

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DE UN PROCESO DE SOLDADURA GMA

Pedro Villanueva Roldán

Martin Ibarra Murillo

Andres Sanz Garcia

Rubén Lostado Lorza

Abstract

MAG welding process in manufacturing of mechanical components is a difficult technique to adjust due to the high number of necessary configuration variables. However, this process has been applied successfully in several fields throughout the Twentieth Century. The optimal adjustment of the settings is a complex task because mistakes generate an increase in residual stresses and strains in the manufactured device. In present work, a sensitivity analysis was performed to determine the influence of each of the settings of the process and to establish an order of relevance. A case study of a GMA welding process was performed using two steel plates in order to obtain experimental data for sensitivity analysis.

Keywords: *GMA welding process; manufacturing of mechanical components; sensitivity analysis*

Resumen

El proceso de soldadura GMA en la fabricación de componentes mecánicos es una técnica difícil de ajustar debido al elevado número variables de configuración necesarias. A pesar de ello, dicho proceso se ha aplicado con éxito en múltiples sectores a lo largo del siglo XX. El ajuste óptimo de las variables de configuración es una tarea complicada ya que las desviaciones producen un incremento en las tensiones y deformaciones residuales en la pieza resultante.

En el presente trabajo, un análisis de sensibilidad fue realizado para determinar la influencia de cada uno de los parámetros de configuración del proceso y

posteriormente, poder establecer un orden de importancia. Un caso práctico de la soldadura de dos placas de acero fue realizado para realizar una lectura de datos y aplicar el análisis de sensibilidad.

Palabras clave: *Proceso de soldadura GMAW; fabricación de componentes mecánicos; análisis de sensibilidad*

1. Introducción

Los procesos productivos actuales buscan mayor flexibilidad, eficiencia y ahorro de tiempos, además de una garantía en la calidad del producto acabado. En concreto, la necesidad de flexibilidad genera un elevado número de situaciones cambiantes en las condiciones de trabajo, que necesitan de experiencia por parte de los profesionales para mantener la calidad en el producto acabado.

La soldadura robotizada es uno de los sistemas de fabricación actuales más extendidos debido a su flexibilidad, eficiencia y capacidad de producción gracias a su elevado nivel de automatización. Pero existe un claro inconveniente en la complejidad para efectuar una soldadura con calidad, puesto que no se comporta de la misma manera un soldador experimentado y un robot. La mayoría de los trabajos de investigación actuales buscan determinar las variables críticas del soldeo, las características del cordón y sus repercusiones metalúrgicas.

La soldadura de este estudio es realizada mediante el método de soldeo por arco con electrodo metálico consumible, y es conocida como GMAW del inglés "*Gas Metal Arc Welding*". La técnica es similar a la soldadura por arco con gas inerte, aunque de coste inferior y con la clara diferencia en el gas protector que emplea. El concepto básico de este proceso surge hacia 1920 y se comercializa en 1948 para aceros no aleados y aceros de baja aleación, pero en la actualidad se ha ampliado para la soldadura de la mayor parte de los aceros inoxidable, del aluminio y de cualquiera de sus aleaciones.

Este proceso de soldeo se caracteriza por poderse utilizar tanto en modo semiautomático, automático y robotizado, además de utilizar un gas protector químicamente activo durante todo el proceso. Dicho gas está compuesto generalmente de dióxido de carbono (CO_2), argón más dióxido de carbono ($Ar + CO_2$) o argón más oxígeno ($Ar + O_2$). Finalmente, el material de aporte se encuentra en forma de varilla con cierta longitud y es suministrado de forma automática y continua por el equipo de soldadura.

Figura 1: Sistema robot de soldadura GMAW de planta de fabricación



Nota: Cortesía de Mecanizados de Precisión de Navarra, S.L..

En resumen, el proceso GMAW (ver Figura 1) es el más utilizado de los procesos de fabricación relacionados con la unión por soldadura, y además se encuentra completamente automatizado con robots en la inmensa mayoría de las industrias del mundo.

A pesar de su automatización, los parámetros de soldeo, así como las coordenadas de la unión a soldar deben ser indicadas al robot de soldadura. Para que la soldadura sea de calidad se deben tener en cuenta múltiples aspectos: modo de transferencia metálica, penetración en el metal, formación del arco eléctrico, geometría del cordón, deformación en las piezas soldadas, etc. Para ello se deben ajustar correctamente una serie de parámetros, de los que destacan: la polaridad, la tensión de arco, la velocidad de alimentación del hilo y el tipo de gas utilizado. En esta línea, numerosas investigaciones buscan el desarrollo de los modelos matemáticos empíricos que permitan predecir todos los parámetros de configuración para la soldadura con robot.

El análisis de sensibilidad realizado es un método apropiado para identificar, medir y posteriormente ordenar los parámetros que más importancia tienen sobre los modelos matemáticos de predicción buscados. Además puede mejorar el proceso de validación del modelo mediante comparación entre sus salidas y los datos experimentales. El estudio aporta información sobre la influencia de estos parámetros en la calidad de la unión soldada para procesos robotizados de soldadura GMAW.

El análisis experimental se ha particularizado para las medidas y colocación de chapas de acero más empleadas en el proceso de producción donde se han mecanizado las probetas de material y se han realizado las pruebas de soldeo (ver Figura 1).

2. Estado del arte

Se han llevado a cabo sucesivas y numerosas investigaciones de estudios sobre los resultados obtenidos en los procesos de soldadura. Los primeros trabajos estadísticos (Chandel y Bala, 1986) están enfocados en la selección y evaluación de relaciones entre las variables del soldeo por arco sumergido y la geometría del cordón. Otros investigadores (Doumanidis et al., 1986) se centran en la generación de sencillos modelos en un esfuerzo por controlar el ancho del cordón, la penetración y el ratio de enfriamiento de la soldadura. Sin embargo, Chandel (1988) es el primero que particulariza estos trabajos por primera vez para el soldeo GMAW, investigando las relaciones entre los parámetros del proceso y la geometría del cordón resultante.

Pero a pesar del importante número de investigaciones realizadas para analizar el proceso de soldadura por arco, hoy en día existe una carencia de modelos empíricos precisos y generalistas que relacionen las entradas y la geometría del cordón. Algo que está relacionado con la considerable novedad de la técnica y la vertiginosa evolución de este método de producción.

En 2003 Kim et al. desarrolla varios modelos matemáticos lineales para predecir la altura, anchura y penetración del cordón, donde los coeficientes utilizados son valores logarítmicos basados en medidas experimentales; los propios investigadores mejoran posteriormente la precisión y el desempeño de los modelos estadísticos de predicción de geometría del cordón, ampliando el campo de trabajo para aplicarlo a los procesos GMAW en tiempo real (Kim et al., 2008).

En general, el principal parámetro a predecir en la mayoría de las investigaciones (Raveendra y Parmar, 1987) es la geometría del cordón de soldadura.

Otras líneas están basadas en técnicas de inteligencia artificial. La utilización de redes neuronales artificiales, conocidas como ANN del inglés "*Artificial Neural Networks*", es el caso más común. El objetivo es ajustar la red para mejorar la predicción de los parámetros óptimos de configuración del proceso. En 1988 Srikanthan y Chandel proponen una metodología sistemática para construir un primer modelo basado en ANN. Modelos más precisos han sido propuestos posteriormente, enfocados en su mayoría en predecir la geometría del cordón de soldadura (Kim et al, 2004). El éxito de estas técnicas se debe al

desconocimiento inicial del valor de un número elevado de parámetros de entrada al proceso que influyen en la calidad del cordón.

Otro enfoque analizado (McDill y Oddy, 1995) se basa en la formulación de un modelo de elementos finitos, conocido como FEM del inglés "*Finite Element Model*", de la formación del cordón de soldadura en tres dimensiones para un proceso GMAW. En dicho modelo se simula bajo un estado térmico estacionario, las tensiones y deformaciones residuales, considerando que el material se comporta de forma elastoplástica. Esta línea de trabajo ha logrado recientes éxitos desarrollando modelos FEM con distintas geometrías, buscando optimizar la disminución de tensiones residuales (Jiang et al, 2010), prediciendo la distribución de temperaturas, la deformación durante todo el proceso (Khoshravan y Setoodeh, 2010).

3. Objetivos

Existe un interés creciente por lograr que los procesos de soldadura robotizados consigan soluciones de fabricación flexible con una calidad similar a la de un trabajador experto.

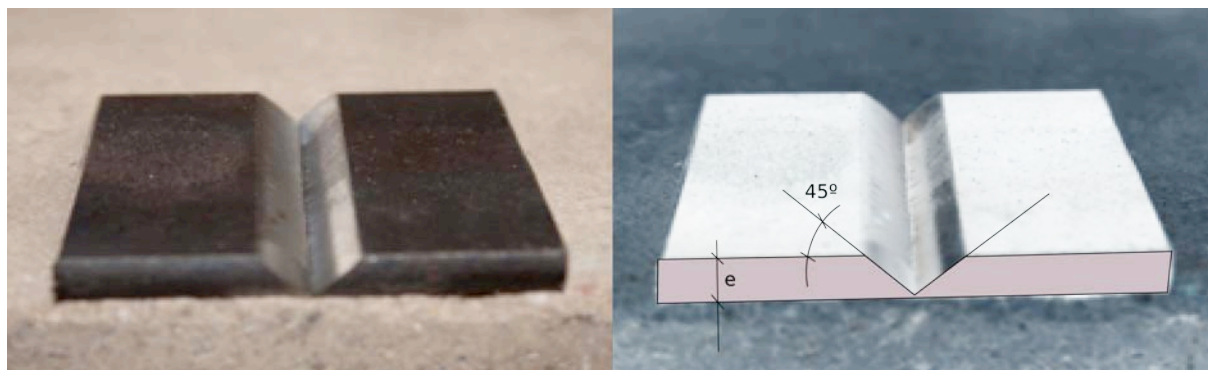
El objetivo principal del artículo es avanzar en la investigación de los procesos con robots de soldadura GMAW, realizando un análisis de sensibilidad. La finalidad del mismo es comprobar la influencia que en las ecuaciones empíricas de determinados modelos tienen determinados parámetros configuración del proceso (entradas de los modelos). Las ecuaciones de sensibilidad se obtienen mediante la derivación de las ecuaciones de los modelos con respecto a los parámetros críticos y de interés en el proceso como son: tensión del arco, corriente de soldadura y velocidad de avance de la soldadura.

Los resultados pueden conducir a modelos de predicción más precisos, al identificar que parámetros de configuración afectan en mayor medida a las condiciones de calidad impuestas, que son las salidas de los modelos matemáticos estimados.

4. Metodología

La soldadura, según la UNE 14100-94, es una unión continua de distintas partes con o sin calentamiento, aplicación de presión o aporte de material.

Figura 2: Probeta tipo para soldadura GMAW a tope con preparación en V de 45°.



Nota: Cortesía de Mecanizados de Precisión de Navarra, S.L..

Los estudios de soldadura aplicados siguen principalmente dos tipos de metodologías. Una primera sería la observación de la soldadura acabada, es decir, un análisis a posteriori. En cambio otro tipo de metodología persigue la medición de los parámetros de soldeo durante su ejecución (Jones, 1976). Los segundos necesitan una mayor inversión de recursos para

su determinación, ya que no solo deben registrar los parámetros del robot de soldeo, sino también capturar las imágenes del proceso.

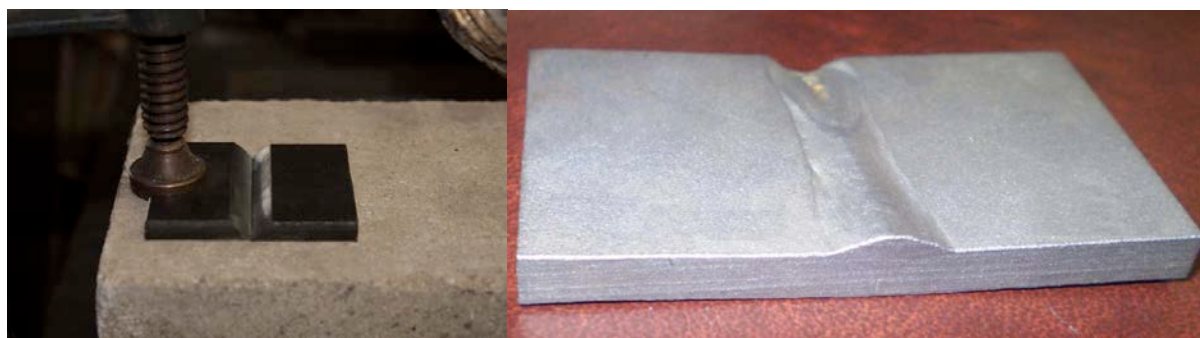
Para la realización de éste trabajo se ha seleccionado el análisis a posteriori para determinar los parámetros de configuración del proceso GMAW que más influyen en la geometría de la pieza acabada.

4.1 Preparación de las probetas

Según se observa en la Figura 2, la parte experimental está enfocada a un proceso de soldadura a tope con bordes en preparación en V. El total de las probetas destinadas al análisis de sensibilidad es de 14 unidades, siendo el acero utilizado la clase **St-3702** en placas de espesor de 6 mm.

Con anterioridad al ensayo las placas han sido mecanizadas con un ángulo de 45° hasta la mitad de su espesor y después son colocadas sobre una superficie plana refractaria. Una de las unidades es fijada con una mordaza y la placa restante queda libre de manera que pueda girar por acción de la retracción térmica que se origina durante este proceso. Desplazamiento que se considera el reflejo visual de las tensiones residuales originadas en el metal base. En la Figura 3.a, se aprecia el mencionado proceso de montaje de las placas para su soldeo.

Figura 3: (a) Sujeción mediante mordaza de una probeta y (b) pieza soldada resultante.



Nota: Cortesía de Mecanizados de Precisión de Navarra, S.L..

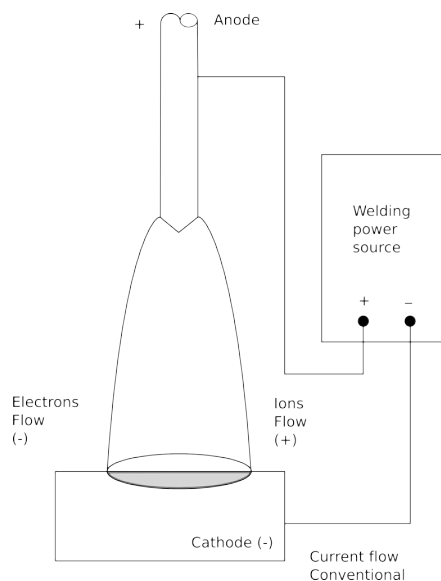
4.2 Proceso de soldadura

A continuación se llevaron a cabo un total de 14 pruebas (ver Figura 3.b) con distintos parámetros de configuración. El sistema empleado está robotizado, en concreto el modelo empleado fue un **ABB 1500 IRB** con maquina **Soldar ESAB 180**. Estos equipos del proceso de GMAW trabajan a tensión constante regulada desde un generador de continua, permitiendo variar la velocidad del hilo del metal de aportación solo entre ciertos límites.

El sistema utiliza polarización inversa (ver Figura 4) con el hilo de metal de aporte como electrodo consumible, estableciendo un arco eléctrico en su extremo. La polaridad es un parámetro que afecta principalmente a la penetración. Para los ensayos realizados la polarización es inversa, puesto que se ha utilizado el mismo hilo de metal, es decir, el electrodo está conectado al polo positivo y se consigue una penetración más elevada.

El ensayo consiste en el soldeo del chaflán mecanizado de forma que quede relleno, pero variando en las sucesivas pruebas realizadas los parámetros del robot de soldadura. Los parámetros que han sufrido variaciones (el resto permanecen constantes) son: la velocidad del hilo, la intensidad y el voltaje del equipo generador del arco.

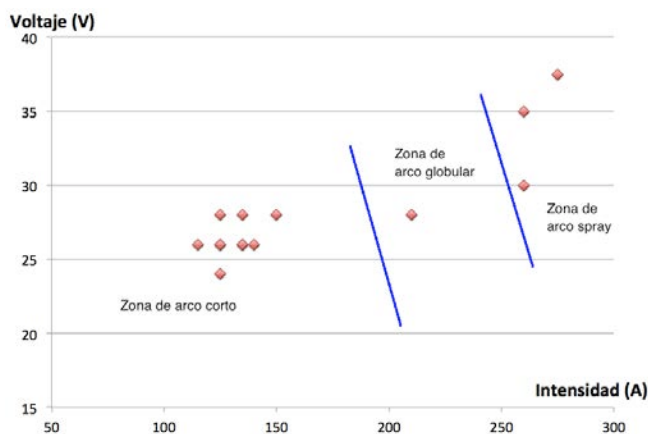
Figura 4: Esquema de funcionamiento del sistema GMAW con polarización inversa



Uno de los parámetros básicos que pueden condicionar los resultados obtenidos es la clase de gas utilizado, por lo tanto, la composición del gas empleado fue igual en todos los casos: $Ar=72\%$, $CO_2=8\%$, $NO= 275 ppm$. Queda eliminado como parámetro crítico a analizar.

Si se analiza la tensión de trabajo y la intensidad de la corriente empleados en los ensayos, se puede determinar el modo de transferencia del metal fundido al baño de fusión del proceso. El 72% de las transferencias realizadas en las 14 pruebas se corresponden con el modo de arco corto, tal y como se representa en la gráfica tensión-intensidad de la figura 6 (Reina, 2003).

Figura 6: Regiones del plano Intensidad-Tensión con distintas formas de transferencia

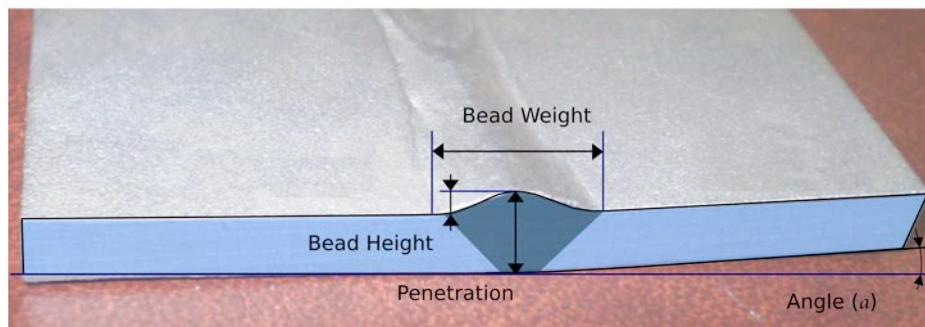


Se describen a continuación el resto de parámetros que no han sufrido variación y por lo tanto no son modelados como entradas en el modelo de predicción utilizado:

- El metal de aporte, que aunque no utilizado por ser constante para todas las pruebas, está directamente relacionado con los parámetros eléctricos que definen el arco (Pascual et al., 2010)

- La velocidad del hilo del metal de aporte, que es directamente proporcional con la intensidad de la corriente de soldadura (Reina, 2003).
- El ángulo de soldadura, que en numerosas investigaciones (Tso-Liang et al., 2001) se demuestra tener un gran impacto sobre las tensiones residuales para ciertos tipos de soldeo.

Figura 5: Medidas características en la probeta una vez soldada



4.3 Mediciones

Las mediciones obtenidas una vez finalizadas las pruebas de soldadura están recogidas en la Tabla 1. En dicha tabla se recogen los valores de las entradas utilizados para configurar el proceso en cada uno de los ensayos:

- Voltaje del equipo de soldadura del robot (V)
- Intensidad de la corriente en el arco de soldadura (A).
- Velocidad de desplazamiento durante el proceso (S).

Tabla 1. Distribución de tamaños para los distintos tamaños de partículas

nº Test	Voltage (V)	Current (A)	Speed (mm/s)	Angle (°)	Bead Height (mm)	Bead Weight (cm)	Penetration (cm)
1	23	120	2	4,23	1,9	3,9	3,4
2	29	120	2	4,21	2	2,5	2,1
3	22	120	2	4,12	2,1	4,9	4,2
4	23	118	2	4,24	1,8	2,8	2,4
5	27	132	2	2,87	2,3	3,0	2,5
6	24	125	5	4,21	0,7	3,2	2,7
7	28	131	5	3,47	0,7	2,08	2,4
8	25	130	5	3,21	0,6	4,4	3,5
9	23	148	5	3,26	1,1	2,8	2,6
10	37,5	270	11	4,25	2,1	4,3	3,7
11	27	145	7	4,57	1,4	3,4	2,7
12	29	215	7	4,58	1,6	3,8	3,4
13	31	273	7	5,27	1,6	3,9	3,7
14	34	255	7	4,84	2,5	4,0	3,5

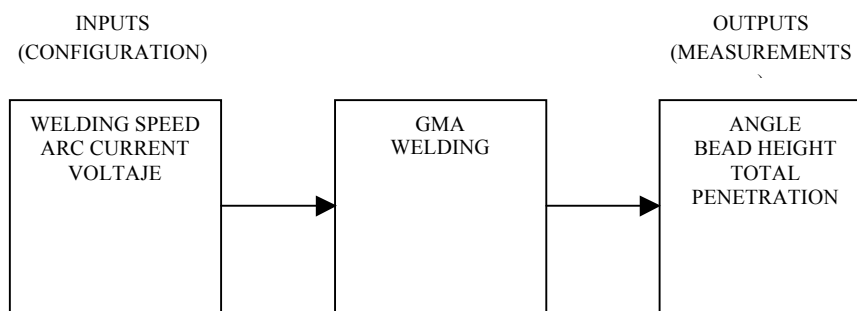
A continuación, y en la misma Tabla 1, están las mediciones realizadas que se corresponden con todos y cada uno de los posibles valores de las salidas del modelo a predecir, incluida la geometría del cordón (ver Figura 5):

- Ángulo de retracción entre caras de ambas chapas (α)
- Altura del cordón de soldadura (H).
- Profundidad de penetración de la soldadura (P).
- Anchura del cordón de soldadura (W).

5. Resultados

A continuación se muestra los resultados obtenidos con la metodología de investigación propuesta en el apartado anterior. Los modelos matemáticos han sido determinados con la herramienta estadística *R-project* y obedecen al esquema que se recoge en la Figura 6.

Figura 6: Esquema del modelo de predicción estadístico utilizado para el proceso GMAW.



Para obtener las ecuaciones de sensibilidad para los modelos, las ecuaciones resultantes se han derivado con respecto a cada una de las variables analizadas (intensidad de la corriente del arco, tensión de trabajo y velocidad de avance del cordón). Dichas ecuaciones de sensibilidad representan la sensibilidad de cada una de las variables de salida, ante las mencionadas entradas. Es decir, tanto la anchura y altura del cordón como el ángulo de deformación y la profundidad de penetración, pueden analizarse con respecto a la intensidad, tensión y velocidad de avance.

Los resultados obtenidos se recogen en las gráficas de la Tabla 2 para el ancho del cordón y en la Tabla 3 para el ángulo de desviación o deformación.

Tabla 2. Sensibilidad (en tanto por ciento, %) de la anchura del cordón ante la corriente (A)

Var: Corriente (A)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Velocidad (mm/s)
125	9	4	1
200	13	5	0,5
275	15	5	2

Tabla 3. Sensibilidad (en tanto por ciento, %) de la desviación ante la corriente (A)

Var: Corriente (A)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Velocidad (mm/s)
125	12	3	1
200	17	4	1,5
275	25	6	1,5

7. Conclusiones

La presente investigación ha sido realizada con la finalidad de determinar el efecto que produce la variación de algunos de los parámetros que intervienen en el proceso de soldadura de tipo GMAW.

Los resultados obtenidos confirman que la corriente del arco es la que presenta mayor influencia sobre la anchura del cordón y sobre el ángulo de deformación. Por lo tanto, para lograr un cordón de soldadura óptimo, en cuanto a geometría del cordón se refiere, es la intensidad del arco la variable que debe ser controlada y estabilizada en primer lugar.

En futuras investigaciones se propone desarrollar nuevos modelos y comparar los nuevos análisis sensibilidad con los resultados obtenidos, para determinar la reproductividad y generalidad de estas conclusiones.

Referencias

- Chandel, R. S., & Bala, S. R. (1986, May). Effect of welding parameters and groove angle on the soundness of root beads deposited by the SAW process. *Proceedings of an International Conference on Trends in Welding Research*, 379-385.
- Chandel, R. S. (1988, April). Mathematical modeling of gas metal arc weld features, *Proceedings of the Fourth International Conference on Modeling of Casting and Welding Processes*, 109-120.
- Doumanidis, G., Hale, M., & Hart, D. E. (1986, May). Multivariable control of arc welding processes, *Proceedings of an International Conference on Trends in Welding Research*, 18-22. Gatlinburg, USA.
- Jiang, W., Fan, Q., & Gong, J. (2010, January). Optimization of welding joint between tower and bottom flange based on residual stress considerations in a wind turbine. *Energy*, 35,, 461-467.
- Jones, S. B. (1976). Process tolerance in submerged arc welding: Initial report. *The Welding Institute Report 1/1976/PE*.
- Khoshrovan, M. R., & Setoodeh, M. A. (2010). Numerical and experimental analysis of welding deformation in thin plates. *Computers, Materials and Continua*, 16 (3), 195-228.
- Kim, I. S. , Son, K. J., Yang, Y. S., Yaragada, P.K. (2003). Sensitivity analysis for process parameters in GMA welding processes using a factorial design method. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, 763-769.
- Kim, I.-S., Son, J.-S., Lee, S.-H., & Yaragada P.K. (2004). Optimal design of neural networks for control in robotic arc welding, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 20, Issue 1, (pags. 57-63).
- Mcill, J. M., & Oddy, A. S. (1995). A nonconforming eight to 26-node hexahedron for three-dimensional thermal-elasto-plastic finite element analysis. *Computers & structures*, 54. n° 2, 183-189.
- Pascual, M., Salas, F., Carcel, F. J., Perales, M., & Sánchez A. (2010) TIG AISI-316 welds using an inert gas welding chamber and different filler metals: Changes in mechanical properties and microstructure. *Revista de metalurgia*, 46 (6).493-498.
- Raveendra, J., & Parmar, R. S. (1987). Mathematical models to predict weld bead geometry for flux cored arc welding, *Metal Construction* 19/2, 31-35.
- Reina, M. (2003). *Soldadura de los Aceros. Aplicaciones*. Madrid: Weld-Work S.L.

- Srikanthan, L. T., & Chandel, R. S. (1998). Neural network based modelling of GMA welding process using small data sets. *Proceedings of the Fifth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore*. (pags. 474–478).
- Thao, D. T., Jeong, J. W., Kim, I. S., & Kim, J. W. (2008). Predicting Lap-Joint bead geometry in GMA welding process. *Archives of Materials Science and Engineering*, 32,121-124.
- Tso-Liang, T., Chin-Ping, F., Peng-Hsiang, Ch., & Wei-Chun Y. (2001) Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 78. 523-538.
- AENOR (1994). *UNE 14100:1994. Soldadura y técnicas afines. Términos y definiciones.*