



# DETECCIÓN DE DELAMINACIONES Y OTROS DEFECTOS DE UNIÓN EN PRODUCTOS DE ACERO MULTICAPA Al/Al-Sn/Al LLEVANDO A CABO LA MONITORIZACIÓN CON ONDAS GUIADAS EMAT

Autores: Philip J. Tallafuss<sup>1</sup>, V. García<sup>2</sup>, P. Kowski<sup>2</sup>, A. Romero<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Design, Manufacture and Engineering Management, University of Strathclyde, Glasgow*

<sup>2</sup>*Innerspec Technologies Europe S.L.*

## Resumen

Ondas guiadas superficiales (Rayleigh) y tipo Lamb fueron usadas para la detección de delaminaciones, residuos de acero embebidos en la matriz del material y problemas de adherencia de la frágil capa intermetálica de Al-Fe en la interfaz formada por el aluminio revestido y el acero generados durante el proceso de laminación en frío "Cold Roll Bonding" (CRB). Se fabricaron muestras multicapa con defectos artificiales de distintos tamaños, localizados entre el aluminio recubierto y el acero. El objetivo de este manuscrito es mostrar la sensibilidad de las ondas guiadas EMAT para indicar, cualitativamente, la presencia de defectos, utilizando para ello técnicas de atenuación de la señal adquirida. Para la generación y recepción de las ondas guiadas se usaron transductores acústico-electromagnéticos (EMAT) dispuestos en configuración *pitch-catch* (transmisión-recepción). La toma de medidas se llevó a cabo en el material laminado antes y después

de aplicar el recocido, de forma que se pudieran evaluar las diferencias que el tratamiento térmico provocaba en términos de atenuación y de relación señal-ruido (SNR). El modo  $S_0$  de onda Lamb se demostró adecuado para la detección de delaminaciones y residuos de acero embebidos en la matriz del material, existiendo una relación entre el grado de atenuación y, el tipo y tamaño de defecto, así como con la realización del recocido. Sin embargo, dicho modo no pudo detectar falta de adherencia de la frágil capa intermetálica de Al-Fe debido a los espesores de la capa de aluminio recubierto y del acero. Secciones de las muestras inspeccionadas con EMAT fueron posteriormente evaluadas, metalográficamente, para corroborar las indicaciones de defecto. Los resultados demostraron la viabilidad del uso de ondas guiadas Rayleigh y Lamb para la detección de defectos de unión en la producción en serie de planchas bimetálicas de Al-Sn/Acero.

## 1. Introducción

Las planchas de Al/Al-Sn/Al/Acero que por simplicidad se llaman planchas bimetálicas de Al-Sn/Acero se usan en la industria del automóvil para la fabricación de rodamientos para motores dadas las buenas propiedades del material híbrido formado por la aleación Al-Sn

y el acero. La metodología recogida en este artículo se aplicó en muestras bimetálicas de aluminio recubierto y acero laminadas en frío (CRB). La unión de ambos metales por laminación en frío se produce a temperatura ambiente gracias al fenómeno de deformación plástica. La Figura 1a muestra un esquema del proceso CRB. La desventaja de la técnica es la necesidad de tener



buenos acabados superficiales en las caras a unir, por lo que son necesarias operaciones secundarias para preparar esas superficies. Actualmente la industria utiliza técnicas de ensayos destructivos tales como *chisel test*, *peel test*, *shear test*, *Erichsen cup test* o *hot hammer test*. A pesar de que todas ellas tienen ventajas e inconvenientes particulares, todos tienen una desventaja en común, ya que sólo una pequeña muestra de material es inspeccionada. La Figura 1b muestra una micrografía de una de las muestras multicapa Al/Al-Sn/Al/Acero. Las capas de recubrimiento del núcleo de Al-Sn eran láminas de Al-1050. La aleación Al-Sn contiene un porcentaje nominal de estaño del 6 %. Las tres capas Al/Al-Sn/Al serán mencionadas a lo largo del artículo como Al recubierto. Este conjunto tri-capa se adhiere al acero por medio del proceso de laminado en frío siempre y cuando el acero no muestre porosidad u óxido. El acero utilizado es de bajo contenido en carbono.

La Figura 2 muestra la probabilidad con la que aparecen determinados tipos de defecto en las muestras que son objeto de este estudio. Pone de manifiesto

que el 71 % de los defectos encontrados en materiales multicapa del tipo Al/Al-Sn/Al/Acero se asocian a falta de adhesión entre la lámina de Al-1050 y el acero, mientras que la falta de adhesión entre la capa de Al-Sn y el recubrimiento de Al-1050 es menos recurrente (10 % de los casos). Por ello, se puede decir que el 80 % de los defectos presentes en estos materiales multicapa se deben a problemas de adhesión.

La Figura 3a muestra una micrografía de la unión de Aluminio recubierto que presenta una delaminación que excede el valor crítico de 250  $\mu\text{m}$  de longitud. Este valor crítico fue determinado de forma empírica. Si la longitud de la delaminación excede el límite, existe riesgo de que la unión en la cara interior del rodamiento falle en servicio o durante el mecanizado de la carrera interior. El fallo por falta de adhesión de la cara interior del rodamiento mostrado en la Figura 3b se produjo durante el proceso de mandrinado de la carrera de los elementos rodantes. Esto ocurre cuando las fuerzas transversales exceden las fuerzas de adhesión entre las capas.

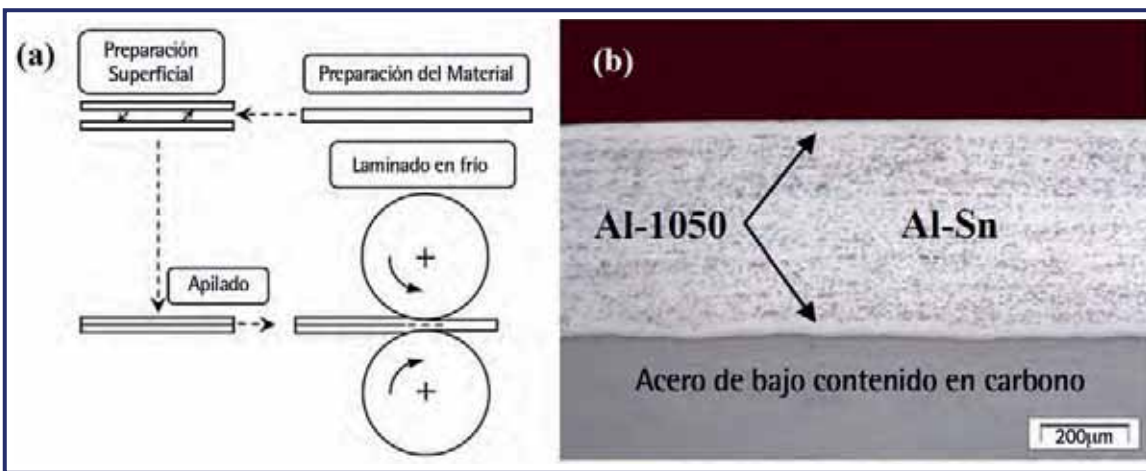


Figura 1. a) Esquema del proceso de laminación en frío. b) Corte transversal de la muestra multicapa Al/AlSn/Al/Acero

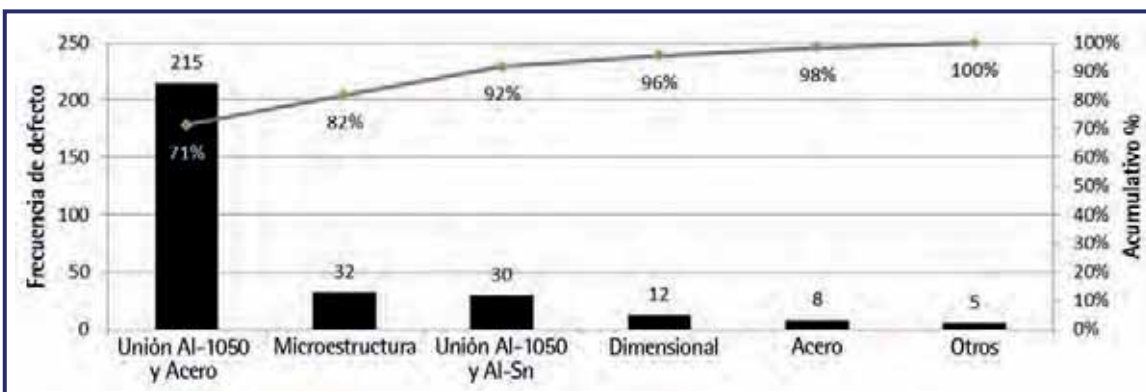


Figura 2. Probabilidad de encontrar distintos tipos de defectología en materiales multicapa Al/Al-Sn/Al/Acero



La micrografía de la Figura 3c muestra una delaminación entre la lámina de Al-1050 y el núcleo de aleación Al-Sn. Este tipo de delaminación aparece en forma de ampollas en la superficie superior de la lámina bimetálica de Al-1050 (véase Figura 3d).

llevando a cabo el escaneo en una sola dirección. Este estudio muestra la utilización de ondas guiadas tipo Lamb y superficiales (Rayleigh) para inspeccionar el estado de la unión entre láminas de materiales multicapa del tipo Al/Al-Sn/Al/Acero.



Figura 3. Delaminación en Al recubierto. a) Sección transversal. b) Media carcasa de rodamiento. c) Sección transversal. d) Superficie de la lámina de Al-1050

Teniendo en cuenta la dificultad de crear uniones metalúrgicas entre dos metales diferentes por el proceso de laminado en frío (CRB) y las limitaciones de las técnicas destructivas, previamente mencionadas, surge la necesidad de utilizar técnicas no destructivas (END) automatizables y capaces de inspeccionar el material durante el proceso productivo, justo después de haber sido laminado en frío. En la bibliografía relativa a técnicas de ensayos no destructivos para inspección de materiales bimetálicos del tipo Al-Sn/Acero se mencionan las técnicas de termografía activa y shearografía. Ambas tienen la desventaja de que no pueden ser usadas durante la producción, pues es necesario identificar métodos de excitación más apropiados. El estado del arte también refleja el trabajo llevado a cabo con la técnica de ultrasonido convencional generando ondas libres. En este caso, el inconveniente es que con ultrasonido convencional se hace un estudio generando las ondas a 0°, por lo que es necesario llevar a cabo un rastreo bidimensional por el material de forma que se inspeccione todo el volumen de la pieza. Por el contrario, las ondas guiadas inspeccionan todo el volumen del material

## 2. Procedimiento experimental

### 2.1 Análisis teórico de la propagación de ondas

La Tabla 1 resume las propiedades del material que están relacionadas con el modo de propagación de las ondas guiadas. Todas las capas del Al recubierto se consideran isótropas para la simulación de las curvas de dispersión de las ondas guiadas, que se basan en la teoría general de la elastodinámica, representada por la ecuación de desplazamiento:

$$(\lambda + \mu)u_{j,ji} + \mu u_{i,jj} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i$$

$\lambda$  y  $\mu$  son el primer y segundo coeficiente de Lamé, los cuales dependen del Módulo de Young y el coeficiente de Poisson del material de cada capa. Para reducir la complejidad durante las simulaciones, las tres capas que componen el Al recubierto fueron consideradas como una. El desplazamiento se representa por  $u$ ,  $\rho$  es la densidad y  $f$  representa la fuerza. Las direcciones de

Características	Al recubierto			Material Base
	Al-1050	Aleación Al-Sn	Al-1050	Acero
Espesor (mm)	0.04+/-0.01	0.51	0.04+/-0.01	1.08
Ancho (mm)	211	211	211	211
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.71	3.11	2.71	7.8
Módulo de Young (GPa)	70	70	70	203
Coefficiente de Poisson	0.33	0.33	0.33	0.293

Tabla 1. Propiedades de la lámina bimetálica compuesta por la aleación Al-Sn y acero



los ejes se expresan por los índices  $i$  y  $j$ . El primer índice representa la dirección de propagación de la onda, el segundo la dirección del frente de onda y el tercero la dirección del espesor. Innerspec calculó mediante el método semianalítico de elementos finitos (SAFE) las curvas de dispersión. Las curvas de dispersión para ondas tipo Lamb y Rayleigh (expresadas en términos de velocidad de grupo y de fase) fueron calculadas para el material bimetálico formado por la aleación Al-Sn y Acero. Cada combinación de frecuencia y velocidad dada por las curvas de dispersión representa, teóricamente, un posible modo de onda. Las ondas Lamb presentan modos simétricos (S) y asimétricos (A) y sus características de propagación dependen del ángulo de entrada del ultrasonido, excitación y geometría. El modo de onda Lamb ideal para inspeccionar debería tener las siguientes características: a) ser no dispersivo, b) mostrar poca atenuación, c) poseer alta sensibilidad, d) ser de fácil excitación y e) ofrecer una buena detectabilidad. Tras aplicar estos criterios de selección a los resultados obtenidos de la simulación, se seleccionaron varios modos de onda que fueron evaluados experimentalmente. Tras el estudio y comparación de la respuesta de estos modos, se observó que el modo  $S_0$  a una frecuencia eficientemente excitable y una longitud de onda menor que el tamaño del defecto a detectar, detectaba con suficiente sensibilidad los defectos artificiales introducidos en las muestras bimetálicas de aleación Al-Sn y Acero.

## 2.2 Preparación de las muestras a inspeccionar

Para llevar a cabo este estudio, se realizaron nueve ensayos experimentales. Las muestras analizadas fueron chapas bimetálicas de grosores comprendidos entre 1.55 y 1.65 mm, donde 0.52 mm del espesor

total son de Al recubierto y 1.08 mm de acero (espesores tras haber aplicado el proceso de laminado en frío CRB). Las muestras se produjeron de manera continua en forma de láminas que fueron cortadas en muestras individuales para facilitar su posterior evaluación. Para la fabricación de estas muestras se usó, exactamente, el mismo material que el empleado en el proceso de producción en serie de estas láminas. Sin embargo, los defectos se introdujeron, artificialmente, justo antes de proceder con el laminado en frío (CRB) que se muestra en la Figura 4. Se usó un tamiz para esparcir una capa fina y plana de residuos sobre la superficie del acero. Desde la Figura 4a hasta la Figura 4d se muestra la deposición de los residuos de alúmina ( $Al_2O_3$ ). En las imágenes comprendidas entre la Figura 4e y la Figura 4h se muestra la creación del defecto artificial con partículas de acero. Se tuvo en cuenta la elongación en la dirección de laminado. Tras aplicar el proceso de CRB, las dimensiones en el plano de deposición ( $X_1$ - $X_3$ ) de los defectos era de 1x1, 5x5, 10x10 y 15x15 mm. Las partículas de alúmina se introdujeron con el fin de crear una delaminación artificial, ya que los óxidos superficiales dificultan la creación de uniones metálicas iniciales, que permitan llevar a cabo uniones frías efectivas. Las partículas de acero son la impureza que aparece con más frecuencia en el proceso productivo y que además perjudican la calidad de la unión. Para tener una referencia con la que comparar, también se produjo una chapa bimetálica sin defectos.

## 2.3 Preparación del experimento

Para llevar a cabo el experimento con ondas guiadas se empleó la configuración *pitch-catch* con dos transductores, donde uno actúa como transmisor y otro como receptor (Figura 5a). Los transductores se posicionaron sobre la superficie de acero.

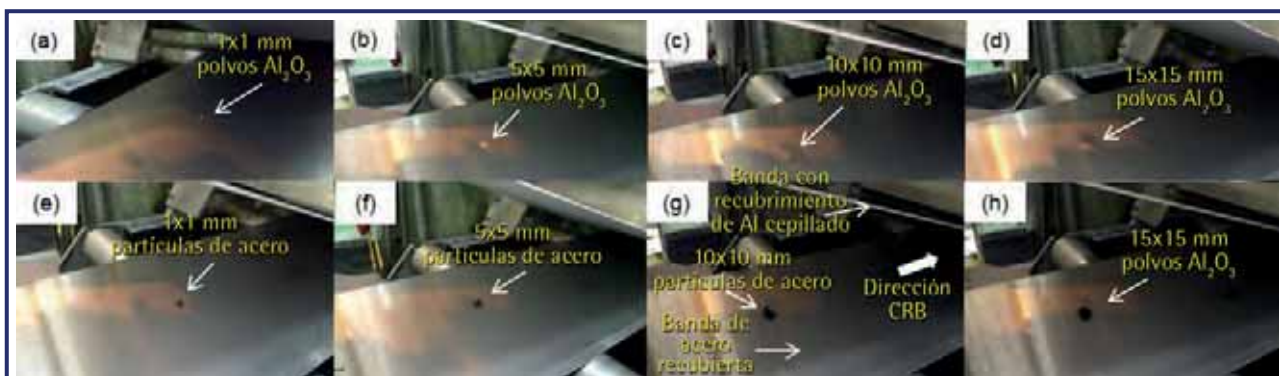


Figura 4. Muestras con defectos artificiales (delaminaciones artificiales con residuos de alumina y acero de distintos tamaños)



Los sensores EMAT fueron fabricados por Innerspec Technologies. El sensor se compone principalmente de dos elementos: a) imán y b) bobina tipo meandro. La Figura 5b muestra un esquema de las contribuciones que participan en la generación del ultrasonido EMAT. El imán genera un campo magnético ( $B$ ) normal a la superficie de inspección. Por la bobina circula una corriente ( $I$ ) que, al estar inmersa en un campo magnético, genera corrientes inducidas ( $J$ ) dentro del material. De la interacción entre las corrientes inducidas y el campo magnético del imán, las partículas de la red del material empiezan a vibrar gracias a la fuerza de Lorentz. Por tanto, el ultrasonido se genera dentro del material.

$$F = J \times B$$

Cuando la onda guiada pasa la zona en la que se posiciona el receptor se produce un campo de tensiones horizontalmente polarizado en esa región que, al interactuar con el campo magnético, genera corrientes que circulan por la bobina tipo meandro que ese encuentra entre la parte a inspeccionar y el imán. Estos sensores diseñados por Innerspec pueden transmitir y generar ondas guiadas en un ancho de banda desde 50 kHz hasta 6 MHz.

El sistema de inspección ST-La(MB) Temate® de Innerspec consta de un ordenador con FPGA y digitalizador de señales de alta velocidad que se utiliza para la generación de la señal de excitación (Figura 6a). Dicha señal se envía a una interfaz de la FPGA para entradas y salidas (DIO, Figura 6b) antes de dirigirla al amplificador de ráfagas "Tone Burst" (Figura 6c). Este amplificador,



Figura 5. Transductores EMAT utilizados para la generación y recepción de ondas guiadas propagando en un material con delaminaciones artificiales. a) Diagrama del experimento. b) Interacción entre campos magnéticos que influyen en la generación del ultrasonido

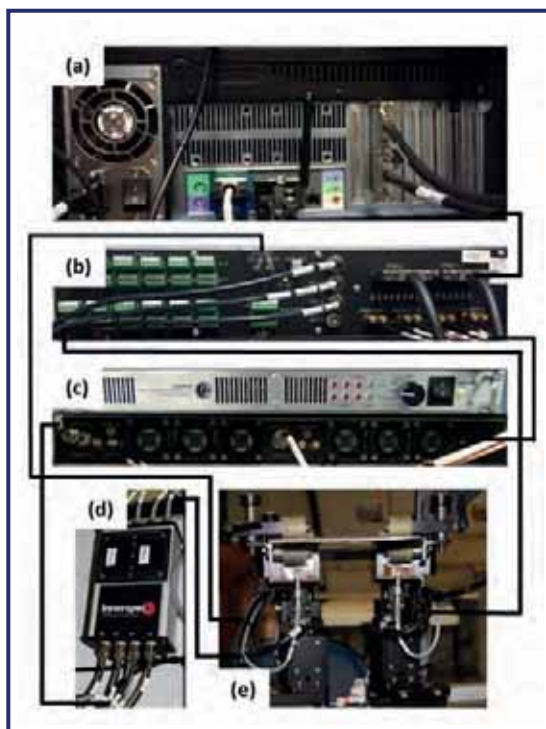


Figura 6. Innerspec Temate® a) FPGA. b) DIO. c) Amplificador. d) Caja Remota. e) Integración

de 10 kW de potencia, se encarga de convertir la señal de muy baja tensión en un pulso de alta potencia, que es necesario para que la señal EMAT generada tenga una buena relación señal ruido (SNR). En la Figura 6d se muestra la caja para acondicionamiento de señal. Su función es conectar el sensor EMAT con el amplificador de ráfagas "Tone Burst" y con la interfaz DIO. Además, tiene un conversor analógico digital (ADC) para obtener la señal digital. Con el fin de mantener ambos sensores alineados y a la misma distancia, se utilizaron los elementos de sujeción mostrados en la Figura 6e.

### 3. Resultados

#### 3.1 Inspección con ondas guiadas Rayleigh y Lamb

En la Figura 7a se muestra la imagen de osciloscopio de la señal recibida por el transmisor cuando no hay ningún defecto entre los dos sensores. El eco registrado se corresponde con la señal directa o DT que



representa la energía generada por el transmisor. La puerta (rectángulo amarillo) se posicionó entre 42 y 46  $\mu$ s. La ganancia del sistema se ajustó de forma que la amplitud del eco fuera cercana al 100 % de la ventana. Cuando aparece algún obstáculo entre el transmisor y el receptor tal como un defecto de delaminación o residuos entre las láminas de Al recubierta y acero, parte del ultrasonido es reflejado. Por ello la cantidad de ultrasonido registrada por el receptor en estos casos fue menor, es decir, la señal recibida ha sido atenuada. En la Figura 7b puede apreciarse como la amplitud de la señal recibida cae hasta el 30 % de amplitud de la ventana debido a la presencia del defecto artificial de 10x10 mm creado a partir de partículas de acero. Tal y como muestran los A-Scans de las siguientes imágenes, usando ondas guiadas tipo Lamb de modo  $S_0$  se detectó el reflejo analizando la atenuación del DT.

Con motivo de evaluar si la inspección podría integrarse dentro del proceso de laminado en frío o si, por el contrario, sólo puede realizarse tras el recocido, se llevaron a cabo ensayos antes y después de aplicar el tratamiento térmico. La Figura 8a muestra los cambios de amplitud del eco dentro de la puerta de inspección en la muestra de referencia antes de aplicar cualquier tratamiento térmico. La ganancia del equipo fue fijada a 0 dB, obteniéndose amplitudes dentro de la puerta cercanas al 100 %. Después de aplicar el recocido y manteniendo los mismos valores de los

parámetros de configuración el nivel de amplitud del eco aumentó hasta un 150 % (Figura 8b). En las muestras con el defecto de tamaño 10x10 mm generado a base de partículas de acero, se llevó a cabo la inspección en la dirección del eje X1. La Figura 8c y Figura 8d representan las muestras con defecto sin y con tratamiento térmico, respectivamente. Los valles señalados por las flechas manifiestan la presencia de defecto entre los transductores transmisor y receptor.

En la Figura 9 se muestran los valores de la mediana y los cuartiles antes y después de aplicar el tratamiento térmico tanto a las muestras usadas como referencia como a las que se les indujo un defecto. Observando los niveles de amplitud de la muestra de referencia antes y después del recocido así como a las zonas libres de defecto de las muestras defectuosas, se puede deducir que existe un aumento de la amplitud del 50 % tras el tratamiento térmico. La Figura 9a hace referencia a todos los ensayos realizados en la muestra con partículas de alúmina. A medida que el tamaño del defecto aumenta, el grado de atenuación de la señal DT se reduce dado que la energía reflejada por el defecto es mayor. La atenuación más significativa con respecto a la referencia se produce en el caso del defecto de 1x1 mm. Puede verse que el hecho de aplicar el tratamiento térmico después del laminado no tiene un gran efecto en la atenuación de la señal, mostrando los resultados antes y después del recocido órdenes de magnitud similares. La Figura 9b hace

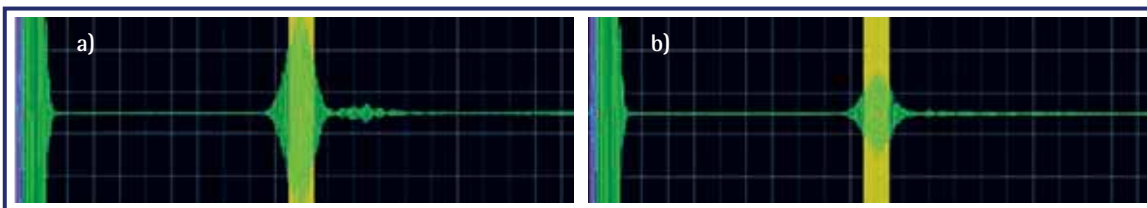


Figura 7. A-Scan tomado, a) en zona libre de defecto y b) zona con defecto

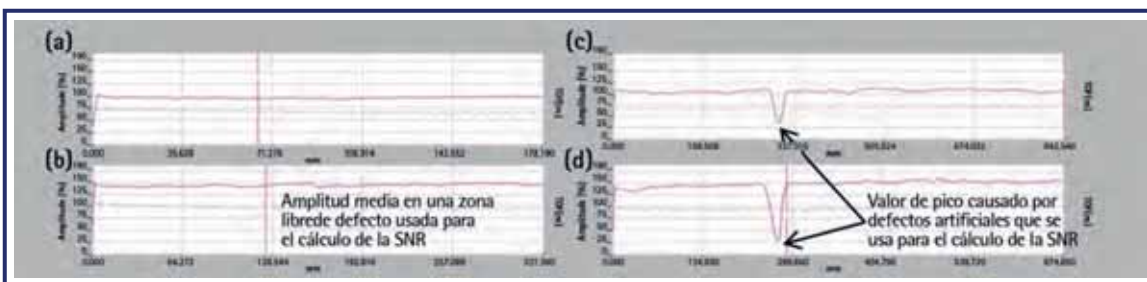


Figura 8. Monitorización del cambio de amplitud del eco situado dentro de la puerta en la muestra de referencia. a) Antes y b) después de aplicar el recocido; y en la muestra con defecto 10x10 mm creado a partir de partículas de acero c) antes y d) después de aplicar el recocido



referencia a todos los ensayos realizados en la muestra con residuos de acero. De nuevo la presencia de defectos tiene un efecto en la atenuación de la señal DT. En este caso hay cierta proporcionalidad entre el tamaño del defecto y el grado de atenuación. Además, hay diferencias entre las medidas anteriores y posteriores al tratamiento térmico. En este caso concreto, tras el recocido, la atenuación del DT es menor que si la medida se hace antes del tratamiento térmico.

Para automatizar el proceso es necesario fijar unos valores límite que al ser cruzados envíen una alarma al operador indicando que el material muestra defectos. Puesto que en presencia de defectos la amplitud recibida por el sensor receptor disminuye, la alarma se activaría cuando el valor de amplitud medido dentro de la puerta de inspección está por debajo del valor límite. Dicho valor debe seleccionarse, apropiadamente, de forma que pequeñas variaciones de amplitud debidas a cambios en las propiedades del material, factores externos o ruido no provoquen falsas alarmas. Datos empíricos demuestran que valores de la relación señal ruido (SNR) por encima de 2 proporcionan buena detectabilidad de defectos. La última fila de la Tabla 2 muestra los valores del SNR calculados con respecto a las muestras de referencia. Teniendo

en cuenta el valor mínimo de SNR que asegura buena detectabilidad, se puede asegurar que la utilización de ondas guiadas permite detectar con fiabilidad defectos artificiales creados con alúmina de tamaño igual o superior a 1x1 mm, los cuales son similares a una delaminación real. A la vista de los resultados de la tabla 2, defectos creados por la introducción de partículas de acero mayores o iguales a 5x5 mm serían detectables con esta técnica. A pesar de la reducción del grado de atenuación que provoca el recocido, podría hacerse la inspección durante el proceso productivo de estos materiales o después de haber aplicado el tratamiento térmico, ya que el efecto que esto causa en los valores del SNR es mínimo en la mayor parte de los casos.

### 3.2 Atenuación a causa de la presencia de defectos

El objetivo es corroborar la similitud entre los defectos creados artificialmente y los defectos naturales que se originan en estos materiales multicapa durante su producción. Por otro lado, también es necesario dar una explicación al distinto grado de atenuación mostrado por los defectos tipo delaminación (con  $Al_2O_3$ ) y defectos creados al embeber partículas de acero.

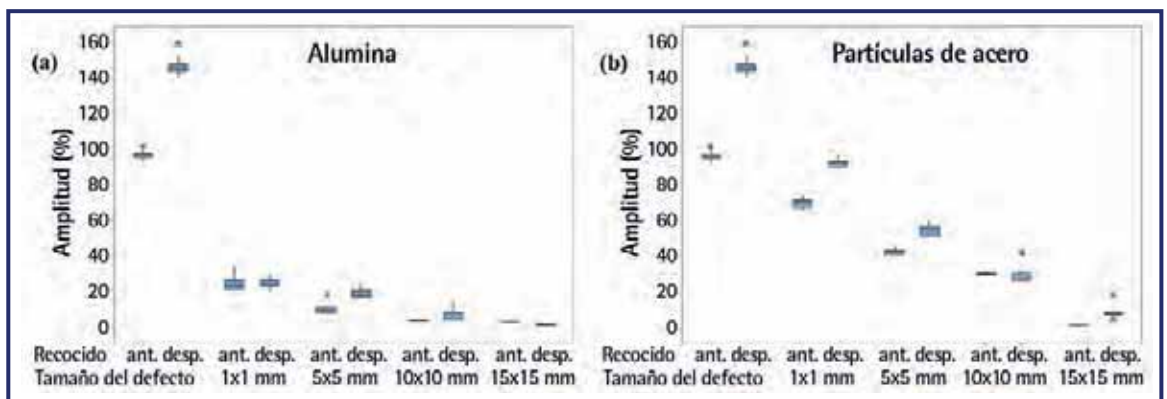


Figura 9. Amplitud del eco en la puerta medido antes y después de aplicar el recocido a las muestras con defectos artificiales de distinto tamaño a) Alúmina. b) Residuos de acero

Medida	Referencia		Defecto delaminación								Defecto partículas acero embebidas							
	Tamaño	-	1x1 mm	5x5 mm	10x10 mm	15x15 mm	1x1 mm	5x5 mm	10x10 mm	15x15 mm								
Recocido	ant.	desp.	ant.	desp.	ant.	desp.	ant.	desp.	ant.	desp.	ant.	desp.	ant.	desp.	ant.	desp.		
N	175	175	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10		
Media	96.7	144.1	23.9	24.3	9.9	18.9	3.9	6.1	2.5	1.4	70.1	92.7	42.7	55.1	30.6	30.1		
Desv. Estándar std	2.0	2.9	4.2	2.4	2.9	2.3	0.6	3.3	0.2	0.4	2.6	2.2	1.5	2.8	0.9	4.7		
SNR	-	-	4.0	5.9	9.7	7.6	25.1	23.8	38.2	106.7	1.4	1.6	2.3	2.6	3.2	4.8		

Tabla 2. Propiedades de la lámina bimetálica compuesta por la aleación Al-Sn y acero



Para ello se tomaron microsecciones de los distintos especímenes, cuyas líneas de unión fueron analizadas al microscopio óptico usando aumentos de 100x y 200x. Las secciones transversales fueron tomadas del plano formado por los ejes  $X_1$  y  $X_2$ , paralelo a la dirección de laminación. La micrografía de la Figura 10a refleja la línea de unión en la muestra de referencia, la cual está libre de porosidad, óxidos o delaminaciones. La delaminación entre el Al-1050 y el acero mostrada en la Figura 10b fue causada por una capa de alúmina mientras que en la Figura 10c la delaminación se generó naturalmente durante la producción. En ambos casos, los defectos se extienden unos 800  $\mu\text{m}$  en la dirección de laminación.

La Figura 10d muestra las partículas de acero embebidas artificialmente entre la capa de Al-1050 y el acero. La Figura 10e muestra las partículas de acero que durante el proceso productivo se introducen entre la capa de Al-1050 y el acero. En ambos casos, la longitud de partículas embebidas excede los 1000  $\mu\text{m}$  en la dirección de laminación. Además, este análisis sugiere que los defectos artificiales tienen características similares a los generados durante la producción. Por tanto, se puede asegurar que las propiedades reflectoras de los defectos artificiales son similares a las de los defectos reales. Comparando ambos tipos de defectos, tanto en el caso artificial como en el natural, el volumen hueco que deja la delaminación es claramente mayor en la dirección de laminación, lo cual explicaría el mayor grado de atenuación registrado en los experimentos con partículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Cuando la onda guiada se

encuentra con un defecto tipo delaminación, el comportamiento de la onda cambia, generándose interferencias destructivas que causan la caída de amplitud.

En el caso de los polvos de acero, las distintas capas siguen estando en contacto físico y, por tanto, sólo una pequeña parte del ultrasonido generado es reflejado al cruzar la interfase. Los resultados muestran también grados de atenuación menores después de aplicar el recocido en los casos de 1x1 mm. Esto sugiere que, al introducir polvos de acero en zonas puntuales y aplicar el tratamiento térmico, no hay huecos entre capas y por ello los niveles de amplitud son comparables en ese caso a los de la referencia sin ser tratada térmicamente.

### 3.3 Atenuación causada por el recocido posterior al laminado

Como se comentó anteriormente, después de aplicar el recocido en la muestra de referencia, la amplitud registrada fue un 50 % mayor. Esto puede explicarse analizando los cambios sufridos por la microestructura. Durante el laminado los granos se alargan y aplastan, lo cual cambia el ratio de forma del grano. La Figura 11a muestra esos granos elongados en la dirección de laminación y la Figura 11b los granos más aplastados en la dirección transversal. Ambas micrografías fueron adquiridas antes del recocido. El hecho de que los límites de grano sean más elongados provoca una mayor dispersión del ultrasonido y en consecuencia una mayor atenuación. Durante el recocido posterior al laminado,

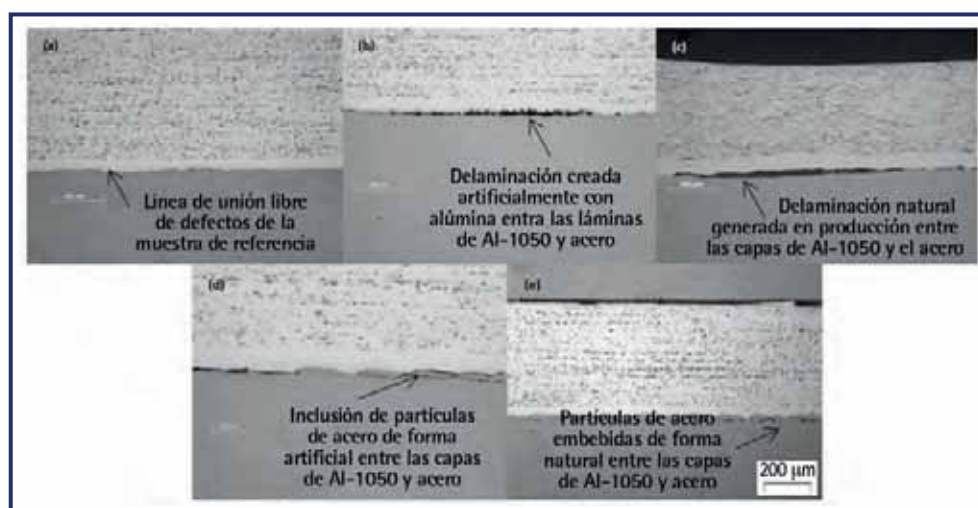


Figura 10. Micrografías ópticas. a) Muestra de referencia. b) Delaminación artificial ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) de tamaño 5x5. c) Delaminación natural. d) Residuos de acero embebidos artificialmente. e) Residuos de acero embebidos naturalmente





la endurecida capa de Al recubierto recristaliza y se produce el fenómeno de difusión entre el acero base y la capa de Al-1050 mejorando la unión entre ambas. La micrografía de la Figura 11c muestra la microestructura recristalizada en la dirección de laminación, y la Figura 11d en la dirección transversal, ambas tomadas tras el recocido. La estructura recristalizada reduce la dispersión de la onda ultrasónica, por lo que el porcentaje de energía generada que es captada por el receptor es mayor. Esto explica el aumento del 50 % de amplitud experimentado en la referencia tras el recocido. Durante el laminado en frío CRB, el grano del acero también se ve afectado y se alarga. Sin embargo, la temperatura de recocido es demasiado baja para recristalizar esos granos, por lo que el acero no influye en la atenuación de estos materiales bimetálicos.

#### 4. Conclusiones

Las curvas de dispersión para ondas guiadas Lamb y Rayleigh fueron calculadas con el método SAFE para su posterior aplicación en la detección de defectos en materiales bimetálicos del tipo aleación Al-Sn/Acero. En ensayos experimentales, el modo  $S_0$  de ondas Lamb demostró ser, fácilmente excitable, en estos materiales. Se fabricaron muestras que incluían defectos artificiales con propiedades ultrasónicas comparables a las que muestran los defectos reales. El modo de onda  $S_0$

es razonablemente sensible a la hora de detectar los defectos artificiales y los resultados muestran una buena repetibilidad. Se dio una explicación al diferente grado de atenuación observado en las muestras de referencia sin y con recocido: la recristalización sufrida por los granos durante el proceso de recocido hace que la dispersión del ultrasonido sea menor que la causada por los granos alargados obtenidos directamente tras laminar en frío. El grado de atenuación de la amplitud depende del tipo y del tamaño del defecto. Teniendo en cuenta que el menor valor de SNR aceptable es 2, los resultados sugieren que, mediante esta técnica, pueden detectarse delaminaciones mayores o iguales a 1x1 mm y defectos con partículas de acero embebidas mayores o iguales a 5x5 mm. Los valores de SNR calculados antes y después del recocido manifiestan que la inspección podría llevarse a cabo tanto durante el laminado en frío como tras el recocido posterior al laminado. La técnica de monitorización descrita en este artículo permite inspeccionar volumétricamente el material a velocidades de producción. A la vista de los resultados, el estudio posiciona al equipo ST-La(MB) de Innerspec Technologies como una solución alternativa a las técnicas destructivas para inspeccionar las láminas bimetálicas Al-Sn/Acero. Además, como ya se ha mencionado, el control de calidad podría integrarse con el proceso productivo al haber demostrado ser capaz de detectar los defectos sin necesidad de aplicar tratamientos térmicos.

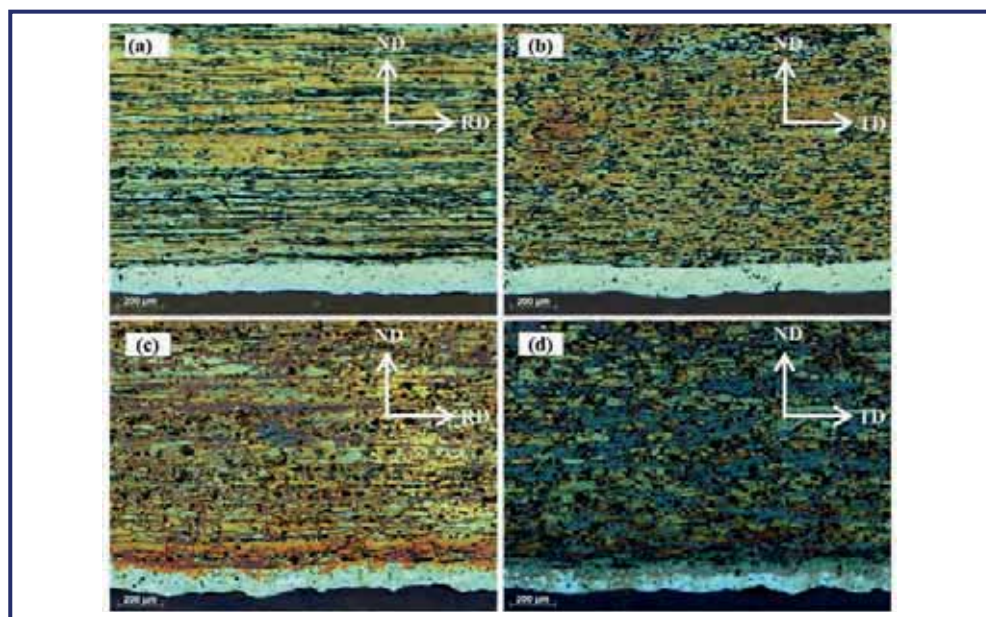


Figura 11. Micrografías ópticas aleación Al-Sn. a) Estructura elongada en la dirección de laminación. b) Estructura aplastada en dirección transversal antes del recocido. c) Estructura recristalizada en la dirección de laminación. d) Dirección transversal tras el recocido (agente revelador: 15 % NaOH)

