

## **Modelado por el Método de los Elementos Finitos de un cordón de soldadura MAG**

Rubén Olarte-Valentín, Carlos Zurrón-Barragán

María Cristina Ramírez-Aragón

*Universidad de La Rioja*

Pedro Villanueva-Roldán

*Universidad Pública de Navarra*

Rubén Lostado-Lorza

*Universidad de La Rioja*

### **Abstract**

One of the principal requirements needed in the early stages of design and manufacture of any mechanical component soldier is the reducing its residual stresses and strains. These stresses and strains can lead to substantial changes in the geometry of the welded components that often require subsequent machining perform in order to conform to the dimensions specified by the customer. Over several decades it has been shown that the Finite Element Method (FEM) is a good technique for design and optimization of mechanical components even though its require their adjust with a set of experimental data. In most cases, this adjustment process is extremely complex and requires established Optimization Techniques such as Genetic Algorithms (GA). This article shows the adjustment process by GA to a MAG weld model made with the FEM. The experimental validation of the FE model was performed using temperatures and deformations obtained from actual welding tests on samples standardized.

**Keywords:** *GMA Welding; Finite Element Method; Genetic Algorithms.*

### **Resumen**

Uno de los requisitos fundamentales necesarios en las fases de diseño y de fabricación de cualquier componente mecánico soldado es la reducción de sus tensiones y deformaciones residuales. Estas tensiones y deformaciones pueden generar cambios sustanciales en la geometría de los componentes soldados requiriendo frecuentemente realizar un mecanizado posterior a fin de ajustarlo a las dimensiones especificadas por el cliente. A lo largo de varias décadas se ha podido constatar que el Método de los Elementos Finitos (MEF) es una buena técnica de Diseño y de Optimización de componentes mecánicos a pesar de requerir en su ajuste de datos experimentales. En la mayoría de las ocasiones, este proceso de ajuste es tremendamente complejo y requiere de Técnicas de Optimización ya establecidas como pueden ser los Algoritmos Genéticos (GA). En este artículo se muestra el proceso de ajuste mediante GA de un modelo de cordón de soldadura MAG realizado con el FEM. La validación experimental del modelo FE se realizó mediante Temperaturas y Deformaciones obtenidas de ensayos de soldadura reales sobre probetas normalizadas.

**Palabras clave:** *Soldadura MAG; Método de los Elementos Finitos; Algoritmos Genéticos.*

## 1. Introducción

La soldadura MAG, es una de las técnicas de soldeo más utilizada en sectores industriales tan importantes como es el sector de la Automoción, el Eólico o el Civil. Esta técnica tiene el inconveniente de generar tensiones y deformaciones residuales sobre los productos que fabrica, lo que supone la aparición de defectos y geometrías inadecuadas. Así mismo, un mal ajuste en los parámetros de soldeo (velocidad, tensión e intensidad) y una secuencia de fabricación incorrecta, pueden amplificar más aún estas tensiones y deformaciones residuales. Según sea el grado de estos defectos, el producto fabricado puede quedar fuera de la tolerancia requerida por el cliente, necesitando de uno o varias operaciones posteriores hasta su aceptación. Normalmente, estas operaciones suelen ser:

- Un **Sobremecanizado** hasta que el producto esté dentro del rango de tolerancia, lo cual implica mermas de material, roturas de herramientas de corte por el templado de la soldadura, tiempos de mecanizado elevados, etc.
- Un **Tratamiento térmico de estabilización**, a fin de disminuir las tensiones residuales localizadas.

El estudio y la evaluación de estas tensiones y deformaciones residuales sobre muestras de componentes reales soldados, supone un elevado coste debido sobre todo al material ensayado (material base y material del cordón) y a la propia instalación automatizada mediante un brazo robot.

Una forma de reducir este coste y mejorar la técnica de soldadura MAG prediciendo la aparición de estas tensiones y deformaciones residuales, es mediante la utilización de modelos que recreen virtualmente el proceso de soldeo.

Uno de los modelos que más se suele utilizar en la mejora de procesos de fabricación de cualquier componente mecánico, son los modelos basados en el Método de los Elementos Finitos (MEF). Ajustar un modelo de elementos finitos en un proceso industrial tan complejo como es un proceso de soldadura MAG, sugiere la utilización de técnicas de optimización ya establecidas (Lostado et al., 2010). Una de las técnicas de optimización más usadas en combinación con el MEF es la técnica basada en los Algoritmos Genéticos (GA).

A día de hoy, existen muy pocos trabajos en los que se utilizan los GA para ajustar un modelo FE de un proceso de soldadura. No obstante, existen otras técnicas en las que se ha optimizado el MEF en procesos de soldadura (Voutchkov et al., 2005; Kim et al., 2002; Xie y Hsieh, 2002; Kadivar et al., 2000)

En este artículo, se muestra el desarrollo y ajuste de un modelo de elementos finitos de un cordón de soldadura MAG sobre dos placas de acero empleando técnicas basadas en los GA. El ajuste del modelo FE se realizó mediante las temperaturas durante el proceso de soldeo y mediante la deformación angular sufridas por las placas una vez soldadas y enfriadas a temperatura ambiente.

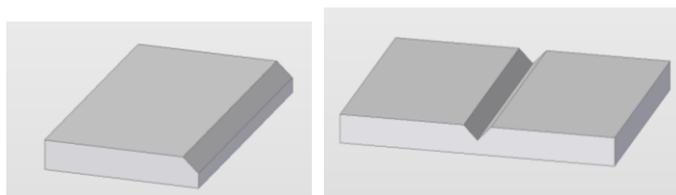
## 3. Metodología

### 3.1 Elección del material, tipo de unión y geometría de las probetas

El ajuste del modelo de elementos finitos (modelo FE) del proceso de soldadura MAG se basó en los datos obtenidos de ensayos reales. En este caso, estos datos fueron la distribución de temperaturas en una serie de puntos de la unión durante el proceso de soldeo y las deformaciones producidas por la contracción del metal de aportación una vez soldadas y enfriadas las piezas. Conforme a este criterio, se eligió una unión soldada a tope formada por dos placas de acero apoyadas en una superficie refractaria. Una de las placas se fijó a la superficie mediante una mordaza y la otra placa se apoyó simplemente a dicha

superficie refractaria. El material elegido para las placas fue el de un acero al carbono de tipo St.37-2 y las dimensiones de éstas fueron de 30 mm de anchura, 50 mm de longitud y 6 mm de espesor. Así mismo, en uno de los laterales de estas placas se realizó un chaflán a 45° hasta la mitad de su espesor con el objetivo de facilitar la penetración del cordón de soldadura. La Figura 1 muestra la geometría de las placas metálicas a soldar.

**Figura 1: Esquemas de la geometría de las piezas**



### 3.2 Diseño de experimentos

El proceso de soldeo se realizó mediante un robot de soldadura fijando previamente sus parámetros de configuración de tensión, intensidad y velocidad. Mediante un diseño de experimentos (Ver Tabla 1) formado por los factores de tensión, intensidad y velocidad, así como dos niveles de valores distintos, se descubrió cómo influyeron estos factores en los valores de anchura y altura del cordón, así como en la distribución de temperaturas del proceso de soldeo y en la deformación angular.

**Tabla 1. Valores de los factores del experimento en dos niveles**

Variables	Nivel -	Nivel+
Tensión	26	28
Intensidad	125	135
Velocidad	3	6

### 3.3 Ensayos de soldadura

En el ensayo de soldadura se utilizó un robot modelo ABB 1500 IRB que incorporaba una máquina de soldar ESAB 180. Así mismo, el gas de aportación empleado en la soldadura MAG fue el de una mezcla de argón, dióxido de carbono y óxido nítrico. De este ensayo, se obtuvieron las temperaturas de diferentes puntos de las placas durante todo el proceso de soldeo. Estas temperaturas fueron obtenidas mediante una cámara termográfica.

**Figura 2: Robot con máquina de soldar, montaje del ensayo y proceso de soldeo**



A fin de tener una referencia de temperatura en el postprocesado de las termografías, se instalo un calentador eléctrico cuya temperatura máxima conocida fué de 600°C (Ver Figura 3).

**Figura 3: Colocación y amarre de las piezas sobre la superficie refractaria con el calentador de fondo**



**Figura 4: Proceso de soldadura y muestra del efecto de la contracción térmica**



### 3.4 Obtención de resultados

Una vez finalizados los experimentos, se seleccionaron y analizaron los resultados experimentales a fin de validar el Modelo de Elementos Finitos. Estos resultados fueron los siguientes:

- **Ángulo formado por las placas soldadas:**

Este ángulo fue apareciendo a medida que el cordón de soldadura se solidificaba y enfriaba, y fue la propia tensión residual inducida por este cordón la que produjo que la placa

simplemente apoyada sobre el material refractario se elevase de su posición original. Este ángulo fue medido de manera precisa mediante una máquina de medir coordenadas tal y como se muestra en la Figura 5.

**Figura 5: efecto de la contracción térmica y máquina de medir coordenadas**



Los resultados de la deformación angular en función de los parámetros de configuración de la máquina de soldeo aparecen en la Tabla 2.

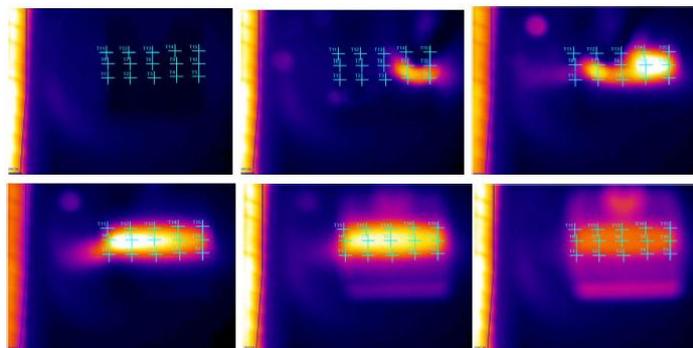
**Tabla 2: Relación entre parámetros del ensayo con el resultado de deformación**

Ensayo	Factores			Resultados
	Tensión [V]	Intensidad [A]	Velocidad [mm/s]	Ángulo [°]
1	26	125	3	4,18
2	28	125	3	4,12
3	26	135	3	3,00
4	26	125	6	4,32
5	26	135	6	3,55
6	28	135	6	3,31

- **Evolución de las temperaturas durante el proceso de soldadura:**

La cámara termográfica registro en intervalos de 2 segundos todo el proceso de soldeo completo. El postprocesado de estas termografías se realizó sobre tres líneas paralelas al cordón de soldadura, una en el centro del cordón y las otras dos a los lados del cordón a las distancia de 8 mm. tal y como se muestra en la Figura 6. Mediante un software de tratamiento de imágenes, se modificó el coeficiente de emisividad asignado a cada imagen hasta conseguir que la zona de referencia correspondiente al calentador eléctrico (situado a un lateral de la imagen) fuera la correspondiente a 600°C. De esta forma, se extrajeron las curvas de temperatura de los puntos que sirvieron como referencia al ajuste del modelo de FE.

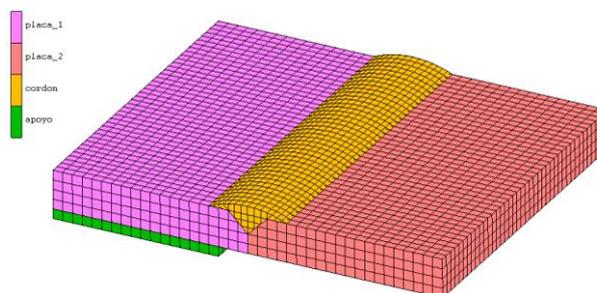
**Figura 6: selección de imágenes de una secuencia de termografías del ensayo**



### 3.5 El modelo de Elementos Finitos

Con el objetivo de obtener unas deformaciones permanentes en el modelo FE una vez que el cordón de soldadura había sido enfriado, fue preciso que el modelo FE tuviera en consideración la curva elastoplástica del material como función de la temperatura. Además, dado que el proceso de soldeo era función del tiempo, de la aceleración de la gravedad y de la temperatura, se planteó un proceso térmico-estructural transitorio a fin de considerar estos otros efectos. El modelo de elementos finitos planteado fue realizado mediante el software de simulación Msc.Marc tal y puede apreciarse en la Figura 7.

**Figura 7: Modelo de elementos finitos de la unión soldada**



En los puntos siguientes, se detallan los puntos más significativos del modelo FE.

- **Condiciones iniciales de temperatura en el modelo FE:**

Las condiciones iniciales en la que se basó el proceso térmico-estructural transitorio fueron las correspondientes a la temperatura a la que se encontraban las placas de acero y el soporte del material refractario. Estas condiciones iniciales correspondían con la temperatura ambiente del laboratorio donde fue realizado el ensayo (18.3°C).

- **Condiciones térmicas y estructurales en el modelo FE:**

En este caso, las condiciones de contorno fueron divididas en dos grandes grupos. Por un lado, se definieron las condiciones térmicas en las que se incluyeron la convección, la radiación y el flujo de calor aportado por la soldadura. Este flujo de calor viene a ser el camino por el cual los elementos “nacen” para formar el cordón de soldadura. Por otro lado, se definieron las condiciones estructurales en las que se incluyeron las restricciones de

movimientos en la placa fijada con la mordaza, el apoyo de la placa libre y la atracción gravitatoria de las placas y el cordón.

### 3.6 Identificación de las variables de sensibilidad en el modelo FE

Con el objetivo de averiguar que variables del modelo FE eran las más influyentes, se realizó un estudio que consistió en la variación progresiva de todas estas variables. Este estudio dio lugar a una serie de variables agrupadas como las variables “Conocidas” o fijadas de antemano y las variables de “Sensibilidad” o desconocidas. En el primer grupo (Conocidas) se encuentran las variables asignadas al flujo de calor en la soldadura o “**Weld flux**”. Estas variables permiten determinar la zona en la que los elementos generadores del cordón de soldadura actúan como fuente de calor en el modelo FE. Así mismo, las variables “**Emisividad**”, necesaria para definir la radiación y la variable “**área**” de la sección transversal del cordón, cuya geometría intenta asemejarse a la real generada en el ensayo de soldadura fueron también tenidas en consideración.

En el segundo grupo (Sensibilidad) se encuentran las siguientes variables:

La variable “**Melt point**”, es el punto de fusión o temperatura máxima alcanzada por los elementos creados en el cordón de soldadura. La variable “**Rear length**”, es el valor que define la longitud del tramo de elementos generadores en el cordón de soldadura que permanecen a la temperatura máxima definida como “**Melt point**”. La variable “**Face film**” o coeficiente de convección, es una de las variables que más influyen en la distribución de temperaturas de todos los elementos superficiales, y su función principal es la de regular la velocidad de enfriamiento de la curva de temperaturas del modelo, y finalmente, la variable “**Contact Heat**” o coeficiente de transmisión de calor, regula el flujo de calor en el contacto mecánico de todas las piezas.

## 4. Planteamiento de los algoritmos Genéticos

En base a las variables de sensibilidad identificadas en el punto anterior, una técnica de optimización basada en (AG) fue planteada. En primer lugar, se estableció un rango para todas las variables de sensibilidad estudiadas en el punto anterior tal y como se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3: Rango de valores adecuado para cada variable en el espectro de simulaciones realizado**

Variables de sensibilidad					
Melt point [°C]	Face film [W/m <sup>2</sup> .°C]	Forward Length [mm]	Heat coeficient (entre las placas 1 y 2) [W/m <sup>2</sup> .°C]	Heat coeficient (entre placas y cordón) [W/m <sup>2</sup> .°C]	Heat coeficient (entre placa 1 y el apoyo) [W/m <sup>2</sup> .°C]
600 - 1100	0,001 - 0,01	5 - 10	200 - 300	200 - 400	10 - 50

A continuación, se generaron de manera aleatoria los individuos (modelos FE) pertenecientes a la generación inicial o generación 0. Estos individuos fueron generados a

partir del rango de variables de sensibilidad mostradas en la Tabla 3. Simulados todos los individuos de esta generación, se plantearon dos funciones objetivo. La primera relacionada con las temperaturas de los 15 puntos que se muestran en la Figura 6 para cada instante de tiempo y la otra con las deformaciones angulares que forman las placas una vez soldadas y enfriadas.

La función objetivo para las temperaturas  $J_T$  se definió acorde a la ecuación 1. Los valores de  $Y_{TFE_i}$  representan los valores de las temperaturas registradas por el modelo FE en los puntos de las placas y del cordón para cada instante de tiempo, y los valores  $Y_{TTH_i}$  son las temperaturas registradas por las termografías en los mismo puntos para cada instante de tiempo.

$$J_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_{TFE_i} - Y_{TTH_i}| \quad (1)$$

De manera análoga la función objetivo de deformaciones angulares  $J_G$  se definió según la ecuación 2. En este caso, los valores de  $Y_{GFE_i}$  hacen referencia a la deformación angular medida entre las dos placas en el modelo FE y  $Y_{GMMC_i}$  son los valores medios de deformación angular registrados por la máquina de medir coordenadas.

$$J_G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_{GFE_i} - Y_{GMMC_i}| \quad (2)$$

Una vez obtenidos los resultados de cada uno de los individuo de la generación 0 (modelos FE simulados), se seleccionaron aquellos que tuviesen unas funciones objetivo  $J_T$  y  $J_G$  menor. A partir de la primera generación o generación 0, se crearon las siguientes generaciones (generación 1, 2, ..) mediante cruces y mutaciones.

La nuevas generaciones fueron formadas de la siguiente manera:

Un 25% de los mejores individuos de la anterior generación (padres de la nueva generación).

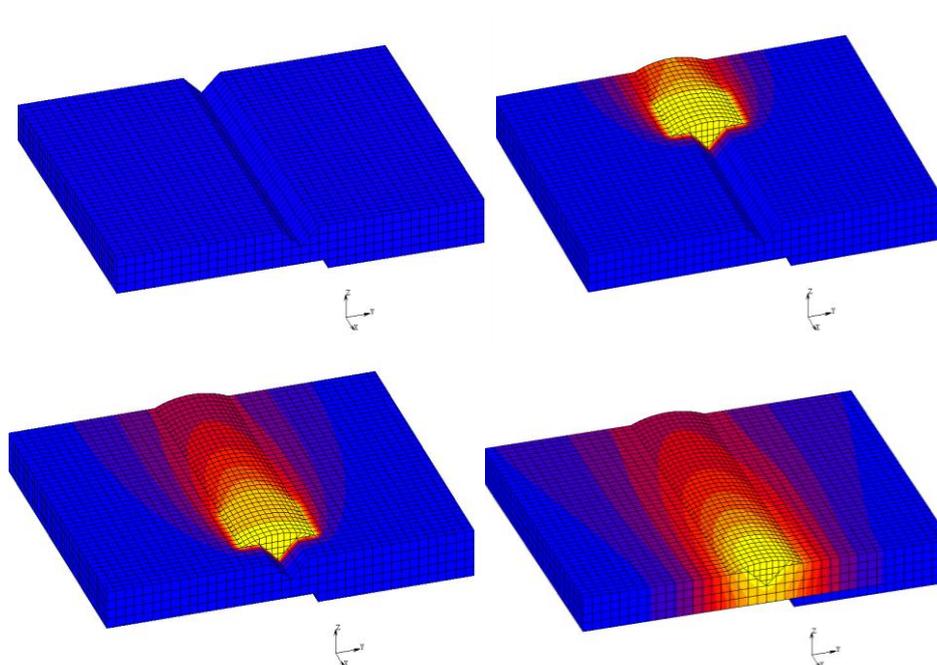
Un 60% de individuos obtenidos por cruzamiento de los padres seleccionados. El proceso de cruzamiento se realizó mediante el cambio de varios dígitos de los cromosomas de las variables a modificar. Los cromosomas se constituyen con los dígitos de las variables eliminados los puntos decimales y unidos todos en un solo conjunto. La posición y número de los dígitos a cambiar se eligió aleatoriamente.

El restante 15% de individuos se obtuvo por mutación mediante la creación aleatoria de los cromosomas dentro de los rangos establecidos. El objetivo de esta parte fue la búsqueda de nuevas soluciones dentro de zonas no exploradas previamente.

## 5. Resultados

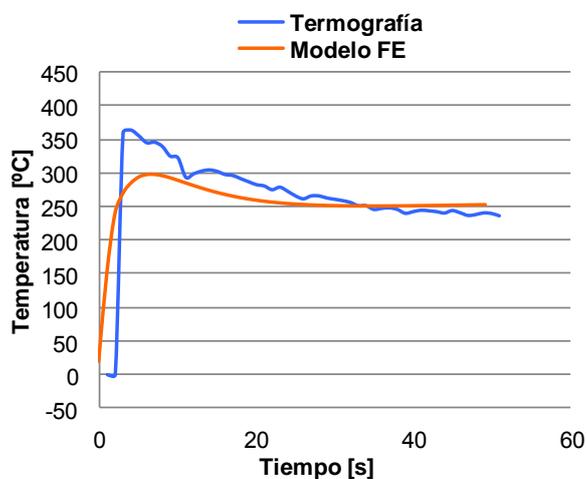
En este punto se muestran los resultados obtenidos en el modelo FE ya validado y ajustado mediante la técnica de los algoritmos genéticos. En la Figura 8 se muestra una secuencia de soldeo en la que se observa la creación del cordón de soldadura para cuatro instantes de tiempo distintos. En esta figura se muestra la temperatura de los elementos mediante bandas isocromáticas.

**Figura 8: Cuatro instantes de la simulación con elementos finitos del proceso de soldadura**



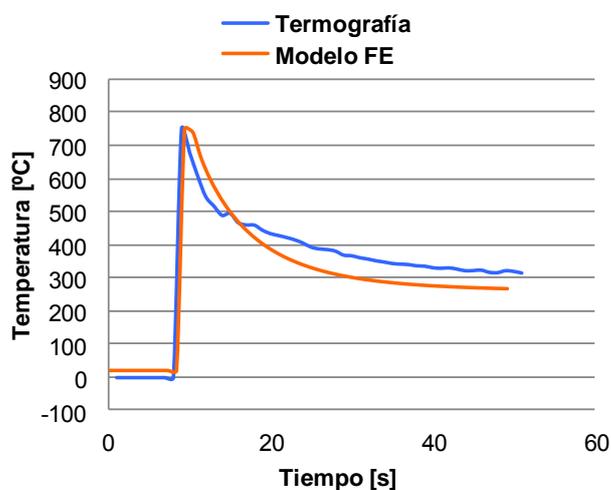
Así mismo, las Figuras 9, 10 y 11 muestran la variación de las temperaturas para distintos puntos del modelo FE en comparación con los datos obtenidos de las termografías. La Figura 11 muestra la comparación de temperaturas para un punto situado en la zona central de la placa simplemente apoyada y a 10 mm. del cordón. Se puede observar como las temperaturas alcanzadas en este punto no son muy elevadas debido a que no existe la fusión de material del cordón o de la placa.

**Figura 9: Evolución de las temperaturas en un punto de la placa y alejado 10 mm. del centro del cordón de soldadura**



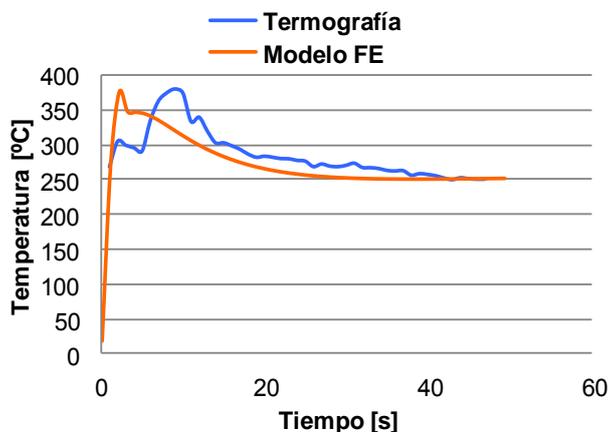
En la Figura 10 se muestra la evolución de temperaturas en un punto del centro del cordón de soldadura. La máxima temperatura aquí es muy superior a la alcanzada en las placas y su disminución es mucho más brusca.

**Figura 10: Evolución de las temperaturas en un punto del cordón de soldadura**



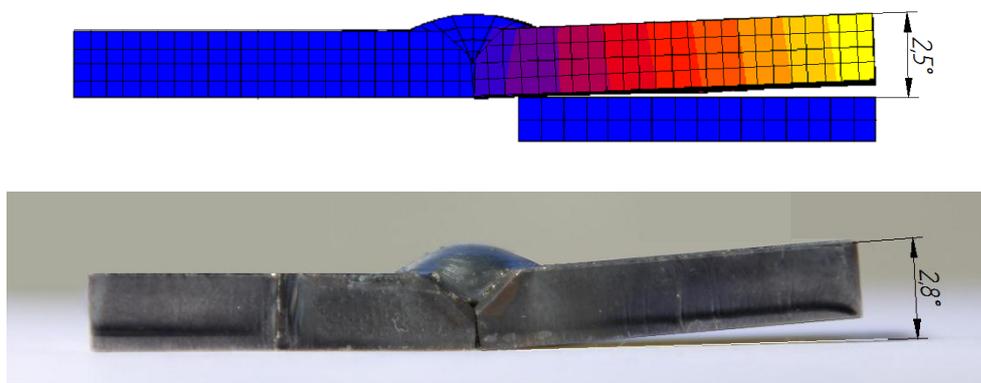
Por último, la Figura 11 muestra la evolución de temperaturas para los puntos situados a una distancia de 8mm respecto al centro del cordón.

**Figura 11: Evolución de las temperaturas en un punto alejado 8mm del centro del cordón de soldadura**



En la Figura 12, se muestra la deformación final (giro o desplazamiento de la placa simplemente apoyada) perteneciente al modelo FE y al resultado experimental. Se observa como la diferencia entre el ángulo girado por el modelo FE y el experimento es de  $0,3^\circ$ .

**Figura 12: Deformación de la unión en el modelo FE y en un ensayo**



## 6. Conclusiones

En este trabajo, se muestra el ajuste y validación de un modelo FE de un único cordón de soldadura MAG en base a las temperaturas registradas durante el proceso de soldeo y al ángulo final formado por las placas soldadas, empleando técnicas basadas en GA. En el apartado de resultados se aprecia como las temperaturas y el ángulo final obtenido del modelo FE se aproxima con gran precisión a los resultados obtenidos experimentalmente. A pesar de ser un modelo FE sencillo, puede ser la base para estudiar nuevas uniones soldadas de geometrías mucho más complejas, como uniones en T o uniones de otro tipo. En este estudio tampoco se ha considerado la deformación longitudinal producida en piezas con cordones muy largos (Aarbogh et al., 2010) y que podrían ser tenidos en consideración en trabajos futuros.

## 7. Referencias

- Aarboogh, H. M., Hamide, M., Fjaer, H. G., Mo, A., & Bellet, M. (2010) Experimental validation of finite element codes for welding deformations. *Journal of Materials Processing Technology*, 1681-1689.
- Kadivar, M., Jafarpur, K., Baradaran, G. (2000) Optimizing welding sequence with genetic algorithm, *Comput. Mech.* 26, 514–519.
- Kim, K. Norman, B. Nnaji, B. (2002) Heuristics for single-pass welding task sequencing, *Int. J. Production Res.* 40 (12) 2769–2788.
- Lostado, R.; Martínez de Pisón Ascacibar, F. J.; Fernández, R.; Fernández, J. (2010) Using genetic algorithms to optimize the material behaviour model in finite element models of processes with cyclic loads, *Journal of strain analysis for engineering design.* 45, 1-17.
- Voutchkov, I., Keane, A.J., Bhaskar, A., Olsen. Tor M. (2005) Weld sequence optimization: The use of surrogate models for solving sequential combinatorial problems”. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 194, 3535–3551.
- Xie, L., Hsieh, C. (2002) Clamping and welding sequence optimization for minimizing cycle time and assembly deformation, *Int. J. Mater. Product Technol.* 17 (5/6) 389–400.

## 8. Correspondencia

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

Rubén Lostado Lorza  
Universidad de La Rioja  
Phone: + 34 941299527  
E-mail: [ruben.lostado@unirioja.es](mailto:ruben.lostado@unirioja.es)