

OPTIMIZATION OF WELDING JOINT IN 7010-T76 ALUMINUM ALLOY BY THE TAGUCHI METHOD

Meseguer-Valdenebro, J. L.¹; Martínez-Conesa, Eusebio²; Portolés, Antonio³

¹ Centro Universitario de la Defensa. San Javier, ² Universidad Politécnica de Cartagena, ³ Universidad Politécnica de Madrid

This research paper show a numerical study in order to optimize the welding parameters of GMAW process, determining its influence on the size of the heat affected zone and the distribution of temperatures over plates by the Taguchi method. The singular variables that interact in this process are, power, welding advance speed and profile gap to weld. In this work is showed a Taguchi method that uses L9 orthogonal matrix, with two levels for every process variable. In this paper will be working on the variables which have major influence and how to work out the minimum size of the heat affected zone , in order to optimize the joint mechanical properties. Also the cooling critical time between 400 and 300 °C ($t_{4/3}$) will be optimized.

Keywords: 7010-T76 Aluminum; Weld; $T_{4/3}$ cooling time, Taguchi, Finite element method

OPTIMIZACIÓN DE LAS UNIONES SOLDADAS EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 7010-T76 APLICANDO EL MÉTODO DE TAGUCHI

Este trabajo presenta un estudio numérico que optimiza mediante el método de Taguchi las variables de soldeo de un proceso GMAW, determinando su influencia en el tamaño de la zona afectada térmicamente y la distribución de temperaturas sobre la chapa. Las variables singulares que interactúan en el proceso son, potencia del proceso, velocidad de avance de soldeo y la separación de los perfiles a soldar. En este trabajo se presenta un método de Taguchi que utiliza una matriz ortogonal L9, con dos niveles para cada variable del proceso. Se determinará cuales son las variables que tienen una mayor influencia y como obtener el mínimo tamaño de zona afectada térmicamente, con el fin de optimizar las propiedades mecánicas de la unión. También se optimizará el tiempo crítico de enfriamiento entre 400 y 300 °C ($t_{4/3}$).

Palabras clave: Aluminio 7010-T76; Soldadura; Tiempo de enfriamiento $T_{4/3}$; Taguchi; Método de los elementos finitos

Correspondencia: Centro Universitario de la Defensa. Base Aérea de San Javier. C/ Coronel López Peña s/n, C.P. 30720. Santiago de la Ribera, Murcia

1. Introducción

Evancho y Staley fueron los pioneros en realizar un análisis del factor de enfriamiento (QFA) y que predice las propiedades físicas del aluminio en el post-enfriamiento en aleaciones de aluminio envejecidas (Evancho & Staley, 1974).

Fink y Willey realizaron un extenso estudio sobre los efectos que tiene el enfriamiento en la resistencia de las aleaciones de aluminio de la serie 7xxx, desarrollándose las curvas C-curvas o también conocidas como curvas TTP (Fink & Willey, 1948)

En los últimos años se ha dado un paso más en el estudio de las aleaciones de aluminio, relacionando los ratios de nucleación con la temperatura, esta información aporta una mayor precisión a la predicción de las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio.

La aleación de aluminio 7010-T76 esta formada principalmente por Al-Zn-Mg-Cu y es empleada en la industria aeroespacial para la producción de componentes estructurales. La propiedad que sobresale de estas aleaciones es su elevada resistencia a la tracción debido a que presenta una microestructura endurecida por precipitación, mediante un envejecimiento de una solución sólida super-saturada (Flynn & Robinson, 2004).

La precipitación en las series de la aleación 7010 se produce a través de un conjunto de etapas (Degischer et al. 1980). Después del tratamiento de solubilización la aleación se somete a un proceso de envejecimiento dual. La primera etapa es la aparición de las zonas de Guinier-Preston (GP) (Singh & Warner, 2010). Las zonas de GP ocurren en las vacantes que presenta un material debido a su enfriamiento, lo que acelera la difusión. Durante la segunda etapa del tratamiento, el crecimiento de las zonas de GP es reemplazado por precipitados de segunda especie los cuales disuelven las zonas de GP.

La calidad del metal de soldadura en las uniones soldadas de las aleaciones de aluminio está condicionada por su composición química y la velocidad de solidificación de la soldadura. Cuanto mayor es la velocidad de solidificación más fina es la estructura que se obtiene en la unión lo que se caracteriza por una mayor resistencia mecánica y una menor tendencia al agrietamiento en caliente (Su, Hua, & Wu, 2014). La velocidad de solidificación en la unión caracteriza el ciclo térmico de soldeo de la unión, lo que determina su calidad estructural (Grong, 1997), siendo crítico el tiempo de enfriamiento entre 410 y 300 °C ($t_{4/3}$).

Por otro lado cabe destacar que el ancho de la zona afectada térmicamente (ZAT) depende del aporte térmico suministrado por la fuente y de la disipación del calor del material base, siendo elevado el ratio de calor disipado para las aleaciones de aluminio (Hadadzadeh, Ghaznavi & Kokabi, 2014).

2. Diseño experimental de Taguchi

Un diseño de Taguchi, o arreglo ortogonal, es un método para diseñar experimentos que usualmente requieren sólo una fracción de las combinaciones factoriales completas. Un arreglo ortogonal significa que el diseño está equilibrado, de manera que los niveles de factores se ponderan equitativamente. Por ello, cada factor puede ser evaluado de manera independiente de todos los demás factores, de manera que el efecto de un factor no ejerce influencia en la estimación de otro factor.

Los experimentos se llevan a cabo de acuerdo con los principios del método experimental de Taguchi para determinar los efectos de los principales parámetros del proceso de soldeo.

En este trabajo, los parámetros del proceso que se mantienen constantes en cada experimento son, el caudal del gas de protección con 12 l/min, un stick-out del hilo de 1 mm de longitud y un diámetro del hilo de 1 mm. Los parámetros del proceso que varían en cada

experimento son, la velocidad de soldeo, potencia de la fuente y la separación de perfiles. En la tabla 1 se presentan los niveles del diseño experimental.

Tabla 1. Niveles del proceso MIG

	Parámetros de soldeo	Unidades	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
P	Potencia	[W]	1557	1673	1744
Vs	Velocidad de soldeo	[mm/s]	11,5	12,25	13
Sp	Separación de perfiles	[mm]	0,0	1,0	1,2

Mediante una matriz ortogonal en L9 como se define en el método de Taguchi a la matriz formada por cuatro columnas y nueve filas como aparece en la tabla 2.

Tabla 2. Matriz de experimentos

Experimento	Parámetros de proceso		
	P	Vs	Sp
	Potencia [W]	Velocidad de soldeo [mm/s]	Separación de perfiles [mm]
1	1557	11.5	0.0
2	1557	12.25	1.0
3	1557	13.0	1.2
4	1673	11.5	1.0
5	1673	12.25	1.2
6	1673	13.0	0.0
7	1744	11.5	1.2
8	1744	12.25	0.0
9	1744	13.0	1.0

El estudio experimental computacional se ha desarrollado utilizando perfiles de aluminio planos 7010-T76 de dimensiones 50 x 150 x 2 mm³. Las variables de salida del proceso son dos, la primera variable es el tiempo de enfriamiento $t_{4/3}$, tiempo que se considera crítico en la aparición de precipitados de GP y la segunda variable es el tamaño de la ZAT. Mediante el método de Taguchi se optimizan los resultados obtenidos en la simulación. Utilizando el criterio "el más pequeño es el mejor" determina que parámetros tienen una mayor influencia sobre la calidad de la unión.

3. Análisis térmico en las uniones soldadas

El análisis térmico mediante un modelo de elementos finitos en la soldadura, se fundamenta en la ecuación de transferencia del calor en un cuerpo (Zhu & Chao, 2002).

$$\rho(T) \cdot c_p(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = q + \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (1)$$

Donde, $\rho(T)$ representa la densidad del material como propiedad termodependiente, $c(T)$ el calor específico, $q(T)$ el calor generado por unidad de volumen, $K_x(T)$, $K_y(T)$, $K_z(T)$ son los coeficientes de conductividad térmica en las tres direcciones (en materiales isotrópicos este valor es el mismo en cualquier dirección), T es la temperatura y t es el tiempo. El problema térmico se rige por una ecuación diferencial no lineal, debido a que las propiedades físicas

del material son dependientes de la temperatura (Powell, Ho, & Liley, 1966; Madhusudhan R., Mukhopadhyay, & Sambasiva R., 2005).

Las pérdidas de calor por radiación y convección se tienen en cuenta mediante las siguientes relaciones (Zhu & Chao, 2002).

$$q_c = h \cdot (T - T_\infty) \quad (2)$$

$$q_r = \varepsilon \cdot s \cdot (T^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

Donde, h representa el coeficiente de convección, T_∞ la temperatura ambiente, ε la emisividad de la superficie del cuerpo y s la constante de Stefan-Boltzmann.

Tabla 3. Coeficientes de convección del aluminio (Incropera et al. 2007)

Coeficiente de convección, h [$W/m^2 \text{ } ^\circ C$]	3	6	7	8	9
Temperatura [$^\circ C$]	25	150	450	750	1650

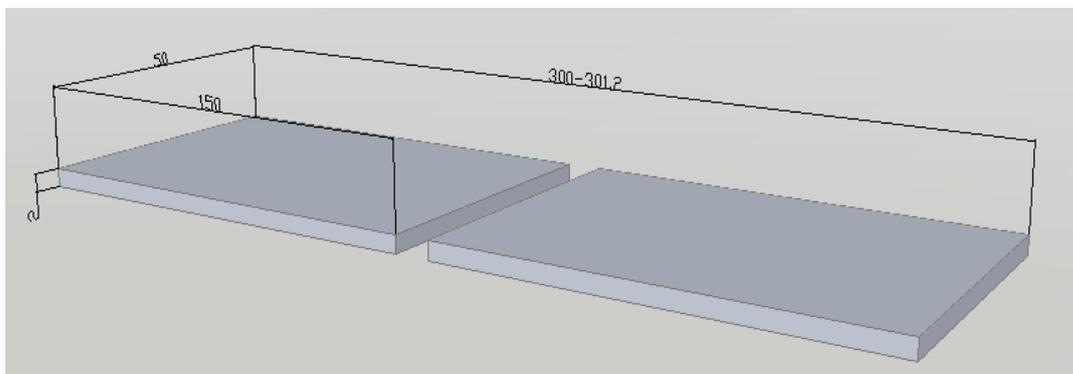
Tabla 4. Coeficientes de emisividad del aluminio (Incropera et al. 2007)

Coeficiente de emisividad del aluminio [ε]	0.8	0.5	0.14
Temperatura [$^\circ C$]	25	300	700

3.1. Modelización del ciclo térmico

El modelo empleado es el indicado en la figura 1, donde se aprecian dos chapas de longitud constante y una separación entre perfiles comprendida entre 0 y 1.2 mm.

Figura 1. Disposición de las chapas y geometría de la unión en mm

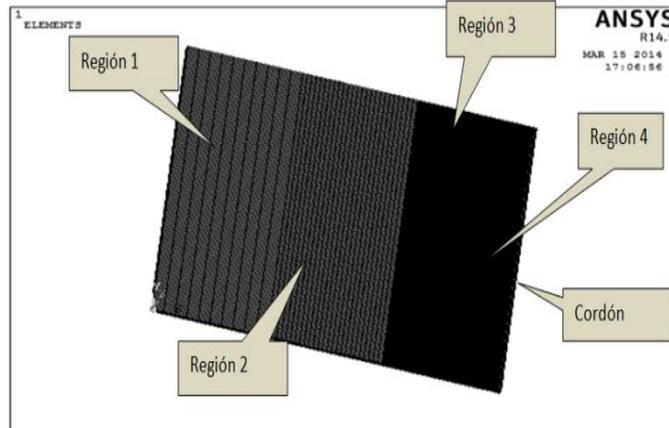


Como se comprueba, se trata de un modelo simétrico por lo que se puede analizar la mitad del modelo, es decir una sola chapa. De esta forma se reduce el coste computacional y se obtienen resultados simétricos a ambos lados para cada una de los perfiles.

3.2. Mallado de la chapa

El programa comercial de elementos finitos empleado es ANSYS R14.5. El elemento empleado para realizar la malla es 'SOL170', elemento de 8 nodos que tienen como grado de libertad la temperatura (Moraitis & Labeas, 2008). Se realiza un mallado dinámico donde va variando el tamaño desde una malla gruesa hasta una malla más fina, se puede comprobar en la figura 2 la evolución del tamaño de la malla.

Figura 2. Regiones de mallado en el perfil



La región 1 contiene 4.499 elementos; la región 2 contiene 11.249 elementos; la región 3 contiene 22.499 elementos y la región 4 contiene 33.749 elementos, se puede comprobar el aumento de la densidad de la malla conforme se aproxima a la región de la soldadura. Por último el cordón tiene 1.350 elementos.

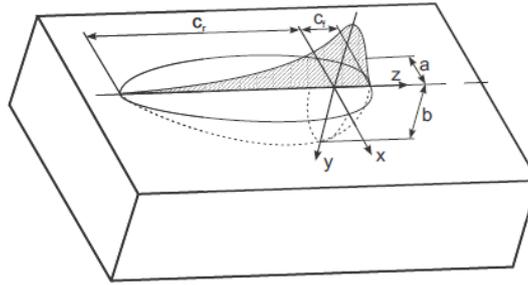
Como el cordón es función del tamaño de los parámetros de la fuente, desde el punto de vista geométrico, el tamaño de la fuente se determina mediante los parámetros de la elipse de Goldak (Goldak, Chakravarti, & Bibby, 1984). Conforme aumenta el tamaño de la fuente, aumenta la temperatura y por lo tanto aumenta el tamaño del cordón (Jia et al. 2014). Los tamaños de la fuente definidos para el modelado de la unión son los que aparecen en la tabla 5.

Tabla 5. Dimensiones de la fuente en mm y separación entre perfiles

Experimento	a	b	c	Separación
1	1.7	2	5.75	0.0
2	2.6	1.4	6.12	1.0
3	2.4	1.1	6.5	1.2
4	2	2	5.75	1.0
5	1.4	2	6.12	1.2
6	1.4	2	6.5	0.0
7	2.7	2	5.75	1.2
8	2	2	6.12	0.0
9	1.8	2	6.5	1.0

Estos valores representan las dimensiones de los semi-ejes del doble elipsoide que se representa el tamaño de la fuente en la figura 3.

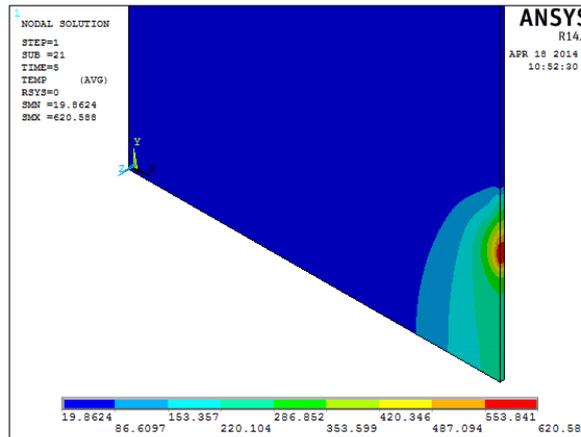
Figura 3. Dimensiones de elipse de Goldak



4. Resultados

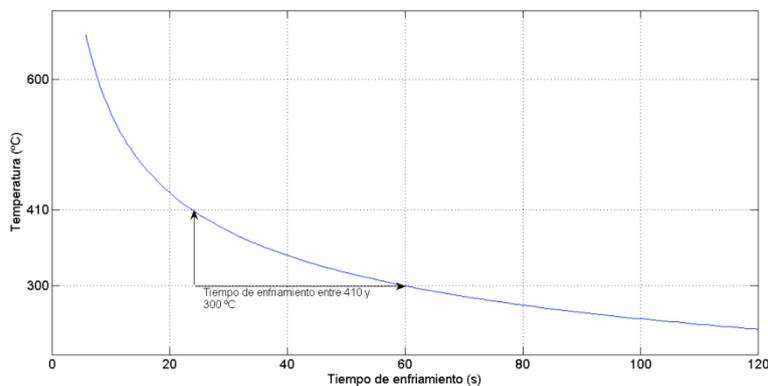
Una vez definidas las variables del problema térmico se resuelven las 9 simulaciones. En la figura 3 los contornos de la simulación 6 en el segundo 5, con una temperatura de fusión de 620 °C.

Figura 4. Modelización mediante ANSYS de la unión



En la figura 4 se observa que la distribución de temperaturas en la unión tiene forma de elipse, esta forma obedece al modelo de la elipse de Goldak, definido en el epígrafe 3.

Figura 5. Curva de enfriamiento

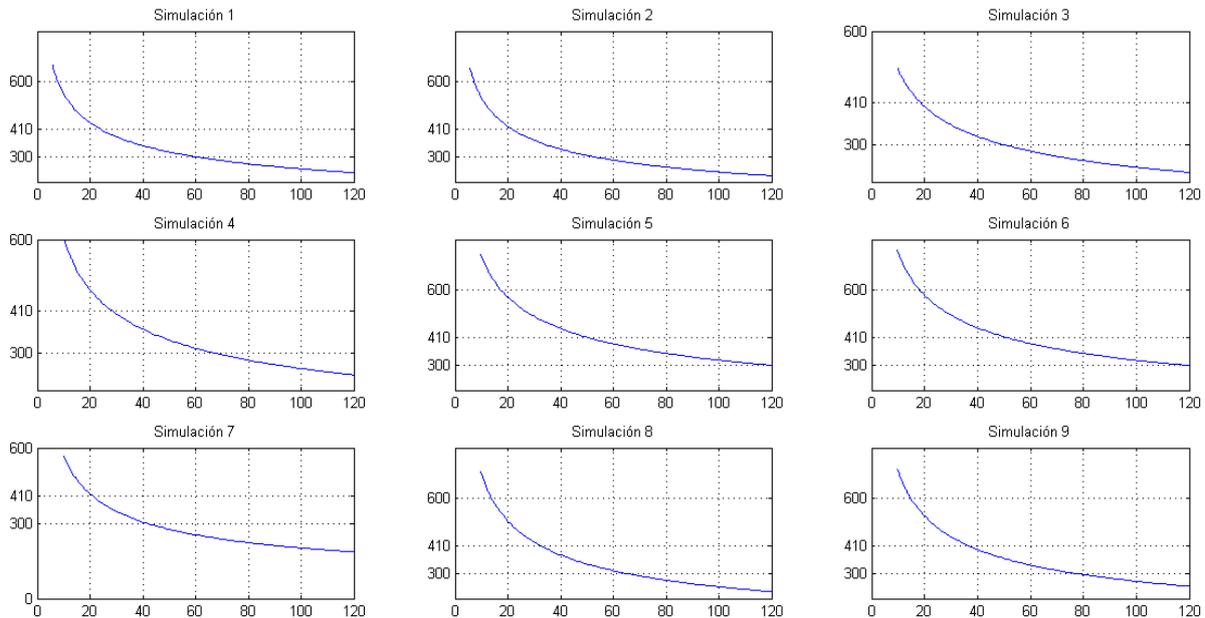


En la figura 5, aparecen representados los resultados del experimento 1. Se muestran la curva de enfriamiento. La curva de enfriamiento del aluminio, tiene un tiempo de enfriamiento característico entre 410 y 300 °C, conocido como $t_{4/3}$ y aparece representado por las flechas que aparecen en la figura, obteniéndose un tiempo de 33,5 s.

4.1. Curvas de enfriamiento

En la figura 6 se muestran las 9 curvas de enfriamiento para cada una de las 9 simulaciones, donde en el eje de abscisas se refleja el tiempo de enfriamiento en segundos y en el eje de ordenadas la temperatura en grados Celsius.

Figura 6. Curvas de enfriamiento para la aleación 7010-T76



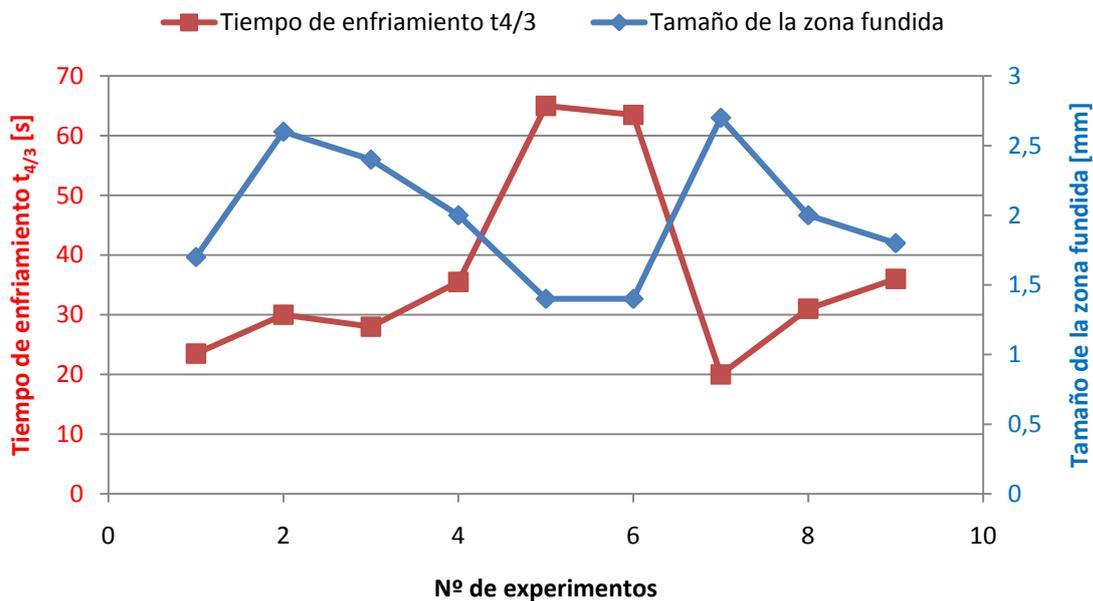
En la tabla 6 se indica el $t_{4/3}$, valor de la pendiente de cada una de las curvas y la expresión analítica para cada una de las curvas de enfriamiento.

Tabla 6. Tiempo de enfriamiento $t_{4/3}$, pendiente de enfriamiento y expresión analítica de cada una de las curvas de enfriamiento

Experimento	$t_{4/3}$ (s)	Pendiente	Curva de enfriamiento (°C)
1	33.5	-0.34	$T = 1206 \cdot t^{-0.34}$
2	30	-0.35	$T = 1200 \cdot t^{-0.35}$
3	28	-0.32	$T = 1043 \cdot t^{-0.32}$
4	35.5	-0.37	$T = 1415 \cdot t^{-0.37}$
5	65	-0.36	$T = 1678 \cdot t^{-0.36}$
6	63.49	-0.37	$T = 1754 \cdot t^{-0.37}$
7	20	-0.45	$T = 1601 \cdot t^{-0.45}$
8	31	-0.45	$T = 1961 \cdot t^{-0.45}$
9	36	-0.42	$T = 1859 \cdot t^{-0.42}$

Conforme aumenta la potencia aumenta la pendiente de la curva de enfriamiento por lo que enfría más rápidamente la unión. El tiempo de enfriamiento $t_{4/3}$ alcanza un valor máximo para el experimento 5. Esto se debe al tamaño de la zona fundida de 1.4 mm. La zona fundida presenta un tamaño reducido y por lo tanto hay una mayor concentración de calor en la zona. Este comportamiento aparece representado en la figura 7.

Figura 7. Variación del tiempo de enfriamiento entre 410 y 300 °C con el tamaño de la zona fundida

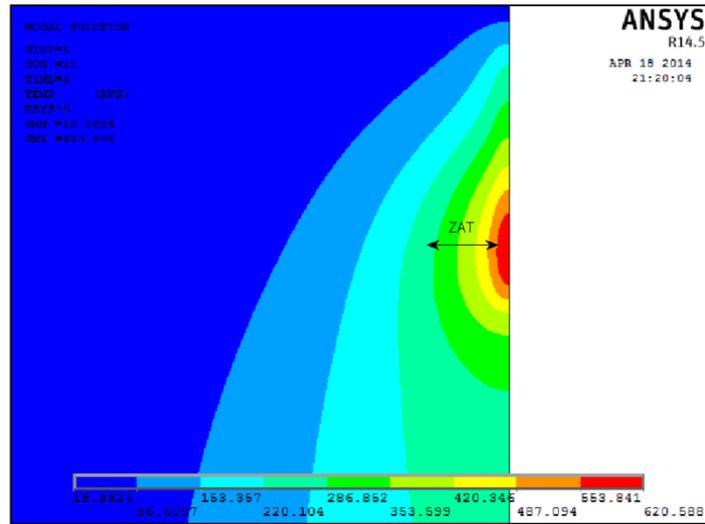


En la figura 7, se diferencian 3 regiones en función del tamaño de la zona fundida, la primera región presenta un tamaño comprendido entre 1.7 y 2.4 mm, la segunda región presenta un tamaño comprendido entre 2 y 1.4 mm y la última región presenta un tamaño comprendido entre 2.7 y 1.8 mm. Se comprueba que el tiempo de enfriamiento crítico ($t_{4/3}$) se presenta para un tamaño de zona fundida de 1.4 mm. El tamaño de la zona fundida no considera el material descolgado que sobresale del metal base, aunque se contempla en la simulación. El material de aportación que no está en contacto con el metal base se enfría por convección, por lo tanto el enfriamiento resulta más lento que si se encontrara en contacto directo con el metal base.

4.2. Zona afectada térmicamente

La ZAT es la región que se encuentra a continuación de la zona fundida y se identifica por las isotermas que están a una temperatura inferior a la de fusión pero superior a 300 °C, donde ya no hay nucleación y por lo tanto no hay recristalización.

Figura 8. Tamaño de ZAT del experimento 6



El tamaño de la ZAT es un factor importante para la determinación de la resistencia mecánica de la unión. La ZAT resulta ser la zona más blanda de la unión ya que es donde se produce la recristalización del metal y hay un cambio del tamaño de grano, por lo tanto, conocer su tamaño va a resultar importante para conocer la resistencia de la unión.

A continuación en la tabla 7 se muestran los tamaños de la ZAT para cada uno de los experimentos realizados.

Tabla 7. Tamaño de la ZAT para cada uno de los experimentos realizados

Experimento	ZAT (mm)
1	0.643
2	0.659
3	0.762
4	1.173
5	0.903
6	0.842
7	1.275
8	0.920
9	0.858

5. Optimización de Taguchi

La optimización de Taguchi determina la influencia de cada una de las variables sobre $t_{4/3}$, conforme al criterio, 'el más pequeño es el mejor'. Se observa que la variable que tiene una mayor influencia es la potencia, la siguiente es la velocidad de soldeo y por último la separación entre perfiles. El método de optimización empleado es 'Optimización de dos pasos', donde primero se reduce la variación y luego se ajusta la media que se desea como objetivo. La ecuación ajustada se muestra en la ecuación (5).

$$\frac{S}{N} = -10 \cdot \log \left(\sum (Y^2)/n \right) \quad (5)$$

La ecuación 5 es empleada para calcular el factor de ruido S/N.

Donde S/N, es la relación de ruido, Y^2 son los valores de la muestra elevadas al cuadrado y n, el tamaño de la muestra.

5.1. Optimización del tiempo de enfriamiento $t_{4/3}$

A continuación en la tabla 8 aparecen los valores las respuestas de valores medios para cada una de las variables del proceso.

Tabla 8. Tabla de respuestas para medias para el $t_{4/3}$ (s)

Nivel	P (W)	Vs (mm/s)	Sp (mm)
1	30.50	29.67	42.66
2	54.66	42.00	33.83
3	29.00	42.50	37.67

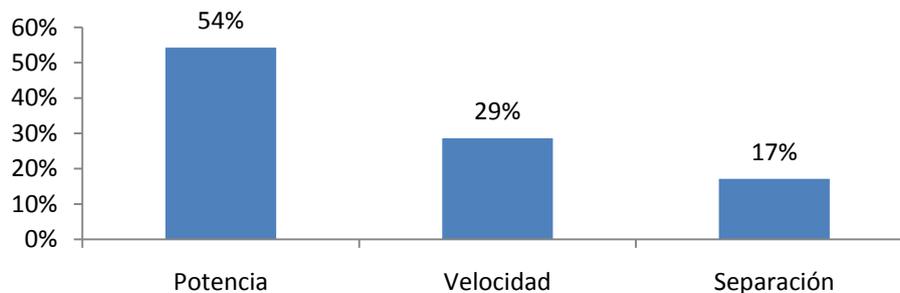
En la tabla 9, se muestran las relaciones de ruido para cada variable del proceso.

Tabla 9. Tabla de respuestas para relaciones de señal a ruido para el $t_{4/3}$ (s)

Nivel	P (W)	Vs (mm/s)	Sp (mm)
1	-29.66	-29.18	-32.13
2	-34.44	-31.88	-30.56
3	-28.99	-32.04	-30.41

En la figura 9 viene representada la influencia de cada una de las variables en la ZAT. Esta relación se obtiene a partir de los factores de ruido para cada una de las variables.

Figura 9. Influencia de cada una de las variables del proceso en tiempo de enfriamiento $t_{4/3}$



En la figura 9 se observa que la variable que presenta una mayor influencia sobre el tiempo de enfriamiento $t_{4/3}$ es la potencia, a continuación le sigue la velocidad de soldeo y la separación.

5.2. Optimización de la ZAT

En la tabla 10 aparecen los valores las respuestas de valores medios para cada una de las variables del proceso.

Tabla 10. Tabla de respuestas para medias de la ZAT (mm)

Nivel	P (W)	Vs (mm/s)	Sp (mm)
1	0.688	1.0303	0.8017
2	0.9727	0.8273	0.8967
3	1.0177	0.8207	0.9800

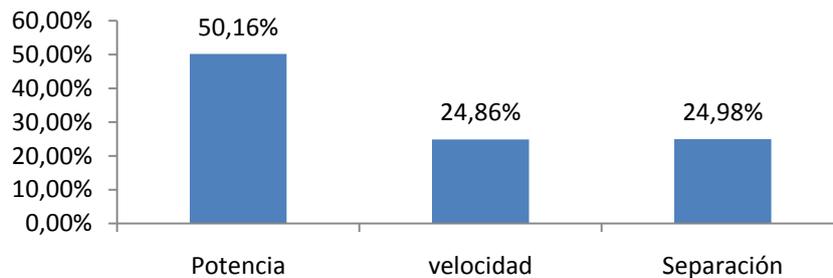
En la tabla 11, se muestran las relaciones de ruido para cada variable del proceso.

Tabla 11. Tabla de respuestas para relaciones de señal a ruido de la ZAT (mm)

Nivel	P (W)	Vs (mm/s)	Sp (mm)
1	3.27299	0.11321	2.01793
2	0.33135	1.74426	1.1888
3	-0.01857	1.72830	0.37898

En la figura 10 viene representada la influencia de cada una de las variables en la ZAT. Esta relación se obtiene a partir de los factores de ruido para cada una de las variables.

Figura 10. Influencia de cada una de las variables del proceso en el tamaño de la ZAT



En la figura 10 se observa que la variable que presenta una mayor influencia sobre el tamaño de la ZAT es la potencia, a continuación le siguen la separación y la velocidad de soldeo con una influencia parecida.

5.3. Optimización de parámetros de soldeo

5.3.1. Optimización del tiempo de enfriamiento $t_{4/3}$

El valor óptimo de los parámetros para un tiempo de enfriamiento $t_{4/3}$ son aquellos que tienen una menor relación de ruido. Estos valores se obtienen con los datos que aparecen en la tabla 10.

Parámetros óptimos del proceso de soldeo

Potencia = 1744 W ; velocidad de soldeo = 11.5 mm/s ; Separación = 1.2 mm

Estos parámetros se corresponden con el experimento 7.

La ecuación de regresión obtenida para el $t_{4/3}$ es la ecuación (6):

$$t_{4/3} = 2899.96 - 1.95 \cdot P - 224.53 \cdot v_s + 314.59 \cdot S_p + 0.15 \cdot P \cdot v_s + 0.025 \cdot P \cdot S_p - 28.98 \cdot v_s \cdot S_p \quad (6)$$

La ecuación de ajuste (6), tiene un coeficiente de determinación $R = 50 \%$.

5.3.2. Optimización de la Zona afectada térmicamente (ZAT)

El valor óptimo de los parámetros para el tamaño de la ZAT son aquellos que tienen una menor relación de ruido. Estos valores se pueden obtener con los datos que aparecen en la tabla 11.

Parámetros óptimos del proceso de soldeo

Potencia = 1557 W ; velocidad de soldeo = 12.25 mm/s ; Separación = 0 mm

Estos parámetros no se corresponden con ninguno de los experimentos propuestos. El valor mínimo de la ZAT predicho es de 0.53144 mm.

La ecuación de regresión obtenida para el tamaño de la ZAT es la ecuación (7):

$$ZAT = -35.5315 + 0.022 \cdot P + 2.831 \cdot v_s + 0.1406 \cdot S_p - 0.0017 \cdot P \cdot v_s + 7.7149 \cdot 10^{-4} \cdot P \cdot S_p - 0.1117 \cdot v_s \cdot S_p \quad (7)$$

La ecuación de ajuste (7), tiene un coeficiente de determinación $R = 93.61 \%$.

6. Conclusiones

Este trabajo ha realizado para conocer la influencia de las variables de soldeo para la aleación 7010-T76 sobre el tiempo de enfriamiento $t_{4/3}$ y el tamaño de la ZAT con el fin de poder mejorar las propiedades de la unión, pudiendo realizarse con otras aleaciones de aluminio.

Para obtener un tamaño pequeño de la ZAT, se deben emplear potencias pequeñas, la separación de bordes debe ser cero y la velocidad de soldeo debe ser intermedia.

Para obtener soldaduras de aluminio con un tiempo de enfriamiento $t_{4/3}$ pequeño, se deben emplear potencias elevadas, una separación de bordes elevada y una velocidad de soldeo pequeña.

La potencia va a resultar ser la variable más influyente tanto para el tamaño de la ZAT como para el $t_{4/3}$.

7. Referencias

- Degischer, H. P., Lacom W., Zahra A., & Zahra, Y. C. (1980). Decomposition processes in an Al-5% Zn-1% Mg ALLOY. - 2. electron microscopic investigations. *Zeitschrift Fuer Metallkunde/Materials Research and Advanced Techniques*, 71, 231–38.
- Evancho, JW, & Staley J.T. (1974). Kinetics of precipitation in aluminum-alloys during continuous cooling. *Metallurgical transactions*, 5, 43–47.
- Fink, W.L., & Willey, L.A. (1948). Quenching of 75S Aluminum Alloy. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 175, 414–27.
- Flynn, R.J., & Robinson, J.S. (2004). The Application of Advances in Quench Factor Analysis Property Prediction to the Heat Treatment of 7010 Aluminium Alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 153, 674–80.
- Goldak, J., Chakravarti A., & Bibby M. (1984). A new finite-element model for welding heat-sources. *Metallurgical Transactions B-Process Metallurgy*, 15, 299–305.
- Grong. (1997). *Metallurgical Modelling of Welding*. 2nd ed. London: The Institute of Materials.
- Hadadzadeh, Amir, Majid Mahmoudi Ghaznavi, and Amir Hossein Kokabi. (2014). The effect of gas tungsten arc welding and pulsed-gas tungsten arc welding processes' parameters on the heat affected zone-softening behavior of Strain-hardened Al-6.7Mg Alloy. *Materials & Design*, 55, 335 – 342.

- Incropera, F., DeWitt, D., Bergman, T. & Lavine, A. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th ed. USA: John Wiley & Sons.
- Jia, X., Jie X., Liu Z., Huang, S., Fan Y., & Sun, Z. (2014). "A new method to estimate heat source parameters in gas metal arc welding simulation process." *Fusion Engineering and Design*, 89, 40 – 48.
- Madhusudhan Reddy, G., A. K. Mukhopadhyay, & A. Sambasiva Rao. (2005). Influence of Scandium on Weldability of 7010 Aluminium Alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, 10, 432–41. doi:10.1179/174329305X29456.
- Moraitis, G. A., and G. N. Labeas.(2008). Residual Stress and Distortion Calculation of Laser Beam Welding for Aluminum Lap Joints. *Journal of Materials Processing Technology*, 198, 260 – 269.
- Powell, R.W., Ho, C.Y., & Liley, P.E. (1966). *Thermal Conductivity of Selected Materials*. USA: NSRDS.
- Singh, C. V., & Warner, D. H. (2010). Mechanisms of Guinier–Preston Zone Hardening in the Athermal Limit. *Acta Materialia*, 58, 5797 – 5805.
- Su, Y., Hua, X., & Wu, Y. (2014). Influence of Alloy Elements on Microstructure and Mechanical Property of Aluminum–steel Lap Joint Made by Gas Metal Arc Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 750 – 755.
- Zhu, X. K., & Chao, Y. J. (2002). Effects of Temperature-dependent Material Properties on Welding Simulation. *Computers & Structures*, 80, 967 – 976.