




Capability of the Liquid Penetrant Method to Detect Defects in Welds

Jorge Wilfredo Vera Alvarado, Dr.¹, Luis Fernando Caballero Garcia, Bach.¹, Martin Taboada Neira, Dr.¹
¹Universidad Nacional de Trujillo, Perú, jvera@unitru.edu.pe, lcaballero@unitru.edu.pe, mtaboada@unitru.edu.pe

Abstract– The dye penetrant test is widely used because of its ease in revealing the presence of surface defects in welded components to ensure that their quality complies with industry standards. Since the various penetrant materials and the characteristics of the elements to be inspected produce uncertainty in the detection, it was proposed to determine the ability of the dye penetrant method to reveal defects in welded joints by varying the testing technique. Tests were performed on structural steel welded joints containing surface defects, characterized by microscopy, applying the visible and fluorescent penetrant techniques. The estimation of the detection capability of each technique was performed by the statistical model $POD \hat{a}$ vs a assisted with Software mh1823POD, obtaining detection probability curves and a_{50} , a_{90} and $a_{90/95}$ values to compare the effectiveness of each testing technique. The results showed that the fluorescent penetrant inks, with respect to the visible ones, present an improvement in their capacity to detect the smallest defects, in a reliable way, forming precise relevant indications to the real size of the defect.

Keywords: Penetrant inks, probability of detection (POD), quality, weld defects, nondestructive testing.

Capacidad del Método de Líquidos Penetrantes para Detectar Defectos en Soldadura

Jorge Wilfredo Vera Alvarado, Dr.¹, Luis Fernando Caballero Garcia, Bach.¹, Martin Taboada Neira, Dr.¹

¹Universidad Nacional de Trujillo, Perú, jvera@unitru.edu.pe, lcaballero@unitru.edu.pe, mtaboada@unitru.edu.pe

Abstract– *El ensayo de líquidos penetrantes es ampliamente utilizado por su facilidad para poner en evidencia la presencia de defectos en la superficie de componentes soldados garantizando que su calidad cumpla con los estándares industriales. Como los diversos materiales penetrantes y las características de los elementos a inspeccionar producen incertidumbre en la detección, se propuso determinar la capacidad del método de líquidos penetrantes para revelar defectos en juntas soldadas al variar la técnica de ensayo. Se realizaron pruebas en juntas soldadas de acero estructural que contenían defectos superficiales, caracterizados por microscopía, aplicando las técnicas de penetrantes visibles y fluorescente. La estimación de la capacidad de detección de cada técnica fue realizada por el modelo estadístico $POD \hat{a}$ vs a asistido con Software mh1823POD, obteniendo las curvas de probabilidad de detección y valores a_{50} , a_{90} y $a_{90/95}$ para comparar la efectividad de cada técnica de ensayo. Los resultados demostraron que los líquidos penetrantes fluorescentes respecto a los visibles, presentan mejora en su capacidad para detectar los defectos de menor tamaño, de forma confiable, formando indicaciones relevantes precisas al tamaño real del defecto.*

Palabras claves: *Líquidos penetrantes, probabilidad de detección (POD), calidad, defectos de soldadura, pruebas no destructivas.*

I. INTRODUCCIÓN

Los métodos de prueba no destructivos (END), son utilizados para evaluar la integridad estructural de un componente o material sin dañarlo. En industrias, como la construcción, aviación, energía nuclear, petróleo y gas, los códigos y normas de fabricación especifican el uso de pruebas por líquidos penetrantes para poner en evidencia defectos de superficie en componentes soldados a fin de asegurar la calidad y seguridad operativa [1-5].

El sistema de prueba de líquidos penetrantes requiere aplicar en la superficie de prueba, un líquido humectante, el cual dispone de baja tensión superficial y penetra en las grietas abiertas a la superficie por acción capilar; luego al remover el exceso de penetrante y aplicar una sustancia reveladora, permite que el penetrante atrapado en el defecto, exude a la superficie formando indicaciones que revelan la presencia de grietas. [2,5] La sensibilidad para detectar defectos en estas pruebas está influenciada por el tipo de penetrante utilizado, que puede ser de color visible o fluorescente, además la forma de remoción puede ser con agua, emulsionante lipofílico, hidrofílico o con solvente. [5,6].

Evaluar la sensibilidad o capacidad de las técnicas de ensayo toma importancia para elegir la técnica más adecuada

para una aplicación en particular. Esta evaluación se realiza determinando la probabilidad de detección (POD) del ensayo. La POD definida como la probabilidad para detectar un defecto usando una prueba no destructiva, está en función al tamaño del defecto [5,7,8]. Los estudios sobre POD comenzaron en la década del 70 en la industria aeroespacial [8,9]. Investigaciones en juntas soldadas reportan que el cálculo de POD evalúa la efectividad de los métodos no destructivos como ensayos por ultrasonido [10], líquidos penetrantes [11-13] y partículas magnéticas [13,14]. Las principales aplicaciones de la información sobre POD están relacionadas al diseño de componentes y estructuras, el mantenimiento de equipos y maquinaria, en la elaboración de procedimientos de ensayo, y en la evaluación y calificación de inspectores END. [5,8].

Las funciones POD se estiman de la evaluación de los resultados en cada prueba no destructiva, mediante dos métodos estadísticos principales $POD \hat{a}$ vs a o POD Hit/miss. La elección del método depende del tipo resultado obtenido; si son de carácter cualitativo como defecto detectado o no detectado, se aplica el método Hit/miss. Por otro lado, si los resultados son del tipo cuantitativo como alguna magnitud del defecto, se emplea el método $POD \hat{a}$ vs a [8,15]. La función POD es graficada como una curva de probabilidades con límites de confianza del 95%; un valor importante de la gráfica es el $a_{90/95}$, referido al tamaño de defecto detectado por la inspección con 90% de probabilidad y 95% de confianza. Otros valores reportados, son a_{50} y a_{90} referidos a un tamaño de defecto cuya probabilidad de detección es 50% y 90% respectivamente [5,8,15,16].

Para asegurar la calidad en la superficie de juntas soldadas, la inspección por líquidos penetrantes debe detectar los defectos que producen indicaciones relevantes, tales como fisuras, poros, falta de fusión y laminaciones, con el objetivo de comparar el tamaño de la indicación con criterios de calidad establecidos en las normas industriales. Sin embargo, ciertos factores como la técnica de ensayo, relacionada al tipo de líquido penetrante a utilizar, y las características del material a ensayar, provocan incertidumbre en la detección de defectos. Por tal razón, el objetivo de la investigación fue determinar la capacidad de detección de defectos superficiales en juntas soldadas utilizando líquidos penetrantes visibles, y fluorescentes, con fines comparativos, estimando la capacidad de cada técnica para detectar defectos en función a su tamaño con el método estadístico de probabilidad de detección $POD \hat{a}$ vs a .

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

II. MATERIAL Y MÉTODOS

A. Material de Estudio

Para el estudio se utilizaron veinte probetas de acero al carbono soldadas en ranura y filete, en uniones a tope y en T, que se muestran en la Fig. 1. Las probetas fueron evaluadas superficialmente con un estereoscopio digital, encontrando un

total de 60 defectos superficiales, sus características dimensionales son detallados en la Tabla I.

B. Materiales para ensayo

Las pruebas fueron realizadas con líquidos penetrantes visibles y fluorescentes, ambos removibles con solvente. Los reveladores utilizados fueron los recomendados por el fabricante acorde al tipo de líquido penetrante. En la Tabla II se detallan los materiales para los ensayos.

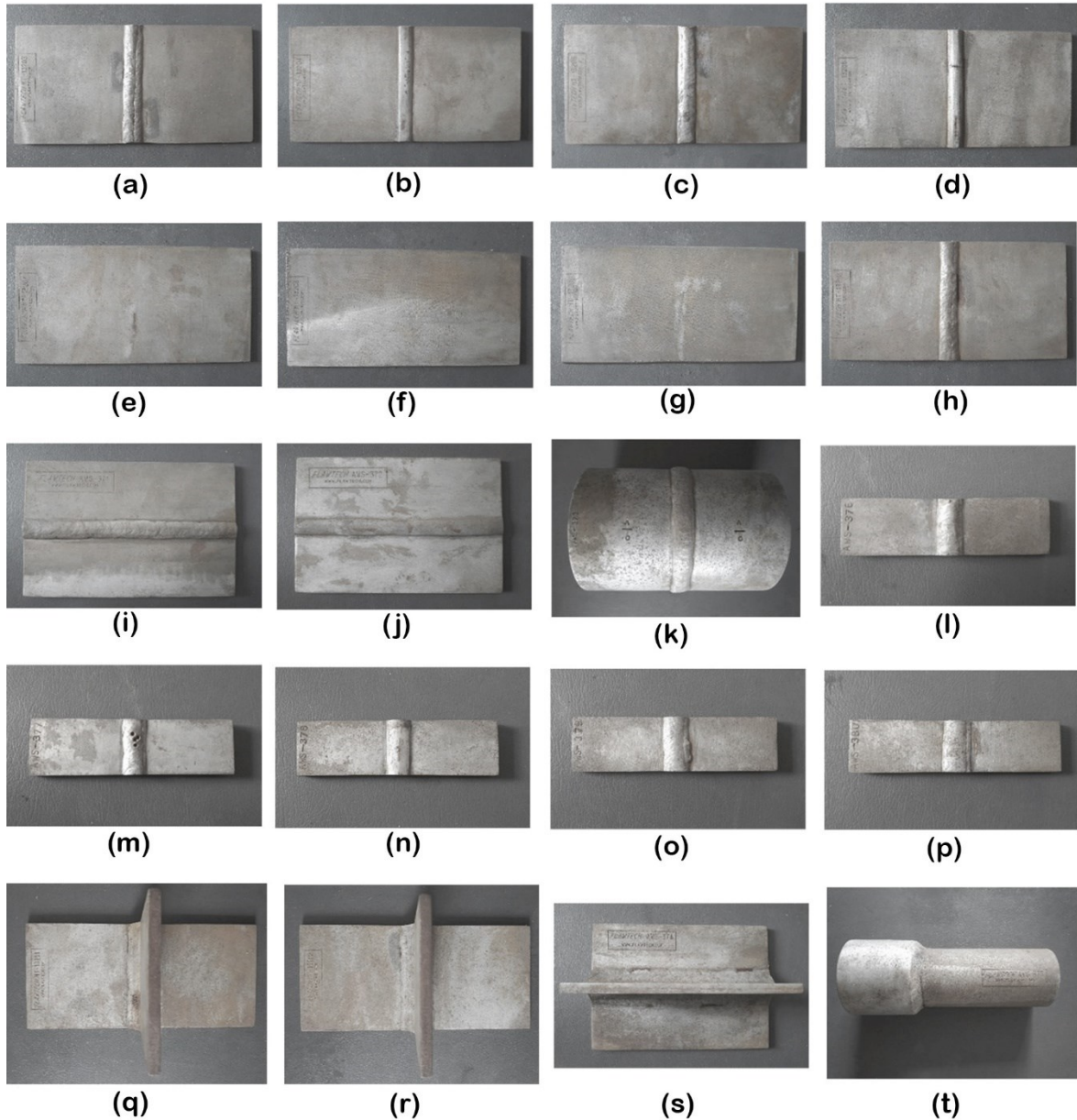


Fig. 1 (a - p) soldadura de ranura y (q - t) soldadura de filete.

TABLA I
DATOS DE LOS DEFECTOS DE LAS PROBETAS DE ESTUDIO

| ID | Defecto | Tamaño (mm) | ID | Defecto | Tamaño (mm) | ID | Defecto | Tamaño (mm) |
|----|----------------------|-------------|----|----------------------|-------------|----|----------------------|-------------|
| 1 | Fisura ZAC | 0.5 | 21 | Fisura en pie | 8 | 41 | Fisura ZAC | 12.5 |
| 2 | Fisura ZAC | 0.5 | 22 | Fisura línea central | 8 | 42 | Solape/Traslape | 12.5 |
| 3 | Porosidad | 0.5 | 23 | Fisura ZAC | 8 | 43 | Fisura en pie | 12.5 |
| 4 | Cavidad | 0.6 | 24 | Fisura línea central | 8 | 44 | Porosidad | 12.5 |
| 5 | Fisura línea central | 0.625 | 25 | Fisura en pie | 8.5 | 45 | Fisura en metal base | 12.5 |
| 6 | Fisura Borde | 0.708 | 26 | Laminación | 9 | 46 | Fisura ZAC | 12.5 |
| 7 | Fisura ZAC | 0.791 | 27 | Porosidad | 10 | 47 | Falta de fusión | 12.7 |
| 8 | Fisura en pie | 0.916 | 28 | Fisura línea central | 10 | 48 | Solape / Traslape | 13 |
| 9 | Fisura en pie | 1.75 | 29 | Fisura raíz | 10 | 49 | Fisura pie | 13 |
| 10 | Laminación | 2 | 30 | Fisura ZAC | 10.5 | 50 | Porosidad | 12 |
| 11 | Fisura en pie | 3 | 31 | Fisura transversal | 10.5 | 51 | Falta de fusión | 13.5 |
| 12 | Fisura en pie | 3.5 | 32 | Fisura línea central | 10.7 | 52 | Falta de fusión | 14 |
| 13 | Fisura ZAC | 5.5 | 33 | Fisura transversal | 11 | 53 | Fisura raíz | 14.5 |
| 14 | Fisura en pie | 5.5 | 34 | Fisura ZAC | 11 | 54 | Fisura ZAC | 16 |
| 15 | Fisura raíz | 5.6 | 35 | Fisura en pie | 11 | 55 | Fisura raíz | 17 |
| 16 | Fisura raíz | 6 | 36 | Fisura ZAC | 11 | 56 | Fisura en pie | 17.5 |
| 17 | Fisura ZAC | 7 | 37 | Fisura raíz | 11.5 | 57 | Fisura línea central | 17.75 |
| 18 | Fisura transversal | 7.3 | 38 | Fisura ZAC | 11.5 | 58 | Fisura línea central | 18.5 |
| 19 | Falta de Fusión | 7.5 | 39 | Fisura en pie | 12 | 59 | Laminación | 19 |
| 20 | Porosidad | 7.5 | 40 | Solape/Traslape | 12 | 60 | Fisura en pie | 22 |

TABLA II
MATERIALES DE ENSAYO UTILIZADOS EN ESTE ESTUDIO

| Penetrante | Removedor | Revelador |
|-----------------------------------|-----------------|------------------|
| Visibles Magnaflux SKL-SP2 | Magnaflux SKC-S | Magnaflux SKD-S2 |
| Fluorescentes Magnaflux ZL-27A | Magnaflux SKC-S | Magnaflux ZP-9F |

C. Procedimiento

Los procedimientos de ensayos por líquidos penetrantes fueron elaborados de acuerdo a las normas de referencia ASTM E 165 [17] y ASME sección V Artículo 6 [18], y ejecutados por un grupo de tres inspectores calificados en END. Cada inspector examinó todas las probetas de estudio utilizando primero los líquidos penetrantes visibles y luego los penetrantes fluorescentes.

La preparación superficial de las juntas soldadas se realizó mediante limpieza mecánica con un cepillo metálico, y posteriormente una limpieza con solvente removedor con el fin de eliminar cualquier contaminante que interfiera en la prueba. El líquido penetrante se aplicó por pulverizado cubriendo la superficie de forma homogénea y se mantuvo por un tiempo de 10 minutos, luego el excedente de líquido penetrante fue

eliminado con un papel absorbente humedecido con el solvente removedor. El revelador se aplicó por pulverizado, el tiempo de revelado fue de 10 minutos. Las probetas fueron examinadas bajo las condiciones de luz que especifica la norma ASTM E 165; las indicaciones obtenidas en cada probeta fueron registradas por fotografía y dimensionadas con un vernier para su posterior análisis.

D. Análisis estadístico

Dado que los resultados de los ensayos son los tamaños de las indicaciones, que representan valores cuantitativos de los defectos, la función POD fue estimada con el modelo estadístico POD \hat{a} vs a . Este modelo, requiere los siguientes datos de entrada, (1) el tamaño real del defecto (a) y (2) la respuesta de la prueba (\hat{a}), los cuales deben mostrar una

correlación lineal, por lo que se utiliza un modelo para el arreglo de la distribución de datos y después obtener una regresión lineal. Los 4 modelos posibles son: 1) \hat{a} en función a , 2) $\log(\hat{a})$ en función a , 3) \hat{a} en función $\log(a)$ y 4) $\log(\hat{a})$ en función $\log(a)$ [8,19]

Además, para definir la ecuación de la probabilidad de detección se consideró que un defecto es detectado cuando la respuesta de la prueba (\hat{a}) es mayor a un valor de decisión preestablecido ($\hat{a}_{decisión}$), teniendo así la ecuación (1)

$$POD(a) = p(\hat{a} > \hat{a}_{decisión}) \quad (1)$$

A partir de una hipótesis de regresión lineal, se tiene la ecuación (2) que permitió obtener las curvas de probabilidad de detección.

$$POD = \Phi\left(\frac{\beta_0 + \beta_1 * a - \hat{a}_{th}}{\delta}\right) \quad (2)$$

Donde, Φ es una ley gaussiana, δ es el término de error y β_0, β_1 son parámetros de regresión que se estiman mediante una función de máxima verosimilitud.

El presente trabajo se asistió del software mh1823POD disponible en línea [19] para realizar el análisis estadístico y gráfico de curvas POD se dispuso del modelo POD \hat{a} vs a descrito.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Defectos detectados por líquidos penetrantes

Los resultados de las pruebas de cada probeta fueron documentados en reportes de inspección (20 reportes), cuyo modelo se observa en la Fig. 2. En el reporte se muestra el registro fotográfico de las indicaciones obtenidas y sus respectivos tamaños dimensionados por cada inspector después de aplicar las técnicas de líquidos penetrantes visibles y fluorescentes.

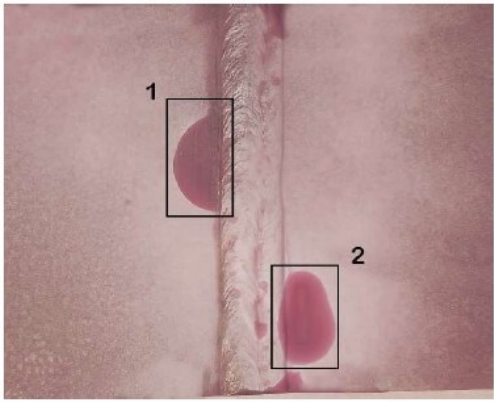
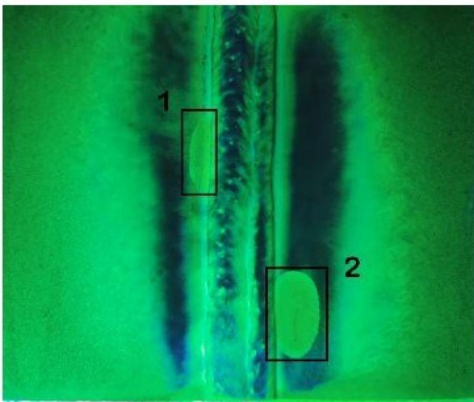
| REPORTE DE INSPECCIÓN | | | No: 01 | | |
|--|------|-----------------|---|-------------|-------------|
| Código de Probeta: | | | 13201 | | |
| Resultados de la inspección (fotografía) | | | | | |
| Líquidos penetrantes visibles | | | Líquidos penetrantes fluorescentes | | |
|  | | |  | | |
| Defectos detectados (indicaciones) | | | | | |
| Técnica de Ensayo | Item | Defecto | Longitud de las indicaciones (mm) | | |
| | | | Inspector 1 | Inspector 2 | Inspector 3 |
| Líquidos penetrantes visibles | 1 | Falta de fusión | 22 | 27.2 | 23.45 |
| | 2 | Fisura ZAC | 21.5 | 24.62 | 22.38 |
| Líquidos penetrantes fluorescentes | 1 | Falta de fusión | 20.08 | 18.47 | 18.68 |
| | 2 | Fisura ZAC | 20.77 | 21.65 | 21.4 |

Fig. 2 Reporte de inspección por líquidos penetrantes de una probeta de estudio.

B. Curvas de probabilidad de detección

Fueron procesados los siguientes datos con el software mh1823POD:

- 1) Tamaño real de cada defecto (a),
- 2) La respuesta de la prueba (\hat{a}) que es longitud de cada indicación documentada en los reportes, y
- 3) El valor de decisión ($\hat{a}_{decisión}$) de 1.6 mm, dato que se extrajo del Código ASME Sección VIII División 1 [20], donde

menciona que las indicaciones obtenidas con ensayos de líquidos penetrantes serán relevantes si presentan un tamaño mayor a 1.6 mm.

Las curvas de probabilidad de detección con un límite de confianza del 95%, se aprecian en la Figs. 3 y 4, muestran las curvas POD de los ensayos realizados con líquidos penetrantes visibles, y fluorescentes respectivamente.

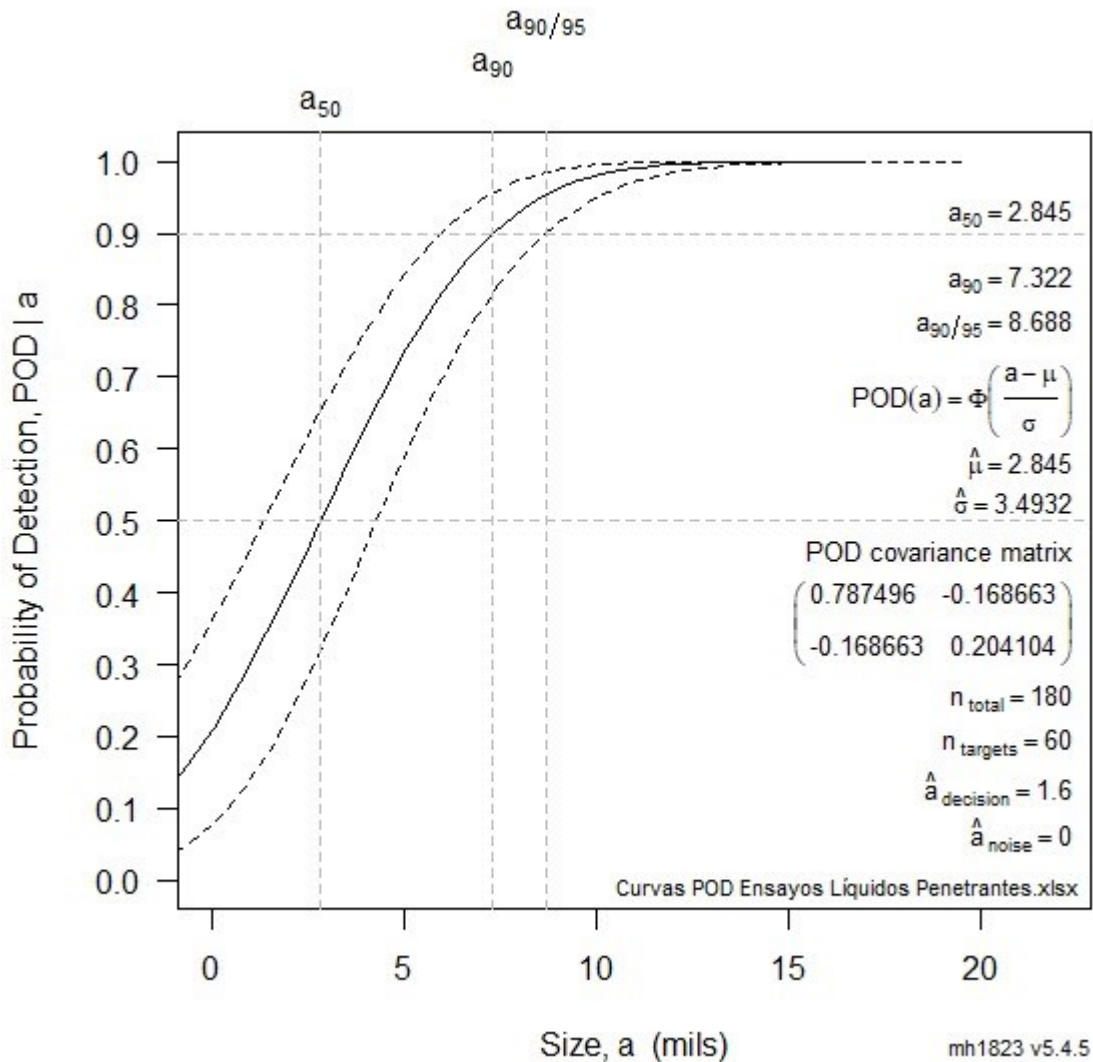


Fig. 3 Curva POD de ensayos realizados con la técnica de líquidos penetrantes visibles.

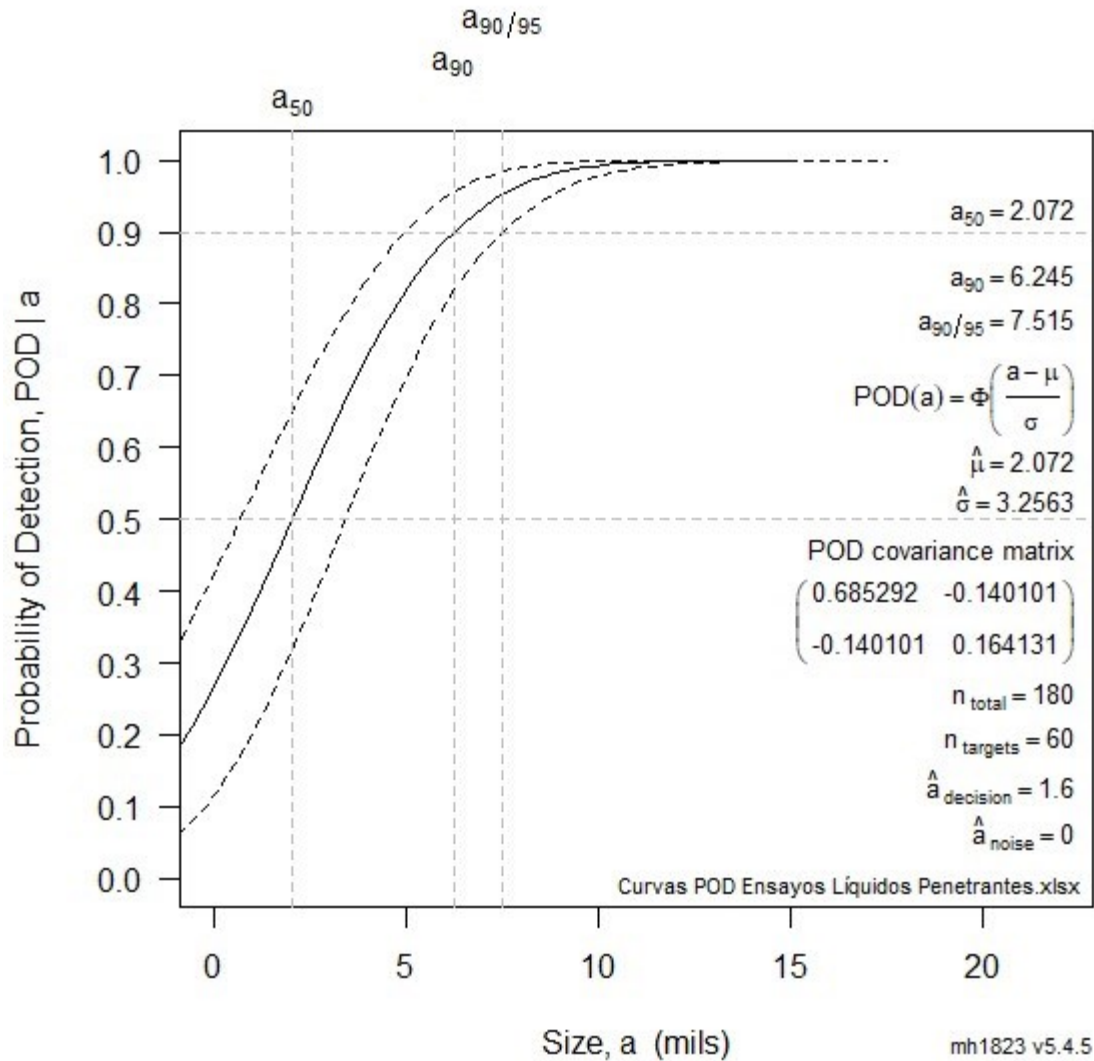


Fig. 4 Curva POD de ensayos realizados con la técnica de líquidos penetrantes fluorescentes.

La Tabla III, detalla los valores a_{50} , a_{90} y $a_{90/95}$ obtenidos a partir de las curvas POD para las técnicas de líquidos penetrantes visibles, y penetrantes fluorescentes.

TABLA III
 VALORES DE TAMAÑO DETECTADO PARA LAS TÉCNICAS CON LÍQUIDOS PENETRANTES VISIBLES Y FLUORESCENTES

| TÉCNICA | a_{50} (mm) | a_{90} (mm) | $a_{90/95}$ (mm) |
|------------------------------------|---------------|---------------|------------------|
| Líquidos penetrantes visibles | 2.845 | 7.322 | 8.688 |
| Líquidos penetrantes fluorescentes | 2.072 | 6.245 | 7.515 |

Los resultados fueron evaluados de acuerdo al código de fabricación de recipientes a presión de la sociedad americana de ingenieros mecánicos ASME, en el cual se especifica como criterio de relevancia, indicaciones generadas por el método de ensayo mayores a 1.6 mm ($\hat{a}_{decision} = 1.6$ mm); con lo cual

quedo demostrado, que la técnica de ensayo desarrollada con líquidos penetrantes fluorescentes disponen de mayor capacidad para detectar defectos de menor tamaño, logrando detectar defectos con una probabilidad del 90%, de por lo menos 7.515 mm de longitud, con un nivel de confianza del 95%, a comparación de los penetrantes visibles que necesitan un tamaño mayor de 8.688 mm para la detección con la misma probabilidad y confianza. Las diferencias en los valores de $a_{90/95}$ (8.688 mm, contra 7.515 mm), a_{50} (2.845 mm contra, 2.072 mm), a_{90} (7.322 mm contra, 6.245 mm), se produce por la variación en la longitud de la indicación registrada para un mismo defecto con cada técnica de ensayo. Cada indicación revelada por un defecto mediante líquidos penetrantes fluorescentes, fue más próxima a su longitud real, por presentar mayor nivel de sensibilidad, y con ello los defectos pequeños generan indicaciones visibles bajo luz ultravioleta, las

indicaciones por ser luminosas permiten ser localizadas con facilidad [5].

Los resultados de POD obtenidos permiten conocer la efectividad de las técnicas de ensayos estudiadas, y pueden servir como guía a los inspectores NDT, en la elaboración del procedimiento de ensayo. Con la consideración que los datos POD no es posible generalizar para un componente o procedimiento de prueba, cualquier cambio en los parámetros o variables involucradas tales como, equipos, materiales, componentes a inspeccionar, los datos POD esperados pueden variar.

IV. CONCLUSIONES

La capacidad para detectar defectos superficiales en juntas soldadas con ensayos de líquidos penetrantes, cuantificada por el modelo $POD \hat{a} vs a$, varía según el tipo de líquido penetrante utilizado en el sistema de prueba. Los penetrantes fluorescentes por sus propiedades físicas, disponen de mejor desempeño respecto a los visibles, permiten detectar con un nivel de confianza de 95%, defectos mayores o iguales a 7.515 mm de longitud, mientras que los líquidos visibles requieren tamaños mayores o iguales a 8.688 mm.

Ambas técnicas de ensayo son de fácil uso para detectar defectos, creando indicaciones con un contraste de color adecuado para la examinación de uniones soldadas bajo condiciones de luz específicas. Sin embargo, las indicaciones relevantes formadas con líquidos penetrantes fluorescentes son próximas a longitud real del defecto, debido a su mayor nivel de sensibilidad respecto a las visibles.

Futuras investigaciones pueden considerar otras variables de ensayo, como forma de remoción del penetrante, niveles de sensibilidad, geometría de los elementos de prueba, nivel de conocimiento y experiencia del inspector, entre otros que intervienen en las pruebas de líquidos penetrantes y contribuir a tener una descripción completa sobre la capacidad de cada técnica de ensayo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Nacional De Trujillo por brindar las instalaciones del Laboratorio de Ensayos No destructivos y Soldadura.

REFERENCIAS

- [1] P. Cawley, "Non-destructive testing - current capabilities and future directions", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 215, no. 4, pp. 213–23, 2001.
- [2] R. Smith, *Non-destructive testing (NDT) - Guidance document: An Introduction to NDT common methods*. The British Institute of Non-Destructive Testing, 2015.
- [3] K. Ashok, "Non-Destructive Testing, Evaluation of Stainless-Steel Materials", *Materials Today Proceedings*, vol. 4, no. 8, pp. 7302-7312, 2017.
- [4] J. Deepak, V. Bupesh, D. Srikanth, H. Surendran, and M. Nickolas, "Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study", *Materials Today Proceedings*, vol. 44, pp. 3732-3737, 2021.
- [5] American Society for Nondestructive Testing, *Nondestructive Testing Handbook, Fourth Edition: Volume 1, Liquid Penetrant Testing*, 2016.
- [6] B. Larson, *Study of the Factors Affecting the Sensitivity of Liquid Penetrant Inspections: Review of Literature Published from 1970 to 1998*, Technical Report No. DOT/FAA/AR-01/95, 2002.
- [7] A. Keprate, "Probability of detection: History, development and future", *Pipeline Technology Journal*, vol. 8, pp. 41–45, 2016.
- [8] U.S. Department of Defense, *Nondestructive evaluation system reliability assessment*, MIL-HDBK-1823A, USA, 2009.
- [9] B. Yee, F. Chang, J. Couchman, G. Lemon, and P. Packman, *Assessment of NDE Reliability Data*, Report NASA CR-134991, USA, 1976.
- [10] J. Kurz, A. Juengert, S. Dugan, and G. Dobmann, "Probability of detection (POD) determination using ultrasound phased array for considering NDT in probabilistic damage assessments", [18th World Conference on Non-Destructive Testing, South Africa, 2012].
- [11] A. Zolfaghari, and F. Kolahan, "Reliability and sensitivity of visible liquid penetrant NDT for inspection of welded components", *Materials Testing*, vol. 59, No. 3, 290-294, 2017.
- [12] B. Parker, *A comparison of the capability of sensitivity level 3 and sensitivity level 4 fluorescent penetrants to detect fatigue cracks in various metals*, Report NASA TM-2011-215869, USA, 2011.
- [13] R. Fonseca, et al., "Study of probability of the detection of defects in welded joints of the techniques of magnetic particle and penetrant testing", 2015.
- [14] A. Zolfaghari, A. Zolfaghari, and F. Kolahan, "Reliability and sensitivity of magnetic particle nondestructive testing in detecting the surface cracks of welded components", *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 33, no. 3, pp. 290-300, 2018.
- [15] I. Virkkunen, T. Koskinen, S. Papula, and T. Sarikka, "Comparison of a versus a and hit/miss POD-Estimation Methods: A European viewpoint", *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 38, no. 89, pp. 1-13, 2019.
- [16] M. Reseco, A. Hor, A. Rautureau, and C. Bes, "Implementation of a robust methodology to obtain the probability of detection (POD) curves in NDT: Integration of human and ergonomic factors", [COFRIEND Days, Strasbourg, France, 2017].
- [17] American Society for Testing and Materials, *ASTM E165: Standard practice for liquid penetrant testing for general industry*, 2019.
- [18] American Society of Mechanical Engineers, *ASME BPVC Section V Nondestructive Examination*, 2021.
- [19] A. Charles, *Statistical best-practices for building probability of detection (POD) models. R package mh1823 POD, version 5.4.5*. In <https://statistical-engineering.com/>, accessed 10 Diciembre 2022.
- [20] American Society of Mechanical Engineers, *ASME Section VIII Division 1: ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, 2021.