

# Modelación del perfil de soldadura y de la cavidad de vapor en la aleación de aluminio 5182 soldada con láser.

**M. Pastor \*, R. Sagaro \*\*, R. Cabrera \*.**

\* Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Ecuador.

\*\* Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Mecánica.

Ave "Las Américas" s/n 90900, Santiago de Cuba, Cuba.

e-mail: sagaro@rsz.uo.edu.cu

## Resumen

El presente trabajo incursiona 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 lo cual ha sido empleado el paquete profesional de elementos finitos COSMOS/M. La modelación de la soldadura ha sido realizada considerando como variable el grado de desenfoque del haz de láser, considerando el flujo de calor según un modelo Gaussiano, con un coeficiente de absorción de 0.24 para la condición de haz enfocado y 0.16 para las condiciones de desenfoque negativo y positivo. La validez de los resultados obtenidos se comprobó mediante los resultados obtenidos en pruebas experimentales.

**Palabras claves:** Aleaciones de aluminio, láser de Nd:YAG.

## 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, 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 automotores y espacial. El fundamento de estas aplicaciones está en sus buenas propiedades mecánicas, pero sobre todo su peso ligero, 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 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 reportan 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]. El desarrollo de un modelo computarizado permitiría predecir con bastante aproximación los perfiles de la cavidad de vapor y la zona de fusión con diferentes grados de desenfoque, sin necesidad de una costosa experimentación.

## 2. Equipos y materiales.

### 2.1 Procedimiento e instalación experimental.

Los cordones de soldadura sobre las láminas de la aleación de aluminio 5182 de 1 mm de espesor fueron obtenidos empleando un láser de Nd: YAG de 3 KW de potencia, cw. Debido a que la eficiencia de transmisión a través de la fibra óptica ha sido estimada en aproximadamente un 92 % por las pérdidas ocasionadas, la potencia del haz al llegar a la superficie de las láminas fue calculada en 2.76 KW. El sistema óptico de

enfoque del láser empleado fue una lente f2 con una distancia focal de 77 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 fue controlada 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. La velocidad de soldadura empleada fue de 105.8 mm/seg. El haz de 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. 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 ISO 13919-1, que establece cuatro niveles de calidad: B calidad máxima, C calidad media, D calidad mediocre y E inaceptable. Durante la realización de los experimentos se comprobó una calidad correspondiente a un nivel B.

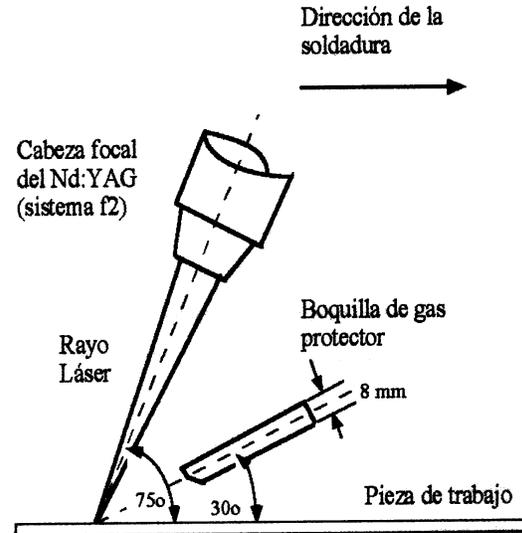


Figura.1 Instalación experimental.

## 2.2. Propiedades de la aleación de aluminio 5182 forjada.

Las tablas 1 y 2 recogen la composición química y propiedades físico – mecánicas de la aleación empleada.

Tabla 1. Composición química de la aleación de aluminio 5182.

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	El resto

Tabla 2. Propiedades físico – mecánicas.

$\sigma$ (Ksi)	$\sigma_y$ (Ksi)	HV	$\mu$	E (Ksi)	TL (°K)	TS (°K)	TV (°K)	Cp (J/kg.°K)	K (W/m²K)	$\rho$ (g/cm³)
40	19	78	0.33	1.10 <sup>4</sup>	911	570	2793	904	123	2.65

Donde:

- $\sigma$  - Resistencia a la tracción en estado recocido.
- $\sigma_y$  - Límite de fluencia
- HV - Dureza Vickers.
- $\mu$  - Coeficiente de Poisson.
- E - Módulo de elasticidad.
- TL - Temperatura del liquidus.
- TS - Temperatura del solidus.
- TV - Temperatura de vaporización aproximada.
- Cp - Calor específico a 293 °K.
- K - Conductividad térmica a 293 °K.
- $\rho$  - Densidad a 293 °K.

## 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  $\alpha$  de Mg en Al con una estructura f.c.c.
- Las partículas claras redondeadas corresponden a una fase eutéctica  $\beta$  cuya fórmula química es  $Al_3Mg_2$  y tienen estructura f.c.c.
- Las partículas oscuras son compuestos químicos de Fe, Mn y Al. Los compuestos de hierro corresponden a la fórmula  $Al_3Fe$  y tienen una estructura muy compleja monoclinica centrada en la base. Los compuestos de Mn corresponden a  $MnAl_6$  y tienen una estructura ortogonal.

En cuanto a la zona de soldadura se determinó constituida por los microconstituyentes que se observan en la figura 2 (zona soldada y de transición) y que puede resumirse en:

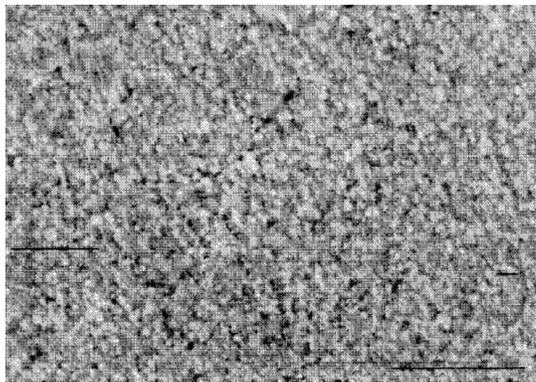
- La matriz es una solución sólida de Mg en Al con un tamaño de grano más fino que el metal base.
- Segregaciones interdendríticas (zonas oscuras) de fase eutéctica  $\beta$  producto de la solidificación.
- Partículas de compuestos precipitados debido al rápido enfriamiento.

La estructura de la zona de fusión en la zona soldada está constituida por una matriz de solución sólida  $\alpha$  con segregaciones dendríticas de AlMg y/o  $Al_3Mg_2$  (zonas

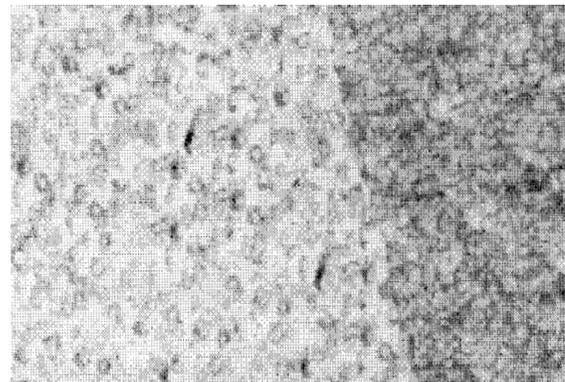
oscuras), con dispersiones de precipitados de  $Al_6Mn$  y AlCr. Si bien es cierto que la mayoría de las aleaciones aluminio–magnesio no son endurecibles por precipitación, en el caso de la aleación 5182 se presenta un endurecimiento por precipitación por la presencia del silicio.

#### 2.4. Perfiles de soldadura de las muestras soldadas con láser de Nd: YAG.

Para determinar el perfil de soldadura de las muestras, se obtuvieron las fotografías de los perfiles de las diferentes muestras (figuras 3 y 4) y se procedió a medir su ancho a diferentes valores de profundidad.

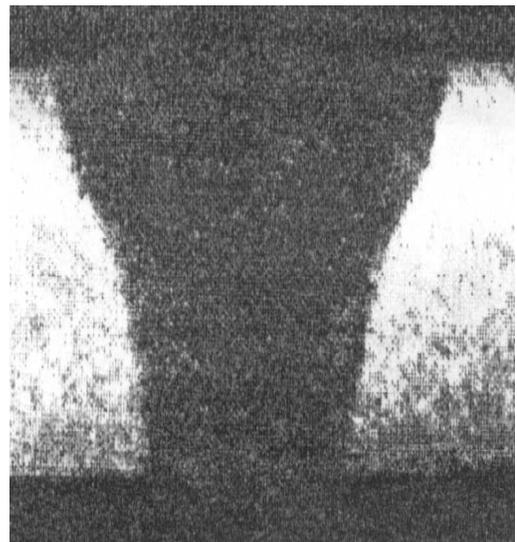


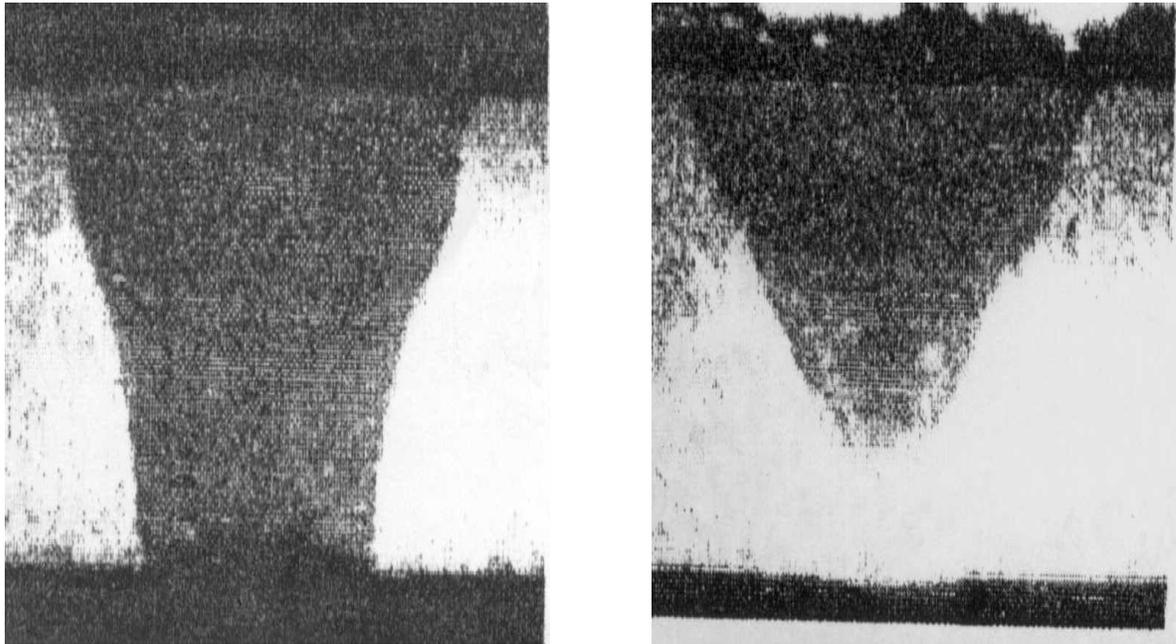
a)



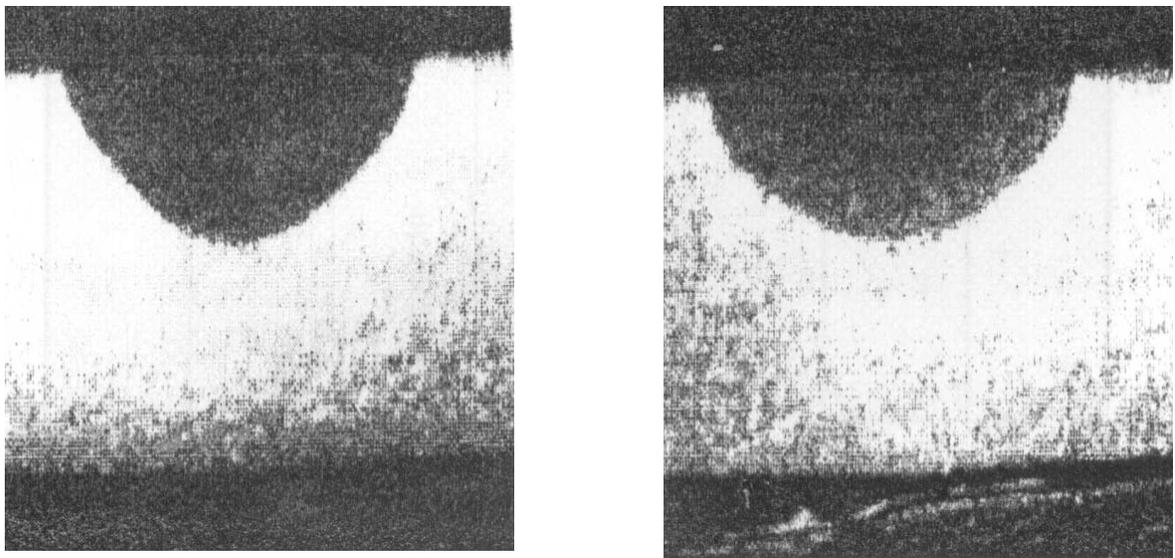
b)

**Figura.2.** a)Micrografía de la zona soldada. b)Micrografía de la zona de transición.





**Figura.3.** .Perfiles de soldadura para la posición enfocada y para diferentes grados de desenfoque negativo.



**Figura.4.** Perfiles de soldadura para dos grados de desenfoque positivo.

A cada uno de los perfiles se le practicaron mediciones de microdureza Vickers (HV), a partir del eje del cordón, a la mitad de su profundidad, hasta alcanzar el metal base libre de influencia térmica. La

figura 5 recoge el comportamiento del parámetro microdureza para los perfiles enfocados, con desenfoque negativo (- 1.00 mm) y con desenfoque positivo (+ 1.00 mm).

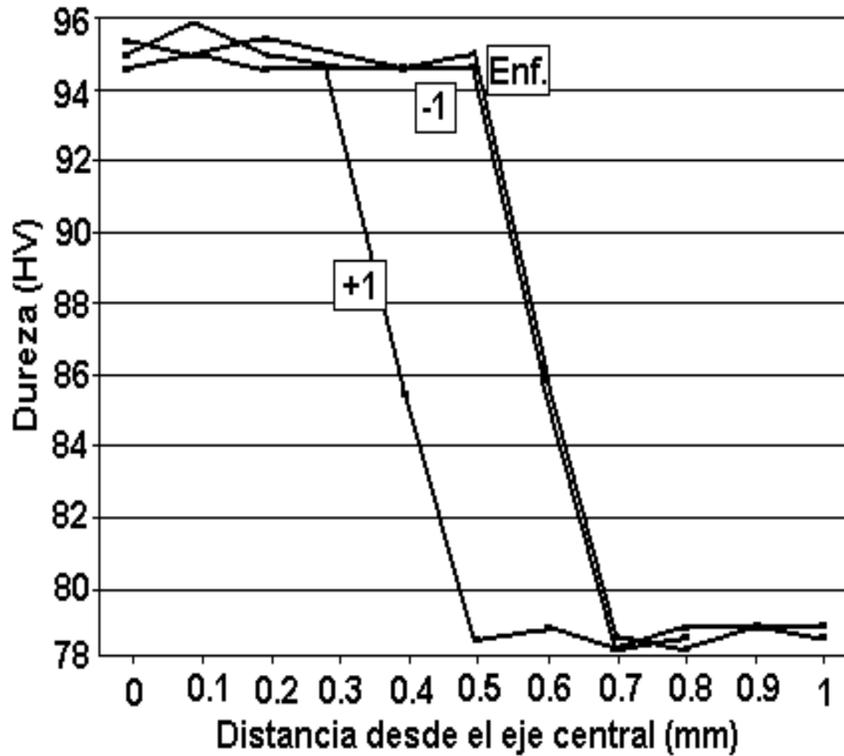


Figura.5. Comportamiento de la dureza para diferentes características de enfoque.

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 (afección térmica) dentro de la cual la dureza disminuye de 95 a 78 HV y que en todas las experiencias presentaba una extensión de aproximadamente de 0.2 mm, que puede ser considerada mínima.

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

### 3. Modelación.

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 del material, este puede ser fundido 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. En este régimen funcionan los láseres

pulsados de Nd:YAG y los láseres de CO<sub>2</sub> de baja potencia (inferior a los 500 W), siendo utilizados en la soldadura de pequeños espesores.

Sin embargo para láseres de 1 Kw o más, de onda continua capaces de alcanzar densidades de potencia del orden de 10<sup>6</sup> w/ cm<sup>2</sup> sobre la superficie del material, el fenómeno que se produce es conocido como 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 vaporizado, captura prácticamente el 100 % de la potencia del láser incidente. La eficiencia del proceso es por tanto muy elevada y se consiguen penetraciones mucho mayores que en el caso de la soldadura por conducción [4].

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 [3]:

$$q(x, z, t) = \frac{3Qh}{pr^2} \exp\left[\frac{-3x^2}{r^2}\right] \exp\left[\frac{-3z^2}{r^2}\right] \quad (1)$$

Donde:

Q - Energía de entrada.

$\eta$  - Eficiencia de la adsorción en el proceso de soldadura.

$R$  - Radio característico de la distribución del flujo de calor.

$\xi$ - Coordenada de transformación que relaciona al sistema de coordenadas fijo y móvil.

$$(\xi = z + v(\tau - t))$$

$v$ - Velocidad del láser en m/seg.

$x$ - Distancia desde el centro de la fuente de calor sobre la superficie soldada en la sección transversal.

$t$ - Tiempo después que el centro de la fuente pasa sobre la sección transversal de interés.

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 a más 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 es adecuadamente descrito por 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 vaporización de la aleación [5].
- Las pérdidas de calor por radiación al exterior son despreciables [6].
- No se consideran los calores latentes de fusión y vaporización.
- La temperatura ambiente es de 293 °K.

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 3 kW y por tanto se generan temperaturas superiores a la de vaporización 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 a través del paquete COSMOS/M se representan en las figuras 6, 7 y 8 para los diferentes grados de desenfoque.

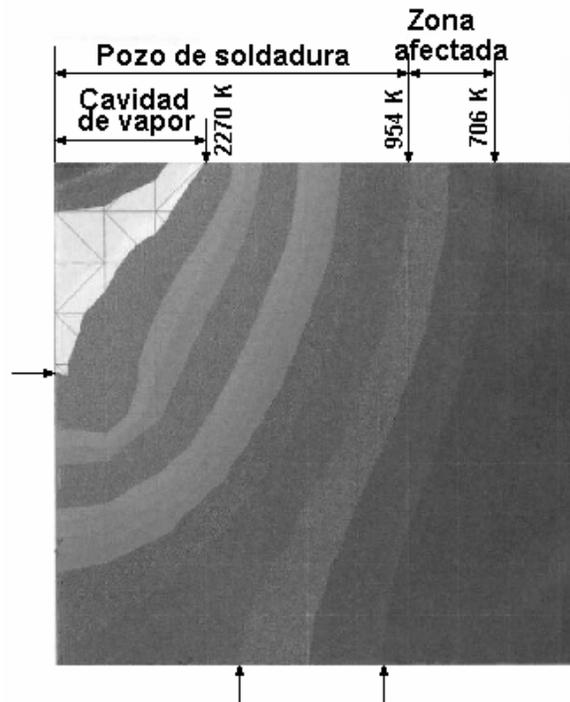


Figura.6 Resultado de la aplicación del modelo para la condición del haz enfocado.

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 en la superficie principal de la pieza y la densidad de energía aportada es lo suficientemente alta para formar una cavidad de vapor que 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 y un diámetro en la parte superior de 0.3 mm.

Para la condición del haz desenfoque (-1 mm), la figura 7 muestra los resultados del procesamiento matemático.

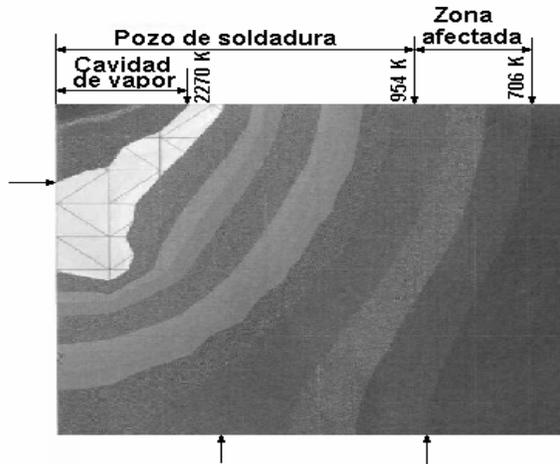


Figura.7. Condición de haz de láser con enfoque negativo (-1 mm).

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 las dimensiones necesarias (23 % y un diámetro en la parte superior de 0.25 mm). La forma geométrica cónica de la cavidad de vapor indica una transferencia de calor dominante en forma de convección.

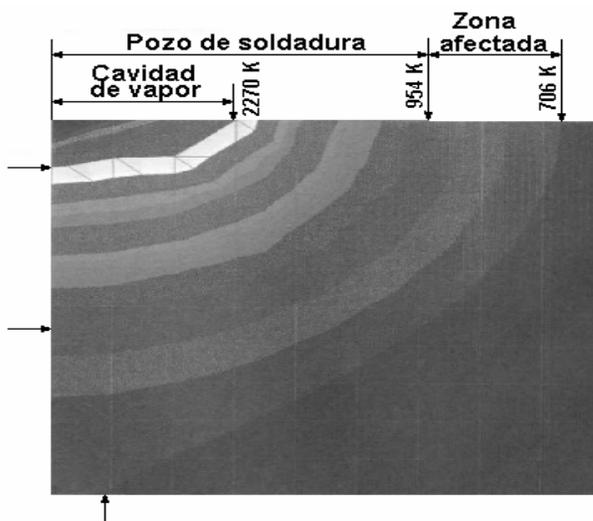


Figura. 8. Resultados para la condición del haz con desenfocado positivo (+ 1.00 mm).

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.

Para este grado de desenfoco el keyhole sólo tiene una profundidad del 13 % y un diámetro en la parte superior de 0.3 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 MEF y el uso del paquete profesional COSMOS/M se obtuvieron los modelos que permiten simular los perfiles de soldadura, keyhole y la zona de afección térmica con resultados muy cercanos a la experimentación como muestran los resultados de los ensayos practicados.
- 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 desenfoco es positivo (+ 1.00 mm) no existe penetración completa de la soldadura. Para la posición de desenfoco 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 desenfoco 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  $\alpha$ , 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.

## 6. Referencias bibliográficas.

1. Metzbow, E. "Keyhole Formation. Metallurgical Transactions B", volume 24 B, October 1993, p 875-879.
2. Orza, J.A. "Soldadura de Aleaciones de Aluminio con láseres de Nd:YAG de alta potencia". Revista Metalurgia 34 (2), 1998, p 227-231.
3. Pástor, M. "Pure formation and composition change during continuous wave Nd:YAG laser welding of aluminum alloys 5182 and 5754." Pennsylvanis State University, 1998, p 115.

4. Kaplan, A. "A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile". Journal of Physics, 1994, p 1805-1814.
5. Ducharme, R. "An integrated mathematical model of the keyhole and weld pool in the laser welding of thin metals sheets". ICALEO, 1992, p 177-186.
6. Oñoro, J " Modelación de la energía absorbida en la fusión de un metal por un haz láser". Revista Metalurgia 34 (5), 1998, p 423-434.

#### **AGRADECIMIENTO.**

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

---

## **Welding profile and steam cavity modelation in aluminum 5182 alloy welded with laser.**

### **Abstract**

The purpose of this research is the study of laser welding process for the 5182 aluminum alloys and the development of models by means of the COSMOS/M package, in order to predict the shape of the steam cavity and the welding temperatures profile. Modeling has been done considering the degree of defocusing. The heat flow applied on the models was a Gauss flow, with a coefficient of absorption of 0.24 for the condition of the focused face and 0.16 for the conditions of negative and positive defocusing. The validity of the models has been demonstrated comparing their results with those obtained by experimental tests.

**Key words: Aluminum alloys, Nd: YAG laser.**