

# IDENTIFICACIÓN DE DEFECTOS EN SOLDADURAS DE ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36 MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS SEGÚN EL CÓDIGO AWS D1.1

INSPECTION OF WELDING IN STRUCTURAL STEEL  
ASTM A36 BY NONDESTRUCTIVE TECHNIQUES  
ACCORDING TO THE CODE AWS D1.1

MAURICIO CELY<sup>1</sup>  
VERÓNICA SOTOMAYOR<sup>2</sup>  
WILLAN MONAR<sup>3</sup>  
PATRICIO CASTRO<sup>4</sup>

*Recibido: 18 de octubre de 2017*  
*Aceptado: 31 de enero de 2018*

---

<sup>1</sup> Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Quito, Ecuador  
(bmcely@puce.edu.ec).

<sup>2</sup> Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador  
(veronica.sotomayor@epn.edu.ec).

<sup>3</sup> Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador  
(william.monar@epn.edu.ec).

<sup>4</sup> Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Quito, Ecuador  
(epcastrom@puce.edu.ec).





# IDENTIFICACIÓN DE DEFECTOS EN SOLDADURAS DE ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36 MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS SEGÚN EL CÓDIGO AWS D1.1

## IDENTIFICATION OF DEFECTS IN WELDING OF STRUCTURAL STEEL ASTM A36 USING NONDESTRUCTIVE TESTING ACCORDING TO AWS CODE D1.1

*Mauricio Cely, Verónica Sotomayor, Willan Monar, Patricio Castro*

**Palabras claves:** Inspección, soldadura, Ensayos No Destructivos (ENDs), ultrasonido, radiografía industrial, discontinuidad, defecto.

**Keywords:** Inspection, welding, Non Destructive Testing (NDT), ultrasound, industrial radiography, discontinuity, defect.

### RESUMEN

El trabajo aquí presentado establece los criterios de inspección de soldaduras en acero estructural ASTM A36 para la identificación de defectos mediante Ensayos No Destructivos (ENDs), principalmente los métodos de ultrasonido y

radiografía industrial de acuerdo con el código AWS D1.1, para esto se establece una comparación entre estos métodos no destructivos aplicados en soldaduras a tope con bisel en V y proceso SMAW. Esto se logra a partir de imágenes



radiográficas y curvas ultrasónicas tipo pulso-eco generadas de muestras soldadas estándar de acuerdo con el código de soldadura estructural AWS D1.1, donde cada una de estas muestras contiene un defecto característico para ser inspeccionado e identificado. También, se analizan los resultados obtenidos con cada técnica no destructiva empleada, permitiendo

obtener un medio de comparación para correlacionar la forma de señal ultrasónica con las indicaciones presentes en la imagen radiográfica. Finalmente, se determinan las ventajas y limitaciones de cada ensayo aplicado en las muestras de acero analizadas para finalmente contrastar los resultados obtenidos y compararlos con la norma aplicada al trabajo desarrollado.

## ABSTRACT

This work presents the criteria of inspection of welds in structural steel ASTM A36 for the identification of defects using Non Destructive Testing (NDT), mainly the methods of ultrasound and industrial radiography according to the AWS code D1.1. It is important to establish a comparison between these non-destructive methods applied in butt welds with V-bevel and SMAW process. This is achieved from radiographic images and pulse-echo ultrasonic curves generated from standard welded samples according to structural welding code AWS D1.1, where each of these

samples contains a characteristic defect to be inspected and identified. Also, the results obtained with each non-destructive technique used are analyzed. Making every activity mentioned it is possible to obtain a means of comparison to correlate the form of ultrasonic signal with the indications present in the radiographic image. Finally, the advantages and limitations of each test applied in the steel samples analyzed are determined to finally compare the results obtained and compare them with the standard applied to the work developed.

## INTRODUCCIÓN

Para un ingeniero dedicado a la inspección en materiales estructurales como el acero, es importante conocer

la mejor técnica que le brinde eficiencia en el ensayo seleccionado y poder inspeccionar al elemento estructural



según una norma. Además, se debe garantizar el ahorro de tiempo en las inspecciones realizadas para obtener mejores resultados, para así brindar un mejor servicio por ensayo realizado a los materiales estructurales.

La inspección que se desarrolla en estructuras tiene un rol importante al determinar discontinuidades de las soldaduras de esta, sin alterar sus propiedades mecánicas, garantizando el funcionamiento y la calidad del servicio que ofrecen como elementos construidos. La inspección no destructiva se basa en un campo muy amplio de pruebas y aplicaciones, mediante diferentes métodos y principios físicos como el electromagnetismo, la emisión acústica, la emisión térmica y la penetración de radiación de alta energía a través de los diferentes materiales como el acero. Los diferentes métodos empleados para inspeccionar materiales cubren pruebas de elementos estructurales y componentes mecánicos que son puestos en operación y que deben ofrecer la resistencia para la que fue diseñada.

Entre los métodos de inspección no destructiva más utilizados en la industria para garantizar el aseguramiento y control de calidad de los materiales están el ultrasonido y radiografía industrial, generalmente en soldaduras asegurándose que estas cumplan estándares internacionales con el fin de garantizar

su desempeño óptimo y evitar fallas a futuro en los elementos estructurales. Estos métodos se utilizan para examinar la integridad estructural de la soldadura, gracias a su alta sensibilidad en la detección de discontinuidades y defectos. Un estudio detallado de detección de discontinuidades en cordones de soldadura por radiografía se ha presentado por (Kasban et al., 2011) y en ultrasonido por (Mundry, 1972).

El ensayo de radiografía industrial, se utiliza para evaluar la calidad de la soldadura mediante la apreciación de radiografías por un operador capacitado de los componentes soldados, llevándose a cabo al utilizar rayos X o una fuente gamma. Además, el ensayo de ultrasonido es una técnica altamente usada dentro del campo de los ensayos no destructivos, que al igual que la radiografía su principal objetivo es la caracterización de discontinuidades en soldaduras. Las ondas ultrasónicas son del mismo tipo que los sonidos audibles, la diferencia se tiene o está en la frecuencia de operación y su forma de propagación. Las frecuencias de los ultrasonidos están por encima de la zona audible del espectro acústico sobrepasando 20kHz. El método de ultrasonido está remplazando a las radiaciones ionizantes al no generar riesgos para las personas y no contaminar el planeta.





## MARCO TEÓRICO

El estudio del fundamento teórico está profundizado en las técnicas no destructivas de Radiografía Industrial (RT) y Ultrasonido convencional (UT) como métodos de inspección en probetas de acero soldadas donde se analizarán sus discontinuidades internas para ser comparadas con los valores permitidos en las normativas internacionales como la AWS D1.1, así como de su nueva tecnología en la presentación de resultados.

### **Inspección**

La inspección es una parte importante dentro de la construcción en estructuras de acero, por lo cual se vuelve necesario elaborar procedimientos de inspección en los que se pueda analizar y controlar la calidad de los elementos que van a estar sometidos a cargas para que se garantice su utilización. En el presente artículo se propone la inspección en acero estructural básicamente con dos técnicas no destructivas que permiten verificar la calidad de las estructuras especialmente soldadas. Para lograr este procedimiento se deben utilizar normativas y códigos estructurales como el AWS D1.1.

### **Radiografía industrial**

La radiografía industrial como inspección no destructiva, es una técnica

de inspección volumétrica que permite detectar discontinuidades macroscópicas e incluso variaciones en la configuración interna del material a inspeccionar. Una gran ventaja de la radiografía industrial es que proporciona un registro permanente de las discontinuidades encontradas.

Esencialmente el ensayo con radiación consiste en hacer incidir un tipo de radiación, ya sea con rayos X, sobre el material designado para obtener una imagen a través de una película radiográfica, al atravesar la radiación sobre la materia, esta se atenúa básicamente por la interacción radiación-materia.

Esta radiación electromagnética, es la energía del haz de radiación que está compuesto de energía denominados fotones que interaccionan con la materia, es por esta razón, que la radiación tipo X posee gran energía, alta frecuencia y corta longitud de onda, y la exposición directa al cuerpo humano en un tiempo prolongado es muy peligrosa e incluso fatal.

Con el fin de determinar claramente las discontinuidades que se pueden presentar en un material o más específicamente en una junta soldada, es necesario tomar en cuenta la configuración o cálculo de ciertas variables que son muy necesarias para realizar la





exposición radiográfica y esto se lo debe realizar para cada geometría del material.

Una de las principales variables que se debe tomar en cuenta es la reducción de la penumbra geométrica, la misma que depende de:

- Tipo de película radiográfica
- Tamaño de la fuente de radiación
- Distancia objeto-película o espesor
- Distancia fuente-objeto

Al considerar que la emisión de las radiaciones permanece constante en intervalos de tiempo cortos, la intensidad total que pasa a través de toda la superficie cerrada que envuelve la fuente emisora es constante, es decir, la intensidad que atraviesa un elemento de superficie es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre la superficie y el foco emisor.

## Ultrasonido

La inspección por ultrasonido es otra técnica altamente usada dentro del campo de los ensayos no destructivos volumétricos.

Convencionalmente el método de ultrasonido consiste en un único transductor piezoeléctrico emisor/receptor, el cual genera un pulso ultrasónico que se propaga en el material produ-

ciendo una reflexión en todos los puntos donde encuentre una discontinuidad quedando estas registradas mediante el pulso reflejado. El tiempo entre el pulso de entrada y la reflexión producida por la indicación está directamente relacionado con la distancia recorrida según la velocidad de propagación de las ondas acústicas en el material, por lo que se puede obtener información acerca de la posición de la discontinuidad detectada.

Las ondas acústicas se propagan sobre un medio elástico, estas se propagan a través de dicho medio gracias a un movimiento ondulatorio con una velocidad y una impedancia acústica característica; son dos parámetros constantes para cada tipo de material. La propagación del haz ultrasónico generado no produce transmisión de materia, sino transmisión de energía. De esta manera las partículas sometidas a la perturbación se desplazarán de su posición de equilibrio, a la posición de reposo y sobrepasando la misma en un movimiento vibratorio armónico.

Las ondas ultrasónicas pueden propagarse dentro de todos los medios donde los átomos y moléculas sean capaces de vibrar, por lo que tendrá lugar en sólidos, líquidos y gases, en el vacío no es capaz de producirse.





## METODOLOGÍA PARA LA INSPECCIÓN EN MUESTRAS DE ACERO SOLDADAS

Con el fin de obtener resultados confiables en la aplicación de los ensayos no destructivos radiográfico y ultrasónico, es necesario seguir ciertos lineamientos descritos en una determinada normativa, para así implementar una metodología de trabajo adecuada.

Los análisis de los requerimientos necesarios de inspección de soldadura se establecen en la norma AWS D1.1, donde en su sección 6 se establece el procedimiento que se debe seguir para una inspección por radiografía industrial y ultrasonido convencional de uniones estructurales de acero, se determinó la utilización de la norma AWS D1.1 ya que su alcance encaja perfectamente con los requerimientos del presente artículo.

La norma AWS D1.1, es un reglamento americano que contiene los requerimientos para la fabricación y montaje de estructuras de acero soldadas. De esta norma se estudiarán los apartados más importantes que intervienen en la soldadura de acero estructural y su posterior inspección por los ENDS.

La sección 6 está dividida en 7 partes ordenadas alfabéticamente, las partes E y F son correspondientes a la inspección de juntas soldadas a tope

con ranura, bajo los métodos no destructivos de Radiografía y Ultrasonido respectivamente.

Las normas y procedimientos dispuestos en la parte E deben regirse cuando la inspección sea requerida, para un eficiente ensayo radiográfico, estas indicaciones mantienen estricta limitación y exclusividad para la inspección y evaluación de placas con ranura soldadas a tope, perfiles y barras irradiadas por una sola fuente de rayos X o Gama.

Los procedimientos y especificaciones establecidos en la parte F deberán ser aplicados en la inspección por ultrasonido en soldaduras con bisel, en el rango de espesores entre 8mm a 200mm.

El personal que realiza las pruebas con ultrasonido debe ser certificado como Nivel I o II en este método a través de la calificación por parte de un Nivel III certificado por la Sociedad Americana de Ensayos No Destructivos con sus siglas en inglés ASNT.

La calificación del operador para realizar pruebas con UT debe incluir una evaluación específica y práctica, basándose en los requerimientos dados en la SNT-TC-1A.





## MATERIALES Y EQUIPOS

En este apartado se especifica el procedimiento adoptado para la obtención de las probetas experimentales soldadas con proceso SMAW, también se detallan las variables y parámetros de calibración configurados en los equipos de radiografía industrial y ultrasonido empleando los lineamientos descritos en la norma AWS D1.1, sección 6 partes E y F.

El equipo usado para efectuar los ensayos de Radiografía Industrial es del tipo Baltographe BF 200/10 marca Balteau, con un ángulo máximo de apertura del haz de rayos de 40°. El equipo de Ultrasonido convencional es de marca Olympus serie Epoch XT. Como se muestra en la figura 1, se observan los equipos a utilizarse.



Figura 1. a) Equipo de radiografía industrial. b) Equipo de ultrasonido convencional

Las probetas elaboradas son la principal herramienta utilizada, ya que en ellas se aplicarán los ensayos de radiografía industrial y ultrasonido y con los resultados que se obtengan se podrán comparar la funcionalidad de las dos técnicas.

Dentro del planteamiento que se realizó inicialmente para dar paso a la elaboración de este trabajo, se estableció la utilización del proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW), ya que según el artículo 3.2.1 de la norma AWS D1.1, es uno de los procesos precalificados.



Además el proceso SMAW es uno de los más utilizados en la soldadura de estructuras de acero, pero también es uno de los métodos en donde más discontinuidades y defectos se pueden encontrar, debido a varios factores como son: soldador no calificado, material base y de aporte no apropiados, condiciones ambientales no aptas, etc., es por todo esto que los cordones de soldadura por proceso SMAW se convierten en los más idóneos para efectuar un análisis de inspección de soldadura mediante técnicas no destructivas .

En cuanto al material base y de aporte están de acuerdo con la sugerencia de la norma AWS D1.1.

El material base es un acero ASTM A36, que es factible de encontrar en el mercado nacional y también tiene una amplia aplicación en el diseño, fabricación y montaje de estructuras.

El grosor escogido para las placas es de 10 mm, puesto que es un espesor que brinda la posibilidad de dar varios pases de soldadura y obtener en ellos las discontinuidades que se requiere.

El electrodo seleccionado es el E7018 con un diámetro de 1/8 [in], ya que brinda buena penetración al momento de soldar, es de fácil manejo para el soldador y de bajo hidrógeno. En resumen, se presenta una tabla para de la selección del material base y de aporte.

**Tabla 1. Resumen de la selección del material base y de aporte.**

Proceso	Material base	Espesor [mm]	Material de aporte
SMAW	Acero ASTM A36	10	E7018, =1/8"

Dentro del planteamiento se estableció soldar con juntas a tope realizando un bisel simple en V y sin placa de respaldo, ya que es el tipo de junta mayormente utilizado cuando se van a realizar cordones de soldadura con penetración completa, por recomendación del soldador y tomando en cuenta el espesor, la separación entre placas

será de 2 mm. Además, la medida del talón será de 0 mm puesto que es junta en V.

En lo concerniente al ángulo de la ranura o bisel claramente se establece que debe ser de 60°. Se debe señalar que la unión de las placas de acero serán juntas de penetración completa, resumidos en la tabla 2.



**Tabla 2. Resumen del diseño de la junta.**

Tipo de Junta	Separación de raíz [mm]	Talón [mm]	Ángulo del bisel
A tope en V	2	0	60°

En cuanto a la posición de soldadura se optó por la 1G, con la finalidad de obtener los resultados más eficientes, ya que es una de las posiciones más utilizadas y factibles de efectuar.

### **Procedimiento de obtención de probetas**

Para la generación de las discontinuidades en los cordones de soldadura se toma en cuenta la norma AWS B1.11, que es un estándar utilizado como guía en el método de inspección visual. Dentro del contenido de AWS B1.11 se explica el origen de formación de las discontinuidades.

Con la información de la norma AWS B1.11, la experiencia del soldador y la manipulación de ciertos factores fue posible obtener las discontinuidades que se requerían.

Las discontinuidades generadas son:

1. Inclusiones de escoria del electrodo E7018
2. Falta de fusión entre pases
3. Falta de fusión en la raíz del cordón de soldadura
4. Poros dispersos

5. Fisura longitudinal
6. Poros agrupados
7. Inclusiones de tungsteno
8. Falta de penetración en la raíz del cordón de soldadura
9. Probeta libre de discontinuidades

Antes de efectuar los pases de soldadura se elabora y presenta el documento con las especificaciones del proceso de soldadura (WPS) precalificado. El WPS es un documento que se entrega al soldador para que lo utilice como guía, con el propósito de obtener soldaduras de buena calidad; cabe recalcar que en este caso el procedimiento estará enfocado a crear discontinuidades.

Para el procedimiento de soldadura se deben tomar en cuenta los siguientes pasos:

1. Alinear y sujetar del material base por medio de placas soldadas en los extremos de la junta.
2. Soldar los pases, siguiendo el WPS respectivo de cada probeta
3. En cada pase posterior de relleno limpiar con grata impidiendo la generación de discontinuidades no deseadas.



## **Generación de discontinuidades**

Para la generación de discontinuidades se procede a revisar literatura sobre cómo se originan las discontinuidades en una muestra soldada y además experimentar con los procesos de soldadura para verificar que sí se estén dando las variables de soldadura para obtener los defectos deseados para ser analizados según normativas.

### **Inclusiones de escoria del E7018**

Para originar esta discontinuidad, el primer pase de soldadura no se limpió adecuadamente la escoria generada mediante el uso esmeril. De esta manera, la escoria formada queda atrapada en los pases siguientes. El último pase sella la discontinuidad evitando modificar el desperfecto provocado.

### **Falta de fusión entre pases**

Para la falta fusión entre el metal base y de aporte, el soldador en el pase número 3 y 4 desvía la dirección de electrodo hacia uno de los biseles aumentando la velocidad de avance en la longitud del desperfecto, evitando que la soldadura se pueda extender a lo ancho de la superficie.

### **Falta de fusión en la raíz del cordón de soldadura**

El pase de raíz en la placa soldada de esta discontinuidad tiene una desvia-

ción en uno de sus extremos en la mitad de la longitud del cordón de soldadura, justo en esta parte también se aumentó la velocidad de avance y el amperaje fue disminuido. Para el pase número 2 se procura aumentar la velocidad de avance sobre el desperfecto provocado, con el objetivo de evadir la discontinuidad y no modificarla.

### **Poros dispersos**

El primer pase de soldadura en las placas donde se pretendía obtener poros dispersos fue realizado de forma normal, para el segundo y tercer pase se utilizaron electrodos humedecidos 24 horas antes, aumentando el exceso de humedad e hidrógeno en la atmósfera de la soldadura. También al electrodo se le quitaron pequeñas partes de su revestimiento a lo largo de su longitud para dar inestabilidad al arco de soldadura.

### **Fisura longitudinal**

El pase inicial se efectuó con 92 A y velocidad de avance de 1.7 mm/s para evitar el exceso de penetración que podría influenciar en el espesor total de la probeta. Al término de cada uno de los siguientes pases, se realizó un enfriamiento brusco sumergiendo la probeta en recipiente con hielo seco y alcohol industrial, alcanzando temperaturas de  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  para que de esta manera se induzcan tensiones internas de contracción y



crecimiento de grano, aumentando así la fragilidad del material y generando fisuras.

### **Poros agrupados**

En lo que respecta a la probeta con poros agrupados el primer pase efectuó con 95 amperios con el propósito de no obtener mucha penetración en la raíz y dar un pase de sellado por el lado de la raíz de la probeta. En el siguiente pase se utilizó nuevamente un electrodo humedecido y el arranque de la soldadura fue desde la mitad de la longitud de la probeta hacia los extremos.

### **Inclusiones de tungsteno**

Se debe aclarar que en un proceso SMAW no se podrán encontrar inclusiones de tungsteno, ya que este tipo de defectos son característicos de un proceso GTAW o TIG. El pase de raíz fue efectuado normalmente. Para lograr el defecto requerido lo que se realizó fue la colocación a propósito de pequeños trozos de tungsteno durante el segundo pase de soldadura.

### **Falta de penetración en la raíz del cordón de soldadura**

Para la generación de la falta de penetración se manipuló el pase de raíz, donde se dejó una pequeña parte sin

soldar en la mitad de la longitud de la junta. Los siguientes dos pases realizados una mayor velocidad de avance principalmente en la zona donde se dejó la falta de penetración para evitar el daño del defecto ya provocado.

### **Probeta libre de discontinuidades**

Finalmente, y con fines didácticos se elaboró una probeta en donde no exista la presencia de algún tipo de discontinuidad o defecto.

### **Ensayo de probetas por radiografía industrial**

Con la obtención de las probetas, el siguiente paso consiste en inspeccionar la junta soldada para observar e interpretar qué discontinuidades se pudieron generar durante el proceso de soldadura, previo a esto se requiere realizar ciertos ajustes y calibraciones a los equipos, acorde con las probetas que se van a utilizar.

En la tabla 3 indicada las variables a tomar en cuenta antes de incidir el haz de radiación X. La película radiográfica utilizada es una AGFA Structurix Rollpac especificación D7.





**Tabla 3.** Variables a tomar en cuenta antes del realizar la radiografía.

Discontinuidad	Espesor de la probeta [mm]	Energía [kV]	t exp [s]	IQIs
Inclusiones de escoria del E7018	12	140	30	Set B
Falta de fusión entre pases	13	140	40	Set B
Falta de fusión en la raíz del cordón de soldadura	13	140	40	Set B
Poros dispersos	14	140	51	Set B
Fisura longitudinal	14	140	51	Set B
Poros agrupados	13	140	40	Set B
Inclusiones de tungsteno	14	140	51	Set B
Falta de penetración en la raíz del cordón de soldadura	13	140	40	Set B
Probeta libre de discontinuidad	15	140	69	Set B

### **Análisis e identificación de las discontinuidades observadas en las películas radiográficas**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las probetas por radiografía.

#### **Inclusiones de escoria del ELECTRODO E7018**

En la película radiográfica de la probeta A mostrada en la figura 2 se puede observar la presencia de discontinuidades esféricas-irregulares de color negro y de gran tamaño, estas características son pertenecientes a las denominadas "Inclusiones de Escorias", y a consecuencia del electrodo que se utilizó, estas escorias son del electrodo E7018.



Figura 2. Probeta A: Inclusiones de escoria del E7018



### Falta de fusión entre pases

En la figura 3 se puede apreciar la imagen de una película radiográfica de la probeta B, donde en uno de los bordes del cordón de soldadura presenta una discontinuidad de longitud considerable y anchura de tamaño medio y con bordes bien definidos. De lo que se observa el material de aporte no llega a fusionar-

se con uno de los extremos del material base, seguramente debido a que el arco de soldadura no fue el correcto, en consecuencia, lo que se ha formado es lo que se denomina "Falta de fusión entre pases de soldadura". El color del defecto es negro, ya que se pudo acumular escoria en el espacio de la falta de fusión.



Figura 3. Probeta B: Falta de fusión entre pases

### Falta de fusión en la raíz del cordón de soldadura

La probeta C ilustrada con la imagen radiografía en la figura 4 se visualiza una línea longitudinal, alargada y delgada ubicada en el extremo de la raíz del cordón de soldadura. El color de la discontinuidad es algo opaco, lo que hace

referencia a que puede existir algo de escoria atrapada en el espacio libre. Este tipo de discontinuidad es denominado "Falta de fusión en la raíz del cordón de soldadura". Esta discontinuidad podría confundirse con una fisura, pero debido a su ubicación y forma geométrica esta posibilidad queda descartada.





Figura 4. Probeta C: Falta de fusión en la raíz del cordón de soldadura

### Poros dispersos

En la imagen radiográfica de la figura 5 se puede evidenciar la presencia de varios puntos negros pequeños y

bien definidos de forma esferoidal muy regular. De esta manera, puede concluir que se tratan de "Poros dispersos" a lo largo del cordón de soldadura.



Figura 5. Probeta D: Poros dispersos



### Fisura longitudinal

La figura 6 muestra la imagen de la película radiográfica de la probeta D, en donde se observa con un poco de dificultad una línea longitudinal rectilínea

muy fina y oscura en una zona de difícil identificación, pero que posiblemente se genera desde el pase de raíz. A este tipo de discontinuidad se la ha nombrado como "Fisura longitudinal".



Figura 6. Probeta E: Fisura longitudinal

### Poros agrupados

La figura 7 ilustra la imagen de la radiografía tomada a la probeta F, en donde se puede ver una agrupación de pequeños puntos redondeados de color negro, como se identificó anteriormen-

te se tratan de pequeños poros. Debido a que se encuentran agrupados en una zona claramente definida, a esta discontinuidad se la conoce como "Poros agrupados".



Figura 7. Probeta F: Poros agrupados



### Inclusiones de tungsteno

En la película radiográfica de la probeta G expuesta en la figura 8, se nota claramente la presencia de un contraste diferente al del cordón de soldadura. Este contraste es de forma irregular

y de color blanco, lo que hace referencia a que se trata de un material distinto al del electrodo y metal base, que para este caso fue tungsteno. Por lo tanto, se trata de "Inclusiones de tungsteno"



Figura 8. Probeta G: Inclusiones de tungsteno

### Falta de penetración en la raíz del cordón de soldadura

En la placa radiográfica de la figura 9 correspondiente a la probeta H, se evidencia una discontinuidad longitudinal gruesa y rectilínea exactamente en el centro del cordón de soldadura, esto

quiere decir que existe una separación entre las placas de material base y que no hay material de aporte. Esta discontinuidad se la conoce como "Falta de penetración en la raíz del cordón de soldadura".



Figura 9. Probeta H: Falta de penetración en la raíz del cordón de soldadura



### Probeta libre de discontinuidades

Finalmente, en la figura 10 se puede observar la radiografía de la probeta I, en donde se visualiza la no exis-

tencia de cualquier tipo de discontinuidades. Esta película radiográfica muestra cómo debería presentarse un cordón de soldadura bien elaborado.



Figura 10. Probeta I: Probeta libre de discontinuidades

### Ensayo de probetas por ultrasonido

Para poder ensayar las probetas soldadas bajo el método ultrasónico se debe tomar en cuenta el instrumento que se va a utilizar en la inspección, también se deben realizar los cálculos de distancias de inspección y la calibración del equipo.

La norma AWS D1.1 estipula que la frecuencia del transductor para inspeccionar con haz angular debe estar entre 2 y 2.5 MHz, establece el uso zapatas para haz transversal con ángulo de 70° de refracción en el acero, para placas soldadas a tope con ranura.

Con la realización del proceso de calibración el equipo de Ultrasonido está

listo para inspeccionar las probetas soldadas.

Un paso previo a la inspección de las probetas, es el cálculo de la distancia a la cual los transductores con la zapata deben ubicarse. Esta distancia es conocida en inglés como "skip distance" y expresada mediante la fórmula (1).

$$\text{skip distance} = 2T \tan \theta_R \quad (1)$$

Con todos los lineamientos, calibraciones y cálculos realizados, se procede a inspeccionar las probetas soldadas por ultrasonido, siguiendo la técnica de barrido de inspección que sugiere la norma AWS D1.1.



### **Análisis de las curvas obtenidas mediante el ensayo de ultrasonido convencional**

Para el análisis de las curvas obtenidas mediante ultrasonido se debe seguir el procedimiento en el código AWS D1.1 observando las recomendaciones para cada uno de los casos analizados en las muestras soldadas de acero estructural.

#### **Inclusiones de escoria del ELECTRODO E7018**

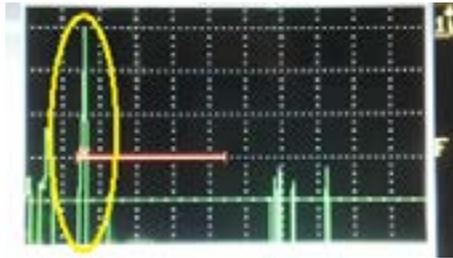


Figura 11. Probeta A: Inclusiones de escoria del E7018

#### **Falta de fusión entre pases**

La falta de fusión entre pases se presenta en forma lineal y no muy ancha, como se visualizó en la radiografía correspondiente, es por esto que el espacio libre que se genera por la falta de fusión entre el material base y el de aporte sea ideal para mostrar reflejos de haz ultrasónico.

Entonces la falta de fusión entre pases se representa con un pico grande

En el ensayo por ultrasonido la inclusión escoria del electrodo E7018 es representada por una indicación de amplitud muy considerable, ya que, debido a su gran tamaño, en comparación con otras discontinuidades, el haz ultrasónico posee mayor superficie reflectora.

La inclusión de escoria es una discontinuidad de gran volumen, es por esto que generalmente existe poca presencia de haces secundarios reflejados de la parte posterior de la probeta, tal como se observa en la figura 11.

acompañado de algunos picos de menor amplitud como consecuencia de los reflejos producidos a lo largo de esta discontinuidad, tal como se observa en la figura 12.

Por efecto de tener una discontinuidad delgada, es motivo de la generación de picos secundarios provenientes de los reflejos del haz ultrasónico al chocar con la pared posterior de la probeta.



Figura 12. Probeta B: Falta de fusión entre pases

### Falta de fusión en la raíz del cordón de soldadura

Tal como se mencionó anteriormente una falta de fusión crea reflejos de haz ultrasónico a consecuencia del espacio libre que se genera.

Una falta de fusión en la raíz del cordón de soldadura presenta mayor espacio libre para la generación de reflejos de ultrasonido, por lo tanto, estos picos serán de mayor tamaño.

La representación de la falta de penetración en la raíz es mediante un pico grande acompañado seguidamente de varios picos medianos, como se ilustra en la figura 13. Los picos secundarios disminuyen en número y amplitud debido a que existen menos reflexiones en la pared posterior de la probeta.

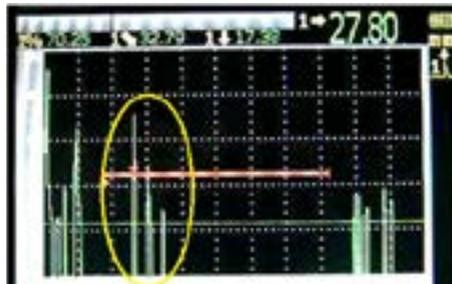


Figura 13. Probeta C: Falta de fusión en la raíz del cordón de soldadura

### Poros dispersos

Los poros pueden ser considerados como pequeñas burbujas de aire generadas por los gases característicos presentes en el proceso de soldadura SMAW. Estas burbujas son pequeños espacios libres que al ser incididos por haces de ultrasonido generan reflejos angostos y bien definidos.

Es por esto que un poro es representado en una pantalla A-Scan como un solo pico muy relevante. Si se aprecia más de un pico distanciados considerablemente uno de otro, se puede tratar

de poros aledaños, como se ve en la figura 18, ya que como se apreció en la radiografía de esta probeta existían gran cantidad de poros en toda la soldadura.

Otra característica en la pantalla ultrasónica cuando se tenga la presencia de poros dispersos en el cordón de soldadura, es la generación de gran cantidad de picos casi del mismo tamaño, tal como se visualiza en la parte derecha de la figura 14, esto como consecuencia de las reflexiones secundarias derivadas del choque del haz con la pared posterior de la probeta.



Figura 14. Probeta D: Poros dispersos

### Figura longitudinal

Las fisuras longitudinales en general son separaciones lineales muy finas de material, generadas por la presencia de esfuerzos internos y en este caso longitudinales. Estas separaciones a pesar de ser muy finas siguen siendo espacios libres que generan reflexiones muy relevantes del haz ultrasónico e incluso casi son del mismo tamaño.

Por lo tanto, una fisura longitudinal en un ensayo ultrasónico se presentará como varios picos algo distanciados entre sí y de amplitud similar, tal como se observa en la figura 15.

Adicionalmente algunos ecos secundarios con mayor distanciamiento entre ellos, producto de las reflexiones con la pared posterior de la probeta.



Figura 15. Probeta E: Fisura longitudinal

### Poros agrupados

Como ya se analizó, un poro es representado en una pantalla ultrasónica como un único pico, en consecuencia, la representación de poros agrupados debe ser varios picos no muy distanciados entre sí y casi de la misma amplitud, como se puede ver en la figura 16.

Al igual que en los poros dispersos, en los agrupados la salida del haz se caracteriza por la presencia gran cantidad de picos casi del mismo tamaño, como consecuencia de reflexiones secundarias de la pared posterior.



Figura 16. Probeta F: Poros agrupados

### Inclusiones de tungsteno

Las indicaciones de las inclusiones de tungsteno en un ensayo ultrasónico se representan por la presencia

de un pico de amplitud considerable, acompañado de algunos picos de amplitud menor, esto se puede observar en la figura 17.

Además, se tiene la presencia de varios ecos secundarios de amplitud muy reducida en comparación con el pico de la inclusión de tungsteno.



Figura 17. Probeta G: Inclusiones de tungsteno

### Falta de penetración en la raíz del cordón de soldadura

Una falta de penetración es una discontinuidad volumétrica enorme ya que existe un gran espacio libre entre las placas de material base y esto en un ensayo ultrasónico provoca que exista un pico de gran amplitud a causa de la primera gran reflexión del haz ultrasónico.

Por consiguiente, una falta de penetración en la raíz del cordón de soldadura se presenta como un pico de amplitud muy elevada acompañada de algún pico de amplitud menor tal cual como se aprecia en la figura 18. Los picos secundarios que se observan son algo dispersos y de baja amplitud como consecuencia del gran tamaño de la discontinuidad presente.

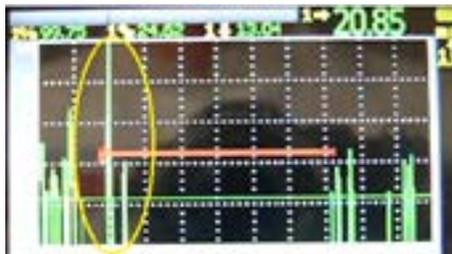


Figura 18. Probeta H: Falta de penetración en la raíz del cordón de soldadura



### Probeta libre de discontinuidades

En una probeta que se encuentre libre de discontinuidades, la pantalla de su ensayo ultrasónico no presentará pico alguno, solamente se visualizarán los picos de entrada del ultrasonido al mate-

rial y los picos de la pared posterior de la probeta como se muestra en la figura 19, en la mitad de estos dos no se encontrará nada, ya que en el recorrido del camino sónico no es interrumpido.

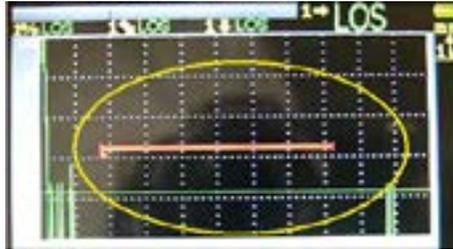


Figura 19. Probeta I: Probeta libre de discontinuidades

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A considerar lo observado en las películas radiográficas de las probetas examinadas con las diferentes discontinuidades en cada una de ellas, el método de radiografía industrial analiza e identifica a las inclusiones de escoria, poros dispersos, poros agrupados, inclusiones de tungsteno y falta de penetración como discontinuidades volumétricas, con una amplia área de oscuridad visible en la película, resaltando los desperfectos del cordón de soldadura en la radiografía. A diferencias de esto, la falta de fusión, fisura longitudinal y falta de fusión en la raíz se las considera como indicaciones

planas, lineales y finas, cuya área de oscurecimiento es relativamente pequeña al ser comparada con las discontinuidades volumétricas, predominando su longitud antes que su espesor, casi invisibles al ojo humano.

En la aplicación del método de ultrasonido, los datos a analizar se observan en la pantalla del equipo y se considera que cada una de estas imágenes representa el barrido de cada probeta, definiendo la discontinuidad encontrada en cada una de ellas con picos o ecos que caracterizan cada indicación, sin tomar importancia si es una discontinui-



dad volumétrica o planar, esto se debe a que la sensibilidad de detección es directamente proporcional a la frecuencia con la que se maneja el transductor.

El factor clave para la sustitución de la radiografía industrial por el método ultrasónico se centra en la probabilidad

de detección de discontinuidades con un equipo no contaminante, menos costoso, rápido en cuanto a operación y ejecución en tiempo real, con alta sensibilidad y muy portátil, características sobresalientes en esta técnica.

## CONCLUSIONES

La sección 6 de la norma AWS D1.1 presenta información detallada referente a los parámetros que deben cumplir las estructuras o los elementos soldados antes, durante y después de la realización de un ensayo ultrasónico de juntas soldadas a tope, el mismo estándar no es muy claro en cuanto a la ejecución de una prueba con radiación X, lo que favorece la aplicación de la inspección por ultrasonido.

El ensayo radiográfico ayuda a identificar la forma geométrica y dimensiones de una discontinuidad específica y con ello su posterior evaluación, algo muy parecido sucede con la prueba ultrasónica, las discontinuidades según la AWS D1.1 son categorizadas alfabéticamente en cuatro grupos según la intensidad de pérdida de decibelios del haz reflejado. Las discontinuidades pertenecientes al grupo A son de relevancia baja, es decir son indicaciones pequeñas, las de los grupos B y C son de relevan-

cia media y las del grupo D son de alta relevancia o indicaciones muy grandes que por lo general son rechazadas. Esta categorización ayuda a generar una rápida evaluación, algo que tarda más con la radiografía industrial.

Del análisis realizado a las películas radiográficas de las probetas, se pudo observar y determinar que la mayoría de las discontinuidades presentan una coloración negra, por lo que se debe tener muy en cuenta su forma geométrica y ubicación en las juntas soldadas, para así llegar a asegurar que se trata de un determinado tipo de discontinuidad.

Una característica importante que presenta el ultrasonido como técnica de evaluación del acero estructural en comparación con la radiografía, está al momento de localizar con exactitud la posición de una determinada discontinuidad, algo que no es evidente con el ensayo radiográfico, ya que en este solo se puede identificar el tipo de defecto.





Los resultados observados en el ensayo con radiografía industrial a través de la visualización en las películas radiográficas, especifica dos tipos de discontinuidades; una volumétrica y la otra lineal o planar que se pueden diferenciar a través de áreas de oscurecimiento en la placa radiográfica.

A base de lo analizado y observado la radiografía es particularmente ade-

cuada para la detección e identificación de defectos volumétricos tales como, inclusiones sólidas, penetración incompleta y porosidades, además, la detección de fallas por ultrasonido es adecuada para la detección y dimensionamiento de defectos planares tales como grietas y falta de fusión.

## RECOMENDACIONES

Para ejecutar correctamente el ensayo de radiografía industrial, se deben calcular minuciosamente los tiempos de exposición de radiación a las probetas, ya que con un exceso o falta de exposición no se podría apreciar la existencia o no de discontinuidades.

En relación al ensayo por ultrasonido, seguir paso a paso los procedimientos de selección y configuración de parámetros, calibración del equipo y técnicas de inspección, previo a la realización del ensayo, con el fin de obtener resultados altamente confiables y no haya la necesidad de verificarlos con otro método de inspección.

Utilizar el apropiado equipo de protección personal al momento de ejecutar los distintos ensayos no destructivos, en especial cuando se trabaje con radiación ionizante.

Realizar todas las calibraciones previas en el equipo de ultrasonido cada vez que se realice este ensayo, de acuerdo con la Norma AWS D1.1, para lograr una excelente visualización y ubicación de la discontinuidad en el instante que se va a realizar el barrido, en caso de no hacerlo provocara resultados erróneos.





## BIBLIOGRAFÍA

- Aloraier, A., Almazrouee, A., Shehata, T., & Price, J. (2012). Role of welding parameters using the flux cored arc welding process of low alloy steels on bead geometry and mechanical properties. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 540-547.
- ANSI/AWS-A3.0. (2001). Norma de Términos y Definiciones de Soldadura. Florida: AWS.
- ANSI/AWS-B1.10. (2000). Guide for the Nondestructive Examination of Welds. Florida.
- ANSI/AWS-B1.11. (2000). Guía para el examen visual de las soldaduras. Florida.
- ASME-V. (2013). Boiler & Pressure Vessel Code, II. Materials, Part D. Properties (Customary).
- ASTM-E1316-15. (2015). Standard Terminology for Nondestructive Examinations 1. In *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM-E94-04. (2010). Standard Guide for Radiographic Examination. ASTM International, 13.
- AWS-D1.1/D1.1. (2010). Structural Welding Code-Steel.
- Ayala, F., & Sango, M. (1987). Procedimientos tipo para inspección de uniones soldadas por los métodos de radiografía industrial y ultrasonido. Quito, Ecuador.
- Fernández, A. (1994). Ensayos No Destructivos por Ultrasonido. Madrid.
- General-Electric. (2007). Industrial Radiography. *Optometry and Vision Science*, 189.
- Gómez, E. (2006). Ultrasonido Nivel II. Madrid: FC Editorial. Obtenido de: [https://books.google.com.ec/books?id=tUD\\_dyFBm1w-C&printsec=frontcover#v=one-page&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=tUD_dyFBm1w-C&printsec=frontcover#v=one-page&q&f=false)
- Grujicic, M., Ramaswami, S., Snipes, J., Yavari, R., & Yen, C. (2014). Optimization of Gas Metal Arc Welding (GMAW) Process for Maximum Ballistic Limit in MIL A46100 Steel Welded All-Metal Armor. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 229-244.
- Kasban, H., Zahran, O., Arafa, H., El-Kordy, M., Elaraby, S. M. S., & Abd El-Samie, F. E. (2011). Welding defect detection from radiography images with a cepstral approach. *NDT and E International*, 44(2), 226–231. <http://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.10.005>
- Ly, D. (2015). Inspección de las uniones soldadas de juntas a tope de penetración completa con diseño de junta en simple "V" para un rango de espesores de 8 a 25 mm





- mediante el método de ensayo de ultrasonido y la técnica de arreglo de fases (Phased Array). Lima, Perú.
- Mahummad, Z., Ahmed, S., Rasool, S., Ali, U., & Rehman, S. (2009). Effect of welding techniques (GTAW & SMAW) on the microstructure & mechanical properties of mild steel SA 516 Gr. 70. *Electrical Engineering*, 6. Obtenido de <http://pecongress.org.pk/images/upload/books/35-40%20Effect%20of%20WELDING%20final%7B15%7D.pdf>
- Mundry, E. (1972). Defect evaluation by ultrasonics, (October), 290–297.
- OLYMPUS. (2012). *Phased Array Testing Basic Theory for Industrial Application*. Toronto: Olympus Editorial.
- Tenemaza, A. (2009). Caracterización de un defecto en uniones soldadas utilizando el método de ultrasonido. Riobamba, Ecuador.
- Valavanis, I., & Kosmopoulos, D. (2010). Multiclass defect detection and classification in weld radiographic images using geometric and texture features. *Expert Systems with Applications*, 37(12), 7606–7614. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.04.082>.
- Vineet, N., & Somnath, C. (2013). Critical Assessment of Temperature Distribution in Submerged Arc Welding Process. *Journal of Advance in Materials Science and Engineering*, 9.



