



NUEVAS REALIDADES PARA LA EDUCACIÓN EN INGENIERÍA:  
CURRÍCULO, TECNOLOGÍA, MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

13 - 16  
DE SEPTIEMBRE

2022

CARTAGENA DE INDIAS,  
COLOMBIA



# **Fabricación de probetas soldadas con inclusiones de escoria y grietas inducidas durante el proceso de soldadura para uso como material didáctico en la enseñanza de ensayos no destructivos**

**Fabián Guerrero, Juan Camilo Vergel Acosta, Carlos Andrés Galán, Ana María Pérez**

**Universidad Industrial de Santander  
Bucaramanga, Colombia**

## **Resumen**

El desarrollo de diferentes industrias en Colombia ha generado la necesidad de tener personal calificado con un amplio conocimiento y experiencia en la realización de múltiples pruebas con Ensayos No Destructivos (END). Por tal motivo, se recurre a inspectores certificados, que requieren formación siguiendo prácticas internacionales recomendadas, donde se utilizan, en el proceso de entrenamiento, piezas con defectos típicos de diferentes procesos de fabricación como soldadura, conformado mecánico o fundición. Estas piezas constituyen material didáctico primordial para el estudio que, junto con la práctica en la interpretación y dimensionamiento de los defectos, mejoran la apropiación del conocimiento disciplinar del estudiante para su posterior certificación como inspector calificado. Por lo anterior, en el presente trabajo se desarrolló una metodología que permite fabricar patrones de bajo costo para la enseñanza de END, con discontinuidades inducidas durante el proceso de soldadura. Para la fabricación de los patrones se contemplaron dos defectos: inclusiones de escoria y grietas. Los defectos fueron inducidos de manera controlada no solo, modificando las variables del proceso de soldadura (corriente, velocidad de enfriamiento, etc.) sino también, por la aplicación de agentes externos como fósforo, azufre o cargas externas. Los resultados obtenidos permitieron evidenciar que la generación de defectos está directamente influenciada por las particularidades de los procesos de fabricación de los patrones. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos en la evaluación de los patrones fabricados por diversas técnicas de END.

**Palabras clave:** Enseñanza de Ensayos No Destructivos; inspección de soldadura; identificación de discontinuidades

### **Abstract**

*The development of different industries in Colombia has generated the need for qualified personnel with extensive knowledge and experience in performing multiple tests with Non-Destructive Testing (NDT). For this reason, in field is necessary the presence of certified inspectors, who require training following international recommended practices, usually, parts with typical defects from different manufacturing processes as welding, forming, or casting are used in the training process. These parts constitute essential didactic material for the study that, together with the practice in the interpretation and sizing of defects, improve the appropriation of the student's disciplinary knowledge for their subsequent certification as qualified inspectors. Therefore, in the present work, a methodology was developed that allows the fabrication of low-cost patterns for NDT teaching, with discontinuities induced during the welding process. Two defects were considered for the fabrication of the patterns: slag inclusions and cracks. The defects were induced in a controlled manner not only by modifying the welding process variables but also by the application of external agents such as phosphorus, sulfur, cold water or external loads. The results obtained showed that the generation of defects is directly influenced by the particularities of the manufacturing processes of the patterns. Finally, the results obtained in the evaluation of the manufactured patterns by different NDT techniques are presented.*

**Keywords:** Non-Destructive Testing; welding inspection; flaw detection

## **1. Introducción**

En general, los Ensayos No Destructivos (END) pueden definirse como técnicas fundamentadas en principios físicos que permiten la evaluación de cualquier tipo de pieza para determinar la presencia de discontinuidades o daños que pueden tener un efecto nocivo sobre el comportamiento en servicio del componente evaluado, esto sin alterar las propiedades físicas, químicas, mecánicas o metalúrgicas de las piezas inspeccionadas (Hellier, 2013). La soldadura es un método confiable, eficiente y económico para unir piezas metálicas por lo que es el método de unión más ampliamente empleado (Jeffus, 2009). Sin embargo, durante el proceso de soldadura pueden inducirse discontinuidades y defectos por falta de uniformidad en las características mecánicas, metalúrgicas o físicas del material o de la soldadura. Según la Sociedad Americana de Soldadura (AWS, por sus siglas en inglés), un defecto es una discontinuidad, que por su naturaleza o por el efecto acumulado generado, no cumple las normas o especificaciones mínimas aceptables. La inspección de soldaduras es uno de los campos que más demanda el uso de END. El término inspección denota una actividad de control de calidad global que incluye numerosos pasos aplicados en diferentes etapas durante la fabricación y la vida útil de un componente (Jenney, 2001). El código AWS D1.1 exige que los inspectores de soldadura estén certificados para cumplir los requisitos mínimos en cuanto a educación, formación, experiencia, conocimientos técnicos generales y agudeza visual. Durante el proceso de formación de los inspectores se realizan entrenamientos con piezas reales y patrones



soldados con defectología específica. De igual forma, el uso apropiado de las técnicas de END implica la calibración de los equipos e instrumentos, para lo cual también se recurre al uso de patrones. La fabricación de patrones para la evaluación de soldaduras mediante END se realiza bajo un control estricto de las variables del proceso para inducir intencionalmente discontinuidades conocidas, las cuales le permitirán al inspector desarrollar sus habilidades técnicas para la detección confiable de discontinuidades. En el mercado se encuentran algunas empresas que fabrican y comercializan estos patrones, sin embargo, con costos muy altos y de baja disponibilidad en el país.

Con base en lo anterior surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible elaborar patrones de bajo costo con discontinuidades controladas por medio del proceso SMAW? Para dar solución a la anterior pregunta, se diseñó un procedimiento de soldadura para la fabricación de patrones con el proceso de soldadura mencionado, modificando variables como corriente y velocidad de enfriamiento y adicionando agentes químicos para inducir la presencia de dos tipos de discontinuidades: inclusiones de escoria y grietas. Finalmente, para evaluar las discontinuidades generadas fueron ejecutados diversos END como inspección visual (IV), líquidos penetrantes visibles (LP), partículas magnéticas secas y húmedas fluorescentes (PM) y radiografía industrial con rayos X (Rx). La inspección de los patrones fabricados permitió confirmar la presencia de las discontinuidades inducidas en cuanto a su tamaño y ubicación según lo esperado para cada muestra. Sin embargo, en algunos casos, los parámetros seleccionados permitieron generar la discontinuidad deseada, pero, acompañada de discontinuidades no previstas como porosidades, socavaduras y falta fusión y de penetración.

## 2. Metodología

El proyecto se desarrolló en tres fases, inicialmente se diseñó la especificación del procedimiento de soldadura (WPS) para inducir la aparición de inclusiones de escoria y grietas en el cordón de soldadura durante el proceso de manufactura. El WPS fue diseñado con base en la parte QW de la norma ASME (ASME, 2020). Completada la fase descrita anteriormente, se fabricaron 10 patrones utilizando el proceso SMAW bajo las condiciones específicas establecidas previamente. Los patrones denominados M1, M2, M3, M4 y M5 fueron fabricados usando como metal base el acero antidesgaste MaxDur450®. Los patrones restantes se fabricaron con acero ASTM A36. Para inducir la aparición de grietas, antes de realizar el pase de presentación se agregó azufre en polvo y roca fosfórica en forma de partículas finas sólidas (Avner, 1988), formando una película de aproximadamente un milímetro de espesor sobre el cordón, finalizando el cordón de presentación se aplicó agua fría generando un choque térmico en la corona de la soldadura lo que permitió la nucleación de grietas debido al enfriamiento brusco del material. Para inducir la aparición de inclusiones de escoria se seleccionó un valor de corriente (I) inadecuada y se modificó la posición del electrodo. Finalmente, se realizó la evaluación de las muestras soldadas usando las técnicas no destructivas de inspección visual, líquidos penetrantes (ASTM, 2018), partículas magnéticas (ASTM, 2021) y Rx (ASTM, 2019), siguiendo las recomendaciones establecidas por los códigos AWS D1.1 y Código ASME para calderas y recipientes a presión (BPVC, por sus siglas en inglés) secciones 5 y 9. El proceso de soldadura se realizó según recomendación a la norma de seguridad NTP-94



(Isnht, NTP, 1998), adecuando al lugar de trabajo y las herramientas presentes, para evitar accidentes que afectara a las personas presentes en el proceso y dañar los materiales utilizados. En la tabla 1 se indican las variables usadas para la fabricación de los patrones según el tipo de defecto a inducir.

Tabla 1. Parámetros utilizados en la fabricación de los patrones en función del tipo de defecto deseado.

| <b>Parámetros constantes para todas las muestras</b>                   |  |   |   |
|--|--|---|---|
| Proceso de soldadura   | Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW)                |   |   |
| Metal base   | ASTM A36, espesor: 12 mm. Acero antidesgaste MaxDur450®, espesor: 9.36 mm. |   |   |
| Metal de relleno   | E7018 / E6010 / Acero Inoxidable 308L. Diámetro del electrodo: 3/32"       |   |   |
| Diseño de bisel  | Unión V, ángulo 60°, espacio de la raíz 0mm                                |   |   |
| Posición / Progresión  | 1G / 75° inclinación   |   |   |
| Polaridad  | Inversa  |   |   |
| <b>Variables modificadas para la obtención de defectos específicos</b> |  |   |   |
| <b>Tipo de Defecto</b>   | <b>Muestra</b>   | <b>Variables del proceso de soldadura</b>   | <b>Agentes externos utilizados</b>  |
| Grietas  | M2   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pases 2 – 3: Pase sin defectos<br/>Variables: I: 100 A; Electrodo: E6013</li> <li>▪ Pase 4: Pase sin defectos<br/>Variables: I: 140 A; Electrodo: E7018</li> <li>▪ Pase presentación: Grieta<br/>Variables: I: 150 A; Electrodo: E7018</li> </ul>  | En el último pase de relleno se adicionó azufre y roca fosfórica. En el pase de presentación se adicionó agua fría.   |
|  | M5   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pase 2: Pase sin defectos<br/>Variables: I: 120 A; Electrodo: 308L</li> <li>▪ Pase 3: Pase sin defectos<br/>Variables: I: 150 A; Electrodo: E7018</li> <li>▪ Pase presentación: Grieta<br/>Variables: I: 140 A; Electrodo: E7018</li> </ul>  |   |
|  | M9   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pases 2 - 3: Pase sin defecto<br/>Variables: I: 140 A; Electrodo: E7018</li> <li>▪ Pase 4: Pase sin defecto<br/>Variables: I: 150 A; Electrodo: E7018</li> <li>▪ Pase presentación: Grieta<br/>Variables: I: 160 A; Electrodo: E7018</li> </ul>  |   |
|  | M10  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pases 2 - 3: Pase sin defectos<br/>Variables: I: 100 A; Electrodo: E6013</li> <li>▪ Pase 4: Pase sin defectos<br/>Variables: I: 120 A; Electrodo: 308L</li> <li>▪ Pase presentación: Grieta<br/>Variables: I: 140 A; Electrodo: E7018</li> </ul>   |   |
| Inclusión de escoria   | M3   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pase 2: Pase sin defectos<br/>Variables: I: 120 A; Electrodo: 308L</li> <li>▪ Pases 3 – 4 y 5<br/>Variables: I: 140 A; Electrodo: E7018</li> </ul>   | Para generar la inclusión de escoria se modificó la posición del electrodo en el momento de hacer el pase de soldadura y se seleccionó una intensidad de corriente no adecuada. |
|  | M4   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pase 2: Pase sin defecto<br/>Variables: I: 100 A; Electrodo: E6013</li> <li>▪ Pase 3: Pase sin defecto<br/>Variables: I: 120 A; Electrodo: 308L</li> <li>▪ Pase 4: Pase sin defecto<br/>Variables: I: 140 A; Electrodo: E7018</li> <li>▪ Pase presentación:<br/>Variables: I: 150 A; Electrodo: E7018</li> </ul> |   |



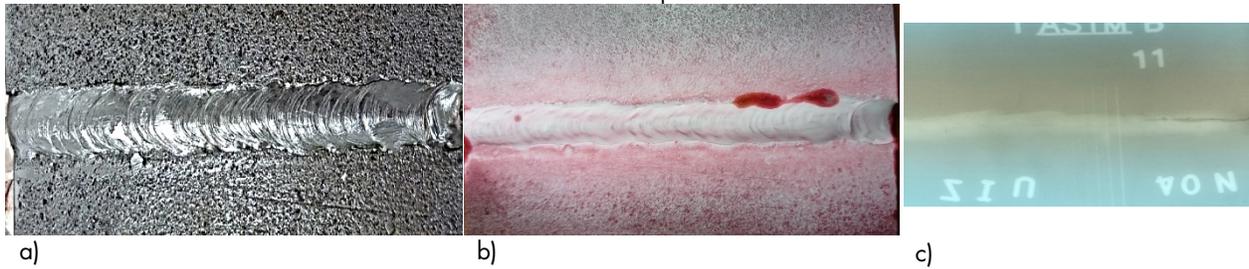
|    |   |  |
|----|---|--|
| M6 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pases 2 – 3 – 4: Pases sin defectos<br/>Variables: I: 150 A; Electrodo: E7018</li> <li>▪ Pase presentación:<br/>Variables: I: 140 A; Electrodo: E7018</li> </ul>   |  |
| M7 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pases 2 - 3: Pase sin defecto<br/>Variables: I: 140 A; Electrodo: E7018</li> <li>▪ Pase 4: Pase sin defecto<br/>Variables: I: 150 A; Electrodo: E7018</li> <li>▪ Pase presentación:<br/>Variables: I: 160 A; Electrodo: E7018</li> </ul> |  |
| M8 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pase 2 – 3: Pase sin defecto<br/>Variables: I: 100 A; Electrodo: E6013</li> <li>▪ Pase 4 – 5:<br/>Variables: I: 140 A; Electrodo: E7018</li> </ul>   |  |

### 3. Resultados y discusión

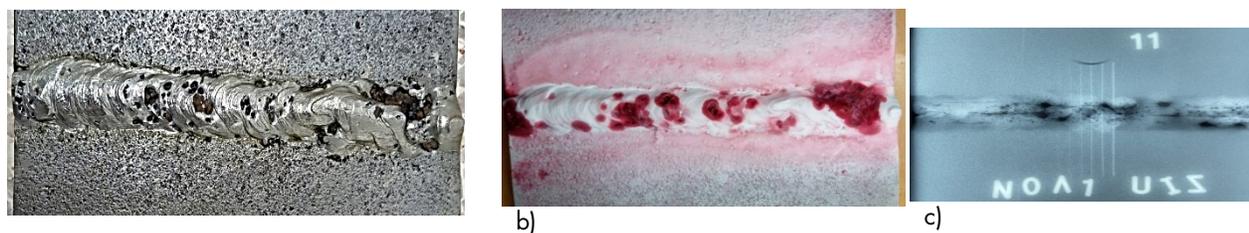
La evaluación de los patrones se realizó usando las técnicas de END mencionadas en la metodología. El patrón M1 presenta poros internos que fueron detectados por Rx, dichas discontinuidades no fueron observadas por LP. En esta muestra no se detectaron inclusiones de escoria ni grietas, pero, se observaron socavaduras a partir de la IV. En el patrón M2 se encontró una grieta que, aunque no pudo observarse por IV fue revelada por LP y Rx. El patrón M3 presenta porosidad agrupada, inclusiones de escoria y socavaduras, todas las discontinuidades son apreciables por IV y confirmadas por los otros END realizados. En el patrón M4 se encontró porosidad aislada y socavaduras observables por IV y LP, se presume que las inclusiones de escoria que querían inducirse en la línea de fusión fueron eliminadas durante la limpieza. La evaluación por Rx permitió evidenciar falta de penetración en el cordón de soldadura. En el patrón M5 fue posible observar la propagación de una grieta a partir de la coalescencia de la porosidad encontrada a lo largo del cordón. El patrón M6 presenta porosidad agrupada y socavaduras observables por IV y LP. Se encontró porosidad interna por medio del ensayo de Rx. En el patrón M7 se observó la presencia de porosidad y falta de fusión evidenciadas por medio de IV y LP, la inspección con Rx determinó que adicionalmente se produjo falta de penetración. El patrón M8 presenta inclusiones de escoria detectadas por IV y PM y falta de fusión que pudo evidenciarse por IV y LP, se determinó adicionalmente, que la muestra presenta falta de penetración detectada por medio de Rx. En el patrón M9 se observaron poros agrupados y alineados tanto por IV como por LP, el examen por Rx permitió establecer la presencia de una grieta interna. De igual forma, el patrón M10 presenta porosidad observable por IV y LP, adicionalmente, fue posible detectar la presencia de una grieta superficial por medio de PM. En las figuras 1-10 se presentan los resultados obtenidos para cada patrón evaluado por diversos END.



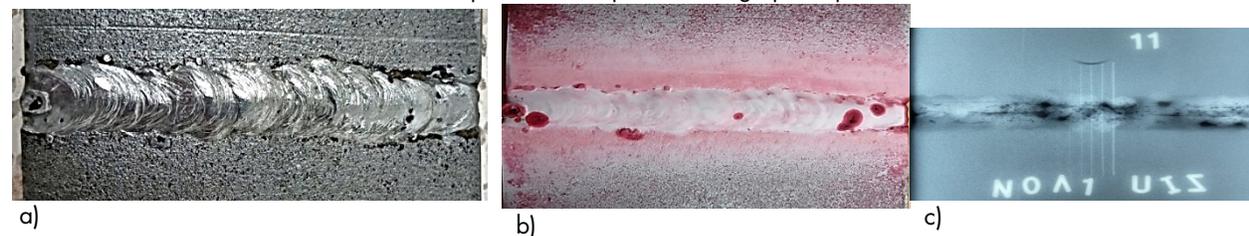
a) b) c)  
 Figura 1. Evaluación por END del patrón M1. En la figura 1a) se observan socavaduras por IV, en la figura 1b) no es posible detectar ningún tipo de discontinuidad por LP, la figura 1c) muestra la presencia de porosidad interna determinada por Rx.



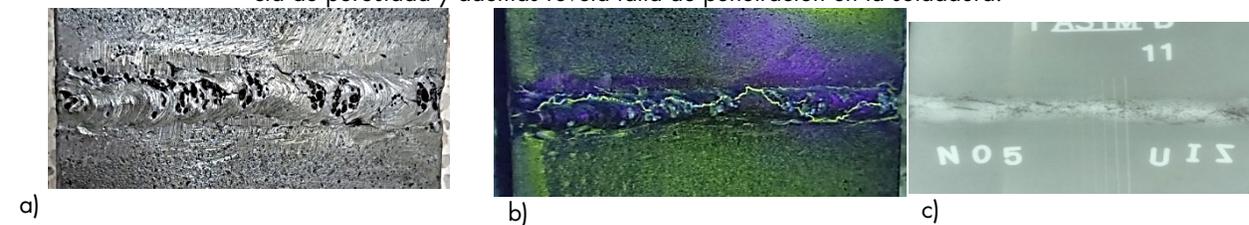
a) b) c)  
 Figura 2. Evaluación por END del patrón M2. En la figura 2a) no se observan discontinuidades por IV, en la figura 2b) se observa una grieta revelada por LP, la figura 2c) confirma la presencia de una grieta por Rx.



a) b) c)  
 Figura 3. Evaluación por END del patrón M3. En la figura 3a) se observa porosidad agrupada, inclusiones de escoria y socavaduras reveladas por IV, en la figura 3b) se confirma la presencia de porosidades por LP, la figura 3c) confirma la presencia de porosidad agrupada por Rx.



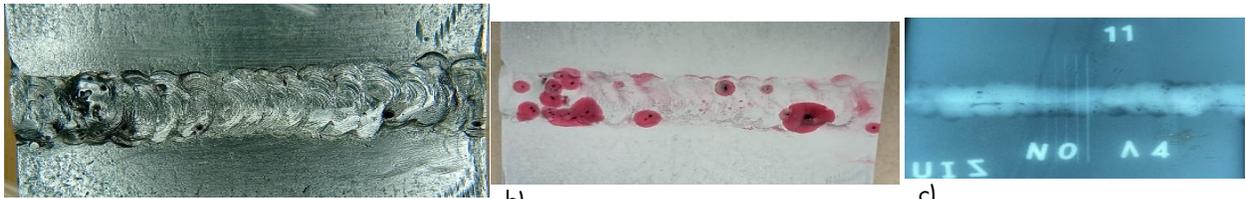
a) b) c)  
 Figura 4. Evaluación por END del patrón M4. En la figura 4a) se observa porosidad aislada y socavaduras reveladas por IV, en la figura 4b) se confirma la presencia de porosidades por LP, la figura 4c) confirma por Rx la presencia de porosidad y además revela falta de penetración en la soldadura.



a) b) c)  
 Figura 5. Evaluación por END del patrón M5. En la figura 5a) se observa porosidad agrupada revelada por IV, en la figura 5b) se observa una grieta a lo largo del cordón de soldadura por PM, la figura 5c) confirma por Rx la presencia de una grieta a lo largo del cordón de soldadura.



a) b) c)  
Figura 6. Evaluación por END del patrón M6. En la figura 6a) se observa porosidad agrupada, inclusiones de escorias y sovacaduras reveladas por IV, en la figura 6b) se confirma la presencia de porosidad por LP, la figura 6c) revela por Rx la presencia de porosidad interna en el cordón de soldadura.



a) b) c)  
Figura 7. Evaluación por END del patrón M7. En la figura 7a) se observa porosidad y falta de fusión reveladas por IV, en la figura 7b) se confirma la presencia de porosidad por LP, la figura 7c) revela por Rx la presencia de porosidad interna y falta de penetración del cordón de soldadura.



a) b) c)  
Figura 8. Evaluación por END del patrón M8. En la figura 8a) se observa falta de fusión e inclusiones de escoria reveladas por IV, en la figura 8b) se confirma la presencia de inclusiones de escoria por PM, la figura 8c) revela por Rx la presencia de porosidad interna, falta de fusión y falta de penetración del cordón de soldadura.



a) b) c)  
Figura 9. Evaluación por END del patrón M9. En la figura 9a) se observa porosidad y una grieta revelada por IV, en la figura 9b) se confirma la presencia de porosidad por LP, la figura 9c) revela por Rx la presencia de porosidad interna, grietas a lo largo del cordón de soldadura.



a) b) c)  
Figura 10. Evaluación por END del patrón M10. En la figura 10a) se observa porosidad alineada y grietas reveladas por IV, en la figura 10b) se confirma la presencia de porosidad alineada por LP, la figura 10c) revela por PM la presencia de una grieta que se propaga a lo largo del cordón de soldadura.

En el proceso de soldadura se identificó que un aumento en la intensidad de corriente tiene un efecto significativo sobre la aparición de porosidades en el cordón de soldadura, especialmente cuando se sobrepasan los 140A. La presencia de porosidad deteriora la resistencia del metal de soldadura en comparación con el metal base (Thekkuden, D. T, et al. 2018). Los poros generalmente son puntos críticos para la acumulación de esfuerzos dando como resultado puntos frágiles a partir de los cuales se puede generar la nucleación y propagación de grietas. Por tal motivo, controlando este parámetro es posible generar grietas en los cordones de soldadura de los patrones, como se constató en las muestras M9 y M10. Es bien sabido que el azufre genera fragilización del hierro y sus aleaciones, así pues para una combinación de altas tensiones y concentración de azufre, es de esperarse que el material presente fisuración en la región contaminada (Bika, D., et al. 1995). Las tensiones podrían estar dadas por las restricciones geométricas del cordón, por la contracción experimentada por el metal que está solidificando, por la diferencia de conductividad térmica entre el metal base y el metal de soldadura, entre otros factores (Coniglio, N., et al. 2015). En el último pase de relleno de las muestras M2, M5, M9 y M10 se aplicó azufre y roca fosfórica con el fin de fragilizar el cordón, sumado a un enfriamiento instantáneo con agua, lo que se mostró eficaz para la generación del agrietamiento esperado. La generación de inclusiones de escoria como discontinuidades inducidas resulta ser complejo pues depende en gran parte de las habilidades del soldador, se evidenció que mantener un arrastre constante del electrodo junto con el desarrollo del cordón de soldadura en una sola dirección evita la aparición de inclusiones de escoria en el cordón de soldadura. Adicionalmente, se observó que la aplicación de agua para acelerar el enfriamiento, lo que es conveniente para la generación de grietas, es contraproducente para mantener en el cordón de soldadura las inclusiones de escoria inducidas pues se inhibe la adhesión de la escoria al metal de soldadura lo que tiene como consecuencia una eliminación de estas en el proceso de limpieza de los patrones.

#### 4. Conclusiones

Ejecutado el presente proyecto dirigido a obtener un procedimiento para la obtención de patrones de soldadura planas con generación de grietas e inclusiones de escoria mediante el proceso SMAW, sumado a la realización del proceso de inspección y evaluación para la caracterización de los patrones se pudo concluir que:

- Las variables empleadas para la generación de grietas, aunque fueron efectivas para la aparición de la discontinuidad deseada, condujeron a la aparición de porosidades tanto alineadas como agrupadas.
- Se observaron grietas en los patrones fabricados con la adición de azufre y fósforo por lo que se puede considerar una variable fundamental para la generación de este tipo de discontinuidad. Adicionalmente, el uso de un electrodo de relleno de diferente composición química que el metal base, en este caso acero inoxidable 308L, se mostró eficaz para la generación de grietas en el cordón de soldadura.
- La generación de inclusiones de escoria como discontinuidades inducidas en los patrones depende en gran medida de la destreza del soldador.
- El WPS y la habilidad del soldador son pautas importantes en la fabricación de los patrones ya que de ellas depende la generación de las discontinuidades requeridas.



- Todas las discontinuidades generadas por los procesos de soldadura utilizados para la fabricación de los patrones fueron evidenciadas con las técnicas de END empleadas.
- Para el estudio práctico de los patrones el aprendiz además de crear un método de análisis crítico sobre la inspección de END también puede deducir causas y efectos de la defectología presentada en los patrones.

## 5. Referencias

### Artículos de revistas

- Bika, D., Pfaendtner, J. A., Menyhard, M., & McMahon Jr, C. J. (1995). Sulfur-induced steel embrittlement in a low-alloy steel. *Acta metallurgica et materialia*, 43(5), 1895-1908.
- Coniglio, N., & Cross, C. E. (2013). Initiation and growth mechanisms for weld solidification cracking. *International materials reviews*, 58(7), 375-397.
- Thekkuden, D. T., Santhakumari, A., Sumesh, A., Mourad, A. H. I., & Rameshkumar, K. (2018). Instant detection of porosity in gas metal arc welding by using probability density distribution and control chart. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(9), 4583-4606.

### Normas

- American Welding Society (2015). AWS D1.1 Structural Welding Code-steel. Ed. 24.
- American Society of Mechanical Engineers (ASME) (2020). ASME section V Boiler and Pressure Vessel Code. Ed 1. Artículo 9.
- American Society for Testing and Materials (2018). ASTM E-165/E-165M Standard Practice for Liquid Penetrant for General Industry.
- American Society for Testing and Materials (2021). ASTM E-1444/E-1444M Standard Practice for Magnetic Particle Testing for Aerospace.
- American Society for Testing and Materials (2019). ASTM E-1032 Standard Practice for Radiographic Examination of Weldments Using Industrial X-Ray Film
- American Society of Mechanical Engineers (ASME) (2020). ASME section IX Boiler and Pressure Vessel Code. Ed 1. Parte QW.

### Libros

- Avner Sidney H. (1988). Introducción a la Metalurgia Física. Ed. 2. Cap. 9-11. pp. 349-455.
- Hellier, C. J. (2013). Handbook of nondestructive evaluation. McGraw-Hill Education.
- Jeffus, L. (2009). Soldadura. Principios y aplicaciones (Vol. 3). Editorial Paraninfo.
- Jenney, Cynthia L. O'Brien, Annette. (2001). Welding Handbook, Volume 1 - Welding Science and Technology (9th Edition). American Welding Society (AWS).
- Smith William F. (2006). Fundamentos de la Ciencia e ingeniería de materiales. Ed 4. Cap. 8-9. Pp. 310-454.

### Fuentes electrónicas

- AWS, Glossary. En: <https://awo.aws.org/glossary/defect/>
- Consonni, M, Wee, Chen Fun, Schneider, C. (2012). Manufacturing of welded joints with realistic defects. Volumen 54 N°2. En <https://www.ingentaconnect.com/content/bindt/insight/2012/00000054/00000002/art00006;jsessionid=a5iumpoahf813.x-ic-live-01>



- Mika Kemppainen ·Likka Virkkunen (2010). Crack Characteristics and Their Importance to NDE. En <https://research.aalto.fi/en/publications/virtual-cracks-and-the-future-of-inspection-reliability>
- Oygasa, (2021). Manual del soldador, en <https://www.infrasal.com/industria/phocadownload-pap/manual%20del%20soldador.pdf>
- Tuomas Koskinen, Likka Virkkunen, Oscar Siljama, Oskari Jessen-Juhler (2021). *Journal of Nondestructive Evaluation*. Artículo número 24. The Effect of Different Flaw Data to Machine Learning Powered Ultrasonic Inspection. En <https://link.springer.com/article/10.1007/s10921-021-00757-x>

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2022 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

