Análisis de técnicas de visión artificial y ultrasonidos para la inspección en servicio de piezas aeronáuticas producidas por fabricación aditiva

On the analysis of computer vision and ultrasound based techniques for the in-service inspection of aeronautics parts produced by additive layer manufacturing (ALM)

Nekane Galarza, Benjamín Rubio, Arantza Bereciartua, Iván Lozano, Jaime Gascón, Garbiñe Atxaga y Jose Pérez

Fundación Tecnalia Research & Innovation (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9622

1. INTRODUCCIÓN

Este artículo describe el trabajo realizado en el marco del proyecto Bionic Aircraft, parcialmente financiado en el programa H2020. El objetivo final del proyecto es reducir las emisiones en la industria de la aviación [1].

ALM puede producir piezas más ligeras y de una manera más rentable. Principalmente, para la fabricación de piezas metálicas, se usa fusión del haz de láser (Laser Beam Melting o LBM). La fusión de polvo metálico capa por capa ofrece una libertad geométrica que no puede lograrse de otra manera. Además, las piezas producidas por ALM satisfacen distintos requisitos de los productos dentro de un único proceso de fabricación, guardándose los pasos del proceso y permitiendo costes más reducidos en comparación con la producción convencional [2]. En la actualidad, el interés en ALM está aumentando [3-5]

Varios materiales pueden usarse en ALM. El uso de aleaciones de Titanio, por ejemplo, implica una reducción de peso del 40% (en comparación con una pieza aeronáutica de Al fabricada por fresado convencional) y el producto desperdiciado es inferior al 10%. En el caso de aleaciones Al-Li, la reducción de peso es incluso mayor (50%) [1]. Aceros, superaleaciones basadas en Níquel y Cobalto, así como aleaciones de Aluminio son también empleadas.

Una de las acciones pendientes es el desarrollo de nuevas estrategias de Ensayos No Destructivos (END) para la inspección de las nuevas piezas fabricadas por ALM en servicio (in-service). Esta inspección en servicio conlleva retos como la incertidumbre de la inspección interior de capas de material y la calidad superficial, la falta de accesibilidad, así como los defectos producidos por las condiciones de servicio [6].

Defectos típicos (como los poros o grietas) producidos con ALM se enumeran en algunos artículos de investigación [6, 7], pero se asume que son detectados en el proceso de fabricación o en línea. Así que, sólo los defectos que aparecen o aumentan de tamaño durante la vida útil de la pieza serán buscados en el alcance de este trabajo, que son diferentes de los defectos detectados en las fases anteriores. Los defectos serán: daños de superficie, grietas de fatiga que aparecen en la superficie y crecen hacia adentro, y grietas internas, las cuales podrían crecer debido a la fatiga, a partir de una "semilla" como pequeñas grietas en caliente [8], de manera inadvertida durante el proceso o en su inspección en línea siendo ahora su tamaño aceptable.

Este trabajo se centra en evaluar la viabilidad de inspección de piezas hechas de AlSiSc, seleccionando los métodos END más adecuados, según la información del daño obtenida mediante un estudio de predicción de fatiga.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección, se describen los diferentes pasos realizados para la realización de un cribado de posibles tecnologías aplicables.

2.1. PRIMERA EVALUACIÓN: EL ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

Se encontró gran número de referencias en la bibliografía, siendo las técnicas más citadas para detectar defectos internos aquellas basadas en rayos X y ultrasonidos (US). Para detección sub-superficial de defectos, las más referenciadas son Termografía corrientes Eddy. También se utilizan sensores 3D para el control de calidad en fabricación [9]. Piezas similares son inspeccionadas por medio de tomografía computerizada basada en rayos X (TC) (defectos internos) y líquidos penetrantes (defectos superficiales).

Las propiedades físicas más relevante de los materiales de ALM proporcionan una pista para seleccionar las tecnologías de inspección de defectos internos. Un tamaño de grano de ~50 μm [10] se obtiene con granos columnares o celulares, dependiendo de la dirección de crecimiento. Considerando, en términos de inspección por ultrasonidos, que el ruido de grano es un problema cuando el tamaño de grano del material es mayor que $\lambda/10$, la relación $\lambda=c/f$ con c=6250m/s (la velocidad de propagación de la onda longitudinal de Al), determina que el límite superior de la frecuencia es 12,5-15MHz. En términos de macroestructuras, se obtiene un tamaño de grano de 200μm~ [10].

Aunque la Tomografía Computerizada (TC) parece ser el método END más adecuado, a priori, no puede ser aplicado para la inspección de piezas en servicio, debido a que se precisa del acceso a ambos lados de la muestra. Asimismo, cualquier método que implique un equipamiento pesado o de gran tamaño no es viable debido a las limitaciones de accesibilidad. Las técnicas de ultrasonidos (US) parecen ser adecuadas para detectar defectos internos, por necesitarse un equipo pequeño y ser posible el acceso a la zona de inspección. En caso de defectos de superficie y sub-superficie, serán consideradas también técnicas de Termografía y Visión por Computador (CV).

2.2. SEGUNDA EVALUACIÓN: ENSAYOS A ESCALA DE LABORATORIO EN ESPECÍMENES SENCILLOS DE REFERENCIA

Las tecnologías seleccionadas fueron probados a escala de laboratorio en muestras sencillas, hechas de AlSi10Mg (similar a AlSiSc). Algunos defectos fueron inducidos.

2.2.1. Visión por Computador (CV)

Diferentes soluciones basadas en CV fueron probadas. Se probó un sistema comercial de **triangulación láser con sensor 3D**, el sistema Gocator 2370 (Resolución: 0,275mm (XY); 0,055mm (Z)). Esta resolución no fue suficiente para obtener un contraste suficiente para la detección de muescas. Aunque existen sistemas con mayor resolución, el tiempo necesario para inspeccionar la misma zona puede ser mucho más elevado, principalmente en el caso de inspección de piezas complejas, lo cual supone un problema.

El **escaneo 3D con luz estructurada** se realizó con un sistema Gocator 3110 (Resolución: 0,100mm (XY); 0,035mm (Z)). La resolución no fue lo suficientemente alta para detectar cualquier defecto.

Un sistema de iluminación difusa (Domo) puede difundir la luz en todos los ángulos. De esta manera, una pieza de forma compleja puede ser uniformemente iluminada, eliminándose los puntos de sobreexposición. Los resultados obtenidos mostraron un gran contraste para detectar muescas (se usó para procesamiento automático la librería de imagen *Halcón*), aunque aparecen zonas con artefactos/falsos positivos, que habrá que eliminar posteriormente mediante SW.

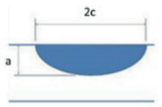
Un sistema Darkfield 2D fue probado tanto con luz blanca como roja. Los mejores resultados se obtuvieron con luz blanca, pero ambas técnicas mostraron buenos resultados. Se detectaron artefactos (falsos positivos) sobre la superficie, por lo que se necesita un algoritmo de procesamiento de imágenes posterior.

2.2.2. Termografía (T)

Los defectos internos fueron inducidos en los especímenes de prueba, unos simulados por agujeros de fondo plano (Flat Bottom Holes o FBH) y otros induciéndolos durante el proceso de fabricación.

Las muestras fueron inspeccionadas por termografía infrarroja activa (IRT) (sistema FLIR SC5000). Se usaron tres enfoques diferentes de estimulación: óptico continuo, óptico pulsado e inductivo, utilizando una lámpara halógena (1KW), una lámpara flash (6KJ) y bobinas de inducción (15A-10KW), respectivamente.

Las pruebas con termografía no mostraron buena respuesta en la detección de grietas internas. Muchas zonas fueron detectadas a lo largo de toda la superficie de los especímenes que no correspondían a defectos reales. Esto pudo haber sido debido a la estructura interna de los materiales, con altos niveles de porosidad y difusividad térmica. Una alta porosidad y difusividad puede distribuir el calor rápidamente sobre el material, difundiendo el calor originado en los defectos tan rápidamente que no es posible detectar cualquier defecto antes de que se disipe todo el calor, incluso con una cámara de alta velocidad.

Specimen		Artificial defects		
N°	Dimension [mm]	Lay-out (defects induced by EDM)		Sizes [mm]
1	100x100x18,3*			D1 a=0,5 2c=1,5 D2 a=1,0 2c=3,0 D3 a=2,0 2c=6,0 D4 (N°1,2) a=5,0 2c=15,0 D4 (N°3) a=3,0 2c=9,0
2	100x100x16*			
3	100x100x4* * *initially defined thicknesses: 19 and 5mm. Due to ALM, approximate dimensions have been obtained.*			

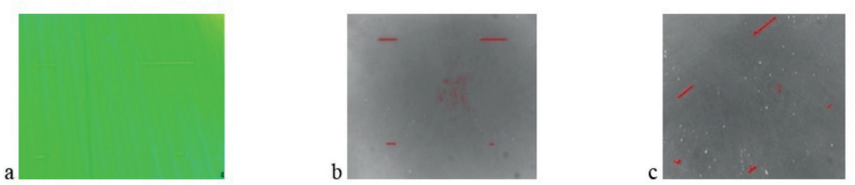
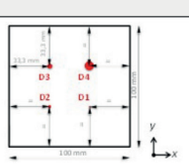
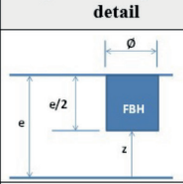
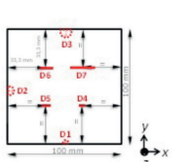
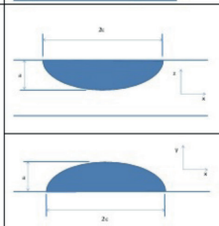


Figura 1. Especímenes fabricados; y los resultados obtenidos con a) Luz estructurada, b) Domo, c) Darkfield

2.2.3. Ultrasonido (US)

Las técnicas de ultrasonidos fueron probadas en los especímenes previamente mencionados y en otros adicionales. Algunos de ellos fueron utilizados para medir las propiedades acústicas (atenuación, velocidad del sonido y la relación señal-ruido) y estudiar el efecto de la calidad de la superficie; y el resto fue usado para verificar la capacidad de detectar defectos internos.

Se realizaron ensayos con un único elemento pulso-eco en esta etapa mediante el uso de transductores de contacto. Se utilizaron transductores de ángulo recto en el rango de 2,25 a 20 MHz y cuñas de 45º. También se usaron líneas de retardo. Fue probada una amplia gama de frecuencias considerando las frecuencias comunes utilizadas en la bibliografía, el tamaño de grano y la forma y localización de defectos.

Specimen		Artificial defects		
N°	Dimensions [mm]	*X-Y* Layout	Shape in other planes or detail	Sizes
N	100x100x3			Ø (mm) D1 0,2 D2 0,5 D3 1,0 D4 2,0
N+1	100x100x18,2			
N+2	100x100x3			a(mm) 2c(mm) SURFACE D1 0,5 1,5 Side D2 1,0 3,0 Side D3 2,0 6,0 Side D4 0,5 1,5 Wide (one) D5 1,0 3,0 D6 2,0 6,0 D6 3,0 9,0

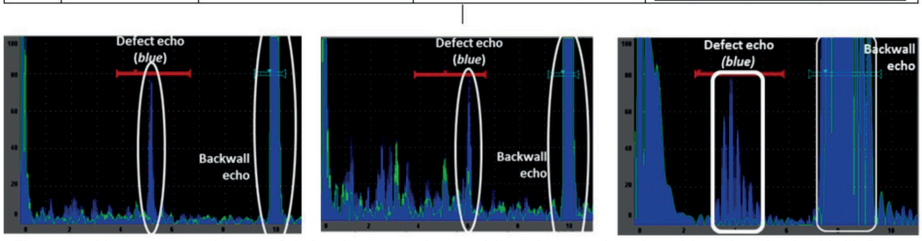


Figura 2. Algunos especímenes fabricados para ultrasonidos y las señales obtenidas: (Izquierda) Nº N, D2. (Centro) Nº N+1, D1 (derecha) Nº N+2, D2

Con respecto a la velocidad del sonido, fueron obtenidos valores superiores a los de acero o Al (CL=6581m/s, CS=3271m/s). Ensayos de atenuación acústica mostraron valores bajos para todas las frecuencias, obteniendo valores superiores a medida que aumentaba la frecuencia. La atenuación derivada de la calidad superficial mostró una gran reducción de las amplitudes de eco, la cual fue mayor a medida que aumentaba la frecuencia (de 6 a 60 veces menor). A pesar del tamaño de grano y la estructura en capas, se obtuvieron buenos valores de relación señal-ruido (23-49dB) optimizando la transmisión y recepción de parámetros (filtrado).

En términos de detección de defectos, las mejores frecuencias estuvieron en el rango 10-20MHz. Todas las muescas y todos FBH ≥ ø0,5 mm fueron claramente detectados (más dificultad para los FHB más cercanos a la superficie; 2-3mm). En la figura 2, puede observarse que los ecos procedentes de pequeños defectos y defectos cerca de la superficie son menos claros.

Las tecnologías fueron evaluadas en 3 aspectos: la influencia de la estructura interna del material; la influencia de la calidad de la superficie; y la detectabilidad de cierto tipo y tamaño esperado de defectos. Además, fueron también considerados la accesibilidad y el nivel de madurez de la tecnología. Tecnologías como Terahertz o Deflectometría fueron descartadas debido a su elevado precio y el enorme tamaño de los transductores, respectivamente. Con respecto a los ultrasonidos (US), el traductor acústico electromagnético (Electro Magnetic Acoustic Transducer o EMAT) fue descartado debido a su gran tamaño. Ultrasonidos Láser también fue descartado debido a sus limitaciones en la capacidad de penetración, el gran tamaño de los equipos y elevado coste. Se fabricó un transductor Small Footprint Phased Array (SFPAT) (10MHz/20elementos/pitch 0,31mm) junto con dos cuñas a 0º (de 0,5 mm y 12 mm de espesor) y uno de 45º en base a los resultados obtenidos con transductores mono elemento. Fueron utilizadas en los experimentos involucrados en las evaluaciones 3 ª y 4ª.

2.3. TERCERA EVALUACIÓN: ENSAYOS A ESCALA DE LABORATORIO EN ESPECÍMENES COMPLEJOS DE REFERENCIA

Las tecnologías seleccionadas fueron probadas en los especímenes de forma compleja, en la que fueron inducidos algunos defectos artificiales. El tipo y la forma de los especímenes fueron seleccionados de acuerdo a los resultados del estudio de predicción de fatiga. Este análisis, cuyo objetivo principal es establecer la fatiga esperada a lo largo del tiempo, se basa en la identificación de los puntos donde la probabilidad de aparición de los fallos por fatiga es máxima (zonas críticas). La categorización de las diferentes zonas se efectúa a partir de los rangos de estrés derivados de los esfuerzos externos y del umbral del tamaño de la grieta. Considerando que las grietas por fatiga se propagan acorde a una ley exponencial, es crucial desarrollar un sistema de END con un bajo umbral de tamaño de daños para asegurar una larga vida. Como resultado, se identificaron las zonas críticas, y fueron considerados cuatro tipos de grietas: de superficie, de esquina, atravesadas e incrustadas. Según estos datos, los especímenes de formas complejas fueron definidos y los defectos fueron inducidos artificialmente. Dependiendo del tipo de defecto y su ubicación, una de las dos tecnologías (CV o ultrasonidos) fue asignada para la inspección de cada defecto.

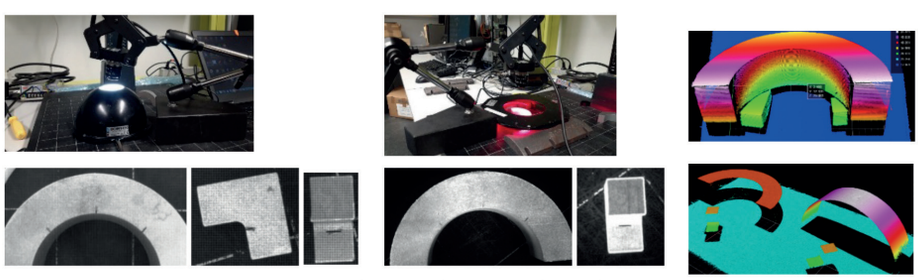
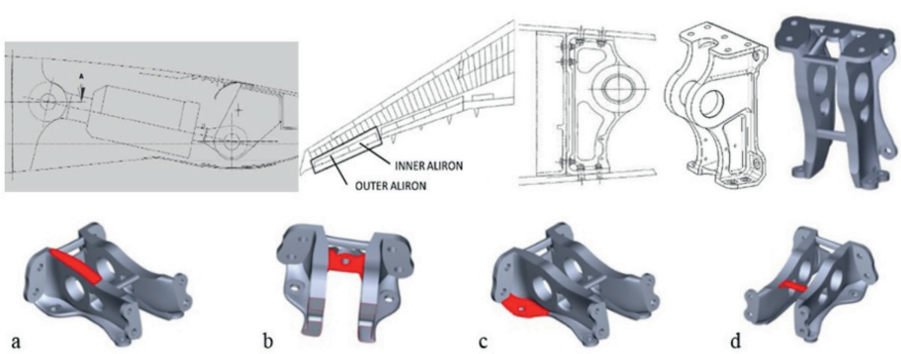


Figura 3. Imágenes obtenidas con: Domo (izquierda); Darkfield (centro); escáner 3D de triangulación láser (derecha)



Transducers	Critical zones					
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Straight angle-single element	R	R	R	NO*	NO	NO
Angular single element	OK	OK	OK	OK	NO	OK
PA – 0° / Wedge	R/OK	R/OK	R/OK	NO/OK	NO/OK	NO/OK

**Except one, which works properly; R: Regular (some non-inspected areas)*

Figura 4. Diseño y posición en el ala, y montaje de la nueva pieza, junto con las áreas de inspección: a) Z1, Z2, Z3, Z4; b); c); d) Z6, Z5. Usabilidad de cada transductor

2.3.1. Visión por Computador (CV)

Se probaron un escáner 3D de triangulación láser, un sistema Domo y un sistema Darkfield. Como resultado, los sistemas Domo y Darkfield fueron las tecnologías más adecuadas. El escáner 3D de triangulación láser no fue capaz de detectar las grietas (figura 3).

2.3.2. Ultrasonido (US)

La inspección con ultrasonidos no se realizó sobre estos especímenes, ya que no eran representativos debido a la complejidad del demostrador final, donde las áreas de inspección (IA) en relación a las zonas críticas son resaltadas (figura 4). Las simulaciones de la propagación del haz de ultrasonidos fueron hechas con Beamtool 9© para identificar zonas no inspeccionables para cada uno de los transductores. En conclusión, el transductor angular de elemento único y, especialmente, el transductor SFPAT parece ofrecer la mejor cobertura de ultrasonidos en todas las zonas.

Los objetivos de estas pruebas fueron: 1) evaluar la zona de cobertura de las tecnologías seleccionadas en las zonas con geometría más compleja y su accesibilidad, y 2) evaluar la viabilidad de detección de los defectos críticos.

Además, tan pronto como el material final (AlSiSc) estuvo disponible, los especí-

menes simples fueron fabricados y se midieron las propiedades acústicas de estos especímenes para comprobar si el cambio del material implicaba cambios importantes en las estrategias de inspección. En términos de velocidad del sonido, los resultados obtenidos fueron similares a los obtenidos sobre AlSi10Mg (CL=6448m/s-CS=3420m/s). La atenuación acústica, sin embargo, parecía ser menor, especialmente a altas frecuencias. Se obtuvieron buenos valores de relación señal/ruido (similares). En resumen, ambos materiales mostraron un comportamiento acústico similar, lo que indica que los resultados obtenidos con AlSi10mg pueden extrapolarse a AlSiSc.

2.4. CUARTA EVALUACIÓN: ENSAYOS A ESCALA DE LABORATORIO EN EL DEMOSTRADOR COMPLEJO

Se realizó un estudio de los métodos potenciales en las áreas más críticas del demostrador final. Por medio de una impresora 3D se simularon los demás elementos que rodean la pieza. En este punto, no es suficiente con la viabilidad de la solución para la detección de grietas, sino que la accesibilidad es una cuestión clave. Algunas grietas fueron inferidas en el soporte para pruebas. Los resultados se describen en la siguiente sección.

3. RESULTADOS

3.1. VISIÓN POR COMPUTADOR

La estrategia de iluminación de campo oscuro (darkfield) ha sido desechada debido a la geometría de la pieza y de la necesidad de colocar la luz con un determinado ángulo bajo. La disposición física no es viable. Por tanto, los sistemas 3D de luz estructurada y 2D de iluminación difusa han sido evaluados.

Para la inspección basada en un sistema 3D de luz estructurada, el dispositivo comercial utilizado para estas pruebas ha sido el Gocator ™3110. Su precisión en el plano XY es de 100 micras, y en el plano Z de 6 micras.

En cada zona, se han realizado varias capturas considerando diferentes ángulos de incidencia, tratando de encontrar la mejor configuración. A continuación, se ha utilizado la librería comercial de procesamiento de imagen MvTec Halcón ™ para procesar las imágenes. Mediante la modificación del ángulo de incidencia, los defectos en la parte central de la superficie han sido claramente identificados. Hay que señalar que esta estrategia no impide la detección de algunos defectos falsos, debidos a la rugosidad de la superficie. Este problema se reduce en las áreas donde la rugosidad de la superficie es suave. Los resultados no son suficientemente satisfactorios.

Para el análisis de la iluminación difusa, el dispositivo comercial elegido es la cámara de modelo UI-3080CP ™ de Fabricante IDS. Su sensor IMX250 tiene una resolución de 2456 x 2054 píxeles. Siguiendo el mismo proceso que con los sistemas 3D, la tarea ha sido dividida, trabajando en las diferentes zonas para buscar la mejor configuración para cada una. El sistema de iluminación ha sido un Domo, semiesfera con interior blanco difuso, que ilumina los objetos desde el eje de la cámara en todas las direcciones, proporcionando una gran cantidad de luz uniforme que elimina el brillo y las sombras. Al mismo tiempo, el tiempo de exposición, la distancia a la muestra y el contraste de la imagen son diferentes parámetros que deben ajustarse simultáneamente para obtener un rendimiento adecuado.

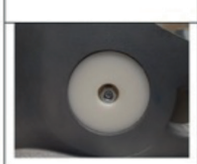
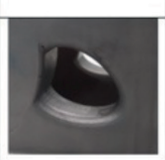
El primer objetivo fue verificar si el sistema puede distinguir las grietas en las esquinas exteriores de la zona "lug" de la pieza. Como se ha indicado, se realizaron diferentes adquisiciones de la zona con diferentes ángulos de ataque. Además, cada adquisición y ángulo de ataque requieren diferentes tiempos de exposición, que oscilan desde los 100 a los 300 ms. La razón es que los diferentes ángulos pueden causar oclusión o crear zonas de sombras. Para cada ángulo, el tiempo de exposición óptimo ha sido seleccionado. Este tiempo de exposición permite disponer de una buena calidad de imagen en condiciones de alto contraste. En el proceso en servicio, cada modificación de la posición tendrá sus parámetros adecuados para ser aplicada. No hay ningún problema en automatizar esto.

Sobre el demostrador final de AlSiSc varias grietas han sido provocados en las distintas zonas. El resumen de la distribución de las grietas y sus tamaños se recoge en la siguiente figura:

No se obtuvieron buenos resultados en las zonas "lug", "stress concentrator" y "thin wall". La accesibilidad es un problema.

3.2. TÉCNICAS DE ULTRASONIDOS

Se estableció el conjunto final de parámetros de inspección junto con cuatro leyes focales para los Small Footprint Phased Array Transducer (SFPAT). Las leyes focales

LUG	HOLE	SURFACE	STRESS CONCENTRATOR	THIN WALL
				
Equidistant placement. Size: 1 x 0.2 x 1 millimetres	1 set of 3 cracks. Size (central area) 1.5 x 0.2 x 0.5 millimetres. 2 sets of 3 cracks. Size (lateral corners) 1 x 0.2 x 1 millimetres.	6 cracks. 20 to 30 millimetres distance. Central area 1.5 x 0.2 x 1 millimetres 2 sets of 6 cracks distributed as the previous ones. Size (both corners) 1 x 0.2 x 1 millimetres	1 crack. Size (central area of the corner) 3 x 0.2 x 1 millimetres 2 cracks. Size (edges of the corners) 1 x 0.2 x 1 millimetres	4 cracks. Size (centre of each join) 3 x 0.2 x 1 millimetres 4 cracks. Size (corner of each join) 1 x 0.2 x 1 millimetres

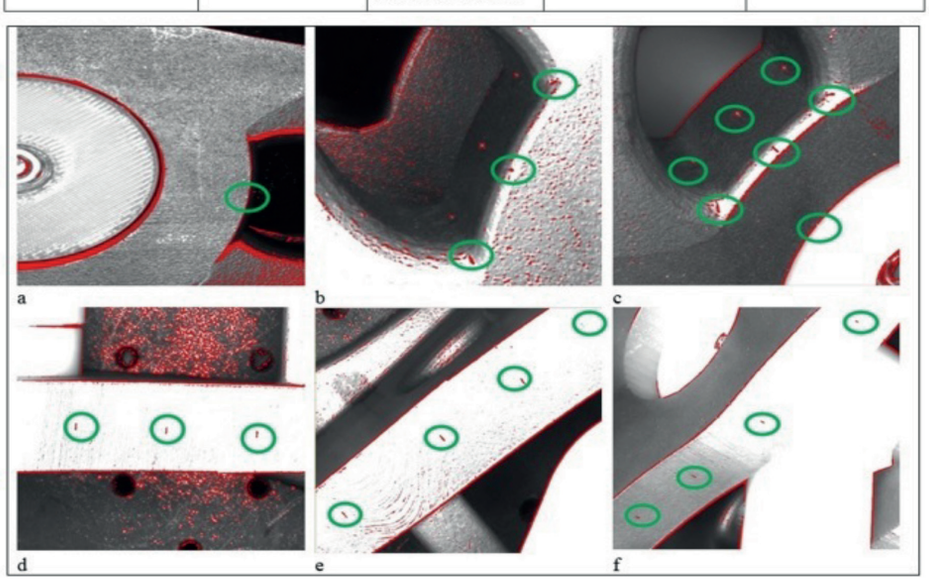
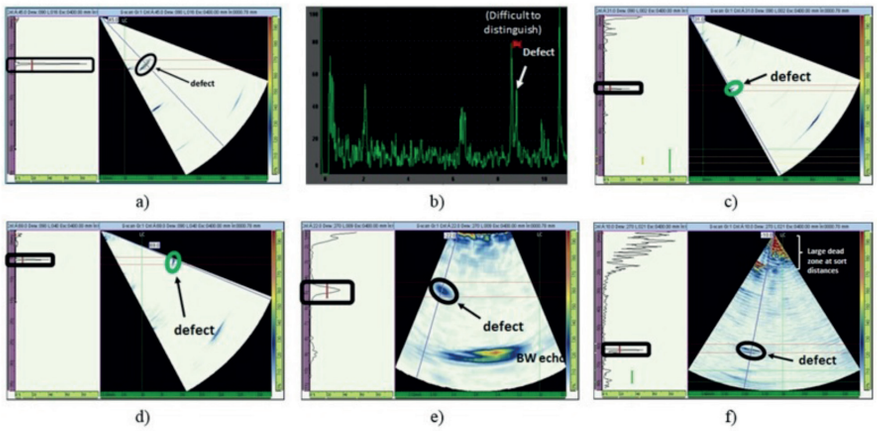


Figura 5. Grietas inducidas sobre el demostrador final y resultados para los sistemas de iluminación difusa. Resultado de inspección en la zona denominada "hole" de la pieza: a) cámara a 0º; b) 15º; c) 30º; y resultado en la zona denominada "superficie": d) cámara a 0º; e) 15º; f) 30º



ULTRASONIC INSPECTION VIABILITY			
CRITICAL ZONE	*DEFECT*	*DETECTABILITY*	*TRANSDUCER USED*
Z1	Z1-S-1	YES, clearly	SFPAT-W45°
	Z1-S-2	Very hardly	All (T3)
	Z1-S-3	YES, clearly	T2, T3, T4
	Z1-E-2 /'	YES, but hardly	SFPAT-W45°
	Z1-E-1/'	YES, clearly	SFPAT-W45°
Z2	= Z1-E-1/'	YES, clearly	SFPAT-W45°
Z3	Z3-E-1/'	YES, clearly	SFPAT-W45°
Z4	Z4-E-1/'	YES, but hardly	SFPAT-W0°-1
Z5	Z5-E-1/'	YES, clearly (*)	SFPAT-W0°-2
Z6	Z1-C-1'	YES, clearly (**)	SFPAT-W45°
	Z1-S-1/'	NO	All

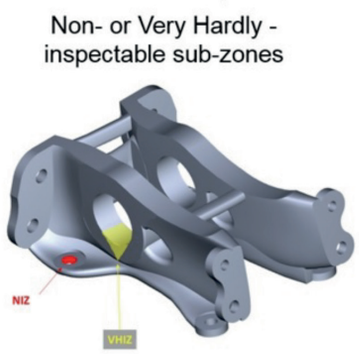


Figura 6. a) Zona LUG: grieta superficial (superior); b) zona LUG: grieta superficial (inferior); c) entre zona LUG y HOLE: grieta incrustada; d) SUPERFICIE LIBRE: grieta incrustada; e) zona concentrador de estrés: grieta incrustada; f) pared delgada: grieta incrustada

implican escaneos tipo S-Scan, ondas L y S, 16 elementos activos por ley, ángulos de dirección desde -30° a +70° (1° por paso) y distancias focales de 5mm a ∞ según la ley específica. Además, la selección final del transductor comprende aquellos en el rango de 5MHz a 15MHz.

En base a las conclusiones extraídas del estudio de predicción de vida, se mecanizó un conjunto de defectos de referencia con los tamaños máximos admisibles (ø1mm para grietas internas y 1x3mm para grietas en la superficie) en los demostradores finales de AlSiSc y AlSi-10Mg. Cada uno de estos defectos es representativo de cada zona crítica en la peor situación posible y el peor punto de vista de inspección (peor acceso, orientación, etc.).

Todos los defectos de referencia fueron detectados, excepto uno localizado en la Z6. La capacidad de dirección y formación del haz con la técnica de ultrasonidos Phased Array así como el pequeño tamaño de los transductores utilizados (que requieren pequeñas superficies de contacto) han sido claves para tener éxito en la detección de las zonas de difícil acceso y geometría compleja. El único defecto no detectado se encuentra en la superficie interior del orificio, y ha sido a causa de la falta de acceso y su superficie irregular. Un resumen de los resultados de detección se recoge en la figura 6.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La conclusión principal de este trabajo es que se ha identificado una combinación de tecnologías basadas en ultrasonidos y visión por computador como la estrategia más adecuada para la inspección en servicio de unas nuevas piezas biónicas ALM para aviación. Las técnicas de visión por computador proporcionan información de grietas en la superficie mientras que las técnicas de ultrasonidos permiten detectar defectos internos.

Con respecto a las tecnologías de la visión por computador (CV), ha sido evaluada una estrategia combinada de sistemas de luz estructurada en 3D y un sistema de cámara 2D con iluminación difusa. Una combinación de ambas tecnologías es adecuada para la ubicación de grietas superficiales en piezas de ALM. Debido al problema de accesibilidad, se han definido ángulos de ataque específicos y tiempos de exposición. Posteriormente, se aplica el algoritmo. Este procedimiento puede automatizarse con un brazo robótico que debería llevar a cabo la inspección de la pieza. El brazo robótico debe seguir una trayectoria establecida para la inspección de todas las zonas. Cada vez que se encuentra en posición de inspección, se debe iniciar la ejecución del algoritmo de procesamiento para detectar las grietas. Este proceso no requiere interacción humana.

En términos de inspección con técnicas de ultrasonidos, los transductores Small Footprint PA parecen ser los más adecuados (gracias a sus capacidades de dirección y generación del haz junto con su pequeño tamaño), debido a la compleja geometría de pieza ALM. La técnica de ultrasonidos es viable para inspeccionar la mayoría de las zonas de los demostradores, los defectos internos pueden ser detectados, así como las grietas superficiales en superficies inaccesibles. Únicamente dos zonas no inspeccionables pequeñas que han sido encontradas en nuestro demostrador específico.

El trabajo futuro se basa en: 1) el uso de cuñas flexibles/superficies de contacto para SFPAT que pueden mejorar el acoplamiento entre el transductor y la pieza sobre superficies de forma compleja y, por lo tanto, mejorar las señales obtenidas; 2) los últimos desarrollos en cuanto a la reducción de tamaño de los dispositivos involucrados pueden hacer viable la utilización de estos sin un agente para el acoplamiento; 3) el desarrollo orientado hacia la automatización y optimización de las rutas de escaneo.

REFERENCIAS

[1] Increasing resource efficiency of aviation through implementation of ALM technology and bionic design in all stages of an aircraft life cycle. BIONIC Aircraft Project. Recovered from: https://bionic-aircraft.eu/
[2] Laumer, T., Karg, M., & Schmidt, M. (2012). Laser beam melting of multi-material components. Physics Procedia, 39, 518-525.
[3] Zhang, Q., Xie, J., Gao, Z., London, T., Grif, D., Oancea, V., 2019. A metallurgical phase transformation framework applied to SLM additive manufacturing processes. Mater. Des. 166. doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107618
[4] Conde, F.F., Escobar, J.D., Oliveira, J.P., Jardini, A.L., Filho, W.W.B., Avila, J.A., 2019. Austenite reversion kinetics and stability during tempering of an additively manufactured maraging 300 steel. Addit. Manuf. 29, 100804. doi: https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100804
[5] Angel, M., Arredondo, Z., Zavala-arredondo, M., London, T., Allen, M., Maccio, T., Ward, S., Grif, D., Allison, A., Goodwin, P., Hauser, C., 2019. Use of power factor and specific point energy as design parameters in laser powder-bed-fusion (L-PBF) of AlSi10Mg alloy Use of power factor and speci fi c point energy as design parameters in laser powder-bed-fusion (L-PBF) of AlSi10Mg alloy. Mater. Des. doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108018
[6] Kim, F. H., & Moylan, S. P. (2018). Literature Review of Metal Additive Manufacturing Defects (No. Advanced Manufacturing Series (NIST AMS)-100-16).
[7] Taheri, H., Shoaib, M. R. B. M., Koester, L., Bigelow, T., Collins, P. C., & Bond, L. J. (2017). Powder-based additive manufacturing-a review of types of defects, generation mechanisms, detection, property evaluation and metrology. International Journal of Additive and Subtractive Materials Manufacturing, 1(2), 172.
[8] Kaufmann, N., Imran, M., Wischeropp, T. M., Emmelmann, C., Siddique, S., & Walther, F. (2016). Influence of process parameters on the quality of aluminium alloy EN AW 7075 using selective laser melting (SLM). Physics Procedia, 83, 918-926.
[9] Picón-Ruiz A., Bereciartua-Pérez, A., Gutiérrez-Olabarria, J.A., Pérez-Larrazabal, J.(2009). La visión artificial en el control de calidad. Desarrollo de un escáner láser tridimensional rotativo. Dyna, vol. 84, no. 9, pp. 733-742, 2009.
[10] Thijs, L., Kempen, K., Kruth, J. P., & Van Humbeeck, J. (2013). Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. Acta Materialia, 61(5), 1809-1819.

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría agradecer a la Comisión Europea por financiar parcialmente esta investigación. Los desarrollos se han realizado en el proyecto BIONIC AIRCRAFT, contrato: H2020-MG-2015-690689, bajo el programa marco H2020.