

# Análisis de la penetración en la soldadura de una estructura metálica



Eusebio J. Martínez-Conesa\*

Valentín Miguel-Eguía \*\*

Carlos Parra-Costa\*

Carlos Godínez-Seoane\*

Eugenio Abellán-Morales\*\*\*

Dr. Ingeniero Industrial

Dr. Ingeniero Industrial

Dr. Arquitecto

Dr. Ciencias Químicas

Ingeniero Técnico Industrial

\* Universidad Politécnica de Cartagena. Paseo Alfonso XIII, 52 – 30203 Cartagena.

Tfno: +34 968 325666. eusebio.martinez@upct.es

\*\* Universidad de Castilla La Mancha. Sistema de gestión de centros de investigación.

Campus universitario, s/n - 02071 Albacete. Tfno: +34 967 599200.

\*\*\* Instituto Politécnico de Cartagena, c/ Grecia, 56 – 30203 Cartagena. Tfno: +34 968 508469

Recibido: 24/03/2011 • Aceptado: 09/05/2011

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4110>

## Penetration analysis in the metal structure welding

### ABSTRACT

• It is highly interesting to know the response of welding equipment and to predict such response as a function of the welding variables inherent to the procedure used. The present work establishes, as a relevant variable, the penetration of carbon-steel welded unions using the GMAW procedure. The behavior of this variable is simulated by mean of response surfaces methodology as a function of gas flow, wire speed, voltage and position of the welding torch. The resulting model is experimentally tested regarding the point for which the optimum response variable is predicted.

• **Keywords:** electric arc welding, response surface methodology, penetration, welding parameters analysis.

### RESUMEN

Resulta de gran interés el conocimiento de la respuesta de un equipo de soldeo y poder predecir la misma en función de las variables de soldeo inherentes al procedimiento empleado. En el presente trabajo, se establece la penetración de uniones soldadas de acero al carbono, mediante el procedimiento GMAW, como variable de interés. Mediante la metodología de superficies de respuesta se obtiene el modelo de comportamiento de dicha variable como función del caudal de gas, velocidad de hilo, la tensión eléctrica y posición de la antorcha de soldeo. El modelo obtenido es comprobado experimentalmente para el punto en el que el modelo predice el valor óptimo de la variable respuesta.

**Palabras Clave:** soldadura por arco eléctrico, metodología de superficie de respuesta, penetración, análisis parámetros de soldeo.

### 1. INTRODUCCIÓN

El procedimiento de soldadura por arco eléctrico con gas de protección (GMAW) es un proceso de soldeo importante en el campo de las construcciones soldadas. Los parámetros de soldadura afectan a

la calidad, la productividad y al coste de la unión de estructuras metálicas por soldadura. Por tanto, el control de los parámetros de soldeo es esencial para conseguir una estructura de alta calidad [1].

El estudio de los factores geométricos del cordón de soldadura tiene una consideración importante para el diseño y fabricación de construcciones soldadas. La geometría del cordón de soldadura afecta directamente a la calidad de la soldadura y a la construcción de estructuras de acero. La penetración se usa para describir la situación en que el metal depositado y el metal base no se funden en forma integral en la raíz de la soldadura, siempre que estuviera proyectado de este modo. Puede ser ocasionada porque la cara de la raíz de la soldadura no alcance la temperatura de fusión en toda su altura, porque el metal de aportación no llegue a la raíz o también puede deberse a la falta de disolución de los óxidos e impurezas de la superficie que impiden la unión. No obstante, las dos últimas causas pueden evitarse tomando la precaución de hacer una correcta preparación de bordes y de limpiar las superficies a unir, respectivamente. Las adecuadas condiciones térmicas de la unión hay que abordarlas desde el punto

de vista de la investigación de los parámetros que afectan al arco eléctrico con el fin de evitar la penetración incompleta de la unión, que no es deseable, particularmente si la raíz de la soldadura está sometida a solicitaciones[2].

Existen diferentes parámetros de soldeo que afectan al cordón de soldadura, los más importantes son: corriente y tensión de soldeo, velocidad de soldadura, velocidad de alimentación del electrodo, ángulo de posicionamiento de la antorcha o del electrodo, distancia de la boquilla y/o del electrodo al metal base, dirección de soldeo, diámetro y composición del electrodo, caudal y composición del gas de protección. Una máxima penetración y un perfil de soldadura adecuado son indicadores de una calidad adecuada del cordón. La acción de la tensión e intensidad de corriente en el arco se resumen en la potencia del arco eléctrico como producto de ambas.

En este trabajo de investigación, los parámetros de soldeo que se estudian para obtener una penetración óptima son la velocidad de alimentación del electrodo, el caudal de gas, la tensión del equipo de soldeo en el punto de regulación considerado y la inclinación de la antorcha respecto al metal base. De todos ellos, se espera que la tensión eléctrica sea el factor con mayor efecto, ya que actúa directamente sobre el calor generado para producir la fusión del metal base. Una potencia excesiva puede conducir a descolgaduras de material y a perforaciones en el metal base, haciendo inservible la unión o montaje de la estructura correspondiente. En relación con lo anterior, una potencia muy pequeña provoca una mínima penetración y con esto resulta una unión muy débil de los perfiles estructurales.

La investigación sobre la relación entre los parámetros del proceso de soldadura y los factores geométricos del cordón se inició en la década de 1950 con un estudio del análisis de la regresión aplicado a la investigación de la geometría del cordón realizado por Lee y Raveendra [3].

Mc Glone y Chadwick [4] han informado de un análisis matemático para correlacionar las variables del proceso y la geometría del cordón para la soldadura por arco sumergido, también estudiaron la relación matemática entre las variables de soldadura y la geometría del cordón de soldadura por arco eléctrico.

Chandel [5] aplica por primera vez esta técnica para el proceso de soldadura GMAW e investiga la relación entre las variables del proceso y la geometría del cordón. Estos resultados mostraron que la potencia del arco eléctrico es la variable de mayor influencia en la geometría del cordón y que los modelos matemáticos derivados de los resultados experimentales se pueden utilizar para predecir la geometría del cordón con precisión.

Yang et al. [6] amplían su estudio a la zona de depósito de la soldadura y presentan los efectos de la polaridad de corriente, diámetro del electrodo, corriente y tensión de soldeo, velocidad de desplazamiento y tipo de fuente de energía.

Posteriormente, Karadeniz et al. [2] presentan un trabajo de investigación en función de los efectos de los parámetros

de soldadura como la potencia de soldeo y la velocidad de soldadura en relación con la penetración. Como resultados se obtienen los parámetros de soldadura adecuados para la producción de chapas de acero de espesor de 2.5mm mediante el uso de robots de soldadura por arco eléctrico.

## 2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

El *Método de Superficie de Respuesta* (M.S.R.) es una metodología de modelización y de análisis, adecuada para aplicaciones en las que una respuesta de interés es influenciada por distintas variables. Esta metodología se suele aplicar para obtener los valores de las variables de diseño que proporcionan un valor óptimo de la variable respuesta [7]. El enfoque consiste en utilizar el diseño de experimentos para determinar qué variables están influenciando 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 especiales. Este método se usa como guía para variar gradualmente los factores controlables que afectan a la respuesta de manera que se mejore el valor de ésta [8].

Aplicado a la soldadura por arco eléctrico, se puede estudiar cómo los parámetros del procedimiento de soldeo afectan a la penetración del cordón de una unión soldada y permite encontrar los valores que optimicen esta respuesta. Esto es, se trata de obtener los valores para las variables independientes que maximizan, minimizan o cumplen ciertas restricciones en la variable respuesta [9]. Concretamente, se precisa determinar los niveles de cuatro variables,  $x_1$  caudal de gas de protección,  $x_2$  velocidad de alimentación del electrodo,  $x_3$  tensión de soldeo y  $x_4$  posición de la antorcha del electrodo que maximiza la penetración del cordón en el metal base ( $y$ ). La penetración es una función del caudal de gas, la velocidad del electrodo, la tensión de soldeo y la posición de la antorcha,  $\varepsilon$  es el error experimental, tal como se indica en la Ecuación (1).

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4) + \varepsilon \quad (1)$$

La representación matemática de M.S.R. puede corresponder a diferentes modelos. Un modelo de primer orden lineal, sin interacciones o productos cruzados, conforme a lo indicado en la Ecuación (2), en la que  $x_1, x_2, \dots, x_k$  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 [10].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2)$$

Otra de las formas más sencillas de superficie de respuesta es dada por la linealidad de primer orden, indicada en la Ecuación (3).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3)$$

El modelo de respuesta cuadrático o modelo de segundo orden, corresponde al indicado en la Ecuación (4).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4)$$

En el presente trabajo de investigación se ha adoptado este último modelo, estableciendo la relación entre los factores y niveles que se consideran en la Tabla 1.

Factores	Niveles		
	-1	0	1
Caudal (l/s)	12	14	16
Velocidad electrodo (mm/s)	62.5	118.205	173.91
Tensión (V)	22	28.45	34.9
Posición Antorcha	45°	90°	135°

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

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). El diseño experimental utilizado ha sido el definido por Box-Behenken [11], tal como se indica en la Tabla 2. El intervalo de valores seleccionados para las variables corresponden a valores reales utilizados en los procedimientos de soldeo de estructuras metálicas que conducen a la estabilización del arco eléctrico [12]. En la Tabla 3 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 [13].

Factores	Replicas	Ensayos	Bloques	Puntos Centrales
4	1	28	1	4

Tabla 2: Condiciones de Box-Behnken

Ensayos	Orden	Caudal	Velocidad Electrodo	Tensión	Posición Electrodo
1	7	-1	1	1	-1
2	8	1	1	1	-1
3	12	1	1	-1	1
4	20	0	0	0	0
5	4	1	1	-1	-1
6	24	0	0	0	0
7	9	-1	-1	-1	1
8	1	-1	-1	-1	-1
9	5	-1	-1	1	-1
10	10	1	-1	-1	1
11	25	0	0	0	0
12	19	0	0	0	0
13	11	-1	1	-1	1
14	28	0	0	0	0
15	17	0	0	0	0
16	22	0	0	0	0
17	3	-1	1	-1	-1
18	15	-1	1	1	1
19	2	1	-1	-1	-1
20	16	1	1	1	1
21	6	1	-1	1	-1
22	21	0	0	0	0
23	13	-1	-1	1	1
24	23	0	0	0	0
25	14	1	-1	1	1
26	27	0	0	0	0
27	18	0	0	0	0
28	26	0	0	0	0

Tabla 3: Matriz de experimentos según MSR

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento de soldadura que se ha empleado para realizar los ensayos ha sido MAG (*Metal Active Gas*) y se ha utilizado una máquina de soldadura del tipo *Compact 387* de corriente continua con polaridad inversa, la composición del gas de protección ha sido una mezcla de 79% Argón + 21% CO<sub>2</sub>; el material de aportación utilizado es un electrodo macizo de acero al carbono del tipo ER-70S6 de diámetro de 0.8mm con una composición química indicada en la Tabla 4. La posición de soldeo empleada ha sido horizontal con bordes a tope y una separación de éstos de 2mm. Se ha realizado el cordón en pasada única en todos los casos con una velocidad de soldeo constante de 6.25mm/s. La distancia del extremo libre del electrodo al metal base ha sido de 8mm [14].

C	Mn	Si	S	P	Cu
0.072%	1.2 %	0.85 %	0.033%	0.024%	0.24%

Tabla 4: Composición química de material aportación correspondiente al electrodo ER70S6

El material base empleado es acero al carbono del tipo F-1110 de composición química la indicada en la Tabla 5. La dimensión de las probetas utilizadas es de 200mm x 50mm x 10mm. Por tanto, el espesor de la chapa utilizada es de 10mm, la longitud del cordón de soldadura es de 200mm.

C	Mn	Si	S	P
0.15%	0.5 %	0.22 %	0.034%	0.029%

Tabla 5: Composición química del acero base soldado F 1110

Por tanto, se llevan a cabo los 28 experimentos de soldadura indicados en la matriz de experimentos. A continuación, se realiza el corte del cordón de soldadura con la ayuda de una sierra mecánica tipo *Fat Modelo-220*, una vez realizado un corte perpendicular al cordón de soldadura en la mitad a una distancia de 100mm del extremo de la chapa, se mide la penetración en cada uno de los ensayos, correspondientes a condiciones de soldeo diferentes. La medición de la penetración,  $h_p$ , se efectúa mediante un proyector de perfiles con una apreciación de 1 $\mu$ m, aunque el resultado se redondea a la décima de milímetro. En la Figura 1 se representa el parámetro en una medición realizada a 10X.

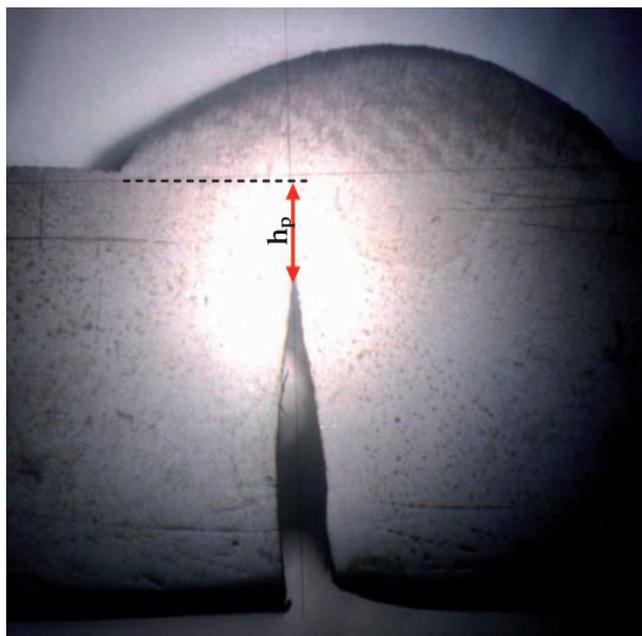


Figura 1: Determinación de la penetración del cordón de soldadura

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los valores de penetración obtenidos se indican en la Tabla 6.

$$H_p = 56,1033 - 6,658 C - 0,0381 V_E - 0,2868 V - 0,0278 P_A + 0,2085 C^2 - 0,0078 V^2 - 0,0004 P_A^2 - 0,0006 C V_E + 0,0281 C V + 0,0017 V_E V + 0,003 C P_A + 0,0019 V P_A \quad (7)$$

Ensayo	Penetración $h_p$ (mm)	Ensayo	Penetración $h_p$ (mm)	Ensayo	Penetración $h_p$ (mm)
1	3,4	11	3,4	21	4,14
2	3,6	12	3,65	22	3,86
3	2,78	13	1,97	23	2,85
4	3,63	14	3,15	24	3,55
5	3,2	15	4,6	25	3,95
6	2,35	16	3,27	26	3,31
7	2,53	17	3,45	27	4,45
8	3,8	18	3,35	28	3,21
9	2,5	19	3,68		
10	4,09	20	5,81		

Tabla 6: Valores experimentales de penetración.

El MSR se plantea en forma matricial conforme se indica en la ecuación (5). De este modo, se plantea la relación existente entre la penetración del cordón de soldeo en el metal base, 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 caudal, velocidad del electrodo, tensión y posición de la antorcha respectivamente.

$$[h_p] = [X] [\beta] \quad (5)$$

Para calcular la matriz de coeficientes  $[\beta]$  se tiene que plantear la expresión matricial indicada en la ecuación (6) 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.

$$[\beta] = [(X)^T [X]]^{-1} [X]^T [h_p] \quad (6)$$

Finalmente, resolviendo la expresión en forma matricial indicada en la Ecuación (6), se obtiene la matriz de coeficientes  $[\beta]$ . 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 la expresión correspondiente a la ecuación (7). En dicha expresión  $C$  representa el caudal de gas de protección,  $V_E$  la velocidad de alimentación del electrodo,  $V$  la tensión eléctrica de soldeo y, finalmente,  $P_A$  la posición de la antorcha del electrodo.

Se realiza un análisis de la varianza, para decidir si las variables de entrada del M.S.R. son o no estadísticamente significativas. Para ello, se lleva a cabo el procedimiento ANOVA característico. Con la aplicación del software “Sagata” para el caso particular de segundo orden, se llega a los resultados indicados en la Tabla 7.

Análisis varianza	grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Cociente-F	P-valor
Modelo	14	13,0466	0,9319	2,32	0,04
Residuo	13	5,67	0,436		
Total	27	18,27			

Tabla 7: Análisis de la varianza

Analizando la Tabla 7 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,  $C$ ,  $V_E$ ,  $T$  y  $P_A$ , 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 caso contrario, se rechaza la hipótesis nula y aceptaremos la hipótesis alternativa, es decir, se concluye que existe una relación de dependencia de las variables con influencia de los niveles experimentados para cada factor sobre los valores de la variable cuantitativa.

En el caso particular estudiado, dado que el nivel de significación, p-valor, es 0,04 se acepta la hipótesis de que no existe una relación de dependencia entre las variables  $C$ ,  $V_E$ ,  $T$  y  $P_A$ .

A partir de la Ecuación (7) y de los valores de cada uno de los factores en cada uno de sus niveles, se puede calcular el valor de la penetración correspondiente para cada uno de los experimentos considerados, según se indica en la Tabla 8. En dicha tabla, se establece en forma de error la diferencia existente entre los valores de la penetración obtenidos experimentalmente 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 8 y 18. Si se tiene en cuenta el error relativo, expresado en tanto por ciento respecto del valor experimental, se obtiene en el experimento 8, correspondiente al caudal de gas mínimo, a la tensión mínima, a la velocidad de alimentación del electrodo mínima y a la posición de la antorcha del electrodo de 45° con respecto a la vertical.

Ensayo	C	$V_E$	V	$P_A$	Penetración	Modelo	Error	Error (%)
1	12	173,91	34,9	45	3,4	3,804	0,404	11
2	16	173,91	34,9	45	3,6	4,061	0,461	11
3	16	173,91	22	135	2,78	2,481	0,299	12
4	14	173,91	28,45	90	3,63	3,644	0,014	0
5	16	173,91	22	45	3,2	3,230	0,030	1
6	14	118,205	28,45	135	2,35	2,685	0,335	12
7	12	62,5	22	135	2,53	2,570	0,040	2
8	12	62,5	22	45	3,8	3,811	0,011	0
9	12	62,5	34,9	45	2,5	3,018	0,518	17
10	16	62,5	22	135	4,09	3,921	0,169	4
11	14	118,205	28,45	90	3,4	3,619	0,219	6
12	14	62,5	28,45	90	3,65	3,293	0,357	11
13	12	173,91	22	135	1,97	1,651	0,319	19
14	14	118,205	28,45	90	3,15	3,611	0,461	13
15	12	118,205	28,45	90	4,6	4,076	0,524	13
16	14	118,205	34,9	90	3,27	3,629	0,359	10
17	12	173,91	22	45	3,45	3,752	0,302	8
18	12	173,91	34,9	135	3,35	3,341	0,009	0
19	16	62,5	22	45	3,68	3,962	0,282	7
20	16	173,91	34,9	135	5,81	4,783	1,027	21
21	16	62,5	34,9	45	4,14	3,353	0,787	23
22	14	118,205	22	90	3,86	3,332	0,528	16
23	12	62,5	34,9	135	2,85	2,315	0,535	23
24	14	118,205	28,45	45	3,55	2,922	0,628	21
25	16	62,5	34,9	135	3,95	4,248	0,298	7
26	14	118,205	28,45	90	3,31	3,622	0,312	9
27	16	118,205	28,45	90	4,45	4,863	0,413	8
28	14	118,205	28,45	90	3,21	3,628	0,418	12

Tabla 8: Análisis del error de la modelización matemática mediante MSR

El proceso de soldadura MAG que se aplica es manual. En los procesos manuales el cordón no es totalmente uniforme, como sí ocurre en la soldadura MIG/MAG automática. En particular, se ha observado que la penetración no es totalmente regular a lo largo del cordón, realizándose una estimación en las mediciones efectuadas sobre una zona similar para todos los cupones soldados. No obstante, la dispersión de valores que se pueden obtener es mayor que en el proceso automatizado. Esta dispersión está, lógicamente incluida en el error o en la distribución de errores que se obtienen en los diferentes ensayos, con valores que van desde cero hasta el 23%. En cualquier caso los autores consideran que, dado que la modelización se aplica a un proceso de soldadura manual, los valores que se obtienen son representativos de este tipo de procesos. Si se distribuye el valor del error obtenido en

los siguientes intervalos: 0-5%, 5-10%, 10-15%, 15-20%, >20%, el número de ensayos contenidos en cada intervalo es 6, 6, 9, 3, 4, respectivamente, lo que indica una distribución prácticamente rectangular o uniforme, indicativa de que el valor del error es independiente del número de ensayos realizados y, por tanto, se debe a cuestiones asignables al procedimiento manual. Finalmente, se ha comprobado que el error producido no guarda correlación con ninguna de las variables contempladas.

En la Figura 2 se muestran las superficies de respuesta de la penetración, en función de los factores que intervienen, seleccionados dos a dos, es decir, cada una de estas figuras nos indica el valor de la penetración en función de las factores utilizados en el diseño de experimentos, caudal de gas de protección, velocidad de electrodo, tensión de soldeo y posición de la antorcha.

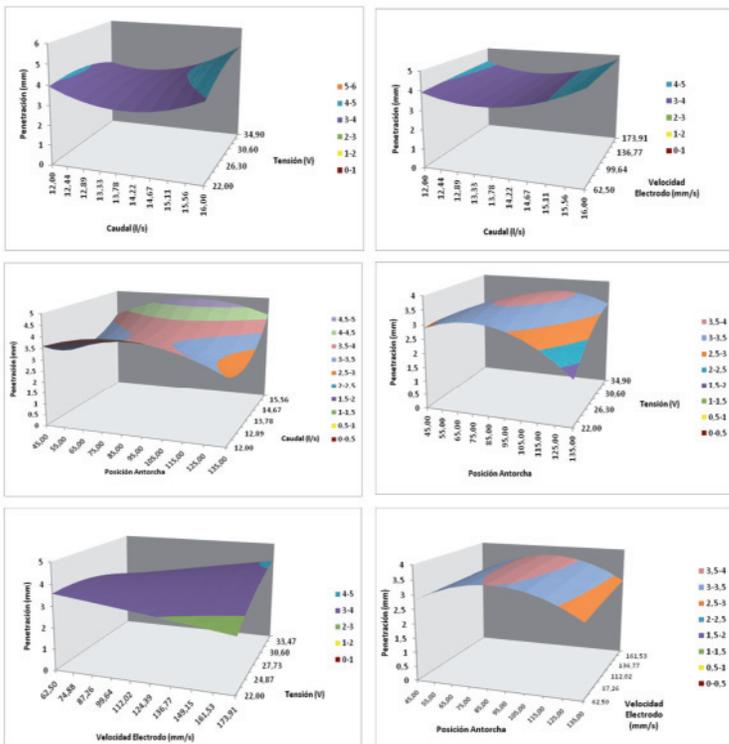


Figura 2: Análisis de la penetración mediante la metodología de superficie de respuesta

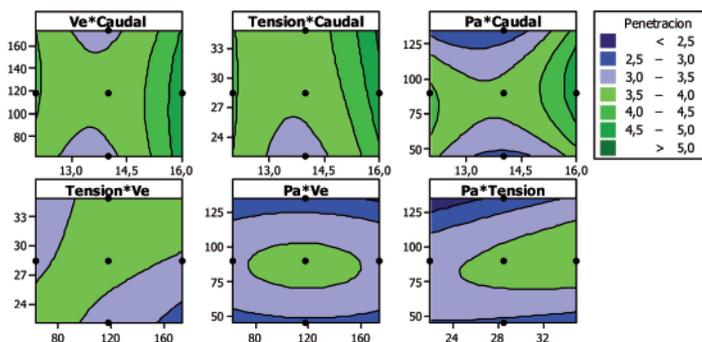


Figura 3: Gráficas de contorno de la penetración

En la Figura 3 se indican gráficas de contorno de cada una de las superficies de respuesta anteriores. Donde se muestra el valor de la penetración en función de las variables de soldadura elegidas en el diseño de experimentos.

La Figura 4 indica la relación que existe entre cada uno de los factores y el valor de la penetración, y se indica que los factores que afectan más a la penetración son el caudal y la posición de la antorcha, y el que menos afecta es la velocidad del electrodo, en el caso del caudal que indica un mínimo en 14 litros y en el caso de la posición del electrodo se indica un máximo en el valor de posición de la antorcha de 90°.

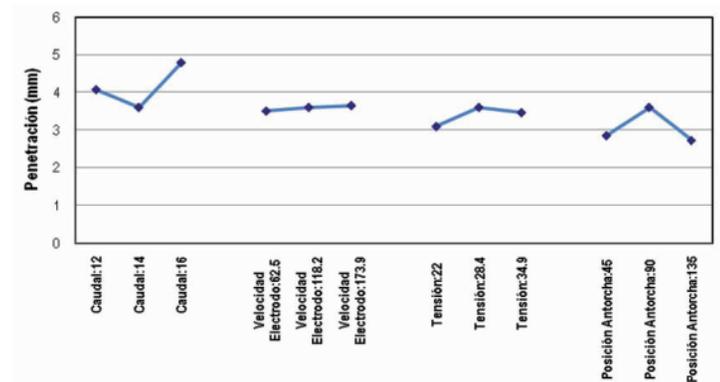


Figura 4: Penetración en función de los factores

Para probar la hipótesis de normalidad de nuestros datos se presenta la gráfica de probabilidad normal en las que se representan los cuartiles de la distribución normal (0,1) frente a los residuos, Figura 5. Como se puede observar en dicha figura, la representación sigue una tendencia casi lineal, lo que prueba la normalidad de los datos tratados [15].

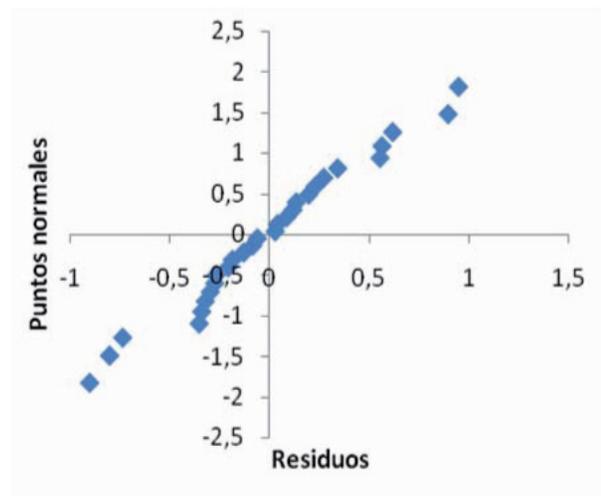


Figura 5: Demostración de la normalidad de los datos tratados

En la Figura 6 se representan los valores de los residuos frente a los valores previstos. Como se puede observar, los

puntos se distribuyen aleatoriamente alrededor del eje x, (y=0), sin seguir ningún patrón, lo que permite admitir la hipótesis de homocedasticidad: se puede afirmar que los coeficientes estimados son los mejores o eficientes.

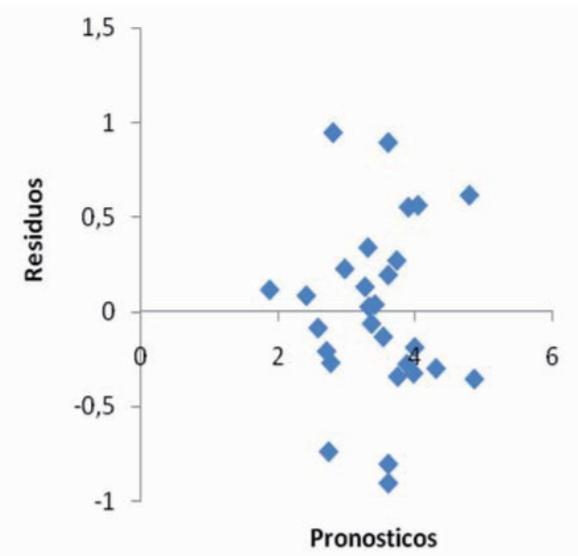


Figura 6: Representación valor del residuo versus pronóstico o valor esperado. Demostración de cumplimiento de la hipótesis de homocedasticidad

### 5. OPTIMIZACIÓN

El principal objetivo de este trabajo de investigación es optimizar la respuesta del M.S.R, que en este caso es la penetración del cordón de soldadura. Para realizar esta optimización se realizan las derivadas parciales de la ecuación (7) respecto de cada una de las variables, C, V<sub>h</sub>, V y P<sub>A</sub>, y se iguala a cero cada una de las expresiones correspondientes, tal y como se establece en las ecuaciones (8) a (11). A partir de dichas expresiones, se plantea un sistema de ecuaciones, cuya resolución conduce a los valores para las variables que se indican en la Tabla 9 [16].

$$\frac{\partial h_p}{\partial C} = -6.658 + 0.417C - 0.0006V_E + 0.0281V + 0.003P_A = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial h_p}{\partial V} = -0.2868 - 0.0156V + 0.0281C + 0.0017V_E + 0.0019P_A = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial h_p}{\partial V_E} = -0.0381 - 0.0006C + 0.0017V = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial h_p}{\partial P_A} = -0.0278 - 0.0008P_A + 0.003C + 0.0019V = 0 \quad (11)$$

Factores	Punto optimo
Caudal gas protección	16 l/s
Tensión de soldeo	34.9 V
Velocidad de alimentación electrodo	161.531 mm/s
Posición antorcha de soldeo	104.7541 °
<b>Penetración optima</b>	<b>5.297 mm</b>

Tabla 9: Valores de parámetros correspondientes al punto estacionario y valor de la penetración correspondiente según MSR

Se ha realizado un cordón de soldadura seleccionando los valores indicados en la Tabla 9 para las variables de soldeo. La penetración medida, Figura 7, fue de 4,957 mm.

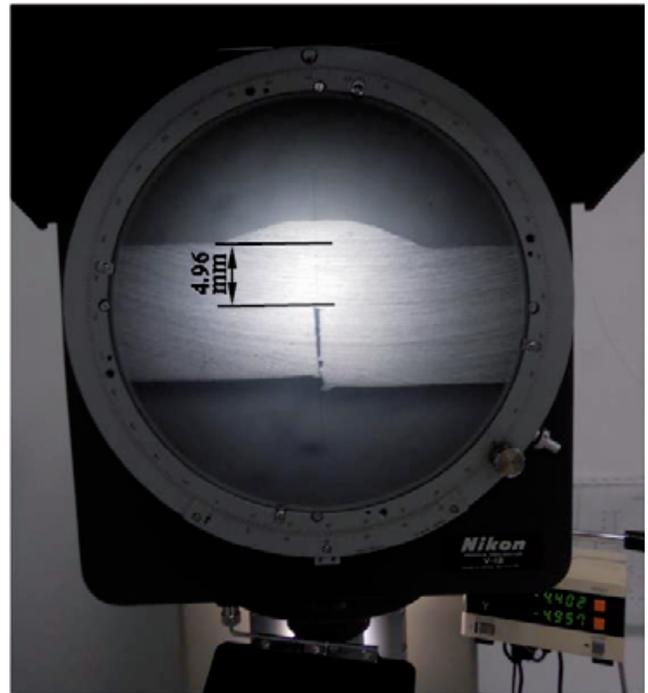


Figura 7: Medición de la penetración para valores típicos de parámetros de soldeo correspondientes al punto estacionario

Los resultados obtenidos de forma experimental y mediante MSR para el valor de penetración en condiciones típicas del punto estacionario, presentan una diferencia inferior al 6.5%, lo que se puede considerar dentro del nivel admisible de error si se tienen en cuenta los valores de error evaluados en el método MSR.

### 6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha aplicado la metodología de la superficie de respuesta al proceso de soldadura a tope de chapas soldadas de acero mediante el procedimiento MAG con desplazamiento manual de la antorcha. Se ha obtenido un modelo de comportamiento en el que la variable de salida es la penetración y las variables de entrada son el caudal de gas, la posición de la antorcha, la velocidad de alimentación del electrodo y la tensión suministrada por el equipo de soldadura.

Se ha obtenido también los valores de éstas que hacen máxima la penetración del cordón. El rango de valores experimentados para las variables se ha establecido teniendo en cuenta la estabilidad del arco en la operación, así como la correcta ejecución práctica del proceso de soldeo.

La comparación de los valores teóricos y los experimentales permiten evaluar la bondad del modelo,

aunque se han obtenido algunos valores situados entre el 15 y el 25%. Se ha determinado que los valores de error obtenidos son independientes del valor de los parámetros experimentados y que la ejecución manual de la soldadura justifica dichos valores debido a que la velocidad de desplazamiento no está perfectamente controlada. En particular, se ha comprobado el valor de penetración para los parámetros en los que ésta resulta máxima conforme al modelo, siendo el error cometido inferior al 7%.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la ayuda prestada en el desarrollo del procedimiento experimental y en la realización de los ensayos al Instituto Politécnico de Cartagena y al Departamento de Materiales e Ingeniería Metalúrgica del I.D.R. de la Universidad de Castilla-La Mancha.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Miralbes R and Castejon L. "Fatigue Design of Tanker Semi-trailers," *Dyna*, vol. 85, no. 6, pp. 480-488, Sept.2010.
- [2] Karadeniz E, Ozsarac U, and Yildiz C. "The effect of process parameters n penetration in gas metal arc welding processes," *Materials Et Design*, vol. 28, no. 2, pp. 649-656, 2007.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2005.07.014>
- [3] Lee JI and Um KW. "A prediction of welding process parameters by prediction of back-bead geometry," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 108, no. 1, pp. 106-113, 2000.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00736-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00736-6)
- [4] MCGlone J and Chadwick D. "The prediction of weld bead geometry from the procedure parameters," *Welding Institute Report*, Feb.1978.
- [5] Chandel R. "Mathematical modelling of gas metal arc weld features," 2 ed Palm Cost: 1988, pp. 109-120.
- [6] Yang L. "The effects of process variables on the weld deposit area of submerged arc welds," *Welding Journal*, vol. 72, pp. 11-8, May1993.
- [7] Montgomery DC and Myers RH. *Response surface methodology: Process and product in optimization using designed experiments*. New York: John Wiley&Sons, 1995.
- [8] Calvo AA, Senderos SZ, Puy JJA, et al. "Hydrogen Production from Biomass. Optimization of Gasification by Experimental Statistical Design," *Dyna*, vol. 83, no. 9, pp. 531-540, 2008.
- [9] Estrems-Amestoy M, Miguel-Eguía V, and Martínez-Conesa EJ. "Optimization of T 8/5 for Stainless Steels Arc Welding," *Dyna*, vol. 84, no. 3, pp. 251-258, 2009.
- [10] Allen TT. *Introduction to engineering statistics and six sigma*, 1ª ed. Ohio: Springer, 2006, pp. 286-350.

- [11] Box GEP and Wilson KB. "On the Experimental Attainment of Optimum Conditions," *Journal of the Royal Statistical Society Series B-Statistical Methodology*, vol. 13, no. 1, pp. 1-45, 1951.
- [12] Miguel V, Manjabacas MC, Coello J et al. "Electrical Evaluation of Welding Machines Based on the arc Properties. Application to SMAW, GMAW, and GTAW Processes.," USA: Amer. Inst. Physics, 2009, pp. 170-179.
- [13] Kim D, Rhee S, and Park H. "Modelling and optimization of a GMA welding process by genetic algorithm and response surface methodology," *International Journal of Production Research*, vol. 40, no. 7, pp. 1699-1711, 2002.
- [14] Shahi AS and Pandey S. "Welding current prediction in GMAW and UGMAW processes using response surface methodology," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 11, no. 3, pp. 341-346, 2006.
- [15] Myers RH, Montgomery DC, Vining GG, et al. "Response surface methodology: A retrospective and literature survey," *Journal of Quality Technology*, vol. 36, no. 1, pp. 53-77, 2004.
- [16] Amago T. "Sizing optimization using response surface method in FOA," *Review of Toyota*, vol. 37, no. 1, pp. 150-158, 2000.