

Modelización del perfil de soldadura y de la cavidad de vapor en la aleación de aluminio 5182 soldada con láser^(*)

M. Pástor*, R. Sagaró** y R. Cabrera*

Resumen El presente trabajo se introduce en el desarrollo de modelos para predecir la forma de la cavidad de vapor y el perfil de la aleación de aluminio 5182 con soldadura láser. Para el procesamiento del modelo se ha empleado el paquete profesional de Elementos Finitos COSMOS/M. La modelización de la soldadura se realizó considerando como variable el grado de desenfoco del haz de láser y la distribución del flujo de calor según un modelo Gaussiano, para las condiciones de haz enfocado y de desenfoco negativo y positivo. La validez de los resultados obtenidos se comprobó mediante la comparación con los resultados obtenidos en pruebas experimentales, concluyéndose que el grado de desenfoco del haz del láser afecta notablemente la estabilidad de la cavidad de vapor y la geometría de la soldadura.

Palabras clave Aleaciones de aluminio. Láser de Nd:YAG. Soldadura. Modelización. Cavidad de vapor.

Modelling of the welded profile and the keyhole of a laser welded Al 5182 alloy

Abstract The purpose of this research is the study of the laser welding process of the aluminum alloy 5182 and the development of models by means of the COSMOS/M package, in order to predict the shape of the keyhole and the temperatures profile of the weld. Modeling has been done considering the degree of defocusing. The heat flow applied on the models was a Gauss flow, considering the condition of the focused face and the conditions of negative and positive defocusing. The validity of the models has been demonstrated comparing their results with those obtained by experimental tests. The extent of defocusing of laser beam affected the stability of the keyhole and welding geometry.

Keywords Aluminum alloys. Nd: YAG laser. Welding. Modeling. Keyhole.

1. INTRODUCCIÓN

En el campo de la soldadura se han estudiado las ventajas de la soldadura láser y sus fundamentos. Se ha comprobado que, al ser el láser un haz de alta intensidad, dirigido sobre la superficie de un metal, produce fusión y evaporación. Si la evaporación es suficientemente alta, formará una cavidad dentro del metal fundido, llamada comúnmente *Keyhole* (cavidad de vapor), lo cual permite que la potencia del haz del láser alcance la profundidad deseada en el material, para dar a la soldadura mayor penetración. Sobre la formación de la cavidad de vapor se han desarrollado diferentes modelos que ofrecen su

tamaño y distribución de temperatura, a través de la sección transversal del pozo fundido^[1].

En cuanto a materiales, uno de los que mayor interés ha despertado en el uso de este proceso es el aluminio y sus aleaciones, por su gran aplicación en sectores de automoción y aeroespacial. El fundamento de estas aplicaciones está en sus buenas propiedades mecánicas, baja densidad, resistencia a la corrosión y facilidad para ser conformado. Sin embargo, la soldabilidad del aluminio y sus aleaciones presenta algunas dificultades, debido a su alta reflectividad, alta conductividad térmica, su baja viscosidad en estado líquido y su alto coeficiente de dilatación. Muchos de estos inconvenientes dejan

(*) Trabajo recibido el día 13 de Junio de 2000 y aceptado en su forma final el día 23 de Octubre de 2001.

(*) Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Ecuador.

(**) Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Mecánica, Cuba.

de serlo con el empleo de la soldadura láser. Sin embargo la pérdida de elementos aleantes de bajo punto de ebullición, por ejemplo, el magnesio en la serie 5000 (en muchos casos se recurre a la soldadura con aportación para compensar las pérdidas), así como defectos tales como porosidad, agrietamiento en caliente y formación de cavidades, son los inconvenientes más importantes^[2].

Numerosas investigaciones indican, como factores a tener en cuenta durante la soldadura láser para controlar la penetración y calidad de la soldadura, la potencia del haz, velocidad de soldeo y el grado de desenfoque^[3 y 4]. El desarrollo de un modelo computarizado permitiría predecir, con bastante aproximación, los perfiles de la cavidad de vapor y la zona de fusión para diferentes grados de desenfoque, sin necesidad de una costosa experimentación.

2. EQUIPOS Y MATERIALES

2.1. Procedimiento e instalación experimental

Se realizaron cordones de soldadura sobre láminas de 1 mm de espesor de la aleación de aluminio 5182, empleando un láser de Nd: YAG de potencia nominal 3 KW, en modo de onda continua (cw). Debido a que la eficiencia de transmisión a través de la fibra óptica (η) ha sido estimada en, aproximadamente, un 92 % por las pérdidas ocasionadas, la potencia del haz al llegar a la superficie de las láminas se calculó en 2,76 KW. El sistema óptico de enfoque del láser empleado fue una lente f2 con una distancia focal de 77 mm. El diámetro del haz enfocado fue de 0,6 mm. La lente se montó sobre un bastidor posicionador de tornillo micrométrico, ensamblado sobre un transportador lineal tele-comando y operado simultáneamente con la señal de encendido del láser.

La densidad de potencia se controló variando la posición del foco con respecto a la superficie de la lámina. El grado de desenfoque se obtuvo moviendo el tornillo de ajuste micrométrico a intervalos de 0,25 mm desde la posición de enfoque para obtener distancias de desenfoque desde -2 a 2 mm.

En la soldadura láser en funcionamiento continuo, al incrementar la velocidad, se reduce la penetración y la anchura de la soldadura, produciéndose fuertes gradientes de temperatura que minimizan la zona afectada térmicamente. A esto se une que, al trabajar a altas potencias incidentes por encima de cierto valor de velocidad, la viscosidad del baño fundido impide un flujo correcto del material, obteniéndose irregularidades en el cor-

dón. La experiencia de los autores^[5] en trabajos anteriores, con el empleo de velocidades de barrido de 52,9–127 mm/s, ha mostrado que, para determinado valor de distancia focal, la mayor penetración de la soldadura, en modo de cavidad de vapor o Keyhole, se obtiene para la aleación 5182 a velocidades superiores, a los 108 mm/s. Sin embargo, a velocidades superiores, la penetración resultó no uniforme y la cavidad de vapor se comporta de manera inestable. Por otro lado, el trabajo experimental referido muestra que, para un grado de desenfoque determinado, el incremento de la velocidad puede provocar una transición en el modo de soldadura de cavidad de vapor a régimen de conducción. Durante esta transición la cavidad de vapor se vuelve inestable y resulta en un alto grado de porosidad. Como quiera que este trabajo no pretende valorar la influencia de la variable velocidad de avance del haz de láser, la velocidad de soldadura empleada fue de 105,8 mm/s.

El haz del láser fue orientado a 75° de inclinación con relación a la superficie de las láminas para prevenir que la radiación reflejada perjudicara la fibra óptica^[5 y 6]. Formando un conjunto con el sistema óptico se instaló una boquilla de cobre de 8 mm de diámetro interior, a través de la cual se hizo pasar un flujo de helio como gas protector de la soldadura. Esta boquilla fue orientada 30° en dirección opuesta a la dirección de movimiento de la pieza soldada (Fig.1). La calidad de la soldadura fue determinada según la norma ISO 13919-1,

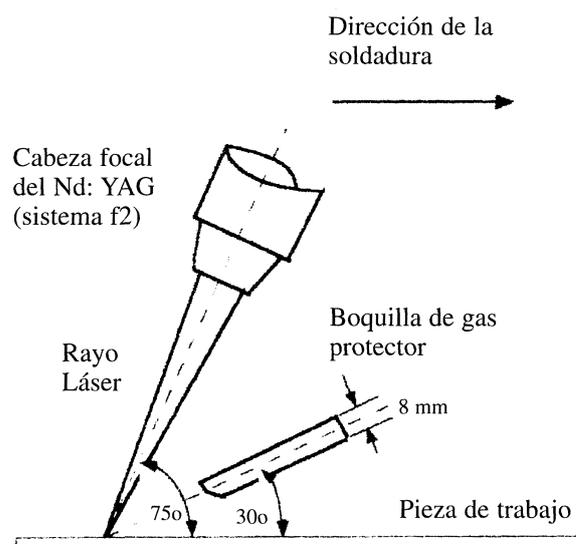


Figura 1. Disposición de la instalación experimental de Nd:YAG para la soldadura de las muestras.

Figure 1. Assembling of Nd: YAG device used for laser welding of samples.

que establece cuatro niveles de calidad: B calidad máxima, C calidad media, D calidad mediocre y E calidad inaceptable. Durante la realización de los experimentos se comprobó una calidad correspondiente a un nivel B.

2.2. Propiedades de la aleación de aluminio 5182 forjada

Las tablas I y II recogen la composición química y propiedades físico-mecánicas, respectivamente, de la aleación empleada.

2.3. Análisis metalográfico

De la observación microscópica, se determinó que la aleación base estaba constituida por determinados microconstituyentes que pueden resumirse:

- La matriz es una solución sólida α de Mg en Al con una estructura cúbica centrada en las caras.
- Las partículas claras redondeadas corresponden a una fase eutéctica β , cuya fórmula química es Al_3Mg_2 , y tienen estructura cúbica centrada en las caras.
- Las partículas oscuras son compuestos intermetálicos de Fe, Mn y Al. Los compuestos de hierro corresponden a la fórmula Al_3Fe y tienen una

estructura monoclinica muy compleja, centrada en la base. Los compuestos de Mn corresponden a $MnAl_6$ y tienen una estructura ortogonal.

Por su parte el análisis metalográfico de la zona soldada según se observa en la figura 2 puede resumirse como:

- La matriz es una solución sólida de Mg en Al con un tamaño de grano más fino que el metal base. Este tamaño, es consecuencia de un enfriamiento bastante rápido, que se produce debido al pequeño tamaño del pozo fundido de soldadura. Cuando el enfriamiento es suficientemente rápido al inicio de la solidificación se produce una gran cantidad de núcleos de cristalización que traen como resultado un grano más fino, que proporcionará al material mayor dureza y resistencia.
- Segregaciones interdendríticas (zonas oscuras) de fase eutéctica β producto de la solidificación.
- Partículas de compuestos precipitados debido al rápido enfriamiento. Si bien es cierto que la mayoría de las aleaciones aluminio-magnesio no son endurecibles por precipitación, en el caso de la aleación 5182 se presenta un endurecimiento por precipitación debido a la presencia del silicio^[7].

Tabla I. Composición química de la aleación de aluminio 5182

Table I. Chemical composition of 5182 aluminum alloy

Elementos	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti	Otros	Al
Contenido, %	0,2	0,35	0,15	0,2-0,5	4-5	0,1	0,1	0,15	93,4 - 94,7

Tabla II. Propiedades físico - mecánicas de la aleación de aluminio 5182

Table II. Physical and mechanical properties of 5182 aluminum alloy

σ_t (MPa)	σ_y (MPa)	HV	μ	E MPa	TL (K)	TS (K)	TV (K)	Cp (J/kg. K)	K (W/m K)	ρ (g/cm ³)
276	138	78	0,33	$7,03 \cdot 10^4$	911	570	2.793	904	123	2,65

Donde:

- σ_t - Resistencia a la tracción en estado recocido.
- σ_y - Límite de fluencia
- HV - Dureza Vickers.
- μ - Coeficiente de Poisson.
- E - Módulo de elasticidad.

- TL - Temperatura del *liquidus*.
- TS - Temperatura del *solidus*.
- TV - Temperatura de evaporación aproximada.
- Cp - Calor específico a 293 K.
- K - Conductividad térmica a 293 K.
- ρ - Densidad a 293 K.

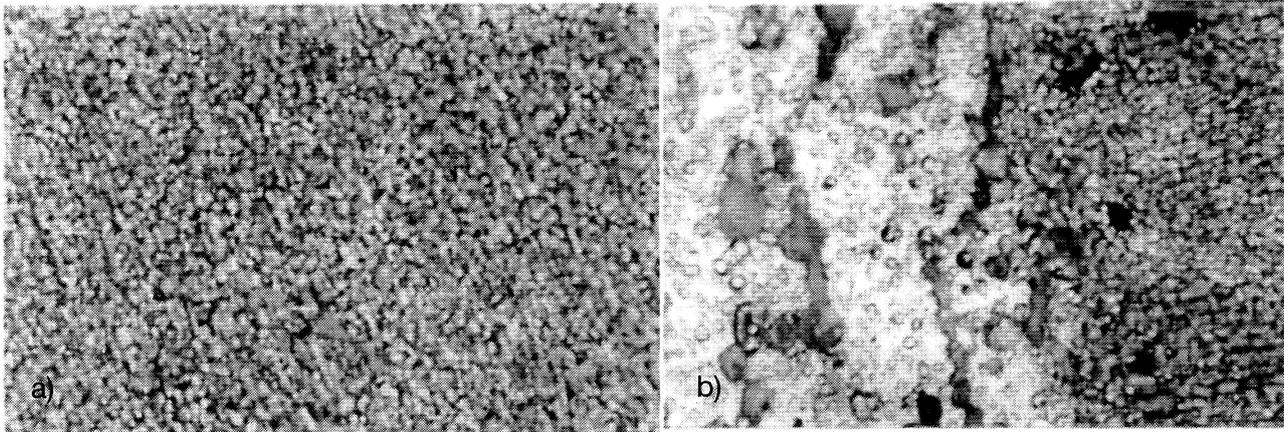


Figura 2. a) Micrografía de la zona soldada (200X). b) Micrografía de la zona de transición (200X).

Figure 2. a) Micrography of welded zone (200X). b) Micrography of transition zone (200X).

La estructura de la zona de fusión en la zona soldada está constituida por una matriz de solución sólida α con segregaciones dendríticas de AlMg y/o Al_3Mg_2 con dispersiones de precipitados de Al_6Mn y AlCr.

La figura 3 recoge el comportamiento del parámetro microdureza para los perfiles enfocados, con desenfoque negativo (-1,00 mm) y con desenfoque positivo (+1,00 mm). El ensayo se realizó según el procedimiento de la norma ASTM-E384, para una carga aplicada de 15 g.

La dureza de la zona fundida para todas las muestras fue de 95 HV por 78 HV el sustrato de la aleación base. Existe una zona (afectada térmicamente) dentro de la cual la dureza disminuye de 95 a 78 HV y que en todas las experiencias presen-

taba una extensión de, aproximadamente, 0,2 mm, que puede ser considerada mínima.

La microestructura de la zona soldada mostró, en todos los casos, una dureza mayor, como resultado del endurecimiento por precipitación que se produce en la aleación debido a la presencia del silicio y como resultado, además, de un grano más fino debido al rápido enfriamiento del pozo de soldadura.

Para determinar el perfil de soldadura de las muestras, se obtuvieron las fotografías de los perfiles de las diferentes muestras (Figs. 4 y 5) y se procedió a medir su ancho a diferentes valores de profundidad.

Como se puede observar de las figuras 4 y 5, cuando la soldadura se realiza bajo la condición del haz enfocado se obtiene un alto grado de penetración, característico de la soldadura en régimen de cavidad de vapor. Sin embargo, para altos grados de desenfoque, la profundidad de penetración es baja y la forma del pozo de soldadura es característica del régimen de conducción.

La figura 6 recoge, a manera de resumen, los resultados de las medidas del ancho del semicordón y la profundidad de penetración para las tres condiciones de enfoque evaluadas en este trabajo.

De las figuras es deducible que el tamaño del pozo de soldadura es mayor para los casos de desenfoque negativo en comparación con el desenfoque positivo, lo cual ha sido reportado por diferentes investigadores^[8]. En los casos de desenfoque positivo, el haz es divergente y la depresión mueve la superficie del líquido fuera del punto focal. Como consecuencia de esto, la densidad de potencia disminuye y se restringe la cavidad para un

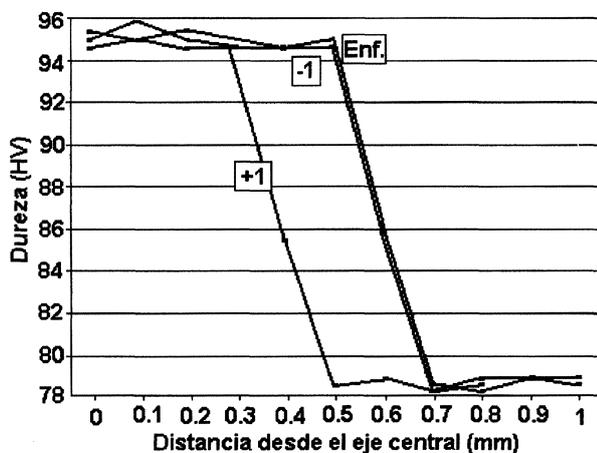


Figura 3. Comportamiento de la dureza para diferentes características de enfoque (carga aplicada 15 g).

Figure 3. Hardness behavior for different conditions of focus (load applied, 15 g).

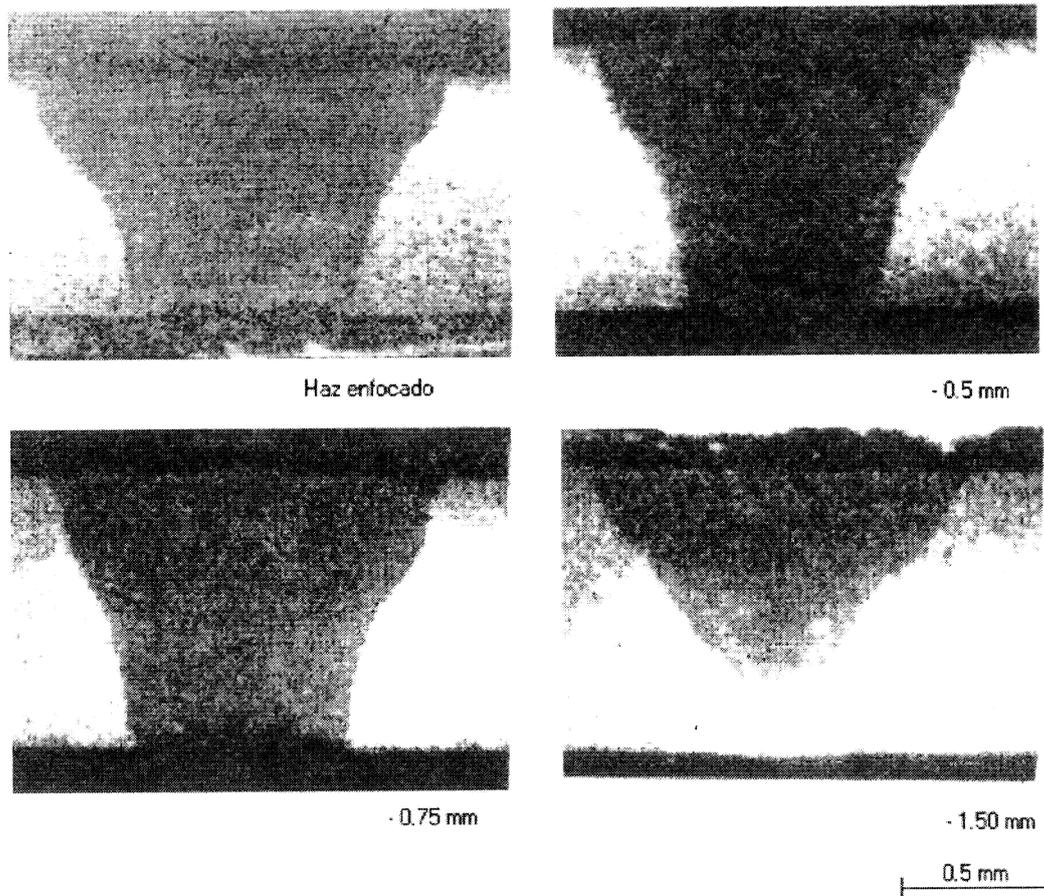


Figura 4. Perfiles de soldadura para la posición enfocada y para diferentes grados de desenfoque negativo.

Figure 4. Welding profiles for different positions (focused and negative defocused).

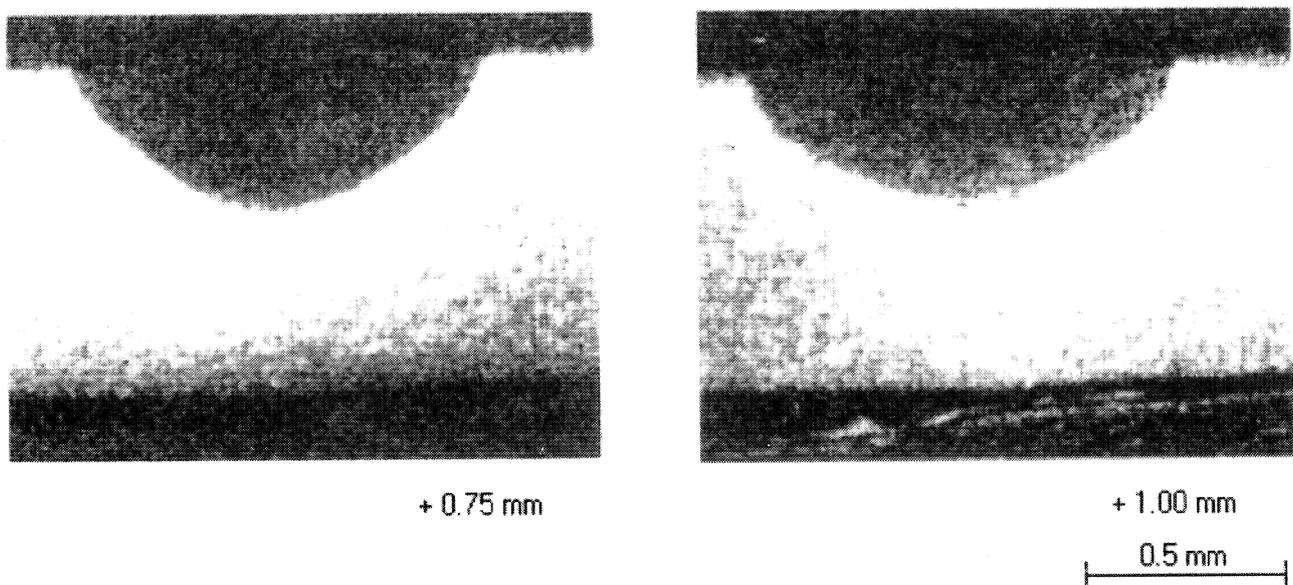


Figura 5. Perfiles de soldadura para dos grados de desenfoque positivo.

Figure 5. Welding profiles for two different positions (defocused).

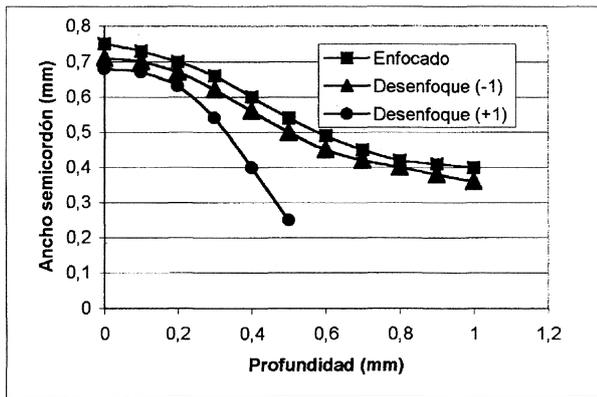


Figura 6. Perfiles experimentales de soldadura para las diferentes condiciones de enfoque.

Figure 6. Different experimental profiles for focused and defocused conditions.

posterior crecimiento. Para los grados de desenfoque negativo, sin embargo, el haz de láser es convergente y produce una mayor cavidad de vapor, generando un mayor pozo de soldadura.

3. MODELIZACION

El haz energético del láser calienta la superficie en el punto de incidencia y el calor penetra en el material por conducción térmica. Si se transfiere suficiente potencia al material, este puede fundirse en el punto de interacción y, de esta forma, producirse una soldadura. Esta condición de soldadura se conoce como régimen de conducción, ya que la energía láser es absorbida superficialmente y transmitida por conducción hacia el interior de la pieza y el calentamiento del material depende de sus propiedades de conducción y difusión del calor.

Cuando la soldadura se realiza empleando láseres de 1 Kw, de onda continua, capaces de alcanzar densidades de potencia del orden de 10^6 w/cm^2 , sobre la superficie del material se produce el fenómeno conocido como Keyhole o cavidad de vapor, en la cual la energía incidente del láser calienta la zona fundida más allá del punto de fusión formando un agujero en el metal. Esta cavidad de forma cilíndrica, llena de gas metálico evaporado, captura prácticamente el 100 % de la potencia del láser incidente. La eficiencia del proceso en estas condiciones es, por tanto, muy elevada, consiguiéndose penetraciones mucho mayores que para el caso de la soldadura por conducción^[9].

La ecuación parcial diferencial tridimensional que gobierna la transferencia de calor puede expresarse:

$$\rho c \left(\frac{\delta T}{\delta t} - v \frac{\delta T}{\delta x} \right) = \frac{\delta}{\delta x} \left(K_x \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(K_y \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(K_z \frac{\delta T}{\delta z} \right) + Q_g \quad (1)$$

donde,

- (x,y,z) – Coordenadas del sistema con relación a la fuente de calor.
- Q_g – Calor generado por unidad de volumen (W/m^3).
- K_x, K_y, K_z – Conductividad térmica en las direcciones x,y,z (W/mK).
- c – Calor específico (J/kgK).
- ρ – Densidad (Kg/m^3).
- t – Tiempo (s).
- v – Velocidad de la pieza (m/s).

El flujo de calor por convección fue determinado por:

$$qc = hc(T - T_0) \quad (2)$$

- hc - Coeficiente de transferencia de calor por convección ($\text{W/m}^2\text{K}$).
- T - Temperatura superficial (K).
- T_0 - Temperatura ambiente (K).

La determinación del coeficiente hc , se realiza mediante la ecuación de Vinokurov^[10]:

$$hc = 2,4 \cdot 10^{-3} \epsilon T^{1,61} \quad (3)$$

La dependencia de las propiedades termofísicas del material del incremento de la temperatura convierte en análisis a la solución de un problema no lineal y, por tanto, se hizo necesario la determinación de la variación de las propiedades de la aleación (K, c, ρ, ϵ) en el rango de temperaturas hasta 3.673 K.

Para este caso, la densidad de potencia dependiente del tiempo en la sección transversal de la pieza soldada está dada por una distribución Gaussiana y puede estimarse^[5]:

$$q(x, z, t) = \frac{3Q\eta}{\pi r^2} \exp\left[\frac{-3x^2}{r^2}\right] \exp\left[\frac{-3z^2}{r^2}\right] \quad (4)$$

donde:

- Q- Energía de entrada (W).
- η - Eficiencia de la absorción en el proceso de soldadura.
- r - Radio característico de la distribución del flujo de calor (mm).
- ξ - Coordenada de transformación que relaciona al sistema de coordenadas fijo y móvil. ($\xi = z + v(\tau - t)$).
- v- Velocidad del láser en m/s.
- x- Distancia desde el centro de la fuente de calor sobre la superficie soldada en la sección transversal (distribución radial del calor), mm.
- t- Tiempo después que el centro de la fuente pasa sobre la sección transversal de interés (s).

Este modelo de fuente de calor es el apropiado para simular la soldadura láser por cuanto produce perfiles de pozos de soldadura más realistas en los que, además de considerar el efecto de la transferencia de calor por conducción se considera también el efecto de la transferencia de calor por convección.

Para la elaboración de los modelos se asumió que:

- El material es isotrópico.
- La distribución del flujo de calor se considera Gaussiano.
- El flujo de fluido y la transferencia de calor en la sección transversal del pozo fundido se describe, adecuadamente, con un modelo bidimensional.
- La forma y tamaño del pozo fundido están determinados por la isoterma de fusión.
- La forma y tamaño de la cavidad de vapor está determinada por la isoterma de evaporación de la aleación^[11].
- Las pérdidas de calor por radiación al exterior son despreciables^[12].
- No se consideran los calores latentes de fusión y evaporación.
- La temperatura ambiente es de 293 K.

Otro aspecto a considerar durante la soldadura láser es la absorción de la energía láser, la cual es afectada por varios factores como son la longitud de onda, la naturaleza y estado de la superficie, la geometría de la unión y el tamaño y naturaleza del plasma presente en el pozo de soldadura. Pese a que Bramson^[13] relacionó la absorción con la resistividad y la longitud de onda de la radiación láser, cuando la densidad de potencia es alta, el material puede vaporizarse rápidamente desde el pozo de soldadura y for-

marse una cavidad de vapor, mejorando drásticamente la eficiencia de la energía absorbida, a valores incluso superiores que los predeterminados por la ecuación de Bramson. En este caso se asumieron valores de eficiencia de absorción de 16 y 24 % según las recomendaciones de otros investigadores^[14 y 15].

Para aplicar el flujo térmico se consideró que el haz de láser actúa sobre el extremo superior izquierdo del modelo, en un radio de 0,3 mm.

Para el modelo en régimen de conducción se asume que, si bien es cierto que la conducción es la forma predominante de transferencia de calor debido al desenfoque del haz, existe, además, algo de convección desde la superficie en la que incide el haz, al ser la potencia utilizada de $Q = 3$ Kw y por tanto se generan temperaturas superiores a la de evaporación de la aleación, formándose una cavidad de vapor desde cuyas paredes existirá convección hacia el resto del material.

Para los casos de las condiciones de haz enfocado y con desenfoque negativo, se asume que la convección tiene lugar, no sólo en la zona de aplicación del flujo de calor sino también lateralmente desde la superficie izquierda del modelo, debido a la mayor densidad de energía presente.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la evaluación del modelo mediante el paquete de elementos finitos COSMOS/M se representan en las figuras 7-12, para los diferentes grados de desenfoque. En cada una de las figuras aparecen delimitadas por el acotado y las isoterma correspondientes, la cavidad de vapor, el pozo de soldadura y zona afectada por el calor. Aún cuando se obtuvo una gran aproximación entre los resultados experimentales y teóricos, estos fueron procesados según la prueba de CHI-CUADRADO (X^2) para un valor de significación o fiabilidad de 0,005 y 10 grados de libertad. En todos los casos analizados, los valores calculados resultaron menores que el valor crítico de significación, por lo que puede concluirse la validez de los resultados. En las figuras 8, 10 y 12 se recogen los valores calculados para cada caso.

En el modelo obtenido para la condición del haz de láser enfocado se puede observar claramente que existe penetración completa de la soldadura en el espesor de la pieza de trabajo, lo cual se debe a que el punto focal (cintura del haz) se encuentra posicionado en la superficie principal de la pieza y la densidad de energía aportada es lo suficientemente alta para formar una cavidad de vapor que

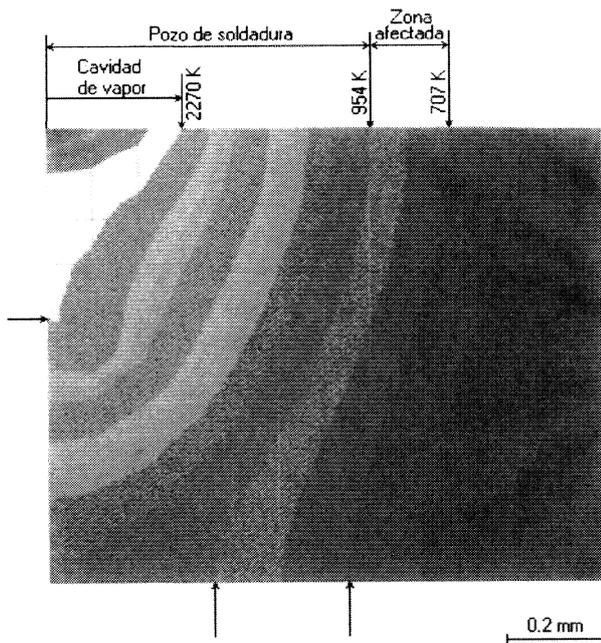


Figura 7. Resultado de la aplicación del modelo para la condición del haz enfocado.

Figure 7. Model results for focused condition.

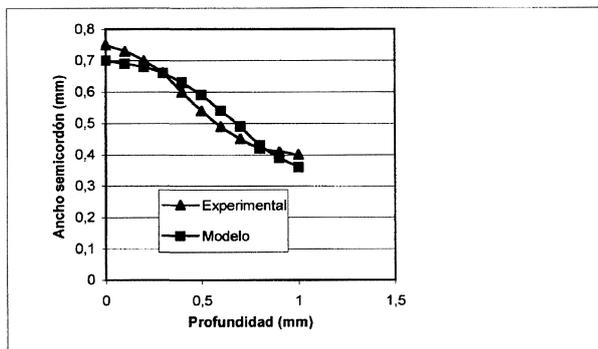


Figura 8. Perfiles experimental y de cálculo para la condición de enfoque del haz de láser ($X^2 = 0,02574$).

Figure 8. Experimental and Theoretical profiles for the focused condition of laser beam ($X^2 = 0.02574$).

permita la distribución más eficiente del calor en todo el espesor. Para este caso, la cavidad de vapor tiene una profundidad que alcanza aproximadamente el 42 % del espesor de la placa ($e = 1$ mm), o sea, una penetración de 0,42 mm y un diámetro en la parte superior de 0,3 mm. En la figura se puede observar que el semiancho del pozo de soldadura calculado por el modelo es de, aproximadamente, 0,7 mm y alcanza una penetración completa en el espesor de las placas. La figura 8 representa, comparativamente, las dimensiones del cordón de soldadura experimental y estimado por el modelo.

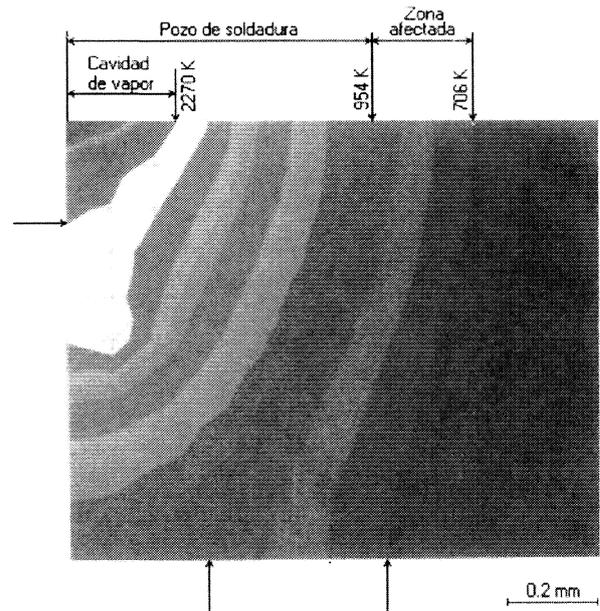


Figura 9. Condición de haz de láser con enfoque negativo (-1 mm).

Figure 9. Defocused Condition (-1 mm) of laser beam.

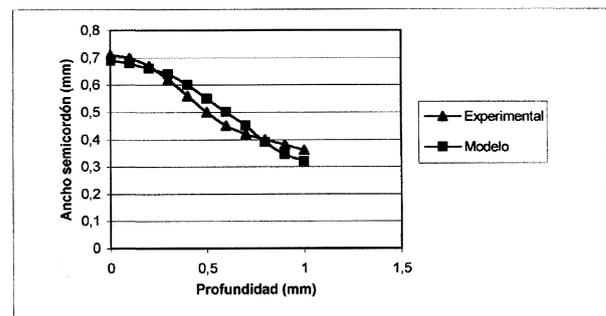


Figura 10. Dimensiones experimentales y teóricas del cordón de soldadura para la condición de desenfoque negativo (-1 mm), $X^2 = 0,02496$.

Figure 10. Experimental and theoretical welds sizes for the negative defocused condition (-1), $X^2 = 0.02496$.

Para la condición del haz desenfocado (-1 mm), la figura 8 muestra los resultados del procesamiento matemático.

Como se puede observar para esta posición del punto focal también existe penetración completa en el espesor de la pieza de trabajo. En este caso, la cintura del haz está posicionada 1 mm por debajo de la superficie de la probeta y, aunque la densidad de energía aportada es menor que en el caso anterior, permite todavía la formación de una cavidad de vapor de 0,23 mm y un semiancho del cordón de 0,25 mm. La forma geométrica cónica de la cavidad de vapor indica una transferencia de calor dominante

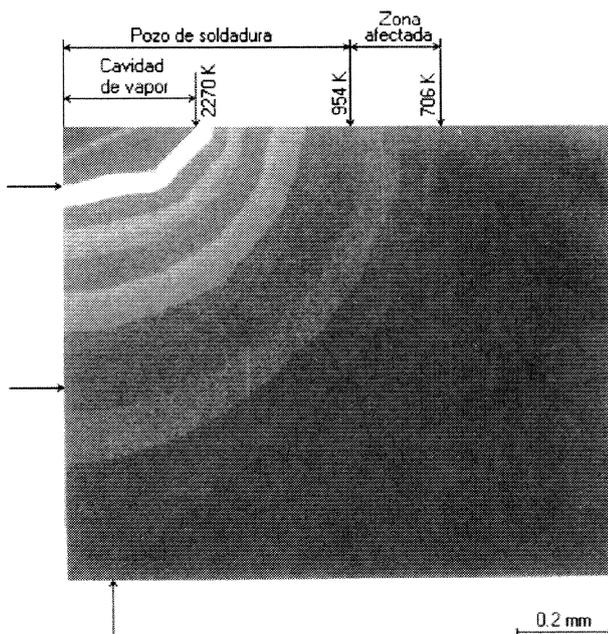


Figura 11. Resultados para la condición del haz con desenfoque positivo (+ 1.00 mm).

Figure 11. Model results for positive defocused (+ 1.00 mm).

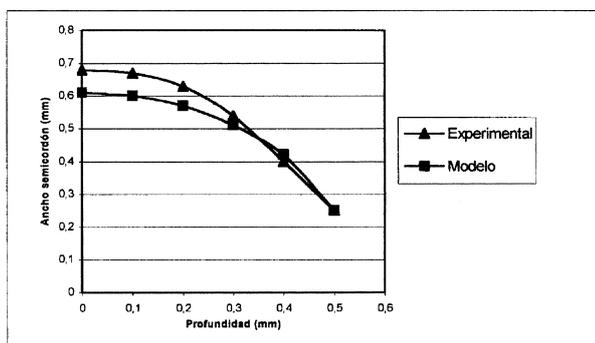


Figura 12. Dimensiones experimentales y teóricas del cordón de soldadura para la condición de desenfoque negativo (+1 mm), $X^2 = 0,02523$.

Figure 12. Experimental and theoretical welds size for the negative defocused condition (+1), $X^2 = 0.02523$.

en forma de convección. El semiancho del pozo de soldadura alcanza en este caso un valor de 0,69 mm (por 0,71 el valor experimental) y una penetración completa de la soldadura al espesor de la muestra. La figura 10 recoge, comparativamente, los resultados experimentales y teóricos para esta condición.

Por último, para el enfoque positivo del haz (+1,00 mm), no existe penetración completa de la soldadura. Esto se debe a que el punto focal está alejado 1 mm por encima de la superficie de la

muestra y la densidad de energía no es la suficiente para producir una cavidad de vapor de dimensiones adecuadas que permita una mayor profundidad de penetración. La figura 12 recoge, comparativamente, los resultados de los ensayos experimentales y calculados por el modelo.

Para este grado de desenfoque, el Keyhole sólo tiene una profundidad de 0,13 mm y un diámetro en la parte superior de 0,3 mm. El pozo de soldadura alcanza un valor de 0,61 mm en la superficie y la penetración fue de, solo, 0,5 mm. La forma de la cavidad de vapor tiene una tendencia a ser circular, lo que evidencia que la transferencia de calor dominante en este caso es la conducción.

5. CONCLUSIONES

- Con el empleo del modelo propuesto y el uso del paquete profesional COSMOS/M de Elementos Finitos se obtuvieron los modelos que permiten simular los perfiles de soldadura, Keyhole y la zona de afectación térmica, con resultados muy cercanos a la experimentación como muestran los obtenidos de los ensayos practicados. Pese a que en este caso el modelo desarrollado se ha utilizado en la predicción de las dimensiones y la geometría de la cavidad de vapor, considerando solo las condiciones de enfoque, el modelo puede ser utilizado en la evaluación de otros parámetros de operación del láser, como potencia y velocidad de barrido.
- Del análisis de los resultados se concluye que la posición del foco tiene un papel importante en la penetración de la soldadura, alcanzándose el mayor valor cuando la fuente está enfocada. Cuando el grado de desenfoque es positivo (+1,00 mm) no existe penetración completa de la soldadura. Para la posición de desenfoque negativo (-1,00 mm) la penetración es completa, pero disminuye el área de fusión con respecto a la posición enfocada.
- De igual forma el tamaño del Keyhole es mayor para la fuente enfocada. Con el desenfoque positivo disminuye su profundidad, considerablemente.
- La estructura metalográfica de las probetas soldadas presentaba en la zona del cordón un tamaño de grano más fino que el metal base y está caracterizada por una matriz sólida α , con segregaciones dendríticas y constituyentes dispersos, con una microdureza de 95 HV. A continuación, se ubica una zona afectada térmicamente con una estructura bastante similar a la

del metal base y dureza variable de 95–78 HV. La extensión de la zona de afección térmica fue de, aproximadamente, 0,2 mm.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los colaboradores de la Universidad del Estado de Pennsylvania, EE.UU., la realización del trabajo experimental y al Dr. Granda, de la Universidad de Sacramento, EE.UU., por su inestimable colaboración en la revisión de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] E. METZBOWER, *Metall. Trans. B* 24 (1993) 875-879.
- [2] J.A. ORZA, *Rev. Metal. (Madrid)* 34 (1998) 227-231.
- [3] B.Y. BLIEDNER, *Weld. J.* (2001) 31-38.
- [4] I. JONES, *et al.*, *Proc. of LAM'92*, Nagaoka, Japan, 1992, pp. 523-528.
- [5] M. PÁSTOR, *Weld. Res. supplement*, (1999) 207-215.
- [6] M.R. FREWIN, *Weld. Res. supplement*, (1999) 15-22.
- [7] M.J. CIESLAK, *Metall. Trans. B* (1988) 319-328.
- [8] Y. ARATA, *Mater. Park*, (1986) 395
- [9] A. KAPLAN, *J. Phys.* (1994) 1.805-1.814.
- [10] V. VINOKUROV, *Welding stress and distortion*, *The British library*, Boston Spa, England, 1977, pp. 118-119
- [11] R. DUCHARME, *Proc. of ICALEO*, 1992, pp. 177-186.
- [12] J. OÑORO, *Rev. Metal. (Madrid)* 34 (1998) 423-434.
- [13] M. BRAMSON, *Infrared radiation: A Handbook for Applications*, Plenum, New York, 1968.
- [14] A. RUSSO, *Weld. J.* 69 (1990) 23-29.
- [15] T. DEBROY, *Rev. Mod. Phys.* 67 (1995) 85-109.