

Análisis numérico de la zona afectada térmicamente en una estructura ligera

Francisco Segura Quiles*; E.J. Martínez-Conesa*; Manuel Estrems Amestoy**; Valentín Miguel Eguía***

* Escuela de Arquitectura y Tecnología de Edificación, Universidad Politécnica de Cartagena

** Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación, Universidad Politécnica de Cartagena

*** Departamento de Mecánica Aplicada y Proyectos, Universidad de Castilla-La Mancha

(*)(**) Avenida Paseo de Alfonso XIII, N° 52, 30203 Cartagena (Murcia)

E-mail: fco.segura.quiles@gmail.com; eusebio.martinez@upct.es

Resumen. Para determinar la zona afectada térmicamente (ZAT) en una unión soldada se recurren a métodos analíticos y numéricos de resolución de ecuaciones diferenciales que definen el proceso de difusión térmica. En el proceso de soldadura existen diferentes parámetros que afectan a la ZAT, factor determinante en la calidad de la unión. Para la optimización de este término se utiliza el método de superficie de respuesta (MSR) que permite optimizar una función de respuesta, la ZAT, sujeta a diferentes variables independientes como son la velocidad de soldadura, la potencia y la temperatura de precalentamiento del metal base. El objetivo es que mediante la metodología de la superficie de respuesta obtener el modelo de comportamiento de la variable de la ZAT como función de las variables tecnológicas del proceso. Los modelos obtenidos serán objeto de análisis para obtener un cordón de soldadura óptimo, es decir, una unión con una ZAT mínima.

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 [1]. Una de las primeras soluciones que se pueden encontrar en la literatura fue la de Suárez [2] 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 [3, 4] 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 [2] y Nguyen [3, 4], el método presentado en el presente 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 ρ , y un calor latente de fusión ΔH . 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, Φ el rendimiento térmico de la operación, V la tensión de soldeo, I intensidad de corriente y ΔH la variación de entalpía en el cambio de fase.

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

2.2. Resultados método de cálculo ZAT

Las dimensiones del metal a soldar son de 0,3x0,075x0,002 m. 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. Metodología de superficie de respuesta y diseño de experimentos

La metodología de superficie de respuesta (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 cuyo objetivo es optimizar esta respuesta. Se ha adoptado un modelo cuadrático, estableciendo la relación entre los factores y niveles (-1, 0, 1) que se consideran en la tabla 1.

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

PARÁMETROS DE SOLDEO	-1	0	1
Potencia (X ₁) (W)	910	1720	2530
V. soldadura (X ₂) (m/s)	0,0033	0,00373	0,00416
Pre calentamiento (X ₃) (°C)	20	110	200

Con la combinación de las variables indicados en la tabla 1 se ha realizado la matriz de experimentos. En la tabla 2 se indican los experimentos seleccionados y los valores correspondientes a cada variable.

Tabla 2. Valores de las variables considerados para la elaboración de la matriz de experimentos.

Exp.	x ₁	x ₂	x ₃	Exp.	x ₁	x ₂	x ₃
1	910	0,00416	200	9	1720	0,00373	110
2	2530	0,00416	200	10	910	0,00416	20
3	1720	0,00416	110	11	1720	0,00373	110
4	2530	0,00416	20	12	2530	0,0033	20
5	1720	0,00373	110	13	2530	0,0033	200
6	910	0,00373	110	14	1720	0,00373	20
7	910	0,0033	20	15	1720	0,00373	200
8	1720	0,00373	110				

4. Resultados y discusión

El MSR se plantea en forma matricial conforme se indica en la siguiente ecuación (3):

$$[ZAT] = [X][B] \quad (3)$$

La ecuación matricial se ha resuelto mediante el empleo de la aplicación informática “Sagata”, obteniendo como resultado la expresión correspondiente a la zona afectada térmicamente (4):

$$ZAT = -8,101429 + 0,011808P + 4.003,262992V + 0,065307T + 0,000001P^2 + 0,000015T^2 - 3,153173PV + 0,000048PT - 23,275194VT \quad (4)$$

P representa la potencia eléctrica, *V* la velocidad de soldadura y *T* la temperatura de precalentamiento del metal base. En la figuras 1 se observa que la ZAT es menor conforme disminuye la temperatura de precalentamiento. Así mismo, se observa una ZAT mínima si la potencia disminuye.

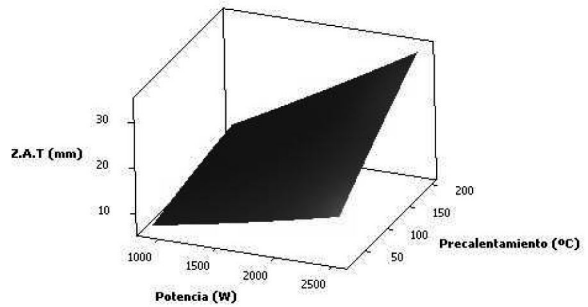
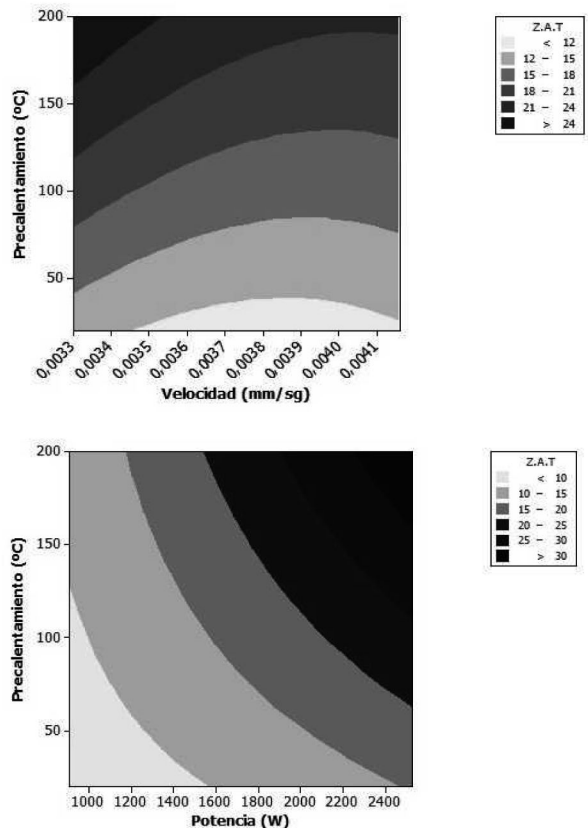


Fig. 1. Gráfica de superficie de respuesta de la ZAT en función de la potencia y la temperatura de precalentamiento.

En la figura 2 se observan las gráficas de contorno de la ZAT en función de las variables tecnológicas del proceso. Se confirma lo analizado anteriormente: se obtiene una ZAT menor de 10 mm si se utiliza una potencia y temperatura bajas. El factor velocidad de soldadura no es un factor determinante ya que se observa como una ZAT mínima se corresponde con una velocidad de soldadura media.



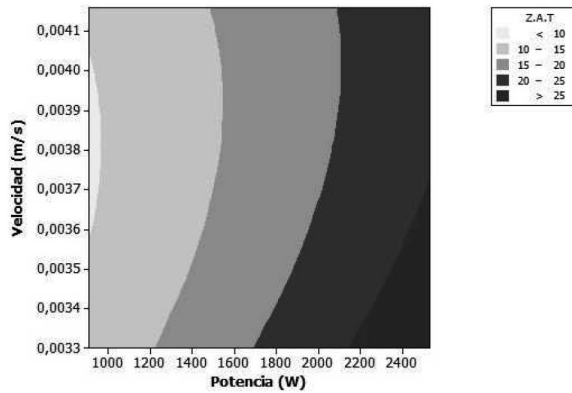


Fig. 2. Gráficas de contorno de la ZAT en función de los factores.

En la figura 3 se observa una ZAT mínima si se utiliza una potencia menor. Esta misma tendencia se corresponde con la temperatura de precalentamiento; conforme la temperatura aumenta, se obtiene una ZAT mayor. Así mismo, 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 a la disminución de la ZAT son la potencia y la temperatura de precalentamiento del metal base.

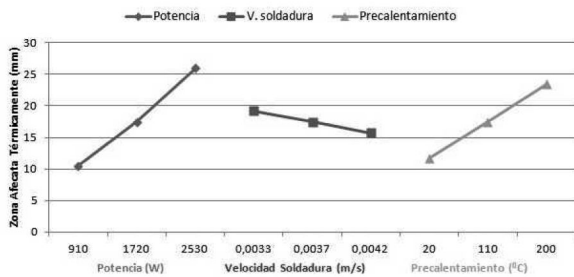


Fig. 3. ZAT en función de los factores.

5. Optimización

En toda unión soldada interesa minimizar, en medida de lo posible, la ZAT. Por ello se analizan los valores correspondientes a la interacción entre dichos factores. El software optimizador de respuesta proporciona una solución óptima para las combinaciones de variables de entrada y una gráfica de optimización interactiva; puede ajustar los valores de configuración de variables de entrada en la gráfica a fin de encontrar la solución más deseable. Tal y como se muestra en la figura 3, con los valores mínimos de potencia (910 W) y precalentamiento (20°C) y el valor medio de velocidad de soldeo (0,0037 m/sg), se obtiene el valor óptimo de la ZAT del cordón (6,90 mm).

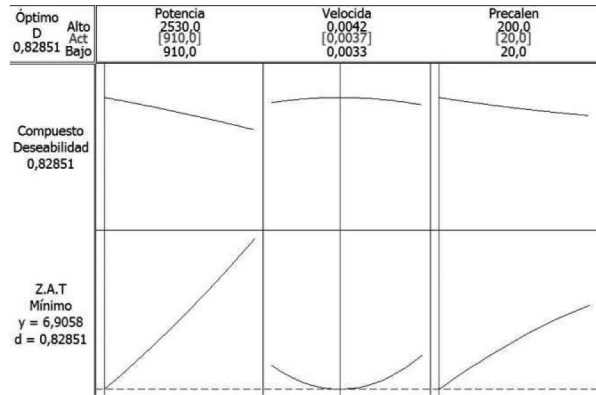


Fig. 3. Gráfica de valores óptimos.

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 ZAT de un cordón de soldadura. 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. 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. Se observa que el factor velocidad de soldadura no influye considerablemente en la determinación de la ZAT. 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.

Referencias

[1] AWS, Welding Handbook, Vol. 2. Welding Processes, 8th ed., 2001, USA.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.