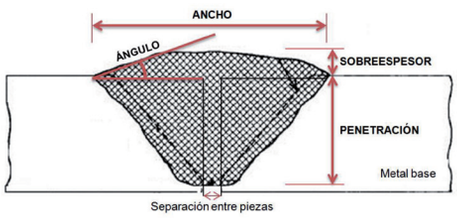
Aplicación para la simulación de la geometría de uniones soldadas a tope de la aleación AA 6063-T5

SIMULATION APPLICATION FOR THE GEOMETRY OF THE BUTT WELD JOINTS OF THE ALLOY AA-6063-T5



DOI: http://dx.doi.org/10.6036/7483 | Recibido: 26/11/2014 • Aceptado: 11/05/2015

Francisco Segura- Quiles[1], Eusebio José Martínez- Conesa[1], Valentín Miguel-Eguía[2]

[1] UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA. Paseo Alfonso XIII, 52 – 30203 Cartagena. Tfno: +34 630 234772
eusebio.martinez@upct.es
[2] UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA. Escuela de Ingenieros Industriales/Instituto de Desarrollo Regional. Campus Universitario s/n- 02071 Albacete

ABSTRACT

- Weld bead geometry plays an important role in determining the mechanical properties of a structure. Geometric parameters as penetration, width, thickness and weld bead angle depend on the variables of the welding process, such as the distance between edges to be joined, welding velocity, arc voltage and electrode feed rate. In the present work it is performed a software application which can simulate the geometry of butt joints of AA 6063-T5 aluminium alloy. For that, it has been obtained a model by the response surface methodology that has been implemented in the computer application.
- **Keywords:** bead geometry, computer simulation, Design of Experiments (DOE), alloy 6063-T5.

RESUMEN

La geometría de una unión soldada es importante en la resistencia mecánica de una estructura. Sus parámetros geométricos como la penetración, el ancho, el sobreespesor y el ángulo del cordón dependen de las variables del proceso de soldadura, tales como la separación entre los bordes a unir, la velocidad de soldadura, la tensión y la velocidad del material de aportación. En el presente trabajo, se lleva a cabo la modelización del proceso de soldadura de la aleación de aluminio 6063-T5 mediante la metodología de superficie de respuesta para soldaduras a tope con diferentes grados de separación entre superficies. A partir del modelo obtenido se desarrolla una aplicación informática, donde se puede simular la geometría de la unión soldada sin la necesidad de realizar ensayos de soldadura.

Palabras clave: geometría unión soldada, simulación computacional, diseño de experimentos, aleación 6063-T5.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción sismorresistente dispone de soluciones adecuadas que, mediante el uso de distintos materiales estructurales, sistemas constructivos, criterios de diseño y métodos de análisis confiables, permiten reducir el riesgo sísmico. La soldadura es un medio de unión muy utilizado por sus muchas ventajas. Sin embargo, es importante reconocer que presenta limitaciones y que el diseño y la construcción de conexiones soldadas requieren de especial cuidado para evitar problemas como los observados después del terremoto de Northridge en 1994 [1]. Por tanto, el procedimiento de soldadura debe ser analizado y optimizado para garantizar una unión de calidad y evitar el derrumbe de la estructura metálica por motivos sísmicos. Es por ello, que el control de los parámetros de soldadura y su optimización es fundamental para garantizar una unión soldada de calidad y que cumpla con la normativa sismorresistente. La resistencia mecánica de una unión soldada depende de la geometría del cordón de soldadura. El análisis de la geometría de la unión tiene una consideración importante para el diseño y fabricación de estructuras metálicas. Esta geometría influye en la calidad de la unión en la construcción de estructuras [2]. La Figura 1 muestra la sección transversal de un cordón de soldadura y su nomenclatura.

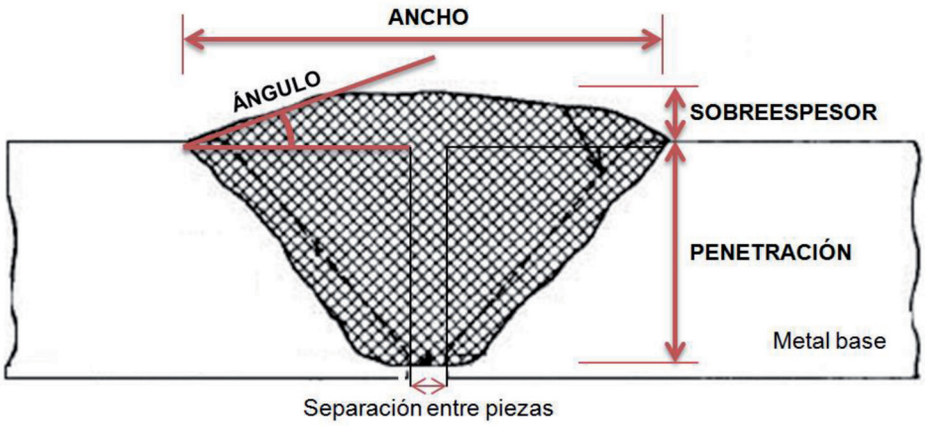


Fig. 1: Nomenclatura de la geometría del cordón de soldadura

Diversos autores estudian la relación entre los parámetros del proceso de soldeo con la geometría de la unión obtenidos planteando modelos en los que las funciones de respuesta Y se expresan conforme al modelo propuesto por McGlone y Chadwick [3] en función de las variables del proceso X_1, X_2, ... X_n, tal y como se indica en la expresión (1) en la que b_1 a b_n son las constantes de ajuste del modelo que dependen del caudal de gas, material de aporte, etc.

$$Y=b_1X_1^{b_1}X_2^{b_2}\ldots X_n^{b_n} \quad (1)$$

Los coeficientes b_1 a b_n son calculados mediante regresión múltiple. Karandeniz et al. [4], analizaron un modelo tipo McGlone y Chadwick, denominado ajuste curvilíneo, considerando como variables la tensión e intensidad del arco eléctrico y la velocidad de soldeo. Consideraron únicamente el estudio de la penetración en aceros de bajo contenido en carbono y se limitan a obtener la variación de dicho parámetro en función de las variables indicadas. Wahab y Painter [5] consideraron como variables del proceso la tensión e intensidad del arco, la velocidad de soldadura y el caudal de gas empleado, limitándose a obtener un modelo similar al indicado.

Kim et al. [6], correlacionaron la penetración con la intensidad, tensión, velocidad de soldadura y ángulo. Compararon los resultados obtenidos mediante el modelo curvilíneo con los que se obtienen de una correlación lineal con las variables experimentadas. Los autores demostraron que se comporta mejor el modelo lineal. Concretamente, si se analizan los resultados obtenidos por estos autores, se puede estimar que el error medio cometido en una regresión lineal es del 16% en tanto que el modelo curvilíneo que representa la expresión (1) conduce a un error medio del 23%. Ambos métodos presentan algún valor experimental que se aleja en más del 50% del correspondiente modelo teórico. El ángulo experimentado varía de 10º a 20º, que es el rango de aplicación típico en operaciones de soldadura GMAW robotizadas.

Payares et al. [7] determinaron el área del cordón en función de la tensión, intensidad y velocidad en soldaduras a tope de la aleación de aluminio 6063-T5. Obtuvieron funciones de tipo curvilíneo para el área transversal estimada de la unión con los parámetros tecnológicos de soldeo.

Existen pocas investigaciones publicadas en relación a la geometría de la unión en aleaciones de aluminio, a pesar del interés que tiene en la construcción [8], no existen investigaciones dirigidas a la optimización de los diversos parámetros tecnológicos que intervienen en el proceso conjuntamente y se suelen establecer simplificaciones en la ejecución de cordones de soldadura que no tienen en cuenta, por ejemplo, la separación entre las superficies a unir.

En este trabajo se presenta una metodología para la generación de una herramienta informática que permita predecir los parámetros geométricos de un cordón de soldadura. La metodología se aplica a la aleación de aluminio 6063-T5.

2. DISEÑO DE UNA APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA LA MODELIZACIÓN DE LOS FACTORES GEOMÉTRICOS DE UNA UNIÓN SOLDADA

2.1. OBTENCIÓN DEL MODELO

El desarrollo de una aplicación informática para la predicción de los parámetros geométricos, Fig.1, de una unión soldada precisa de la modelización previa de los diferentes factores que intervienen en la misma. Existen diversos procedimientos para modelizar la respuesta geométrica. Uno de dichos procedimientos lo constituye la metodología de superficie de respuesta que se define como el conjunto de técnicas matemáticas útiles para la modelización, en aplicaciones donde una respuesta de interés es influenciada por distintas variables y cuyo objetivo es optimizar esta respuesta.

El modelo de respuesta cuadrático o modelo de segundo orden [9], es el indicado en la expresión (2):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{j=2}^{k}\sum_{i=1}^{k} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (2)$$

En relación con el análisis de la geometría de la unión, se puede analizar cómo los parámetros del procedimiento de soldeo afectan a la penetración, sobreespesor, anchura y ángulo de la unión y permite calcular los valores óptimos. El objetivo es calcular los valores óptimos para las variables independientes que maximizan, minimizan o cumplen ciertas restricciones en la variable de respuesta. Se analizan los niveles de 4 variables, x_1 separación de perfiles, x_2 velocidad de soldadura, x_3 tensión y x_4 velocidad del material de aportación, que maximizan la penetración y minimizan el ancho, el sobreespesor y

el ángulo del cordón en el metal base. Tanto la penetración, y_1, como el ancho, y_2, el sobreespesor, y_3, y el ángulo del cordón, y_4, se pueden expresar como funciones de las variables indicadas y del error observado (3).

$$\begin{aligned} y_1 &= f(x_1, x_2, x_3, x_4) + \varepsilon_1 \\ y_2 &= f(x_1, x_2, x_3, x_4) + \varepsilon_2 \\ y_3 &= f(x_1, x_2, x_3, x_4) + \varepsilon_3 \\ y_4 &= f(x_1, x_2, x_3, x_4) + \varepsilon_4 \end{aligned} \quad (3)$$

Como ejemplo de aplicación se ha adoptado un modelo cuadrático [10], estableciendo la relación entre los factores y niveles (-1, 0, 1) que se consideran en la Tabla 1. El proceso de modelización se ha realizado para la soldadura a tope de una aleación de aluminio 6063-T5 con la definición de experimentos que se muestra en la Tabla 2. La composición química de la aleación 6063-T5 se indica en la Tabla 3.

Variables del proceso	-1	0	1
Separación entre piezas (x_1) (mm)	0	1	2
Velocidad de soldadura (x_2) (mm/s)	8,2	13	17,8
Tensión (x_3) (V)	18	21	24
Velocidad del electrodo (x_4) (m/min)	9	10,5	12

Tabla 1: Niveles de las variables según el diseño experimental

Ensayo	x_1	x_2	x_3	x_4	Ensayo	x_1	x_2	x_3	x_4
1	1	13	18	12	**13**	0	13	21	9
2	1	13	24	12	**14**	1	17,8	18	10,5
3	2	13	24	10,5	**15**	0	17,8	21	10,5
4	2	13	21	12	**16**	1	8,2	21	12
5	2	17,8	21	10,5	**17**	2	8,2	21	10,5
6	1	17,8	24	10,5	**18**	1	17,8	21	12
7	0	13	18	10,5	**19**	1	13	24	9
8	0	8,2	21	10,5	**20**	1	8,2	18	10,5
9	1	13	18	9	**21**	1	8,2	21	9
10	2	13	18	10,5	**22**	1	8,2	24	10,5
11	0	13	21	12	**23**	1	17,8	21	9
12	0	13	24	10,5	**24**	2	13	21	9

Tabla 2: Matriz Experimental

Mn	Si	Cr	Cu	Zn	Pb	Fe	Ti	Mg
0.020	0.430	0.010	0.010	0.010	0.010	0.200	0.020	0.480

Tabla 3: Composición química (% en masa) de la aleación de aluminio AA 6063-T5

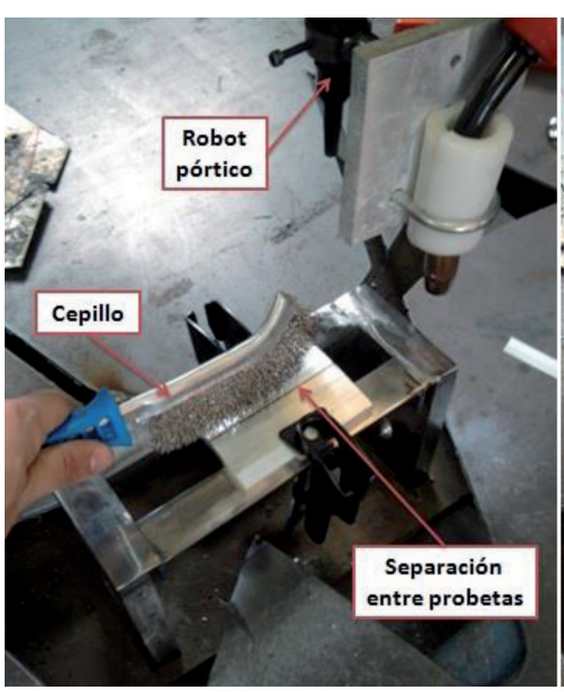


Fig. 2.a) Equipo experimental previo ensayo

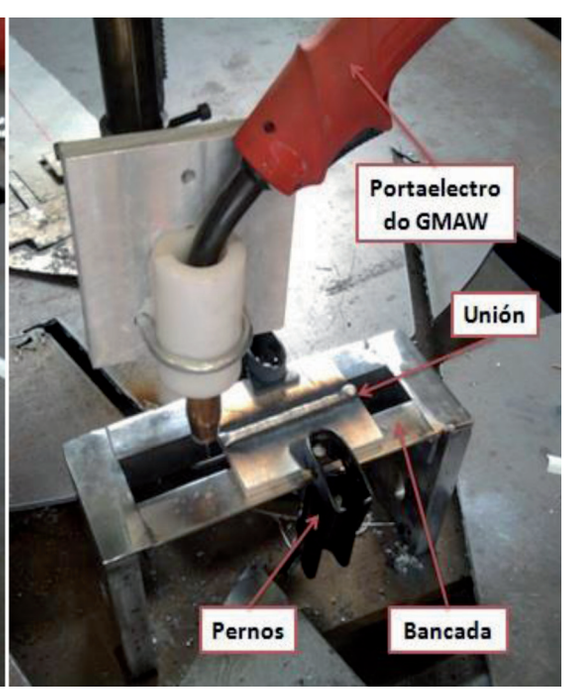


Fig. 2.b) Equipo experimental tras ensayo realizado

Con la combinación de las variables indicadas en la tabla 2 se ha realizado la matriz de experimentos, teniendo en cuenta los valores codificados conforme a los niveles (-1, 0,1). El intervalo de valores seleccionados para las variables corresponde a valores reales utilizados en la unión de estructuras metálicas. En la Tabla 2 se indican los experimentos seleccionados para la obtención de la matriz de experimentos y se especifican los valores correspondientes a cada variable en los diferentes experimentos considerados.

La metodología debe efectuarse mediante un procedimiento de soldeo que permita el control de las variables de soldeo y la repetibilidad de las condiciones de soldadura. Para la aplicación aquí descrita se definió un proceso de soldadura en una máquina sinérgica de polaridad positiva (inversa) GMAW con el empleo del utillaje preciso para conseguir el control de todas las variables de soldeo, Fig.2.

Las dimensiones de las probetas fueron de 100x40x8 mm. El gas de protección fue argón al 99% típico de estas aplicaciones y el caudal empleado 14 l/min. La distancia del electrodo al metal base fue de 3 mm para garantizar la protección del gas. El material de aportación empleado fue alambre de 1,2 mm de diámetro de S Al 5356 ($AlMg_5Cr(A)$) conforme a la norma EN ISO 18273.

Para la sujeción de las probetas se realizó un soporte de aluminio que se alojó en un robot pórtico y cuyo objetivo era la colocación de las probetas y su fijación mediante pernos. En la Figura 2.a) y 2.b) se observa un detalle del dispositivo descrito.

Las zonas a unir fueron tratadas superficialmente con un cepillo de púas de aluminio para eliminar cualquier tipo de oxidación superficial que dificultara la estabilidad del arco eléctrico. Para controlar la separación entre las piezas se emplearon chapas de 1 y 2 mm de espesor. Los parámetros de tensión y velocidad de alimentación del material de aportación fueron regulados mediante los controles existentes en la máquina de soldadura. La velocidad de soldadura se estableció mediante el desplazamiento de un robot pórtico programado por control numérico.

Para efectuar la medición de los parámetros geométricos de las uniones soldadas, éstas fueron cortadas por la mitad con el fin de evitar efectos de contorno como son el cebado y fin de cordón ya que no se emplearon apéndices en las piezas con este fin. Además, se estima que en dicha zona el material base alcanza la temperatura de régimen, evitando evaluar la unión en zonas en las que exista una anómala disipación del calor, como por ejemplo en la parte inicial del cordón. En la Figura 3 se muestra un detalle de algunos de los cordones medidos. La medición de los factores geométricos fue realizada en un proyector de perfiles Nikon a 20x.

De manera aproximada se puede considerar el área del cordón de soldadura y la parte del metal base que participa

Cordón	Penetración (mm) Y_1	Ancho (mm) Y_2	Sobreespesor (mm)Y_3	Ángulo (º)Y_4
1	5,067	7,957	2,995	55
2	3,850	10,984	2,540	35
3	4,313	7,584	0,954	23
4	4,353	9,122	2,161	27
5	3,972	6,038	0,663	20
6	3,067	7,407	1,771	50
7	2,281	7,718	2,740	61
8	2,612	10,996	3,552	57
9	1,572	6,901	2,073	41
10	5,394	7,729	1,512	48
11	3,609	8,502	2,687	54
12	2,113	9,363	2,380	50
13	2,039	8,958	2,433	44
14	3,748	6,733	2,037	46
15	2,390	8,327	2,311	51
16	4,682	12,110	3,772	47
17	4,954	10,920	2,265	55
18	4,284	7,790	1,876	27
19	2,358	9,885	1,675	28
20	3,725	8,964	2,932	63
21	3,401	8,900	2,642	55
22	3,841	12,804	3,118	37
23	2,898	7,403	1,131	30
24	3,752	7,841	1,099	24

Tabla 4: Resultados de los ensayos

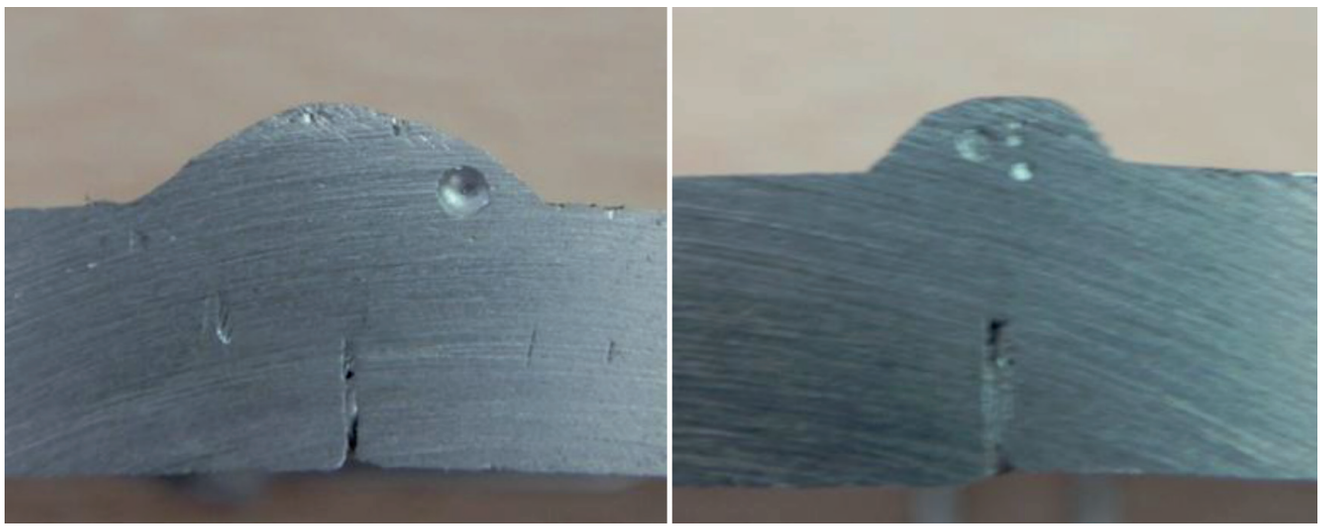


Fig. 3: Vista general de secciones transversales de cordones de soldadura obtenidas experimentalmente

$$Y_1 = -34{,}6593 + 4{,}8033\boldsymbol{S} + 0{,}0012\boldsymbol{V_s} + 1{,}6747\boldsymbol{T} + 2{,}9969\boldsymbol{V_e} - 0{,}0104\boldsymbol{S^2} + 0{,}0093\boldsymbol{V_s^2} - 0{,}0074\boldsymbol{T^2} - 0{,}0396\boldsymbol{SV_s} - 0{,}0761\boldsymbol{ST} - 0{,}0138\boldsymbol{V_sT} - 0{,}1615\boldsymbol{SV_e} + 0{,}0036\boldsymbol{V_sV_e} - 0{,}113\boldsymbol{TV_e} \quad (4)$$

$$Y_2 = -38{,}9380 + 2{,}0191\boldsymbol{S} + 1{,}6466\boldsymbol{V_s} + 2{,}5283\boldsymbol{T} + 1{,}30\boldsymbol{V_e} - 0{,}4069\boldsymbol{S^2} + 0{,}0111\boldsymbol{V_s^2} - 0{,}0323\boldsymbol{T^2} - 0{,}1153\boldsymbol{SV_s} - 0{,}1492\boldsymbol{ST} - 0{,}0550\boldsymbol{V_sT} + 0{,}2895\boldsymbol{SV_e} - 0{,}0980\boldsymbol{V_sV_e} + 0{,}0024\boldsymbol{TV_e} \quad (5)$$

$$Y_3 = -2{,}3746 - 0{,}8621\boldsymbol{S} + 0{,}0374\boldsymbol{V_s} + 0{,}3086\boldsymbol{T} + 0{,}3822\boldsymbol{V_e} - 0{,}2909\boldsymbol{S^2} + 0{,}0053\boldsymbol{V_s^2} - 0{,}0050\boldsymbol{T^2} - 0{,}0188\boldsymbol{SV_s} - 0{,}0165\boldsymbol{ST} - 0{,}0078\boldsymbol{V_sT} + 0{,}1347\boldsymbol{SV_e} - 0{,}0134\boldsymbol{V_sV_e} - 0{,}0032\boldsymbol{TV_e} \quad (6)$$

$$Y_4 = 624{,}5362 + 34{,}6354\boldsymbol{S} - 22{,}8277\boldsymbol{V_s} - 44{,}8819\boldsymbol{T} + 8{,}3542\boldsymbol{V_e} + 5{,}8750\boldsymbol{S^2} + 0{,}3852\boldsymbol{V_s^2} + 0{,}9722\boldsymbol{T^2} - 1{,}5104\boldsymbol{SV_s} - 1{,}1667\boldsymbol{ST} + 0{,}5208\boldsymbol{V_sT} - 1{,}1667\boldsymbol{SV_e} + 0{,}1736\boldsymbol{V_sV_e} - 0{,}3889\boldsymbol{TV_e} \quad (7)$$

del mismo, es decir, se puede estimar la dilución existente, aunque no es objeto del presente trabajo.

Se realizan los experimentos correspondientes a los valores de las variables indicados en la Tabla 2, obteniendo los parámetros geométricos indicados en la Tabla 4.

El planteamiento de la ecuación (2) extendido a las cuatro variables de salida, y_1 a y_4, involucra la formulación matricial del problema cuya resolución va dirigida a la obtención de la denominada matriz de coeficientes [10]. Las expresiones (4) a (7) corresponden a la modelización matemática entre las variables tecnológicas del proceso de soldadura y los parámetros geométricos que definen la morfología del cordón y que son el resultado del planteamiento matemático efectuado.

Para la penetración, se obtiene la ecuación (4). En dicha ecuación S representa la separación entre piezas, V_s la velocidad, T la tensión y V_e la velocidad del material aportación.

La expresión para la anchura del cordón queda modelizada como se establece en la ecuación (5).

La ecuación para el sobreespesor queda modelizada tal y como se establece en la expresión (6).

Finalmente, la ecuación para el ángulo del cordón queda modelizada como se establece en la expresión (7).

2.1. ANÁLISIS DEL ERROR EXPERIMENTAL

La metodología de superficie de respuesta es muy utilizada en áreas donde el error experimental es tan pequeño que se puede considerar despreciable, especialmente en ingeniería [11]. Las expresiones (4), (5), (6) y (7) no incluye el error experimental obtenido para cada ensayo. De este modo existen pequeñas desviaciones entre el modelo teórico desarrollando por la MSR y el procedimiento experimental. Para un mayor ajuste de la simulación numérica, se calculó el error experimental medio para cada uno de los parámetros geométricos estudiados en este trabajo, tal y como se muestra en la Figura 4, y se aplica a las expresiones corregidas (8), (9), (10) y (11).

$$y'_1 = f(x_1, x_2, x_3, x_4) + \varepsilon_1 = Y_1 + 0{,}00948 * Y_1 \quad (8)$$

$$y'_2 = f(x_1, x_2, x_3, x_4) + \varepsilon_2 = Y_2 - 0{,}0016 * Y_2 \quad (9)$$

$$y'_3 = f(x_1, x_2, x_3, x_4) + \varepsilon_3 = Y_3 + 0{,}0053 * Y_3 \quad (10)$$

$$y'_4 = f(x_1, x_2, x_3, x_4) + \varepsilon_4 = Y_4 - 0{,}014 * Y_4 \quad (11)$$

En la Figura 4, la línea azul representa la distribución del error absoluto y la línea roja representa el resultado obtenido. El apartado (a) representa los resultados del ancho de la

unión, el apartado (b) representa los resultados obtenidos del sobreespesor del cordón y el apartado (c) representa los resultados obtenidos del ángulo del cordón. La línea roja traza los resultados experimentales y numéricos obtenidos y la separación de la línea azul de la línea roja indica el error que se ha obtenido en la aproximación tanto numérica como experimen-

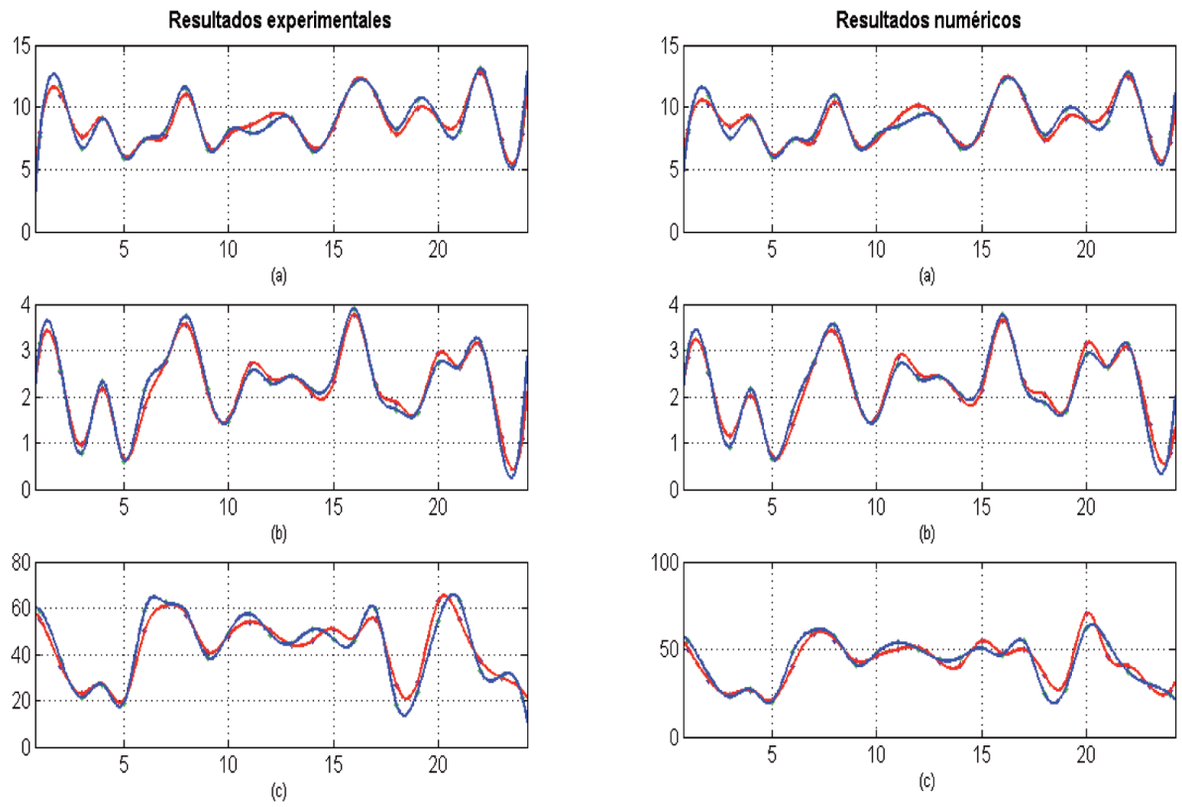


Fig. 4: Representación de los resultados experimentales y de los resultados numéricos



Fig. 5: Pantalla principal de la aplicación informática

tal. Los resultados obtenidos resultan ser bastante precisos y tienen una buena aproximación de los resultados.

2.1. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMATICO EN UNA APLICACION INFORMATICA

El objetivo principal de este trabajo de investigación es proporcionar al proyectista una herramienta de predicción de los parámetros geométricos de un cordón de soldadura de una aleación de aluminio para facilitar un diseño de calidad en uniones estructurales. Una vez aplicada la metodología de superficie de respuesta, se obtiene una serie de ecuaciones (8) (9) (10) (11) para predecir los factores geométricos en función de la separación, velocidad de soldadura, tensión y velocidad del electrodo y teniendo en cuenta el ajuste de las ecuaciones realizado en el apartado 2, se realiza la implementación del método numérico en una aplicación informática, en este caso se utiliza la plataforma NetBeans: un entorno de desarrollo integrado, hecho principalmente para el lenguaje de programación Java.

Los resultados del cordón de soldadura que se obtienen con la simulación fueron validados con los resultados de otros autores [12] [13] [14] [15], dando una buena correlación. Este programa sirve de apoyo para la planeación y simulación del procedimiento de soldadura en estructuras metálicas. Mediante la plataforma *NetBeans*, entorno desarrollado para Java se desarrolla una aplicación que permite introducir los valores de entrada al proceso de soldeo para un rango de valores, si el valor introducido se sale del rango definido, la aplicación envía un aviso por pantalla indicando que se ha producido un error. Los datos de entrada son separación, velocidad de soldadura, tensión y velocidad del electrodo, los datos de salida son, penetración, ancho, sobreespesor y ángulo. Se desarrolla un módulo de comunicación con el programa Matlab, que recibe los datos recogidos por la aplicación creada con Java, que actúa como base de datos que posteriormente suministra a Matlab. Con esta interacción se desarrollan las superficies qué permiten estudiar la relación entre los parámetros geométricos en función de las variables de entrada, establecer máximos y mínimos, etc. Matlab crea las superficies, utilizando la función 'surf' que está definida por una malla formada con dos vectores (13), (14), (15), (16) mediante la función 'meshgrid'. Una vez que está definida la malla, se introduce la tercera variable que se corresponde con una variable de salida en forma matricial, ecuaciones (4), (5), (6), (7) que definen la altura de la superficie quedando de esta forma una superficie en 3 dimensiones que relaciona dos variables de entrada con una variable de salida.

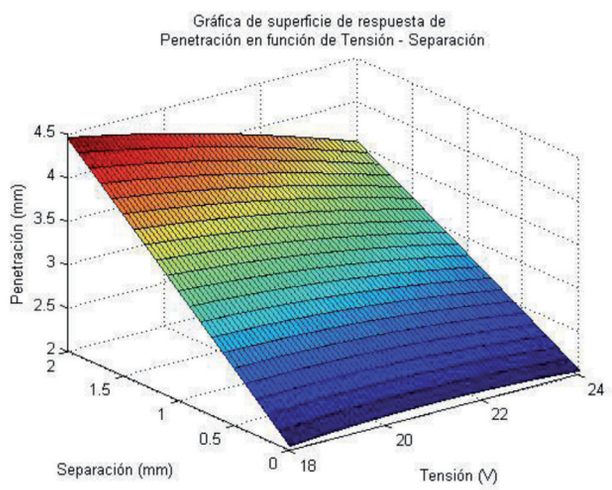


Fig. 6: Gráficas de superficie de respuesta de la penetración en función de la variación de los factores tecnológicos del proceso

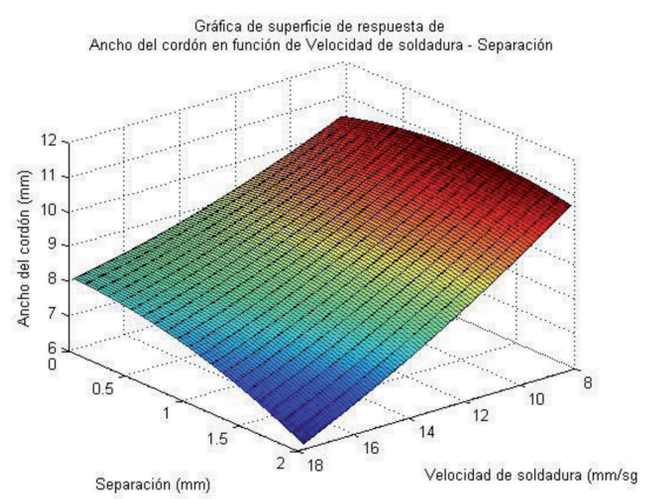
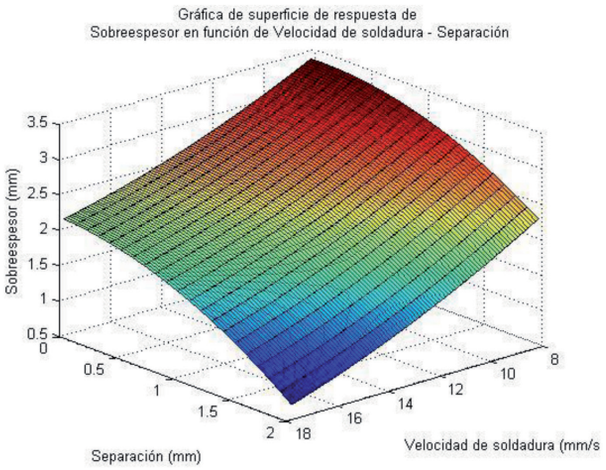
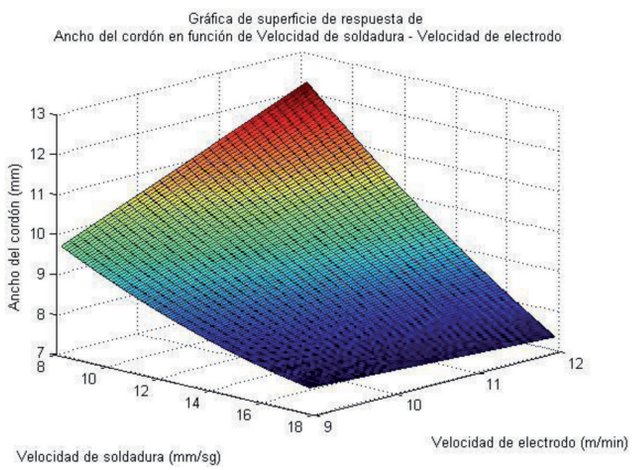
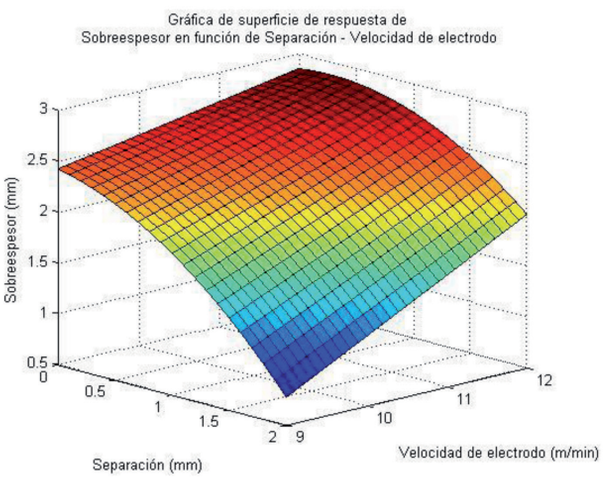


Fig. 7: Gráficas de superficie de respuesta del ancho en función de la variación de los factores tecnológicos del proceso GMAW







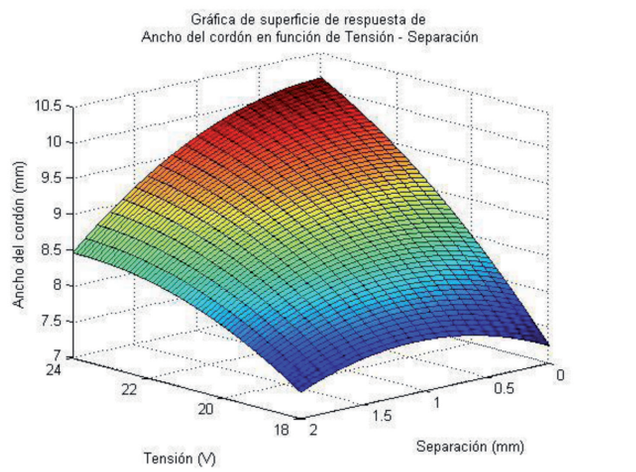


Fig. 8: Gráficas de superficie de respuesta del sobreespesor en función de la variación de los factores tecnológicos del proceso GMAW

Fig. 9: Gráficas de superficie de respuesta del ángulo del cordón en función de la variación de los factores tecnológicos del proceso GMAW

Separación: sep = 0:0.1:2 (13)
Tiempo de enfriamiento: ten = 18:0.1:24 (14)
Velocidad de soldeo: vsold= 8.2:0.1:17.8 (15)
Velocidad de electrodo: velec= 9:0.1:12 (16)

Se calculan las diferentes respuestas que representa la superficie mediante las ecuaciones (4), (5), (6) y (7).

En la Figura 5, aparece la interfaz gráfica de la aplicación informática donde se puede seleccionar el tipo de material y los parámetros de soldeo empleados en la unión. En la parte superior derecha se puede introducir los datos de entrada que se dividen en parámetros de soldadura y parámetros geométricos. En la parte inferior de la aplicación aparecen las variables de salida en MATLAB donde se obtienen las gráficas de las superficies de respuesta del proceso.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En las Figuras 6 a 9 se observan las gráficas correspondientes a las superficies de respuesta que se obtienen a partir de la aplicación informática diseñada en el entorno de *software MATLAB* para cada una de las variables de respuesta que definen la geometría del cordón de soldadura. Las gráficas obtenidas a partir de la aplicación informática realizada presentan una resolución adecuada para el análisis visual en relación a la influencia de las variables tecnológicas del proceso. Básicamente se pueden destacar dos aspectos: la gradación de color en función del valor adquirido por la variable de respuesta y la división de la superficie de respuesta en unidades cuadradas. Ambos aspectos de forma combinada facilitan la identificación visual de puntos singulares de la superficie de respuestas, esto es, puntos máximos, mínimos y puntos silla. También permiten evaluar con claridad el cambio de tendencia en el comportamiento de la variable de salida, aunque ésta no se corresponda con la existencia de los citados puntos singulares. A juicio de los autores, este resultado contrasta con las gráficas que facilitan otras aplicaciones de software en las que el análisis visual resulta más difícil [16, 17].

Aunque no es objeto del presente trabajo realizar un análisis pormenorizado de la influencia de los factores de soldadura, el análisis de las gráficas de las figuras permite establecer algunos aspectos de interés. La Figura 6 indica que conforme aumenta la velocidad de soldadura la penetración disminuye rápidamente, pero se mantiene prácticamente invariable para los mayores valores de velocidad de soldeo. Con la tensión del arco, la penetración tiende a disminuir. Ambas tendencias son esperables de acuerdo con los principios de la soldadura por arco eléctrico.

También se observa que los factores que más afectan al aumento de la penetración son la separación y la velocidad de alimentación del electrodo.

En la Figura 7 se observa que el ancho del cordón disminuye conforme aumenta la separación. El ancho también disminuye con la velocidad de soldadura observando que este factor es el más significativo.

En relación al sobreespesor, se observa que éste disminuye conforme aumenta la separación, Figura 8. El sobreespesor mínimo se obtiene empleando una velocidad de soldadura alta. La tensión tiene tendencia a disminuir el sobreespesor. Por último, una velocidad de electrodo elevada, o lo que es lo mismo, una alta intensidad, conduce a la obtención de mayores valores para el sobreespesor.

En la Figura 9 se observa que los factores más determinantes sobre el ángulo del cordón son la velocidad de soldadura, la separación y la tensión.

El análisis de las gráficas de superficie de respuesta generadas con la simulación informática confirma los resultados obtenidos en otro trabajo [16] en el que el análisis fue realizado mediante software de tipo comercial, por lo que se puede constatar que la aplicación informática desarrollada predice los parámetros geométricos de la soldadura GMAW de la aleación de aluminio 6063.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la metodología a seguir para la realización de una aplicación informática que permita la predicción de la morfología de una unión soldada en función de las variables tecnológicas que intervienen en el proceso. La aplicación se ha realizado para soldadura a tope de chapa de la aleación de aluminio 6063. La aplicación informática se basa en la modelización realizada a partir de un diseño de experimentos mediante la metodología de la superficie de respuesta. Las variables tecnológicas consideradas son la tensión de soldadura, velocidad de soldeo, velocidad de alimentación del electrodo y separación de las piezas a unir.

A nivel de usuario, se ha creado un entorno de fácil interacción. Los gráficos de superficie de respuesta obtenidos presentan una calidad de resolución que favorecen el análisis visual de la influencia de las variables que intervienen en el proceso, así como la identificación de puntos críticos en las superficies de respuesta.

Para efectuar un análisis de optimización de parámetros es necesario combinar los resultados obtenidos con aplicaciones comerciales, lo que supone una posible línea de avance en el desarrollo futuro de la aplicación realizada.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Earthquake Engineering Research Institute, Slides on the January 17, 1994, Nortridge Earthquake, Set I:An Overview.

[2] B.K. Srivastava, S.P. Tewar y J. Prakash, *Int. J. Engineer. Sci. Technol.* 2 (2010) 1.425-1.432.

[3] J.C. Mc Glone y D.B. Chadwick, *Welding Institute Report* 80 (1978) 256-263.

[4] E. Karadeniz, U. Ozsarac y C. Yildiz, *Mater. Design.* 28 (2007) 649-656.

[5] M.A. Wahab y M.J. Painter, *J. Pm. Ves. & Piping* 73 (1997) 153-159.

[6] I.S. Kim, J.S. Son, I.G. Kim, J.Y. Kim y O.S. Kim, *J. Mater. Process. Tech.* 136 (2003) 139-145.

[7] M.C. Payares, C. De Barros, P. Muñoz y Z. Cassier, *Rev. Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* 17 (1997) 5-12.

[8] V. Aleo, M.K.S. Madugula y R. Balachandar, Canadian *Journal of Civil Engineering Publisher* 33 (2006) 151-160.

[9] J. Norambuena-Contreras, D. Castro-Fresno, J.J. Del Coz, P.J. García, "Simulación numérica de una mezcla asfáltica usando MEF y diseño de experimentos", *Revista de la Construcción Volumen 10 Nº 2 (2011)* pp. 4-15.

[10] G. Menéndez, V.L. Bonavetti y E.F. Irassar, "Los diseños de experimentos y la tecnología del hormigón", *Revista de la Construcción Volumen 7 Nº 1 (2008)* pp. 94-104.

[11] R. Torres, F. Chacín, J. García y M. Ascanio, Optimización en Modelos de Superficies de Respuesta, *Rev. Fac. Agron. (Maracay)*, 2003, 29:69-83.

[12] Bingul, Z.; Cook, E. "Dynamic Modeling of GMAW Process". Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, Deitroit, Michigan, May 1999.

[13] K. L. Moore, R. Yender, J. Tyler, D. S. Naidu. "Modeling, Calibration, and Control-Theoretic Analysis of the GMAW Process". Proceedings of the American Control Conference, Philadelphia, PA, June 1998.

[14] R. S. Chandel, J. A. Goldak, A. S. Oddy "Computer Prediction of Weld Bead Shapes". Metals Technology Laboratories, Report: MTL 88-5, April 1985.

[15] K. L. Moore, D. S. Naidu. "Gas Metal Arc Welding Control – Modeling and analysis". Second World Congress of nonlinear analysis, Athens, Greece, July 1996.

[16] V. Miguel, E.J. Martínez-Conesa, F. Segura, M.C. Manjabacas, E. Abellán " Optimization of GMAW process of AA 6063-T5 aluminum alloy butt joints based on the response surface methodology and on the bead geometry" Revista de Metalurgia, 48 (5), 333-350, 2012

[17] MARTINEZ-CONESA, Eusebio José, MIGUEL-EGUIA, Valentin, GODINEZ-SEOANE, Carlos et al. PENETRATION ANALYSIS IN THE METAL STRUCTURE WELDING. DYNA, Enero 2012, vol. 87, no. 1, p.90-97. DOI: http://dx.doi.org/10.6036/4110