

Características dimensionales de soldaduras formadas sobre el acero AISI 1045 mediante la aplicación del láser diodo de alta potencia ^(*)

A. Sánchez-Castillo*, J. Pou**, F. Lusquiños**, F. Quintero**, R. Soto**, M. Boutinguiza**, M. Saavedra* y M. Pérez-Amor**

Resumen El denominado láser diodo de alta potencia (LDAP) emite un haz de energía óptica generada mediante la estimulación de diodos y ofrece la capacidad de suministrar niveles de potencia hasta de 6 kW. El objetivo de este trabajo de investigación fue estudiar las principales variables de soldadura y sus efectos sobre las características dimensionales de los cordones formados mediante la aplicación de este novedoso láser. Los resultados obtenidos demuestran que el LDAP es una fuente de energía capaz de formar cordones de soldadura sobre placas de acero AISI 1045, en el modo de conducción, sin ningún tipo de preparación mecanizada, precalentamiento o tratamiento postsoldadura y sin la aplicación de metal de aporte.

Palabras clave Soldadura láser. Láser diodo de alta potencia. Gas de protección. Acero al carbono. Profundidad de penetración.

Dimensional characteristics of welds performed on AISI 1045 steel by means of the application of high power diode laser

Abstract The named High Power Diode Laser (HPDL), emits a beam of optical energy generated by diode stimulation and offers the capability of supplying levels of power up to 6 kW. The objective of this research work was to study the main welding variables and their effects on dimensional characteristics of the beads performed by means of application of this novel laser. The results obtained, show that HPDL, is an energy source able to perform welds on AISI 1045 steel plates under conduction mode, without any kind of mechanized preparation, preheating or post-weld treatment and, without filler metal application.

Keywords Laser welding. High Power Diode laser. Shielding gas. Carbon steel. Depth of penetration.

1. INTRODUCCIÓN

Los láseres de CO₂ y de Nd:YAG han dominado el campo del procesamiento de materiales con láser en los últimos 20 años, utilizándose para diferentes tipos de tratamientos, como corte, soldadura, taladrado, tratamientos superficiales, etc.^[1-5]. Sin embargo, su aplicación se limita a aquellos aceros con contenidos de carbono no mayores que 0,25 %, debido a que estos presentan baja soldabilidad. Cuando la elevada densidad de potencia generada por estos equipos (>10⁵ W/cm²) se enfoca sobre el material en cuestión, conduce, eventualmente, a la formación de una soldadura denominada “por pe-

netración profunda”. No obstante, para realizarla, es necesario lograr ajustes muy precisos entre las partes a unir (debido a las reducidas dimensiones del haz), los cuales son obligatorios, y conseguir alinear el haz enfocado sobre esa ranura. De otra manera, puede dar lugar a defectos como la falta de unión, entre otros^[6 y 7]. Desventajas similares se presentan en la soldadura por haz de electrones y en la soldadura por plasma^[8].

Por otra parte, las propiedades mecánicas del acero AISI 1045 (R_t: 565 Mpa; R_c: 310 MPa; elongación: 16 %) le permiten satisfacer una gran variedad de aplicaciones. Su bajo coste, característica que lo convierte en un producto ampliamente

(*) Trabajo recibido el día 23 de junio de 2003 y aceptado en su forma final el día 6 de mayo de 2004.

(*) Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Edif. “U”, Ciudad Universitaria. Morelia, Michoacán, México.

(**) Dpto. Física Aplicada Universidad de Vigo, Lagoas Marco-sende 9, E-36200 Vigo, España.

competitivo, es determinante en su selección y muy atractivo para la ingeniería^[9-11].

Uno de los primeros intentos por lograr la soldadura del acero AISI 1045 mediante láser (CO₂, 500 W) fue realizado por Hart *et al.*^[12]. En esos ensayos, no consiguieron formar soldaduras con continuidad metálica debido al desarrollo de fisuras en la zona de fusión. Describen la formación de crestas y valles sobre la superficie del cordón: un defecto típico y repetitivo, aún en la actualidad, en la soldadura láser de estos aceros. Más recientemente, Eng *et al.*^[13], obtuvieron de sus experimentos los mismos resultados. Últimamente, el grupo de investigación que dirige el Prof. Popwra^[14 y 15], ha confirmado que la pobre soldabilidad de estos aceros (> 0,25 % C), limita las aplicaciones de la soldadura láser (CO₂ y Nd:YAG).

En la actualidad, un novedoso láser cuya generación de energía óptica se basa en la estimulación de diodos, ofrece la posibilidad de suministrar altos niveles de potencia (hasta 6 kW), con una eficiencia de conversión eléctrica (> 40 %) mayor que la de los láseres empleados en el presente (CO₂ ≈ 10 %; Nd:YAG ≈ 3 %), junto con cortas longitudes de onda (800-959 nm). Sus características sobresalientes, como portabilidad, tamaño compacto y robustez (lo cual disminuye los costos), hace de ellos, equipos muy atractivos para ser utilizados en ambientes industriales^[16]. Estos láseres se caracterizan por su haz ampliamente divergente y su astigmatismo, lo cual conduce a la formación de una mancha láser (sección transversal del haz) de, comparativamente, grandes dimensiones, con lo cual, la densidad de potencia es considerablemente baja. Sin embargo, estas características del haz diodo lo hacen prometedor para formar soldaduras con los diseños de unión comúnmente utilizados en los procesos convencionales de soldadura por fusión. Al ser un láser de reciente creación, la investigación de sus capacidades para formar cordones de soldadura es aún limitada.

En este trabajo de investigación se estudió el comportamiento dimensional de los cordones de soldadura formados bajo diferentes condiciones de soldadura, utilizando como fuente de energía el láser diodo de alta potencia.

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se utilizó un láser diodo de alta potencia (Rofin-Sinar DL-015), que emite una radiación de $\lambda = 940$ nm. Su potencia nominal es de 1.500 W.

La potencia suministrada por el láser se ubicó en el rango de 1.100-1.500 W, con incrementos de 100 W cada vez. La velocidad de soldadura comprendió valores desde 2,0 mm/s hasta 4,0 mm/s, con incrementos de 0,5 mm/s. Ambos parámetros de soldadura, seleccionados como variables de estudio, dieron lugar a 25 diferentes condiciones de soldadura.

Las soldaduras se formaron sobre placas de acero AISI 1045 (50 × 50 × 5 mm³), con composición química: 0,47 % C, 0,73 % Mn, 0,21 % Si, 0,009 % S y 0,040 % P. El procedimiento de soldadura consistió en colocar dos placas sobre un posicionador para formar la unión en empalme y mantenerlas firmes mediante un par de sujetadores de presión. El láser se mantuvo en posición fija, mientras que el movimiento relativo fue suministrado al posicionador mediante una mesa X-Y. Trabajos previos determinaron que un flujo de gas transversal es más conveniente para proteger el área fundida y controlar la formación de plasma, sobre la zona de soldadura. De esta manera, se aplicó argón mediante una boquilla convenientemente diseñada para este propósito, a una presión de 3 bares. A fin de evitar cualquier modificación en la conducción del calor generado por el haz láser, no se suministró metal de aporte, ni tampoco se utilizaron las prácticas recomendadas para soldar este acero, como son el precalentamiento o el tratamiento postsoldadura.

La evaluación dimensional se realizó a través de probetas obtenidas de la sección transversal de cada cordón formado. Esta etapa se llevó a cabo con el empleo de un microscopio estereoscópico (NIKON SMZ10-A) acoplado a una mesa micrométrica con resolución de 1 mm. Con el objetivo de revelar esas características geométricas, se utilizaron los métodos comúnmente aplicados para revelar la microestructura. La figura 1 muestra los principales parámetros evaluados: ancho de piletta (P), ancho de la zona afectada térmicamente (ZAT), (H) y, profundidad de penetración (D).

3. RESULTADOS

La figura 2a) muestra el comportamiento del ancho de piletta respecto de la potencia suministrada, y, la figura 2b), corresponde a la misma característica representada contra la velocidad de soldadura. De manera general, a medida que se suministra mayor potencia, mayor es el ancho de la piletta obtenida. Al contrario sucede con respecto de la velocidad de soldadura, puesto que cuando ésta se incrementa, el ancho de la piletta se ve reducida. La

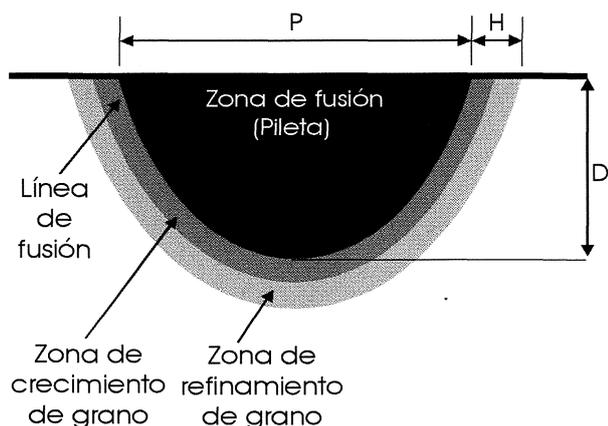


Figura 1. Representación esquemática de un cordón de soldadura que muestra las diferentes zonas desarrolladas bajo un ciclo normal de soldadura, y sus principales características geométricas.

Figure 1. Schematic drawing of a weld bead that shows the different zones developed after one normal welding cycle, and its main geometrical characteristics.

figura 2c) muestra que, conforme la potencia suministrada se incrementa, el ancho de la piletta también incrementa su dimensión. Sin embargo, como muestra la figura 2d), esta característica se ve disminuida cuando se compara con el aumento de la velocidad de soldadura. Con respecto de la profundidad de penetración, es posible afirmar, fundamentándose en la figura 2e), que esta característica del cordón, se incrementa progresivamente al hacerlo el nivel de potencia suministrado; en vez de eso, como muestra la figura 2f), la profundidad de penetración disminuye, al incrementarse la velocidad de soldadura. Al analizar la potencia suministrada de cara a cada una de las características dimensionales (P, H, D) puede observarse el siguiente comportamiento: a medida que la potencia suministrada es mayor, invariablemente resulta que se obtiene un mayor ancho de la piletta, un mayor ancho de la zona afectada térmicamente y una mayor profundidad de penetración, como lo ilustran las figuras 2a), c) y e). Por el contrario, cada vez que la velocidad de soldadura experimenta un incremento, paso a paso, las características dimensionales bajo estudio progresivamente se reducen, como lo muestran las figuras 2b), d) y f).

4. DISCUSIÓN

Una característica común que todas las soldaduras experimentales mostraron, a partir de su sección transversal, es la forma aproximadamente parabólica de la línea de fusión (Fig. 3). Este hecho de-

muestra que la soldadura se realizó por conducción del calor en tres dimensiones y no en dos, tal como sucede en la soldadura por penetración profunda, típica de la soldadura por medio de CO_2 y Nd:YAG.

Cuando la soldadura se forma bajo el modo de conducción es posible explicar el comportamiento de las características dimensionales, de la siguiente manera: al incrementar la potencia suministrada por el láser, manteniendo constantes el resto de los parámetros, incluyendo la velocidad de soldadura, conlleva un aumento de la irradiancia (*Energía suministrada / unidad de tiempo \times unidad de área*). Este hecho tiene como consecuencia, un incremento en la energía absorbida por el material irradiado, por lo cual, la cantidad de material fundido debe incrementarse, tal y como se verifica en las figuras 2a), c) y e). El resultado es un incremento en el ancho de la piletta, el ancho de la ZAT y el aumento en la profundidad de penetración. Con respecto a la reducción en el tamaño de las características dimensionales al modificar la velocidad de soldadura, se propone la siguiente explicación: incrementar la velocidad de soldadura (manteniendo constantes los demás parámetros, incluida la potencia suministrada), da como resultado que el factor *densidad de energía \times tiempo de interacción*, disminuya, con lo que la energía disponible para la fusión, es menor. Este hecho implica una disminución en el rango de la temperatura alcanzada en la piletta, por lo que el ancho de la piletta, el ancho de la ZAT y la profundidad de penetración, son menores.

Es conveniente aclarar que las soldaduras fueron formadas con el método por “ambos lados”. Las diversas condiciones experimentales se encaminaron a obtener cordones de soldadura con características de continuidad metálica. El estudio sistemático de la influencia de las distintas variables (potencia y velocidad de soldadura) involucradas en el proceso de soldadura, se realizó con el objetivo de obtener las bases que conduzcan, en un futuro, a lograr la ventana de trabajo con la que lograr, efectivamente, soldaduras con características de continuidad metálica.

Es posible inferir que la característica íntimamente relacionada con la continuidad metálica, en soldadura realizada en el modo de conducción, es la profundidad de penetración. Los experimentos han demostrado que, bajo la aplicación de un haz con 1.500 W de potencia, junto con una velocidad de soldadura de 2,0 mm/s, da como resultado, la mayor profundidad de penetración: 1,97 mm, por

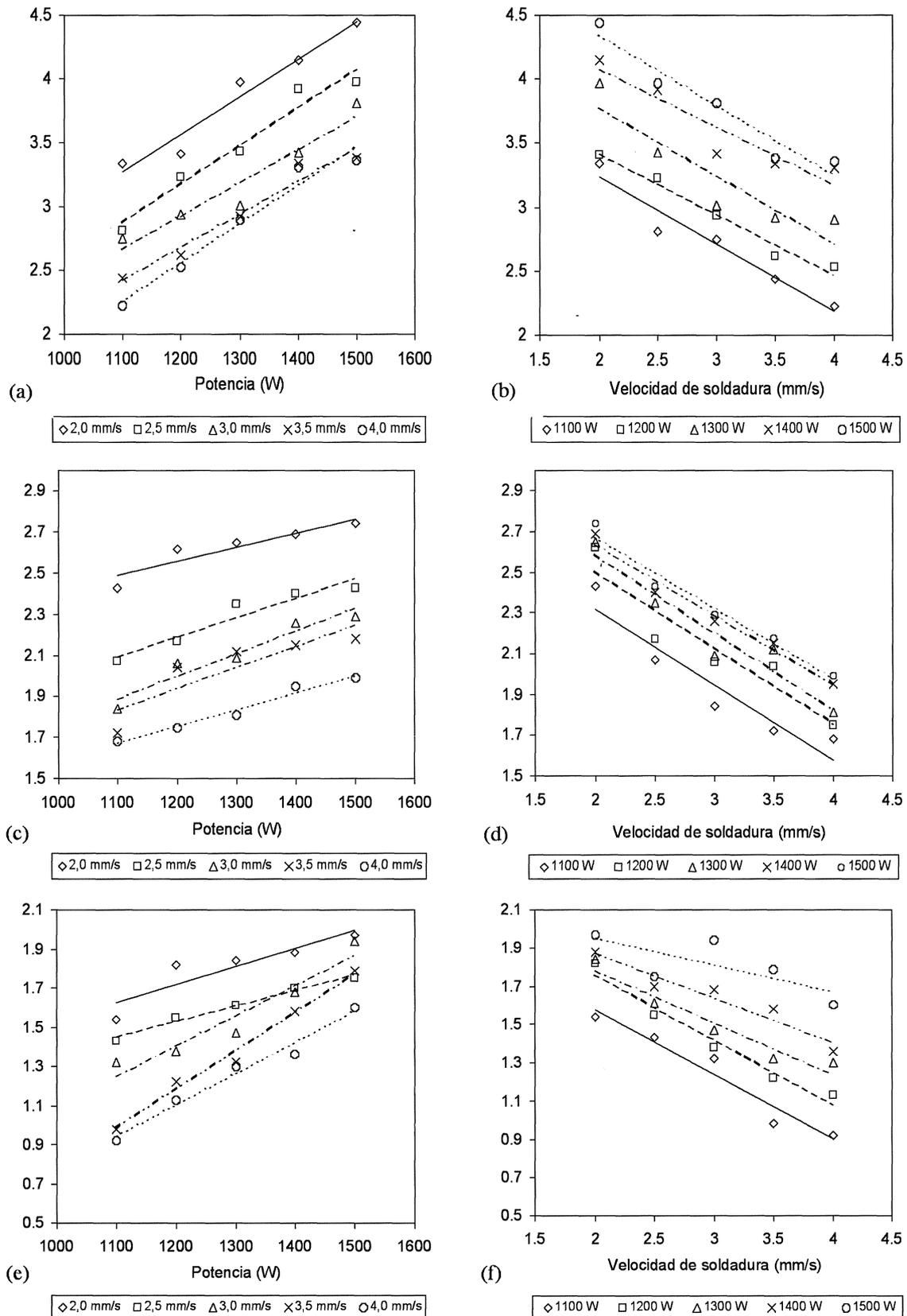


Figura 2. Comportamiento dimensional experimentado por las soldaduras al modificar la potencia suministrada, (a)(c)(e), y la velocidad de soldadura (b)(d)(f). Se agregaron líneas de tendencia, para una mejor apreciación.

Figure 2. Dimensional performance experimented by the welds modifying the power supplied, (a)(c)(e), and the welding velocity (b)(d)(f). Tendency lines were added, for better appreciation.

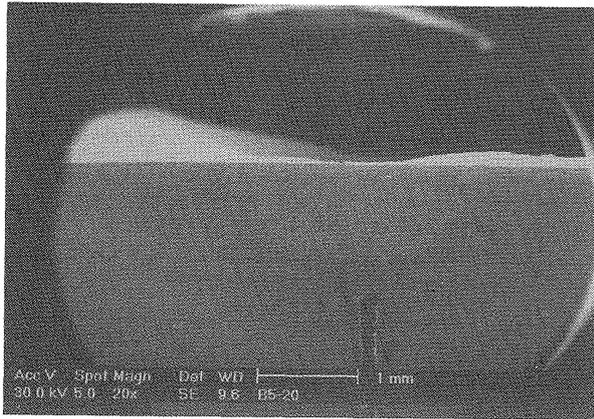


Figura 3. Sección transversal correspondiente a uno de los cordones de soldadura formados mediante láser diodo de alta potencia; la línea de fusión con forma de domo, fue delimitada.

Figure 3. Cross section corresponding to one of the weld beads performed by means of HPDL; fusion line with dome shape, was delineated.

cada lado. Sin embargo, teniendo en consideración que el espesor de las placas es de 5,0 mm, una pequeña porción central (visto a partir de una sección transversal) presenta falta de fusión.

5. CONCLUSIONES

El láser diodo de alta potencia representa una fuente de energía capaz de formar cordones de soldadura sobre placas de acero AISI 1045 bajo el modo de conducción sin mecanizar previamente la unión, precalentarla o, someterla a tratamiento postsoldadura y asimismo, sin la aplicación de metal de aporte. Por los resultados obtenidos en esta investigación, el láser diodo representa una herramienta prometedora para formar cordones de soldadura sobre aceros con contenidos de carbono superiores a 0,25 %, como aquí se ha demostrado.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a D. José Benito Rodríguez del CACTI (Universidad de Vigo) su continuada ayuda para la realización de los análisis llevados a cabo en este trabajo. Esta investigación ha sido financiada parcialmente por la Xunta de Galicia (INFRA 99-43). El Dr. Sánchez-Castillo desea asimismo expresar su gratitud a la Universidad de

Vigo por la concesión de una beca que le permitió finalizar su preparación académica.

REFERENCIAS

- [1] M. PÉREZ-AMOR y O.D. SOARES (Eds.), *Applied Laser Tooling*, Martinus Nijhoff Publishers, Boston, E.U.A., 1987, pp. 25-40.
- [2] M.S. LAROSI, F. LUSQUÍÑOS, J. POU, R. SOTO y M. PÉREZ-AMOR, *Rev. Metal. Madrid* 34 (1998) 194-196.
- [3] G. MUÑIZ, A. CONDE, B.J. FERNÁNDEZ, R.VARELA, I. GARCÍA y J.I. DE DAMBORENEA, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 443-451.
- [4] G. MOLPECERES, R. CATALINA y J.L. OCAÑA, *Rev. Metal. Madrid* 38 (2002) 195-204.
- [5] T. VANDERWERT, *The Industrial Laser Annual Handbook*, D. Belforte y M. Levit (Eds.), Pennwell Books, Oklahoma, E.U.A., 1986, pp. 58-68.
- [6] W.W. DULEY, *Laser Welding*, John Wiley & Sons, Inc., N.Y., E.U.A., 1999, pp. 1-13.
- [7] J.F. READY y D.F. FARSON (Eds.), *Handbook of laser materials processing*, Laser Institute of America, Orlando, E.U.A., 2000, pp. 27-89.
- [8] S. KOU, *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons, New York, 1987, pp. 13-26.
- [9] W.T. LANKFORD, N.L. SAMWAYS, R.F. CRAVEN y H.E. MC GANNON, *The Making, Shaping and Treating of Steel*, 10th edition, Herbick & Held, Pittsburgh, E.U.A., 1985, pp. 1277-1283.
- [10] *Metals handbook. Properties and selection: Iron and Steels*, Vol. 1, 9th edition, American Society for Metals, Ohio, E.U.A., 1989, pp. 117, 455-471.
- [11] P.D. HARVEY (ed.), *Engineering properties of steel*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, E.U.A., 1982, pp. 30-31.
- [12] G.H. HARTH, W.C. LESLIE, V.G. GREGSON y B.A. SANDER, *Source Book on Application of the Laser in Metalworking*, ASM, Ohio, E.U.A., 1981, pp. 172-177.
- [13] ENG. S. NG y A. WATSON, *Journal of Laser Application* 11 (1999) 273-278.
- [14] E. BEYER, B. BRENNER y R. POPRAWA, *Hybrid Laser Welding Techniques for Enhanced Welding Efficiency*, ICALEO '96, Vol. 81, section D, pp. 157-166.
- [15] S. BONSS, B. BRENNER, E. BEYER y F. BACHMANN, *Diode Laser Applications Hardening and Welding*, ICALEO '98, Vol. 85, section G, pp. 121-130.
- [16] J.L. BOCOS, F. ZUBIRI, F. GARCÍANDÍA, J. PEÑA, A. CORTIELLA, J.M. BERRUETA y F. ZAPIRAÍN, *Rev. Metal. Madrid* 40 (2004) 146-151.