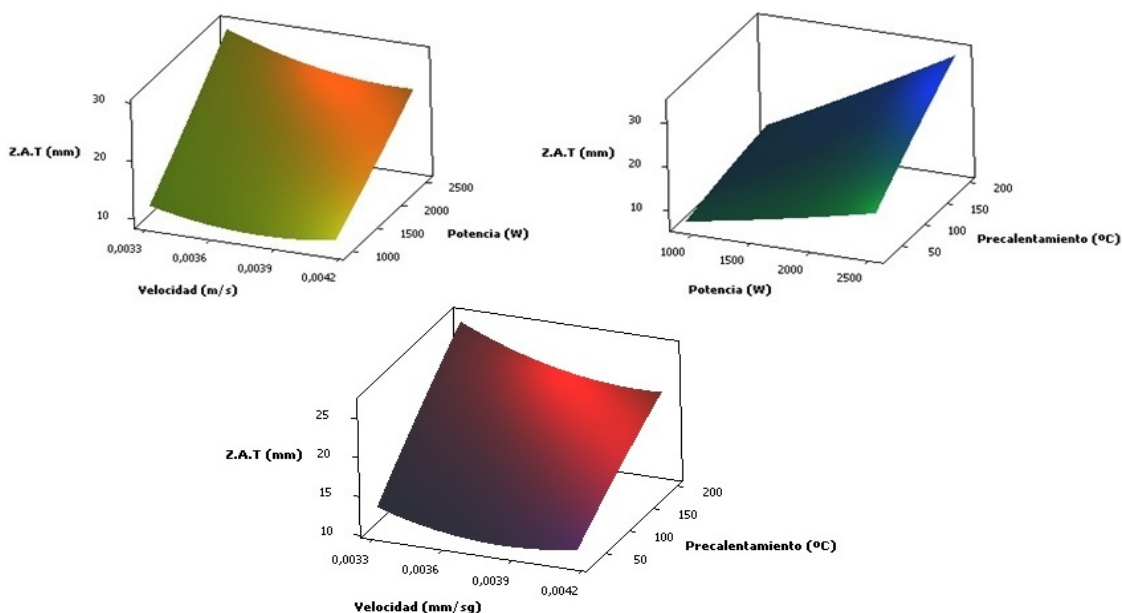
**Tabla 5: Análisis del error del método numérico mediante MSR para la ZAT**

Experimento	P (W)	V (m/sg)	Pr (°C)	ZAT (mm)	Simulación (mm)	Error	Error (%)
1	910	0,00416	200	10,39	11,81	1,42	14
2	2530	0,00416	200	23,82	30,96	7,14	30
3	1720	0,00416	110	12,10	17,22	5,12	42
4	2530	0,00416	20	7,04	16,57	9,53	135
5	910	0,00373	110	9,49	10,952	1,46	15
6	910	0,0033	20	7,04	9,264	2,23	32
7	910	0,0033	200	13,42	13,17	0,25	2
8	2530	0,00373	110	18,12	23,82	5,70	31
9	1720	0,0033	110	15,52	20,202	4,68	30
10	910	0,00416	20	7,61	7,95	0,34	4
11	1720	0,00373	110	13,81	16,67	2,86	21
12	2530	0,0033	20	10,86	18,72	7,86	72
13	2530	0,0033	200	31,25	40,27	9,02	29
14	1720	0,00373	20	8,14	9,348	1,21	15
15	1720	0,00373	200	19,72	24,08	4,36	22

En la figura 1, se representa las gráficas de la superficie de respuesta para la zona afectada térmicamente en función de las variables tecnológicas del proceso de soldeo. Se obtiene una ZAT menor si utilizamos una potencia eléctrica de soldeo y una temperatura de precalentamiento mínima. Se observa que la velocidad de soldadura es el factor menos determinante para controlar la ZAT: con una velocidad media se obtiene una ZAT menor.

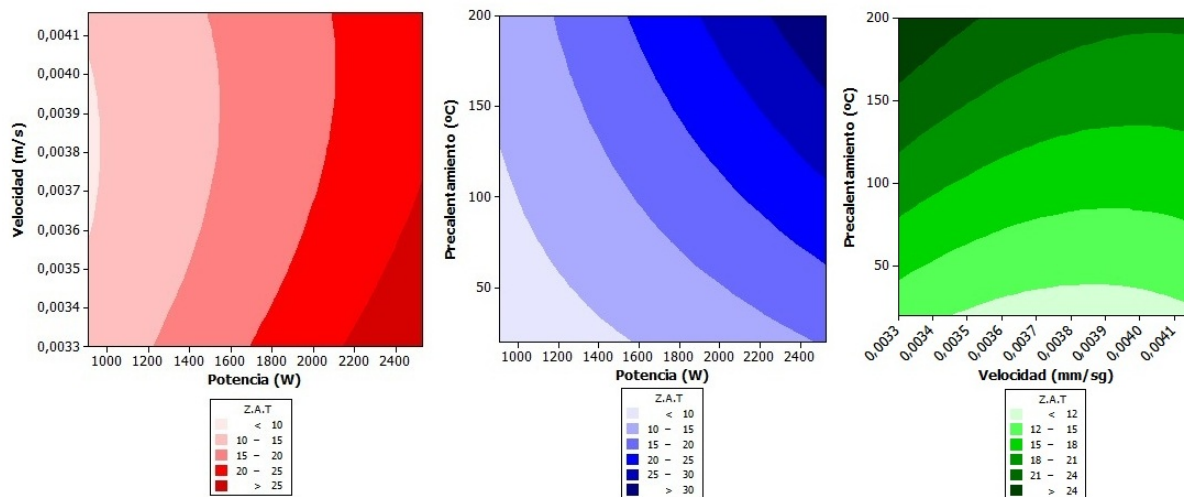


Figura 1: Gráficas de superficie de respuesta de la ZAT en función de los factores



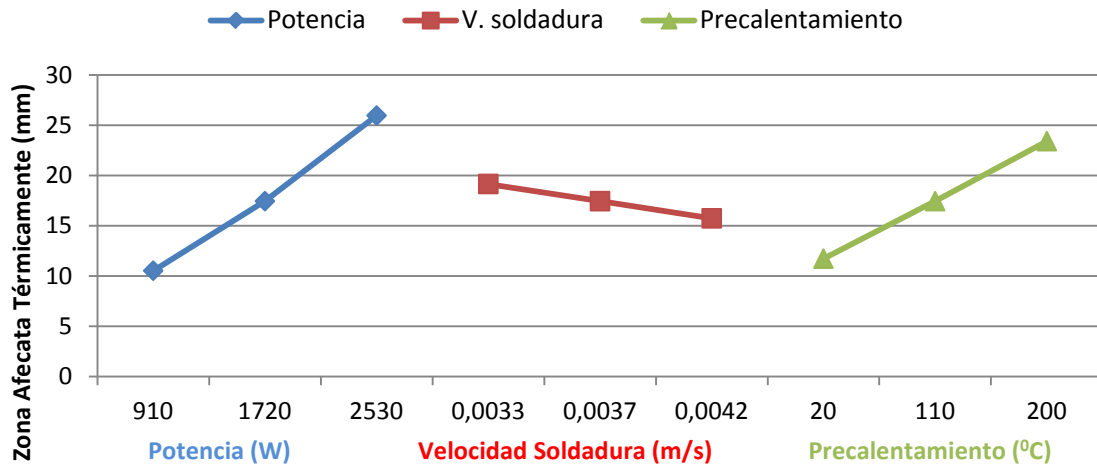
En la figura 2, correspondiente a las gráficas de contorno de la ZAT, se observa que la gráfica de contorno velocidad de soldadura – potencia muestra una ZAT mínima si se utiliza una velocidad media y una potencia mínima. La gráfica de contorno temperatura de precalentamiento – potencia muestra una ZAT menor si se utilizan ambos factores mínimos. La gráfica de contorno temperatura de precalentamiento – velocidad de soldadura confirma lo anterior: se obtiene una ZAT mínima con una temperatura de precalentamiento menor.

Figura 2: Gráficas de contorno de la ZAT en función de los factores tecnológicos del proceso de soldeo



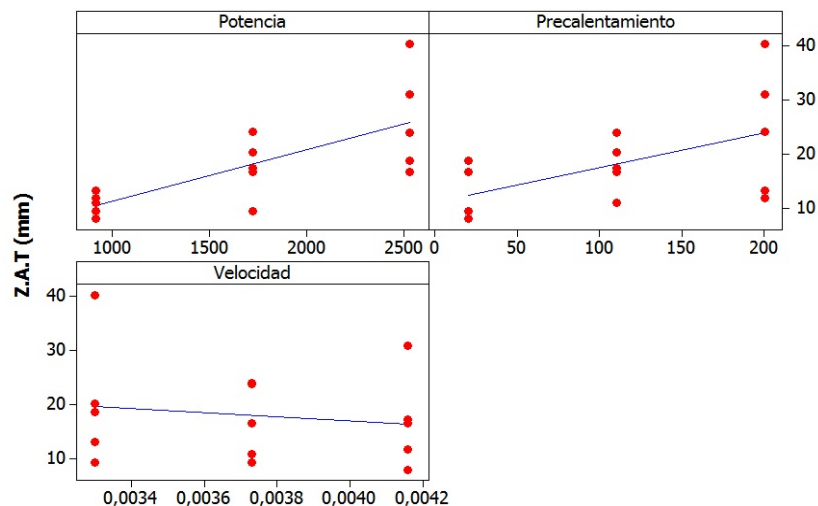
En la figura 3, se observa que conforme aumenta la velocidad de soldadura la ZAT disminuye proporcionalmente, aunque esta disminución no es muy significativa ya que la constante de proporcionalidad, es decir, la pendiente de la recta correspondiente, es pequeña. En definitiva, se observa que los factores que más afectan al aumento de la ZAT son la potencia y la temperatura de precalentamiento del metal base ya que la constante de proporcionalidad en ambos factores es mayor que la observada para la velocidad de soldeo.

**Figura 3: ZAT en función de los factores tecnológicos del proceso de soldadura**



En la figura 4 se observa la gráfica de dispersión de la ZAT en función de las variables del proceso. Los puntos de la gráfica de dispersión, en el caso de la velocidad de soldadura, no muestran un patrón claro. La línea de regresión es relativamente plana, lo que reafirma que la velocidad no es un factor determinante para controlar la ZAT.

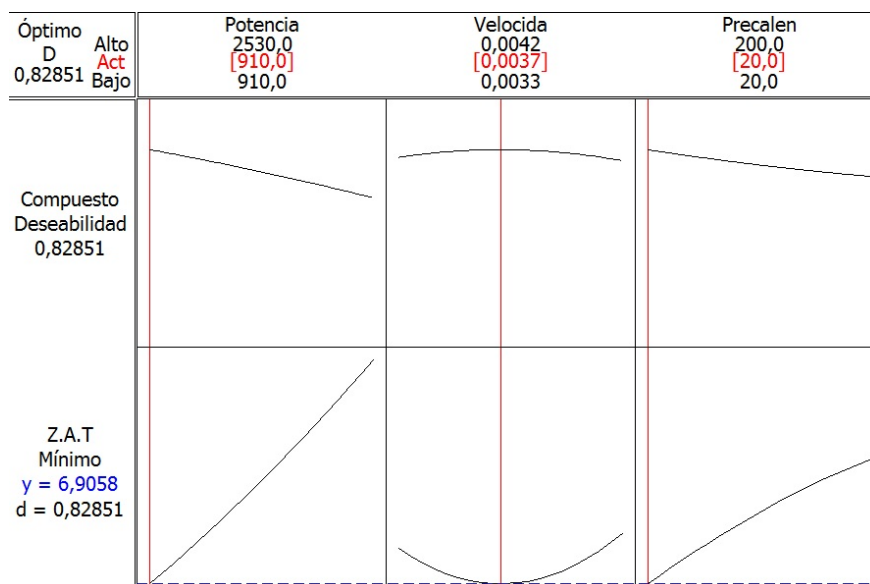
**Figura 4: Gráfica de dispersión de la ZAT en función de los factores**



## 5. Resultados y optimización

En toda unión soldada interesa minimizar, en medida de lo posible, la zona afectada térmicamente. Por ello se analizan los valores correspondientes a la interacción entre dichos factores. Para esto se utiliza el optimizador de respuesta de Sagata que proporciona una solución óptima para las combinaciones de variables de entrada (potencia del arco eléctrico, velocidad de soldadura y temperatura de precalentamiento del metal base) y una gráfica de optimización. La gráfica de optimización es interactiva; puede ajustar los valores de configuración de variables de entrada en la gráfica a fin de encontrar las soluciones más deseables.

Figura 5: Gráfica de valores óptimos



Tal y como se muestra en la figura 5, con los valores mínimos de potencia (910 W) y precalentamiento (20°C) y el valor medio de velocidad de soldadura (0,0037 m/sg), se obtiene como valor óptimo de la ZAT del cordón el que se refleja en la tabla 6.

Tabla 6: Valor de la ZAT correspondiente a condiciones de operación óptimas

RESULTADOS	Z.A.T (mm)	Potencia (W)	V. soldadura (m/sg)	Precalentamiento (°C)
MSR	6,90	910	0,0037	20

## 6. Conclusiones

En el presente trabajo se ha aplicado la metodología de la superficie de respuesta para la modelización de diversas variables que intervienen en la zona afectada térmicamente de un cordón de soldadura. Los factores más determinantes para obtener una ZAT mínima son la potencia y la temperatura de precalentamiento del metal base. Si se utiliza una potencia de 910 W y una temperatura de precalentamiento de 20°C, se obtiene una ZAT mínima. El factor velocidad de soldadura no influye considerablemente en la determinación de la ZAT, con un valor medio de 0,0037 m/sg se obtiene una ZAT menor. Se han calculado los valores para la potencia, velocidad de soldeo y temperatura de precalentamiento que optimizan la función de respuesta, esto es, que conducen a una ZAT mínima. Dichos valores se muestran en la tabla 8. La aplicación a otros materiales y técnicas de soldeo por arco eléctrico debe hacerse partiendo de valores obtenidos por métodos numéricos corregidos convenientemente con las características propias del proceso y del material, o bien a partir de datos experimentales.

## 7. Referencias

- [1] AWS, Welding Handbook, Vol. 2. Welding Processes, 8th ed., (2001), USA.
- [2] Nguyen, N.T.; Ohta, A.; Matsuoka, K.; Suzuki, N.; Maeda, Y.(1999) "Analytical Solutions for Transient Temperature of Semi-Infinite Body Subjected to 3-D Moving Heat Sources". Welding Journal, pp 265-274.
- [3] Nguyen, N.T.; Mai, Y.W.; Simpson, S.; Ohta, A. (2004) "A analytical Approximate Solution for Double Ellipsoidal Heat Source in Finite Thick Plate". Welding Journal, pp 82-93.
- [4] Suárez, J.C.; Carrillo, E.; Molleda, F. (1991) "Modelización de los ciclos térmicos puntuales del campo de temperaturas durante la soldadura por arco". Revista de soldadura, 21 (2), p.65.

### **Correspondencia** (Para más información contacte con):

Eusebio Martínez Conesa. Paseo Alfonso XIII, nº 50, Edificio Arquide, UPCT, Cartagena, España  
Phone: + 34 968325666 Ext. 5666  
Fax: 34 968 325931  
E-mail: eusebio.martinez@upct.es  
URL: <http://www.upct.es>