

# Sistema de inspección híbrido EMAT-Visión para optimar el proceso de fabricación de Tailor Welded Blanks en el sector de la automoción

A Romero, A Calvo, M Ramírez, X Mínguez, J Jiménez, M. Molero-Armenta, V García  
Innerspec Technologies Europe, Loeches, 28890 Madrid, España

## Resumen

Uno de los principales retos a los que se enfrenta la industria del automóvil es la reducción del peso de partes estructurales, sin que esto afecte a la seguridad del producto final. La fabricación de Tailor Welded Blanks (TWB) en la industria del automóvil es un proceso avanzado que consiste en combinar varias chapas finas de metal que son soldadas mediante tecnología láser antes del proceso de estampado. Aunque la inspección de TWB suele llevarse a cabo mediante la tecnología EMAT, ésta presenta ciertas limitaciones a la hora de identificar defectos superficiales tales como el desalineamiento lateral y vertical de una chapa respecto a otra. Con el fin de afrontar esta limitación, los fabricantes inspeccionan las chapas con un equipo adicional de visión artificial que complementa los resultados del equipo EMAT. Este artículo presenta el nuevo sistema de inspección OPTIBLANKS, que es el primer equipo híbrido que combina EMAT y visión artificial para establecer un criterio de aceptación/rechazo unificado a través de la combinación de la información proporcionada por ambas tecnologías no destructivas. Esta hibridación dota al sistema final de más inteligencia, lo que le permite tomar decisiones más robustas y optimizar el proceso de fabricación y la calidad del producto final. El artículo presenta los resultados del proceso de validación de OPTIBLANKS en una planta de fabricación de TWB (Gestamp Solblank). Los resultados muestran la necesidad de combinar la información de las dos técnicas para incrementar la probabilidad de detección (POD) del sistema de inspección.

## 1. Introducción

El uso de Tailor Welded Blanks (TWB) ésta considerado como una de las formas más eficientes de reducir el peso de partes estructurales en la industria del automóvil gracias al elevado ratio resistencia-peso obtenido en la estructura del vehículo al utilizar este proceso de fabricación. Con este método de fabricación se pueden alcanzar reducciones de peso de hasta 65 kg [1] [2, 3]. Considerando que una reducción de peso de 10kg supone una reducción del consumo de combustible y de las emisiones de CO<sub>2</sub> de 1g/km [4], el uso de TWB reduciría las emisiones de CO<sub>2</sub> en 6.5g/km.

Las TWBs presentan numerosas ventajas tales como reducción de costes, reducción peso de las partes estructurales, reducción de las vibraciones y el ruido de las partes ensambladas, mejor utilización de los materiales, mejor integridad estructural, mejor resistencia a la corrosión y mejor precisión dimensional [5]. Al año, se producen entre 200 y 250 millones de chapas soldadas con láser, lo que supone un consumo de 300.000 toneladas de material [6].



Figura 1. Partes estructurales del coche rotas tras el estampado a causa de defectos en el cordón

Durante el proceso de fabricación de TWBs, existe un paso crítico debido a la precisión necesaria y al pequeño espesor de las chapas a unir; este paso es la unión mediante soldadura láser. Los defectos generados en la soldadura son la principal causa de rechazo durante la etapa de control de calidad de los productos finales (Figura 1). Además, una soldadura incorrecta impide que el proceso de fabricación continúe correctamente ya que la pieza fallará en procesos de conformación por estampado posteriores. Con el fin de optimizar este proceso de fabricación, así como la cantidad de material utilizado y reducir el material desechado, la industria ha ido adoptando sistemas de inspección en línea para evaluar el 100% de las piezas soldadas y descartar aquellas que presenten defectos para evitar malgastar recursos y tiempo en procesos posteriores.

Los sistemas de inspección en línea media que hacen uso de transductores ElectroMagnético Acústicos (EMAT) son la mejor opción para inspeccionar TWB ya que utilizan ultrasonidos que generan ondas guiadas volumétricas capaces de evaluar el volumen interno completo del cordón de soldaduras de espesores desde décimas de milímetro hasta varios milímetros. Sin embargo, esta tecnología presenta limitaciones para identificar defectos exteriores al cordón o geométricos tales como el desalineamiento lateral y vertical de las chapas. Para abordar esta limitación, algunos fabricantes combinan esta técnica ultrasónica con equipos de visión artificial pero la inspección con dos sistemas consecutivos en línea presenta varios inconvenientes: sobredetección e incremento de costes de operación y mantenimiento.

Este artículo presenta una nueva tecnología híbrida de inspección que suprime estas limitaciones. OPTIBLANKS es el primer equipo híbrido que combina EMAT y visión artificial para establecer un criterio de aceptación/rechazo unificado en base a la combinación de la información proporcionada por ambas tecnologías no destructivas. Esta hibridación dota al sistema final de más inteligencia, lo que le permite tomar decisiones más robustas y optimizar el proceso de fabricación y la calidad del producto final.

## **2. Estado del arte**

En comparación con los sensores de ultrasonido convencional, los transductores EMAT no generan el ultrasonido en el interior del sensor. El ultrasonido se genera por la interacción electromagnética directamente en el interior del material a inspeccionar. Es por esto que la inspección se realiza sin usar acoplantes y permite que haya cierta separación entre el sensor y el material a inspeccionar [7].

La Figura 2 muestra las diferencias entre la generación de ultrasonidos con transductores convencionales y EMAT [8]. A la izquierda, se muestra un transductor convencional en el que el cristal piezoeléctrico se excita para hacerlo oscilar. El uso de gel acoplante es necesario para transmitir dicha oscilación al material a inspeccionar. A la derecha, se muestra el principio de generación con EMATs. Los sensores EMAT necesitan tener un imán (permanente o electroimán) y una bobina RF [9]. Con los transductores EMAT las ondas ultrasónicas se generan en el interior del material gracias a la interacción de dos campos magnéticos: uno de alta frecuencia (RF) generado por las bobinas con otro de baja frecuencia generado por imanes. Esta interacción genera fuerzas de Lorentz que hacen vibrar la estructura del material, produciendo una onda elástica que viaja por el material a inspeccionar. De forma recíproca, las ondas elásticas reflejadas por un defecto en presencia de un campo magnético inducen corrientes en la bobina receptora EMAT.

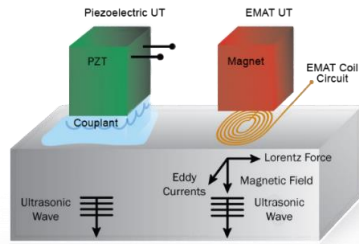


Figura 2. Comparación entre transductores de ultrasonido convencional y EMAT

En materiales ferromagnéticos, la magnetostricción refuerza el efecto de la fuerza de Lorentz produciendo señales ultrasónicas de mayor amplitud.

Las ventajas de EMAT frente a los transductores piezoeléctricos son: i) el proceso de transducción se produce en la superficie del material; ii) no necesita acoplante; iii) no se ve afectada por el estado superficial de la pieza; iv) se pueden inspeccionar superficies ásperas, sucias (aceite/agua), oxidadas o irregulares; la inspección se puede realizar en productos planos, curvos o con superficies más complejas; v) se pueden realizar inspecciones a alta velocidad (hasta 60 m/s); vi) EMAT permite medir a altas y bajas temperaturas; vii) se pueden generar ondas Lamb, transversales horizontales (SH), transversales verticales (SV), longitudinales y superficiales dada su buena selectividad en frecuencia. Las limitaciones de EMAT son la alta potencia requerida, el gran tamaño de los transductores debido al imán y la baja relación señal ruido (SNR) [10] [11] [12]. Además, el material debe ser conductor de la electricidad.

Entre los defectos descritos en las normas EN ISO 1399-1:1996 [13] y SEL100, EMAT es capaz de detectar poros internos, concavidades en la parte superior y raíz de la soldadura, reducciones de la sección transversal de la soldadura, exceso de material y exceso de penetración en la raíz entre otros (Figura 3). Sin embargo, tiene dificultad para detectar desalineamientos laterales, defectos al inicio y final de la soldadura y desalineamientos verticales positivos.

Los fabricantes de TWB usan como técnica complementaria a EMAT la profilometría láser. Defectos externos tales como el desalineamiento o la horizontalidad han sido extensamente estudiadas por técnicas de visión artificial.

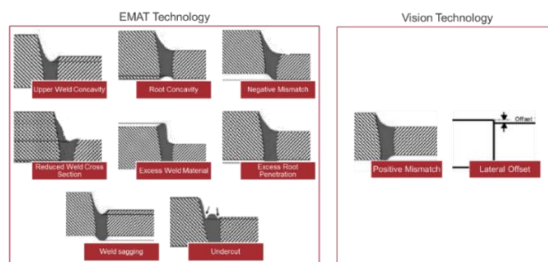


Figura 3. Defectos detectados por cada una de las tecnologías

Este artículo presenta el proceso de validación del primer sistema de inspección híbrido de Ensayos NO Destructivos (END) que combina la tecnología EMAT con visión artificial para proporcionar un criterio de aceptación/rechazo consensuado y unificado

### 3. Montaje experimental

El equipo híbrido OPTIBLANKS consta de tres subsistemas: sistema EMAT, sistema de visión 3D superior y sistema de visión 3D inferior. Los resultados de cada subsistema son adquiridos por ordenadores independientes y después se juntan para ser analizados,

procesados y mostrados de forma conjunta. La Figura 4a muestra el esquema de la arquitectura y la comunicación del sistema OPTIBLANKS.

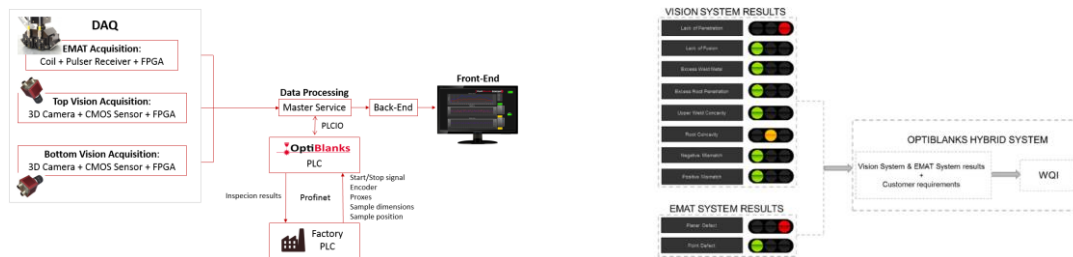


Figura 4. a) Arquitectura y Comunicación de OPTIBLANKS, b) Criterio de rechazo

El sistema EMAT discrimina entre defectos de tipo planar (defectos largos como falta de penetración, etc) y puntuales (poros, etc), mientras que el de visión clasificar los defectos de interés de forma independiente. La decisión sobre si la chapa inspeccionada es apta o no se basa en la combinación de los resultados obtenidos con ambas técnicas y es dependiente de los criterios de aceptación establecidos por el cliente (umbrales). Como resultado de este proceso se genera un índice de la calidad de la soldadura (WQI) que toma valores entre el 0% y el 100% (Figura 4).

Cada uno de los sistemas 3D consta de una cámara 3D. El ángulo entre la cámara y la fuente de iluminación (láser) se determinó y optimizó para esta aplicación de forma empírica (Figura 5).

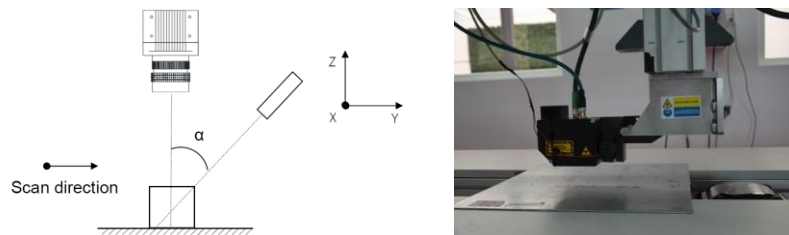


Figura 5. Sistema 3D a) Configuración, b) Montaje en el gantry

Para evaluar el funcionamiento del sistema antes de la fase de validación en planta, se diseñó un banco de pruebas que permite replicar las condiciones reales de operación de las líneas en las que se instalará OPTIBLANKS (Figura 5). El banco de pruebas tiene dos cabezales con sistemas láser (uno para inspeccionar la cara superior y otro para la cara inferior de la chapa) que pueden alcanzar velocidades de hasta 60m/min. La mesa de inspección cuenta además con electroimanes para afirmar las chapa que están siendo inspeccionadas de forma similar a las líneas de fabricación de TWBs. Mediante un sistema de fotocélulas se garantiza la seguridad del inspector mientras el sistema está en funcionamiento de modo que la inspección se detiene automáticamente en el momento que se cruzan los límites de seguridad marcados por las fotocélulas.



Figura 6. Banco de pruebas automatizado

## 4. Pruebas de validación en planta y resultados

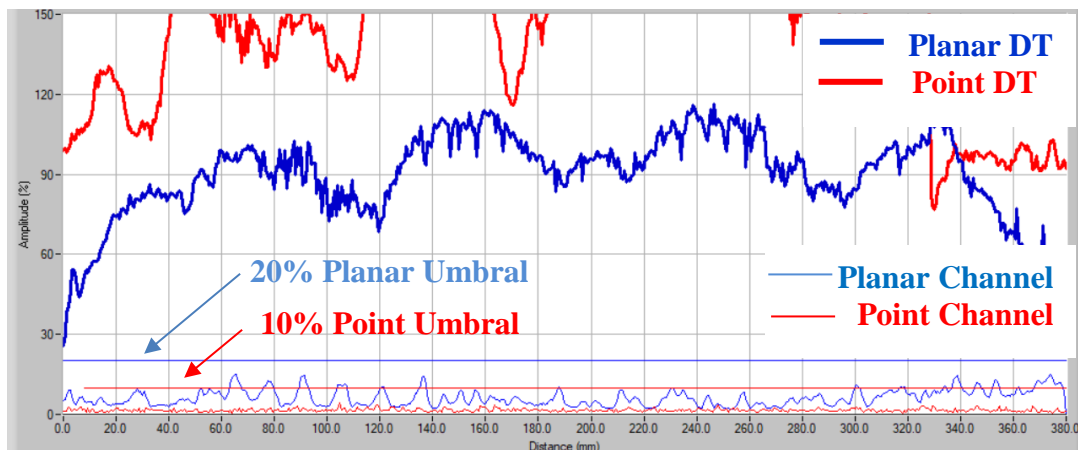
La validación del equipo se realizó en la planta de fabricación de TWB Gestamp Solblank. Gestamp Solblank es líder mundial en la fabricación de componentes de automoción y a su vez uno de los fabricantes que cuenta con mayor producción y líneas de fabricación de TWBs más avanzadas en toda Europa. Para la realización de las pruebas de validación se instaló el módulo de visión en la línea de control de rechazos “controladora” (Figura 7) ya que esta línea ya contaba con un sistema EMAT integrado. Aquí se inspeccionan chapas rechazadas y aquellas clasificadas como inválidas (debido a errores de inspección o inspección sin resultado) durante el proceso de control de calidad. Durante las pruebas en planta se inspeccionaron 300 chapas de dos referencias distintas (una de ellas monoespesor y la otra con una diferencia de espesor de 0.5mm entre las chapas soldadas)



Figura 7. Línea Controladora (Gestamp Solblank)

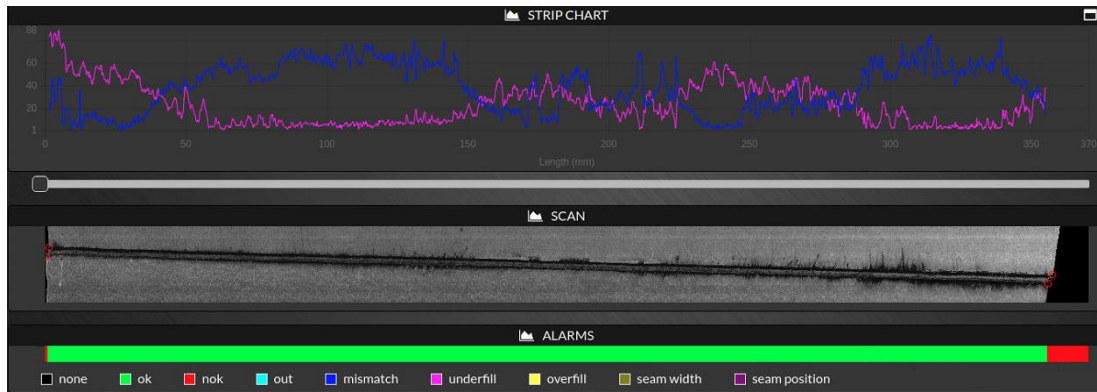
A continuación, se presentan los resultados de cuatro casos de estudio: en uno de ellos la soldadura no tenía defectos y en los otros tres restantes sí. En cada caso se muestran los resultados de ambas técnicas para demostrar la necesidad y la importancia de desarrollar una tecnología híbrida para la inspección de TWB.

En primer lugar se presentan los resultados de una TWB sin defectos en la soldadura (Figura 8). Las señales registradas por los canales planar y puntual del equipo EMAT están por debajo de los umbrales del 20% y 10% establecidos por los operadores de planta respectivamente. Las medidas tomadas con el equipo visual (concavidad y desalineamiento vertical) no cruzan el umbral de 100  $\mu\text{m}$  establecido. Es por esto que esta chapa se clasificó y envió a la pila de TWB consideradas como aptas.



a) EMAT results on a defect-free blank

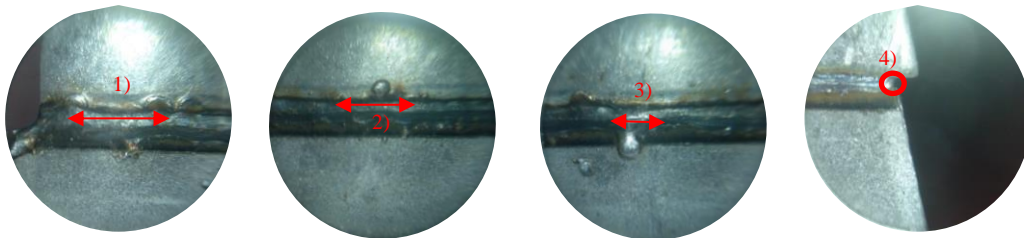




b) Visual results on a defect-free blank

Figura 8. Comparison between a) EMAT and b) Visual testing results

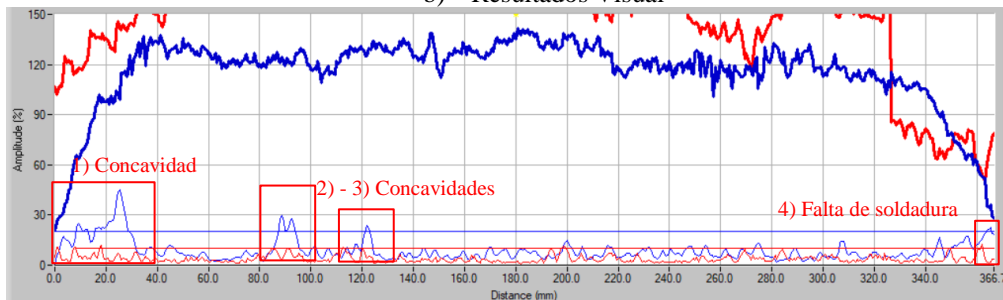
En segundo lugar se estudió una chapa que fue rechazada por las dos técnicas, proporcionando ambas indicaciones similares. Inicialmente la soldadura fue inspeccionada visualmente por un operador (Figura 9a). La soldadura presenta una concavidad al principio y otras dos más durante la primera mitad del cordón. Debido al desalineamiento lateral al final de la soldadura, hay una falta de unión soldada al final (defecto 4)



a) Fotografías de la soldadura



b) Resultados Visual



c) Resultados EMAT

Figura 9. Soldadura rechazada por ambas técnicas b) Visual, c) EMAT

El equipo visual detectó los cuatro defectos con la característica que analiza la concavidad de la soldadura (Figura 9b). El valor de la concavidad aumenta cuando la cámara se encuentra sobre las zonas con defecto.

El sistema EMAT también fue capaz de detectar esos cuatro defectos (Figura 9c). Las concavidades generan reflejos que son detectados por el canal planar (defectos alargados, línea azul). La falta de unión soldada al final de la chapa es detectada por ambos canales planar y puntual. La indicación del defecto no es tan clara como en casos anteriores porque la bobina se encuentra prácticamente fuera de la chapa en ese instante. En la Tabla 1 se

muestran los resultados del equipo de visión expresados en  $\mu\text{m}$  de concavidad (usando como referencia la chapa fina de  $1000 \mu\text{m}$ ) y los del equipo EMAT en porcentaje de amplitud de la reflexión generada por los defectos.

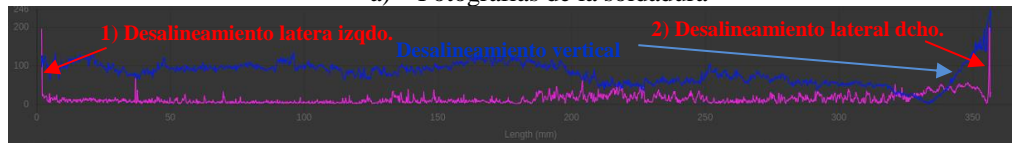
**Tabla 1. Resultados cuantitativos (TWB rechazada)**

|               | 1) Concavidad                       | 2) Concavidad                       | 3) Concavidad                      | 4) Falta de soldadura                |
|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Visual</b> | 196.92 $\mu\text{m}$<br>19.7 % prof | 178.75 $\mu\text{m}$<br>17.9 % prof | 102.9 $\mu\text{m}$<br>10.3 % prof | 232.15 $\mu\text{m}$<br>23.12 % prof |
| <b>EMAT</b>   | 45 %                                | 29.80 %                             | 23.80 %                            | 22.30                                |

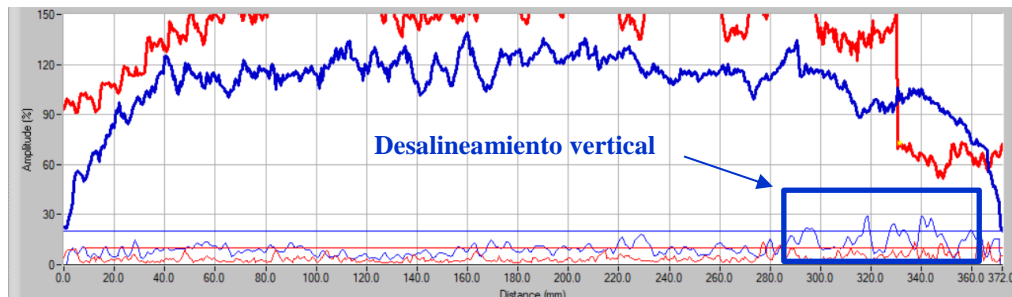
En tercer lugar, se analizó una chapa que también fue rechazada por ambos equipos, pero con distinto grado de probabilidad de detección (POD). Antes de ser inspeccionada por los equipos de END, la soldadura fue revisada visualmente por un operador quien identificó desalineamientos laterales al principio y al final del cordón (Figura 10a).



a) Fotografías de la soldadura



b) Resultados Visual



c) Resultados EMAT

**Figura 10. Soldadura rechazada (mayor POD con visual)**

El sistema visual detectó ambos defectos con la característica que evalúa la concavidad de la soldadura (Figura 10b). Esta característica, representada por la línea magenta, aumenta cuando el sistema inspecciona las zonas con desalineamiento lateral.

El sistema EMAT (Figura 10c) no mostró reflexiones relacionadas con el desalineamiento lateral al principio de la soldadura. Sin embargo, el canal planar (línea azul) cruza el umbral del 20% justo antes del final de la soldadura (320-350 mm). Esta reflexión está relacionada con un desalineamiento vertical que también fue identificado por el equipo visual (por eso la línea azul aumentaba hasta el final de la inspección). Los valores cuantitativos de estos resultados se muestran en Tabla 2.

**Tabla 2. Resultados cuantitativos (TWB rechazada)**

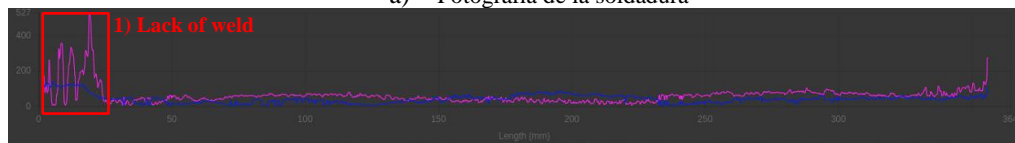
|               | 1) Desalineamiento lateral izqdo.. | 2) Desalineamiento lateral dcho. |
|---------------|------------------------------------|----------------------------------|
| <b>Visual</b> | 208.9 $\mu\text{m}$                | 222.55 $\mu\text{m}$             |

|             |                    |                    |
|-------------|--------------------|--------------------|
|             | 20.9 % profundidad | 22.2 % profundidad |
| <b>EMAT</b> | -                  | -                  |

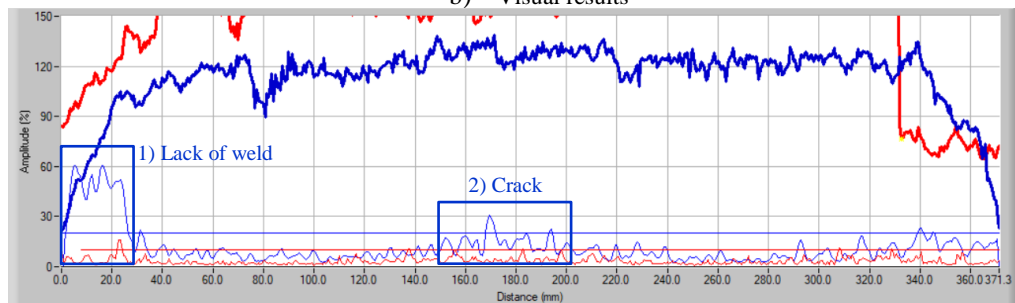
Por último, se presentan los resultados de la inspección de una TWB en la que la unión entre ambas chapas no es buena (Figura 11a). Como se muestra en la siguiente figura no hay cordón en algunas zonas. Este defecto fue claramente detectado por el sistema visual (Figura 11b) y EMAT (Figura 11c). Este caso de estudio es un excelente ejemplo para justificar la necesidad de un sistema de inspección híbrido en las líneas de fabricación de TWB.



a) Fotografía de la soldadura



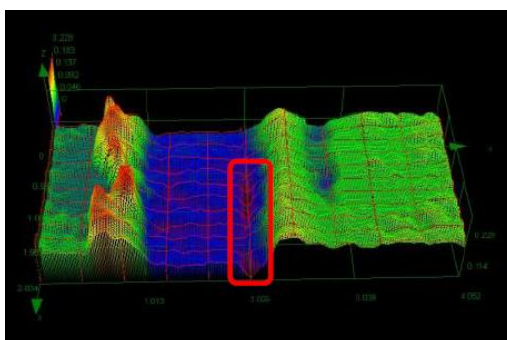
b) Visual results



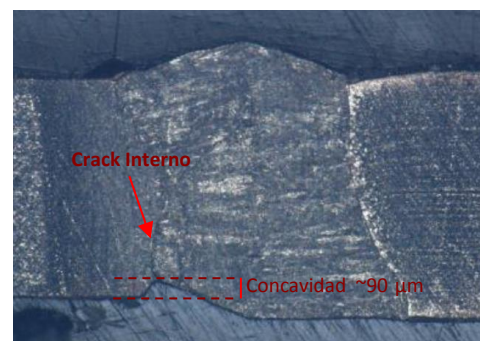
c) EMAT results

**Figura 11. Soldadura rechazada (mayor POD con EMAT)**

Además de ese fallo de unión, los sistemas EMAT y visual mostraron ligeros incrementos en las señales del canal planar y en la característica de concavidad respectivamente antes del final de la inspección. El sensor EMAT captó reflexiones en la zona central de la soldadura indicativas de defecto. Sin embargo, el sistema visual no mostró ninguna indicación al respecto. El hecho de ser detectado por EMAT, que es una técnica de inspección volumétrica, nos indica que el defecto puede ser interno. Para salir de dudas con respecto a la causa de la reflexión, Gestamp Solblank realizó un estudio macrográfico en la región de interés.



a)



b)

**Figura 12. Macrográficas de la soldadura a) 3D, b) 2D**

Las macrográficas revelan que en esa zona había una pequeña concavidad de 90  $\mu\text{m}$  que originó una grieta hacia el interior. Aunque la concavidad es muy pequeña como para afectar



a la integridad de la soldadura (tamaño por debajo de los 100  $\mu\text{m}$ ), en el proceso de estampado posterior, esta soldadura rompería a causa de la grieta interna detectada únicamente por EMAT. Los resultados cuantitativos de esta inspección se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3. Resultados cuantitativos (soldadura rechazada)**

|        | 1) Falta de unión                                     | 2) Crack       |
|--------|---|----------------|
| Visual | <b>527.42<math>\mu\text{m}</math><br/>52.7 % prof</b> | -              |
| EMAT   | <b>60.40 %</b>  | <b>30.80 %</b> |

Tal y como se arroja de este resultado, la detección de defectos internos en el cordón es una de las características diferenciadoras que hacen imprescindible el uso de tecnología EMAT para esta aplicación. Los defectos internos no son detectables de ningún otro modo pudiendo causar rupturas a pesar en el proceso de estampación a pesar de haber pasado a través de sistemas de control visual.

## 5. Conclusiones

El sistema de inspección híbrido OPTIBLANKS fue integrado en la línea controladora de Gestamp Solblank. El sistema inspeccionó 300 chapas de dos referencias distintas. Los resultados globales de la inspección se muestran en la Tabla 4:

**Tabla 4. Resumen global de resultados**

| Soldaduras OK | Soldaduras Rechazadas |                      |                      |
|---------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>34.3%</b>  | <b>65.7%</b>          |                      |                      |
|               | POD<br>EMAT=Visual    | POD<br>Visual > EMAT | POD<br>EMAT > Visual |
|               | <b>65.2%</b>          | <b>21.7%</b>         | <b>13.1%</b>         |

Sólo el 34.3% de todas las soldaduras inspeccionadas durante el periodo de validación resultaron estar en buen estado, mientras que el 65.7% fueron rechazadas por ambas técnicas. Centrándonos en los casos de rechazo, la mayor parte de las veces ambas técnicas proporcionan resultados similares y por tanto rechazan la soldadura por las mismas razones. Sin embargo, hay casos en que una de las técnicas detecta defectos que la otra técnica no es capaz de ver. Un 21.7% de las veces el sistema visual mostró una POD mayor y un 13.1% de las veces EMAT fue más eficaz en cuanto a la detección de defectos.

A la luz de los resultados mostrados en este artículo se concluye lo siguiente:

- El uso de tecnología EMAT para inspección de soldadura láser de chapa fina es la mejor opción para asegurar la resistencia estructural y falta de defectos internos en el cordón. Esta tecnología puede ser complementada mediante sistemas de visión para caracterizar defectos geométricos, mejorando así la respuesta ante desalineamientos laterales o verticales.
- Excelente tasa de falsos positivos/negativos: el sistema OPTIBLANKS no clasificó ninguna soldadura buena como mala y viceversa. La clasificación de buenas/malas fue del 100% en las pruebas llevadas a cabo.
- La probabilidad de detección de defectos (POD) en procesos de fabricación de TWB puede mejorar al complementar la tecnología EMAT mediante sistemas de inspección visual. La tecnología EMAT es necesaria en todos los casos para asegurar la integridad del cordón.

- Los resultados aportados mediante los indicadores de reflexión del ultrasonido EMAT representan con gran fidelidad la resistencia estructural del cordón. De este modo, esta tecnología no solo sirve para detectar defectos sino para optimizar el proceso de soldadura.

## 6. Agradecimientos

Los resultados mostrados en este artículo se han obtenido gracias a Gestamp Solblank quien dio acceso a Innerspec a su línea controladora para realizar pruebas de validación de la tecnología.



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 778392. This work reflects only the author's view and that the Agency is not responsible for any use that may be made of the information it contains.

## 7. Bibliografía

- [1] *TWB Company LLC Brochure*, October 2017.
- [2] S. Chan, L. Chan y T. Lee, «Tailor welded blanks of different thickness ratios effect on forming limit diagrams,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 132, nº 1-3, pp. 95-101, 2003.
- [3] R. Pallet y R. Lark, «The use of tailored blanks in the manufacture of construction components,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 117, nº 1-2, pp. 249-254, 2001.
- [4] P. Golinska, *Environmental Issues in Automotive Industry*, Springer, 2013.
- [5] B. Kinsey y X. Wu, «Tailor Welded Blanks for Advanced Manufacturing,» 2011.
- [6] E. A. M. Association, *EU Production*, 2017.
- [7] F. Niese, «EMUS-Wanddickensensor für die Pipeline Inspection mit integrierter Wirbelstrom und Streuflussprüfung,» de *Dissertation*, Saarbrücken, 2010.
- [8] B. López, «In-Service Inspections Using EMAT and MRUT,» The Woodlands (USA), July-August 2015.
- [9] J. García, R. Gil, M. Rosa, A. Romero, J. Jiménez y V. García, «Smart Sound Processing for Defect Sizing in Pipelines using EMAT Actuator Based Multi Frequency Lamb Waves,» *Sensors*, vol. 18, nº 3, p. 802, 2018.
- [10] Y. Xie, S. Rodríguez, W. Zhang, Z. Liu y W. Yin, «Simulation of an Electromagnetic Acoustic TRransducer Array by using Analytical Method and FDTD,» *Journal of Sensors*, pp. 1-10, 2016.
- [11] X. Song y Y. Wang, «Effects of AC Coils Parameters on Transduction Efficiency of EMAT for Steel Plate INspection,» *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-11, 2014.
- [12] Z. Cai, H. Cheng y C. Liu, «Nonlinear Electromagnetic Acoustic Testing Method for TEnsilE Damage Evaluation,» *Journal of Sensors*, pp. 1-11, 2018.
- [13] «Welding Electrons and laser beam welded joints: Guidance on quality levels for imperfections. Part 1: Steel,» *ISO 13919-1,1996*.