

# Materiales formativos 3D desde ingeniería inversa para el aprendizaje de la inspección de soldaduras

*3D Learning materials from reverse engineering for weld inspection training*

Manuel Rodríguez-Martin<sup>1,3</sup>

Pablo Rodríguez-González<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Católica de Ávila (España)

<sup>2</sup> Universidad de León (España)

<sup>3</sup> Universidad de Salamanca (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8798>

## INTRODUCCIÓN

A día de hoy son muchos los trabajos que abordan los laboratorios virtuales (LVs) en titulaciones relacionadas con la ingeniería [1-2], algunos de ellos acometidos desde un criterio de bajo coste [3]. Concretamente, la formación avanzada en materia de soldadura es crucial en distintos programas universitarios relacionados con la ingeniería. A su vez, es de vital importancia, aunque en un entorno más profesional, también en ciclos formativos de grado medio y superior, y en formación específica para acreditación profesional de soldadores, inspectores e ingenieros de soldadura. Por ello se torna como absolutamente imprescindible el conocer los distintos tipos de procedimiento de soldeo y la adquisición de destrezas en materia de reconocimiento de uniones soldadas, así como de evaluación visual de las mismas; dado que la inspección visual (IV) se considera un ensayo no destructivo (END) que, junto con otros tipos de END como los ultrasonidos, los métodos radiográficos, las partículas magnéticas, las corrientes eléctricas y los líquidos penetrantes, sirven para evaluar la calidad de la soldadura en aras de garantizar la integridad física de máquinas y estructuras [4]. De todos esos ensayos, el único que pende única y exclusivamente de las habilidades visuales del inspector es el de IV, ensayo que a su vez ostenta una elevada componente cualitativa y cuyo éxito descansa de manera directa en la formación técnica del inspector, el cual, antes de poder realizar inspecciones, debe recibir una sólida formación en cuanto al reconocimiento, caracterización y medida de defectos e imperfecciones se refiere. Dicha formación, que suele realizarse en contextos de laboratorio, en base a especímenes con defectos concretos diseñados para instrucción del personal, sobre los cua-

les el estudiante realiza prácticas de observación para adquirir competencias en materia de inspección de soldadura. Estos especímenes, que tienen que ser fabricados para presentar de manera específica uno o varios defectos concretos [5], tienen costes elevados (entre 200 y 5000 euros cada uno de ellos dependiendo del tipo de soldadura y del defecto contenido) y en muchos casos no cubren la totalidad del abanico de defectología que puede darse en situaciones reales.

Además, la transición de los sistemas educativos hacia formación *online* (asíncrona) justifica la necesidad de aplicar técnicas de ingeniería inversa para escanear tridimensionalmente especímenes de soldadura que sean útiles para labores formativas y que permitan la interacción del alumnado con modelos de una fidelidad similar a la de un espécimen físico. Además, el uso de materiales 3D también redundan en la motivación del alumnado [6].

## TÉCNOLOGÍAS PARA LA RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE SOLDADURAS PARA FINES DOCENTES

Las técnicas aplicadas para la reconstrucción tridimensional de soldaduras que han sido estudiadas con éxito hasta el momento son dos: macro-fotogrametría de objeto cercano y escaneo láser (Fig.1). La primera fue descrita en [4-5] y se basa en los principios de la fotogrametría de rango cercano, la cual se basa en la captura de múltiples imágenes fotográficas según un protocolo recomendado, y su posterior procesado con programas específicos (e.g.: *Graphos*) que permiten controlar los parámetros en aras de una reconstrucción rigurosa del objeto. La técnica de escaneo láser aplicada a este fin se basa en el uso de un brazo metrológico articulado, más conocido por sus siglas en inglés ACMM, dispositivo utilizado en industrias avanzadas para labores metrológicas y de ingeniería inversa. La reconstrucción con dicho sistema es directa y ágil, pudiendo consultarse dicho procedimiento en [7]. Asimismo, otras técnicas de reconstruc-

ción tridimensional como la luz estructurada han sido aplicada a contextos de inspección [8]; sin embargo, su potencialidad para usos formativos es baja, dados los problemas de reconstrucción que se dan en soldaduras o partes de la misma que generan reflejos. Sin que sea objeto del presente informe técnico la descripción completa de estas técnicas (dado que el lector lo puede encontrar ya en la literatura), sí que conviene indicar que la técnica macro-fotogramétrica solo requiere una cámara réflex convencional con objetivo macro y algunos materiales auxiliares, mientras que para la reconstrucción tridimensional basada en escaneo láser se precisa el uso del sistema ACMM, el cual es costoso (a título orientativo, entre 80-100 veces el coste del material necesario para la reconstrucción macro-fotogramétrica); sin embargo, la precisión que aporta un sistema ACMM (hasta decenas de micras) es superior a la obtenida utilizando fotogrametría (en torno a la décima de milímetro). No obstante, los resultados obtenidos con macro-fotogrametría poseen información radiométrica (color), mientras que los resultados obtenidos con escaneo láser únicamente aportan geometría, lo que sustenta la necesidad de acompañar los materiales docentes con imágenes fotográficas adicionales para que el alumno puedan interpretar correctamente la soldadura. Sin embargo, el escaneo láser tiene una ventaja clara con respecto a la macro-fotogrametría: al no requerir elementos auxiliares de escalado, proporciona métricas reales de forma directa con las precisiones mencionadas, mientras que la macro-fotogrametría precisa de un procedimiento de escalado ulterior a la captura de imágenes y que se base en algún elemento de escala introducido en la escena (esta es una de las principales fuentes de incertidumbre que se propaga hacia la reconstrucción 3D final).

Conviene indicar que la elección de una u otra tecnología debe basarse en un estudio de requerimientos previo para analizar la casuística interviniente en el proceso y optar por la solución que más valor añadido genere en el proceso formativo; requerimientos que deberán validar-

se sobre el producto final para estudiar el cumplimiento de las expectativas formativas del producto.

Finalmente, los modelos pueden ser distribuidos por plataformas formativas (LMS) y su visualización e interacción sobre ellos (toma de medidas, secciones, extracción de vistas, etc) pueden ser realizadas por los alumnos mediante el uso de *software* libre de visualización y edición de nube de puntos, como, por ejemplo, *CloudCompare*.

## RESULTADOS

Para ilustrar las tecnologías anteriores se muestran diferentes resultados de reconstrucciones (Fig.2). Se han realizado tres ejemplos de modelos virtuales de soldaduras con distintas disposiciones y

diferentes materiales. Como puede verse en la Figura 2 (a), la soldadura en L se ha reconstruido con escaneo láser y el producto final es una nube de puntos de densidad variable (según la curvatura) y con alta precisión y una métrica real obtenida de manera directa. En la Figura 2 (b y c) pueden visualizarse el producto final de dos soldaduras planas de acero realizado con macro-fotogrametría. Se puede apreciar que tienen una densidad mucho mayor, así como textura fotorealística; no obstante, su precisión es más modesta que la otorgada por el ACMM.

En base a los resultados obtenidos con las diferentes técnicas, se puede apreciar una mayor operatividad en las reconstruidas con macro-fotogrametría, debido a que estas incluyen información de color y el densificado de puntos es más alto;

sin embargo, no conviene desmerecer los productos generados con ACMM, debido a que, gracias a su elevada precisión, se pueden solventar sus carencias mediante la aportación de material complementario con información radiométrica, tal como fotografías de alta definición. Finalmente conviene indicar que en este informe se han presentado las técnicas en conjunto para un fin, que es la generación de material virtual para la formación en inspección de soldadura y queda en manos de los formadores elegir el procedimiento de reconstrucción que más se adecue a las necesidades docentes del programa formativo que se trate.

## REFERENCIAS

- [1] Heradio R, de la Torre L, Galán D, et al. "Virtual and remote labs in education: a bibliometric analysis". *Computers & Education*. July 2016. Vol. 98. p. 14-38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.03.010>
- [2] Vergara D, Rodríguez-Martín M, Rubio MP, et al. "Formación de personal técnico en ensayos no destructivos por ultrasonidos mediante realidad virtual". *DYNA Ingeniería e Industrial*. March 2018. Vol 93(2). p.150-154. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8444>
- [3] Rossiter J. "Low production cost virtual modelling and control laboratories for chemical engineering students". *International Federation of Automatic Control 20th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace - ACA 2016*. Quebec, pp.230-235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.182>
- [4] Rodríguez-Martín M, Lagüela S, González-Aguilera D, et al. "Procedure for quality inspection of welds based on macro-photogrammetric three-dimensional reconstruction". October 2015. *Optics & Laser Technology*. Vol 73. p. 54-62. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.04.011>
- [5] Rodríguez-Martín M, Rodríguez-González P. "Learning based on 3D photogrammetry models to evaluate the competences in visual testing of welds". *EDUCON2018 - IEEE Global Engineering Education Conference 17-20 April 2018*. Gran Canaria (Spain).
- [6] Ayala-Álvarez FJ, Blázquez-Parra EB, Montes-Tubío F. "Presentación de contenidos 3D: del aula a la empresa. Usabilidad e influencia en la capacidad espacial". March 2017. *DYNA Ingeniería e industria*. Vol 92, p.137. DOI: <https://doi.org/10.1109/EDUCON.2018.8363422>
- [7] Rodríguez-González P, Rodríguez-Martín M, Ramos L, et al. "3D reconstruction methods and quality assessment for visual inspection of welds". *Automation in Construction*. July 2017. Vol. 79. p. 49-58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.03.002>
- [8] Rodríguez-Martín M, Rodríguez-González P, González-Aguilera D, et al. "Feasibility Study of a Structured Light System Applied to Welding Inspection Based on Articulated Coordinate Measure Machine Data". May 2017. *IEEE Sensors Journal*. Vol. 17(13). p. 4217-4224. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2017.2700954>

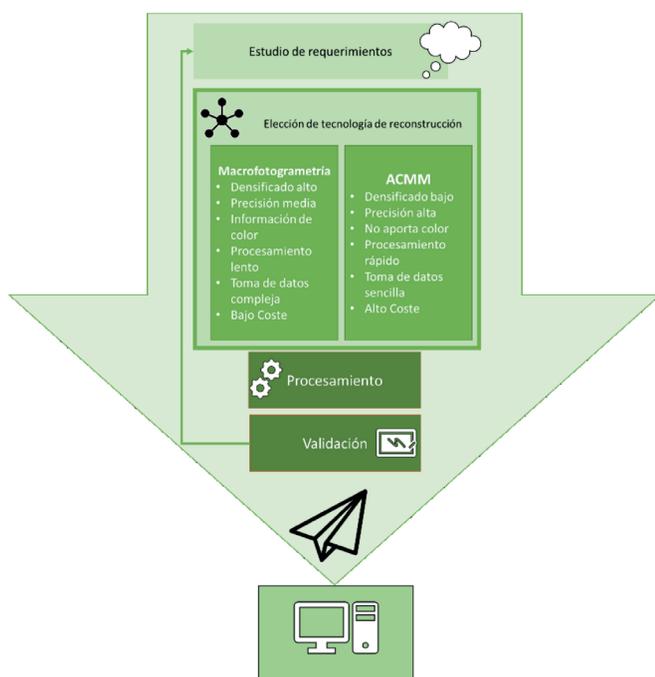


Fig. 1: Proceso de generación de los modelos de soldadura para uso formativo

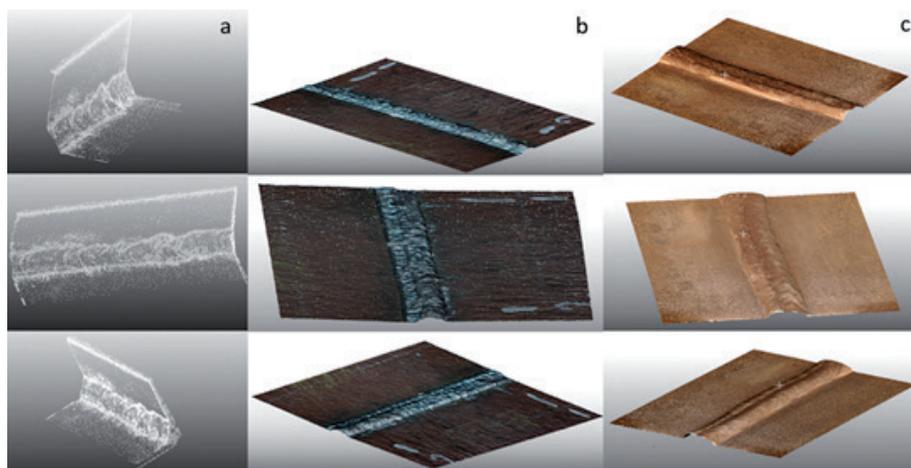


Fig. 2: Diferentes productos 3D según las tecnologías de reconstrucción: Soldadura en L de aluminio reconstruida con escaneo láser (a), soldaduras planas de acero reconstruidas con macro-fotogrametría (b y c)