

## Continuidad metalúrgica de un acero ASTM A 36 con preparación de bordes a diferentes ángulos

### Metallurgical continuity of an ASTM A 36 steel with preparation of edges at different angles

**Yoel Matos Durán** [yomadu@gmail.com](mailto:yomadu@gmail.com) Empresa Mecánica del Níquel, Cuba.

**Addiel Torres Martínez** [additorresm@gmail.com](mailto:additorresm@gmail.com) Empresa Mecánica del Níquel, Cuba.

**Leonardo Ramírez Lozano** [lrlozanomile@gmail.com](mailto:lrlozanomile@gmail.com) Empresa Mecánica del Níquel, Cuba.

**Resumen:** Se determinó la continuidad metalúrgica de un acero ASTM A 36 con preparación de bordes a diferentes ángulos. Se emplearon ensayos no destructivos, como líquido penetrante, ultrasonido y radiografía, así como las deformaciones al ser soldado con electrodo E 7018 y biseles de 30° y 35°. Fueron obtenidas las imperfecciones y discontinuidades encontradas en la soldadura, en las referidas al diseño, comportamiento metalúrgico y proceso de soldadura, donde esta última fue la que mayor incidencia presentó en la unión. Por último, con una longitud de onda longitudinal de 4376,78 m/s y una superficial de 2884,49 m/s, se comprobó que en el bisel de 30° existen dos grietas longitudinales a una longitud de 9,6 mm y 1,3 mm de profundidad, además el bisel de 35° mostró falta de penetración de 1,25 mm.

**Palabras claves:** aleaciones, defectos de soldadura, discontinuidad metalúrgica, uniones soldadas

**Abstract:** The metallurgical continuity of an ASTM A 36 steel with edge preparation at different angles was determined. Non-destructive tests were used, such as liquid penetrant, ultrasound and radiography, as well as deformations when being welded with electrode E 7018 and 30° and 35° bevels. The imperfections and discontinuities found in the weld were obtained, referring to the design, metallurgical behavior and welding process, where the latter was the one that had the greatest impact on the joint. Finally, with a longitudinal wavelength of 4376.78 m/s and a superficial one of 2884.49 m/s, it was found that in the 30° bevel there are two longitudinal cracks at a length of 9.6 mm and 1.3 mm deep, in addition the 35° bevel showed a lack of penetration of 1.25 mm

**Keywords:** alloys, welding defects, metallurgical discontinuity, welded joints

## Introducción

La soldadura se ha constituido en uno de los procesos de fabricación más utilizados para la unión de elementos estructurales. Con el desarrollo de las nuevas técnicas, sustituyó al atornillado y al remachado en la construcción de estructuras, como puentes, edificios y barcos. Es fundamental en la industria automotriz, aeroespacial y en la fabricación de maquinaria; sin embargo, su aplicación produce deformaciones estructurales importantes en el metal debido a cambios en la composición y transformaciones de fase durante la solidificación y enfriamiento (Il'yashchenko, Chinakhov & Gotovshchik, 2015).

De acuerdo con González-Cabrera *et al.* (2017), el proceso de soldadura necesita de calor para lograr la unión entre sus partes. Este calor es importante no solo porque permite que se lleve a cabo la unión, sino porque afecta su microestructura y esta, a su vez, sus propiedades mecánicas. Además, provoca variaciones dimensionales y puede generar esfuerzos residuales que afecten la integridad estructural de los componentes soldados.

Easterling (1992) y Fernández-Columbié, Suárez & Rodríguez (2021) plantean que, según avanza el arco, se forma un pozo fundido del metal base y de aporte, el cual se solidifica con rapidez detrás del arco en movimiento. Las partes del trabajo inmediatamente adyacentes a la gota de soldadura se vuelven extremadamente calientes y se expanden, en tanto que las porciones removidas permanecen relativamente frías.

En la actualidad son aceptados los criterios de diseño y explotación que contemplan soldaduras con imperfecciones; bajo estos criterios, estas necesitan ser reparadas si su presencia es peligrosa para la integridad de la estructura (González-Cabrera *et al.*, 2017). La integridad de las estructuras soldadas se estima con la vida a fatiga de la junta soldada, conteniendo imperfecciones y comparándola con la vida requerida.

Los defectos en uniones soldadas son del tipo porosidad, falta de penetración, falta de fusión, inclusión de escoria, socavación y desalineamiento (Maddox, 1994). El tamaño e intensidad de las imperfecciones depende del proceso de soldadura, la geometría, la facilidad de acceso y el cuidado ejercido en el proceso de soldar. Varias de estas imperfecciones son descritas por García-Rodríguez y Burgos (2007).

Una forma de comprobar la calidad o soldabilidad de las uniones soldadas son los ensayos destructivos, pruebas que se realizan en los materiales, tanto ferrosos como no ferrosos; con el objetivo de comprobar o determinar sus propiedades físicas y mecánicas principalmente.

El objetivo del trabajo es determinar la continuidad metalúrgica de un acero ASTM A 36 con preparación de bordes a diferentes ángulos con el empleo de ensayos no destructivos, como líquido penetrante, ultrasonido y radiografía al ser soldado con electrodo E 7018 y preparación de bordes con biseles de 30° y 35°

### **Desarrollo experimental**

#### **Soldadura de las planchas de acero ASTM A 36**

La soldadura fue manual en posición plana (1G) aplicando dos pases. Ambas láminas fueron colocadas sobre un banco de acero. Se empleó un sistema de sujeción mediante sargentos y pletinas para minimizar la distorsión del conjunto y desplazamientos accidentales del mismo durante la deposición de los cordones. Las placas fueron punteadas como requisito para mantener la apertura de raíz constante en toda su longitud. En la figura 1 se muestra las planchas soldadas. La 1a se corresponde con el bisel de 30° y la 1b con el de 35°.



Figura 1. a) Soldadura con bisel a 30°. b) Soldadura con bisel a 35°.

La máquina soldadora empleada fue un transformador tipo Miller, con corriente alterna. La regulación de los parámetros se realizó modificando la velocidad de soldadura, actuando para ello sobre la corriente y la tensión de arco. Se soldó con corriente directa

electrodo positivo y con intensidades de corriente de 105 y 160 A a 220 V. La intensidad de corriente empleada fue de 165 A y una tensión de 16 V.

Las pruebas más empleadas en un estudio de ensayo normalmente se realizan en placas cortadas en bloques ya estandarizados para ejecutar las mismas. Estas probetas se desarrollan en junta soldadas a tope para así realizar el estudio por medio de ensayos de tracción, impactos, plegados, rotura crítica, dureza o ensayos no destructivos, todas ellas buscan el estudio del material.

### **Procedimiento para el ensayo de líquidos penetrantes**

El método o prueba de líquidos penetrantes se fundamentó en el principio de la capilaridad. Para detectar las discontinuidades superficiales que pudieran encontrarse en las superficies de ambas uniones soldadas se empleó un juego de líquidos penetrantes de la marca ARDROX, para luz visible, removible con solvente. Está integrado por tres aerosoles, compuesto por un solvente limpiador, un líquido penetrante y un revelador no acuoso, todos ellos teniendo una capacidad de 340 cm<sup>3</sup>.

El procedimiento para la aplicación de la técnica de líquidos penetrantes se realizó de acuerdo a las normas ASTM E165 y ASTM E1417. Para la realización de este ensayo se empleó un penetrante líquido removible con agua, a partir de la condición de la superficie a inspeccionar ya que, al ser un cordón de soldadura, esta se comporta de forma rugosa. La técnica empleada para la aplicación del penetrante y el revelador fue por pulverización.

### **Inspección de las uniones con ultrasonido**

Para la inspección de las uniones por ultrasonido, se empleó el de haz direccionado o la técnica de ángulo de haz. Se utilizó esta técnica debido a que el transductor no tiene que ir en el lugar de la superficie de la soldadura, por lo que ubicó en la superficie lisa al lado de esta. El ángulo empleado fue de 70°, el que está establecido para espesores de planchas que están entre 5 y 15 mm de espesor. Con la inspección de este ángulo permite producir la esquila de ondas en la parte a inspeccionar en un grado y encontrar los defectos. La marca del equipo a utilizar es KRAUTKRAMER, modelo USN 52L.

El procedimiento empleado en el ensayo de ultrasonido fue el de pulso-eco, designado también como procedimiento de pulsos reflejados ya que utiliza la porción reflejada del

sonido para la evaluación de defectos. El oscilador piezoeléctrico funciona a la vez como emisor y como receptor. Como la energía recibida es mucho más débil que la emitida, aquí no puede operarse sobre la base sonido continuo, empleándose exclusivamente impulsos de sonido.

### **Método radiográfico en los cordones de soldadura**

Los defectos son detectados por diferencias en la absorción de radiación del material, donde se generan zonas oscuras/claras en la placa radiográfica. El ensayo se realizó a partir de dos operaciones establecidas. Primeramente, para la realización de la radiografía, se situó la fuente radiográfica a 4 mm de distancia de la pieza a inspeccionar, el film radiográfico al lado opuesto de la pieza. Se irradió en conjunto con el film, la impresión dependió del espesor, la diferencia de la densidad y el tiempo de radiación en la pieza. En el revelado, se comprobó que las guías y los rodillos del procesador estuviesen alineados y las guías transversales ajustadas, el estanque de crecimiento orgánico se mantuvo limpio para un revelado correcto y sin fallas.

Durante el ensayo de radiografía la emisión de rayos fue emitida en todas direcciones con la misma intensidad, pero solo se emplearon los emitidos a través de una sección especial del tubo de rayos X llamado ventana. El cátodo es el electrodo negativo del tubo de rayos X, con 2 partes; el filamento y la copa de enfoque.

### **Resultados y discusión**

En la industria las exigencias en los materiales, dependen del servicio que prestarán, se espera una respuesta a condiciones de presión, corrosión, resistencia eléctrica, dilatación, ductilidad y dureza. Estos aceros necesitan procesos de conformado para adoptar las formas requeridas y cumplir sus funciones, y deben llevarse a cabo, manteniendo las propiedades sin distorsionarlos. Un elevado aporte de calor afecta la zona de la junta, cambiando sus propiedades mecánicas y sus dimensiones, ya que presentan un alto grado de expansión térmica. Los efectos de los parámetros de soldadura dictaminarán la calidad final de la unión.

### **Análisis del ensayo por líquidos penetrantes**

La efectividad del ensayo está determinada por la limpieza, cuando no se logra la misma se crean indicaciones falsas originadas por procesos metalúrgicos, de fabricación, de

controles de calidad, ensayos no destructivos realizados anteriormente y también por las condiciones de servicio a las que está sometida la superficie de la pieza. Para este análisis el método escogido fue tipo II (coloreados) método C (removible con solvente). Es más común, económico y sin complicaciones a la hora de desarrollarlo. En la figura 2 se muestra el modo de aplicación del líquido penetrante en las superficies de ambas planchas soldadas.



Figura 2. Modo de aplicación del penetrante.

Luego de aplicar el limpiador se continua el procedimiento, se roció tanto en la presentación como en la raíz a una distancia de 20 cm para que cubriera uniformemente el cordón de la junta a inspeccionar, se esperó un tiempo de 15 min con el objetivo de que el penetrante ingresara a todas las discontinuidades como la capilaridad y la viscosidad. Se realizó una limpieza intermedia para remover el exceso de penetrante y eliminar el líquido presente dentro de las discontinuidades. Se utilizó un trapo seco y se aplicó en una sola dirección, para no extraer el líquido de las fallas, se hicieron las pasadas suficientes para quitar el exceso del penetrante. Transcurrido el tiempo establecido se aplicó el revelador, tanto en la superficie como en la raíz de la junta soldada. En la figura 3 se muestra los resultados. La 3a se corresponde con la muestra M1 y la 3b con la muestra M2.



Figura 3. Defectos detectados por líquidos penetrantes.

En la muestra M1 (bisel de 30°) se observa la presencia de socavado y de cráter en el cordón de soldadura, el de socavado se ha obtenido en un solo extremo de dicho cordón. En la M2 (bisel de 35°) existen discontinuidades como poros e inclusiones de escorias.

En las soldaduras con bisel, la socavación o socavado interno puede ocurrir tanto en la superficie como en la raíz, donde la orientación, manipulación y tamaño de electrodo son los principales factores que genera la discontinuidad. Características eléctricas y variables como amperaje y arco eléctrico se deben controlar, utilizando las recomendaciones de fabricante ya que de lo contrario podría existir un exceso de calor y posteriormente aparecerá el socavado, que fue referido por Rodríguez (2014).

Las causas de la formación de los poros en la unión pudiesen estar asociado al agrietamiento en el revestimiento del electrodo, debido a que, durante la fusión, en la zona donde se encuentra el defecto, no existirá una protección del baño líquido y surgirán producto de la absorción de gases. Por otro lado, las inclusiones de escorias son materiales solidos no metálicos (partes del revestimiento). En muchas ocasiones estas pueden quedar atrapadas entre los cordones y el metal base o entre ellos, llamándose entonces inclusiones de escoria y constituyen un defecto interno en las uniones soldadas. Las salpicaduras se originaron porque el metal de aporte durante su fusión provocó la formación de gotas a los lados de la costura

### Resultados del ensayo radiográfico

A partir de los criterios establecidos para determinar los defectos obtenidos en este ensayo, se procedió al análisis de las discontinuidades. En la figura 4 se muestra los mismos.

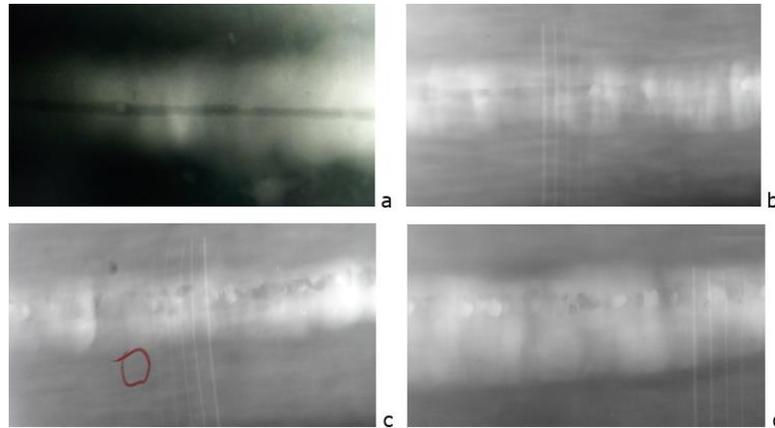


Figura 4. a) Penetración incompleta. b) Incompleta por el desalineado. c) Concavidades y socavados. d) Porosidad.

La falta de penetración o penetración incompleta (figura 4a), esta imperfección es considerada superficial debido a que en las uniones en V son visibles por la cara posterior. A menudo la raíz de la soldadura no queda adecuadamente rellena con material de aporte y deja un vacío. Este defecto generalmente no es aceptable y requiere de una eliminación del cordón anterior y repetición del proceso. Por otra parte, la penetración incompleta debido al desalineamiento (figura 4b) se observa en la radiografía como un cambio abrupto de la densidad a lo largo de la imagen con una línea recta más oscura en el centro y a lo largo del borde. Este defecto está provocado por que las placas bases no están correctamente alineadas.

Las concavidades externas y socavados o falta de relleno obtenidas (figura 4c) se muestran como una disminución de refuerzo externo, por poco depósito de material de relleno o aporte del cordón. La imagen radiográfica muestra una densidad de soldadura más oscura que las piezas a soldarse, esta se extiende a través del ancho completo de la imagen. Por último, La porosidad obtenida es del tipo esférica aislada (figura 4d), esta esfera es producida por alteraciones del arco eléctrico, variación del amperaje/velocidad de soldadura, oxidación en el revestimiento del electrodo, húmedo oxidado.

### Resultados del ensayo de ultrasonido

Determinar los desperfectos presentes en las uniones soldadas por medio del ultrasonido, permitió predecir las condiciones que se obtuvo del proceso de soldadura, y la existencia de defectos como: porosidad, escoria, falta de penetración, de fusión,

socavado, grietas, desalineamiento. Con el transductor y el instrumento se garantizó las distancias de las tres ondas, las cuales se mostraron en la pantalla del equipo.

Este barrido se realizó en la dirección del haz, transversalmente a través de la soldadura o defecto, pero como la longitud de las ondas transversales son más pequeña que las longitudinales a determinada frecuencia, es más sensibles a defectos pequeños. Por lo anterior, van a ser más sensibles a la dispersión, y con menor capacidad de penetración en los materiales, con la misma se podrá determinar imperfecciones en este sentido en el cordón, criterio también expuesto por Halmshaw (1991) y Varia & Ganatra (2013).

Independientemente que, estas ondas se desplazan por contornos circulares y alrededor de curvaturas, se reflejan en la presencia de esquinas. Para determinar la longitud de ondas longitudinal y transversal se realizó a partir del área de las mismas.

En la figura 5 se muestra los resultados obtenidos del ensayo de ultrasonido en la muestra M2, en correspondencia con el defecto determinado con líquidos penetrantes.



Figura 5. Resultados de los ensayos para la muestra M2.

En el C-Scan se observa que, a una distancia de profundidad de indicación de 50° mm existe una señal la cual hace referencia a dos picos con tendencia a ir decreciendo que llegan hasta un 30 %, pico relevante donde señala que ese porcentaje de la energía del haz enviado fue reflejado por el defecto y el otro 70 % restante no. El ultrasonido muestra el defecto detectado por el ensayo de líquidos penetrantes (cambio de tonalidad) consistente en falta de penetración (círculo amarillo figura de la derecha), encontrándose a 1,25 mm de profundidad desde la superficie donde se ubicó el palpador, lo que indica que está en la superficie.

## Conclusiones

Se determinaron y caracterizaron, mediante los procedimientos metodológicos y las guías establecidas para cada uno de los ensayos, las discontinuidades que se presentaron en las áreas afectadas.

A través de los ensayos no destructivos se determinó que, las imperfecciones y discontinuidades encontradas en la soldadura del acero ASTM A 36 con preparación de bordes a 30 y 35° soldado con electrodo E 7018, se encuentran las referidas al diseño, a comportamiento metalúrgico y al proceso de soldadura, esta última fue la que mayor incidencia presentó en la unión.

## Referencias bibliográficas

Easterling, K. (1983). *Introduction to the physical metallurgy of welding*. Butterworths.

Fernández-Columbié, T., Suárez, L. & Rodríguez, I. (2021). Influencia de la temperatura en la soldadura de unión disímil mediante proceso de gas y tungsteno. *Revista de Iniciación Científica*, 7(1), 24-29.  
<https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/3050>.

García-Rodríguez, Y. & Burgos, J. (2007). Procedure for the obtaining by means of MEF of the thermal fields, deformations and residual tensions in welded unions. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad de Zulia*, 30(1), 13-22.  
[http://ve.scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0254-07702007000100003&Ing=es&ting=es](http://ve.scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702007000100003&Ing=es&ting=es).

González-Cabrera, O., Gómez-Pérez, C., Perdomo-González, L. & Vázquez-Badillo, E. (2017). Comportamiento de la resistencia al desgaste entre depósitos obtenidos con electrodos simple y doblemente recubiertos. *Soldagem & Inspeção*, 22(1), 87-98.  
[http://old.scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=A0104-92242017000100087](http://old.scielo.php?script=sci_arttext&pid=A0104-92242017000100087).

Halmshaw, R. (1991). *Nondestructive Testing*, Edward Arnold.

Ilyashchenko, D., Chinakhov, D. & Gotovshchik, Y. (2015). Calculation of the heat content of the electrode metal droplet when applying power supplies for manual arc welding with different volt-ampere characteristic. *Applied Mechanics & Materials*, 756(200), 101-104. <https://www.scientific.net/AMM.756.101>.

Maddox, S. (1994). Applying Fitness-for Purpose Concepts to the Fatigue Assessment of Welded Joints. *The International Conference on Fatigue*, 1(1), 72-81.

Rodríguez, O. (2014). *Defectos y controles de uniones soldadas en soldadura manual*. Editorial Universitaria.

Varia, V. & Ganatra, Y. (2013). Ultra sonic testing of welded joints prepared at different voltage and current. *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*, 2(11), 738-742. <http://www.ijret.org>.