

TESIS DOCTORAL

Metodología de inspección no destructiva de la instalación de remaches ciegos aeronáuticos

Presentada por:

Javier Camacho de Miguel

en el

Departamento de Ingeniería Mecánica

de la

Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea

para la obtención del grado de

Doctor Ingeniero Industrial

Dirigida por:

Dr. D. Luis Norberto López de Lacalle Marcaide

Dra. Dña. M^a Asunción Rivero Rastrero

Bilbao, 2019

A ti Igone, a Jon, a Unai y a Ane,
sin quienes nada de esto habría sido posible,
pero habría sido mucho más rápido.

Agradecimientos

El germen de esta tesis nace del empecinamiento de mi Directora de Tesis, Asun, por abrirme los ojos. Gracias Asun por tu interés desinteresado, por convencerme, por desencadenar todo esto.

Gracias compañeros y compañeras de Tecnalía, no imagino este trabajo sin vuestro apoyo y colaboración; sin vuestro ánimo, sin vuestro acompañamiento.

Gracias también a mi Director de Tesis, Berti, por echarme una mano cuando la he necesitado.

Gracias, sinceras, Aita y Ama por educarme.

Y por fin, gracias a ti Igone, porque si bien todo lo anterior es más que cierto, sin ti no habría sido posible. Gracias por tu tiempo, por tu comprensión, por tu apoyo, por estar ahí, por animarme, por cuidar de todo y de todos cuando he tenido que evadirme, por hacer que este trabajo haya sido posible.

Abstract

Aerospace manufacturing requires efficient manufacturing processes. Composite materials are extensively used and manufacturing processes must evolve to overcome composite constraints for manufacturing and joining. Bolting is an extended joining process for composite materials in which a deformable blind bolt is stressed until joining forces are high enough to cause bolt breakage and ensure sufficient compression forces in the joint.

Among bolting methods, blind bolting is an efficient composite joining method that enables the construction of aerospace composite structures accessing joints from a single side of the joint (front side), thus allowing for constructing closed structures where accessing the back side (blind side) is not possible. However, not being able to access the deformed head at the blind side prevents to perform a quality control and ensure a proper bolt deformation and a proper installation.

In this research work a nondestructive method for blind bolt installation is developed. Several potential inspection techniques (shearography, thermography, frequency response methods and ultrasonic methods) are tested for blind bolting inspection suitability assessment. An ultrasonic measurement technique is identified as partially capable of classifying bolt installation. A further development, combining ultrasonic methods and process monitoring data, has led to a blind bolt installation classification method with a hit rate $>95\%$ on tested samples. Furthermore, the method is capable of determining the installation of incorrect griped rivets even if the resulting installation fulfills the dimensions specified by quality standards.

Resumen

Resumen

La construcción aeronáutica requiere de procesos de fabricación eficientes. Los materiales compuestos son utilizados de forma masiva y los procesos de fabricación deben evolucionar para solventar las limitaciones para su fabricación y para su unión. El remachado es un proceso de unión habitual para la unión de materiales compuestos en el que un remache deformable es tensionado hasta que las fuerzas de unión son suficientemente altas como para provocar la rotura de uno de los componentes del remache y asegurar de esta forma fuerzas de unión de compresión suficientemente altas.

De entre los procesos de remachado, el remachado mediante remaches ciegos es una técnica eficiente de unión que permite la construcción de estructuras aeronáuticas de material compuesto accediendo a la unión desde un único lado (desde la cara vista), permitiendo así la construcción de estructuras cerradas en las que el acceso a la cara trasera (la cara ciega) no es posible. Sin embargo, la imposibilidad de acceder a la cabeza de cierre deformada del remache ciego impide llevar a cabo un control de calidad adecuado de la instalación del remache y asegurar que la deformación del remache se ha logrado en condiciones adecuadas.

En el presente trabajo de investigación se desarrolla una metodología de inspección no destructiva de remaches ciegos. Se ha evaluado diferentes tecnologías potenciales (shearografía, termografía, métodos basados en respuesta en frecuencia y métodos basados en ultrasonidos) con respecto a su capacidad de llevar a cabo la inspección de remaches ciegos. Se ha identificado un método basado en ultrasonidos que es capaz de clasificar parcialmente la instalación de los remaches ciegos. Un desarrollo posterior en el que se combina el método de capacidad parcial con el monitorizado del proceso ha conllevado el desarrollo de un método con una capacidad de clasificación total y una tasa de acierto >95% en las probetas evaluadas. Adicionalmente, el método desarrollado es capaz de identificar remaches que siendo de una longitud inferior a la nominal resultan instalados en condiciones que superan un control de calidad dimensional llevado a cabo por inspectores cualificados.

Organización de la memoria

En el capítulo 1 *Introducción* se describe el contexto en el que se engloba el presente trabajo. Se describen los orígenes que dan lugar a la necesidad y a la motivación para llevar a cabo el presente trabajo, comenzando el capítulo con un enfoque global de las tipologías de unión en la fabricación aeronáutica y centrándose gradualmente en las uniones mediante remaches ciegos de materiales compuestos. Se lleva a cabo una revisión de los métodos de inspección actuales, así como una revisión de patentes que claman por métodos de inspección de remaches o de aplicaciones asemejables, ilustrando la importancia del control de calidad en la construcción aeronáutica.

El capítulo 2 *Análisis del estado del arte de tecnologías de inspección no destructivos en elementos de unión y otros* analiza el potencial de cuatro tecnologías de base identificadas sobre las que poder llevar cabo el desarrollo de un método de clasificación no destructivo: shearografía, termografía, métodos basados en ultrasonidos y métodos basados en repuesta en frecuencia. Para cada tecnología base, se lleva a cabo una revisión del estado de la técnica y su aplicación en aplicaciones aeronáuticas o de índole asemejable al remachado mediante remaches ciegos.

Identificadas y consideradas con potencial suficiente, las tecnologías base son evaluadas experimentalmente como se describe en el capítulo 3 *Análisis de la viabilidad de tecnologías potenciales para la inspección de remaches ciegos ABS0257*. Cada tecnología se ha sometido a un análisis experimental con probetas con remaches ciegos reales. Como conclusión del análisis de viabilidad se identifica un método basado en ultrasonidos con una capacidad parcial de clasificación.

En el capítulo 4 *Desarrollo de una nueva técnica de clasificación no destructiva de remaches ciegos* se combina el método con capacidad parcial con la monitorización del proceso. Para ello, se describe el montaje experimental, la obtención de nuevas probetas y el análisis de datos de las señales del proceso de remachado combinado con los datos provenientes de la medida mediante ultrasonidos. Como resultado de este análisis combinado se obtiene un método de clasificación capaz de clasificar la totalidad de los remaches en las probetas con un error inferior al 2%.

Tras haber desarrollado un método de resultados prometedores, en el capítulo 5 *Validación de la metodología* se detalla el proceso seguido para verificar la validez del método aplicándolo a nuevas probetas.

Finalmente, el capítulo 6 *Contribuciones al estado del arte y líneas futuras de investigación* resume la contribución del presente trabajo al estado de arte en la

inspección de remaches ciegos y marca la línea de continuación de investigación recomendada para el método de inspección no destructivo desarrollado.

Publicaciones y patentes

Los resultados de la investigación realizada han sido publicados en los siguientes ámbitos:

- Patente Europea EP2641672 '*Method for evaluating the installation of blind rivets, method and system for installing blind rivets, method and system for obtaining a pattern, and aircraft*'. 2012.

También solicitada y concedida en:

CHINA: CN103317076 (2013)

ESTADOS UNIDOS: US2013250730 (2013).

- Congreso SAE AeroTech 2013. Admisión en el congreso con presentación oral.

Camacho, J., Rivero, A., Guzmán, D., Astorga, J., "A Non-Destructive Method to Classify the Correct Installation of Blind Bolts," SAE International Journal of Materials and Manufacturing 7(1):45-57, 2014. doi:10.4271/2013-01-2184.

El artículo es seleccionado para su inclusión en el 'SAE International Journal of Materials and Manufacturing', 2015, ISSN of 1946-3979.

- Camacho, J., Rivero, A., Veiga, F., Guzmán, D. 'A non-destructive quality assessment for blind-fastener installations based on the combination of ultrasound techniques and real-time monitoring of the fastening process'. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2016) 84: 1057. doi: 10.1007/s00170-015-7795-6

- Camacho, J., Veiga, F., Penalva, M.L., Diez-Olivan, A., Deitert, L., López de Lacalle, N. On-Line Monitoring of Blind Fastener Installation Process. *Materials* 2019, 12, 1157. doi: doi.org/10.3390/ma12071157

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tablas	xiii
Nomenclatura	xv
1. Introducción	1.1
1.1. Contexto tecnológico e industrial	1.1
1.2. Desarrollo de las uniones remachadas ciegas en la fabricación de estructuras aeronáuticas.....	1.2
1.2.1. Fortalezas del remachado como tecnología de unión	1.2
1.2.2. Análisis de incertidumbre y variabilidad en las uniones remachadas ciegas.....	1.8
1.2.3. Debilidades de las uniones remachadas para aplicaciones aeronáuticas.....	1.12
1.2.4. Repercusión de las uniones mediante remaches ciegos en la industria aeronáutica	1.14
1.2.5. Datos reales de remaches ciegos: remaches tipo ABS0257	1.15
1.3. Transcendencia del control de calidad de la instalación de remaches ciegos como estrategia de mitigación de incertidumbre, sobredimensionamiento y sobrecostos.....	1.17
1.4. Objetivos del trabajo	1.24
1.5. Resumen del capítulo	1.24
2. Análisis del estado del arte de tecnologías de inspección no destructivos en elementos de unión y otros	2.1
2.1. Introducción	2.1
2.2. Tecnología base 01: Shearografía.....	2.1
2.2.1. Base teórica	2.1
2.2.2. Aplicaciones en la industria aeronáutica	2.5
2.2.3. Potencial de la shearografía para la inspección de remaches instalados incorrectamente	2.8
2.3. Tecnología base 02: Termografía activa.....	2.9

2.3.1. Base teórica	2.9
2.3.2. Potencial de la termografía activa para la inspección de remaches instalados incorrectamente	2.14
2.4. Tecnología base 03: Métodos basados en ultrasonidos	2.15
2.4.1. Base teórica	2.15
2.4.2. Potencial de las técnicas de ultrasonidos para la inspección de remaches instalados incorrectamente.....	2.17
2.5. Tecnología base 04: Métodos basados en respuestas en frecuencia	2.18
2.5.1. Base teórica	2.18
2.5.2. Potencial de métodos basados en respuesta en frecuencia para la inspección de remaches instalados incorrectamente	2.26
2.6. Resumen del capítulo	2.27
3. Análisis de la viabilidad de tecnologías potenciales para la inspección de remaches ciegos ABS0257	3.1
3.1. Probetas de remaches ciegos para el análisis de viabilidad.....	3.1
3.2. Análisis de viabilidad de la tecnología base 01: Shearografía	3.2
3.2.1. Descripción del análisis de viabilidad	3.2
3.2.2. Conclusiones del análisis de viabilidad de la shearografía	3.6
3.3. Análisis de viabilidad de la tecnología base 02: Termografía activa	3.6
3.3.1. Descripción del análisis de viabilidad	3.6
3.3.2. Conclusiones del análisis de viabilidad de la termografía activa	3.9
3.4. Análisis de viabilidad de la tecnología base 03: Métodos basados en ultrasonidos	3.9
3.4.1. Descripción del análisis de viabilidad	3.9
3.4.2. Conclusiones del análisis de viabilidad de los métodos basados en ultrasonidos.....	3.17
3.5. Análisis de viabilidad de la tecnología base 04: Métodos basados en respuesta en frecuencia	3.18
3.5.1. Descripción del análisis de viabilidad	3.18
3.5.2. Conclusiones del análisis de viabilidad de los métodos basados en respuesta en frecuencia.....	3.24

3.6. Sensibilidad de las tecnologías base respecto a la instalación de los remaches ciegos.....	3.25
3.7. Conclusiones del análisis de viabilidad.....	3.26
3.8. Resumen del capítulo	3.28
4. Desarrollo de una nueva técnica de clasificación no destructiva de remaches ciegos.....	4.1
4.1. Introducción	4.1
4.2. El proceso de remachado ciego y su monitorización.....	4.1
4.2.1. Montaje experimental	4.3
4.2.2. Obtención de probetas.....	4.7
4.3. Verificación del método de clasificación basado en TOF en las probetas B y C	4.8
4.4. Análisis de las señales del proceso	4.12
4.4.1. Acerca de las señales adquiridas.....	4.12
4.4.2. Selección y extracción de puntos característicos. Obtención de valores de evaluación. Regiones de interés.....	4.15
4.5. Análisis de datos y procedimientos de evaluación.....	4.23
4.5.1. Preámbulo.....	4.23
4.5.2. Evaluación basada en valores de evaluación de manera independiente.....	4.24
4.5.3. Análisis basados en identificación mediante patrones	4.26
4.5.4. Análisis de datos mediante técnicas de inteligencia artificial	4.30
4.6. Entendiendo la ley de clasificación	4.34
4.7. Aplicación de la ley de clasificación a probetas no utilizadas para su desarrollo	4.36
4.7.1. Preámbulo.....	4.36
4.7.2. Mejora de la precisión en la medida de TOF.....	4.38
4.7.3. Resultados y análisis.....	4.40
4.7.4. Análisis de la ley TOFvsTc y su validación	4.44
4.8. Resumen del capítulo	4.46
5. Validación de la metodología	5.1

5.1. Preámbulo	5.1
5.2. Metodología de validación	5.1
5.3. Sensibilidad del método para detectar los tipos de defectos en la instalación de remaches	5.4
5.4. Resumen del capítulo	5.6
6. Contribuciones al estado del arte y líneas futuras de investigación	6.1
6.1. Contribuciones al estado del arte	6.1
6.2. Líneas futuras de investigación	6.3
7. Referencias	7.1

Índice de Figuras

Figura 1.2.1. Ensamblaje de subcomponentes para construcción de fuselajes: pueden observarse las líneas de remaches utilizados para la construcción de los subcomponentes.	1.3
Figura 1.2.2. Izda: fabricación de una unión remachada mediante proceso manual. Dcha: detalle de roscas de remaches en componente aeronáutico. .	1.4
Figura 1.2.3. Esquemas de uniones mecánicas convencionales mediante varios elementos: tornillo, arandela, tuerca de seguridad en su caso, tuerca.....	1.5
Figura 1.2.4. Ciclo de remachado de una unión ciega [Airbus 2013b].	1.5
Figura 1.2.5. Muestra de la cara vista tras la instalación de remaches ciegos.	1.6
Figura 1.2.6. Cabezal de remachado tricept [Pkmtricept].	1.7
Figura 1.2.7. Operación de remachado con dos personas [Airbus 2013a].....	1.8
Figura 1.2.8. Ciclo de remachado.	1.10
Figura 1.2.9. Ejemplo de variabilidad de resultados en función de la modelización del comportamiento de remache [Jeong 2006].	1.12
Figura 1.2.10. Sobredimensionamiento y sobrecostes en las uniones aeronáuticas mediante remaches ciegos.	1.13
Figura 1.2.11. Características de los remaches ABS0257 [Monogram 2013a].	1.15
Figura 1.2.12. Dimensiones de los remaches ABS0257 [Monogram 2013a].	1.16
Figura 1.2.13. Dimensiones de los remaches ABS0257 una vez instalados y sus propiedades mecánicas [Monogram 2013a].	1.16
Figura 1.3.1. Criterios para el control de calidad de instalación de remaches ABS0257 [Monogram 2013b].	1.18
Figura 1.3.2. Cotas de control de calidad actualmente.	1.18
Figura 1.3.3. Izda: Control de calidad con calas manuales [Monogram 2013b]. Dcha: Reconstrucción de la cara vista de unión remachada mediante visión artificial [Fraunhofer 2006].	1.19
Figura 1.3.4. Tipos de fallo no detectables desde la cara vista de la unión [Airbus 2013b].	1.19
Figura 1.3.5. Señales de velocidad y de presión respecto al desplazamiento [Byrne 1997].	1.21
Figura 1.3.6. Curva de carga respecto al tiempo [Weeks 2006].	1.21

Figura 1.3.7. Herramienta y sistema de control para instalar un remache [Wang 2008].	1.22
Figura 2.2.1. Esquema de shearografía digital [Hung 1999].	2.2
Figura 2.2.2. Izquierda: Imagen original obtenida por la cámara CCD; Derecha: Imagen de shearografía (patrón de interferencia) con deformación debido a una carga aplicada en el centro [Hung 2009].	2.3
Figura 2.2.3. Izquierda: imagen con superficie de análisis en reposo. Centro: imagen con superficie de análisis excitado. Derecha: Imagen shearográfica, obtenida a partir de las imágenes en reposo y excitada [Hendorfer 2006].	2.3
Figura 2.2.4. Defectos a lo largo de un refuerzo de acero de una rueda de [Hung 2004].	2.4
Figura 2.2.5. Evaluación de la integridad de tubos de acero soldados. Imagen superior una soldadura correcta. En la imagen inferior una mala soldadura. La soldadura defectuosa se caracteriza por una deformación excesiva que se visualiza por una imagen con trazas muy densas [Hung 2004].	2.4
Figura 2.2.6. Faltas de pegado en una estructura unida mediante adhesivos. La estructura estaría unida a lo largo de la región horizontal central a una estructura rígida. Una región perfectamente pegada debería aparecer en la imagen como un área negra. El ensayo muestra una región despegada en la mitad de la unión adhesiva [Hung 2004].	2.5
Figura 2.2.7. Imagen shearográfica de una pared de bloques de hormigón. La discontinuidad localizada en la huella muestra una separación entre dos bloques de hormigón [Hung 2004].	2.5
Figura 2.2.8. Recubrimiento con defectos [Mayer 2002].	2.6
Figura 2.2.9. Defectos de delaminación de capas [Mayer 2002].	2.6
Figura 2.2.10. Las huellas de la imagen revelan un remache suelto en la unión [Hung 2004].	2.7
Figura 2.2.11. Hipótesis de deformación superficial heterogénea provocada por la instalación incorrecta de un remache ciego.	2.8
Figura 2.3.1. Esquema de termografía de pulso transitoria [Hung 2009].	2.10
Figura 2.3.2. Izquierda: Muestra pintada con defectos (agujeros) con corrosión y sin corrosión. Derecha: Imagen termográfica postprocesada: los defectos con corrosión se apresan en blanco, defectos sin corrosión en negro [Collrep 2002].	2.11

Figura 2.3.3. La zona roja en la izquierda de la imagen termográfica es indicio de delaminación [Collrep 2002].	2.11
Figura 2.3.4. Ilustración de remache autoperforante y sección de la unión mediante remache autoperforante.	2.12
Figura 2.3.5. Secciones de los remaches autoperforantes analizados. Izquierda: unión correcta. Derecha: unión incorrecta [Riegert 2002].	2.13
Figura 2.3.6. Remaches en unión Al-Al; Izquierda: Imagen de amplitud, derecha: imagen de fase. El círculo negro muestra el remache autoperforante dañado [Riegert 2002].	2.13
Figura 2.3.7. Remaches en unión CFRP-Al; Izquierda: Imagen en modo amplitud, derecha: imagen en modo fase. El círculo negro muestra el remache autoperforante dañado [Riegert 2002].	2.13
Figura 2.3.8. Imágenes termográficas de uniones metal-metal unidas mediante tornillos con distintos pares de apriete [Zweschper 2001].	2.14
Figura 2.3.9. Excentricidad de la presión superficial de una unión metal-metal atornillada con un par de apriete de 20 Nm [Zweschper 2001].	2.14
Figura 2.4.1. Ilustración de un frente de onda generado por un array de transductores con desfase de tiempo controlado.	2.16
Figura 2.4.2. Esquema de la evaluación de tornillos mediante el tiempo de vuelo [Sung-Jin 2007].	2.16
Figura 2.4.3. Presencia de delaminación y de porosidad (azul oscuro) usando scan tipo B (izquierda) y scan tipo C (derecha) ([42]).	2.17
Figura 2.4.4. Esquema de funcionamiento del método de clasificación contenido en WO2006/110089 [Stepinski 2006].	2.18
Figura 2.5.1. FRF de planchas de composite pegadas correctamente (Control) y con delaminación en el pegado (Damaged) [White 2008].	2.21
Figura 2.5.2. Frecuencia natural de la estructura unida en función del par de apriete. Izda: aflojando un único tornillo; dcha: aflojando todos los tornillos [Caccese 2004].	2.21
Figura 2.5.3. Índice de daño en función del par de apriete de un único tornillo obtenido mediante el método de transmisibilidad (en la banda de frecuencia 7 – 9 kHz) [Caccese 2004].	2.22
Figura 2.5.4. Puente I-40 sometido a ensayo: grieta provocada sobre el puente.	2.22

Figura 2.5.5. Índices de daño en cada punto de medida. $\times\times\times$: curvatura de FRF. $\square\square\square$: índice de variación de curvatura. $\ominus\ominus\ominus$: curvatura de modos propios [Sampaio 1999].	2.23
Figura 2.5.6. Modelo de aerogenerador a escala y control de daño mediante actualización de parámetros modales en un modelo MEF [Fritzen 2009].	2.23
Figura 2.5.7. Estructura aeronáutica: puntos de medida, grieta y su ubicación [Fritzen 2009].	2.24
Figura 2.5.8. Vistas del montaje experimental sobre el fuselaje del helicóptero [Brown 2003].	2.25
Figura 2.5.9. Izquierda: transmisibilidad entre remaches sanos respecto al aflojado; Centro y derecha: similitud entre a) el comportamiento medido –centro- y b) el de una bifurcación de tipo tridente –derecha- [Brown 2003].	2.25
Figura 3.1.1. Probeta remachada #1 y distribución de la calidad de los remaches instalados.	3.1
Figura 3.1.2. Probeta remachada #2 y distribución de la calidad de los remaches instalados.	3.2
Figura 3.1.3. Detalle de remaches correctamente e incorrectamente instalados (probeta #2, remaches fila superior: 13 – 12 – 11; fila inferior 22 – 21).	3.2
Figura 3.2.1. Imagen shearográfica obtenida mediante excitación por vibraciones.	3.3
Figura 3.2.2. Imagen shearográfica obtenida mediante excitación térmica durante el enfriamiento de la probeta.	3.4
Figura 3.2.3. Imagen shearográfica obtenida cuando se excita por carga estática.	3.4
Figura 3.2.4. Izquierda: cabezal de shearografía con excitación por lámparas halógenas integrado. Derecha: proyección de luz coherente sobre probeta remachada.	3.5
Figura 3.2.5. Imágenes shearográficas bajo excitación con calentador de aire de alta potencia: misma información visualizada en dos modos diferentes.	3.6
Figura 3.3.1. Calentamiento de la muestra #2 mediante lámpara halógena.	3.7
Figura 3.3.2. Imagen termográfica de la muestra #2 tras calentamiento mediante lámpara halógena.	3.8
Figura 3.3.3. Imagen termográfica de la muestra #2 tras calentamiento mediante calentador de aire de alta potencia.	3.8

Figura 3.4.1. Izda: Palpador con array de transductores sobre probeta de acero con taladros a diferentes cotas. Dcha: izda: A-Scan de un transductor; dcha: S-Scan donde se aprecian todos los agujeros de la probeta de acero.	3.10
Figura 3.4.2. Montaje de transductor US sobre el remache e identificación de interfaces.....	3.12
Figura 3.4.3. Señal US rectificada con identificación de ecos. El TOF corresponde al tiempo del eco 3 respecto al eco 2.	3.12
Figura 3.4.4. TOF correspondientes a los remaches de la probeta #1 y fronteras inferior y superior.....	3.15
Figura 3.4.5. TOF correspondientes a los remaches de la probeta #2 y fronteras inferior y superior.....	3.17
Figura 3.5.1. Izquierda: excitador piezoeléctrico con montaje por vacío. Centro y derecha: ejemplo de montaje del excitador sobre una probeta remachada. .	3.18
Figura 3.5.2. Izda: vista de las cabezas de cierre con pegatina reflectante. Dcha: vista del montaje experimental para la medida de la respuesta de los remaches.	3.19
Figura 3.5.3. Esquema de la cadena de medida.	3.20
Figura 3.5.4. Izda: vista general del montaje experimental. Dcha: adquisición de datos, controlador del cabezal del vibrómetro láser, generador de funciones y amplificador.	3.21
Figura 3.5.5. Gráfico conjunto de todas las FRF, magnitud frente a frecuencia.	3.22
Figura 3.5.6. Gráfico conjunto de todas las FRF, parte real frente a parte imaginaria.....	3.22
Figura 3.5.7. Árbol de decisión obtenido mediante el algoritmo REPTree. ...	3.23
Figura 3.5.8. Árbol de decisión obtenido mediante los algoritmos CART y J48.	3.24
Figura 4.2.1. Izda: imán diametral sobre soporte elástico. Dcha: montaje del imán sobre la cabeza de cierre de un remache.	4.3
Figura 4.2.2. Montaje de un soporte con marcas reflectantes para el uso de un tacómetro óptico.....	4.4
Figura 4.2.3. Montaje del sensor de efecto hall sobre un portaprobetas mediante un soporte magnético desplazable.....	4.4

Figura 4.2.4. Imágenes CAD del montaje experimental de la mesa dinamométrica, portaprobetas y probeta a remachas.	4.6
Figura 4.2.5. Izda: Cara vista y cara ciega de la probeta B. Dcha: Cara vista y cara ciega de la probeta C.	4.7
Figura 4.3.1. Clasificación en base a TOF de los remaches de la probeta B. Se identifica límite inferior pero no límite superior.	4.11
Figura 4.3.2. Clasificación en base a TOF de los remaches de la probeta C: se observa una clara tendencia de agrupación de los remaches en base al TOF.	4.11
Figura 4.4.1. Ejemplo de señal de caudal Q_a , correspondiente al remache B75.	4.12
Figura 4.4.2. Izda: señal de velocidad en pulsos. Dcha: Señal de velocidad convertida mediante convertidor frecuencia-voltaje.	4.13
Figura 4.4.3. Izda: señal de caudal Q_b [10-100L/min]. Dcha Señal de caudal Q_a [50-500L/min].	4.13
Figura 4.4.4. Izda: señal de presión. Dcha: Señal de fuerza de reacción sobre el portaprobetas.	4.14
Figura 4.4.5. Izda: señal de velocidad en pulsos. Dcha: Señal de velocidad convertida mediante convertidor frecuencia-voltaje.	4.14
Figura 4.4.6. Izda: señal de caudal Q_b [10-100L/min]. Dcha Señal de caudal Q_a [50-500L/min].	4.14
Figura 4.4.7. Izda: señal de presión. Dcha: Señal de fuerza de reacción sobre el portaprobetas.	4.15
Figura 4.4.8. Señales de potencia calculadas y señales de presión y caudal de origen. Izda: B75. Dcha: C16.	4.15
Figura 4.4.9. Ilustración del desfase entre el aumento de presión y el flujo de aire.	4.18
Figura 4.4.10. Superposición de señales e ilustración de puntos característicos de las señales.	4.19
Figura 4.4.11. Señal de pulsos de velocidad con cada inicio y fin de medias vueltas identificados.	4.19
Figura 4.4.12. Puntos de inicio de deformación y rotura del vástago sobre la señal de fuerza de reacción F_z	4.20
Figura 4.4.13. Puntos de inicio de remache, máxima presión y presión de rotura.	4.21

Figura 4.4.14. División del ciclo de remachado en regiones de interés.....	4.22
Figura 4.4.15. Ilustración del cálculo de energía consumida en cada región – ilustración para la región 4.	4.23
Figura 4.5.1. Valores de evaluación: izda) relación de presiones; dcha) caudal de rotura.	4.24
Figura 4.5.2. Ejemplos de valores de evaluación: izda) relación de energía consumida entre regiones 3 y 4; dcha) número de vueltas giradas.	4.25
Figura 4.5.3. Izda: Probeta B, clasificación parcial en base al tiempo de ciclo; dcha: probeta C, clasificación parcial en base a la relación entre el grip y el tiempo de ciclo (dcha).	4.25
Figura 4.5.4. Esquema de clasificación basado en identificación mediante patrones.	4.27
Figura 4.5.5. Ley de clasificación TOFvsTc obtenido mediante análisis de los remaches de la probeta B.	4.33
Figura 4.5.6. Ley de clasificación TOFvsTc aplicada a la probeta C.....	4.34
Figura 4.6.1. Ilustración gráfica de la hipótesis que explica los fenómenos físicos asociados a la ley de clasificación TOFvsTc.....	4.35
Figura 4.7.1. Imagen de las nuevas probetas para validación del método TOFvsTc.....	4.37
Figura 4.7.2. Remaches incorrectamente instalados previos: presentan anillos y picaduras.....	4.38
Figura 4.7.3. Remaches incorrectos en las placas de validación: sin anillos ni picaduras.....	4.38
Figura 4.7.4. Ilustración del rectificado de señal de US habitual para inspección mediante US.....	4.39
Figura 4.7.5. Pantallazos (y estampa de tiempo en el margen superior izquierdo) de una señal temporal visualizada como: izda) rectificadas, y dcha) señal temporal.	4.40
Figura 4.7.6. Clasificación TOFvsTc de la probeta de validación V1.	4.40
Figura 4.7.7. Clasificación TOFvsTc de la probeta de validación V2.	4.41
Figura 4.7.8. Detalle de los avellanados excesivamente profundos en las últimas filas de las probetas de validación V1 y V2.	4.42

Figura 4.7.9. Ilustración del efecto del avellanado excesivo sobre el espesor efectivo de la unión: un avellanado demasiado profundo disminuyen el espesor efecto de unión.....	4.42
Figura 4.7.10. Clasificación de los remaches de la probeta V1 con distinción entre remaches con avellanado en tolerancias y avellanado demasiado profundo.	4.43
Figura 4.7.11. Clasificación de los remaches de la probeta V2 con distinción entre remaches con avellanado en tolerancias y avellanado demasiado profundo.	4.43
Figura 4.7.12. Clasificación de los remaches con avellanado dentro de tolerancias: probeta V1.	4.44
Figura 4.7.13. Clasificación de los remaches con avellanado dentro de tolerancias: probeta V2.	4.44
Figura 5.2.1. Plano TOF-Tc correspondiente al tamaño ABS0257-5-300: los remaches del cajón de tamaño incorrecto se posicionan en la zona correspondiente a remaches incorrectamente instalados.	5.3
Figura 5.2.2. Plano TOF-Tc correspondiente al tamaño ABS0257-5-350: los remaches del cajón de tamaño incorrecto se posicionan en la zona correspondiente a remaches incorrectamente instalados.	5.3
Figura 5.2.3. Plano TOF-Tc correspondiente al tamaño ABS0257-6-400: los remaches del cajón de tamaño incorrecto se posicionan en la zona correspondiente a remaches incorrectamente instalados.	5.4
Figura 5.3.1. Capacidad de detección de cada tipo de defecto del método TOFvsTc.....	5.5
Figura 6.2.1. Representación gráfica de la hipótesis de extensión a una ley de clasificación 3D mediante la adición de un eje con información relativa al espesor de unión.	6.4
Figura 6.2.2. Representación gráfica de la proyección del espacio 3D sobre el plano TOF-Tc.	6.4

Índice de Tablas

Tabla 1.2.1. Materiales y tratamientos térmicos de los componentes de un remache ABS0257 [Monogram 2013a].	1.16
Tabla 1.3.1. Resumen de patentes para la clasificación de remaches basadas en la monitorización del proceso de remachado.	1.23
Tabla 2.5.1. Resumen de los principales métodos de SHM.	2.20
Tabla 3.4.1. Secuencia de caracterización de los ecos mediante phased array.	3.11
Tabla 3.4.2. Ilustración de la secuencia temporal de vuelo del pulso US y la aparición de ecos.	3.13
Tabla 3.4.3. Probeta #1: Relación de número de remache, TOF medido y estado del remache.	3.14
Tabla 3.4.4. Probeta #2: Relación de número de remache, TOF medido y estado del remache.	3.16
Tabla 3.4.5. Resumen de la clasificación de remaches basada en TOF en las probetas #1 y #2.	3.17
Tabla 3.5.1. Listado de remaches para los que se ha medido su FRF.	3.21
Tabla 3.7.1. Resumen de las capacidades de los métodos por ultrasonidos y de respuesta en frecuencia.	3.27
Tabla 3.7.2. Evaluación de las tecnologías con potencial para el desarrollo de un método de clasificación según los criterios evaluación de aptitud.	3.28
Tabla 4.2.1. Descripción de la instrumentación para la monitorización del proceso de remachado.	4.5
Tabla 4.2.2. Características de las probetas generadas bajo monitorización del proceso.	4.7
Tabla 4.2.3. Identificación de remaches para los que no se han obtenido todas las señales deseadas.	4.8
Tabla 4.3.1. TOF correspondientes a los remaches de la probeta B.	4.9
Tabla 4.3.2. TOF correspondientes a los remaches de la probeta C.	4.10
Tabla 4.4.1. Estado de la instalación de los remaches de ejemplo.	4.13
Tabla 4.5.1. Resumen de la efectividad del método TOFvsTc.	4.34
Tabla 4.7.1. Características de las probetas de validación.	4.36

Tabla 4.7.2. Leyes de clasificación TOFvsTc de las probetas V1 y V2, y forma genérica de la ley.	4.45
Tabla 4.7.3. Resumen de la capacidad de clasificación del método TOFvsTc.	4.45
Tabla 5.2.1. Listado de remaches instalados con grip incorrecto en el cajón extraído de producción.	5.2

Nomenclatura

CFRP	Polímero reforzado por fibra de carbono (<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>)
FRF	Función de Respuesta en Frecuencia
F_z	Fuerza de reacción sobre el soporte de la unión remachada en dirección axial del remache
N	Velocidad de giro
N_p	Velocidad de giro expresada mediante pulsos de frecuencia proporcional a la velocidad
N_t	Velocidad de giro medida mediante tacómetro óptico
Q	Caudal
P	Presión
ΔP	Diferencia de presiones
PCA	Análisis de componentes principales (<i>Principal Component Analysis</i>)
SHM	Monitorización de la salud estructural (<i>Structural Health Monitoring</i>)
T_c	Tiempo de ciclo
TOF	Tiempo de vuelo (<i>Time of Flight</i>)
US	Ultrasonidos

1. Introducción

1.1. Contexto tecnológico e industrial

Las estructuras aeronáuticas deben responder a las altas exigencias propias de su sector, atendiendo a criterios tecnológicos, ingenieriles, económicos y de seguridad de manera simultánea. En los ámbitos tecnológicos e ingenieriles, las exigentes condiciones de operación y de explotación de las estructuras aeronáuticas provocan un desarrollo continuado de las capacidades de los constructores aeronáuticos, resultando en estructuras a la vanguardia del estado de arte de la ciencia y tecnología aplicables. Por otra parte, en el ámbito económico, la creciente necesidad de reducción de los costes del ciclo de vida de las aeronaves debido a su impacto crítico en la rentabilidad de los operadores aeronáuticos obliga a repensar las soluciones ingenieriles y tecnológicas desde el punto de vista de sus costes de fabricación, montaje, explotación y mantenimiento. Asimismo, toda estructura aeronáutica debe garantizar su integridad y seguridad, de forma fiable, a lo largo de toda su vida útil. Es decir, las estructuras aeronáuticas están sometidas a:

- Exigencias ingenieriles: resistencia mecánica, ligereza, comportamiento dinámico, estabilidad, fatiga, resistencia térmica, etc.
- Limitaciones económicas: costes de fabricación, montaje, operación y mantenimiento.
- Requisitos de seguridad: integridad, envejecimiento adecuado, aptitud de inspección.

Se trata de requisitos que aunque aplicables a cualquier producto industrial, en el sector aeronáutico cobran especial relevancia. En consecuencia, las estructuras finales resultan ser extremadamente complejas y en una evolución constante.

Las aeronaves son productos de complejidad extrema compuestas por infinidad de subsistemas y componentes con funciones muy diversas y sometidos a exigencias completamente diferentes. De este modo, puede considerarse estructura aeronáutica el ala de una aeronave, sometida a cargas aerodinámicas, a condiciones meteorológicas extremas, a fatiga estructural y térmica, corrosión; así como puede considerarse estructura aeronáutica la

turbina de un motor de avión, sometido a exigencias claramente diferentes. Por tanto, surgen variedad de soluciones particulares para cada conjunto de exigencias aplicables a cada subestructura, adecuándose a sus exigencias y optimizando su aptitud atendiendo a los criterios ingenieriles, económicos y de seguridad.

Siendo las exigencias para cada subsistema tan diferentes, y como consecuencia, siendo la solución adoptada para la fabricación y montaje de cada subsistema tan diferente, los subsistemas albergan una característica común a todos ellos: deben estar unidos al resto para formar la aeronave. De esta forma se añade un condicionante más a las exigencias de cada subsistema: debe poder unirse de forma eficiente al resto de subsistemas; imponiéndose una condición de compatibilidad entre subsistemas por diferente que sean en su concepción. Retomando el ejemplo anterior, los motores (fabricados en aleaciones de base níquel o cobalto) deben poder unirse a las alas de un avión (fabricadas en aluminio y compuesto de fibra de carbono) de manera eficiente. Y más allá de la unión de subsistemas, las uniones entre partes son singularidades clave en la fabricación propia de las subestructuras aeronáuticas.

La necesidad de adecuarse a la variedad de materiales, formas, y funcionalidades de las partes a unir ha conllevado el desarrollo de diferentes tecnologías de unión que se adecúan a las particularidades de cada set de elementos a unir. En la fabricación aeronáutica, las tecnologías de unión más extendidas son la soldadura de materiales, las uniones mecánicas, y las uniones adhesivas. Además, es conveniente considerar como una tipología de unión las piezas fabricadas de forma monolítica – que aunque su objetivo es precisamente evitar el uso de uniones, compiten contra las tecnologías de unión durante la toma de decisiones del diseño de las estructuras.

1.2. Desarrollo de las uniones remachadas ciegas en la fabricación de estructuras aeronáuticas

1.2.1. Fortalezas del remachado como tecnología de unión

Las uniones remachadas son un caso particular de las uniones mecánicas que ofrecen características especialmente adecuadas para la fabricación aeronáutica, principalmente:

A. Materiales de unión:

No existen las restricciones en la tipología de materiales a unir que sí restringen el uso de otras tecnologías de unión. Permite la unión de materiales metálicos

disimilares, de materiales compuestos, y de materiales metálicos y compuestos entre sí.

El desarrollo de los materiales composites, su relación peso/resistencia, el avance en los métodos de cálculo, los avances en las técnicas de inspección, y otros avances han supuesto que en las aeronaves actuales los materiales compuestos sean ampliamente utilizados. Entre los materiales compuestos más extendidos se encuentran los polímeros reforzados con fibra de carbono, CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers). Son materiales no soldables y para los que no existe una solución adhesiva adecuada para fabricar piezas estructurales aeronáuticas. Sin embargo las uniones remachadas son una solución válida y ampliamente extendida para unir piezas de CFRP.

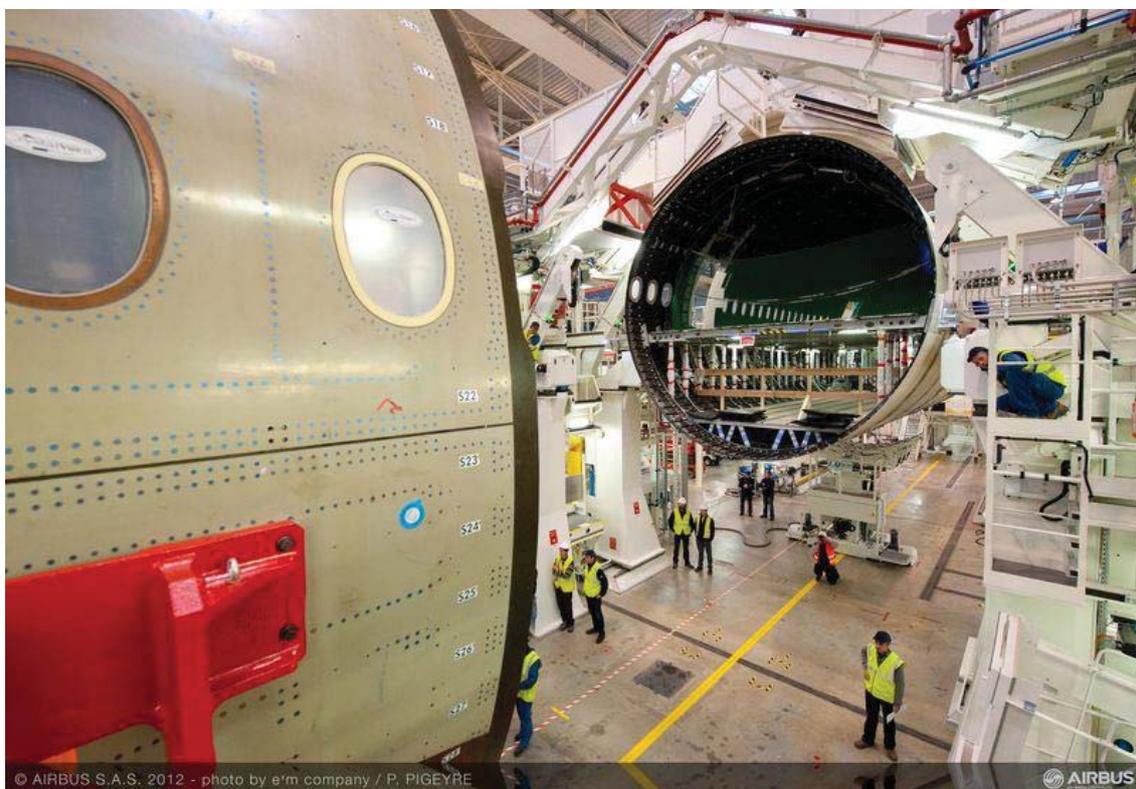


Figura 1.2.1. Ensamblaje de subcomponentes para construcción de fuselajes: pueden observarse las líneas de remaches utilizados para la construcción de los subcomponentes.

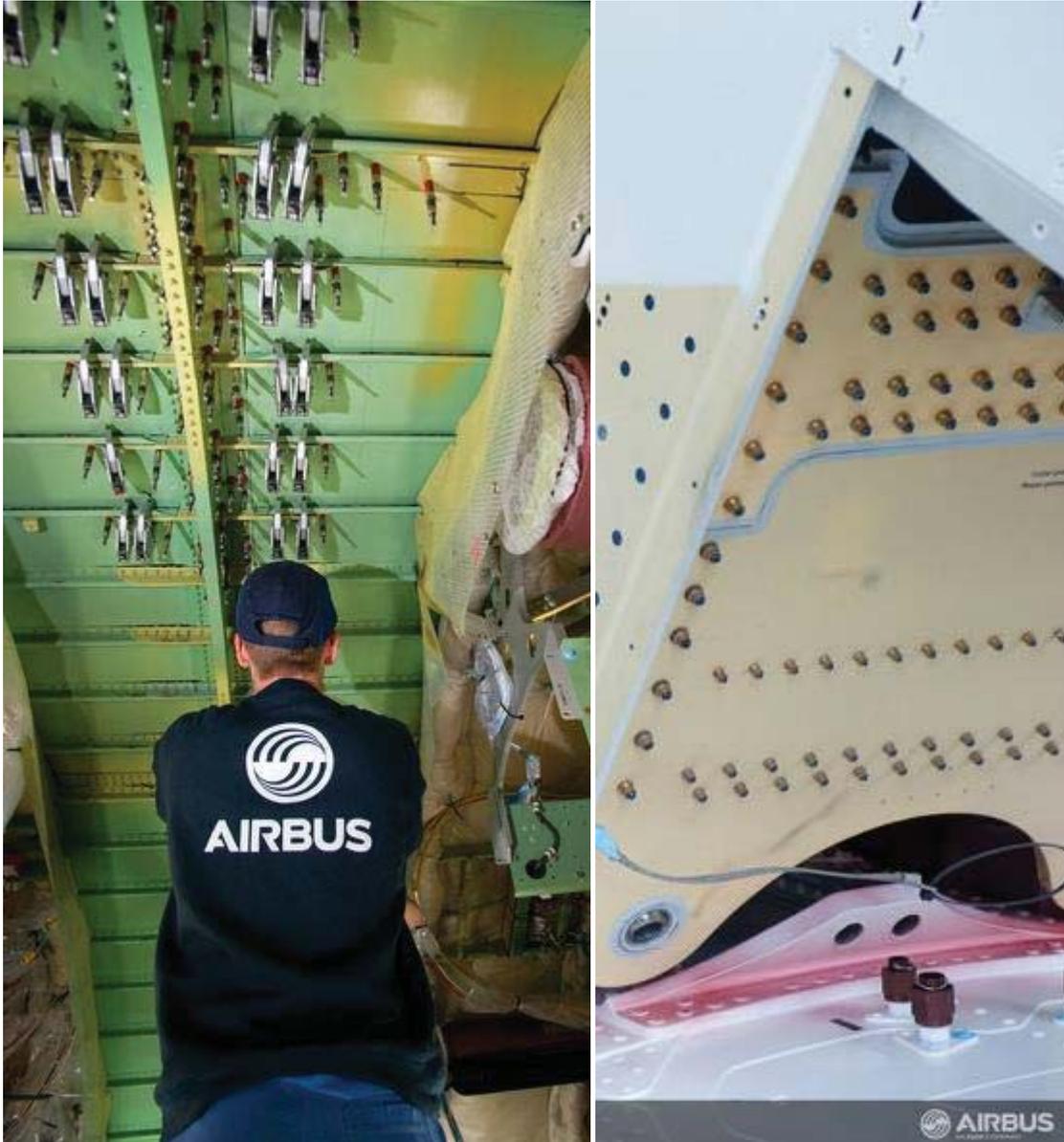


Figura 1.2.2. Izda: fabricación de una unión remachada mediante proceso manual. Dcha: detalle de roscas de remaches en componente aeronáutico.

B. Uniones ciegas:

En las uniones mecánicas convencionales la unión de los elementos se lleva a cabo accediendo por cada lado de la unión con una parte del sistema de unión, uniéndolos entre ellos y asegurando la unión de los elementos a unir, como muestra la Figura 1.2.3.

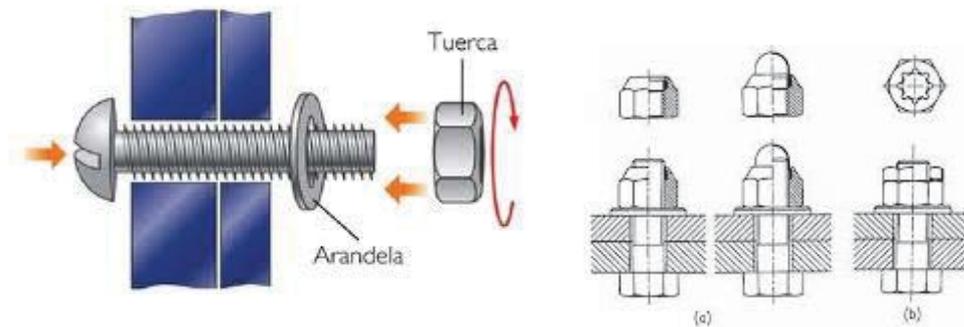


Figura 1.2.3. Esquemas de uniones mecánicas convencionales mediante varios elementos: tornillo, arandela, tuerca de seguridad en su caso, tuerca.

Los remaches ciegos permiten la unión de los elementos accediendo exclusivamente desde uno de los lados de la unión (conocido como ‘cara vista’), sin necesidad de acceder al otro lado de la unión (conocido como ‘lado ciego’, o ‘cara ciega’). Esta particularidad se logra mediante diseños especiales de remaches que, en su estado inicial –sin deformación de ningún tipo- son capaces de atravesar los agujeros de unión, pero que una vez iniciada su deformación quedan encajados en ellos. La Figura 1.2.4 muestra un ejemplo de operación de remachado de una unión ciega.

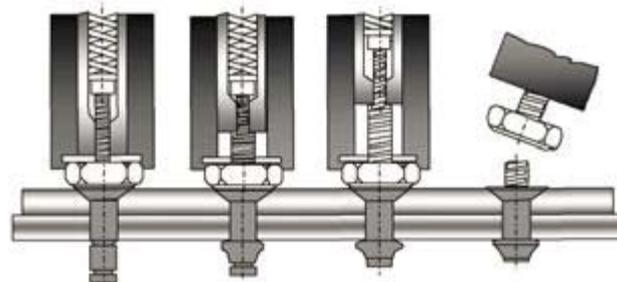


Figura 1.2.4. Ciclo de remachado de una unión ciega [Airbus 2013b].

La posibilidad de unir varios elementos accediendo desde un único lado de la unión supone una gran ventaja de las uniones remachadas mediante remaches ciegos frente a otro tipo de tecnologías de unión. La Figura 1.2.5 muestra la cara vista de una unión mediante remaches ciegos.

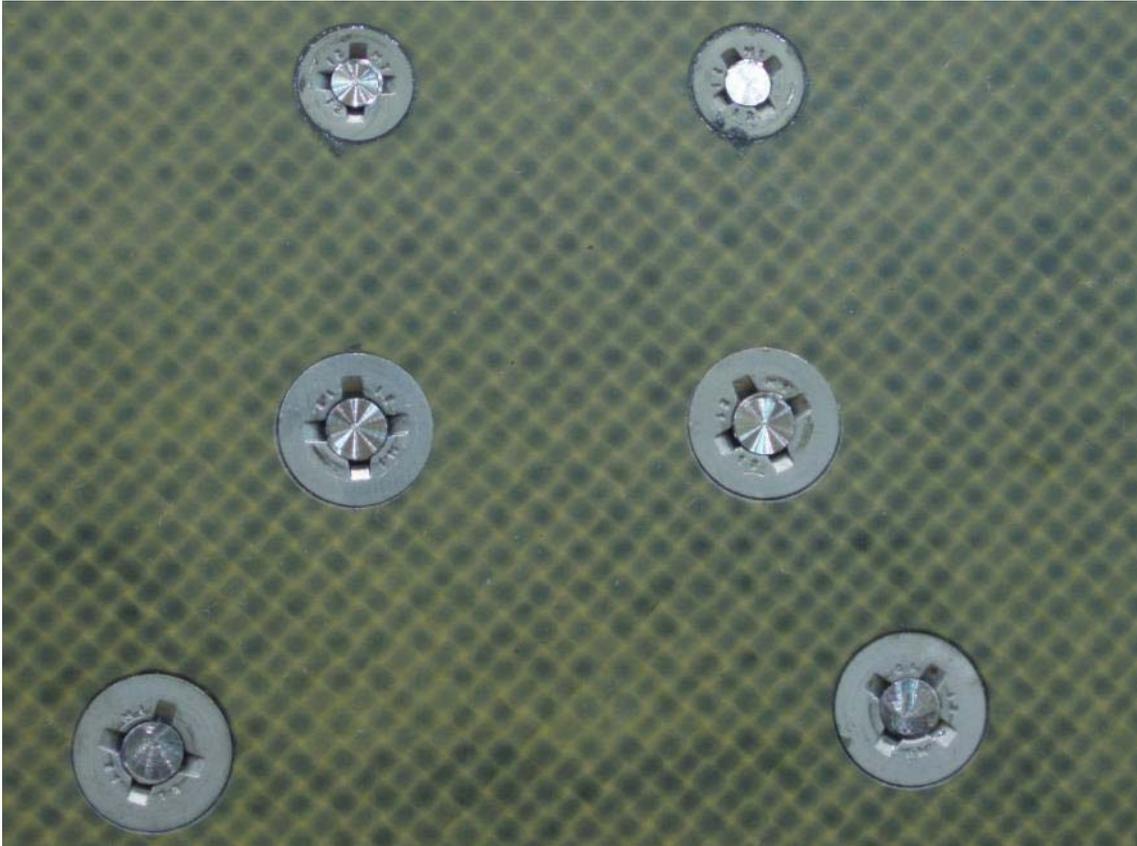


Figura 1.2.5. Muestra de la cara vista tras la instalación de remaches ciegos.

C. Capacidad de automatización:

La reducción en la complejidad de la operación de unión que supone el uso de remaches ciegos ha permitido desarrollar sistemas totalmente automatizados que llevan a cabo las uniones remachadas con grados de automatización muy elevados. El ciclo de operación de remachado completo consiste en:

1. Posicionamiento del cabezal.
2. Taladrado.
3. Medida de espesor real de unión a remachar.
4. Aplicación de sellante en el orificio para garantizar estanqueidad de la unión.
5. Inserción del remache en el orificio.
6. Remachado.
7. Control de calidad y verificación del remache montado.
8. Fresado del pin según criterios aerodinámicos

La operación de fresado, aunque no forma parte del proceso de remachado, es necesaria para cumplir con criterios aerodinámicos de las estructuras formadas. Por tanto, se considera una etapa más en la operación de unión.

A modo de ejemplo, la Figura 1.2.6 muestra un cabezal de remachado para máquinas Tricept. Las máquinas dotadas con este cabezal y con almacén

automático de remaches, tienen tiempos de ciclo por remache de en torno a 30 segundos.

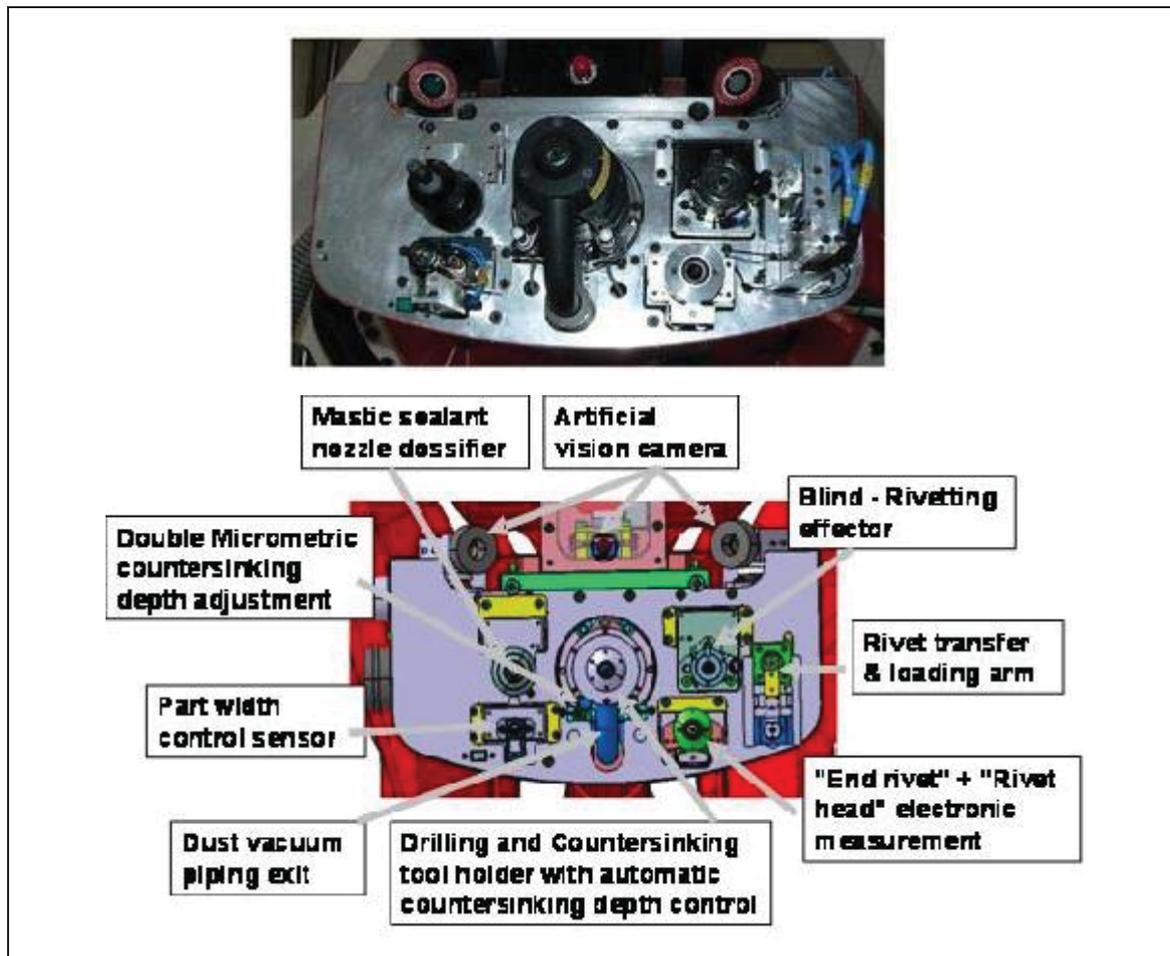


Figura 1.2.6. Cabezal de remachado tricept [Pkmtricept].

En uniones mediante remaches no ciegos, la complejidad de la operación de cara a su automatización es claramente mayor. Deben posicionarse los elementos desde ambos lados de la unión simultáneamente, introducirse unos dentro del otro, y llevar a cabo la operación de remachado. La Figura 1.2.7 muestra una operación de remachado llevada a cabo, como es habitual, de forma manual mediante dos operarios y con remachadora neumática manual.



Figura 1.2.7. Operación de remachado con dos personas [Airbus 2013a]

1.2.2. Análisis de incertidumbre y variabilidad en las uniones remachadas ciegas

Las uniones remachadas presentan un grado de incertidumbre y variabilidad que debe tenerse en cuenta desde la fase de diseño de las uniones. A diferencia de otros procesos de fabricación más deterministas, las uniones remachadas entrañan en sí mismas fuentes de incertidumbre que provocan una variabilidad que debe ser asumida en las uniones. Obviando las fuentes de incertidumbre ajenas al proceso de remachado (como puede ser un deficiente control de calidad de los materiales a unir o de los remaches para la unión), las principales fuentes de incertidumbre y variabilidad en las uniones remachadas son: a) las debidas a la fabricación de la unión, y b) las debidas a la falta de conocimiento preciso del comportamiento estructural de las uniones remachadas.

1.1.1.1 Análisis de incertidumbre en la fabricación de las uniones remachadas

El remachado involucra altas tensiones y grandes deformaciones en el remache. Según comienza el ciclo de remachado, la parte del remache diseñada para tal fin comprime los materiales de unión, que ejercen la reacción correspondiente sobre el remache. Según aumenta la fuerza o el par de remachado, las tensiones (de compresión en los materiales y de tracción o compresión en la zona del remache diseñada para tal) aumentan, provocando la deformación plástica y posterior rotura del remache. Tras la rotura, la deformación elástica se recupera, quedando la unión bajo tensiones de compresión.

Es conveniente hacer hincapié en lo descrito en el párrafo anterior. Por conveniencia, se ilustrará a continuación (ver Figura 1.2.8) la secuencia de etapas de una operación de remachado y se expondrán las principales causas de incertidumbre siguiendo la instalación de un remache ciego ABS0257, pero lo expuesto es totalmente trasladable a cualquier tipo de remache:

A. Inicio:

En primer lugar, se introduce el remache en su posición. Comienza la operación de remachado haciendo girar el vástago roscado del remache, que debido a la rosca interior del remache comienza a moverse hacia el exterior. El vástago que está unido al extremo opuesto del remache avanza hacia la cara ciega de la unión. El par de remachado es bajo, apenas hay oposición al movimiento. Por otra parte, externamente se mantiene el cuerpo del remache en su posición contra la cara vista de la unión.

B. Deformación plástica de la funda:

Al poco de iniciar el movimiento, la funda trasera toca con la cuña interior. Comienza a ejercerse el par de remachado debido a la oposición de la funda exterior a ser deformada. Al mismo tiempo el vástago, que es el transmisor de los esfuerzos, comienza a someterse a tracción. El ciclo continúa y la funda, ligeramente deformada contacta con la cara ciega.

C. Esfuerzos sobre los materiales de unión:

Los elementos de unión se oponen al avance de la funda, lo que aumenta el par de remachado, la tensión en el vástago, la deformación de la funda (que comienza a coger forma de campana contra la cara ciega), y comienza a ejercer tensiones de compresión entre los elementos de unión. Evidentemente, los elementos de unión también se deforman debido a la compresión a la que se ven sometidos. Los esfuerzos aumentan superando los límites elásticos y provocando deformaciones plásticas.

D. Rotura:

Siguiendo con el ciclo, el par de remachado aumenta, las tensiones aumentan, provocando en primer lugar la deformación plástica del vástago y finalmente su rotura. Se anula el par de remachado, y la fuerza de unión de compresión sobre los materiales de unión (de tracción sobre el vástago) es la posición de equilibrio alcanzada entre ellos.

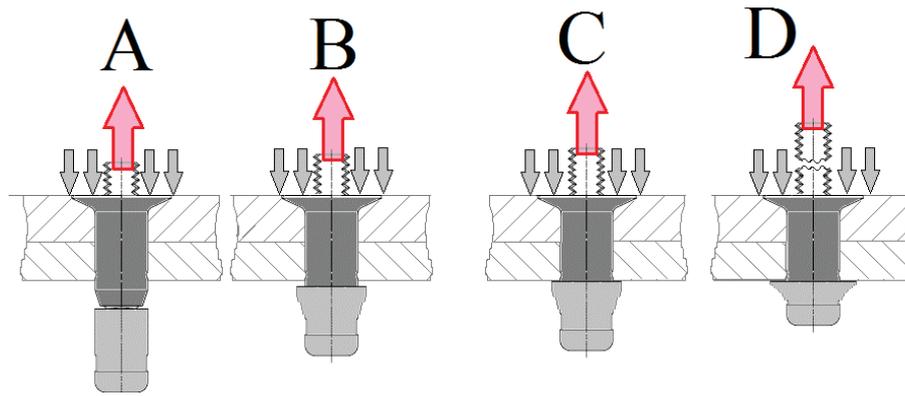


Figura 1.2.8. Ciclo de remachado.

Resulta evidente que el comportamiento de las partes involucradas (vástago, funda exterior, materiales de unión) es altamente no lineal, y que además se encuentran totalmente influenciados por la situación particular del resto de partes.

Durante la etapa denominada como *B Deformación plástica de la funda*, la funda se ve sometida a deformaciones plásticas que endurecen su material (siendo un remache ABS0257, acero inoxidable 304). Por lo tanto, pequeñas variaciones en la distancia desde que comienza la deformación debida a la cuña hasta que la funda contacta contra la cara ciega, pueden provocar grados de endurecimiento por deformación en frío diferentes, preconditionando la siguiente etapa de forma diferente.

La etapa *C Esfuerzos sobre los materiales de unión* comienza desde la situación final de la etapa anterior. Durante esta etapa, además de la variabilidad en la situación de partida de la funda del remache, las desviaciones de los materiales de unión respecto de sus valores nominales (pequeñas variaciones de espesor, juego entre ellos, rebabas en el orificio, variaciones de rigidez a compresión, u otros) provocan un comportamiento variable y un desarrollo de tensiones sometido a incertidumbre. Por otra parte, el cuerpo del remache (entre la cabeza posterior y el apoyo avellanado) se ve sometido a compresión longitudinal y a compresión radial: es decir, la compresión que le provocan entre la cabeza de cierre y el soporte externo provocan, por efecto Poisson un abombamiento del cuerpo hacia el exterior. Al mismo tiempo, los materiales unión, debido a la compresión a la que se ven sometidos, por el mismo efecto Poisson se ven sometidos a un abombamiento hacia el interior. La holgura entre el remache y los materiales de unión (es decir, la holgura entre el remache y el agujero) añade más incertidumbre a los esfuerzos de unión finales en la unión.

Por otra parte, el proceso asume una perpendicularidad perfecta entre el eje del remache y la cara vista, perpendicularidad que si no se cumple provoca una heterogeneidad en la distribución de tensiones sobre la cara vista. Lo mismo

ocurre con la cara ciega, a la que según diseño de remache se le asigna una tolerancia de perpendicularidad y que evidentemente añade incertidumbre al proceso de instalación de remaches.

En [Ibrahim 2005] ofrecen un análisis detallado de las fuentes de incertidumbre y de diferentes métodos de modelización del comportamiento dinámico de las uniones mecánicas. Atribuyen las causas de incertidumbre a la fricción entre elementos, endurecimiento, acabado de las superficies, dimensiones relativas de los elementos de unión y al creep. En consecuencia, afirman que todas las uniones y las estructuras formadas contienen incertidumbre.

En consecuencia, el desarrollo del proceso de remachado ocurre gracias a una secuencia de fenómenos altamente no lineales y dependientes entre sí. Aunque algunas de las causas son mitigables asegurando la integridad de los materiales de unión, su geometría y el taladrado previo, las no linealidades y la incertidumbre son inherentes al proceso de remachado y no es posible evitarlas. Y tal y como se concluye en [Venkateswarlu 2013], la variabilidad del proceso es una de las causas de fallo en la instalación de remaches.

1.1.1.1 Análisis de incertidumbre por falta de conocimiento preciso del comportamiento estructural de las uniones remachadas

Las uniones remachadas unen dos o más elementos de forma no continua, sino puntualmente mediante cada uno de los remaches de la unión. Debido a la variabilidad en la fabricación en instalación de la unión remachada, las condiciones de contorno particulares de cada remache son variables, pero además, influyen sobre el comportamiento global de la unión. Las tolerancias de fabricación en los elementos de unión y la incertidumbre en la instalación de cada remache impiden formular ecuaciones de compatibilidad geométrica de forma plenamente veraz, y deben aplicarse factores de seguridad para asegurar la validez de las uniones diseñadas y fabricadas.

La modelización del comportamiento no lineal de los remaches no es sencilla, dificultad que se ve magnificada debido a las incertidumbres propias del proceso de remachado. Adicionalmente, en aplicaciones aeronáuticas deben tenerse en cuenta los efectos dinámicos sobre las estructuras, lo que añade complejidad a los métodos de cálculo. En este aspecto, [Jaroslav 2003] ofrece una amplia revisión de bibliografía acerca de métodos de simulación mediante elementos finitos de uniones mecánicas.

A modo de ejemplo de la dificultad para obtener simulaciones válidas expuesta, la Figura 1.2.9 muestra los resultados de simulaciones según 3 modelos MEF diferentes para una unión mediante un remache [Jeong 2006]. En esta

simulación el material, su geometría y las condiciones de contorno están definidas y son constantes para los 3 modelos de comportamiento de remache. Se trata de una carga estática aplicada sobre una viga cantiléver formada por dos vigas unidas entre sí mediante un remache. Por tanto, no existen efectos dinámicos ni de histéresis en el problema.

A la izquierda, en la parte baja se muestran los desplazamientos resultantes en cada modelo y en la parte derecha los desplazamientos del punto indicado de la estructura (arriba en el eje X y debajo en el eje Z). Salta a la vista cómo, incluso para una estructura simple, según el método de modelización los resultados obtenidos son variables.

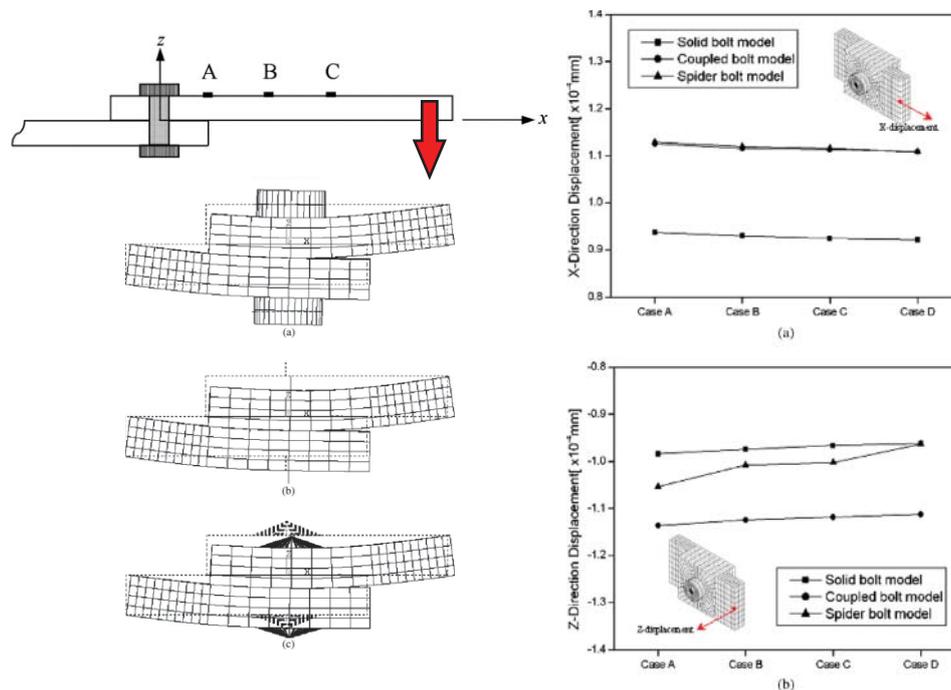


Figura 1.2.9. Ejemplo de variabilidad de resultados en función de la modelización del comportamiento de remache [Jeong 2006].

1.2.3. Debilidades de las uniones remachadas para aplicaciones aeronáuticas

Rodríguez, M. lista los siguientes efectos perjudiciales de las uniones mecánicas de polímeros reforzados con fibra [Rodríguez 2011]:

- × Riesgo de aplastamiento y delaminación por distribución ineficiente de la fuerza de unión o de la presión lateral ejercida sobre entre paredes del agujero y del remache.
- × Fractura de fibras durante el taladrado previo a la inserción del elemento de unión.
- × Efectos derivados de la diferencia de coeficientes de dilatación térmica entre los polímeros reforzados y los materiales de los elementos de unión.

- × Necesidad de sellar la unión para evitar el deterioro de las resinas poliméricas debido a absorción de humedad.
- × Riesgo de corrosión galvánica, lo que obliga a utilizar materiales que presenten buen comportamiento frente a la corrosión galvánica en combinación con los polímeros reforzados con fibra de carbono (como el Ti-6Al-4V o aceros inoxidables) que aumentan el coste de los remaches.
- × Necesidad de precisión en los diámetros del agujero y del remache, con el objetivo de optimizar la presión lateral entre las paredes del agujero y del remache. Un juego demasiado grande o demasiado pequeño son perjudiciales, por hacer nula la presión lateral y por riesgo de daño de los materiales a unir al forzar la inserción del remache, respectivamente.
- × Aumento de peso de la estructura por adición de los propios remaches.

Centrándose en los remaches ciegos, y teniendo en cuenta además criterios relacionados con la vida útil total y con el coste del ciclo de vida completo, es necesario añadir las siguientes debilidades al listado anterior:

- × Necesidad de taladrar los elementos a unir, generando discontinuidades, concentraciones de tensiones y puntos sensibles para creación de fisuras (o crecimiento a partir de microfisuras creadas durante el taladrado) y aparición de corrosión.
- × Sobredimensionamiento de las uniones por la incertidumbre asociada a los remaches ciegos, y su sobrecoste asociado, tal y como ilustra la Figura 1.2.10.

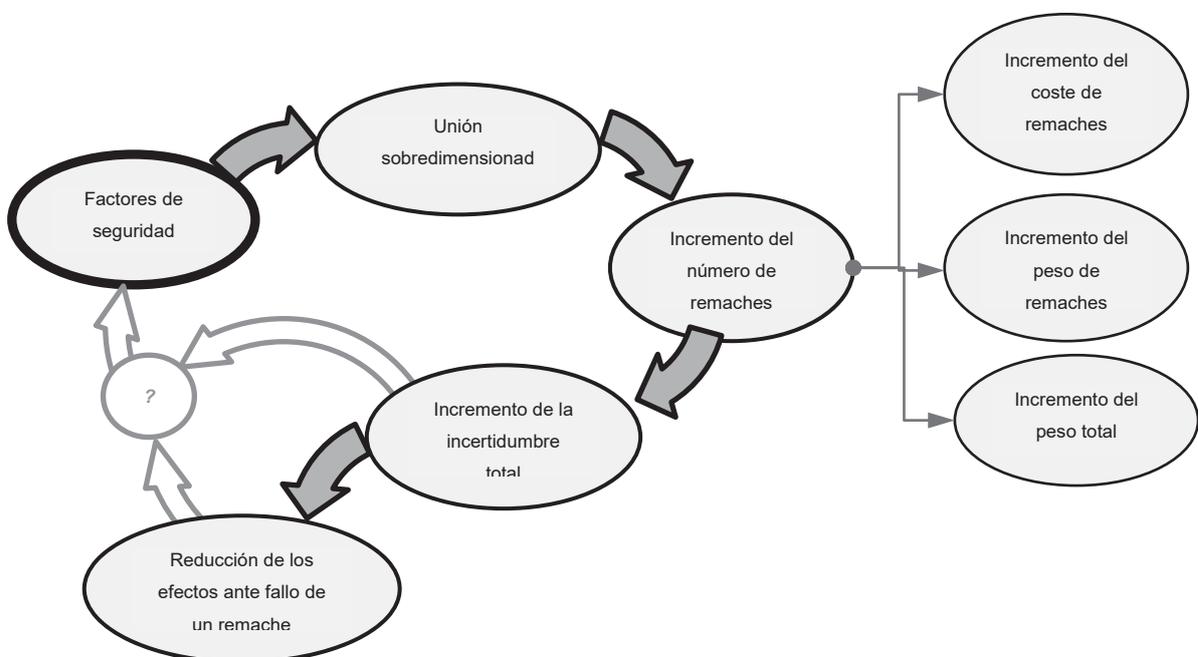


Figura 1.2.10. Sobredimensionamiento y sobrecostes en las uniones aeronáuticas mediante remaches ciegos.

Sobredimensionamiento que provoca los siguientes efectos negativos:

- Aumento del número de remaches.
 - Aumento del peso de las uniones resultantes.
 - Aumento del peso total de la aeronave y su consumo.
 - Aumento de los tiempos de fabricación.
 - Aumento de los costes de fabricación.
- Limitación en el control de calidad de la instalación del remache, debido precisamente a no acceder a la cara ciega de la unión. Los controles de calidad se llevan a cabo en la cara vista exclusivamente, de forma que no es posible garantizar la correcta instalación de los remaches ciegos.
 - Planes de mantenimiento sobredimensionados derivados de la incapacidad de garantizar la correcta instalación de los remaches ciegos.

A pesar de las debilidades expuestas, las posibilidades que ofrece la unión mediante remaches ciegos la convierten en la mejor solución para multitud de uniones aeronáuticas.

Por otra parte, es innegable que a medida que avanza el conocimiento y la tecnología asociada al proceso, la unión mediante remaches ciegos está cada vez más extendida en las aplicaciones aeronáuticas, habiendo sido precisamente su aplicación en la industria aeronáutica uno de los principales motivos para su desarrollo y optimización.

1.2.4. Repercusión de las uniones mediante remaches ciegos en la industria aeronáutica

Los datos a continuación se ofrecen con el objetivo de ilustrar la importancia y la aplicación que actualmente tiene la unión mediante remaches ciegos en la industria aeronáutica:

- Una única ala de un A380 tiene instalados en torno a 180.000 remaches [Rexroth BG].
- Las alas de un A380 contienen en torno a 750.000 uniones mecánicas [TheGuardian 2006].
- Un avión comercial requiere la instalación de en torno a 1 500 000 – 3 000 000 remaches [Campbell 2006].

La gran demanda de soluciones para uniones remachadas en la industria aeronáutica ha provocado el diseño de remaches con fines exclusivamente aeronáuticos, diseñados y optimizados para sus aplicaciones particulares, incluso, para constructores en exclusiva.

1.2.5. Datos reales de remaches ciegos: remaches tipo ABS0257

El presente trabajo se centra en remaches ciegos tipo ABS0257 (también designados como MBF2113). Se trata de remaches ciegos en dos versiones: remaches adaptables a remachadoras manuales y remaches para cabezales de remachado automático. La diferencia entre ambos reside únicamente en la forma de amarre del remache en la remachadora, siendo la parte funcional idéntica entre ambos.

Dentro de la familia de remaches ABS0257 existen diferentes tamaños, designados mediante dos magnitudes: su diámetro (al que se denomina ‘guión’) y el espesor nominal de la unión (al que se denomina ‘grip’). De esta forma, un remache de guión 6 y grip 350 se designa como ‘ABS0257-6-350’.

Las figuras Figura 1.2.11 a Figura 1.2.13 muestran el plano y características de los remaches ABS0257. Los materiales que forman cada componente de los remaches ciegos ABS0257 se detallan en la Tabla 1.2.1. Puede observarse la complejidad del remache ABS0257, optimizado para uniones de CFRP, tanto en su diseño como en la combinación de los materiales que componen sus partes.

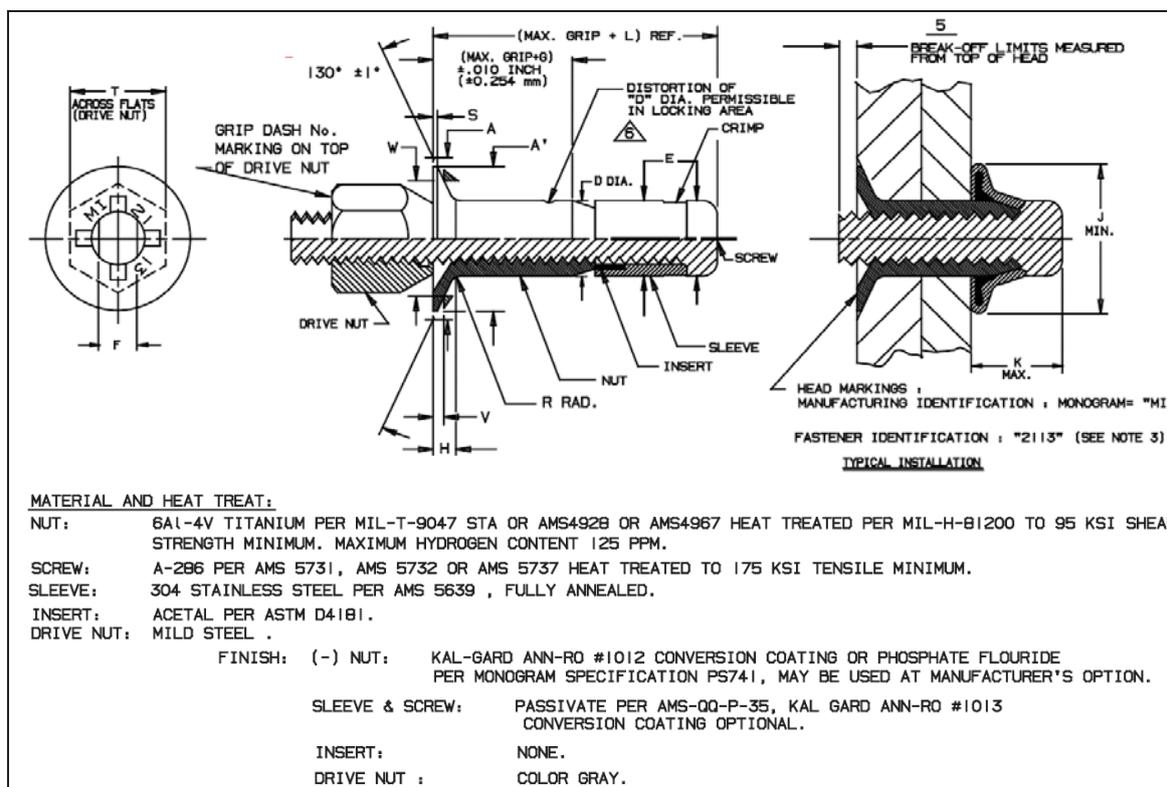


Figura 1.2.11. Características de los remaches ABS0257 [Monogram 2019].

TABLE I

PART NUMBER	A DIA. REF.		A' DIA. MIN.		D DIA.		E DIA. MAX.		F WRENCH FLATS		G REF.		H REF.		L REF.		R RAD. MAX.		S MAX.		T ACROSS HEX. REF.	
	INCH	mm	INCH	mm	INCH	mm	INCH	mm	INCH	mm	INCH	mm	INCH	mm	INCH	mm	INCH	mm	INCH	mm	INCH	mm
MBF2113-5-()	.332 .325	8.43 8.25	.296	7.52	.1645 .1625	4.178 4.126	.1640	4.166	.085 .080	2.16 2.03	.017	0.43	.039	0.99	.512	13.00	.030	0.76	.009	0.229	.375	9.52
MBF2113-6-()	.365 .378	9.28 9.60	.342	8.69	.1965 .1965	5.042 4.991	.1985	5.042	.113 .108	2.87 2.74	.027	0.68	.043	1.09	.575	14.61	.030	0.76	.011	0.279	.375	9.52
MBF2113-7-()	.416 .409	10.57 10.39	.373	9.47	.2275 .2268	5.778 5.728	.2275	5.778	.121 .116	3.07 2.95	.035	0.89	.043	1.09	.635	16.13	.030	0.76	.011	0.279	.375	9.52
MBF2113-8-()	.507 .499	12.89 12.67	.463	11.76	.2595 .2575	6.591 6.541	.2595	6.591	.135 .130	3.43 3.30	.055	1.40	.057	1.45	.700	17.78	.030	0.76	.011	0.279	.375	9.52
MBF2113-9-()	.538 .530	13.66 13.46	.494	12.55	.2895 .2875	7.353 7.303	.2895	7.353	.152 .147	3.86 3.73	.065	1.65	.057	1.45	.815	20.70	.030	0.76	.011	0.279	.500	12.70
MBF2113-10-()	.635 .626	16.13 15.90	.577	14.66	.3115 .3095	7.912 7.861	.3110	7.899	.152 .147	3.86 3.73	.070	1.78	.075	1.90	.892	22.66	.040	1.02	.014	0.356	.500	12.70
MBF2113-11-()	.666 .657	16.92 16.69	.608	15.44	.3435 .3415	8.725 8.674	.3433	8.720	.185 .180	4.70 4.57	.075	1.90	.074	1.88	.941	23.90	.040	1.02	.015	0.381	.500	12.70
MBF2113-12-()	.762 .752	19.35 19.10	.696	17.68	.3745 .3725	9.512 9.462	.3740	9.500	.185 .180	4.70 4.57	.080	2.03	.089	2.26	1.090	27.69	.040	1.02	.016	0.406	.500	12.70

Figura 1.2.12. Dimensiones de los remaches ABS0257 [Monogram 2019].

TABLE I (CONT)

PART NUMBER	MINIMUM AVAILABLE GRIP DASH NO.	INSTALLED DIMENSIONS						MECHANICAL PROPERTIES											
		RECOMMENDED HOLE SIZE		J DIA. MIN.		K MAX.		BREAK-OFF LIMITS (MIN.)		TENSILE STRUCTURAL FAILURE (MIN.)		DOUBLE SHEAR MIN.		LOCKING TORQUE MIN.		V GAGE PROT.		W GAGE DIA.	
		INCH	mm	INCH	mm	INCH	mm	INCH	mm	LBS.	N	LBS.	N	IN-LBS	Nm	INCH	mm	INCH	mm
MBF2113-5-()	-100	.188 .185	4.27 4.19	.250	6.35	.300	7.62	+.103 -0.000	+2.62 +0.00	900	4000	3150	14010	1.0	0.113	.0115 .0095	0.292 0.241	.2832 .2650	7.193 7.188
MBF2113-6-()	-150	.202 .199	5.13 5.05	.300	7.62	.350	8.89	+.103 -0.000	+2.62 -0.00	1400	6230	4600	20460	1.5	0.170	.0140 .0114	0.356 0.289	.3272 3.270	8.311 8.306
MBF2113-7-()	-150	.231 .228	5.88 5.79	.350	8.89	.400	10.16	+.103 -0.000	+2.62 -0.00	1800	7120	6050	26910	2.0	0.226	.0202 .0176	0.513 0.447	.3315 3.313	8.420 8.415
MBF2113-8-()	-150	.263 .260	6.68 6.60	.400	10.16	.450	11.43	+.103 -0.000	+2.62 -0.00	2100	9340	7900	35140	2.5	0.282	.0180 .0151	0.457 0.384	.4320 4.318	10.973 10.968
MBF2113-9-()	-150	.293 .290	7.44 7.37	.450	11.43	.500	12.70	+.103 -0.000	+2.62 -0.00	2600	11565	9900	43590	3.0	0.339	.0247 .0224	0.627 0.569	.4320 4.318	10.973 10.968
MBF2113-10-()	-200	.315 .312	8.00 7.92	.475	12.06	.550	13.97	+.103 -0.000	+2.62 -0.00	3600	16010	11350	50460	3.5	0.400	.0227 .0201	0.577 0.511	.5389 5.365	13.688 13.678
MBF2113-11-()	-200	.347 .344	8.81 8.74	.525	13.33	.575	14.60	+.103 -0.000	+2.62 -0.00	4400	19570	13850	61600	4.0	0.452	.0302 .0276	0.767 0.701	.5389 5.365	13.688 13.678
MBF2113-12-()	-250	.378 .375	9.60 9.52	.575	14.60	.625	15.87	+.103 -0.000	+2.62 -0.00	5000	22240	16450	73170	4.0	0.452	.0255 .0228	0.648 0.579	.6532 6.528	16.591 16.581

Figura 1.2.13. Dimensiones de los remaches ABS0257 una vez instalados y sus propiedades mecánicas [Monogram 2019].

Nótese la estrecha tolerancia en el diámetro del agujero necesario, de en torno a 80µm en diámetros de 4.20mm, asociada al fenómeno descrito en la etapa C de la sección 1.1.1.1 *Análisis de incertidumbre en la fabricación de las uniones remachadas.*

Parte	Designación plano	Material y tratamiento térmico
Cuerpo	Nut	Ti-6Al-4V según MIL-T-9047 STA o AMS4967 con tratamiento térmico según MIL-H81200 hasta 95ksi mínimo. Máximo contenido en hidrógeno 125ppm
Vástago	Screw	A-296 según AMS5731, AMS5732 o AMS5737 con tratamiento térmico hasta 175ksi mínimo
Forro	Sleeve	Acero inoxidable 304 según AMS5639 recocido
Inserto	Insert	Acetal según ASTM D4181

Tabla 1.2.1. Materiales y tratamientos térmicos de los componentes de un remache ABS0257 [Monogram 2019].

1.3. Transcendencia del control de calidad de la instalación de remaches ciegos como estrategia de mitigación de incertidumbre, sobredimensionamiento y sobrecostes.

El control de calidad en la instalación de remaches ciegos surge como estrategia de limitación de incertidumbre, con el objetivo de minimizar los sobrecostes asociados a la incertidumbre del proceso, dada la necesidad de sobredimensionar las uniones para garantizar la seguridad de las mismas.

Es evidente que un método de clasificación capaz de identificar la correcta o incorrecta instalación de los remaches permitiría reducir los coeficientes de seguridad necesarios actualmente. En consecuencia, permitiría reducir asimismo el sobredimensionamiento, el peso, y el coste de la unión; siempre y cuando el coste del control de calidad sea inferior a ellos.

No obstante, la imposibilidad de acceder a la cara ciega de la unión en uniones remachadas no ha permitido desarrollar un método de control de calidad suficientemente apto como para su aplicación en la industria aeronáutica para los remaches ABS0257.

La Figura 1.3.1 muestra un remache ABS0257 una vez completada su instalación, donde las cotas J y K indican cotas que debe cumplir el remache tras su instalación. La cota J marca el diámetro mínimo de la cabeza de cierre, y la cota K marca la altura máxima de la cabeza de cierre permitida.

La interpretación de las cotas J y K es la siguiente: el remache debe sufrir un grado de deformación suficiente para asegurar los esfuerzos de unión. Por tanto, el extremo de cierre del remache debe avanzar (debido a la deformación) hacia la cara ciega de la unión. Al avanzar, la funda se irá deformando en forma de campana y la longitud de la cabeza de cierre irá disminuyendo. Si no ocurre una deformación mínima, bien la longitud será demasiado larga, o bien el diámetro no habrá alcanzado un tamaño mínimo.

Sin embargo, cumplir con estas dos cotas J y K no asegura la correcta instalación de un remache. Si la deformación fuera excesiva, es decir, si la cabeza de cierre quedara aplastada contra la cara ciega, seguiría cumpliéndose el criterio de las cotas J y K. Por tanto, se debe verificar también la cota designada N, medida entre la superficie de ruptura del pin y superficie plana de la cara vista del remache. En caso de aplastamiento de la cabeza de cierre, caso en que la cabeza de cierre habría avanzado demasiado, el punto de rotura del pin en la cara vista sobresaldrá en exceso. Por tanto, la cota N limita la longitud del pin tras la rotura en la cara vista.

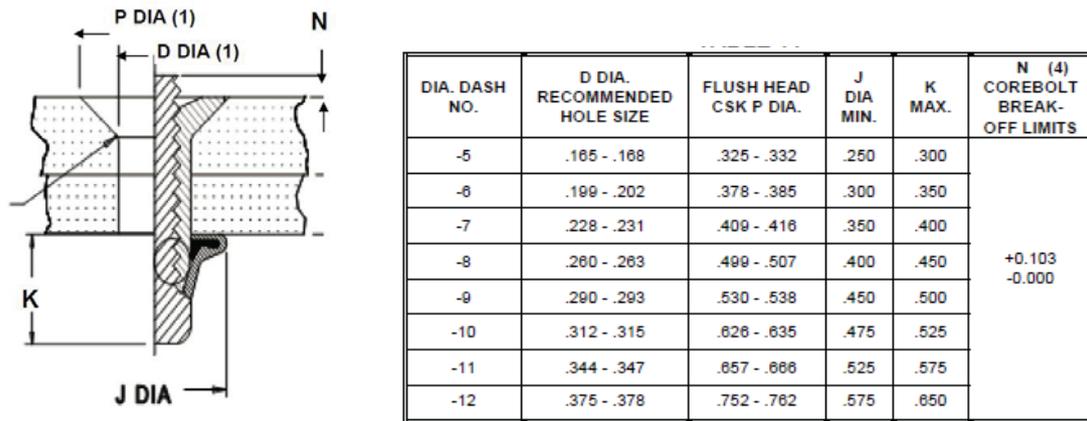


Figura 1.3.1. Criterios para el control de calidad de instalación de remaches ABS0257 [Monogram 2013].

Actualmente, los controles dimensionales se limitan a analizar la longitud de rotura del pin (cota N), y la altura de la cabeza vista del remache respecto a superficie vista del elemento de unión (cota n), cota que debe estar controlada para cumplir con requisitos de aerodinámica. Para el A380, la cota n debe medir entre 0-0.2 mm, y entre -0.075 - +0.075 para los A330-A340.

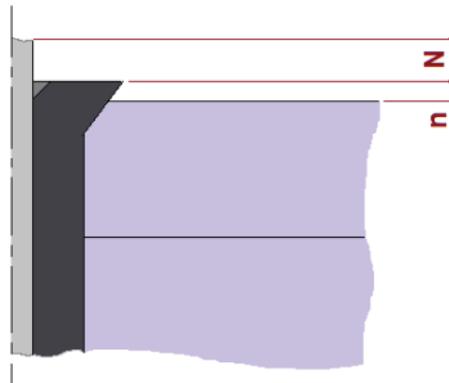


Figura 1.3.2. Cotas de control de calidad actualmente.

Los métodos de verificación de las cotas N y n más extendidos son, por una parte, el control manual mediante calas y galgas específicas [Monogram 2013], o bien mediante métodos basados en visión artificial, de interés especial para sistemas automatizados. La Figura 1.3.3 muestra ejemplos de calas manuales (izquierda), así como la reconstrucción 3D de la cabeza vista de un remache mediante un método de control de calidad basado en visión artificial. En este caso, el método consiste en la proyección de patrones de luz conocidos sobre la cabeza del remache, adquisición de los patrones deformados proyectados sobre las superficies reales, y la obtención de las superficies reales a partir de los patrones deformados.

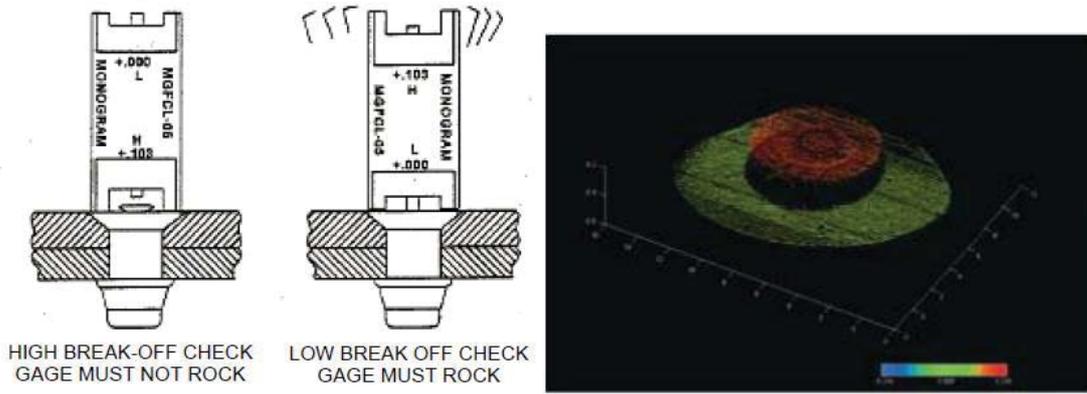


Figura 1.3.3. Izda: Control de calidad con calas manuales [Monogram 2013]. Dcha: Reconstrucción de la cara vista de unión remachada mediante visión artificial [Fraunhofer 2006].

Aunque el control de calidad de las cotas en la cara vista permite detectar los remaches correctamente instalados cuyos fallos sean detectables desde la cara vista, no es suficiente para garantizar la correcta instalación de los remaches. La Figura 1.3.4 muestra un listado de defectos no detectables desde la cara vista.

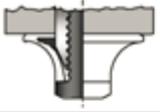
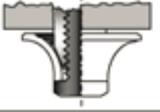
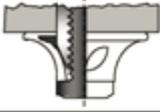
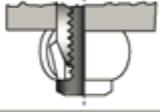
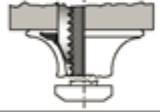
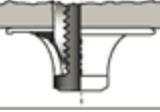
	Correct installation	—
	Sleeve not in contact with the structure (loose joint)	Unacceptable
	Split or cracked sleeve	Unacceptable
	"buckled" sleeve	Unacceptable
	Blind head failure	Unacceptable
	Nut head failure	Unacceptable
	Flared sleeve	Unacceptable if limits in Tables 4, 5 and 6 are not accomplished

Figura 1.3.4. Tipos de fallo no detectables desde la cara vista de la unión [Airbus 2013b].

En consecuencia, estos defectos no son detectables en la actualidad, y por tanto permanecen en las aeronaves sin ser repuestos ni eliminados.

En relación al control de calidad de la instalación de remaches, existen varias patentes que aclaman su idoneidad para la verificación de la instalación de los remaches ciegos.

Las patentes referentes a la determinación de la correcta o incorrecta instalación de remaches (ya sean ciegos o no) recogen métodos que contrastan las señales temporales, o valores puntuales de las señales, frente a valores de referencia. En general, se centran en el análisis de señales de dos magnitudes:

- Esfuerzo de remachado: ya sea directamente la señal de fuerza ejercida sobre el remache, par de un motor, presión hidráulica o neumática, deformación de algún elemento sensible a la carga axial del remache, u otros.
- Desplazamiento durante el remachado: desplazamiento de la cabeza del remache, ángulo girado por el motor, integración de la velocidad lineal o de giro, u otros.

La Tabla 1.3.1 describe un listado de patentes que claman métodos para la clasificación de remaches basándose en la monitorización del proceso. Ninguna de las patentes hace referencia a tasas de acierto, tasas de falsos positivos o negativos, ni fiabilidad de los métodos. Actualmente, ninguna de las patentes es aplicable para clasificación de remaches ABS0257. A continuación se describen 3 de ellas a modo de ejemplo:

i) La patente *US5661887 BLIND RIVET SET VERIFICATION SYSTEM AND METHOD* [Byrne 1997] clama por un sistema para verificar la correcta instalación de remaches ciegos. Se propone un mandrino que incorpora sensores capaces de captar el desplazamiento axial del pistón y la presión del fluido hidráulico aplicado al pistón durante el proceso de remache. A partir de la señal de desplazamiento se calcula la velocidad del pistón y se representa la velocidad así como la presión respecto al desplazamiento (véase la Figura 1.3.5). El análisis de las dichas señales permite detectar los remaches que están mal puestos.

Un algoritmo detecta el punto de ruptura de remaches, que se corresponde con el punto de velocidad máxima y la comparativa entre la presión máxima alcanzada en el punto de ruptura y el desplazamiento total del pistón frente a valores de referencia de remaches colocados correctamente permiten detectar los remaches mal colocados, de acuerdo a la patente.

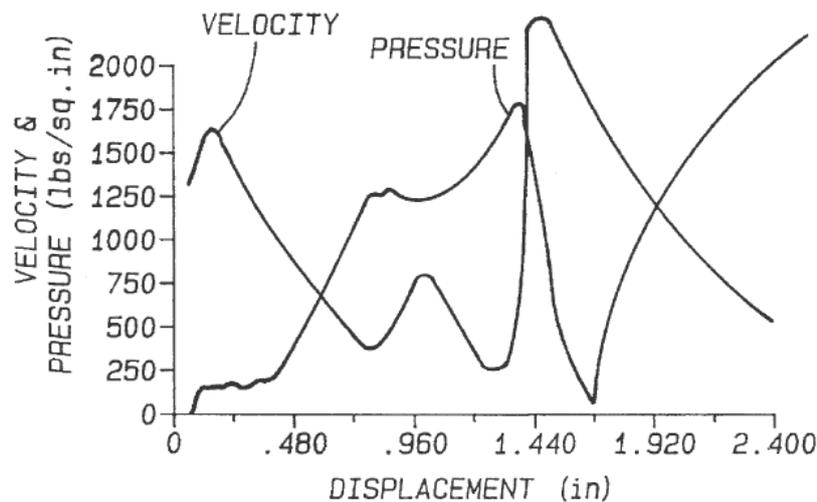


Figura 1.3.5. Señales de velocidad y de presión respecto al desplazamiento [Byrne 1997].

ii) La patente *US0191120 METHOD AND APPARATUS FOR MONITORING BLIND FASTENERS SETTINGS* [Weeks 2006], presenta un cabezal de remachado que capta una señal eléctrica relacionada con la carga aplicada –la presión– sobre el remache durante la inserción del mismo. El método presentado basa la detección de la correcta o no colocación de un remache en una comparativa de la evolución de la carga sobre el remache con respecto al tiempo de inserción, comparada con una señal de referencia. La Figura 1.3.6 ilustra una señal temporal de presión como las obtenidas mediante el cabezal en cuestión. En resumen, se puede afirmar que el método presentado se basa en la comparación de una función tiempo-carga patrón con la función tiempo-carga capturada durante el proceso.

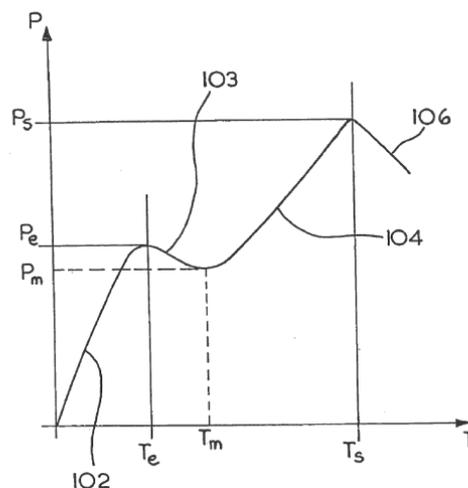


Figura 1.3.6. Curva de carga respecto al tiempo [Weeks 2006].

iii) La patente *US7313851 METHOD FOR MONITORING THE INSTALLATION OF BLIND RIVET* [Wang 2008] presenta un cabezal de remachado de control que permite medir la carga axial sobre el remache y el desplazamiento axial.

Para medir dichas magnitudes se usan dos transductores. También se puede afirmar que este método se basa en la comparación de una función tiempo-carga/ tiempo-desplazamiento predefinido con la función tiempo-carga/tiempo-desplazamiento capturada durante el proceso. Por medio de este método de comparación se clasifican los remaches ciegos como correctamente o incorrectamente instalados.

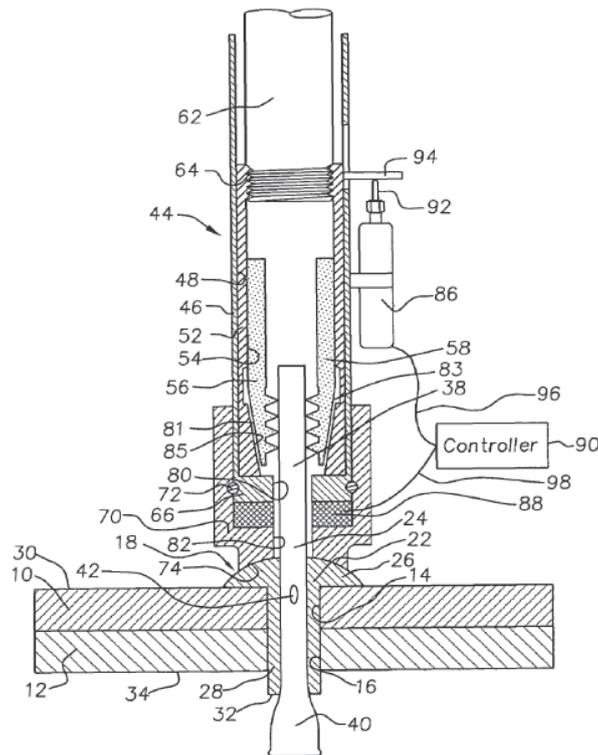


Figura 1.3.7. Herramienta y sistema de control para instalar un remache [Wang 2008].

Por otra parte, tanto en [Saygin 2010] como en [Mohan 2008] se analizó la capacidad de identificar el grip del remache instalado y la desviación respecto al grip nominal para la unión correspondiente respectivamente, para uniones atornilladas y para uniones mediante remaches pull-type respectivamente. En ambos casos la identificación se lleva a cabo mediante el análisis de las señales esfuerzo (par y deformación medida en la herramienta respectivamente) – desplazamiento (ángulo y desplazamiento medido en la herramienta respectivamente), basándose en un método de clasificación obtenido basándose en MTS (Mahalanobis-Taguchi Strategy). En ambos casos se obtuvo un método de identificación de grip satisfactorio aunque requiere de una calibración previa de cada unión.

Número de patente (fecha de publicación)	Título	Monitorización del proceso según las señales de:	Valores de evaluación	Principio de evaluación
US20060191120A1 (31-Ago-2006)	Method and apparatus for monitoring blind fastener setting	1. Señal relacionada con la fuerza	Tiempos de inicio y rotura de remache	Diferencia de tiempos
US005666710A (16-Sep-1997)	Blind rivet setting system and method for setting a blind rivet the verifying the correctness of the set	1. Fuerza 2. Desplazamiento	Energía total del proceso	Integración de la fuerza respecto al desplazamiento
US7313851B2 (01-Ene-2008)	Method for monitoring the installation of blind rivets	1. Fuerza 2. Desplazamiento	Valores instantáneos	Contraste contra curvas patrón
WO2005097375 (20-Oct-2005)	A rivet monitoring system	1. Proporcional a la carga (deformación, presión...)	Valores instantaneous	Contraste contra curva patrón
US20080250832A1 (16-Oct-2008)	Dynamic verification method for a riveting process with blind rivets carried out with an automatic riveting apparatus, and verifying device for carrying out the verification	1. Desplazamiento 2. Fuerza	Valores iniciales, finales, y al menos un intermedio	Contraste contra curva patrón
US005661887A (02-Sep-1997)	Blind rivet set verification system and method	1. Presión 2. Desplazamiento	Presión en la rotura	Velocidad como derivada del desplazamiento; punto de rotura como punto de máxima velocidad
WO2007028210A1 (15-Mar-2007)	Method for attaining a predetermined clamping force in threaded joints	1. Par 2. Ángulo	Esfuerzo de unión	Obtiene el esfuerzo de unión tras aplicar un ciclo de histéresis completo de carga-descarga-carga
WO2007301760A1 (22-Mar-2007)	Monitoring system for fastener placing tool	1. Fuerza 2. Desplazamiento (aparato sin contacto)	Valores instantaneous	Contraste contra curva patrón

Tabla 1.3.1. Resumen de patentes para la clasificación de remaches basadas en la monitorización del proceso de remachado.

1.4. Objetivos del trabajo

El presente trabajo de investigación pretende desarrollar un método de inspección no destructivo que cumpla con los siguientes condicionantes derivados de las necesidades reales en la producción aeronáutica:

- ser válido para remaches del tipo ABS0257.
- ser válido para uniones de material compuesto de fibra de carbono de dos componentes, CFRP-CFRP.
- conocer el estado del remache tras el afeitado de los pines, ya que este proceso afecta al estado del remache.
- durar en torno a 1-2 segundos por remache.
- es deseable que tenga una adaptación para su aplicación en procesos de remachado manual.
- no introducir cambios perjudiciales en el proceso de remachado actual.
- sin necesidad de acceder a la cabeza de cierre de los remaches.
- sin modificar ninguna propiedad del remache instalado o del elemento.

1.5. Resumen del capítulo

Las estructuras aeronáuticas están formadas por subconjuntos que atienden a cumplir con diferentes funciones y por tanto están diseñados y fabricados en variedad de formas y materiales. Las uniones mediante remaches ciegos son una solución especialmente apta para la unión de materiales metálicos – CFRP o para uniones CFRP – CFRP.

En la actualidad el proceso de remachado y los propios remaches son avanzados y complejos, con altos grados de automatización. Sin embargo, dada la naturaleza ciega de las uniones, no es posible verificar mediante controles de calidad la correcta instalación de los remaches, a pesar de su importancia estructural.

Aunque existen multitud de patentes que claman por un método para la clasificación de la instalación de los remaches, ninguno de ellos es de aplicación en la actualidad a los remaches ciegos tipo ABS0257. En consecuencia se penaliza el tamaño, coste, peso y tiempo de fabricación de las uniones aeronáuticas mediante remaches ciegos.

El presente trabajo de investigación ha tenido como objetivo desarrollar un método de inspección no destructiva que permita conocer la correcta o incorrecta instalación de remaches ciegos tipo ABS0257 en uniones CFRP-CFRP.

2. Análisis del estado del arte de tecnologías de inspección no destructivos en elementos de unión y otros

2.1. Introducción

Existen multitud de métodos, técnicas y tecnologías destinadas al ensayo no destructivo o inspección no destructiva, siendo comúnmente más efectiva la combinación de varias técnicas para la detección de defectos [Dwivedi 2018]. Puede consultarse una descripción general de distintos métodos de inspección no destructivos en [Groves 2018]. Se han identificado 4 tecnologías base con potencial capacidad sobre las que basar el desarrollo de un sistema no destructivo de inspección de la calidad de la instalación de remaches ciegos.

Estas 4 tecnologías base son: i) shearografía, ii) termografía activa, iii) métodos basados en ultrasonidos, y iv) métodos basados en respuesta en frecuencia.

2.2. Tecnología base 01: Shearografía

2.2.1. Base teórica

La shearografía es una técnica de interferometría óptica que ha probado ser válida para ensayos no destructivos, a través de la medida y del posterior análisis del campo de deformaciones de la superficie inspeccionada (evalúa los desplazamientos y las derivadas de los desplazamientos). La Figura 2.2.1 muestra un esquema de shearografía digital (DISH¹).

¹ Existen 3 métodos de grabación distintos de shearografía. Además de la DISH está la grabación fotográfica y la termoplástica que requieren mayor inversión de tiempo que la DISH. [Hung 2009].

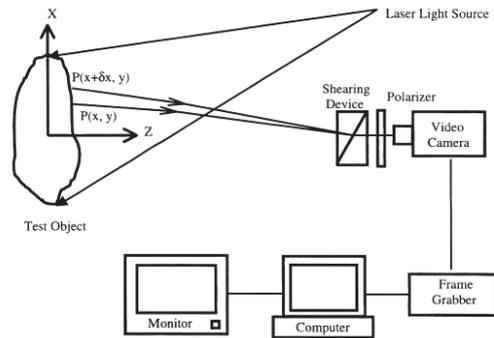


Figura 2.2.1. Esquema de shearografía digital [Hung 1999].

El objeto a analizar se ilumina con una luz láser emitida desde una fuente y la imagen es capturada con una cámara que está conectada a un computador que permite grabar y procesar la imagen. La cámara es generalmente un sensor de imagen CCD², una lente y un dispositivo constituido por un prisma doblemente refractante y un polarizador. El prisma produce dos imágenes desplazadas lateralmente de una misma superficie. O lo que es lo mismo, en cada punto de la imagen medida, se recibe luz procedente de dos puntos desplazados lateralmente del objeto real.

La shearografía mide directamente la derivada primera de la deformación de la superficie. Este método ofrece información directa de las deformaciones debido a la relación directa entre la deformación de la superficie con los desplazamientos en el interior del material [Kittel 2004], es casi insensible a perturbaciones como las vibraciones [Steinchen 1999, [Steinchen 1995] y por lo tanto es un método apto como técnica de inspección no destructiva. La Figura 2.2.2 muestra una imagen típica de una shearografía sin deformación (izquierda). Cuando el material es sometido a deformación la imagen que se obtiene mediante shearografía se ve alterada, y la diferencia entre ambas imágenes se conoce como imagen shearográfica (derecha).

² CCD (charge-coupled device). Los detectores CCD se basan en el efecto fotoeléctrico que consiste en la emisión de electrones por un material cuando se le ilumina con radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta, en general); por lo tanto es la conversión espontánea dentro de algunos materiales de luz recibida en corriente eléctrica.

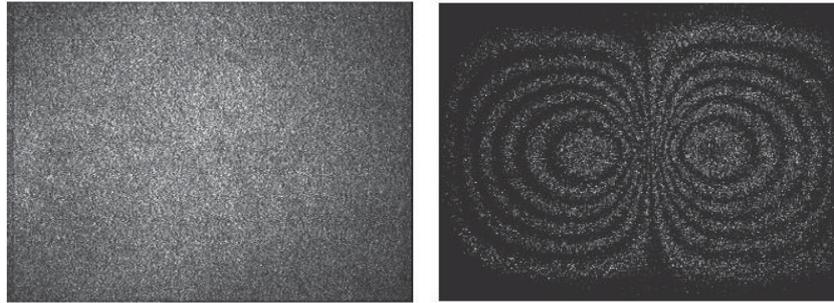


Figura 2.2.2. Izquierda: Imagen original obtenida por la cámara CCD; Derecha: Imagen de shearografía (patrón de interferencia) con deformación debido a una carga aplicada en el centro [Hung 2009].

Las trazas de la imagen shearográfica se pueden describir mediante expresiones matemáticas, lo cual hace posible la interpretación de estas trazas. La Figura 4.10 muestra la diferencia que se obtiene entre las trazas de la imagen sin excitar y de la imagen cuando se aplica una carga. La formulación matemática que realiza el tratamiento de la imagen puede verse en [Hung 2009] [Steinchen 1995] [Hung 1997].

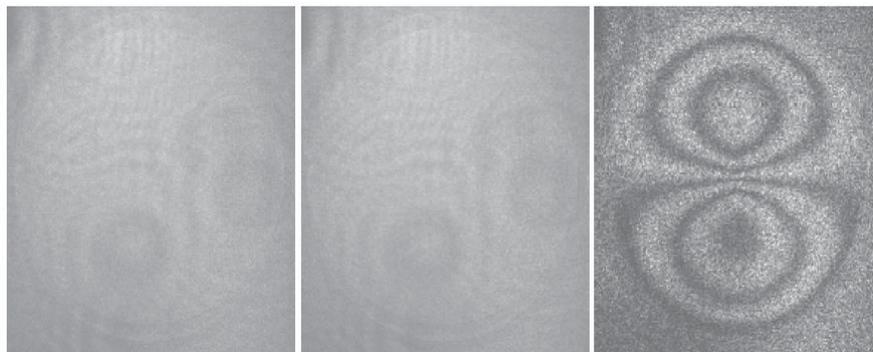


Figura 2.2.3. Izquierda: imagen con superficie de análisis en reposo. Centro: imagen con superficie de análisis excitado. Derecha: Imagen shearográfica, obtenida a partir de las imágenes en reposo y excitada [Hendorfer 2006].

La shearografía permite una rápida detección de defectos materiales metálicos y no metálicos incluyendo materiales compuestos, midiendo las respuestas mecánicas del material bajo excitaciones externas y comparándolas con un estado de referencia (habitualmente, en reposo). Se usa comúnmente durante el diseño y optimización de procesos y productos, control de procesos, inspección tras fabricación, e inspección en servicio, y puede ser utilizado para medir deformaciones axiales estáticas y dinámicas (tensión y compresión), así como tensiones de cortadura, de flexión y de torsión. El tipo general de defectos que pueden detectarse mediante shearografía incluyen delaminación de fibras, deformación bajo cargas, micro-grietas y variación de espesores. El rango de aplicaciones va desde inspección en serie en la línea de producción,

inspecciones en montaje hasta aplicaciones en áreas de mantenimiento y reparación. Es una técnica que da información de tipo cualitativo y que requiere de información adicional para determinar un valor absoluto o cuantitativo de la deformación. La shearografía es utilizada con diferentes técnicas de excitación en variedad de aplicaciones. En [Hung 2004] Hung muestra aplicaciones de éxito de la shearografía como técnica de inspección no destructiva: en la industria de neumáticos (ver Figura 2.2.4), la industria del acero (ver Figura 2.2.5), el área de investigación de materiales (ver Figura 2.2.6) y la industria de la construcción (ver Figura 2.2.7).



Figura 2.2.4. Defectos a lo largo de un refuerzo de acero de una rueda de [Hung 2004].

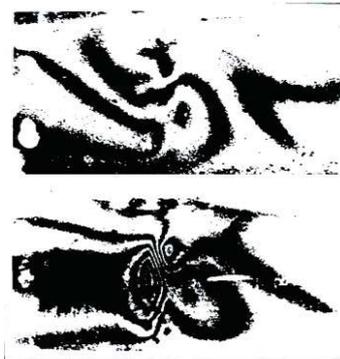


Figura 2.2.5. Evaluación de la integridad de tubos de acero soldados. Imagen superior una soldadura correcta. En la imagen inferior una mala soldadura. La soldadura defectuosa se caracteriza por una deformación excesiva que se visualiza por una imagen con trazas muy densas [Hung 2004].

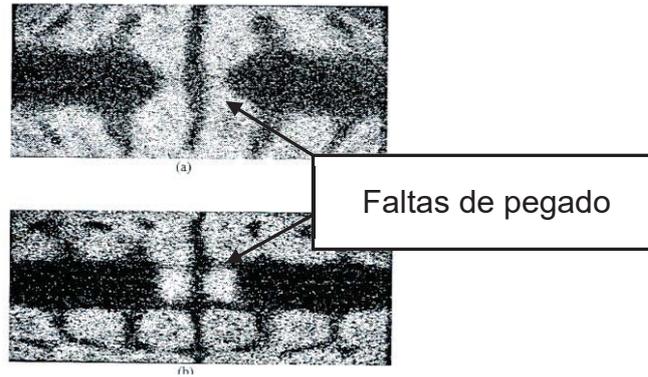


Figura 2.2.6. Faltas de pegado en una estructura unida mediante adhesivos. La estructura estaría unida a lo largo de la región horizontal central a una estructura rígida. Una región perfectamente pegada debería aparecer en la imagen como un área negra. El ensayo muestra una región despegada en la mitad de la unión adhesiva [Hung 2004].

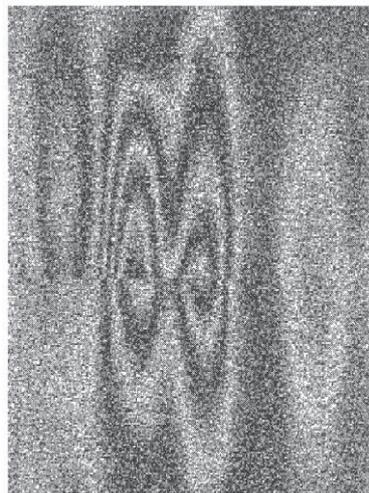


Figura 2.2.7. Imagen shearográfica de una pared de bloques de hormigón. La discontinuidad localizada en la huella muestra una separación entre dos bloques de hormigón [Hung 2004].

2.2.2. Aplicaciones en la industria aeronáutica

La shearografía aplicada a la industria aeronáutica puede ser utilizada en la inspección de los álabes, componentes de protección térmica o cierres. La shearografía permite medir áreas grandes, por lo cual es posible inspeccionar componentes grandes. Este método detecta fallos en los componentes cuando estos producen cambios en la rigidez de la estructura que a su vez implican cambios en la deformación superficial. Como es una técnica muy apta para detectar discontinuidades, permite detectar faltas de pegado, poros, impurezas, etc. Las Figura 2.2.8 y la Figura 2.2.9 muestran defectos por recubrimientos no adheridos en estructuras sándwich de nido de abeja así como impactos o defectos de delaminación en estructuras monolíticas pueden detectarse mediante esta técnica

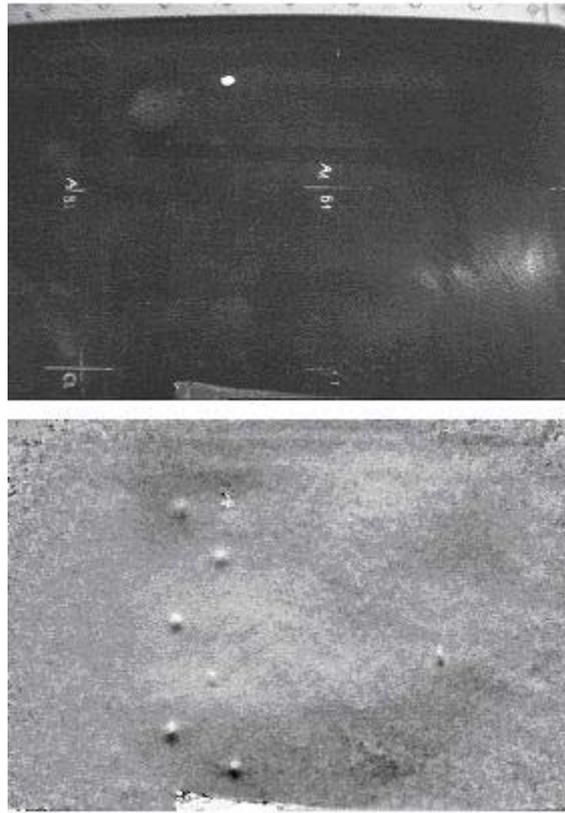


Figura 2.2.8. Recubrimiento con defectos [Mayer 2002].

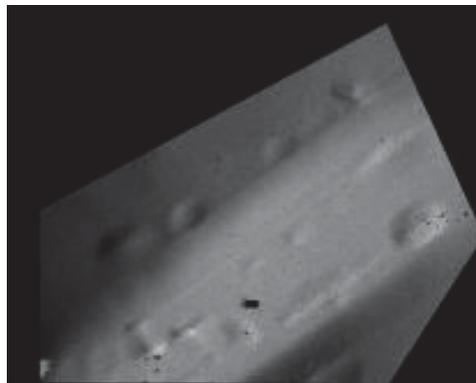


Figura 2.2.9. Defectos de delaminación de capas [Mayer 2002].

La Figura 2.2.10 muestra un ejemplo de aplicación de esta técnica no destructiva a la inspección de una unión remachada en la cual hay un remache que está montado en su posición, pero simplemente ocupando su posición, sin haberle provocado ninguna tensión de apriete, y por lo tanto sin ejercer fuerzas de compresión en la unión [Hung 2004]. El remache suelto ocupa el lugar de más a la derecha de la imagen, y como puede observarse en comparación a los otros dos remaches (centro e izquierda, correctamente instalado, la deformación superficial medida mediante shearografía resalta un comportamiento claramente diferenciado en torno al remache completamente suelto respecto al entorno de los otros dos remaches.

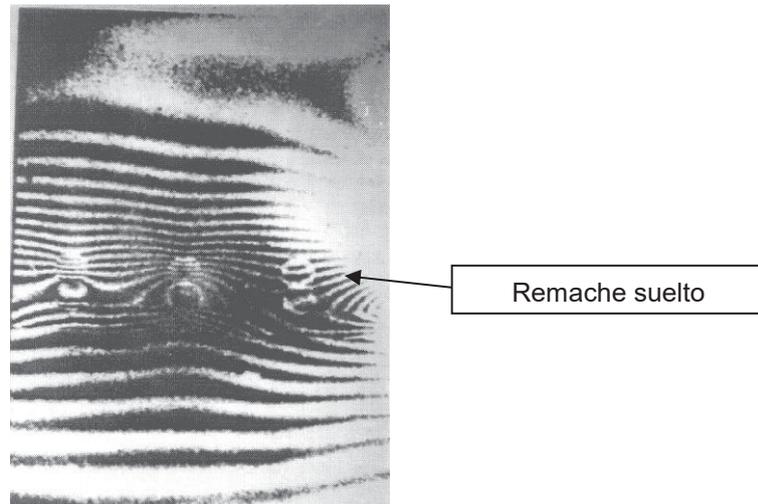


Figura 2.2.10. Las huellas de la imagen revelan un remache suelto en la unión [Hung 2004].

La opinión mayoritaria [Steinchen 1999] [Hung 1999] [Steinchen 1995] [Hung 1997] [Hung 2005] [Ayorinde 2008] evalúa positivamente la shearografía como método de ensayo no destructivo que permite un análisis y observación de toda una superficie sin contacto. La consideran una técnica eficaz para detectar defectos superficiales y sub-superficiales. Además, el movimiento como sólido rígido del objeto a ensayar no causa ni tensiones ni deformaciones, por lo que el método es consistente respecto a este tipo de movimiento y por lo tanto la aplicación del método no requiere dispositivos de aislamiento del elemento que se quiere inspeccionar.

Le et. al utilizaron la shearografía para la inspección de grietas en los agujeros de uniones remachadas [Le 2018]. Tras desarrollar un anillo excitador a medida de la unión, posicionado en torno al remache a inspeccionar, demostraron la capacidad de la shearografía para la detección de una grieta; si bien bajo condiciones de laboratorio tanto en la ejecución de la prueba como en el análisis.

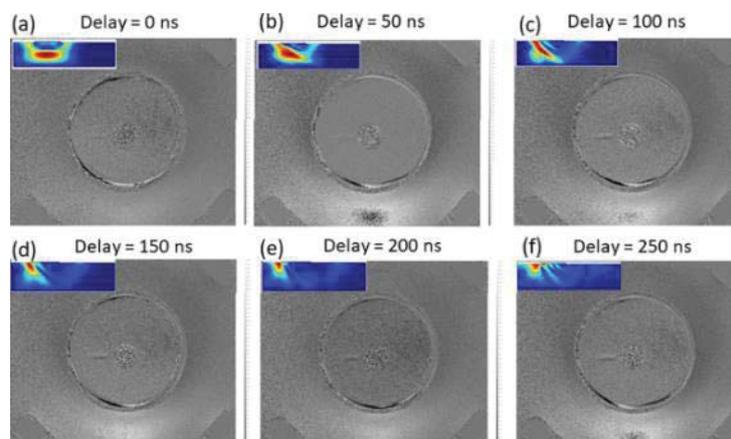


Figura 2.2.11. Imágenes de la unión remachada: la mejor identificación se da a los 100ns [Le 2018].

2.2.3. Potencial de la shearografía para la inspección de remaches instalados incorrectamente

La shearografía ha demostrado tener una altísima sensibilidad para detectar discontinuidades en el comportamiento de grandes superficies. A pesar de ser capaz de inspeccionar grandes áreas, la sensibilidad en la medida del desplazamiento es muy grande, logrando resoluciones muy inferiores a la longitud de onda utilizada en la iluminación del objeto.

Bajo la hipótesis de que un remache colocado incorrectamente provocará deformaciones en la superficie del entorno del remache diferentes a las de un remache correctamente instalado, ver Figura 2.2.12, la shearografía podría otorgar información mediante la que poder clasificar los remaches ciegos como correctamente o incorrectamente instalados.

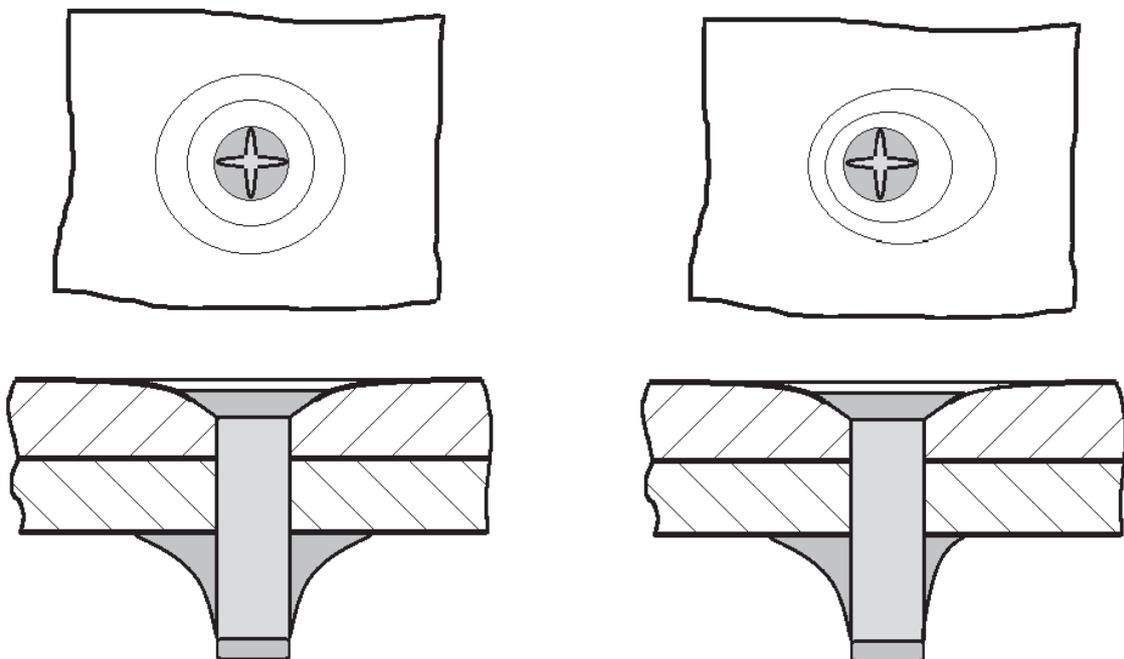


Figura 2.2.12. Hipótesis de deformación superficial heterogénea provocada por la instalación incorrecta de un remache ciego.

No obstante, la inspección por shearografía actualmente requieren la intervención de un inspector cualificado, persona en la que recae la responsabilidad de clasificar las indicaciones observadas mediante shearografía como defectos o no.

En caso de obtener mediante shearografía datos que contengan la información sobre el estado de la instalación del remache, se prevé la necesidad de desarrollar un postprocesado adecuado para la identificación de remaches correctamente o incorrectamente instalados.

2.3. Tecnología base 02: Termografía activa

2.3.1. Base teórica

La termografía infrarroja es una técnica óptica sin contacto que detecta la radiación infrarroja invisible al ojo humano. La termografía infrarroja puede utilizarse para detectar el comportamiento por debajo de la superficie mediante la medición de la distribución de radiación infrarroja, y en su caso, su conversión a una escala de temperaturas.

Las técnicas de inspección por termografía se dividen dos, en función de si se aplica al objeto inspeccionado algún tipo de excitación específica para la inspección. Se clasifica en: i) termografía infrarroja pasiva, y en ii) termografía activa.

La termografía pasiva se emplea en la investigación de materiales que está a temperaturas diferentes (normalmente superiores) a la temperatura ambiente, mientras que la termografía activa requiere una fuente de estimulación térmica externa como lámparas, láser pulsado, transductores ultrasónicos... para inducir un contraste térmico. No existe un método de excitación universal óptimo para inspeccionar cualquier tipo de defecto en cualquier tipo de material; cada aplicación requiere de la adaptación particular del método a sus condiciones particulares.

La termografía infrarroja pasiva tiene una aplicación masiva en la inspección de, por ejemplo, cuadros eléctricos. En caso de ocurrir derivas de tensión, el paso de intensidad provoca ligeros aumentos de temperatura en el material que atraviesan, que son detectados mediante la observación con cámaras infrarrojas. La termografía pasiva es de aplicación en aquellas situaciones en las que la aparición de una excitación es síntoma de fallo o de error.

La termografía activa surge como alternativa para extender las capacidades termográficas a aquellas situaciones en las que los errores no provocan de por sí aumentos o descensos de temperatura. Ha sido empleada con éxito para inspección en muchas aplicaciones usando diferentes técnicas de excitación térmica: pulso transitorio, calentamiento cíclico (ambas posibles con un montaje experimental como el mostrado en la Figura 2.3.1), o mediante excitación vibratoria que produce calentamiento desde el interior del material debido a rozamientos internos del material.

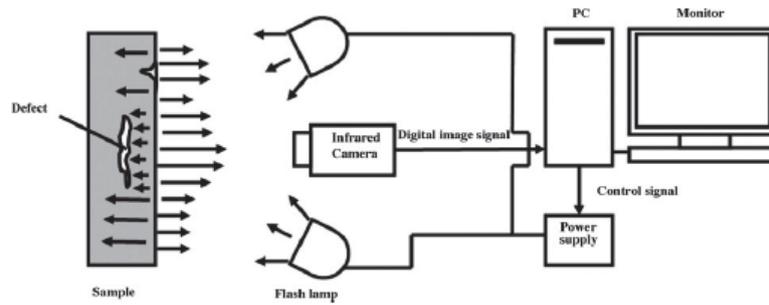


Figura 2.3.1. Esquema de termografía de pulso transitoria [Hung 2009].

En general, la excitación térmica se genera mediante lámparas halógenas situadas frente al objeto a inspeccionar. El calor es absorbido por el objeto y se propaga hacia el interior. En su propagación, el calor puede llegar hasta algún defecto que interfiera en su camino, lo que supone una discontinuidad en la propagación del calor. En el caso mostrado en la Figura 2.3.1, el defecto evita la propagación del calor a través del material provocando un aumento relativo de la temperatura entre la superficie en la zona del defecto y su entorno sin defecto.

De esta forma, las imágenes termográficas permiten estimar la forma, el tamaño y la localización de los defectos. Además, una secuencia de imágenes térmicas dan información de la variación de temperatura con respecto al tiempo, información que puede procesarse para estimar la profundidad de los defectos teniendo en cuenta las propiedades térmicas del material inspeccionado (principalmente el coeficiente de difusión térmica), y teniendo en cuenta el tiempo transcurrido desde la aplicación de la excitación hasta la aparición de los puntos calientes. Se recomienda la consulta de [Shepard 2018] para una profundización en la aplicación de termografía activa para la inspección no destructiva de materiales compuestos.

Cabe destacar que además de los métodos de excitación, las técnicas de postprocesado de los datos obtenidos aumenta el potencial de las técnicas de termografía activa para la detección de defectos.

Por ejemplo, una inspección con excitación térmica cíclica, o pulsada, originará cíclicamente puntos calientes. En general, un análisis en frecuencia de cada punto de las imágenes termográficas produce resultados más sensibles que la observación directa de las imágenes temporales. Incluso, el análisis de las fases de las componentes en frecuencia observada ha demostrado ser más sensible que un análisis en amplitudes para la detección de defectos subsuperficiales.

Mediante termografía activa se pueden identificar defectos bajo la superficie de las estructuras. La Figura 2.3.2 muestra la capacidad de detección de corrosión en una muestra pintada, corrosión no detectable a la vista.

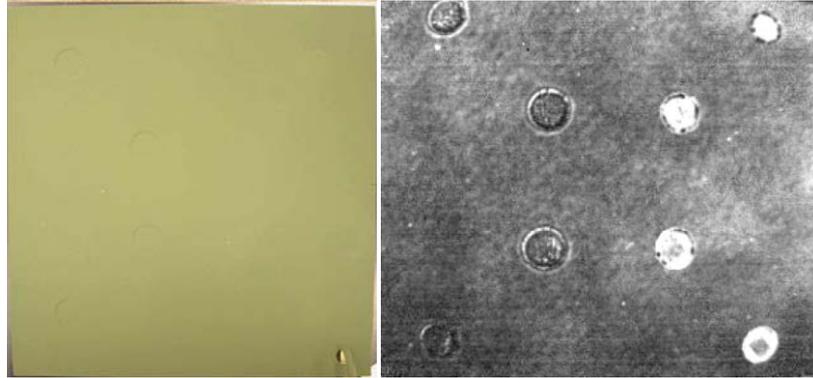


Figura 2.3.2. Izquierda: Muestra pintada con defectos (agujeros) con corrosión y sin corrosión. Derecha: Imagen termográfica postprocesada: los defectos con corrosión se aprecian en blanco, defectos sin corrosión en negro [Collrep 2002].

En la industria aeronáutica este método tiene aplicaciones variadas. A modo de ejemplo, la Figura 2.3.3 muestra un defecto de delaminación en una estructura metálica de nido de abeja, y la Figura 2.3.3 revela entradas de agua en un álabe de nido de abeja de material compuesto.

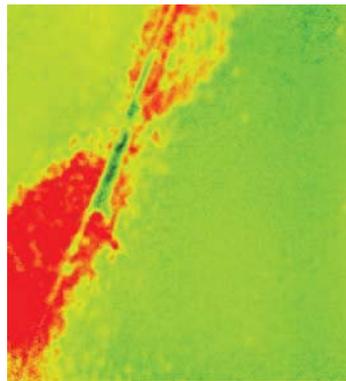


Figura 2.3.3. La zona roja en la izquierda de la imagen termográfica es indicio de delaminación [Collrep 2002].

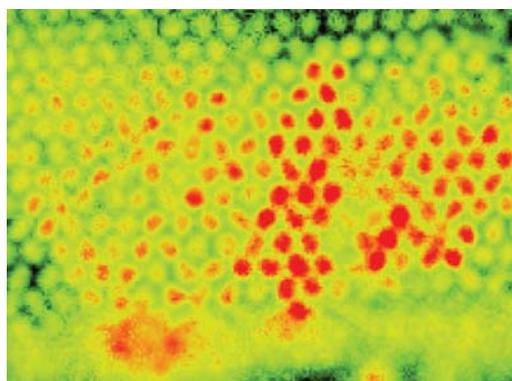


Figura 2.3.3. Imagen termográfica de la superficie de un álabe pintado. Las zonas rojas denotan intrusiones de agua en el corazón del nido de abeja, [Collrep 2002].

Zaiß et. al. valoraron la capacidad de técnicas de termografía activa para detectar defectos en planchas de material compuesto en [Zaiß 2017], concluyendo que se trata de un método apto para inspección de las planchas una vez curadas ya que son aptas para detectar defectos internos (ver por ejemplo la Figura 2.3.4)

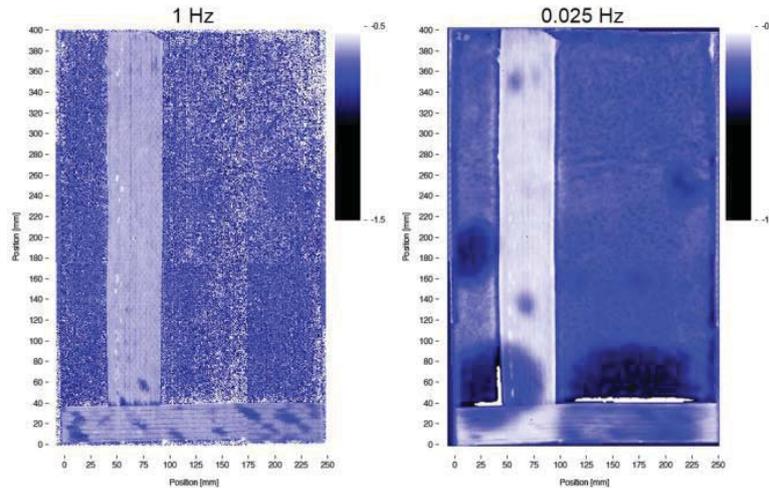


Figura 2.3.4. Evaluación mediante termografía activa de una misma plancha bajo dos frecuencias de excitación diferentes [Zaiß 2017].

[Riegert 2002] estudió la capacidad de la termografía infrarroja activa para la inspección no destructiva de remaches autoperforantes. Los remaches autoperforantes se introducen a presión en los elementos de unión (sin necesidad de agujeros previos, de ahí su nombre), deformándose los propios remaches autoperforantes y los materiales a unir, y resultando en una unión por deformación (ver Figura 2.3.5).



Figura 2.3.5. Ilustración de remache autoperforante y sección de la unión mediante remache autoperforante.

La Figura 2.3.6 muestra secciones de remaches autoperforantes que resultan en una unión correcta de los materiales (izquierda) y en una unión incorrecta (derecha); obtenidas tras seccionar las uniones inspeccionadas mediante termografía.

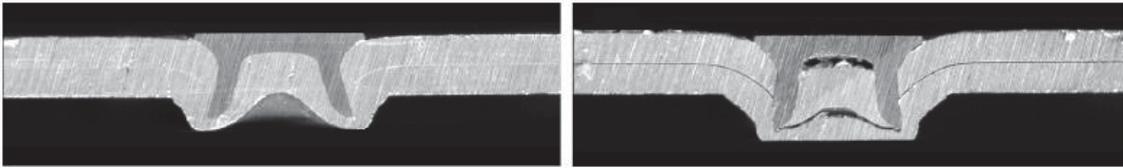


Figura 2.3.6. Secciones de los remaches autopercutores analizados. Izquierda: unión correcta. Derecha: unión incorrecta [Riegert 2002].

Las figuras Figura 2.3.7 y Figura 2.3.8 muestran la capacidad de detectar mediante termografía remaches autopercutores dañados en uniones metal-metal o incluso en uniones CFRP-metal. Los remaches dañados se revelan en ambos tipos de uniones. En el caso de la unión CFRP-Al el remache autopercutor dañado puede detectarse tratando la imagen termográfica en amplitud y en fase, en el caso de unión Al-Al el remache dañado sólo puede detectarse en analizando la fase de las imágenes temporales.

[Riegert 2002] explica esta diferencia de capacidad de detección debido a la diferencia de conductividad del material compuesto y del aluminio, en relación a la velocidad elevada a la que fluye el calor en la unión Al-Al.

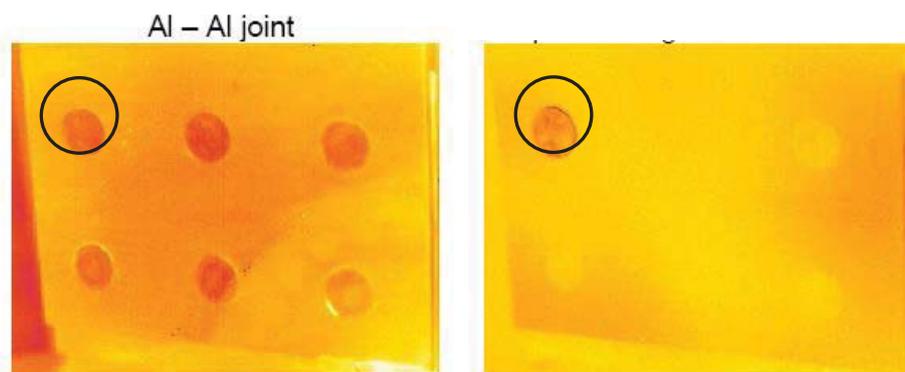


Figura 2.3.7. Remaches en unión Al-Al; Izquierda: Imagen de amplitud, derecha: imagen de fase. El círculo negro muestra el remache autopercutor dañado [Riegert 2002].

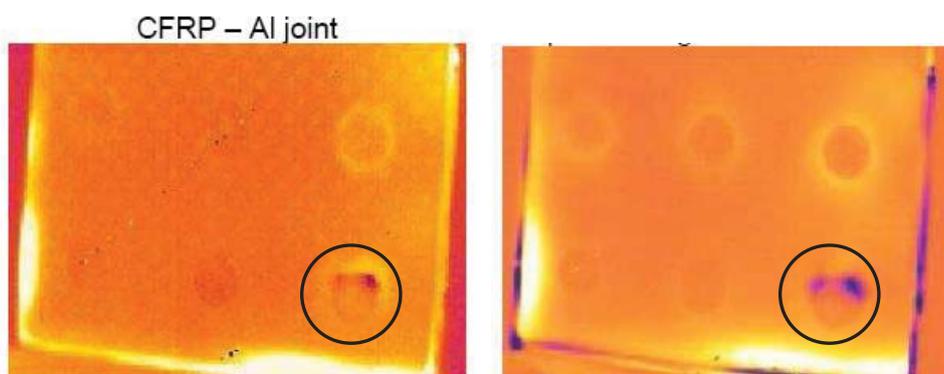


Figura 2.3.8. Remaches en unión CFRP-Al; Izquierda: Imagen en modo amplitud, derecha: imagen en modo fase. El círculo negro muestra el remache autopercutor dañado [Riegert 2002].

La Figura 2.3.9 muestra una serie de imágenes termográficas de una unión metal-metal unidos mediante tornillos con distintos pares de apriete, con par de apriete creciente de izquierda a derecha [Zweschper 2001]. La fila superior muestra las imágenes termográficas que se obtienen tras excitación óptica mediante lámparas halógenas. La fila inferior se ha obtenido tras excitación ultrasónica (excitando la muestra con un transductor ultrasónico, provocando el calentamiento interno del material por rozamientos), en la que se aprecia claramente la pérdida de apriete (Par = 0 Nm).

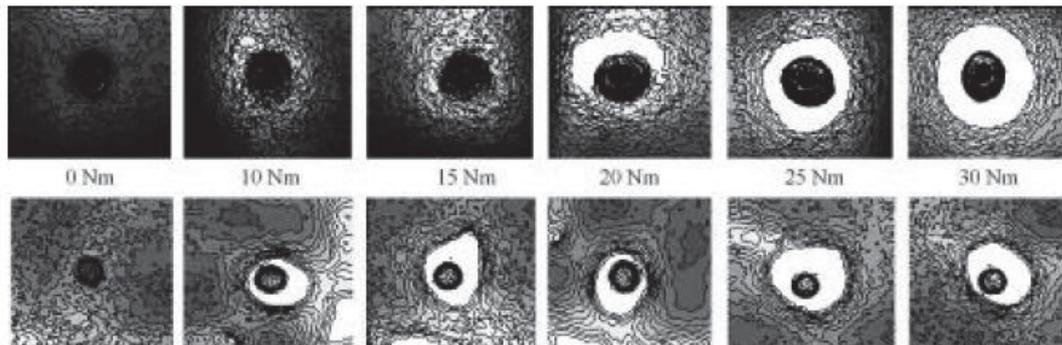


Figura 2.3.9. Imágenes termográficas de uniones metal-metal unidas mediante tornillos con distintos pares de apriete [Zweschper 2001].

Por otra parte, Zweschper también demuestra la capacidad de la termografía activa para detectar excentricidades en el montaje de los tornillos de unión, tal y como muestra la Figura 2.3.10.

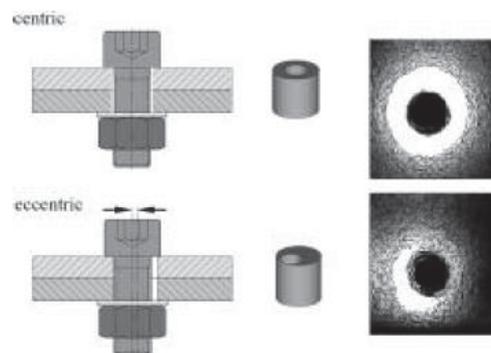


Figura 2.3.10. Excentricidad de la presión superficial de una unión metal-metal atornillada con un par de apriete de 20 Nm [Zweschper 2001].

2.3.2. Potencial de la termografía activa para la inspección de remaches instalados incorrectamente

Aunque este método ofrece resultados fiables, hay que tener en cuenta que las características de los materiales a inspeccionar así como los tipos de defectos posibles determinarán si mediante termografía activa puede desarrollarse un

método capaz de evaluar la correcta o incorrecta instalación de remaches ciegos. Los parámetros fundamentales, de acuerdo con [Avdelidis 2004], son:

- Propiedades térmicas: difusividad térmica, calor específico.
- Propiedades ópticas: emisividad, absorción, reflexión.
- Otras propiedades: densidad, porosidad ...

Bajo la misma hipótesis establecida en el apartado 2.2.3 *Potencial de la shearografía para la inspección de remaches instalados incorrectamente*, ilustrado en la Figura 2.2.12, la termografía activa podría permitir identificar las diferencias existentes en las condiciones a las que está sometida el material CFRP en las inmediaciones de los remaches: debido a diferentes grados de compresión, a diferentes espesores resultantes, a diferentes tensiones de compresión, a variaciones que estas diferencias provocan en su propiedades térmicas, y a otros efectos.

2.4. Tecnología base 03: Métodos basados en ultrasonidos

2.4.1. Base teórica

Las técnicas de ultrasonidos están fuertemente instaladas en la industria (aeronáutica y de todo tipo). El principio básico de las técnicas ultrasónicas consiste en la emisión de un pulso ultrasónico a través del medio a inspeccionar, y la recepción de los ecos de dicho pulso en las superficies que encuentre. Es decir, un transductor genera una sobrepresión de muy corta duración. El pulso se propaga a través del objeto a inspeccionar. En caso de reflexionar contra alguna discontinuidad (una superficie, un cambio de material, un poro, una inclusión, un cambio de densidad, ...) se produce una reflexión del pulso. El estudio de las reflexiones recibidas permite conocer si existen defectos en el objeto a inspeccionar.

A partir de esta base, los métodos de inspección por ultrasonidos, así como las tecnologías asociadas, se han desarrollado hasta alcanzar a día de hoy un alto grado de conocimiento, de capacidades de simulación y de postprocesado de datos, derivando en un alto grado de especialización de los métodos para aplicaciones particulares.

Uno de los principales avances en las técnicas de ultrasonidos lo supuso el paso de análisis con un único transductor a análisis simultáneo con varios transductores (sincronizados en fase), conocido como Phased Array (PA), tal y como muestra la Figura 2.4.1. Las técnicas phased array generan frentes de onda, de dirección variable, permitiendo hacer barridos angulares, acceder a zonas no accesibles mediante transductor único, y dotando de más información

para su posterior análisis mediante técnicas avanzadas. Actualmente, los avances en la capacidad de computación de los ordenadores permiten el desarrollo de técnicas de análisis más complejas, como describen Ali et. al. [Ali 2018] en su desarrollo para la identificación de posición de grietas y de orientación de las mismas.

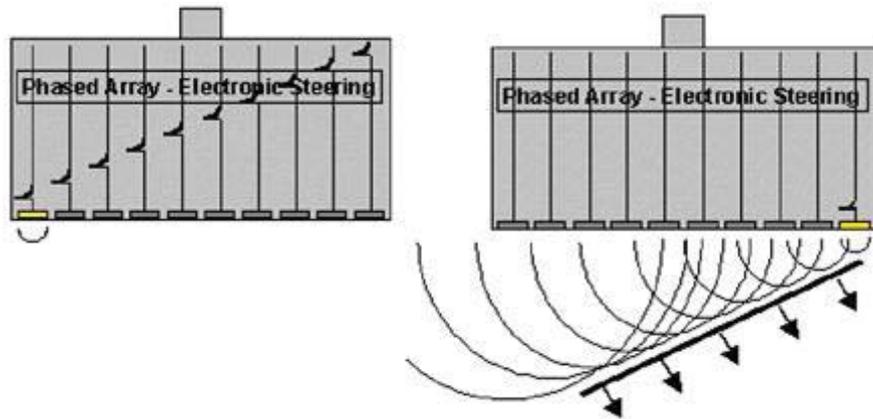


Figura 2.4.1. Ilustración de un frente de onda generado por un array de transductores con desfase de tiempo controlado.

En una aplicación similar a las uniones remachadas mediante remaches ciegos, aunque más simple, Sun-Jin muestra una aplicación de las técnicas por ultrasonidos para inspección de la correcta o incorrecta instalación de tornillos [Sung-Jin 2007]. Consiste en la medida y evaluación del tiempo de vuelo (TOF, time-of-flight) de un pulso ultrasónico a través de los tornillos, como muestra la Figura 2.4.2.

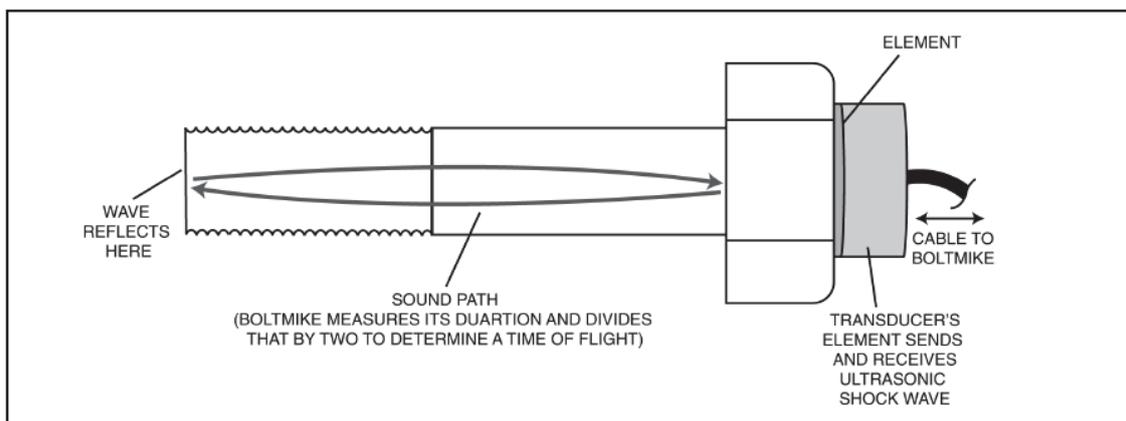


Figura 2.4.2. Esquema de la evaluación de tornillos mediante el tiempo de vuelo [Sung-Jin 2007].

En un análisis simplificado, los tiempos de vuelo medidos están afectados por:

- La longitud del tornillo, que se encontrará en las tolerancias de fabricación.
- La tensión del material, que modifica la velocidad del sonido a través de él, que dependerá del grado de apriete del tornillo.

De esta forma, se pueden discernir (previa calibración) los tornillos que resulten con una tensión baja, es decir, no estén trabajando como debieran.

Las aplicaciones aeronáuticas de las técnicas de ultrasonidos están enfocadas a la inspección de la integridad de materiales (detección de poros, delaminaciones, inclusiones y otros); así como a la detección de grietas. La Figura 2.4.3 muestra la identificación mediante técnicas de ultrasonidos de delaminación provocada artificialmente [Nageswaran 2006]. Por su parte, Le et. al [Le 2018] desarrollaron un método para inspección de forma continua para la detección de corrosión en uniones remachadas, analizando señales ultrasónicas mediante scan tipo B. El método demostró su validez para una velocidad de avance de hasta 6mm/s.

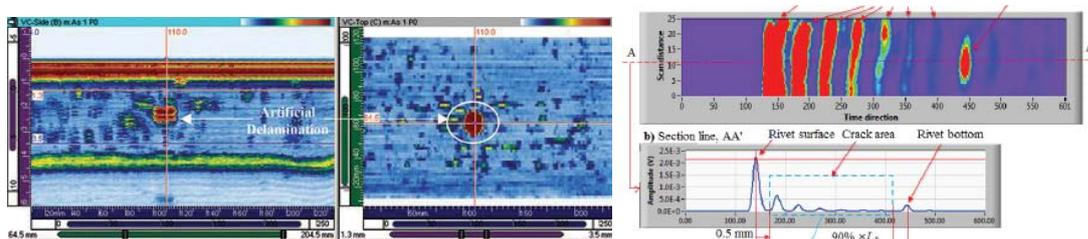


Figura 2.4.3. Izquierda: Presencia de delaminación y de porosidad (azul oscuro) usando scan tipo B (izquierda) y scan tipo C (derecha). Derecha: Identificación de corrosión mediante scan tipo B, y análisis posterior [Le 2018].

2.4.2. Potencial de las técnicas de ultrasonidos para la inspección de remaches instalados incorrectamente

La norma para validar la colocación de remaches [Monogram 2013] se refiere a la longitud y al diámetro de la cabeza de cierre de los remaches como criterio de calidad de la instalación. Una de las características de algunos remaches mal colocados, es que la longitud es distinta a la de los correctamente instalados.

La adaptación de un sistema de ultrasonidos para la medida de tiempos de vuelo de los remaches permitiría obtener la longitud de los mismos, o al menos indicadores de la longitud. Téngase en cuenta que entre dos remaches de longitud distinta, no sólo varía la longitud, sino también la tensión a la que estén sometidos, lo que provocará diferencias en la velocidad del sonido; por tanto, la calibración del sistema TOF-longitud puede no ser lineal (a través únicamente de la velocidad del sonido), sino que puede ser no lineal (con velocidad del sonido variable en función de la tensión, es decir, de la propia longitud).

Con otro enfoque completamente diferenciado, y más relacionado con el siguiente apartado 2.5 *Tecnología base 04: Métodos basados en respuestas en frecuencia*, Stepinski ha desarrollado un método de clasificación de remaches

basado en tecnología ultrasónica que describe en su patente *WO2006/110089 METHOD AND APPARATUS FOR ASSESING QUALITY OF RIVETS USING ULTRASOUND* [Stepinski 2006].

El método consiste en la medida de impedancia de un remache una vez ha sido instalado. Previamente, se tendrá calibrado mediante remaches patrón el plano de impedancia (parte real – parte imaginaria). La posición de la medida del remache a evaluar en el plano de impedancia calibrado determinará si el remache se clasifica como correctamente o incorrectamente instalado.

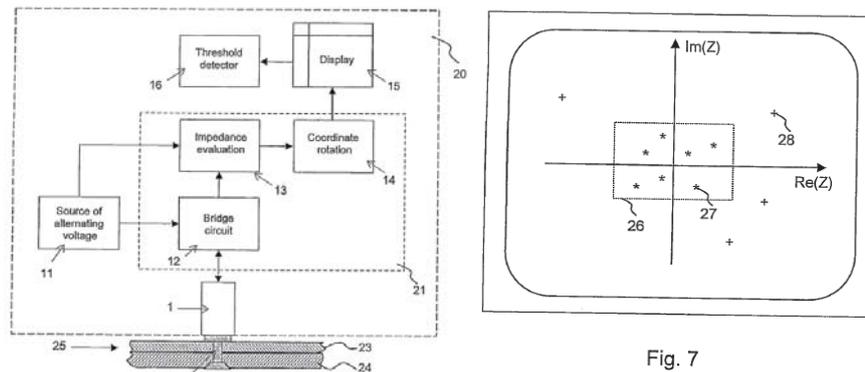


Fig. 7

Figura 2.4.4. Esquema de funcionamiento del método de clasificación en [Stepinski 2006].

2.5. Tecnología base 04: Métodos basados en respuestas en frecuencia

2.5.1. Base teórica

Los métodos de inspección mediante técnicas basadas en la respuesta en frecuencia surgen de la necesidad cada vez mayor de detectar y localizar daño en diferentes tipos de estructuras. Los desarrollos de estos métodos han sido principalmente enfocados hacia grandes estructuras civiles (edificios, puentes, y otros), estructuras offshore (petroleras, energías renovables, ...) o estructuras con requisitos de diseño muy ajustados, como pueden ser las estructuras aeronáuticas (alas, fuselajes, ...) y aeroespaciales. Entendiendo que una pronta detección de un fallo puede evitar consecuencias demasiado costosas (ya sea en recursos materiales o en personas), a lo largo de las últimas décadas se han venido desarrollando diferentes técnicas de SHM (Structure Health Monitoring), entre las que se encuentran las técnicas SHM basadas en el comportamiento dinámico de dichas estructuras.

El objetivo de las técnicas SHM va más allá de la mera distinción entre estructuras sanas y dañadas, sino que además pretenden localizar el daño, cuantificar la gravedad del mismo y a ser posible, ser capaces de predecir la vida restante de la estructura.

La información básica para aplicar cualquiera de los métodos SHM es el comportamiento dinámico de las estructuras. La caracterización básica del comportamiento dinámico se obtiene a través de la medida de sus funciones de respuesta en frecuencia (FRF) entre diferentes puntos de la estructura. La posición de los puntos, y el tratamiento de la información contenida en las FRF distinguen los métodos (y las aptitudes de cada uno de los métodos) entre sí.

Sin embargo, a día de hoy, las técnicas SHM cubren parcialmente los dos primeros objetivos (detección de daño y localización), pudiendo llegar en ocasiones a dar una estimación basta del grado de daño.

Las limitaciones principales con que se encuentran los métodos SHM basados en el comportamiento dinámico son los siguientes:

- Variaciones propias de los ítems de ensayo: diferencias inherentes a los ítems de ensayo debidas a su propia construcción.
- Variabilidad en las medidas: ruido experimental, diferencias debidas al montaje experimental, incertidumbre de medida, errores de medida y demás variaciones propias de cualquier medida experimental.
- Sensibilidad de los métodos: deben tener gran sensibilidad al daño para poder detectar daños que produzcan pequeñas variaciones en el comportamiento dinámico de grandes estructuras.
- No unicidad: defectos distintos pueden producir cambios similares en el comportamiento dinámico de las estructuras.

Los diferentes métodos obtienen uno o varios índices de daño, que en función de su valor determinan si existe fallo o no; y los puntos de medida con los índices correspondientes a niveles de daño indicarán su posición. La Tabla 2.5.1 recoge los métodos basados en comportamiento dinámico más extendidos actualmente (para ampliar información se recomienda consultar la revisión realizada por Crane en [Crane 2018]).

Método	Parámetros de evaluación	Principio	Observaciones
Salto en frecuencia	Parámetro modal: Frecuencias de resonancia	Evalúa la variación en las frecuencias propias entre elementos sanos y dañados.	
Modos propios	Parámetro modal: modos propios	Estudia los cambios en la forma de los modos propios (en los desplazamientos relativos).	En elementos sencillos y continuos, se pueden detectar defectos pequeños.

Curvatura de modos propios	Derivado de Parámetro modal: Curvatura	Calcula la curvatura de los modos propios (su derivada), mejorando la detección de pequeños defectos.	Cálculo por aproximación por diferencias centrales. La precisión aumenta en gran medida si se miden deformaciones directamente (en lugar de su cálculo a partir de los desplazamientos).
Curvatura de FRF	Derivada de FRF: Curvatura de FRF	Similar al método de curvatura de modos propios, pero sobre una FRF de forma que se extiende el rango de frecuencias de análisis.	Se extiende el rango de análisis mejorando la sensibilidad del método.
Flexibilidad dinámica	Parámetro modal: Flexibilidad dinámica $[K]^{-1}$ (inversa de la matriz de rigidez $[K]$)	Cada columna de la matriz de flexibilidad dinámica $[K]^{-1}$ corresponde a los desplazamientos del nodo correspondiente ante una fuerza unidad. Generalmente, se compara con las matrices teóricas a partir de simulaciones MEF.	También pueden compararse con matrices medidas sobre el ítem recién construido (asumiendo que no existen defectos de fabricación).
Actualización de parámetros modales	Párametros modales: $[K]$, $[M]$, $[C]$	Actualización continua de modelos MEF para estimación de posición y tamaño de defecto.	Requiere un conocimiento previo del defecto. Muy útil para control y supervisión una vez localizado un defecto.
Transmisibilidad	Transmisibilidad	Propone la evaluación de la transmisibilidad entre dos grados de libertad.	Requiere menores costes de cálculo sin perder la capacidad de detectar fallos.
Power Mode Shapes	Parámetros modales a partir de potencias espectrales	Similar al método de curvatura de modos propios, sin necesidad del cálculo de los parámetros modales.	Más estable frente al ruido en las medidas.

Tabla 2.5.1. Resumen de los principales métodos de SHM.

A modo de ejemplo, White et al [White 2008] comprobaron la validez del método SHM para la verificación del pegado de materiales compuestos en estructuras aeronáuticas. El estudio comprende la comparación en dos geometrías distintas. La excitación y medición se realiza mediante transductores piezoeléctricos. En este caso, el rango de análisis se extiende hasta los 10 kHz debido a que las condiciones de contorno en ambas muestras se mantenían controladas (e invariables). La Figura 2.5.1 muestra las gráficas FRF obtenidas, donde se observan las diferencias entre FRFs en pegados correctos y en pegados con delaminación en el pegado.

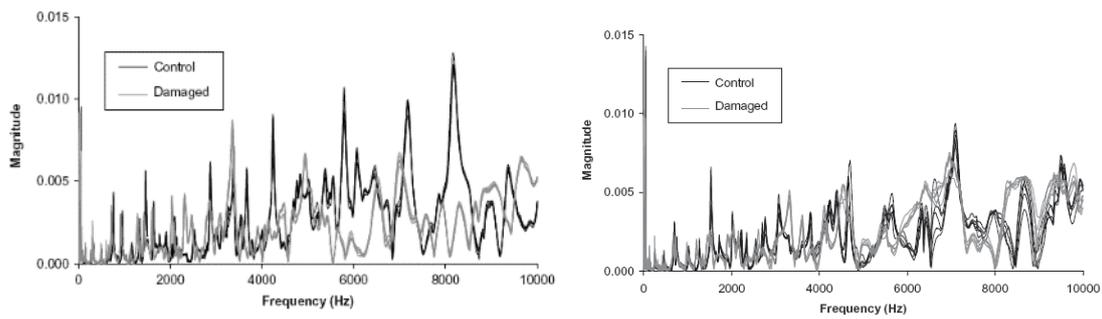


Figura 2.5.1. FRF de planchas de composite pegadas correctamente (Control) y con delaminación en el pegado (Damaged) [White 2008].

Caccese, Mewer y Vel [Caccese 2004] estudiaron diferentes métodos de detección de daño en uniones atornilladas entre placas de metal y material compuesto, evaluando diferentes técnicas e instrumentación utilizada. Estudiaron la unión entre una placa metálica y otra de material compuesto en tres situaciones: i) unión correcta, ii) unión con un tornillo aflojado, y iii) unión con todos los tornillos aflojados.

En su ensayo experimental, observaron que la frecuencia natural fundamental apenas variaba con un tornillo suelto, y que variaba muy ligeramente cuando todos los tornillos se aflojaban. Por su parte, el amortiguamiento relativo apenas se veía modificado en cualquiera de los casos. Sin embargo, el método de transmisibilidad mostró resultados prometedores. La Figura 2.5.2 muestra la variación de la frecuencia natural fundamental en función del par de apriete variando un único de tornillo y variando el par de apriete de todos los tornillos; y la Figura 2.5.3 muestra el índice de daño obtenido por el método de la transmisibilidad midiendo en dos posiciones (cerca del tornillo aflojado y lejos del tornillo aflojado), midiendo aceleraciones o deformaciones respectivamente.

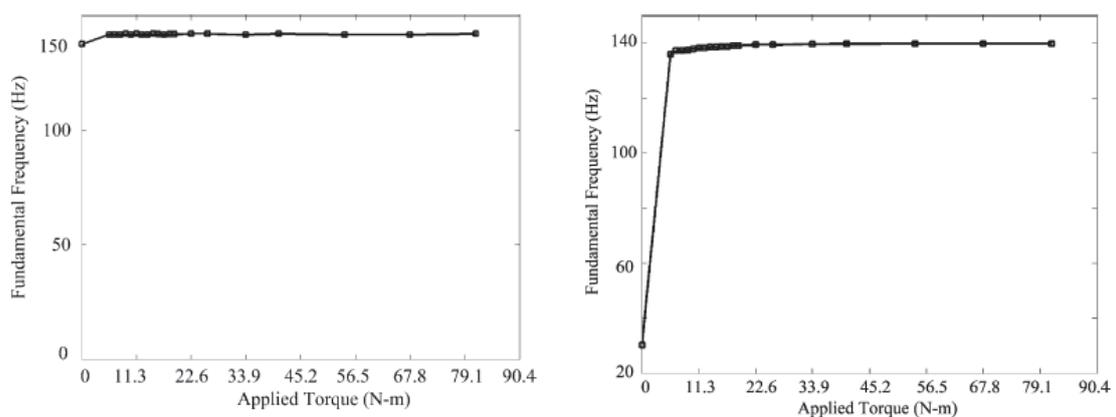


Figura 2.5.2. Frecuencia natural de la estructura unida en función del par de apriete. Izda: aflojando un único tornillo; dcha: aflojando todos los tornillos [Caccese 2004].

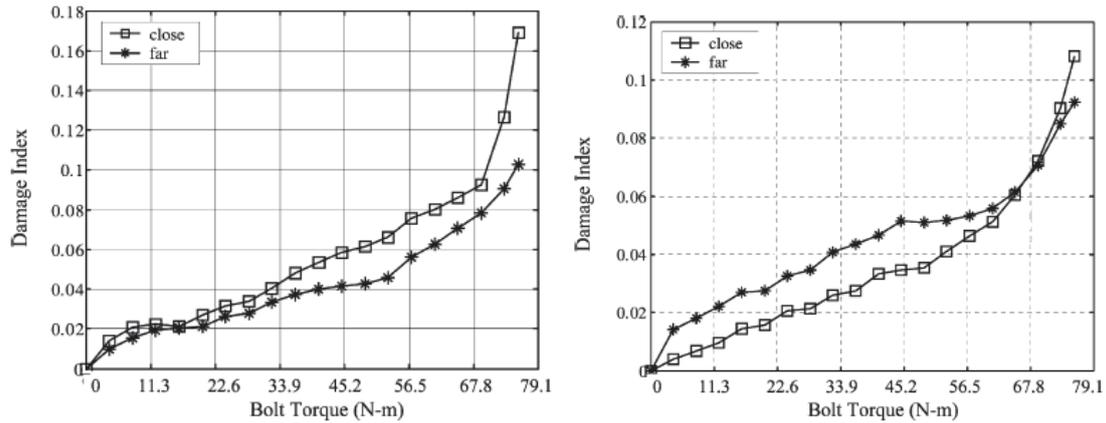


Figura 2.5.3. Índice de daño en función del par de apriete de un único tornillo obtenido mediante el método de transmisibilidad (en la banda de frecuencia 7 – 9 kHz) [Caccese 2004].

La Figura 2.5.4 muestra una imagen del puente I-40 sobre el Río Grande. Antes de su demolición (1993), se permitió a un grupo de investigación compuesto por personal de LANL (Los Alamos National Laboratory) y de la universidad del estado de Nuevo Mexico llevar a cabo ensayos experimentales destructivos sobre él. De esta forma, se pudo ensayar una estructura real bajo condiciones controladas. Los datos obtenidos sobre el puente I-40 son actualmente una referencia para la evaluación de los métodos SHM que han ido surgiendo desde entonces.



Figura 2.5.4. Puente I-40 sometido a ensayo: grieta provocada sobre el puente.

Como ejemplo, la Figura 2.5.5 muestra una comparativa de resultados entre diferentes métodos [Sampaio 1999]. El punto de medición más cercano a la grieta es el numerado como 7. Se muestran los índices de daño normalizados

obtenidos mediante 3 técnicas diferentes: curvatura de FRF, índice de variación de curvatura, curvatura de modos propios

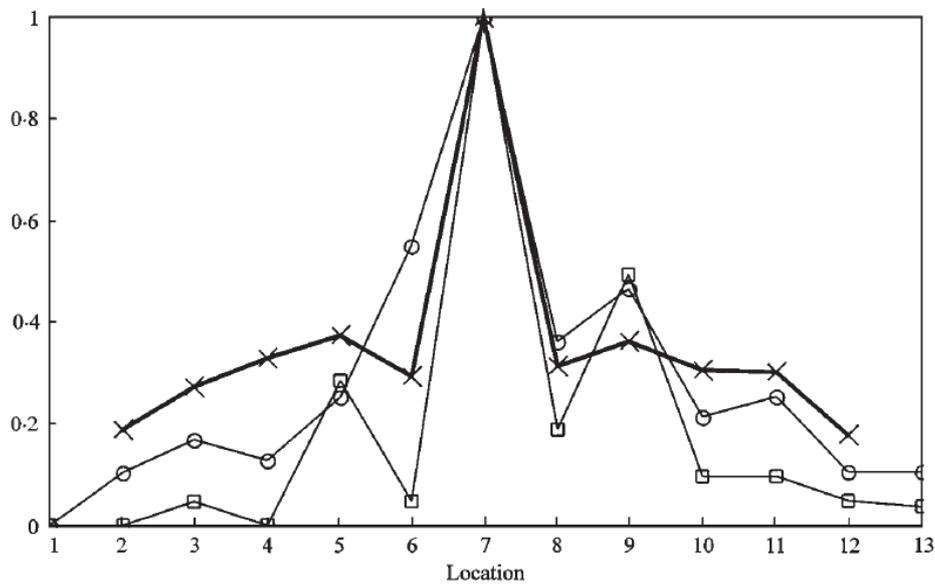


Figura 2.5.5. Índices de daño en cada punto de medida. x-x-x: curvatura de FRF. □-□-□: índice de variación de curvatura. o-o-o: curvatura de modos propios [Sampaio 1999].

En la Figura 2.5.6 se muestra otro ejemplo de aplicación, en este caso sobre una estructura a escala de una torre de aerogenerador. El método seguido para la obtención de índices de daño y estimaciones del grado de daño propuesto para esta aplicación es el de actualización de parámetros modales [Fritzen 2009]. La Figura 2.5.6 muestra el montaje experimental.

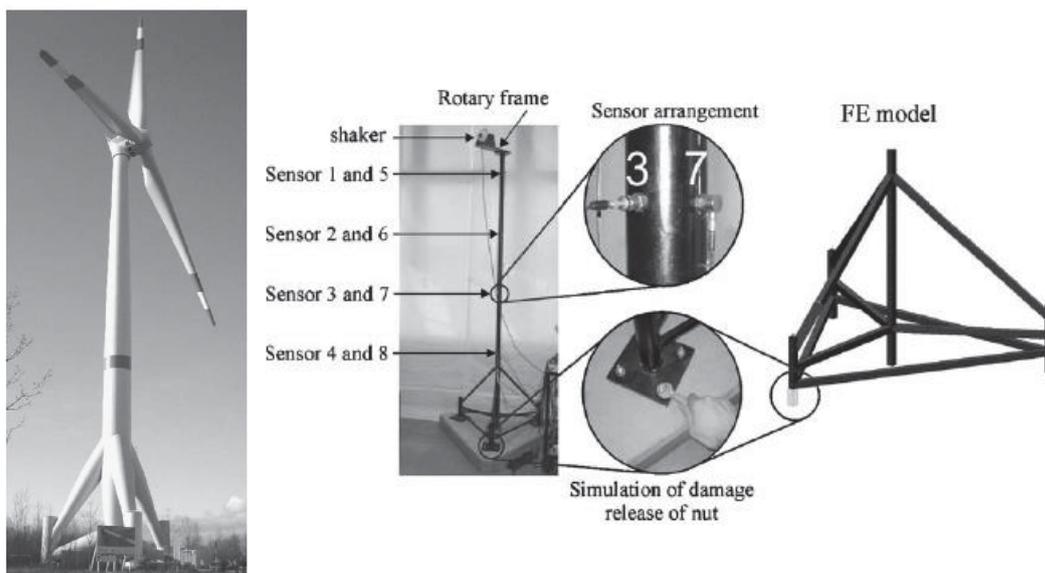


Figura 2.5.6. Modelo de aerogenerador a escala y control de daño mediante actualización de parámetros modales en un modelo MEF [Fritzen 2009].

La Figura 2.5.7 muestra otro ejemplo de aplicación de Fritzen [Fritzen 2009] sobre una parte de la estructura de Airbus A320. Se muestran tanto los puntos de excitación y medida (se utilizaron sensores piezoeléctricos, aprovechando su capacidad de excitar y medir al mismo tiempo) y la ubicación y forma del daño provocado sobre la estructura.

Los resultados obtenidos muestran claramente la capacidad del método para detectar, y para localizar, el daño en la estructura. Las medidas 1 a 10 corresponden a la estructura antes de provocarle el daño, y las medidas 11 a 15 a resultados con la grieta indicada. El eje vertical (D_{ni}) corresponde al índice de daño calculado, que toma valores muy altos en el sensor 9 (el más cercano a la grieta) en las medidas correspondientes a la estructura dañada (medidas 11 a 15).

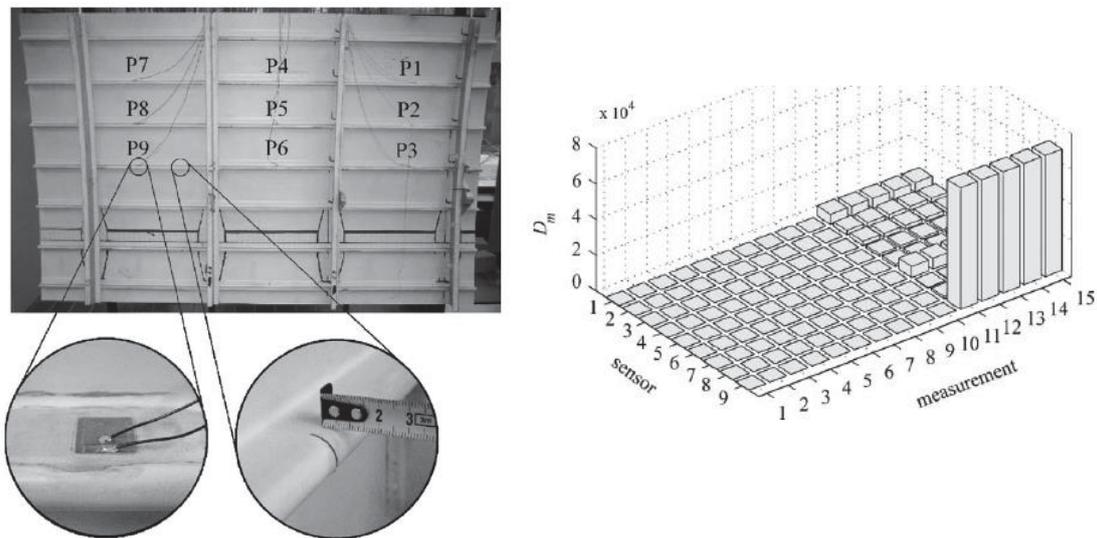


Figura 2.5.7. Estructura aeronáutica: puntos de medida, grieta y su ubicación [Fritzen 2009].

En otro estudio sobre aplicación de técnicas de respuesta en frecuencia para la identificación de daño en estructuras aeronáuticas, Brown y Adams [Brown 2003] realizaron ensayos sobre el fuselaje de un helicóptero siguiendo el método de la transmisibilidad.

Ensayaron el helicóptero para detectar la pérdida de apriete de sus remaches. Para poder controlar el par de apriete, algunos de los remaches fueron sustituidos por tornillos que poder apretar y aflojar de forma controlada. La Figura 2.5.8 muestra una imagen del helicóptero Bell 206L.

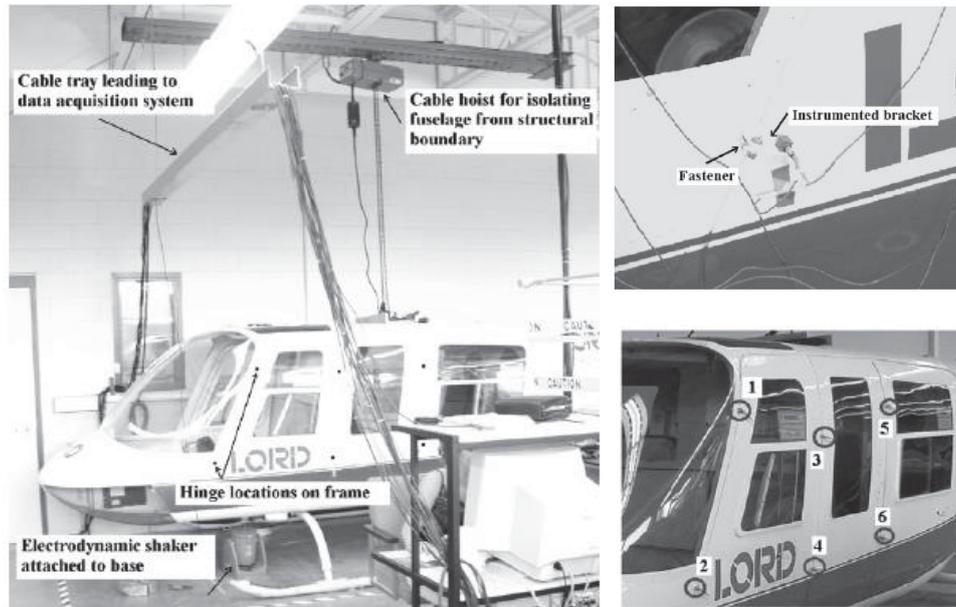


Figura 2.5.8. Vistas del montaje experimental sobre el fuselaje del helicóptero [Brown 2003].

El estudio compara el comportamiento del fuselaje remachado ante pérdidas de fuerza de apriete como un sistema no lineal de orden tres, que sigue una bifurcación de tipo tridente en la que el parámetro crítico es precisamente la fuerza de apriete.

Más allá de la inspección periódica, se pretende evaluar el propio método como sistema de inspección en línea (a lo largo de la vida real del helicóptero), para lo que se somete a ensayo el fuselaje mientras se va modificando la fuerza de apriete de uno de los tornillos.

La Figura 2.5.9 muestra los índices de transmisibilidad entre remaches respecto al tornillo que simula el daño. Se aflojó parcialmente el tornillo en los ciclos 6, 26 y 30. Asimismo, se muestra una gráfica de los índices de transmisibilidad entre grados de libertad y la simulación de una bifurcación tipo tridente.

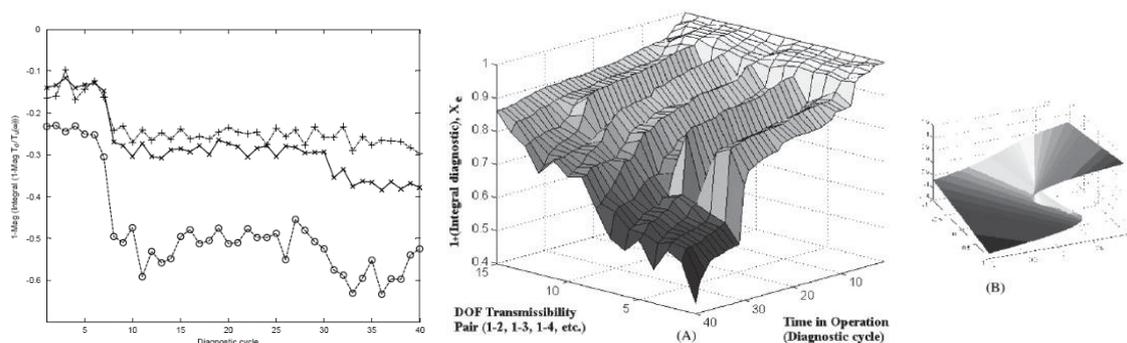


Figura 2.5.9. Izquierda: transmisibilidad entre remaches sanos respecto al aflojado; Centro y derecha: similitud entre a) el comportamiento medido –centro- y b) el de una bifurcación de tipo tridente –derecha- [Brown 2003].

Con la misma intención de obtener un método de inspección continua, evitando inspecciones periódicas, Huynh et. al. [Huynh 2018] realizaron un estudio para la detección de aflojamiento en uniones atornilladas. Mediante la instalación de un elemento piezoeléctrico sobre la unión, tras llevar a cabo un análisis de sensibilidad de la impedancia electromecánica del mismo frente a variaciones de rigidez de la unión determinaron el rango de frecuencia óptimo de inspección para la valoración de la impedancia electromecánica (seleccionando la óptima como aquel rango de frecuencia viable más sensible a variaciones de rigidez debidas al apriete de la unión).

Como indicadores de 'variación de impedancia' desarrollaron dos índices, basados en la correlación entre impedancias de referencia e impedancia a evaluar, y en suma de errores cuadráticos.

Tal y como muestra la Figura 2.5.10, los indicadores responden ante aflojes de uno de los tornillos de la unión (la línea horizontal azul es el valor establecido como umbral superior, por encima de cuyo valor se detecta aflojamiento).

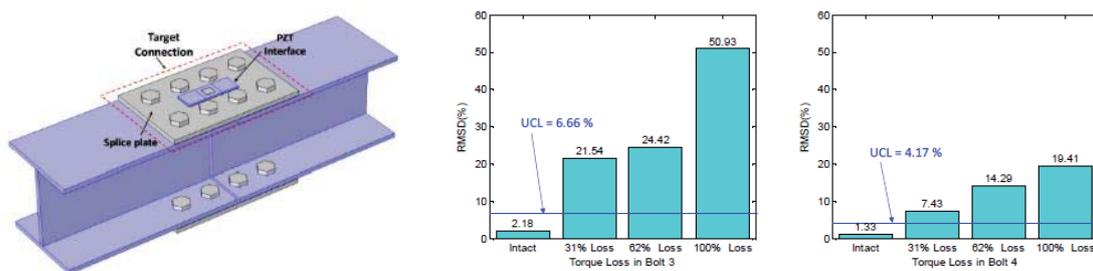


Figura 2.5.10. Izquierda: Esquema del montaje del elemento piezoeléctrico en la unión mecánica. Centro y Derecha: Ejemplo de sensibilidad ante el afloje de tornillos.

Bajo un enfoque diferente, aunque mediante el análisis de la respuesta en frecuencia de las uniones atornilladas, Zhang et. al. [Zhang 2017] desarrollaron un método para la identificación de aflojamiento de tornillos en uniones mecánicas. El método se basa en transmitir ondas de Lamb a través de la unión y el análisis de la modificación de su contenido en frecuencia. De manera similar a Huynh et. al. [Huynh 2018] desarrollaron indicadores que miden el grado de aflojamiento como base para un posible futuro sistema SHM.

2.5.2. Potencial de métodos basados en respuesta en frecuencia para la inspección de remaches instalados incorrectamente

Para el caso de la detección de remaches defectuosos, el enfoque de la identificación mediante técnicas FRF debe ser algo distinto. Los remaches no son estructuras tan complejas como las estructuras a las que van destinadas los métodos basados en respuesta en frecuencia. Ni siquiera es de interés la

localización del defecto dentro de la estructura: si el remache es defectuoso, se reemplazará al completo, no tiene especial interés conocer qué parte del remache ha fallado.

Las técnicas SHM requieren la medida de varios puntos a lo largo de la estructura, y la correlación de parámetros entre diferentes puntos para así localizar los defectos. En el caso de los remaches ciego, será un único punto (la cabeza vista del remache) el de excitación y medida de respuesta.

No obstante, el concepto de variación de frecuencias y modos propios debido a errores en el montaje es válido. Las funciones de respuesta en frecuencia muestran la relación entre la excitación aplicada en un punto y la respuesta del punto de medida a dicha excitación. De forma que al igual que los métodos mencionados, las diferencias de rigidez, masa y amortiguamiento entre remaches correctos e incorrectos conllevarán diferencias de comportamiento dinámico.

Se debe tener en cuenta que las diferencias de comportamiento dinámico buscadas deben ser debidas exclusivamente a la instalación de los remaches. Por tanto, se debe ser capaz de medir el comportamiento dinámico del remache en sí, y no el de la estructura sobre la que se encuentre instalado. Es esperable que existan diferencias en las FRF a bajas frecuencias, incluso entre remaches con idéntico montaje, debido a modos estructurales de la estructura donde vayan montados. Aunque se utilicen niveles de excitación bajos que no lleguen a excitar la estructura completa, a bajas frecuencias el comportamiento de la estructura tendrá una influencia muy superior a la del remache en sí. En consecuencia, se deberán utilizar frecuencias suficientemente altas para la detección exclusivamente de diferencias debidas al remache en sí.

2.6. Resumen del capítulo

Se han identificado 4 tecnologías potenciales como base para el desarrollo de un método de clasificación de remaches ciegos: i) shearografía, ii) termografía activa, iii) técnicas de ultrasonidos, y iv) métodos basados en respuesta en frecuencia. Se han estudiado las capacidades de dichas tecnologías, y basándose en sus características y en aplicaciones similares se ha evaluado su potencial aptitud como tecnologías de base para el desarrollo del método de clasificación. Sin embargo, debe comprobarse experimentalmente su aptitud para la aplicación particular de la clasificación no destructiva de remaches ciegos ABS0257.

3. Análisis de la viabilidad de tecnologías potenciales para la inspección de remaches ciegos ABS0257

3.1. Probetas de remaches ciegos para el análisis de viabilidad

Con el objetivo de evaluar la viabilidad de desarrollar un método de clasificación de cada una de las tecnologías potenciales, se han preparado dos planchas de CFRP remachadas, sobre las que llevar a cabo dicho análisis de viabilidad.

La probeta #1 (ver Figura 3.1.1) tiene un espesor tal que le corresponden remaches ABS0257-5-350 (remaches ABS0257 de guión 5 y grip 350). Para crear un número suficiente de remaches mal instalados, se han instalado remaches correspondientes a un grip inferior, concretamente remaches ABS0257-5-300.

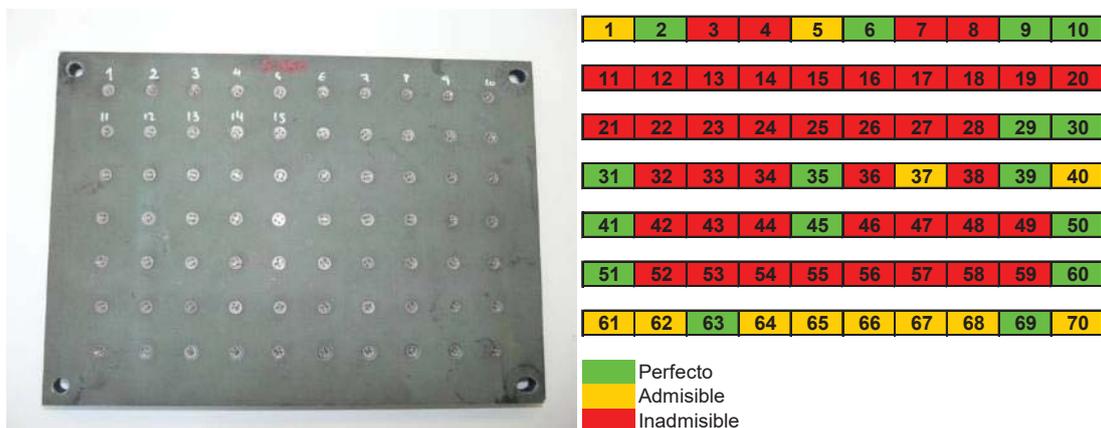


Figura 3.1.1. Probeta remachada #1 y distribución de la calidad de los remaches instalados.

La probeta #2 (ver Figura 3.1.2) tiene un espesor tal que le corresponden remaches ABS0257-6-450. Del mismo modo que en la probeta #1, para provocar remaches mal instalados se han instalado algunos remaches correspondientes a un grip inferior, con remaches ABS0257-6-400.

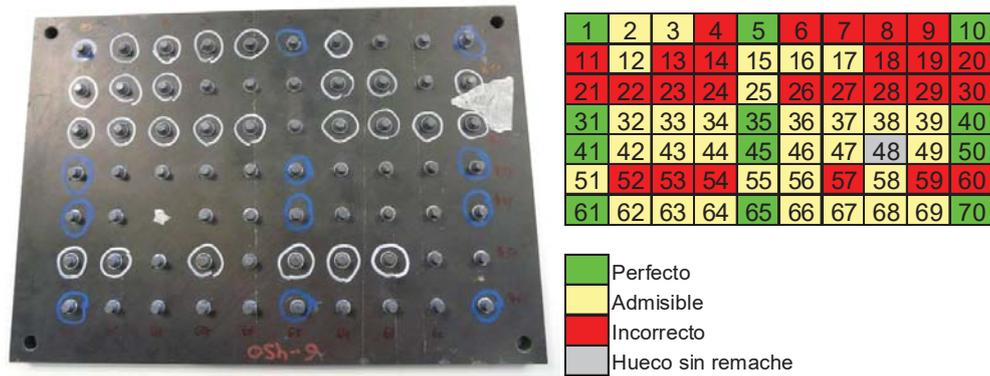


Figura 3.1.2. Probeta remachada #2 y distribución de la calidad de los remaches instalados.

La Figura 3.1.3 muestra un detalle en el que se observan remaches incorrectamente instalados, bien por aparición de un anillo en la cabeza de cierre, por picaduras, o por aplastamiento de la cabeza de cierre.



Figura 3.1.3. Detalle de remaches correctamente e incorrectamente instalados (probeta #2, remaches fila superior: 13 – 12 – 11; fila inferior 22 – 21).

3.2. Análisis de viabilidad de la tecnología base 01: Shearografía

3.2.1. Descripción del análisis de viabilidad

Para valorar la viabilidad de la shearografía como método de clasificación no destructivo de remaches ciegos se sometió a ensayo la probeta #1. El ensayo consistió en la obtención una imagen de shearografía con la probeta en reposo, una nueva imagen de shearografía cuando la probeta está deformada debido a algún tipo de excitación externa y en la composición y análisis de la imagen de diferencias de las dos imágenes de shearografía.

Para la excitación se utilizaron tres métodos distintos sobre la probeta #1:

1. Excitación por vibraciones en un rango de 0-100kHz (ver Figura 3.2.1)
2. Excitación térmica y medición durante la fase de enfriamiento (ver Figura 3.2.2)
3. Carga estática (ver Figura 3.2.3)

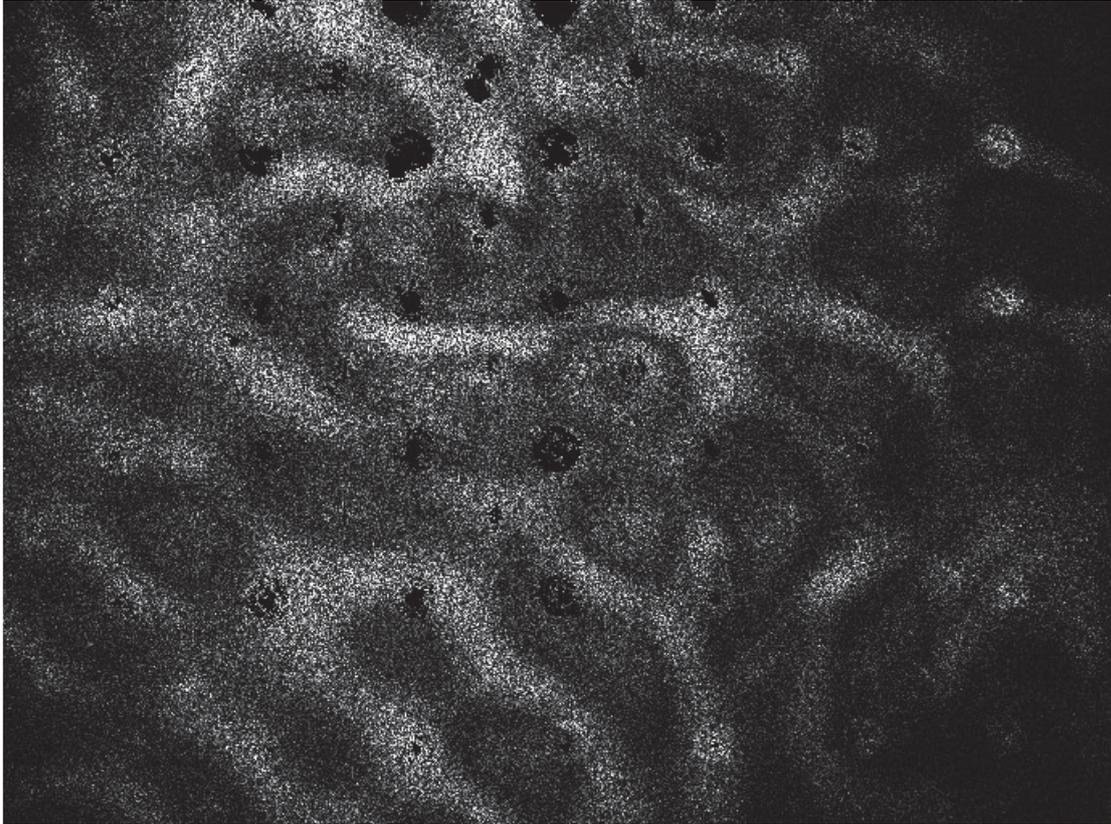


Figura 3.2.1. Imagen shearográfica obtenida mediante excitación por vibraciones.

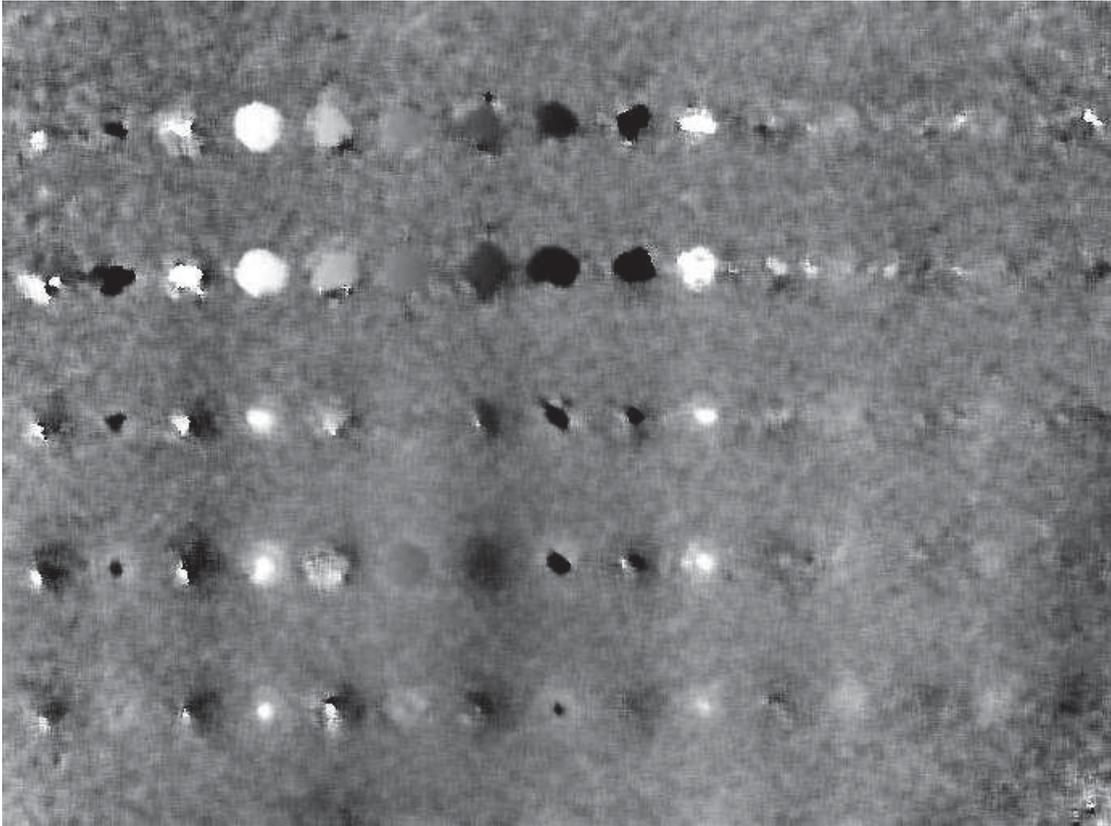


Figura 3.2.2. Imagen shearográfica obtenida mediante excitación térmica durante el enfriamiento de la probeta.

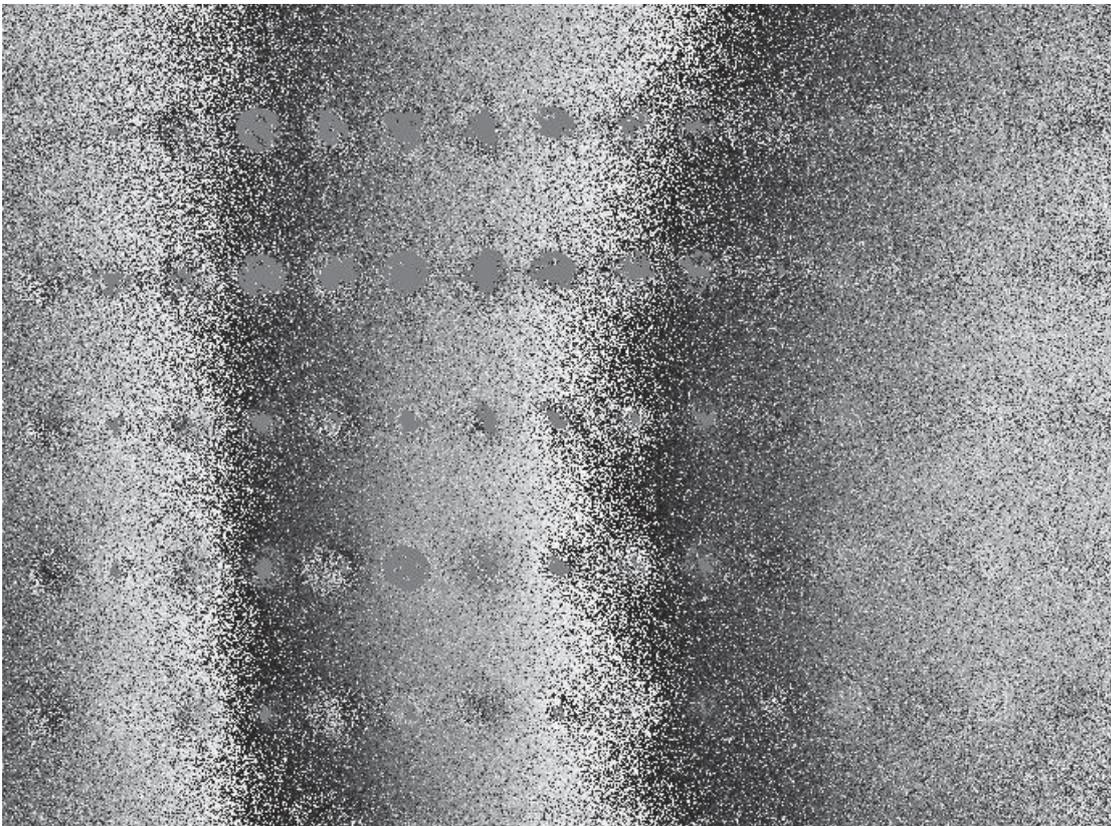


Figura 3.2.3. Imagen shearográfica obtenida cuando se excita por carga estática.

En un análisis preliminar de los datos recogidos no se encuentran diferencias significativas entre los entornos correspondientes a remaches correctamente instalados y a los correspondientes a remaches incorrectamente instalados.

En una segunda fase se ha evaluado la técnica de shearografía con excitación térmica sobre la probeta #2. En esta segunda evaluación, en primer lugar, como fuente térmica se utilizaron 2 lámparas halógenas de 1kW.



Figura 3.2.4. Izquierda: cabezal de shearografía con excitación por lámparas halógenas integrado. Derecha: proyección de luz coherente sobre probeta remachada.

En esta segunda prueba, tampoco se observan diferencias apreciables entre los entornos de los remaches correctamente instalados y los de remaches incorrectamente instalados); ni en la cara vista de los remaches ni en la cara ciega.

Un posible motivo de no evidenciar diferencias en los entornos de remaches correctamente e incorrectamente instalados podría ser la excitación deficiente de la probeta remachada. Aunque se caliente de forma prolongada mediante lámparas halógenas, la absorción del CFRP y la difusión de calor hacia el interior de la plancha es baja. Por tanto, se ha optado por sustituir la forma de calentamiento por un calentador de aire de alta potencia (600W). De esta forma, aunque el calentamiento superficial sea menos homogéneo, se conseguirá una mayor excitación térmica.

La Figura 3.2.5 muestra un ejemplo de imagen shearográfica, donde se indican los números de remache y el estado de su instalación (el número 48 corresponde con un hueco sin remache).

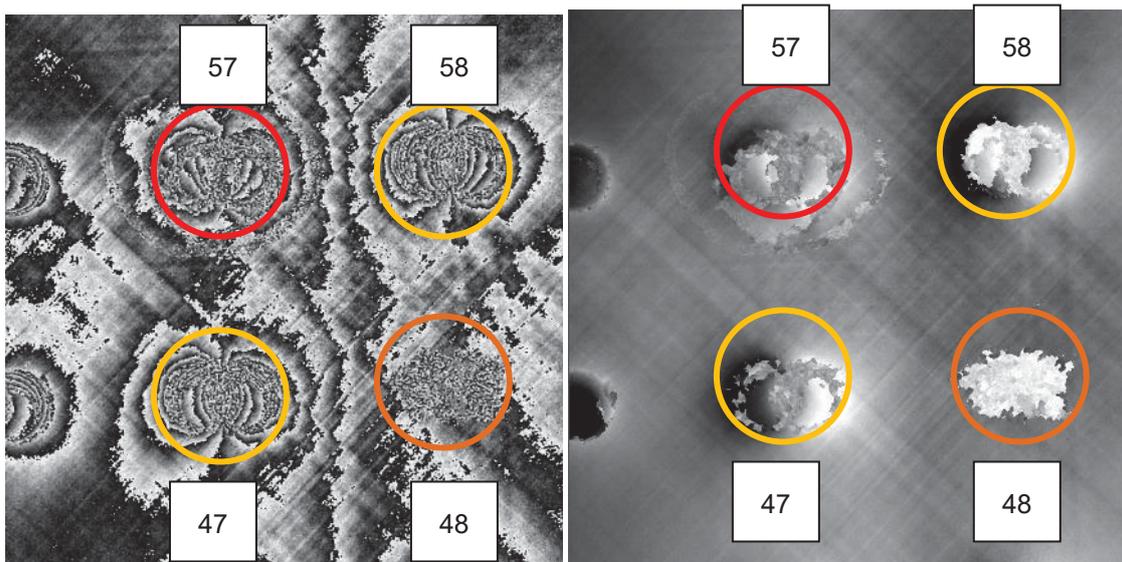


Figura 3.2.5. Imágenes shearográficas bajo excitación con calentador de aire de alta potencia: misma información visualizada en dos modos diferentes.

Incluso bajo esta excitación térmica, no se han observado diferencias características entre los entornos de los remaches correctamente e incorrectamente instalados.

3.2.2. Conclusiones del análisis de viabilidad de la shearografía

A la vista de la imposibilidad de discernir entre los entorno de remaches correctamente e incorrectamente instalados, se ha optado por enviar una muestra a laboratorios externos para su análisis mediante shearografía (IKT, de la universidad de Stuttgart); en donde tampoco han podido clasificar los remaches en base a los resultados obtenidos mediante shearografía.

Se concluye que la shearografía no es una tecnología apta para el desarrollo de un sistema de evaluación no destructiva de remaches ciegos ABS0257 en uniones de CFRP en las condiciones que se desea.

3.3. Análisis de viabilidad de la tecnología base 02: Termografía activa

3.3.1. Descripción del análisis de viabilidad

Se han realizado ensayos de termografía sobre la probeta #2. En una primera etapa, como método de calentamiento se utilizó una lámpara halógena, tal y como muestra la Figura 3.3.1. Puede observarse que el calentamiento provocado no es homogéneo en toda la placa, por lo que es esperable que existan diferencias de valores absolutos de temperatura según los remaches estén más distanciados de la lámpara.

Estudiando el enfriamiento de la probeta, no se han observado diferencias significativas entre los entornos de los remaches correctamente e incorrectamente instalados. La Figura 3.3.2 muestra una imagen termográfica tras haber calentado la probeta, durante el enfriamiento, en un instante en el que los puntos más calientes tienen un salto de temperatura de unos 10°C respecto a la temperatura ambiente. Se indican asimismo el estado de los remaches en la zona más caliente de la imagen termográfica.



Figura 3.3.1. Calentamiento de la muestra #2 mediante lámpara halógena.

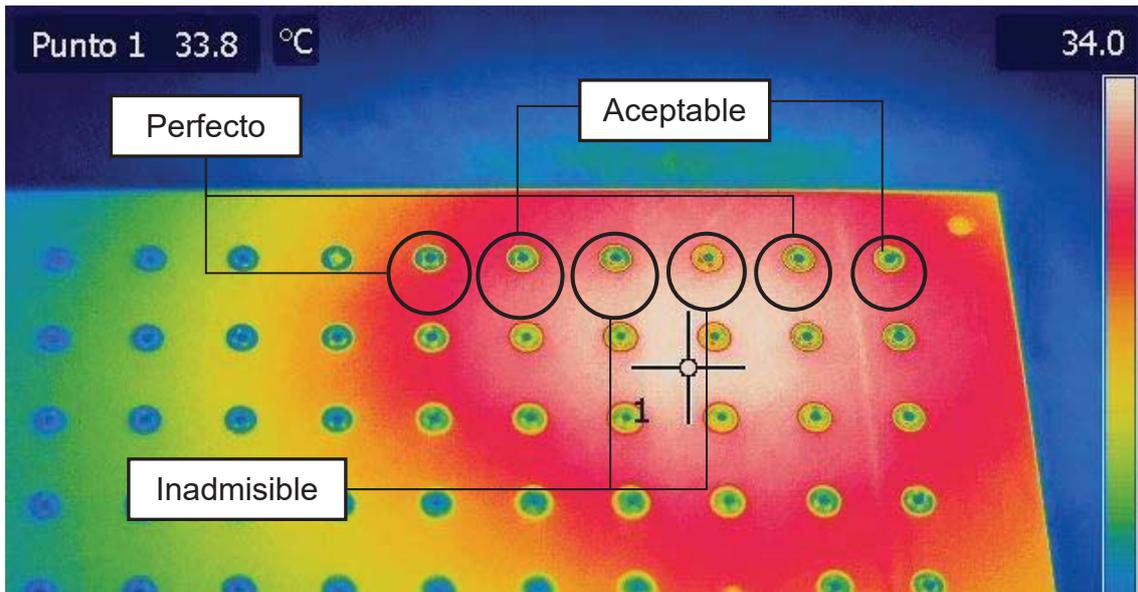


Figura 3.3.2. Imagen termográfica de la muestra #2 tras calentamiento mediante lámpara halógena.

En consecuencia, y en concordancia con el análisis de viabilidad de la shearografía, se ha optado por sustituir el calentamiento mediante lámpara halógena por calentamiento mediante calentador de aire de alta potencia.

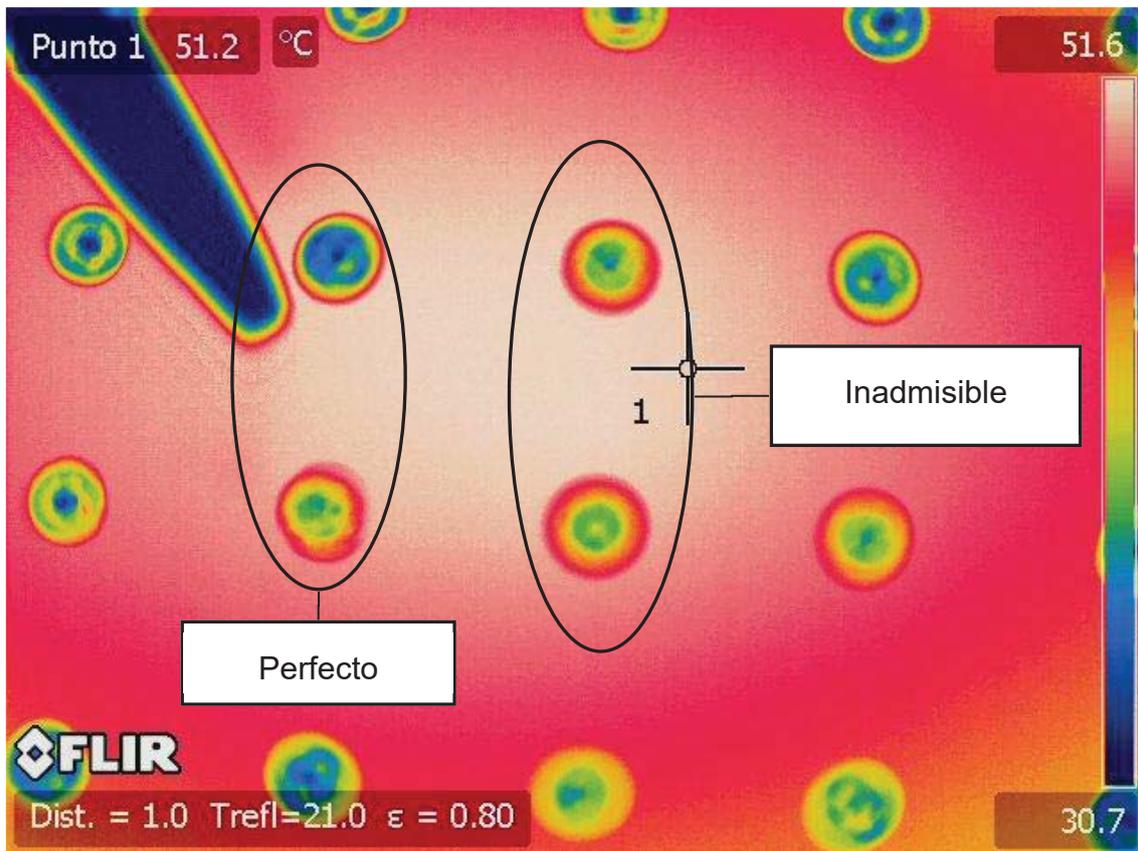


Figura 3.3.3. Imagen termográfica de la muestra #2 tras calentamiento mediante calentador de aire de alta potencia.

Incluso provocando un salto de temperatura muy superior al conseguido mediante lámpara halógena, el estudio del enfriamiento de en el entorno de remaches correcta e incorrectamente instalados no ha arrojado diferencias significativas.

3.3.2. Conclusiones del análisis de viabilidad de la termografía activa

Del mismo modo que en análisis de viabilidad de la shearografía, ante la imposibilidad de discernir entre remaches correcta e incorrectamente instalados mediante termografía activa, se ha optado por enviar una muestra a un laboratorio externo para su análisis mediante termografía (IKT, de la universidad de Stuttgart). En este caso tampoco han podido clasificar los remaches en base a los resultados obtenidos mediante termografía activa.

Se concluye que la termografía activa no es actualmente una tecnología apta para el desarrollo de un sistema de evaluación no destructiva de remaches ciegos ABS0257 en uniones de CFRP. Probablemente la baja conductividad térmica de CFRP y la reducida capacidad de inspección de las técnicas infrarrojas cuando el espesor aumenta, son las causas principales que explican la no aplicabilidad de estas técnicas.

3.4. Análisis de viabilidad de la tecnología base 03: Métodos basados en ultrasonidos

3.4.1. Descripción del análisis de viabilidad

Se pretende evaluar la sensibilidad del tiempo de vuelo (TOF) para discernir entre remaches correctamente instalados y remaches incorrectamente instalados. En el estudio de viabilidad se han empleado dos tipos de tecnologías de inspección basadas en ultrasonidos: Convencional y Phased array. Los equipos utilizados han sido:

Equipos de inspección por ultrasonidos:

Phased array: OMNSCAN MX

Convencional: Panametrics DL35

Palpadores:

Phased array: 5MHz y 64 elementos 5L64-I1

Suela: SI1-OL

Convencional: 20MHz M208 20/.125" 574232

Sin suela

Se ha empleado una metodología sencilla para realizar el estudio, identificando cada uno de los ecos de fondo en las señales. Debido a la compleja geometría del remache, es posible que cualquier arista o plano produzca un eco. Por lo tanto, es necesario distinguir el eco de fondo del resto de los ecos. La longitud aproximada de los remaches es conocida y dado que los equipos han sido calibrados previamente, se conoce el tiempo aproximado donde debe aparecer cada uno de los ecos.

Medida de la cabeza de cierre mediante phased array

La inspección mediante phased array de los remaches podría servir para la medida del diámetro de la cabeza de cierre. Los datos obtenidos de la inspección se han representado con gráficos A-scan y S-scan, representaciones normalizadas en inspecciones por ultrasonidos. La Figura 3.4.1 muestra el array utilizado y las representaciones de la información recogida utilizadas:

- A-scan: Es una representación gráfica de la amplitud o intensidad del pulso respecto al tiempo de vuelo de uno de los transductores (a elección del usuario) del array de ultrasonidos.
- S-scan: Es una representación gráfica del eco de todos los cristales del palpador utilizado. Se da en dos ejes, tiempo de vuelo y posición del transductor en el palpador, y en una escala de colores que representa la intensidad o amplitud de la señal obtenida desde cada cristal.

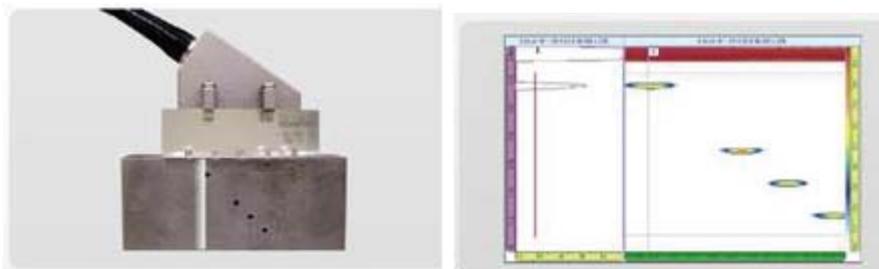


Figura 3.4.1. Izda: Palpador con array de transductores sobre probeta de acero con taladros a diferentes cotas. Dcha: izda: A-Scan de un transductor; dcha: S-Scan donde se aprecian todos los agujeros de la probeta de acero.

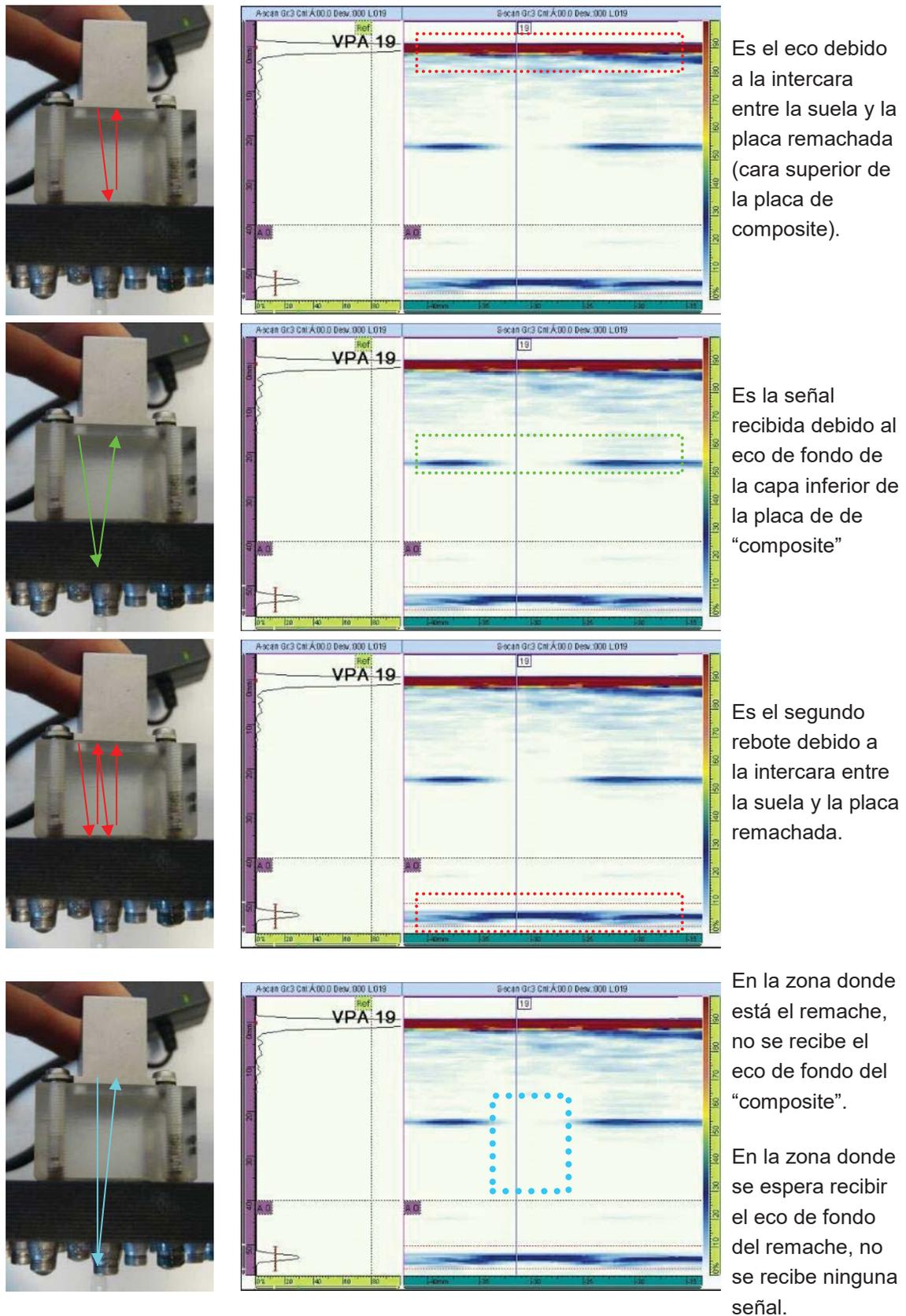


Tabla 3.4.1. Secuencia de caracterización de los ecos mediante phased array.

A pesar de haber utilizado un array de 64 elementos, no se ha conseguido resolución suficiente para medir en con resolución suficiente la cabeza de cierre

de los remaches. A tenor de las observaciones, no se perciben ecos de capucha de la cabeza de cierre en sí, únicamente se obtienen ecos de la superficie ciega de CFRP.

Medida del TOF mediante transductor convencional

Se ha realizado la medición de todos los remaches de ambas probetas con la intención de conocer la sensibilidad del TOF para discernir entre remaches correctamente e incorrectamente instalados.

La Figura 3.4.2 esquematiza el posicionamiento del transductor de US sobre un remache, identificando las interfaces que el pulso se encuentra durante su vuelo. La Figura 3.4.3 muestra la señal temporal de ultrasonidos rectificada, sobre la que se identifica a qué interfaz corresponde cada eco. Para una mejor comprensión, la Tabla 3.4.2 ilustra paso a paso el vuelo del pulso ultrasónico y la generación de cada uno de los ecos.

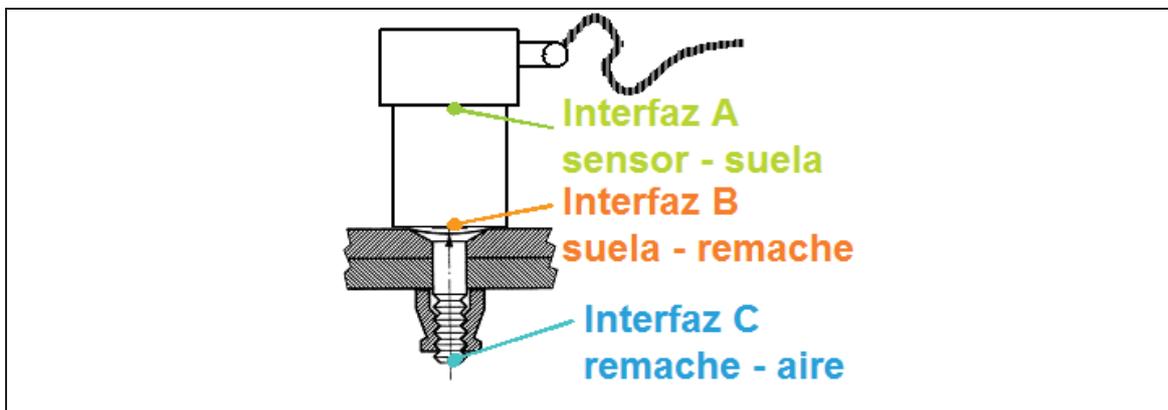


Figura 3.4.2. Montaje de transductor US sobre el remache e identificación de interfaces.

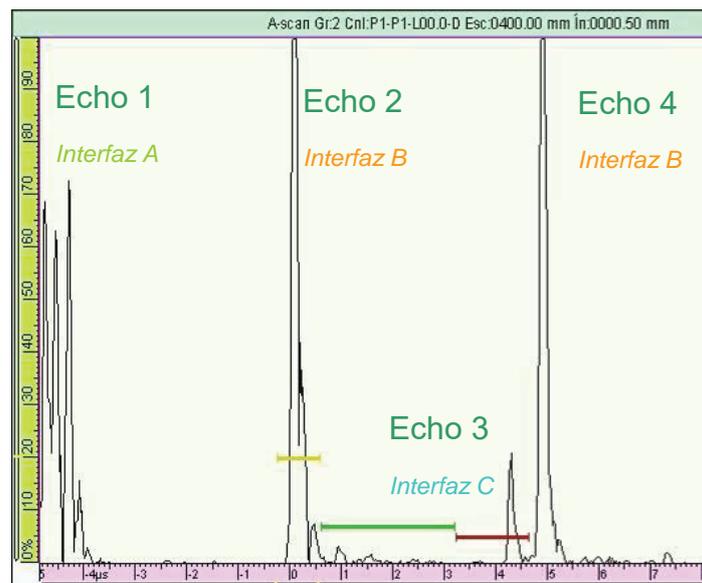


Figura 3.4.3. Señal US rectificada con identificación de ecos. El TOF corresponde al tiempo del eco 3 respecto al eco 2.

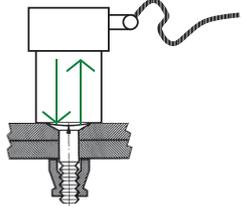
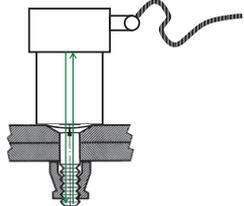
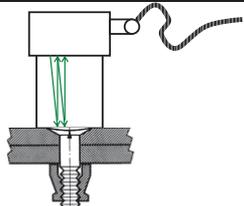
<p>Eco 1 Este eco se genera entre el transductor y la suela que hace de palpador, en la Interfaz A.</p>	
<p>Eco 2 Este eco se produce en la intercara suela – remache, lo produce la parte de la onda no transmitida (la reflejada). Interfaz B</p>	
<p>Eco 3 La componente transmitida llega al final del remache y en la intercara con el aire es reflejada casi al 100%, muy baja proporción es transmitida al aire. Interfaz C</p>	
<p>Eco 4 La onda que ha generado el eco 2, tras rebotar en el transductor, vuelve a viajar en dirección al remache, contra el que choca y otra vez hay una parte que no se transmite, que se refleja y vuelve a viajar hasta el transductor. Interfaz B</p>	

Tabla 3.4.2. Ilustración de la secuencia temporal de vuelo del pulso US y la aparición de ecos.

De esta forma se han medido los tiempos de vuelo de cada remache. La Tabla 3.4.3 recoge los tiempos de vuelo medidos la probeta #1.

Remache	TOF [μ s]	Instalación	Remache	TOF [μ s]	Instalación
1	2.85	Aceptable	36	2.90	Inadmisible
2	3.13	Perfecto	37	3.02	Aceptable
3	2.94	Inadmisible	38	2.95	Inadmisible
4	2.64	Inadmisible	39	3.13	Perfecto
5	2.79	Aceptable	40	2.92	Aceptable
6	3.10	Perfecto	41	3.37	Perfecto
7	2.69	Inadmisible	42	2.89	Inadmisible
8	2.91	Inadmisible	43	2.90	Inadmisible
9	3.09	Perfecto	44	2.86	Inadmisible
10	2.89	Perfecto	45	3.09	Perfecto
11	2.98	Inadmisible	46	2.90	Inadmisible
12	2.65	Inadmisible	47	2.83	Inadmisible
13	2.65	Inadmisible	48	2.85	Inadmisible
14	2.70	Inadmisible	49	2.88	Inadmisible
15	2.65	Inadmisible	50	3.07	Perfecto
16	2.65	Inadmisible	51	2.95	Perfecto
17	2.66	Inadmisible	52	2.91	Inadmisible
18	2.70	Inadmisible	53	2.89	Inadmisible
19	2.64	Inadmisible	54	2.92	Inadmisible
20	2.65	Inadmisible	55	2.88	Inadmisible
21	2.88	Inadmisible	56	2.92	Inadmisible
22	2.94	Inadmisible	57	2.90	Inadmisible
23	2.90	Inadmisible	58	2.84	Inadmisible

24	2.86	Inadmisible	59	2.83	Inadmisible
25	2.88	Inadmisible	60	2.96	Perfecto
26	2.90	Inadmisible	61	3.11	Aceptable
27	1.50	Inadmisible	62	2.82	Aceptable
28	2.85	Inadmisible	63	2.85	Perfecto
29	2.89	Perfecto	64	2.92	Aceptable
30	2.91	Perfecto	65	3.18	Aceptable
31	3.20	Perfecto	66	2.85	Aceptable
32	2.97	Inadmisible	67	2.93	Aceptable
33	2.89	Inadmisible	68	2.85	Aceptable
34	2.88	Inadmisible	69	2.80	Perfecto
35	3.17	Perfecto	70	3.13	Aceptable

Tabla 3.4.3. Probeta #1: Relación de número de remache, TOF medido y estado del remache.

Los TOF de la probeta #1 se muestran de forma gráfica en la Figura 3.4.4. El eje horizontal corresponde al TOF (mostrado en μs), y el eje vertical corresponde al número de remache asignado arbitrariamente en la probeta #1. Es decir, el eje vertical no ofrece información representativa, se utiliza únicamente para identificar cada uno de los puntos mostrados y por claridad en la representación gráfica. La información está contenida en el eje horizontal.

En la Figura 3.4.4 puede observarse una tendencia clara: los remaches con mayor TOF están correctamente instalados, y los remaches con menor TOF están incorrectamente instalados.

De esta forma, se pueden asignar dos fronteras, o dos valores límite de TOF. Atendiendo a los resultados obtenidos, la frontera inferior se puede asignar como $2.75\mu\text{s}$, y la frontera superior $3.00\mu\text{s}$. Y atendiendo a estas dos fronteras, se cumple que:

- Por debajo de la frontera inferior, todos los remaches están incorrectamente instalados.
- Por encima de la frontera superior, todos los remaches están correctamente instalados.
- En la zona intermedia, los remaches no pueden ser clasificados atendiendo a estas dos fronteras.

Según estas dos fronteras se pueden clasificar 24 de 70 remaches contenidos en la placa, es decir, un 34% del total de remaches en la probeta #1.

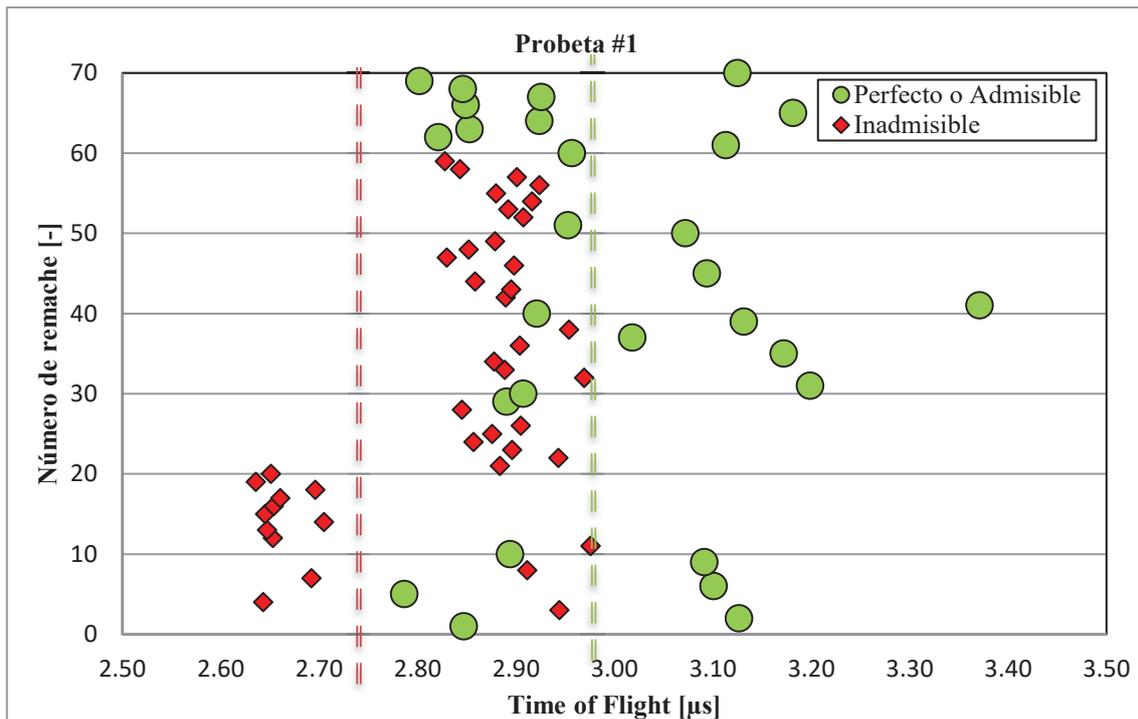


Figura 3.4.4. TOF correspondientes a los remaches de la probeta #1 y fronteras inferior y superior.

La Tabla 3.4.3 recoge los tiempos de vuelo medidos la probeta #2. El remache 48 corresponde al hueco sin remache en la probeta #2, y los remaches 56 y 58 no han podido ser medidos por haber roto el pin por dentro del cuerpo. Los TOF de la probeta #2 se muestran de forma gráfica en la Figura 3.4.5.

Remache	TOF	Instalación	Remache	TOF	Instalación
1	3.75	Aceptable	36	3.75	Inadmisible
2	3.64	Perfecto	37	3.76	Aceptable
3	3.64	Inadmisible	38	3.78	Inadmisible
4	3.55	Inadmisible	39	3.79	Perfecto
5	3.75	Aceptable	40	3.79	Aceptable
6	3.63	Perfecto	41	3.79	Perfecto
7	3.61	Inadmisible	42	3.77	Inadmisible
8	3.60	Inadmisible	43	3.77	Inadmisible
9	3.56	Perfecto	44	3.77	Inadmisible
10	3.70	Perfecto	45	3.75	Perfecto
11	3.33	Inadmisible	46	3.74	Inadmisible
12	3.66	Inadmisible	47	3.77	Inadmisible
13	3.55	Inadmisible	48	-	-
14	3.64	Inadmisible	49	3.76	Inadmisible
15	3.59	Inadmisible	50	3.83	Inadmisible
16	3.66	Inadmisible	51	3.79	Perfecto
17	3.76	Inadmisible	52	3.76	Perfecto
18	3.63	Inadmisible	53	3.60	Inadmisible
19	3.67	Inadmisible	54	3.61	Inadmisible
20	3.59	Inadmisible	55	3.56	Inadmisible
21	3.54	Inadmisible	56	No medible	Admisible
22	3.63	Inadmisible	57	3.62	Inadmisible

23	3.66	Inadmisible	58	No medible	Admisible
24	3.58	Inadmisible	59	3.70	Inadmisible
25	3.66	Inadmisible	60	3.57	Inadmisible
26	3.60	Inadmisible	61	3.76	Inadmisible
27	3.59	Inadmisible	62	3.83	Inadmisible
28	3.57	Inadmisible	63	3.80	Perfecto
29	3.56	Perfecto	64	3.72	Aceptable
30	3.65	Perfecto	65	3.73	Aceptable
31	3.81	Perfecto	66	3.75	Perfecto
32	3.76	Inadmisible	67	3.73	Aceptable
33	3.80	Inadmisible	68	3.73	Aceptable
34	3.80	Inadmisible	69	3.74	Aceptable
35	3.78	Perfecto	70	3.73	Aceptable

Tabla 3.4.4. Probeta #2: Relación de número de remache, TOF medido y estado del remache.

Se observa para los TOF de la probeta #2 la misma tendencia observada para los TOF de la probeta #1. En este caso, la frontera inferior se puede asignar como $3.58\mu\text{s}$, y la frontera superior $3.69\mu\text{s}$; cumpliéndose las tres premisas observadas en la probeta #1:

- Por debajo de la frontera inferior, todos los remaches están incorrectamente instalados.
- Por encima de la frontera superior, todos los remaches están correctamente instalados.
- En la zona intermedia, los remaches no pueden ser clasificados atendiendo a estas dos fronteras.

En este caso, según estas fronteras se pueden clasificar 51 de 67 remaches, un 76%. Sin embargo, si la incrementa la frontera inferior hasta $3.64\mu\text{s}$, se clasificarían 57 de 67 remaches, un 85%, cometiendo un error inferior al 1.5%.

Se observa asimismo que los TOF obtenidos para la probeta #2 son mayores a los TOF medidos para la probeta #1, hecho que concuerda con que la probeta #2 es de mayor espesor, y por tanto sus remaches más largos que los instalados en la probeta #1.

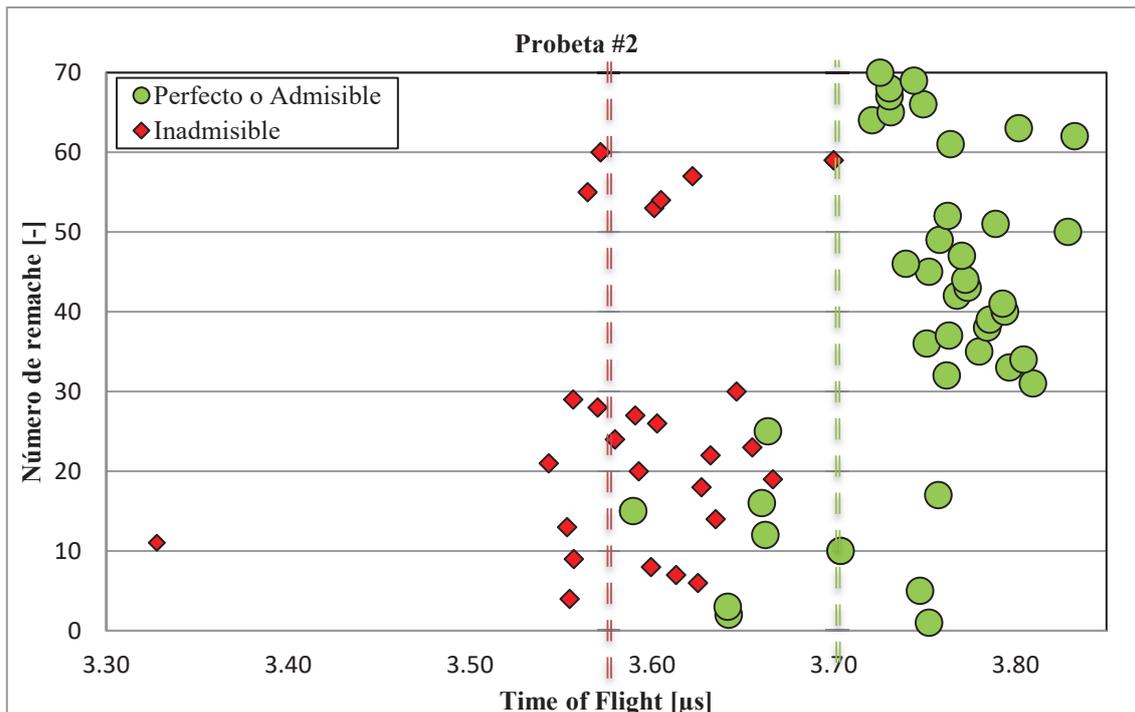


Figura 3.4.5. TOF correspondientes a los remaches de la probeta #2 y fronteras inferior y superior.

3.4.2. Conclusiones del análisis de viabilidad de los métodos basados en ultrasonidos

Con el método de inspección por ultrasonidos “Phased array” no se han obtenido resultados positivos, no se ha observado diferencias que permitan distinguir los remaches incorrectamente instalados de los correctamente instalados.

Con el método de ultrasonidos convencional y con un palpador 20MHz se ha conseguido medir el tiempo de vuelo de la onda ultrasónica a través del vástago de los remaches.

En ambas probetas, se han obtenido dos fronteras que dividen el conjunto de los remaches en cada probeta en 3 zonas: zona de remaches incorrectos por debajo de la frontera inferior, zona de remaches correctos por encima de la frontera superior, y zona de incertidumbre entre ambas fronteras. La Tabla 3.4.5 resume las capacidades de clasificación basada en TOF en cada una de las probetas.

Probeta // número de remaches	Incorrectos			Correctos			Clasificados		No clasificados	
	Total	<TOF _{inf}	%	Total	>TOF _{sup}	%	Total	%	Total	%
#1 // 70	42	11	26%	28	13	46%	24	34%	46	66%
#2 // 67	26	10	39%	41	35	85%	51	76%	6	24%
· Admitiendo un falso positivo (clasificar como incorrecto un remache correcto):										
#2 // 67	26	22	85%	41	35	85%	57	85%	10	15%

Tabla 3.4.5. Resumen de la clasificación de remaches basada en TOF en las probetas #1 y #2.

En conclusión, se ha demostrado que el tiempo de vuelo de un pulso ultrasónico a través del vástago de los remaches es parcialmente capaz de clasificar los remaches instalados como correctamente o incorrectamente instalados.

Si bien la demostración se basa en la capacidad parcial del método aplicado a dos lotes de 70 y 67 unidades, los resultados arrojan una tendencia contrastable entre TOF y calidad de la instalación del remache.

3.5. Análisis de viabilidad de la tecnología base 04: Métodos basados en respuesta en frecuencia

3.5.1. Descripción del análisis de viabilidad

El análisis de viabilidad de los métodos de respuesta en frecuencia ha consistido en la medida experimental de la respuesta en frecuencia de remaches correctamente e incorrectamente instalados, y el postproceso de datos para la obtención de métodos de clasificación.

Para eliminar la influencia de la estructura donde los remaches están instalados, se ha considerado un límite inferior en frecuencia de 5kHz por debajo del que no se han estudiado las respuestas en frecuencia; llegando hasta 50kHz.

Para conseguir una excitación adecuada, se ha utilizado un excitador piezoeléctrico, mostrado en la Figura 3.5.1.



Figura 3.5.1. Izquierda: excitador piezoeléctrico con montaje por vacío. Centro y derecha: ejemplo de montaje del excitador sobre una probeta remachada.

Las amplitudes de movimiento provocadas en sobre los remaches se han controlado y mantenido a niveles muy pequeños, con el objetivo de que la estructura sea excitada muy localmente. De forma que los fenómenos que se registren sean locales también, y no se vean afectados por la posición concreta de cada remache en la probeta

Respecto a la medida de la respuesta de los remaches, si bien los excitadores piezoeléctricos presentan la ventaja de que se podrían adecuar para ser utilizados como actuador y sensor al mismo tiempo, debido a que el excitador particular no tiene anillos piezoeléctricos redundantes para ser usados como sensor, se ha requerido la medida externa de respuesta de los remaches. Por tanto, se ha dispuesto de un vibrómetro láser Polytec 5000 con capacidad para medir las pequeñas amplitudes de respuesta a las frecuencias requeridas.

Por simplicidad experimental, la respuesta de los remaches se ha medido desde la cabeza de cierre, pegando una pegatina reflectante en la cabeza de cierre y proyectando el láser sobre él. La Figura 3.5.2 muestra imágenes de las cabezas de cierre con pegatina reflectante y una imagen del montaje experimental para la medida de la respuesta de los remaches.

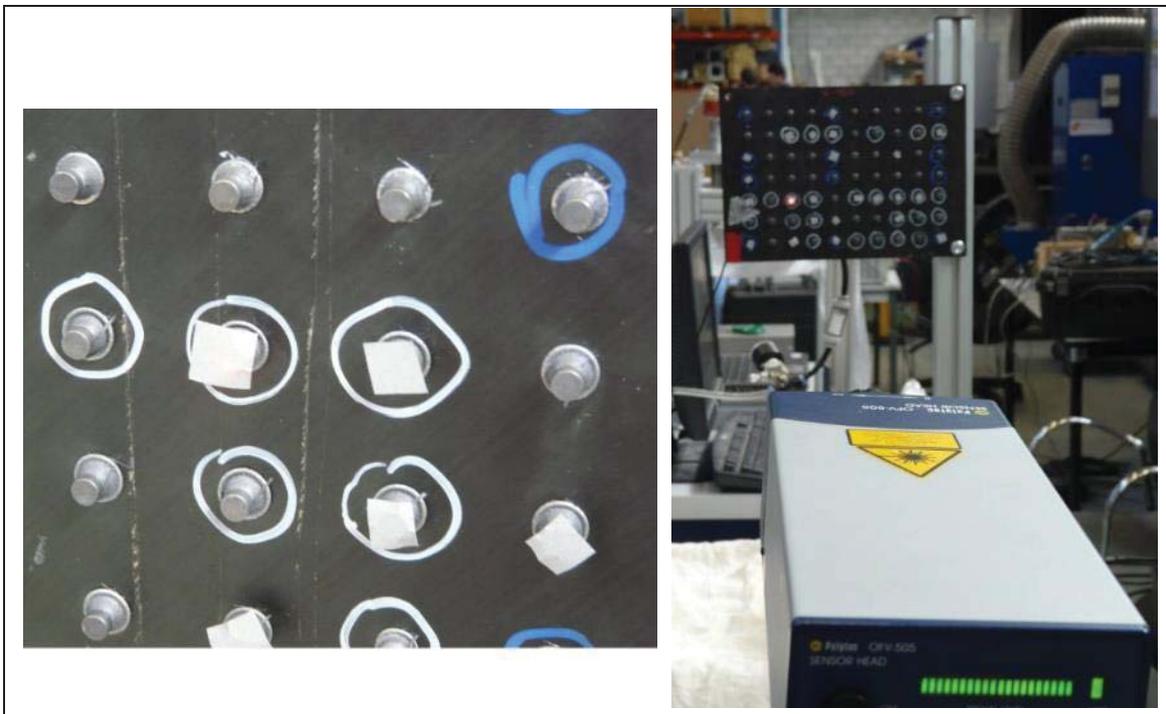


Figura 3.5.2. Izda: vista de las cabezas de cierre con pegatina reflectante. Dcha: vista del montaje experimental para la medida de la respuesta de los remaches.

La Figura 3.5.3 muestra un esquema de la cadena de medida completa: la excitación se comanda mediante PC y generada por un generador de funciones, que por una parte se registra y por otra es amplificada para poder excitar el excitador piezoeléctrico. La respuesta del remache es medida por el vibrómetro y registrada por la misma tarjeta de adquisición.

El generador de funciones utilizado es configurable desde un PC, y es capaz de generar funciones senoidales o barridos de frecuencia hasta frecuencias muy superiores a los 100kHz. Se conecta vía USB a un PC, y genera las señales

configuradas en niveles de hasta $\pm 10V$. Permite configurar las frecuencias de inicio y de fin, el salto de frecuencias y el periodo para los barridos.

El amplificador es el elemento de que da la potencia necesaria. Tiene como entrada la señal emitida por el generador, y como salida emite una señal proporcional pero de potencia suficiente: eleva el voltaje al orden de los cientos de voltios (hasta en torno a $\pm 200V \sim 250V$) requeridos por el excitador piezoeléctrico.

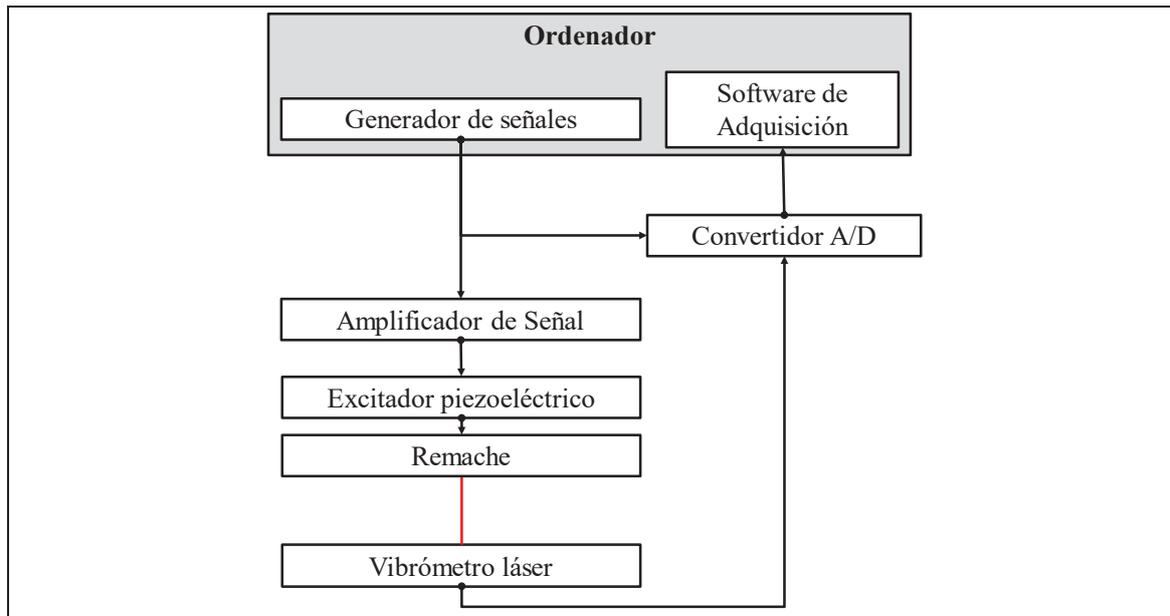


Figura 3.5.3. Esquema de la cadena de medida.

Cada uno de los remaches ensayados ha sido excitado en el rango 5kHz a 50kHz. Debido a lo amplio del ancho de banda (45 kHz), y a que el sistema no tiene capacidad para emitir un ruido blanco, por lo que se ha excitado mediante barridos en frecuencia, se ha optado por dividir el ensayo de cada remache se en tres partes, excitando un tercio del rango de estudio en cada una: 5kHz a 20kHz; 20kHz a 35kHz; 35kHz a 50kHz. De esta forma, se ha conseguido obtener FRFs con buena coherencia en todo el rango de estudio.

Se ha comprobado que si se tratara de ensayar los remaches con un barrido único desde 5kHz a 50kHz, el tiempo de medida en el que no se está excitando cada una de las frecuencias (bien porque el barrido aún no ha llegado o bien porque ha pasado ya) es demasiado grande en comparación con el tiempo de medida con excitación; y por tanto el resultado obtenido está muy influenciado por los valores residuales medidos durante el tiempo de no excitación, obteniendo coherencias inadecuadas y por tanto resultados no válidos.

Se ha utilizado una frecuencia de muestreo de 110kHz y un tiempo de medida de 30 segundos por intervalo. Las FRFs se han calculado mediante software

propio basado en MatLab aplicando ventanas Hanning con 2048 líneas y un solape del 25%.

La Figura 3.5.4 muestra una vista general del montaje experimental del ensayo, tomada durante el desarrollo del mismo.

De esta forma, se han medido las FRFs de 37 remaches de la probeta #2, tal y como recoge la Tabla 3.5.1.



Figura 3.5.4. Izda: vista general del montaje experimental. Dcha: adquisición de datos, controlador del cabezal del vibrómetro láser, generador de funciones y amplificador.

Estado	Disponibles en muestra #2	Ensayados	Total
Perfecto	12	1 5 31 35 10 41 45 50 61 65 70	18
Admisible	31	3 15 16 17 25 55 67	
Incorrectos	26	6 7 8 13 14 19 20 21 22 23 24 26 27 29 30 53 54 57 59	19

Tabla 3.5.1. Listado de remaches para los que se ha medido su FRF.

A modo ilustrativo, la Figura 3.5.5 muestra de forma gráfica el conjunto de las FRF medidas (frecuencia – magnitud). Asimismo, la Figura 3.5.6 muestra esta misma información, en forma de parte real frente a parte imaginaria.

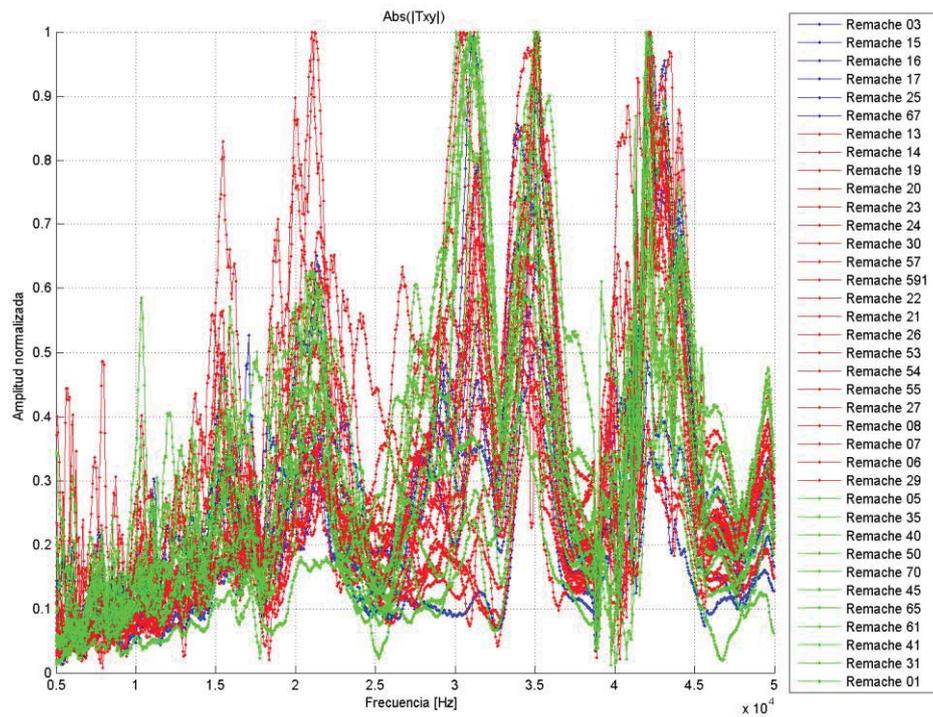


Figura 3.5.5. Gráfico conjunto de todas las FRF, magnitud frente a frecuencia.

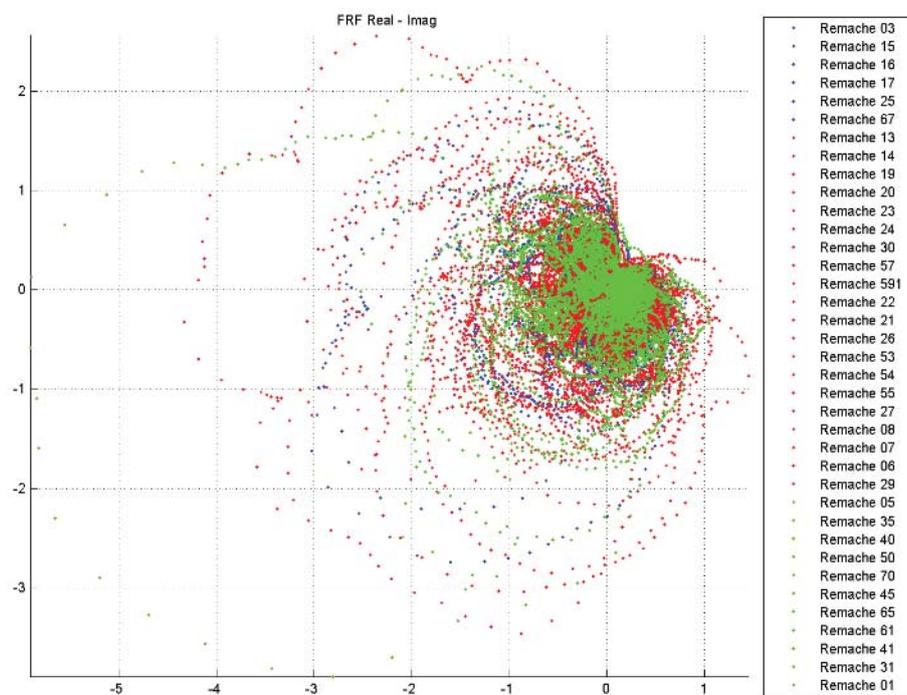


Figura 3.5.6. Gráfico conjunto de todas las FRF, parte real frente a parte imaginaria.

Las FRF de los remaches se han analizado aplicando técnicas de clasificación supervisadas, dado que se conoce el estado de cada uno de los remaches. Tan sólo se han considerado dos niveles de calidad de la instalación de los remaches: correctamente instalados (Admisibles o Perfectos) e incorrectamente instalados (Inadmisibles).

Con los datos experimentales de FRF y el estado del remache, se ha procedido a postprocesar la información atendiendo a dos estrategias:

- i. Mediante la generación de árboles de decisión
- ii. Mediante el entrenamiento de una red neuronal

i) Generación de árboles de decisión:

Un árbol de decisión, conocido también como diagrama de árbol, es una herramienta de soporte en la toma de decisiones que utiliza un grafo o modelo de decisiones. Se trata de una ley de clasificación que atiende a las características particulares de cada uno de los ítems a clasificar.

Se han empleado tres algoritmos diferentes para la generación de árboles de decisión: REPTree, CART, J48; siendo los árboles obtenidos mediante los algoritmos CART y J48 idénticos. La Figura 3.5.7 muestra gráficamente el árbol de decisión obtenido mediante el algoritmo REPTree y la Figura 3.5.8 el correspondiente a los algoritmos CART y J48.

El algoritmo obtenido mediante REPTree clasifica los remaches en función de la magnitud de las FRF en las frecuencias de 9790Hz y 1620Hz. El algoritmo obtenido mediante CART o mediante J48 clasifica los remaches en función de las magnitudes de las FRF a 1005Hz, 13485Hz y 2211Hz.

El árbol de decisión obtenido mediante CART o mediante J48 clasifica el total de remaches cometiendo un único error, clasifica como correcto un remache incorrectamente instalado.

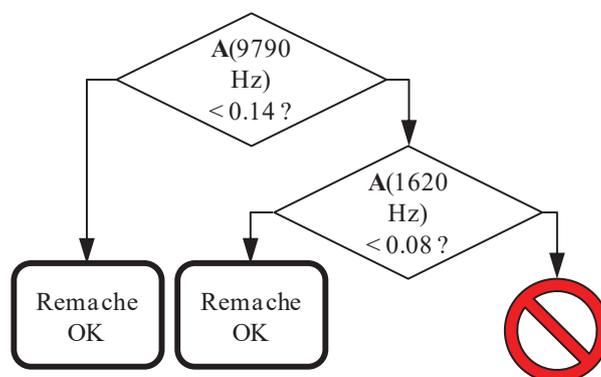


Figura 3.5.7. Árbol de decisión obtenido mediante el algoritmo REPTree.

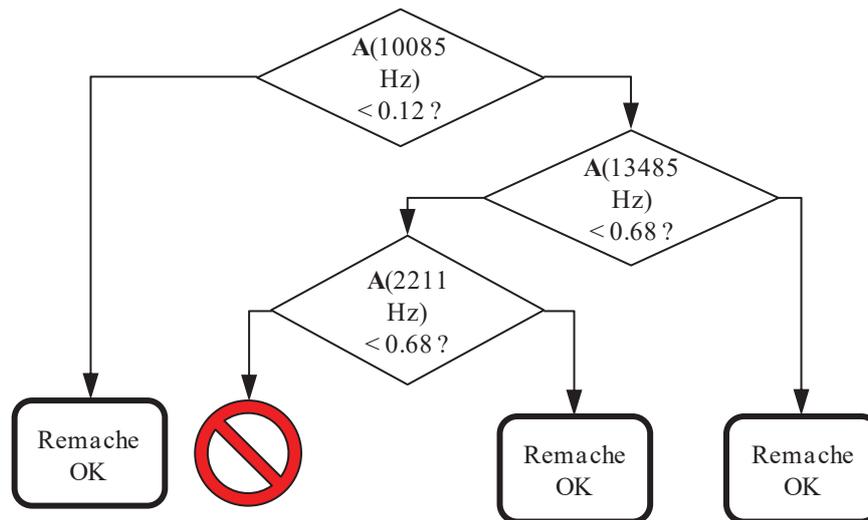


Figura 3.5.8. Árbol de decisión obtenido mediante los algoritmos CART y J48.

ii) Entrenamiento de una red neuronal:

Las redes neuronales son un modelo de computación inspirado en el proceso biológico de procesamiento de la información sensorial por parte del tejido nervioso. Desde un punto de vista matemático, una red neuronal es equivalente a una función matemática no lineal y no explícita en la que las entradas se combinan para dar una salida que se ajuste a un conjunto de entrenamiento dado.

Existen diferentes métodos de entrenamiento que permiten ajustar las constantes o pesos de la función de forma que el error cometido por la red neuronal al ajustar los datos dados sea mínimo.

En este caso se ha empleado una red neuronal multicapa con una única capa oculta. Se han utilizado 15, 30 y 60 neuronas en la capa oculta y función de activación sigmoide. Cada una de las componentes del espectro de frecuencias se asocia con una neurona de entrada y hay una salida única que es la clasificación del remache.

En los tres casos (con 15, con 30 y con 60 neuronas en la capa oculta), la red neuronal obtenida tras el proceso de entrenamiento ha detectado correctamente todos los remaches para los que se ha medido su FRF.

3.5.2. Conclusiones del análisis de viabilidad de los métodos basados en respuesta en frecuencia

Se ha obtenido un árbol de decisión capaz de clasificar los 37 remaches para los que se ha medido su FRF cometiendo un único error, lo que supone una tasa de acierto del 97%.

Asimismo, mediante el entrenamiento de una red neuronal se han podido clasificar el total de los remaches correctamente.

Sin embargo, se deben tener en cuenta los siguientes condicionantes:

- El número total de casos es limitado, 37 casos; cuando los algoritmos utilizados están diseñados para su aplicación en lotes de datos de uno o varios órdenes de magnitud mayores.
- No se conoce un fenómeno físico que se pueda asociar a las leyes de clasificación obtenidas.

Por tanto, la capacidad del método obtenida debe tomarse como preliminar. Es posible que las leyes de clasificación obtenidas respondan a efectos numéricos de los datos disponibles en lugar de a fenómenos físicos que realmente respondan al estado de la instalación del remache.

3.6. Sensibilidad de las tecnologías base respecto a la instalación de los remaches ciegos

Se entiende por sensibilidad la capacidad de cada tecnología para detectar que un remache ciego esté bien o mal instalado. Si una tecnología es sensible, será técnicamente viable para desarrollar en base a esa tecnología un sistema de ensayos no destructivo para clasificar los remaches.

// Shearografía

No es sensible a la colocación del remache. Por lo tanto, su aplicación a la detección de remaches ciegos mal instalados no es técnicamente viable. La reducida distancia entre remaches y el “elevado” espesor de las uniones, se consideran las razones por las que la shearografía no funciona. También se atribuye la no viabilidad del método, a que la diferencia entre el efecto de un remache mal instalado y el efecto de un remache bien instalado, en la deformación de la superficie sea mínimo o nulo, en contra de la hipótesis de partida mostrada en la Figura 2.2.12.

// Termografía

No es sensible a la calidad de la instalación del remache. Por lo tanto, su aplicación a la detección de remaches ciegos mal instalados no es técnicamente viable. La baja conductividad del material compuesto y el elevado espesor anulan este método.

// Ultrasonidos

La norma de verificación de remaches hace referencia a la longitud y diámetro de la cabeza de cierre.

La técnica de ultrasonidos permite medir el tiempo de vuelo, que está íntimamente relacionado con la longitud del pin del remache. No ha sido posible medir con ninguna técnica ultrasónica, la tensión en el remache, ni el diámetro de la cabeza de cierre, ni la existencia de huecos entre la cabeza de cierre y las pieles. Por lo cual el método tendría una capacidad de detección parcial.

En la probeta #1 (guión 5 y grip 350), la clasificación basada en el TOF ultrasónico ha detectado el 26 % de los remaches mal instalados y el 46% de los bien instalados.

En la probeta #2 (guión 6 y grip 500), la técnica de ultrasonidos ha detectado el 39% de los remaches mal instalados y el 81% de los bien instalados.

// Respuesta en frecuencia

Para focalizar el análisis en cada remache es necesario trabajar con las funciones de respuesta en frecuencia del remache, cuando es excitado a frecuencias muy elevadas entre 5000Hz hasta 50kHz.

Las FRF obtenidas en esas condiciones, han permitido deducir reglas y árboles de decisión que clasifican los remaches como buenos o malos con un acierto del 100%.

Estos resultados aunque prometedores, no son concluyentes, no es posible garantizar que las leyes obtenidas sean de aplicación cuando se apliquen a un número de muestras (de remaches) más grande. Estos excelentes resultados obtenidos en los ensayos reducidos, podrían no reproducirse en ensayos a gran escala. Las técnicas de tratamiento de datos que ha sido aplicadas para obtener los modelos que han permitido clasificar el 100% de los remaches ensayados, son muy potentes y tienen mucha capacidad de encontrar leyes de clasificación para grupos reducidos de muestras, incluso cuando estas leyes de clasificación no pudieran representar ningún fenómeno o modelo físico real.

3.7. Conclusiones del análisis de viabilidad

La Tabla 3.7.1 resume los resultados de clasificación obtenidos para el método basado en ultrasonidos (clasificación en base al TOF) y de los métodos basados en respuesta en frecuencia.

		<i>(muestra 1)</i>		<i>(muestra 2)</i>		<i>(muestra 2)</i>
Malos		42		26		19
Buenos		28		43		18
tecnología US	Malos	⁽¹¹⁾ 26%	⁽²⁰⁺¹⁾ 50%	⁽¹⁰⁾ 38%	⁽²²⁺¹⁾ 88%	⁽¹⁹⁾ 100%
	Buenos	⁽¹³⁾ 46%		⁽³⁵⁾ 81%		⁽¹⁸⁾ 100%
	total CLASIFICADOS	⁽²⁴⁾ 34%	⁽³⁴⁾ 49%	⁽⁴⁵⁾ 65%	⁽⁵⁸⁾ 84%	⁽³⁷⁾ 100%
	ERROR sobre clasificados	0%	⁽¹⁾ 3%	0%	⁽¹⁾ 2%	0%
	total SIN CLASIFICAR	⁽⁴⁶⁾ 66%	⁽³⁶⁾ 51%	⁽²⁴⁾ 35%	⁽¹¹⁾ 16%	0%
						Métodos FRF

Tabla 3.7.1. Resumen de las capacidades de los métodos por ultrasonidos y de respuesta en frecuencia.

Además de cuánto de sensible es una tecnología con respecto a la colocación del remache, hay otros criterios a valorar, antes de decidir si una tecnología puede ser la base para el desarrollo de un ensayo no destructivo que clasifique los remaches. Estos otros criterios de evaluación de aptitud del método son:

- Coste del sistema final
- Tiempo ciclo de inspección
- Nivel de cambios que introduce en el proceso actual
- Automatización de la inspección
- Integrabilidad en una máquina y operatividad en condiciones de taller
- Nivel de formación del operario
- Peso y volumen del módulo

La Tabla 3.7.2 recoge la evaluación de las distintas tecnologías con respecto a los criterios de evaluación. Se ha decidido incluir la monitorización del proceso como posible tecnología debido a la potencial capacidad de la monitorización del proceso en base a las patentes existentes.

Cualquiera de las tres tecnologías con posibilidades: ultrasonidos, respuesta en frecuencia y monitorización del proceso, es automatizable e integrable en los dispositivos de remachado actuales. El tiempo de inspección, en el caso de los ultrasonidos y de la monitorización, cumpliría con el requisito relativo al tiempo

de ciclo. Sin embargo, la obtención de la función de respuesta en frecuencia necesitaría del orden del minuto por remache.

La monitorización de proceso clasificaría el remache tras la inserción del mismo, por lo cual no satisface el requisito de que el proceso de inspección se realice tras el desbarbado.

		ULTRASONIDOS	FRF	MONITORIZACIÓN	SHEAROGRAFÍA	TERMOGRAFÍA
Capacidad de...	...distinción bueno-malo Sensibilidad.	Parcial	Apto	Potencialmente capaz (patentes)	No	No
	...Integración en máquina	Apto	Apto	Apto		
	...Automatización	Apto	Apto	Apto (pero antes del desbarbado)		
t	Tiempo de ciclo	ms	segundos	online		
€	Equipamiento	<20k€	<20k€	<2k		
Sistema final	Capacidad de distinción	Parcial	Posible 100%	Posible 100%		
	Sistema manual	Apto	Apto	Apto		

Tabla 3.7.2. Evaluación de las tecnologías con potencial para el desarrollo de un método de clasificación según los criterios evaluación de aptitud.

En consecuencia, a la vista de los resultados obtenidos en el análisis de viabilidad de las distintas tecnologías, se propone la clasificación por TOF como base para el desarrollo de un sistema de clasificación no destructivo.

Con el objetivo de expandir la capacidad del método, se propone combinar las capacidades de la clasificación por TOF con la monitorización del proceso de remachado. De esta forma, obteniendo más información sobre la instalación de cada uno de los remaches, se pretende desarrollar extender la capacidad del método de clasificación.

3.8. Resumen del capítulo

El análisis de viabilidad de las tecnologías base ha determinado que, o bien la hipótesis de partida de deformación heterogénea de la superficie en torno a los remaches incorrectamente instalados (ver Figura 2.2.12) que justifica la inspección por shearografía o por termografía activa no se cumple en la realidad,

o bien que tanto la shearografía como la termografía activa no tienen capacidad para diferenciar sus efectos.

Por el contrario, la medida del tiempo de vuelo de un pulso ultrasónico (TOF) a través del vástago del remache ha demostrado una capacidad parcial de clasificación.

Mediante métodos basados en respuesta en frecuencia y técnicas de inteligencia artificial para la obtención de árboles de decisión, ha sido posible también clasificar los remaches medidos. No obstante, el método es desestimado debido a: por una parte, la posibilidad de que se la clasificación se deba a motivos numéricos y no físicos; y por otra, el tiempo demasiado largo requerido para la obtención de FRF en caso de pretender aplicar el método en la producción industrial, que supondría costes demasiado elevados.

En conclusión, se propone continuar con el desarrollo del método basado en la medida de TOF extendiendo su capacidad combinándolo con la monitorización del proceso de remachado.

4. Desarrollo de una nueva técnica de clasificación no destructiva de remaches ciegos

4.1. Introducción

El desarrollo de la nueva técnica de clasificación no destructiva de remaches ciegos está basado en el método de clasificación por TOF, que ha demostrado una capacidad parcial de clasificación.

Se pretende analizar el proceso de remachado mediante la monitorización de sus parámetros principales, y desarrollar la nueva técnica de clasificación extendiendo la capacidad parcial del método basado en TOF con la información aportada por la monitorización del proceso.

4.2. El proceso de remachado ciego y su monitorización

El proceso de remachado está gobernado por las siguientes magnitudes, que están interrelacionadas entre ellas:

- Velocidad angular del cabezal
- Ángulo girado por el cabezal
- Par del cabezal
- Carga axial sobre el remache
- Desplazamiento axial del remache

Aunque cada una de las variables está influenciada por el resto de ellas, no se pueden describir relaciones sencillas entre ellas debido a fricciones y a la deformación plástica.

Por ejemplo, el ángulo de giro del remache no es exactamente el mismo ángulo girado por el cabezal: justo antes de la rotura del vástago, el remache dejará de girar, mientras que debido a la deformación plástica el cabezal continuará girando; y después de la rotura, el cabezal sufrirá una rápida aceleración angular, al dejar el remache de oponer resistencia al giro. El par que ejerce el cabezal está íntimamente relacionado con la carga axial sobre el remache, pero la fricción en la rosca interna del remache y la deformación plástica del vástago influyen en su magnitud también.

En la actualidad, aunque también hay remaches ciegos que se instalan manualmente mediante remachadoras semiautomáticas, la gran mayoría de los remaches se montan en máquina herramienta.

Por tanto, se ha optado por monitorizar el proceso de remachado automático y no el manual. Posteriormente, una vez desarrollado el método de clasificación, será deseable poder extenderlo para su aplicación en procesos de remachado manual. Tal y como se describe en el apartado *1.2.1 Fortalezas del remachado como tecnología de unión*, el ciclo de operaciones para el remachado automático es:

1. Posicionamiento del cabezal.
2. Taladrado.
3. Medida de espesor real de unión a remachar.
4. Aplicación de sellante en el orificio para garantizar estanqueidad de la unión.
5. Inserción del remache en el orificio.
6. Remachado.
7. Control de calidad y verificación del remache montado.
8. Fresado del pin según criterios aerodinámicos

La operación del remachado en sí se lleva a cabo mediante un motor neumático que se encuentra encapsulado en el cabezal. El motor no dispone de encoder ni de ningún otro sensor de velocidad, ni de ningún otro sensor de medida de otras magnitudes (par, presión de aire, caudal de aire u otros) a excepción de un detector de rotura del pin (en realidad, se trata de una señal digital que indica si hay aplicación de par o no en el cabezal, pero no da ninguna información de la magnitud del par).

En consecuencia, la operación de remachado se lleva a cabo en lazo abierto: una válvula abre el circuito neumático, el aire circula, provoca el giro del motor (a la velocidad de giro y par resultante en función de la oposición que oponga cada unión particular), y cuando se detecta la rotura del vástago (es decir, la no aplicación de par), se cierra la válvula y termina la operación. De esta forma, no existe retroalimentación al control de ninguna forma excepto la detección de rotura del vástago.

Debido a lo compacto y robusto de la máquina herramienta destinada a las operaciones de remachado (téngase en cuenta que se trata de maquinaria industrial diseñada para y operada a 3 turnos); se propone una instrumentación de máquina totalmente externa y no invasiva, que se capaz de medir experimentalmente las siguientes señales temporales:

- Velocidad de giro del remache: no siendo exactamente la velocidad de giro del cabezal, se considera una señal totalmente representativa del

proceso. Para las pruebas en condiciones de laboratorio es posible acceder a la cabeza de cierre y medir su velocidad de giro (por el contrario, no es posible acceder al motor neumático compacto e integrado en el cabezal de la máquina).

- Presión de aire a la entrada del motor.
- Caudal de aire de entrada al motor.
- Fuerza axial de reacción sobre los elementos de unión

No es posible monitorizar las siguientes magnitudes de interés:

- × Par en el cabezal
- × Velocidad angular del cabezal
- × Carga axial en el remache

4.2.1. Montaje experimental

La Tabla 4.2.1 recoge la instrumentación utilizada para la medida de las magnitudes de medida.

La medida de velocidad de giro de los remaches es especialmente delicada. Por una parte, a medida que se vayan instalando los remaches sobre las probetas, cada remache irá montado en una posición diferente por lo que el sistema de medida debe ser posicionado en cada remache. Y por otra parte, la cabeza de cierre se desplaza axialmente hacia la placa, por lo que el método de medida debe ser capaz de seguir o de absorber este desplazamiento.

De forma que se han propuesto dos métodos de medida de la velocidad: i) mediante el montaje de un imán diametral sobre la cabeza de cierre y el uso de un sensor de efecto hall (ver Figura 4.2.1 y Figura 4.2.3); y ii) mediante el marcado de los remaches y el uso a distancia de un tacómetro óptico (ver Figura 4.2.2).



Figura 4.2.1. Izda: imán diametral sobre soporte elástico. Dcha: montaje del imán sobre la cabeza de cierre de un remache.



Figura 4.2.2. Montaje de un soporte con marcas reflectantes para el uso de un tacómetro óptico.

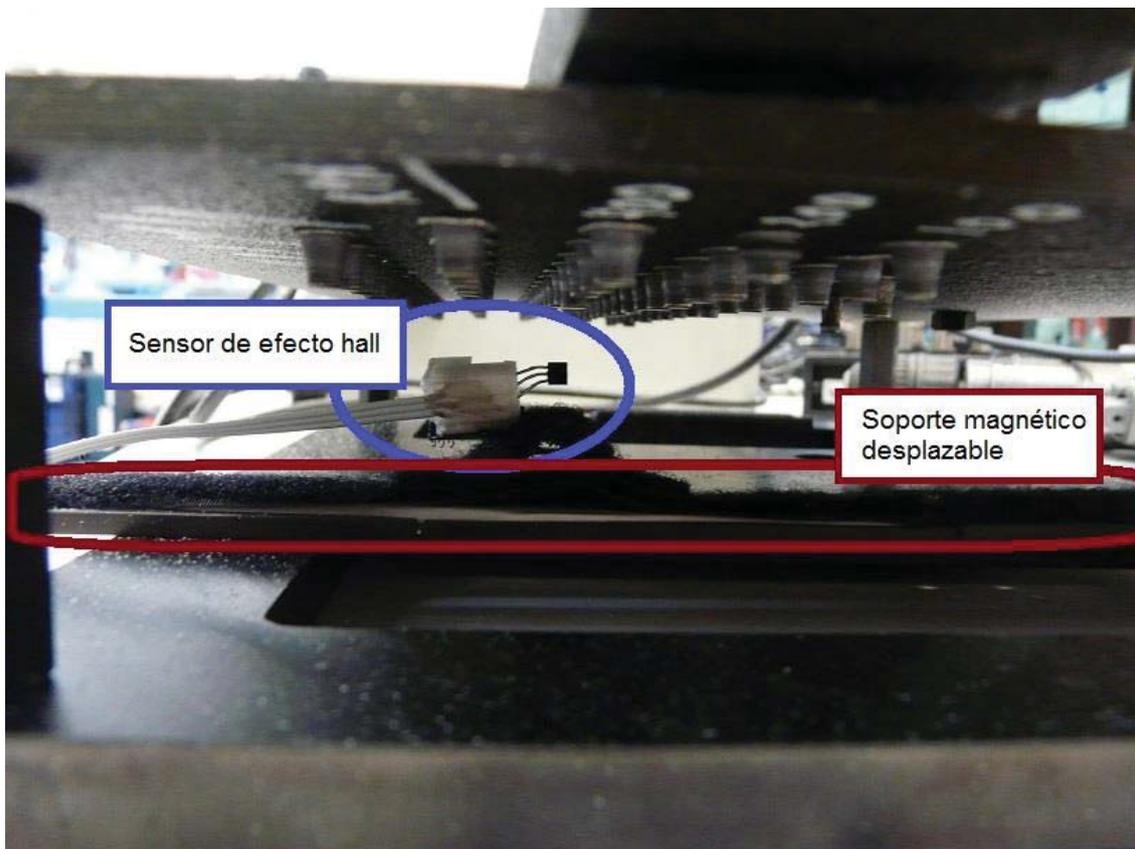


Figura 4.2.3. Montaje del sensor de efecto hall sobre un portaprobetas mediante un soporte magnético desplazable.

El montaje de estos elementos tiene unas tolerancias de funcionamiento: el rango de medida de los sensores de efecto hall es pequeño, y por tanto, una distancia demasiado grande entre el sensor y el imán en su posición inicial puede provocar la pérdida de pulsos. Por otra parte, el soporte reflectante debe ser visible por el correspondiente tacómetro óptico, con una reflexión suficiente; en caso contrario no registrará los pulsos correspondientes.

Respecto a la medida de caudal, se desconoce el caudal máximo consumido por el motor de remachado, del que además no se tiene referencia. Para estimar el caudal máximo a medir, se considera que un motor Ferry tipo NF 334-34 es asemejable al motor de remachado. Teniendo en cuenta que el caudal máximo del motor Ferry a 6bar es de unos 250L/min, se considera que un sensor capaz

de medir hasta 500L/min será adecuado para medir el caudal máximo durante el proceso de remachado.

Los sensores de caudal existentes no cubren el rango desde 0L/min hasta 500L/min, por lo que se opta por instalar dos sensores de caudal en serie: un sensor para caudales bajos, y un sensor para caudales altos. Así, se ha optado por montar un sensor de rango 10L/min a 100L/min y otro de 50L/min a 500L/min, existiendo un rango de solape desde 50L/min a 100L/min.

Magnitud	Nombre asignado	Rango	Sensor	Comentarios adicionales
Velocidad angular del remache	N	DC - >12000 rpm	Efecto hall	Imán diametral montado sobre la cabeza de cierre. La señal de pulsos del sensor de efecto hall se convierte mediante un conversor frecuencia-voltaje. La calidad de la señal analógica dependerá de la configuración del convertidor.
	Np	DC - >12000 rpm	Hall effect	Mismo imán diametral, mismo sensor de efecto hall, se registra el tren de pulsos directamente.
	Nt	5 - 200000 rpm	PCE-155	Alternativamente al sensor de efecto hall. Marcas reflectantes montadas sobre la cabeza de cierre. Registro del tren de pulsos.
Presión del aire	P	0 - 10 bar	ISE30-01-26-L	-
Reacción axial total	Fz	Ajustable, hasta 4kN	Kistler 9257BA	-
Caudal de aire	Qb	5 - 100 L/min	PF2A550-F02N	-
Caudal de aire	Qa	50 - 500 L/min	PF2A551-F04-2	-

Tabla 4.2.1. Descripción de la instrumentación para la monitorización del proceso de remachado.

Se establece una frecuencia de muestreo de 3kHz, considerada muy superior a la necesaria para recoger los fenómenos que ocurran durante el proceso de remachado. Esta consideración se basa en experiencias de monitorización de procesos similares. De todas formas, durante la puesta previa y ajuste de la

cadena de medida se comprobará que la frecuencia de muestreo propuesta es suficiente durante el registro de las señales correspondientes a los primeros remaches.

El inicio del registro se hace de forma manual, de manera que los registros entre diferentes remaches no están sincronizados en tiempo. Se registran 7 segundos (21000muestras a 3kHz), tiempo que en durante la puesta punto se comprueba que es sobradamente amplio para registrar la operación de remachado.

Para la medida de la reacción axial total se dispone de una mesa dinamométrica. Se ha diseñado una estructura de adaptación de la mesa a la estructura de la máquina herramienta, sobre la que montar la mesa dinamométrica. Asimismo, desde la mesa dinamométrica se ha diseñado un portaprobetas sobre el que montar las probetas a remachar. La Figura 4.2.4 muestra imágenes CAD del montaje experimental:

- La estructura gris oscura corresponde a la estructura original en la máquina herramienta.
- El soporte anaranjado sirve de soporte de la mesa dinamométrica a la estructura.
- El cuerpo negro corresponde a la mesa dinamométrica.
- La plancha transparente corresponde a la probeta de CFRP a remachar.
- La placa gris clara mecanizada y los prolongadores azules dotan de una separación entre la probeta a remachar y la mesa dinamométrica para insertar el método de medida de velocidad angular del remache.

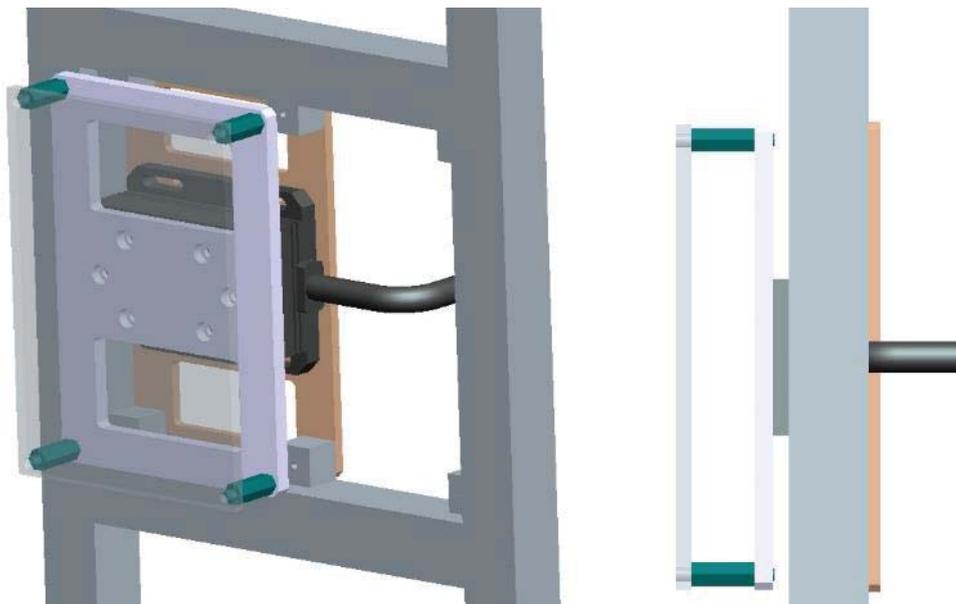


Figura 4.2.4. Imágenes CAD del montaje experimental de la mesa dinamométrica, portaprobetas y probeta a remachas.

4.2.2. Obtención de probetas

Con la instrumentación descrita, se ha procedido a generar 2 nuevas probetas remachadas registrando las señales de proceso correspondientes.

Del mismo modo que para la evaluación de las tecnologías base, para forzar la aparición de remaches incorrectamente instalados se han instalado remaches de un grip inmediatamente inferior al correspondiente al espesor de las probetas. La Tabla 4.2.2 resume las características principales de las probetas generadas.

Probeta	Guión	Grip	Grip utilizado para forzar la aparición de errores	Número de remaches instalados
A	Probeta utilizada para puesta a punto del sistema de adquisición y de la cadena de medida.			
B	5	200	150	84
C	5	250	200	84

Tabla 4.2.2. Características de las probetas generadas bajo monitorización del proceso.

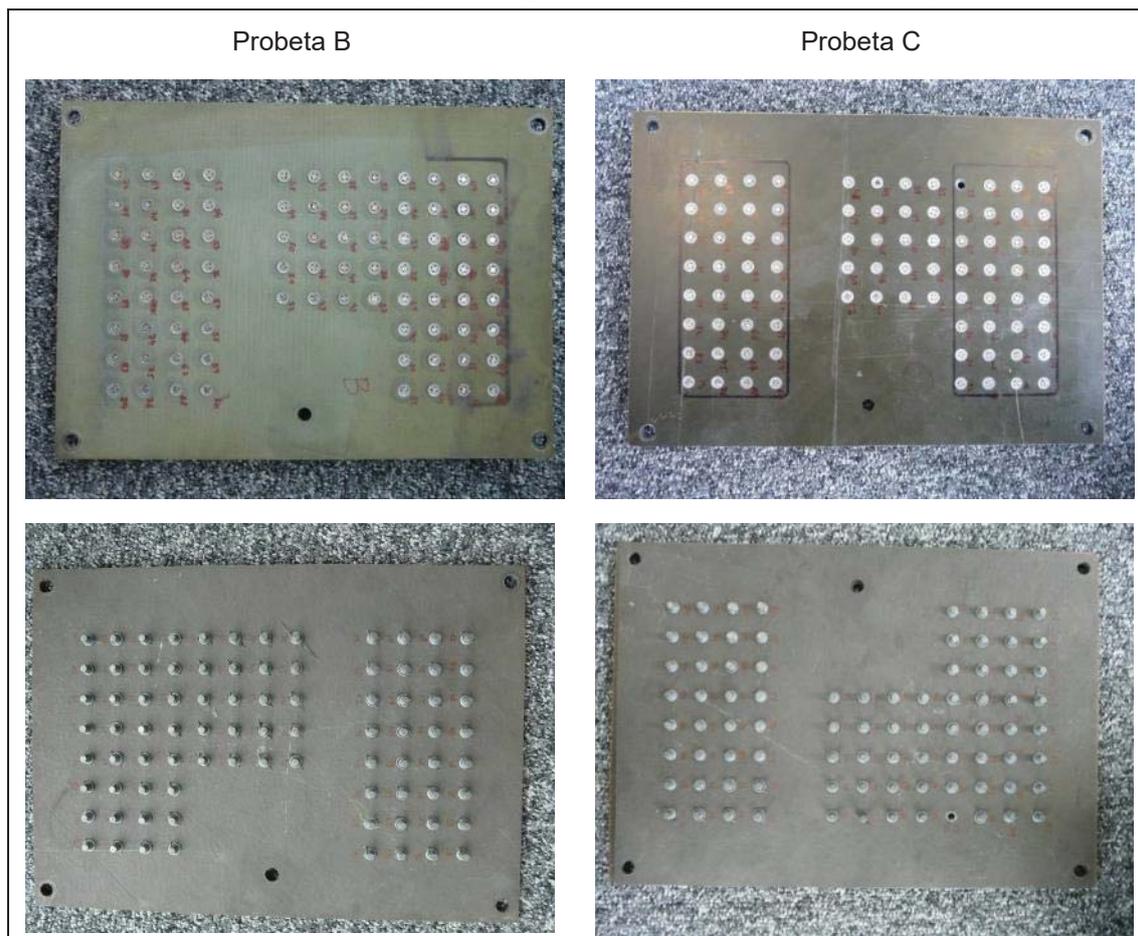


Figura 4.2.5. Izda: Cara vista y cara ciega de la probeta B. Dcha: Cara vista y cara ciega de la probeta C.

Debido a errores puntuales en la medida experimental, de los siguientes remaches no se han obtenido todas las señales temporales:

Probeta	Remaches para los que no se han medido todas las señales temporales
B	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 16, 20, 40, 41
C	5, 10, 25, 26, 57, 63, 72

Tabla 4.2.3. Identificación de remaches para los que no se han obtenido todas las señales deseadas.

4.3. Verificación del método de clasificación basado en TOF en las probetas B y C

La generación de nuevas probetas permite evaluar la capacidad del método de clasificación por TOF en dos nuevos lotes de remaches. La Tabla 4.3.1 recoge los TOF correspondientes a la probeta B y la Tabla 4.3.2 a la probeta C.

Probeta B					
Número	TOF [μ S]	Instalación [Correcto - 1; Incorrecto -0]	Número	TOF [μ S]	Instalación [Correcto - 1; Incorrecto -0]
1	3.84	1	43	3.76	1
2	3.72	1	44	3.85	1
3	3.66	1	45	3.92	1
4	3.84	1	46	3.62	0
5	3.71	1	47	3.74	0
6	3.80	1	48	3.73	0
7	3.69	1	49	3.67	1
8	3.61	1	50	3.78	0
9	3.60	0	51	3.92	0
10	3.58	0	52	3.65	0
11	3.48	0	53	3.79	1
12	3.52	0	54	3.73	1
13	3.46	0	55	3.40	0
14	3.91	1	56	3.62	0
15	3.77	1	57	3.64	0
16	3.83	1	58	3.45	0
17	3.78	1	59	3.62	1
18	3.82	1	60	3.90	1
19	3.63	0	61	3.78	0
20	3.62	1	62	3.41	0
21	3.64	0	63	3.43	0
22	3.77	1	64	3.38	0

23	3.91	0	65	3.38	0
24	3.67	0	66	3.43	0
25	3.73	1	67	3.42	0
26	3.73	0	68	3.43	0
27	3.56	1	69	3.74	1
28	3.62	1	70	3.69	1
29	3.69	1	71	3.69	1
30	3.86	1	72	3.74	1
31	3.51	1	73	3.76	1
32	3.70	0	74	3.65	1
33	3.91	1	75	3.69	1
34	3.73	1	76	3.62	1
35	3.74	1	77	3.77	1
36	3.77	1	78	3.72	1
37	3.81	1	79	3.70	1
38	3.71	1	80	3.72	1
39	3.86	1	81	3.70	1
40	3.67	1	82	3.63	1
41	3.83	1	83	3.68	1
42	3.74	1	84	3.84	1

Tabla 4.3.1. TOF correspondientes a los remaches de la probeta B.

Probeta C					
Número	TOF [μS]	Instalación [Correcto - 1; Incorrecto -0]	Número	TOF [μS]	Instalación [Correcto - 1; Incorrecto -0]
1	4.33	1	43	no medible	0
2	4.29	1	44	4.25	1
3	4.32	1	45	4.30	1
4	4.30	1	46	4.33	1
5	4.26	1	47	4.43	1
6	4.31	1	48	4.40	1
7	4.4	1	49	4.39	1
8	4.27	1	50	4.31	1
9	3.88	0	51	4.27	1
10	3.94	0	52	4.38	1
11	3.91	0	53	3.86	0
12	3.97	0	54	3.91	0
13	3.91	0	55	3.95	0
14	3.90	0	56	3.91	0
15	3.89	0	57	3.89	0
16	3.89	0	58	3.89	0
17	3.95	0	59	3.87	0
18	3.94	0	60	4.37	0

19	3.79	0	61	3.96	0
20	3.88	0	62	3.92	0
21	3.93	0	63	4.28	1
22	3.96	0	64	4.31	1
23	3.93	0	65	4.29	1
24	3.90	0	66	3.96	0
25	no medible	0	67	3.92	0
26	4.06	0	68	3.89	0
27	3.85	0	69	3.89	0
28	3.89	0	70	3.94	0
29	4.07	0	71	3.85	0
30	3.92	0	72	4.27	1
31	3.94	0	73	4.38	1
32	3.81	0	74	4.29	1
33	4.34	1	75	4.44	1
34	4.29	1	76	4.31	1
35	4.31	1	77	4.27	1
36	4.30	1	78	4.30	1
37	4.30	1	79	4.31	1
38	4.34	1	80	4.39	1
39	4.41	1	81	4.28	1
40	4.28	1	82	4.22	1
41	4.34	1	83	4.36	1
42	4.34	1	84	4.35	1

Tabla 4.3.2. TOF correspondientes a los remaches de la probeta C.

Se ha procedido a evaluar el método de clasificación por TOF con los nuevos lotes de remaches.

La Figura 4.3.1 muestra gráficamente la clasificación en base a TOF de los remaches de la probeta B: puede observarse la tendencia observada descrita en el apartado 3.4 *Análisis de viabilidad de la tecnología base 03: Métodos basados en ultrasonidos* según la cual los remaches más cortos son incorrectos. No obstante, no se aprecia un límite superior a partir del cual los remaches son correctos.

La Figura 4.3.2 muestra la clasificación en base a TOF de los remaches de la probeta C. En este caso, se observa una clara tendencia de agrupación de los remaches correcta o incorrectamente instalados en función del TOF: los remaches de TOF menor son incorrectos y los de TOF mayor están correctamente instalados.

No se conocen los motivos de un comportamiento tan diferenciado entre las placas, si bien en todo caso se mantiene la tendencia observada en el análisis de viabilidad.

A la vista de los resultados, se confirma la capacidad parcial del método de clasificación de la calidad de la instalación de remaches en base al TOF.

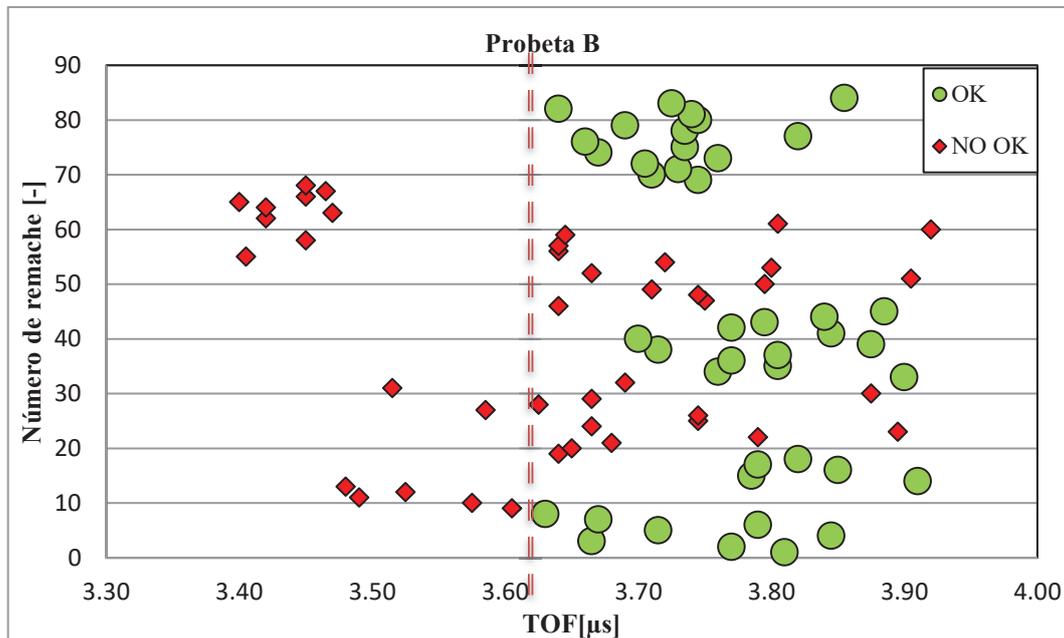


Figura 4.3.1. Clasificación en base a TOF de los remaches de la probeta B. Se identifica límite inferior pero no límite superior.

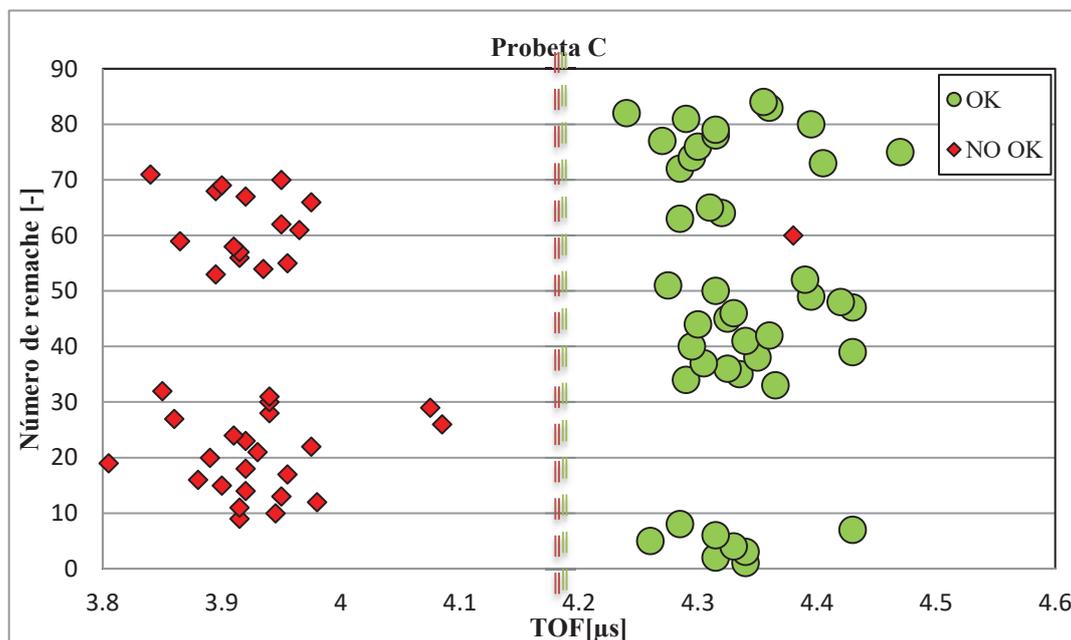


Figura 4.3.2. Clasificación en base a TOF de los remaches de la probeta C: se observa una clara tendencia de agrupación de los remaches en base al TOF.

4.4. Análisis de las señales del proceso

4.4.1. Acerca de las señales adquiridas

La frecuencia de muestreo de 3kHz ha demostrado ser suficiente para registrar los eventos relevantes del proceso de remachado. Con el objetivo de minimizar el ruido en las señales todas ellas se han suavizado mediante una media móvil centrada de 16ms (equivalente a 50 muestras).

A pesar de, a priori, haber sobredimensionado el máximo caudal a medir, las medidas experimentales muestran que el motor neumático de remachado consume más de 500L/min. De esta forma, la señal obtenida se satura y hasta aproximadamente un segundo después no mide el caudal, cuando baja de los 500L/min. Por su parte, el sensor de medida de caudal entre 10L/min y 100L/min satura nada más empezar el ciclo y no otorga información de interés. La Figura 4.4.1 muestra a modo de ejemplo la señal de caudal Q_a registrada para el remache B75 (remache número 75 de la probeta B).

Respecto a la medida de velocidad, se ha registrado mediante la colocación de imán diametral y el sensor de efecto hall. En principio, el montaje experimental ha sido adecuado, midiendo los pulsos correspondientes. Sin embargo, no existen garantías de que no se hayan perdido pulsos en algún remache. Por otra parte, no se considera apta la señal de velocidad convertida mediante convertidor frecuencia-voltaje N . La conversión de pulsos a señal continua se realiza mediante promediado exponencial de una duración determinada por la constante de tiempo del convertidor. En el caso de velocidades altas, o de muchos pulsos por vuelta, esta conversión es válida. Por el contrario, los resultados de los ciclos de remachado muestran que en la señal convertida se puede apreciar la influencia del promediado exponencial. Se considera que este efecto se debe a la forma de obtención de la señal, la propia conversión de pulsos a señal continua, y no a un comportamiento real del remache.

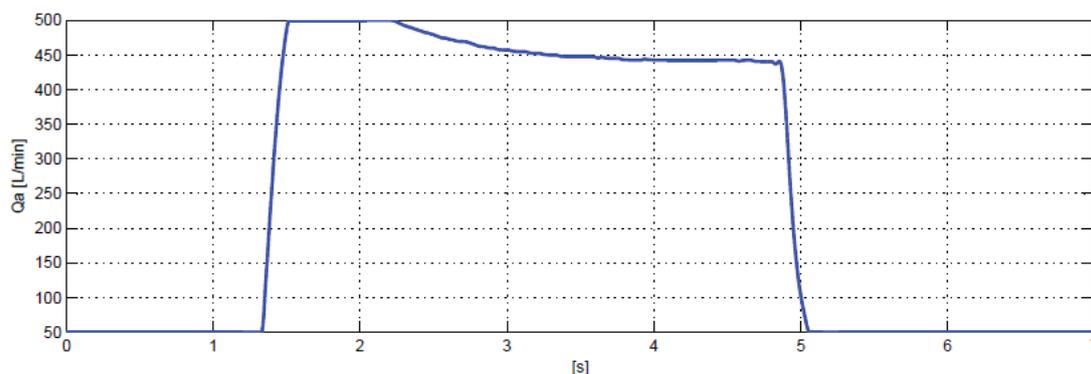


Figura 4.4.1. Ejemplo de señal de caudal Q_a , correspondiente al remache B75.

A modo ilustrativo, las figuras Figura 4.4.2 a Figura 4.4.7 muestran ejemplos de señales temporales registradas de remaches correctamente e incorrectamente instalados de ambas probetas B y C. La Tabla 4.4.1 indica el estado de la instalación de cada uno de los remaches.

	Correctamente instalado		Incorrectamente instalado	
Probeta B	#75	#33	#28	#19
Probeta C	#46	#74	#30	#53

Tabla 4.4.1. Estado de la instalación de los remaches de ejemplo.

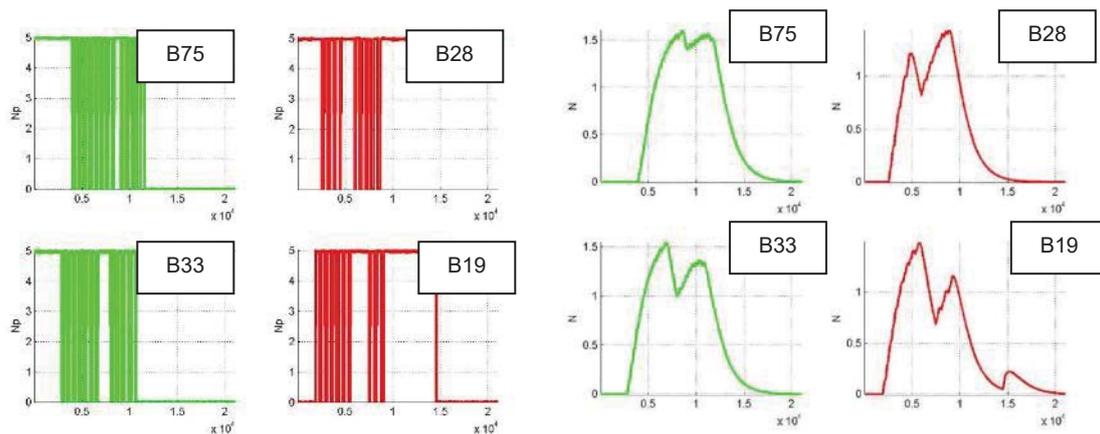


Figura 4.4.2. Izda: señal de velocidad en pulsos. Dcha: Señal de velocidad convertida mediante convertidor frecuencia-voltaje.

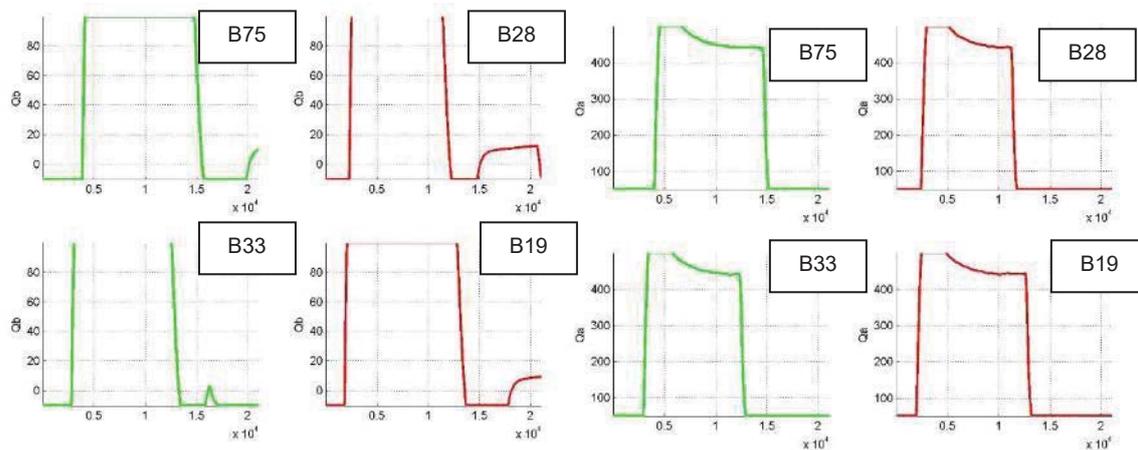


Figura 4.4.3. Izda: señal de caudal Qb [10-100L/min]. Dcha Señal de caudal Qa [50-500L/min].

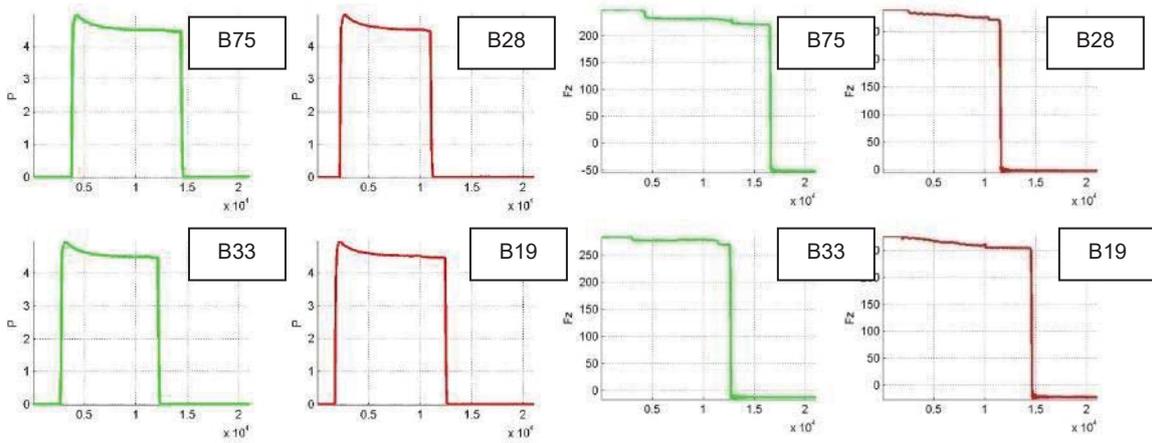


Figura 4.4.4. Izda: señal de presión. Dcha: Señal de fuerza de reacción sobre el portaprobetas.

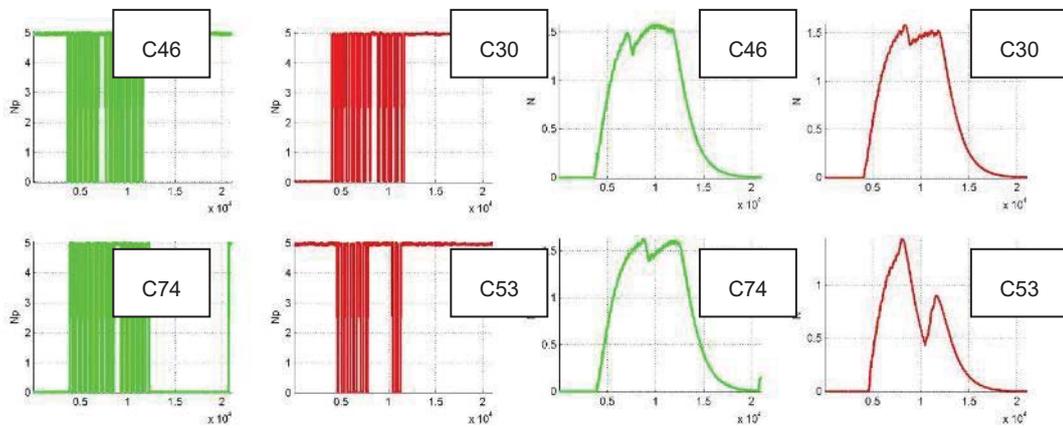


Figura 4.4.5. Izda: señal de velocidad en pulsos. Dcha: Señal de velocidad convertida mediante convertidor frecuencia-voltaje.

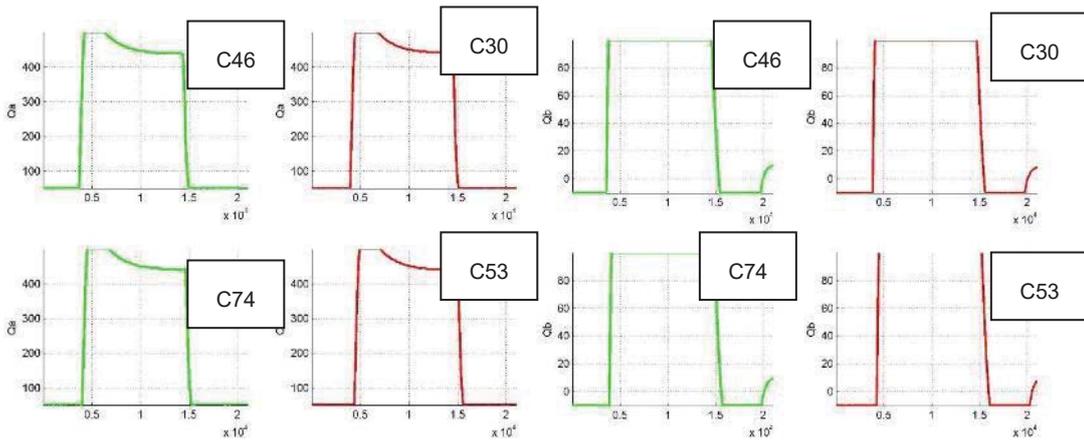


Figura 4.4.6. Izda: señal de caudal Qb [10-100L/min]. Dcha Señal de caudal Qa [50-500L/min].

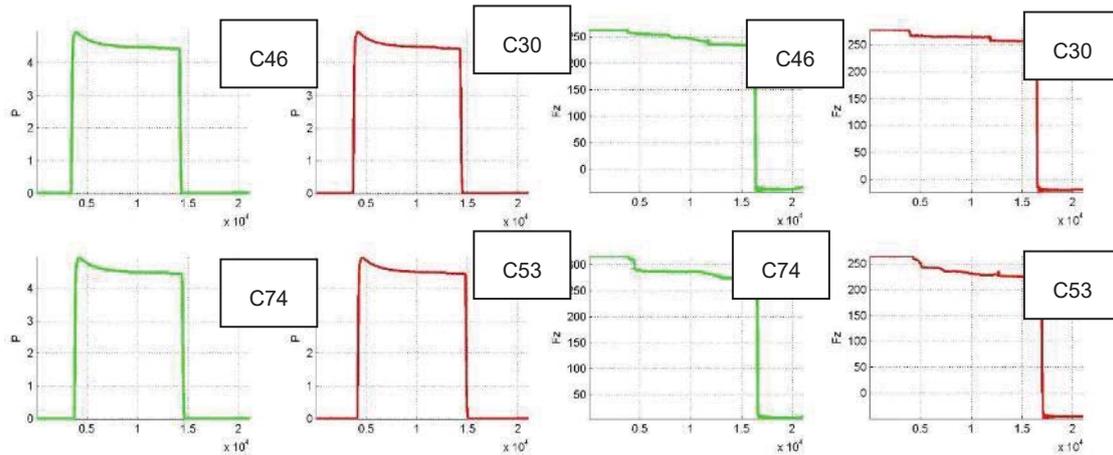


Figura 4.4.7. Izda: señal de presión. Dcha: Señal de fuerza de reacción sobre el portaprobetas.

Como última etapa en el acondicionamiento de las señales se ha procedido a obtener la señal temporal de potencia en el proceso de remachado a partir de las señales de presión y de caudal, como el producto de presión y caudal instantáneos. En los periodos de señal en los que la señal de caudal ha saturado, no se ha calculado potencia dado que el dato sería incorrecto. La Figura 4.4.8 muestra un ejemplo de señal de potencia calculada.

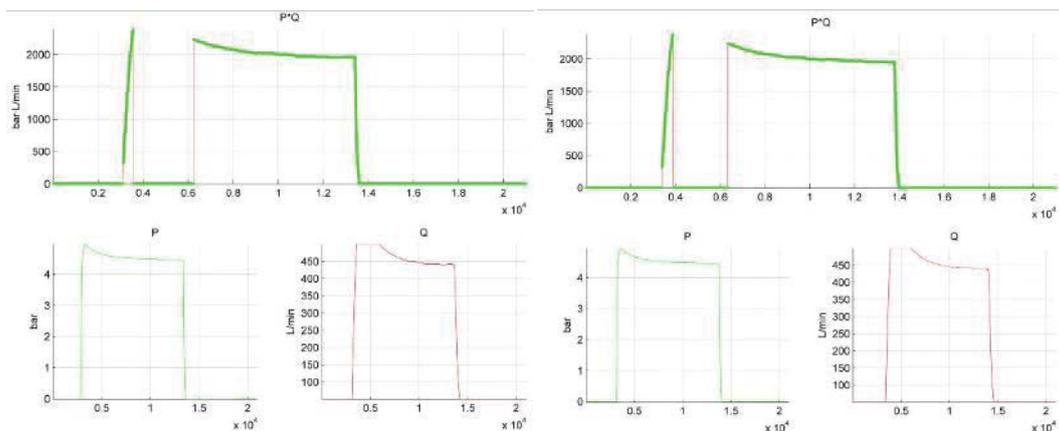


Figura 4.4.8. Señales de potencia calculadas y señales de presión y caudal de origen. Izda: B75. Dcha: C16.

4.4.2. Selección y extracción de puntos característicos. Obtención de valores de evaluación. Regiones de interés.

Selección y extracción de puntos característicos

Bajo la hipótesis de partida para la monitorización proceso, es decir, que la evolución temporal de las magnitudes principales del proceso contienen información acerca del estado de la calidad de la instalación del remache, se han seleccionado *puntos característicos* de las señales temporales.

Los *puntos característicos* corresponden a valores de las señales temporales que, a la vista de la evolución temporal de las magnitudes medidas, se considera que tienen potencial para contener información acerca de la calidad de la instalación del remache.

Posteriormente, algunos de estos puntos serán evaluados como variables, y otros serán utilizados para el cálculo de variables de valuación. Por ejemplos, los instantes de tiempo de inicio de ciclo y de fin de ciclo no contienen información por sí mismos (recuérdese que tal y como se describe en el apartado 4.2.1 *Montaje experimental* el inicio del registro temporal se ha hecho de forma manual y no de forma sincronizada con el proceso del remache). Sin embargo, la diferencia de tiempos entre ambos corresponde con el tiempo de ciclo de remachado que sí podría contener información sobre la calidad de la instalación del remache. Otros puntos, como la presión máxima alcanzada, podrían por sí mismo contener información y ser tratados directamente como variables de evaluación.

En resumen, se ha analizado la evolución temporal de las magnitudes de medida a lo largo del ciclo de remachado y se han identificado puntos característicos de las señales a partir de los cuales se obtendrán variables de evaluación, bien considerando los puntos característicos en sí mismos, bien mediante el cálculo a partir de varios puntos característicos.

Los puntos característicos considerados para cada uno de los remaches se listan a continuación. Las figuras Figura 4.4.9 a Figura 4.4.13 muestran ejemplos de identificación de los puntos característicos sobre señales reales de proceso. En estas imágenes, las señales han sido escaladas con fines ilustrativos y no corresponden a unidades físicas:

- **Instante de tiempo de inicio de ciclo:** este valor se obtiene a partir de la señal de presión, en el instante en que la presión empieza a aumentar. Se podría pensar que el punto podría extraerse también como el instante en que comienza a haber caudal de aire. Sin embargo, existe un desfase de tiempo entre la subida de presión y el flujo de caudal, tal y como muestra la Figura 4.4.9. Aunque se podría utilizar cualquiera de ellos – siempre se hiciera referencia a la misma señal siempre-, se considera más adecuado la consideración del inicio de ciclo como el instante en que empieza a subir la presión de aire.
- **Presión pico:** máxima presión a lo largo del ciclo.
- **Fin de ciclo:** el instante de fin de ciclo de remachado se considera cuando ocurre la rotura del vástago, a pesar de que después de este instante, el motor de remachado sigue girando durante un tiempo hasta que se corta el suministro de aire. La rotura del vástago se detecta en la señal de

reacción sobre la probeta como una irregularidad en la señal, como muestra la Figura 4.4.12.

- **Inicio de la deformación:** se considera el inicio de la deformación del remache como el instante en que observa la primera disturbación en la señal de fuerza de reacción. Este instante ocurre ligeramente después del inicio de ciclo. La Figura 4.4.12 muestra un ejemplo de extracción de dicho punto.
- **Puntos de medias vueltas:** inicio y final de cada una de las medias vueltas de giro del remache, extraídos de la señal de pulsos de velocidad, como muestra la Figura 4.4.11.
- **Instante de tiempo de la última media vuelta completa:** instante en el que se completa la última media vuelta.

Obtención de puntos de evaluación

El valor de evaluación de partida no proviene de las señales de proceso, se trata precisamente del TOF, del cual se sabe que tiene una capacidad parcial de clasificar los remaches según el estado de su instalación:

1. **TOF:** tiempo de vuelo.

A partir de los puntos característicos se han obtenido los puntos de evaluación sobre los que tratará de obtener leyes de clasificación para la identificación del estado de la instalación de cada remache:

2. **Presión pico:** presión máxima en el ciclo de remachado.
3. **Caudal de rotura:** caudal en el instante de la rotura del vástago
4. **Presión de rotura:** presión en el instante de la rotura del vástago
5. ΔP : diferencia de presión entre la presión pico y la presión de rotura
6. **Tiempo de ciclo (T_c):** tiempo transcurrido entre la rotura del vástago y el inicio de ciclo.
7. **Tiempo de deformación del remache:** tiempo transcurrido entre el inicio de la deformación del remache y la rotura del vástago.
8. **Número total de medias vueltas giradas.**
9. **Tiempo transcurrido entre la última media vuelta y la rotura del vástago.**
10. **Duración promedio** de cada media vuelta.
11. **Desviación típica de las duraciones de las medias vueltas.**
12. Duración de la **media vuelta más rápida.**
13. Duración de la **media vuelta más lenta.**
14. **Ratio de presiones:** ratios entre la presión pico y ΔP .
15. La **inversa del ratio de presiones.**

16. **Ratio entre el tiempo de ciclo y el tiempo de deformación del remache.**
17. **La inversa del ratio de tiempos de ciclo y de deformación.**
18. **Ratio entre el número de vueltas y el tiempo de ciclo.**
19. **La inversa del ratio entre el número de vueltas y el tiempo de ciclo.**
20. **Ratio entre los tiempos de medias vueltas más rápida y más lenta.**
21. **La inversa del ratio de tiempos de medias vueltas rápida y lenta.**
22. **Potencia de rotura:** potencia en el instante de rotura del vástago.
23. **Ratio presión y caudal:** relación entre la presión de rotura y el caudal de rotura.
24. **La inversa del ratio de presión y caudal de rotura.**
25. **Ratio entre el grip y el tiempo de ciclo.**

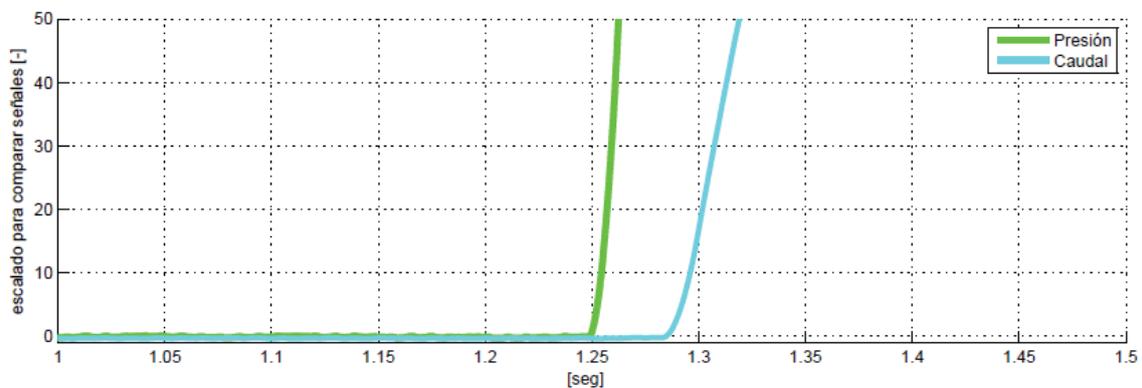


Figura 4.4.9. Ilustración del desfase entre el aumento de presión y el flujo de aire.

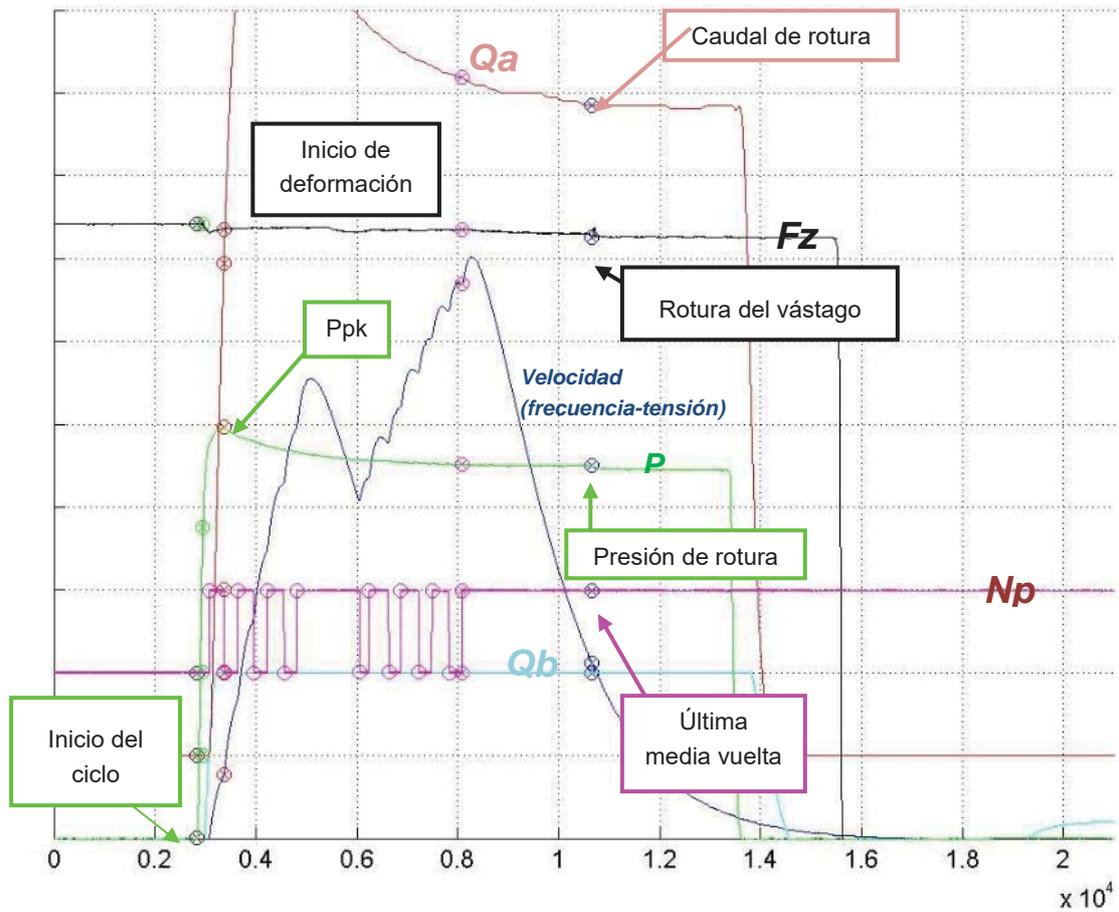


Figura 4.4.10. Superposición de señales e ilustración de puntos característicos de las señales.

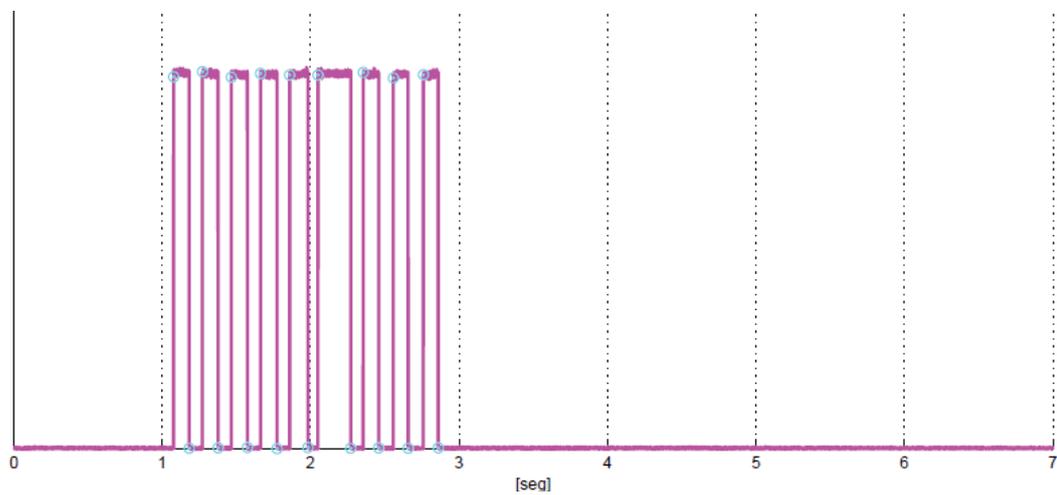


Figura 4.4.11. Señal de pulsos de velocidad con cada inicio y fin de medias vueltas identificados.

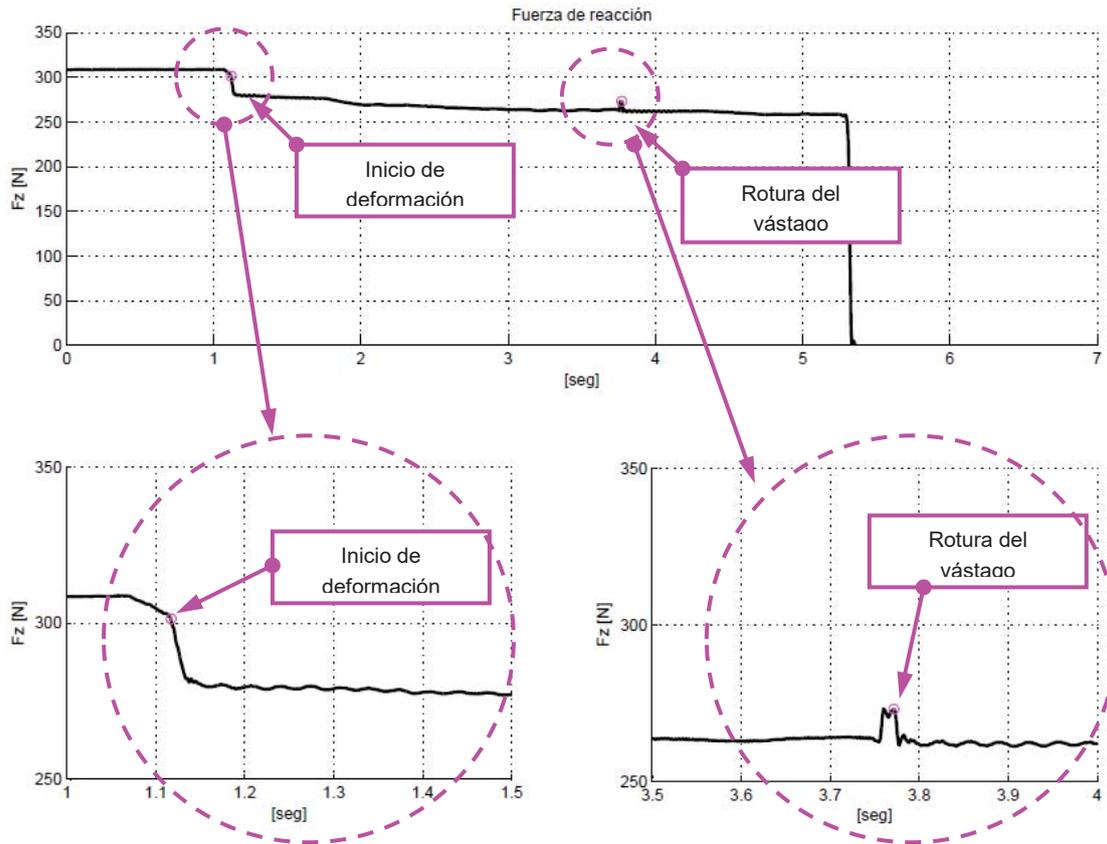


Figura 4.4.12. Puntos de inicio de deformación y rotura del vástago sobre la señal de fuerza de reacción F_z .

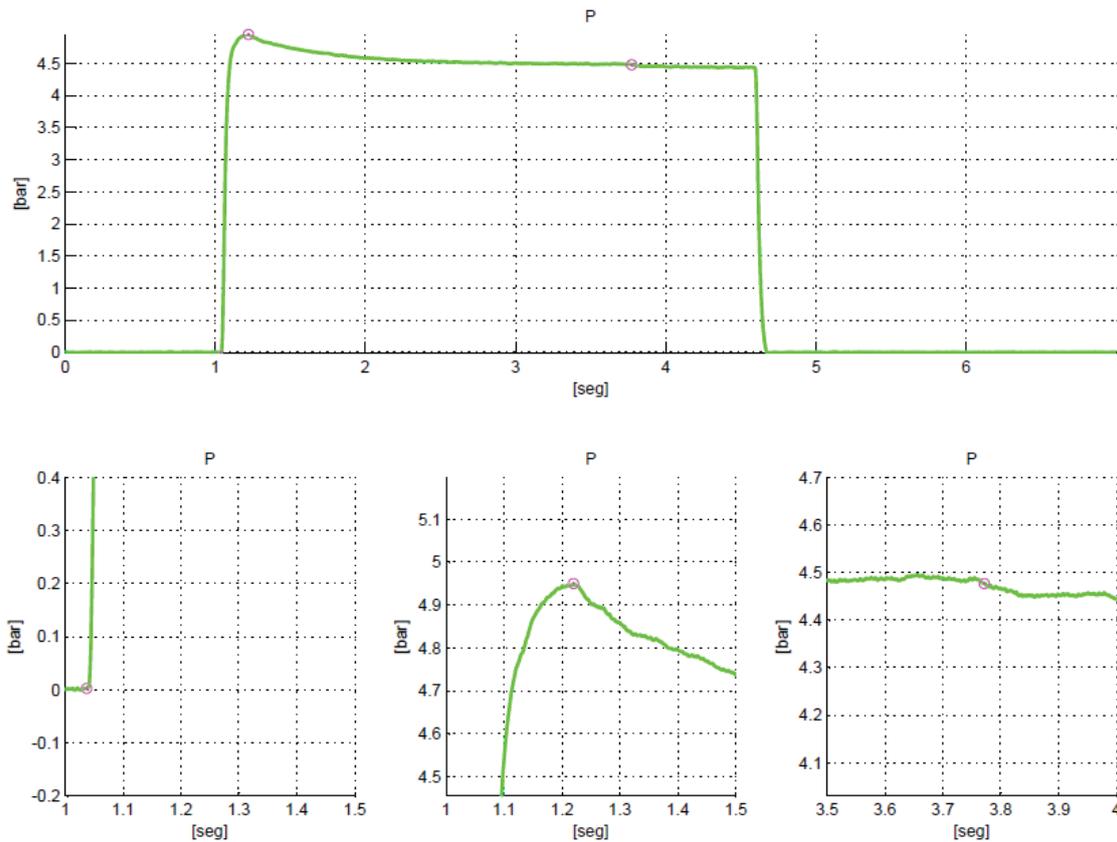


Figura 4.4.13. Puntos de inicio de remache, máxima presión y presión de rotura.

Análisis energético: división del ciclo en regiones de interés

Además de los valores de evaluación definidos, se ha considerado conveniente analizar el consumo energético durante el ciclo de remachado. Así, se ha dividido el ciclo en 5 regiones y se ha calculado la energía consumida en el proceso en cada una de ellas.

La última región se ha definido como el intervalo de tiempo transcurrido entre la última media vuelta y la rotura del vástago. El resto del tiempo del ciclo, desde el inicio del ciclo hasta la rotura del vástago, se ha dividido en 4 regiones. Para cada región, se ha calculado la energía consumida en cada región como la integración temporal de la señal de potencia en cada región.

Debido a la saturación de la señal de caudal, la región 1 se ha desestimado en todos los remaches ya que no aporta información real. La región 2, en algunos remaches contenía parte de la señal de caudal saturada y en otros no. En los remaches en los que la señal de caudal ha saturado no se han tenido en cuenta.

De esta forma, se han obtenido los siguientes valores de evaluación adicionales:

26. Energía consumida en la región 02.

27. **Energía consumida** en la región **03**.
28. **Energía consumida** en la región **04**.
29. **Energía consumida** en la región **05**.
30. **Relación de energías** consumidas entre las regiones **03** y **04**.
31. La **inversa** de la relación anterior.
32. **Relación de energías** consumidas entre las regiones **04** y **05**.
33. La **inversa** de la relación anterior.

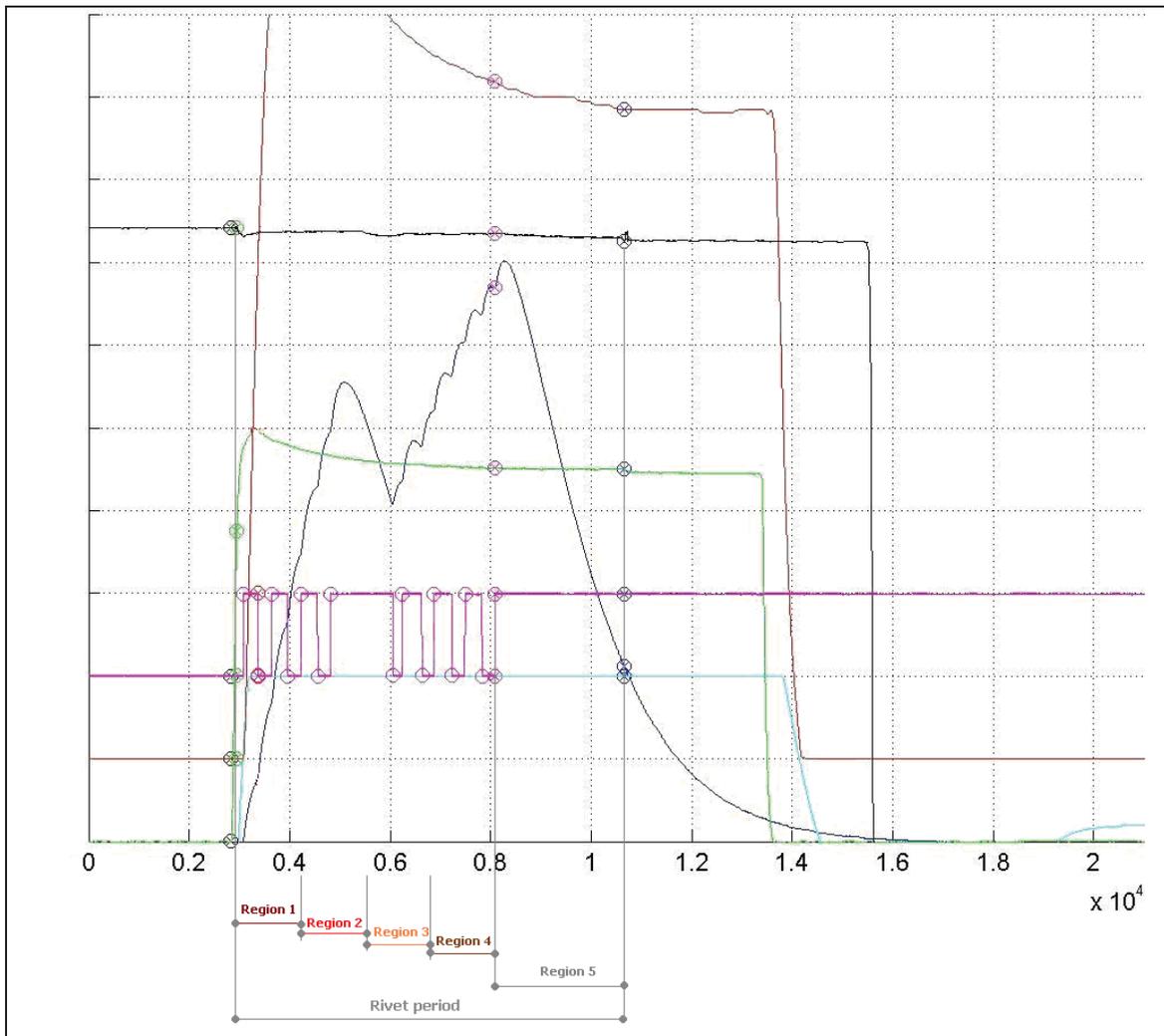


Figura 4.4.14. División del ciclo de remachado en regiones de interés.

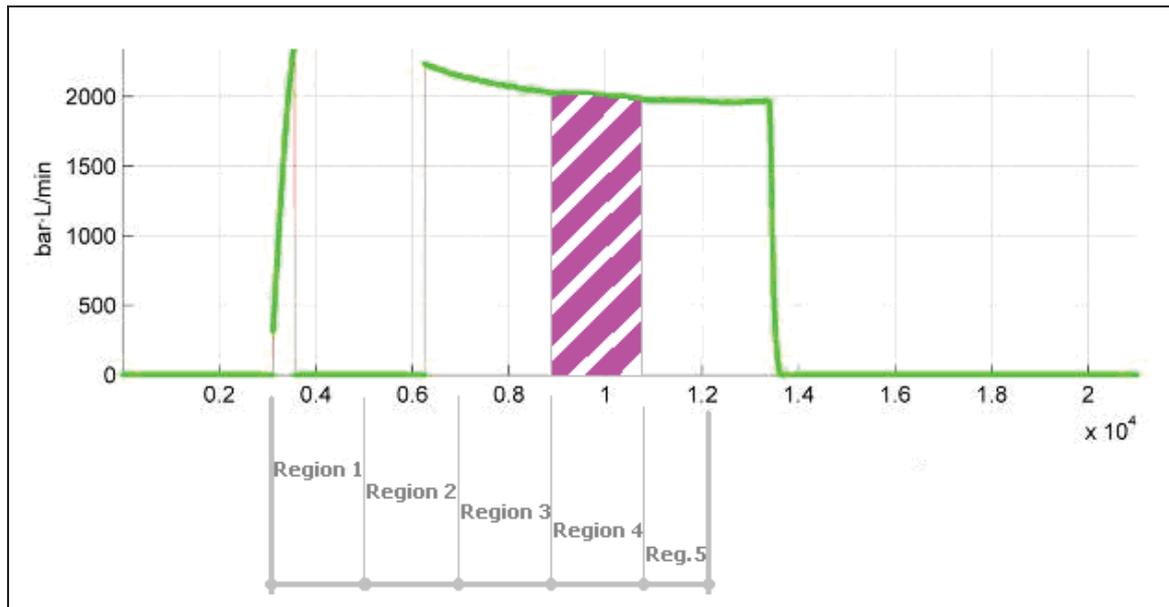


Figura 4.4.15. Ilustración del cálculo de energía consumida en cada región – ilustración para la región 4.

4.5. Análisis de datos y procedimientos de evaluación

4.5.1. Preámbulo

Se han obtenido un total de 33 valores de evaluación para cada uno de los 84 remaches contenidos en cada una de las 2 placas. Se han definido diferentes estrategias de postprocesados para tratar tal cantidad de datos con el objetivo de extraer información acerca de la instalación de los remaches (siempre y cuando dicha información esté contenida en los datos).

Las estrategias de postprocesado de datos propuestas han tenido tres enfoques principales:

1. **Evaluación de los valores de evaluación** uno a uno, de forma independiente
2. **Análisis basados en identificación mediante patrones**
 - i) Con los valores de evaluación
 - ii) Tras un análisis de componentes principales
3. **Análisis mediante algoritmos de inteligencia artificial**
 - i) Clasificación lineal
 - ii) Clasificación basada en similitudes

4.5.2. Evaluación basada en valores de evaluación de manera independiente

Como primer tratamiento, los valores de evaluación se han estudiado de manera independiente, uno a uno. El análisis directo de los valores de evaluación interrelacionándolos entre sí conllevaría una cantidad de posibilidades que hace inviable dicho análisis. Tan sólo agrupándolos de dos en dos, teniendo en cuenta que se han definido 32 valores de evaluación, conllevaría analizar 528 combinaciones. A los que habría que añadir las combinaciones de 3 en 3, de 4 en 4, etc. Por tanto, el análisis directo de los valores de evaluación se ha llevado a cabo únicamente con los valores de evaluación de uno en uno.

Para ello, los valores de evaluación se han graficado de manera similar al TOF: en el eje horizontal el valor de interés, y en el eje vertical el número de remache, que no aporta información de cara a la clasificación del remache como correcto o incorrecto. Además, en verde se representan los remaches correctamente instalados y en rojo los remaches incorrectamente instalados. De esta forma, se han obtenido un gráfico por cada variable de evaluación, es decir, un total de 32 gráficas por cada probeta.

Si el valor de evaluación en cuestión fuera representativo del estado de la instalación del remache, debería observarse alguna tendencia de agrupación de los remaches correctos o incorrectos. En general los valores de evaluación no han mostrado ninguna tendencia de cara a la clasificación del remache, tal y como puede observarse en las figuras Figura 4.5.1a Figura 4.5.2.

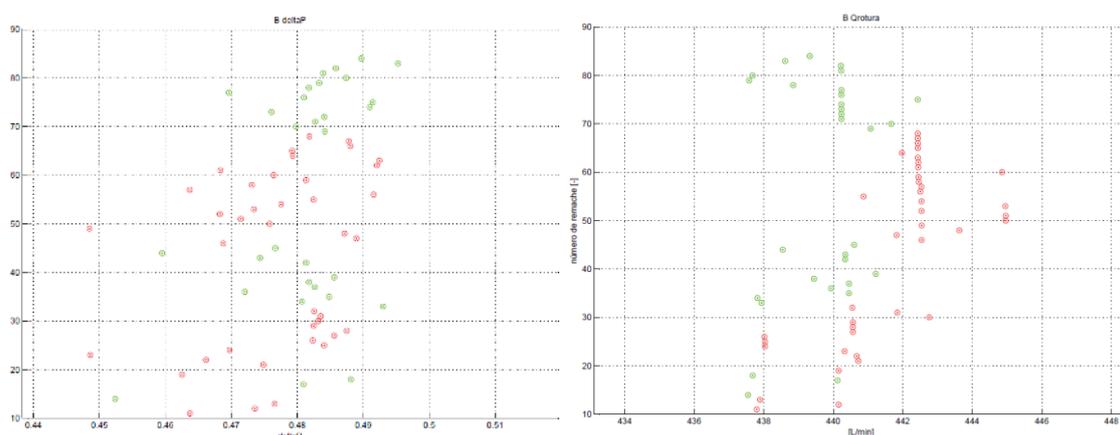


Figura 4.5.1. Valores de evaluación: izda) relación de presiones; dcha) caudal de rotura.

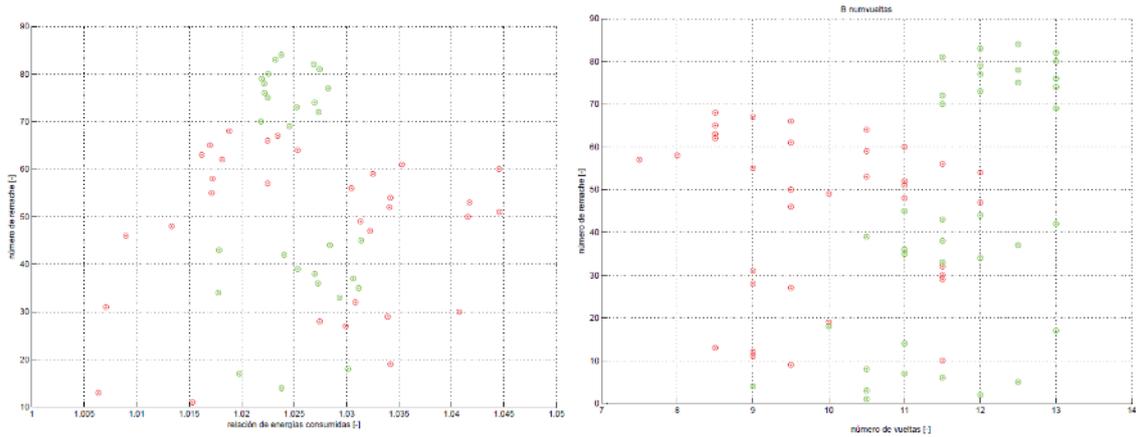


Figura 4.5.2. Ejemplos de valores de evaluación: izda) relación de energía consumida entre regiones 3 y 4; dcha) número de vueltas giradas.

A pesar de que la mayoría de valores de evaluación no son representativos por sí mismos del estado de la instalación del remache, algunos valores de evaluación presentan una capacidad parcial.

La Figura 4.5.3 muestra gráficos correspondientes al tiempo de ciclo y a la relación entre grip y tiempo de ciclo. Puede observarse claramente una tendencia de los remaches incorrectamente instalados a tener tiempos de ciclo más cortos que los remaches correctamente instalados. Por su parte, la relación entre el grip y el tiempo de ciclo muestra una tendencia similar.

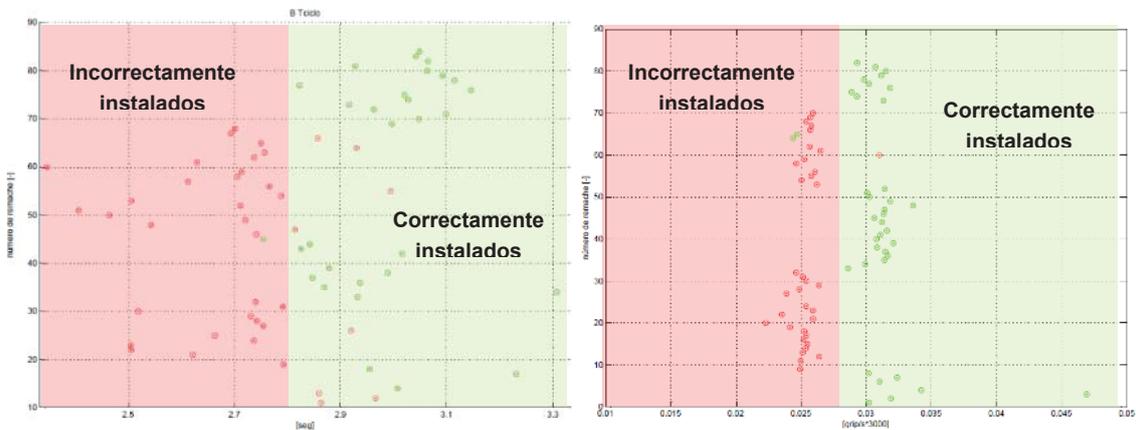


Figura 4.5.3. Izda: Probeta B, clasificación parcial en base al tiempo de ciclo; dcha: probeta C, clasificación parcial en base a la relación entre el grip y el tiempo de ciclo (dcha).

Analizados todos los valores de evaluación, se concluye que ninguno de ellos tiene de por sí información suficiente para evaluar la calidad de la instalación de los remaches.

4.5.3. Análisis basados en identificación mediante patrones

Preámbulo

La clasificación mediante patrones se basa en la comparación del ítem a clasificar con patrones de clasificación conocida. Por tanto, debe existir previamente una librería de patrones, que contengan cuantos mayores casos posibles, y que además sea representativa de todas las situaciones posibles.

Un aspecto importante de las técnicas basadas en la clasificación mediante patrones es precisamente el método de comparación del ítem con los patrones. El método de comparación a seguir no es un aspecto trivial, sino que marca la capacidad del método para obtener resultados satisfactorios. El método de comparación debe ser definido de manera precisa, lo que habitualmente supone la definición de factores y parámetros (como por ejemplo, los pesos de cada variable). El establecimiento de los valores particulares de estos factores no es trivial, debe decidirse durante la definición del método en base a decisiones que se tomen al definir el método.

Incluso una vez se haya definido el método de comparación entre el ítem a clasificar y cada patrón, la clasificación del ítem puede ser llevada a cabo de maneras muy divergentes, y también necesita ser decidido en base a criterios subjetivos, como por ejemplo:

- El ítem se clasifica como el patrón más parecido a él.
- El ítem se clasifica llevando a cabo una ponderación de la similitud con todos los patrones de la librería.
- Se realiza una preselección de los patrones más similares, y el ítem se clasifica teniendo en cuenta la similitud con ellos.
- Se hace una evaluación teniendo en cuenta cada variable de forma independiente, y el ítem se clasifica como una ponderación entre ellas.

La Figura 4.5.4 muestra un esquema del procedimiento de clasificación de un ítem basada en su identificación mediante patrones. El ítem a clasificar se compara contra cada uno de los patrones (mediante el método de comparación que se defina), obteniendo el grado de similitud, y conocida la clasificación de cada patrón (en el esquema, correcto o incorrecto). Posteriormente, una vez identificados aquellos patrones con los que la similitud es elevada, o suficiente, se clasifica el ítem en función del método de evaluación global que se defina, dando como resultado la clasificación resultante del método.

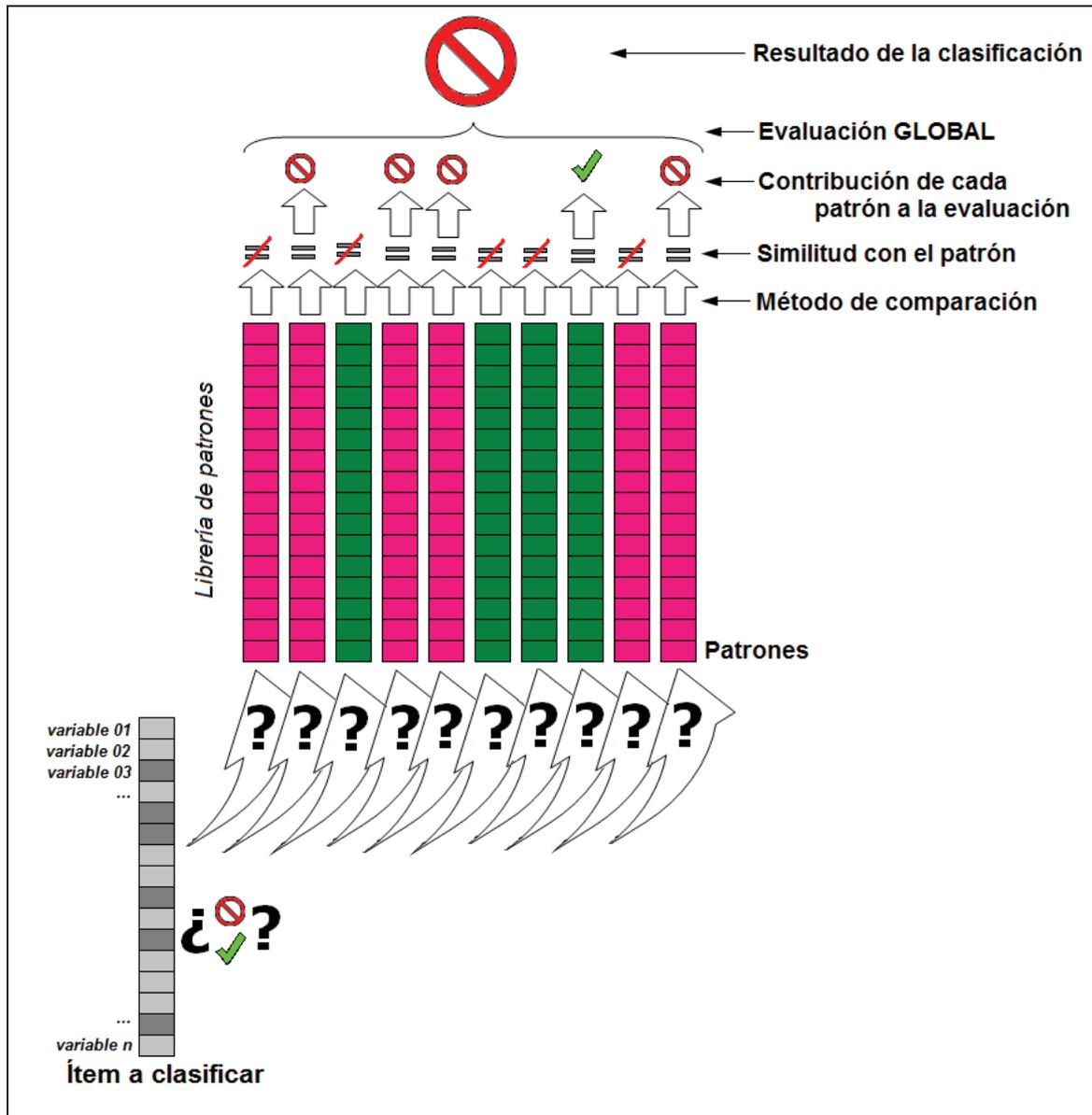


Figura 4.5.4. Esquema de clasificación basado en identificación mediante patrones.

Salta a la vista lo crucial que resultan para la validez del resultado de la clasificación tanto el método de comparación ítem-patrón como el método de clasificación global. Con los mismos datos de origen, con la misma librería de patrones, los resultados –y la validez del método de clasificación- pueden ser divergentes en función de ellos.

Para la definición de un método de clasificación basado en identificación mediante patrones, se han valorado dos opciones: una con los valores de evaluación de por sí, y otra tras realizar un análisis de componentes principales.

Identificación mediante patrones con los valores de evaluación

Siguiendo el esquema de la Figura 4.5.4, bajo este enfoque se han definido:

- El **ítem de evaluación** corresponde a los valores de evaluación de cada remache a clasificar. Se escoge un lote de remaches aleatoriamente como remaches a clasificar.
Con el objetivo de homogeneizar la importancia de cada valor de evaluación con respecto al resto de valores, los datos se han normalizado previo al inicio del análisis (se normalizan para que tengan media nula y desviación estándar unitaria). De este modo, los valores de evaluación son analizados en base a su comportamiento global, independientemente del valor numérico de las unidades en que se hayan medido (una magnitud de 100mm es idéntica a 0.1m, pero numéricamente se trata de una cantidad 1000 veces mayor).
- Los **patrones** corresponden a todos los remaches no seleccionados como ítems de evaluación, cuyo conjunto forma la librería de patrones.
- Como **método de comparación**, se han probado tres métodos diferentes:
 - Atendiendo la distancia euclídea.
 - Atendiendo a la distancia euclídea normalizada.
 - Atendiendo a la proximidad, en oposición a la distancia.Cada uno de los patrones que forman la librería tiene el mismo peso que el resto, ya que no existen motivos para considerar cualquiera de ellos como más representativo que el resto.
- Por último, también se han probado tres **métodos de evaluación global**:
 - Todos los patrones contribuyen a la clasificación.
 - Únicamente los patrones con mayor similitud contribuyen.
 - Todos los patrones contribuyen, siendo su contribución proporcional al grado de similitud.

Identificación mediante patrones con tras un análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (PCA) es una herramienta estadística para reorganizar un lote de datos, mediante un cambio de variables, obteniendo como resultado un nuevo lote de variables (conocidas como componentes principales) que están ordenadas por su grado de influencia sobre la desviación estándar. Es decir, la primera componente principal (PC1) será la responsable de mayoría de la variabilidad en el lote de datos, después la segunda componente principal (PC2), y así sucesivamente.

Estas componentes principales se obtienen como combinaciones lineales de las variables originales del lote de datos, no es necesaria ninguna información añadida. Y se obtienen tantas componentes principales como variables originales. Pero existe en efecto una gran ventaja de las componentes principales frente a los datos brutos: a menudo, las primeras componentes

principales concentran un alto porcentaje de la variabilidad de los datos, y en consecuencia, es suficiente con analizar únicamente las primeras pocas componentes principales. En consecuencia, es una herramienta útil para compresión de datos: la información original es convertida a un lote de tamaño muy inferior con muy poca pérdida de información (de variabilidad); siendo la diferencia de información entre el lote original y el comprimido muy pequeña.

En este caso los elementos para la clasificación mediante identificación de patrones se definen como:

- El **ítem de evaluación** corresponde a las primeras componentes principales de los remaches elegidos como remaches a clasificar (elegidos de forma aleatoria, como en el caso anterior).
- Los **patrones** corresponden a las primeras componentes principales de los remaches restantes, formando la librería de patrones.
- Como **métodos de comparación** entre ítem-patrón se establecen los mismos 3 métodos:
 - Atendiendo la distancia euclídea.
 - Atendiendo a la distancia euclídea normalizada.
 - Atendiendo a la proximidad, en oposición a la distancia.

Del mismo modo, cada uno de los patrones tiene el mismo peso que el resto, no se considera que ningún remache sea más representativo del resto.

- Como **métodos de evaluación** se han probado los tres mismos métodos:
 - Todos los patrones contribuyen a la clasificación.
 - Únicamente los patrones con mayor similitud contribuyen.
 - Todos los patrones contribuyen, siendo su contribución proporcional al grado de similitud.

Resultados del análisis de los métodos de clasificación mediante identificación de patrones

Todos los métodos probados para la clasificación de remaches mediante métodos de identificación de patrones han mostrado un comportamiento muy dependiente, muy sensible, a los parámetros que definen el método: porcentaje de remaches utilizados como patrones y como remaches a evaluar, selección de los valores o de componentes principales más relevantes, límite de proximidad, etc.

Dependiendo de sus valores particulares, el mismo método es capaz, o incapaz, de clasificar correctamente los remaches escogidos. Por tanto, los métodos desarrollados para clasificación de remaches basados en la identificación de patrones no son suficientemente robustos.

4.5.4. Análisis de datos mediante técnicas de inteligencia artificial

Preámbulo

Las técnicas de inteligencia artificial son una herramienta apta para el análisis de grandes lotes de datos, como el correspondiente al obtenido por la monitorización del proceso de remachado, incluso lotes cuyo tamaño es varios órdenes de magnitud superior. En consecuencia, se han utilizado algoritmos de inteligencia artificial como técnicas de postprocesado de para los datos obtenidos. En concreto, se han utilizado técnicas de clasificación supervisada y no supervisada.

Los clasificadores supervisados son leyes de clasificación que tratan de predecir nuevas situaciones basándose en situaciones previas conocidas. Es decir, basándose en valores conocidos de remaches correctamente e incorrectamente instalados, un método de clasificación supervisada sería una ley que predeciría el estado de un nuevo remache estando la predicción basada en los valores de evaluación de remaches conocidos. En parte, el concepto base de los clasificadores supervisados coincide con los métodos de identificación en base a patrones.

Por el contrario, los clasificadores no supervisados son métodos destinados a agrupar ítems similares entre sí. Esto es, basándose en los valores de evaluación, el resultado correspondería a grupos compuestos por ítems de características similares. Bajo la hipótesis de que los valores de evaluación contienen información acerca del estado del remache, se pretende obtener leyes para agrupar los remaches en grupos de correctos e incorrectos. Incluso, podrían agruparse en base a tipologías de fallo diferentes, si dicha información estuviera contenida en los valores de evaluación. La diferencia principal con respecto a los clasificadores supervisados es que en la obtención de las leyes de clasificación, los clasificadores no supervisados no utilizan la información del estado del remache de los remaches patrón.

A la vista de la revisión de las numerosas patentes que claman por métodos que clasifican el estado de los remaches en base a las señales del proceso (tal y como muestra la Tabla 1.3.1), y bajo la creencia de que en caso de que los valores de evaluación provenientes de las señales de proceso los métodos basados en inteligencia artificial serán capaces de extraer la información correspondiente, se han analizado los valores de evaluación en dos partes:

- i) Únicamente los valores de evaluación provenientes de las señales del proceso
- ii) Todos los valores de evaluación identificados (TOF y los provenientes de las señales del proceso)

De este modo, en caso de que se desarrollara un método únicamente basado en las señales del proceso, se evitaría tener que instalar un dispositivo de ultrasonidos para la medida de TOF; simplificando la instalación de los equipos necesarios para la medida de las magnitudes necesarias.

Resultados y discusión

Tras analizar el primer lote de datos, i) únicamente los valores de evaluación provenientes de las señales del proceso, se han obtenido leyes de clasificación con una tasa de acierto de en torno al 60-70%. No obstante, se han obtenido leyes diferentes para el lote de la probeta B y el lote de la probeta C, leyes basadas en valores de evaluación diferentes.

Por tanto, bajo la convicción de que en caso de existir, la ley de clasificación de remaches ciegos debe ser la misma para los diferentes tamaños de remache, no se considera aceptable que tamaños diferentes de remache requieran leyes de clasificación diferentes.

Es decir, se considera que, si las leyes obtenidas correspondieran a fenómenos físicos relacionados con la instalación del remache y su proceso, en tal caso la ley de clasificación debe ser homogénea para los distintos tamaños de remache. Podrían existir coeficientes, y valores límites, que deban ser ajustados y tomen valores diferentes para diferentes tamaños de remache, pero desde luego no se considera aceptable que se basen en valores de evaluación diferentes.

En consecuencia, se considera que las leyes obtenidas para los valores de evaluación provenientes de las señales de proceso exclusivamente no son representativas de ningún fenómeno físico asociado a la instalación del proceso. Las leyes obtenidas se atribuyen a efectos numéricos, de manera similar a los árboles de decisión obtenidos en el apartado *2.5.2 Potencial de métodos basados en respuesta en frecuencia para la inspección de remaches instalados incorrectamente*.

Por tanto, se ha procedido a analizar el segundo lote de datos, ii) todos los valores de evaluación identificados.

Como resultado, se han obtenido dos leyes de clasificación (una por lote de cada probeta), siendo ambas al mismo tiempo leyes simples y con una alta tasa de acierto.

La ley correspondiente a la probeta C corresponde a la clasificación atendiendo al TOF; en concordancia con los resultados observados en los apartados *2.4 Tecnología base 03: Métodos basados en ultrasonidos* y *4.3 Verificación del método de clasificación basado en TOF en las probetas B y C*. En la probeta C, el TOF por sí mismo es capaz de clasificar el total de remaches con tan solo 1

remache erróneamente clasificado. A modo de ilustración, a continuación se reproduce la Figura 4.3.2.

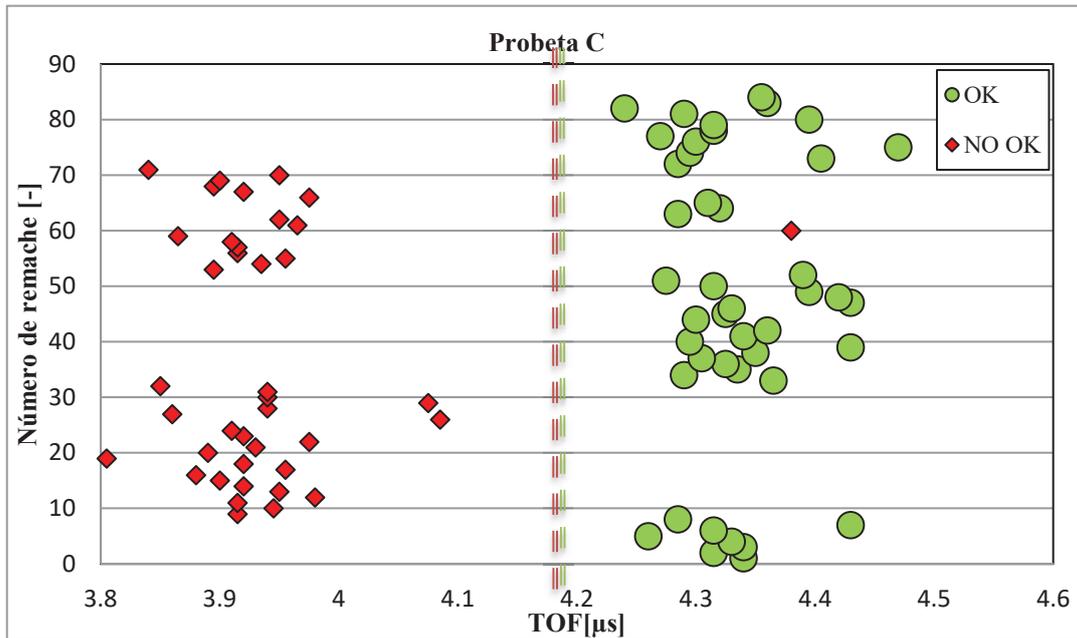


Figura 4.3.2. Clasificación en base a TOF de los remaches de la probeta C: se observa una clara tendencia de agrupación de los remaches en base al TOF.

La ley obtenida para los remaches de la probeta B es diferente, tiene en cuenta un segundo valor de evaluación: el Tiempo de Ciclo (T_c). Mediante únicamente estos dos valores de evaluación (TOF y T_c), todos los remaches de la probeta B son clasificados cometiendo únicamente un error. Nótese que esta ley es ligeramente más complicada que la correspondiente a la probeta C, dado que necesita de un segundo valor de evaluación. La Figura 4.5.5 muestra gráficamente la clasificación en base a TOF y T_c .

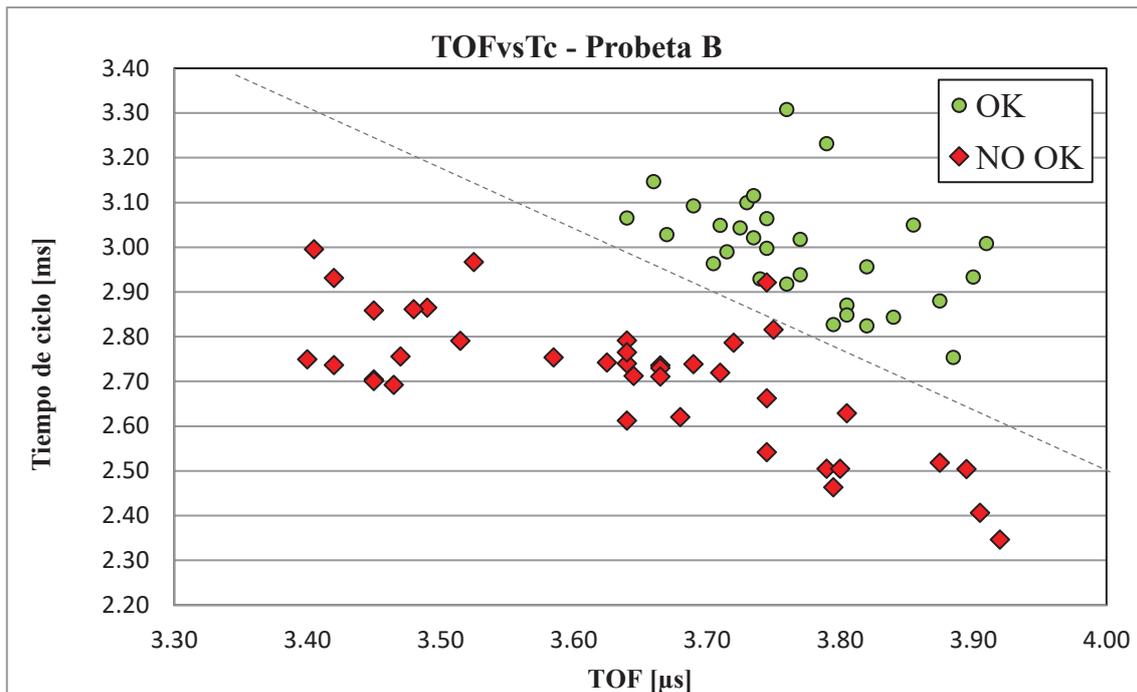


Figura 4.5.5. Ley de clasificación TOFvsTc obtenido mediante análisis de los remaches de la probeta B.

A pesar de haber obtenido dos leyes de clasificación con una tasa de acierto elevada (en ambos casos, un único error en todo el lote), no se considera aceptable ninguna ley de clasificación que no sea de aplicación a cualquier tamaño de remache.

A lo largo análisis de resultados se ha hecho mención repetidamente a la influencia que tienen diversos parámetros (y sus valores particulares) en la generación de métodos de clasificación. A este respecto, se considera que aunque el TOF es muy método muy eficaz para la clasificación de los remaches de la probeta C, es posible que existan métodos más precisos, pero que en el compromiso eficacia-complejidad, sea considerado menos apto que el método basado únicamente en TOF.

En consecuencia, se ha aplicado la ley de clasificación TOFvsTc obtenida para la probeta B a los remaches de la probeta C, para comprobar si la ley TOFvsTc es de aplicación también en los remaches de la probeta C. El resultado de aplicar la ley TOFvsTc a la probeta C se muestra en la Figura 4.5.6. Puede observarse que no sólo aplica la ley TOFvsTc, sino que además, mejora la capacidad de clasificación dado que clasifica de forma acertada el remache incorrectamente instalado que el TOF no puede discernir.

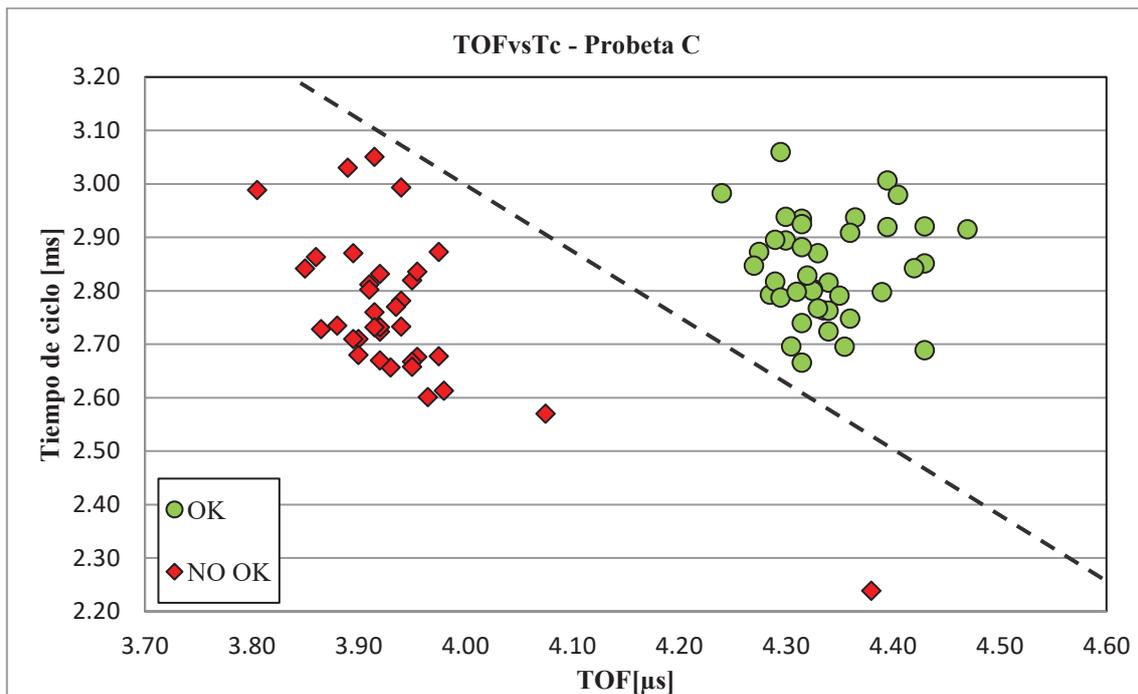


Figura 4.5.6. Ley de clasificación TOFvsTc aplicada a la probeta C.

A la vista de que la ley TOFvsTc es capaz de clasificar correctamente todos los remaches contenidos en las probetas B y C, cometiendo únicamente un error, se considera que la ley TOFvsTc es una ley apta para clasificar el estado de la instalación de los remaches ciegos.

De manera que se ha desarrollado una ley de clasificación que basándose en dos parámetros únicamente (TOF y Tc), es capaz de clasificar los remaches ciegos contenidos en las probetas B y C. La efectividad el método se resume en la Tabla 4.5.1.

Probeta // número de remaches	Clasificados		No clasificados		Correctamente clasificados		Erróneamente clasificados	
	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%
B // 69	69	100%	0	0%	68	98.5%	1	1.5%
C // 76	76	100%	0	0%	76	100%	0	0%

Tabla 4.5.1. Resumen de la efectividad del método TOFvsTc.

4.6. Entendiendo la ley de clasificación

Una vez obtenida experimentalmente la ley de clasificación TOFvsTc, a continuación se sugiere una hipótesis que justifica la efectividad el método y la relaciona con fenómenos físicos asociados al proceso de remachado y a la calidad de la instalación de los remaches.

La calidad de la instalación del remache se determina según esta ley en base a dos parámetros: TOF y Tc. En caso de que cualquiera de ellos sea demasiado

corto, el remache estará incorrectamente instalado. En caso contrario, depende de los valores numéricos específicos.

Si la longitud real del remache instalado es demasiado corta, entonces también lo será el tiempo de vuelo (TOF) correspondiente a ese remache. De manera que, los remaches con un TOF corto (es decir, con una longitud corta), corresponde a instalaciones de remache en las que cabeza de cierre ha resultado corta y por tanto excesivamente deformada.

Por otra parte, si la longitud del remache no es excesivamente corta, la cabeza de cierre no se encontrará excesivamente deformada. Pero, una parte de los remaches de longitud adecuada están incorrectamente instalados. En concreto, aquellos remaches que teniendo una longitud adecuada hayan partido demasiado pronto se encontrarán insuficientemente deformados, sin haber llegado su grado de deformación esperado. De forma que el tiempo de ciclo de los remaches que no alcancen su grado de deformación esperado será corto en relación a los remaches correctamente deformados.

De esta manera queda descrita la hipótesis bajo la que se asocian los fenómenos físicos que explican la aptitud de la ley de clasificación TOFvsTc, hipótesis que se muestra de forma gráfica en la Figura 4.6.1.

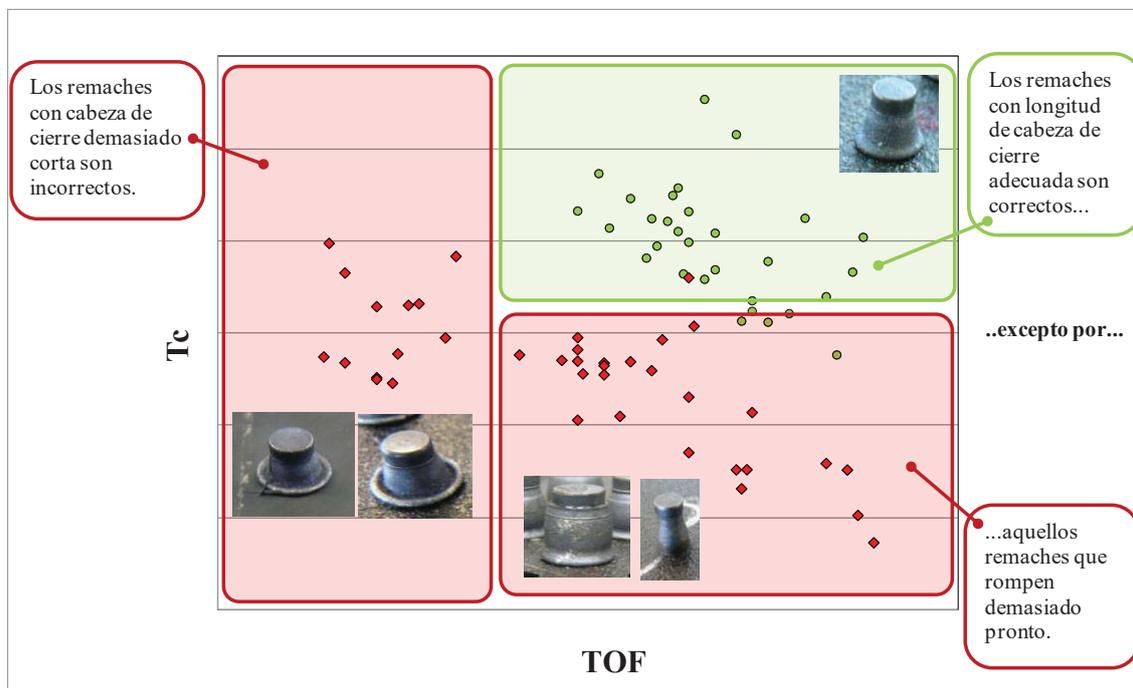


Figura 4.6.1. Ilustración gráfica de la hipótesis que explica los fenómenos físicos asociados a la ley de clasificación TOFvsTc.

4.7. Aplicación de la ley de clasificación a probetas no utilizadas para su desarrollo

4.7.1. Preámbulo

La ley TOFvsTc obtenida ha mostrado su capacidad de clasificar los remaches de las probetas B y C. A pesar de ello, dado que los buenos resultados obtenidos se aplican precisamente a los datos en base a los que se ha desarrollado la propia ley, se han fabricado nuevas probetas remachadas sobre las que evaluar la capacidad de la ley de clasificación.

La única monitorización del proceso necesaria es la medida del tiempo de ciclo, el resto de magnitudes no resultan de interés dado que no aportan a la ley de clasificación TOFvsTc. En esta ocasión, no ha sido necesario dotar de instrumentación externa para la medida del tiempo de ciclo, debido a que a pesar de no disponer de sensores de medida de las magnitudes monitorizadas anteriormente, sí que dispone de un sistema de identificación de aplicación de par por el motor. De modo que el tiempo de ciclo puede obtenerse como la diferencia de tiempos entre el inicio de aplicación de par y el final de aplicación de par.

Aunque la medida de tiempo de ciclo difiere del tiempo de ciclo medido durante la monitorización del proceso, la ley de clasificación debe ser de aplicación con la nueva medida de tiempo de ciclo. El único inconveniente será la imposibilidad de comparar entre sí los remaches cuyos tiempos de ciclos se han medido en base a estampas de tiempo diferentes. Sí será posible clasificar los remaches de cada una de las probetas de validación.

La Figura 4.7.1 muestra imágenes de las nuevas probetas generadas. Por su parte, la Tabla 4.7.1 resume sus características.

	Probeta V1	Probeta V2
Guión	5	6
Grip	300	350
Número de remaches instalados	180	136

Tabla 4.7.1. Características de las probetas de validación.

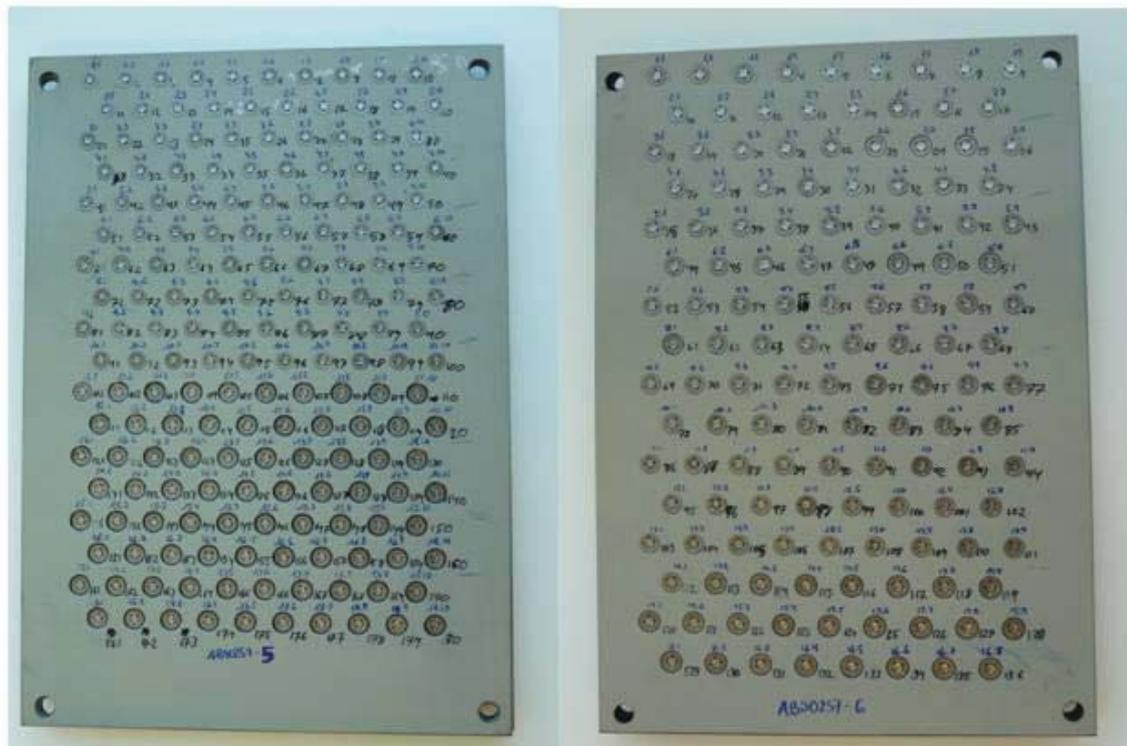


Figura 4.7.1. Imagen de las nuevas probetas para validación del método TOFVsTc.

Es necesario destacar que existe una diferencia añadida entre las probetas de validación y las probetas anteriores. Cada grip es válido para unir un rango de espesores de unión. Las probetas fabricadas previamente han correspondido a espesores que, aunque dentro de los límites del grip correspondiente, se encontraban cercanos al espesor límite superior del rango de validez del grip. De este modo, el efecto de insertar un remache de grip más corto para favorecer la aparición de fallos en los remaches se vería magnificado.

Las probetas de validación han tenido un espesor cercano al espesor medio del rango de validez de cada grip. En consecuencia, los remaches utilizados de un grip inferior para provocar la instalación de remaches incorrectamente instalados han resultado en instalaciones que, aunque incorrectas, no han resultado tan malas como las anteriores.

De hecho, algunos de los remaches con grip inferior no han sido identificados como incorrectos por los inspectores, dando la instalación por buena. Sin embargo, dado que el grip instalado es incorrecto, a pesar de superar el control de calidad realizado por inspectores, en el presente trabajo se han considerado como incorrectamente instalados.

La Figura 4.7.2 muestra remaches incorrectamente instalados en las probetas previas. La Figura 4.7.3 muestra remaches incorrectamente instalados de las probetas de validación, remaches que no presentan anillos ni picaduras.



Figura 4.7.2. Remaches incorrectamente instalados previos: presentan anillos y picaduras.

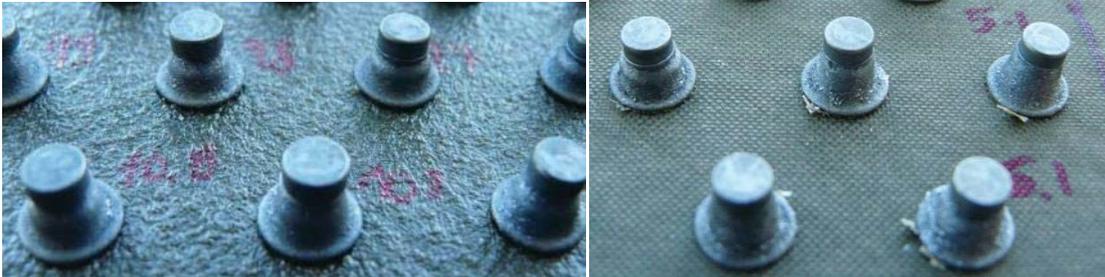


Figura 4.7.3. Remaches incorrectos en las placas de validación: sin anillos ni picaduras.

4.7.2. Mejora de la precisión en la medida de TOF

La medida de tiempo de vuelo de los remaches se ha realizado siguiendo las técnicas de medida habituales en inspección por ultrasonidos. En general, en las aplicaciones de inspección por US, la medida precisa de TOF no tiene especial interés, el interés reside en si ocurren o no ocurren ecos, no su estampa de tiempo precisa.

Por tanto, para facilitar la visualización de datos y la identificación de ecos, la señal temporal se postprocesa, rectificándola. El rectificado consiste en obtener una envolvente de la señal temporal en valor absoluto, lo que simplifica la detección de ecos y por otra parte, disminuye la cantidad de puntos de la señal, disminuyendo la cantidad de memoria y facilitando el manejo de datos.

Las diferencias de TOF entre los remaches clasificados han resultado significativas, pero no obstante, se ha considerado conveniente mejorar la precisión en la medida del TOF. Para ellos, las subsiguientes medidas de TOF se han tomado sobre la señal temporal bruta, identificando un semiciclo tanto al paso por la intercara prolongador-remache y en el final del remache (intercaras B y C de la Figura 3.4.2).

En la Figura 4.7.4 se muestra el proceso de rectificado, y la identificación de un ciclo representativo al paso del pulso por las intercaras. En la parte superior, se muestra una señal temporal bruta, sin postprocesar. Se diferencian el paso por la intercara de contacto prolongador-remache, y el eco proveniente del final del remache. En la segunda gráfica, se muestran superpuestas la señal original (en verde) y la misma señal en valor absoluto (en negro). En la tercera gráfica, se muestra la señal en valor absoluto (en verde), y la señal remuestreada con una frecuencia de muestreo muy inferior (en negro). Puede observarse con facilidad

la existencia de ecos, aunque si se quiere localizar el instante temporal, al situar una ventana sobre la que buscar el valor máximo de la señal rectificada, existen puntos de magnitud cercana, que en función de la presión de contacto, podrían superarse entre sí indistintamente, localizando el máximo hasta un ciclo más adelante o más atrás, dando lugar a la incertidumbre descrita en la medida de TOF.

En la cuarta gráfica, se muestra nuevamente la señal temporal bruta, sobre la que se ha identificado el tercer semiciclo del eco al paso del pulso por la intercara. De la misma manera, se identifica el tercer semiciclo del eco al final del remache. De esta forma, la incertidumbre en la medida de TOF se reduce y se aumenta la precisión de la misma.

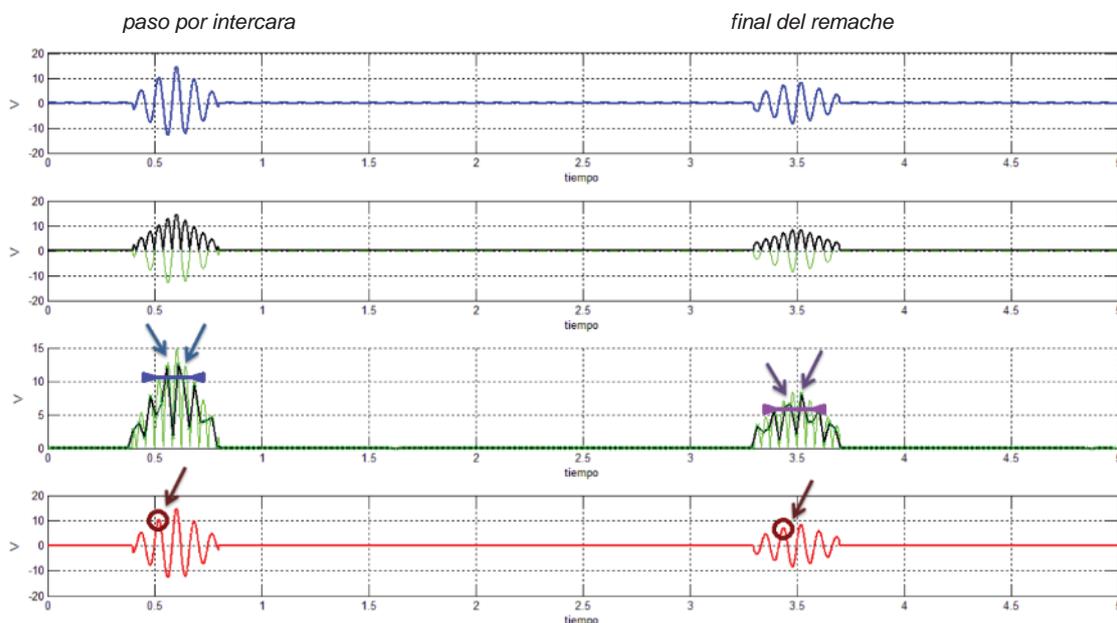


Figura 4.7.4. Ilustración del rectificado de señal de US habitual para inspección mediante US.

Este método de medida resulta más laborioso pero ha permitido reducir la tolerancia de la medida de TOF de $\pm 0.03\mu\text{s}$ a una medida con una tolerancia de $\pm 0.01\mu\text{s}$.

La Figura 4.7.5 muestra pantallazos reales obtenidos durante la medida de TOF de un remache: el eco correspondiente al final del remache está identificado mediante la ventana temporal roja. Puede observarse la diferencia entre el análisis de señal rectificada y señal temporal, y el cambio en la estampa de tiempo entre el máximo localizado en la señal rectificado ($10.71\mu\text{s}$) y en la señal temporal bruta ($10.68\mu\text{s}$).

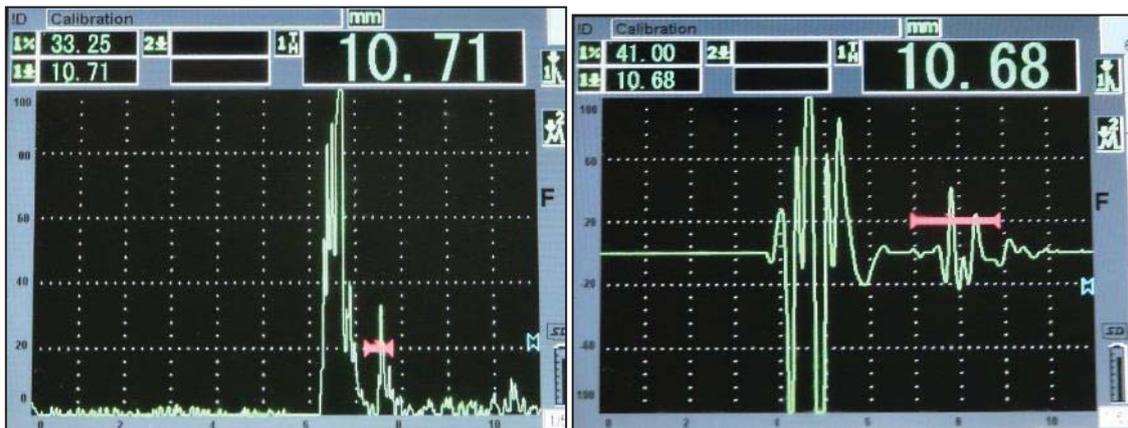


Figura 4.7.5. Pantallazos (y estampa de tiempo en el margen superior izquierdo) de una señal temporal visualizada como: izda) rectificada, y dcha) señal temporal.

4.7.3. Resultados y análisis

Las figuras Figura 4.7.6y Figura 4.7.7 muestran las gráficas de clasificación según la ley $TOFvsT_c$ correspondientes a los remaches de las probetas V1 y V2 respectivamente.

Puede observarse que los resultados observados no concuerdan con los esperados. Aparentemente, la ley de clasificación $TOFvsT_c$ obtenida como consecuencia del análisis de datos de las probetas B y C no tiene capacidad de clasificar los remaches contenidos en las nuevas probetas de clasificación.

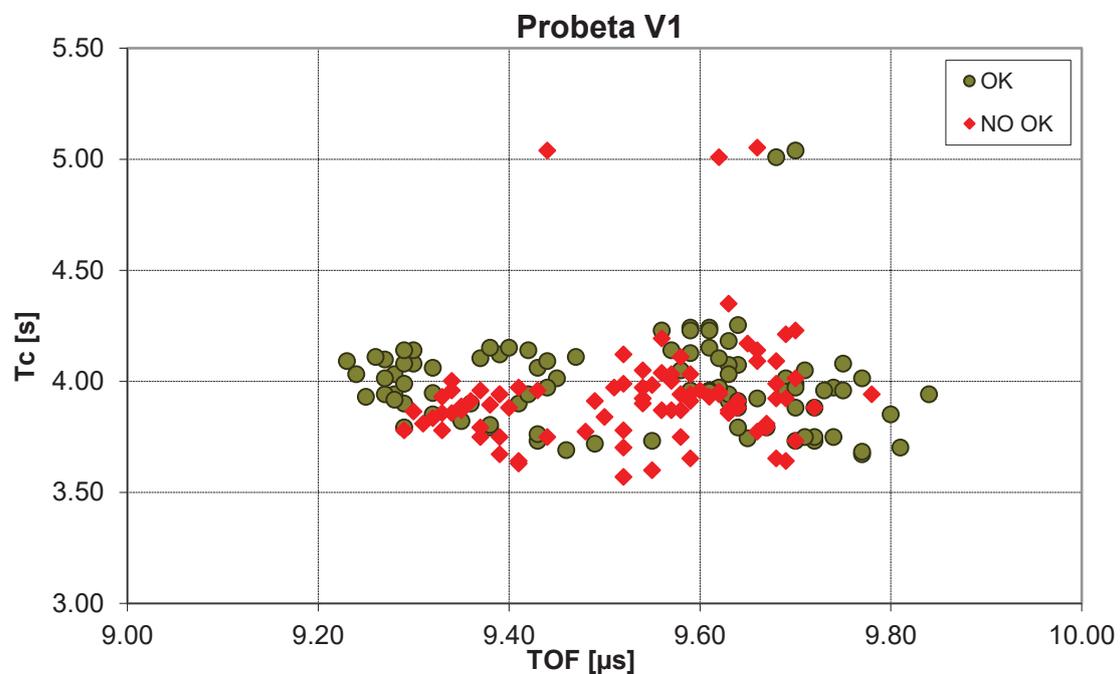


Figura 4.7.6. Clasificación $TOFvsT_c$ de la probeta de validación V1.

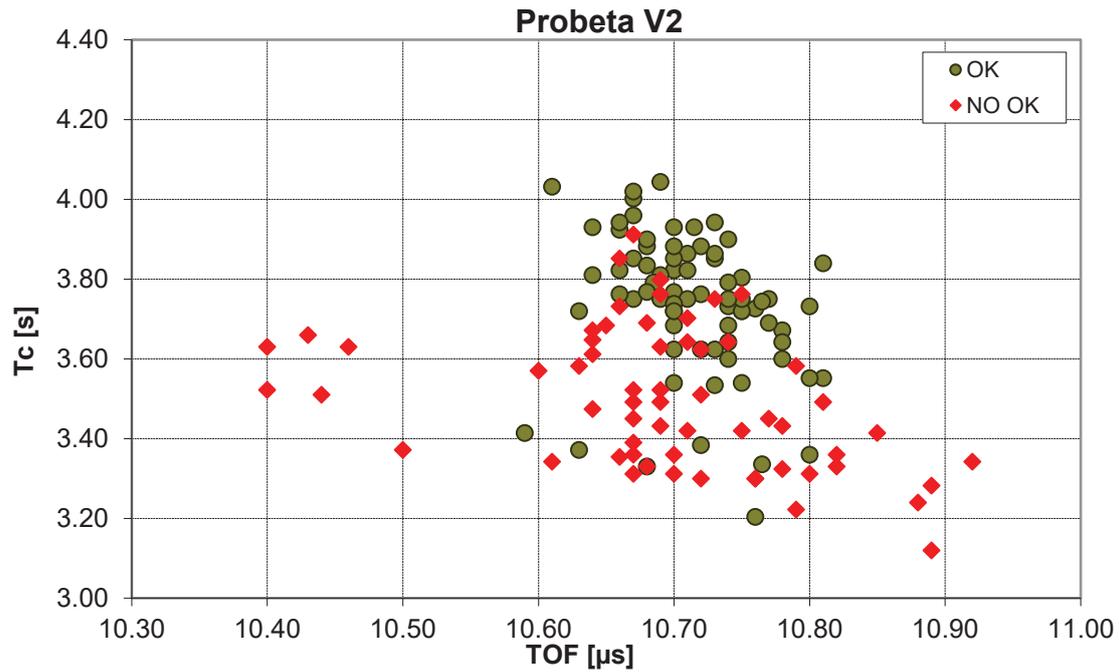


Figura 4.7.7. Clasificación TOFvsTc de la probeta de validación V2.

Sin embargo, si se observan con detalle los remaches instalados en las probetas de validación, se pueden observar cómo existen instalados remaches cuyo avellanado previo ha sido demasiado profundo (en concreto, las últimas filas de las probetas). La Figura 4.7.8 muestra detalles en los que se observan claramente los avellanados demasiado profundos. Como resultado, los remaches instalados no cumplen con los criterios de calidad a comprobar desde la cara vista.

En concreto, no cumplen con la cota n descrita en el apartado 1.3 *Transcendencia del control de calidad de la instalación de remaches ciegos como estrategia de mitigación de incertidumbre, sobredimensionamiento y sobrecostes*. y mostrada en la Figura 1.3.2. El defecto de instalación debido a un avellanado incorrectamente mecanizado (ya sea demasiado profundo o insuficientemente profundo) es detectable actualmente mediante, por ejemplo, los métodos de inspección basados en visión artificial descritos en dicho apartado.

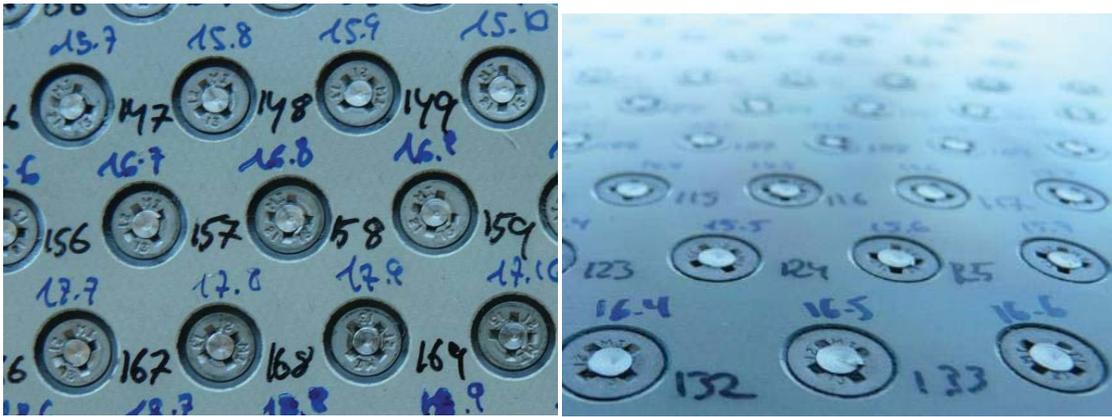


Figura 4.7.8. Detalle de los avellanados excesivamente profundos en las últimas filas de las probetas de validación V1 y V2.

Un avellanado fuera de tolerancias puede interferir con la ley de clasificación obtenida TOFvsTc. Como se ilustra en la Figura 4.7.9, un avellanado demasiado profundo tiene un efecto equivalente a una reducción del espesor de unión. Es decir, del mismo modo que los remaches de tamaños para diferentes espesores no son comparables entre sí (dado que tendrán diferente grip), un remache con avellanado dentro de tolerancias y un remache con avellanado demasiado profundo tampoco son comparables entre sí. Por tanto, los remaches con avellanados demasiado profundos de las probetas V1 y V2 no son comparables al resto de remaches de las probetas; o lo que es lo mismo, remaches instalados en espesores efectivos diferentes no son comparables entre sí.

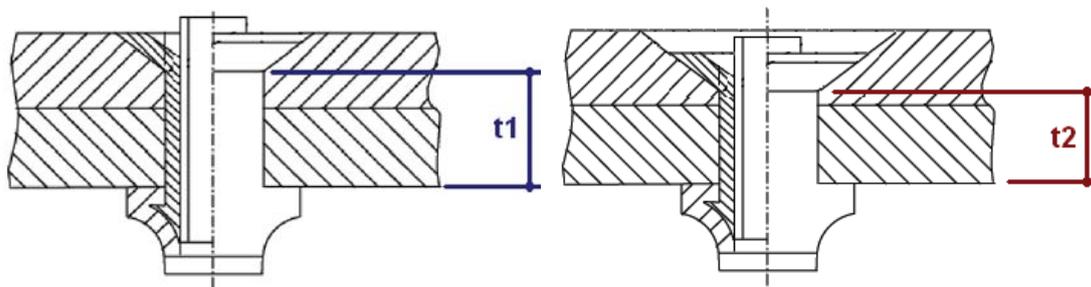


Figura 4.7.9. Ilustración del efecto del avellanado excesivo sobre el espesor efectivo de la unión: un avellanado demasiado profundo disminuyen el espesor efecto de unión.

Atendiendo a la distorsión que introduce el avellanado excesivo, las figuras Figura 4.7.10 y Figura 4.7.11 muestran la clasificación de los remaches de cada probeta V1 y V2, diferenciando entre remaches con avellanado dentro de tolerancias y avellanados excesivos.

Tras eliminar los remaches con avellanado excesivo del análisis, las figuras Figura 4.7.12 y Figura 4.7.13 muestran la clasificación de los remaches de las probetas V1 y V2 respectivamente atendiendo a la ley TOFvsTc.

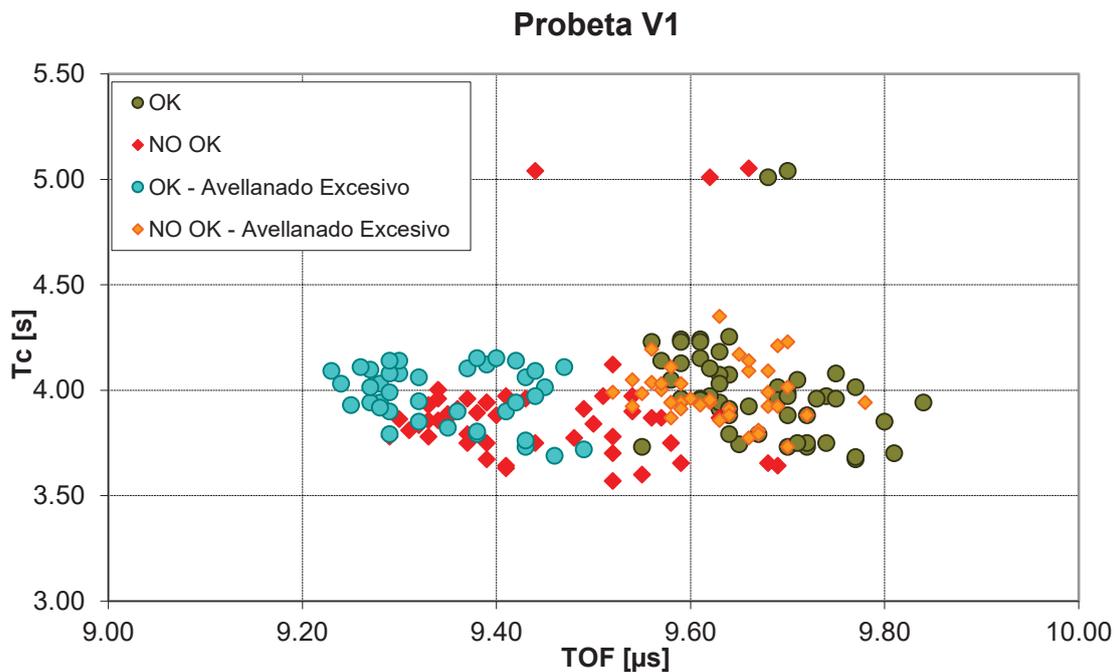


Figura 4.7.10. Clasificación de los remaches de la probeta V1 con distinción entre remaches con avellanado en tolerancias y avellanado demasiado profundo.

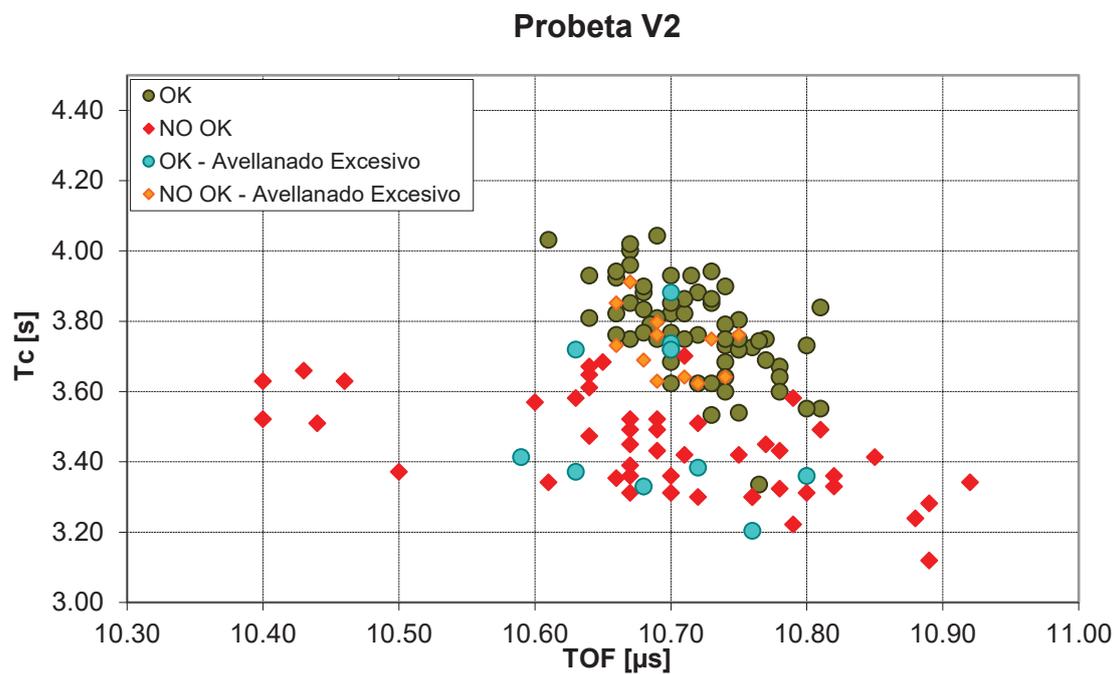


Figura 4.7.11. Clasificación de los remaches de la probeta V2 con distinción entre remaches con avellanado en tolerancias y avellanado demasiado profundo.

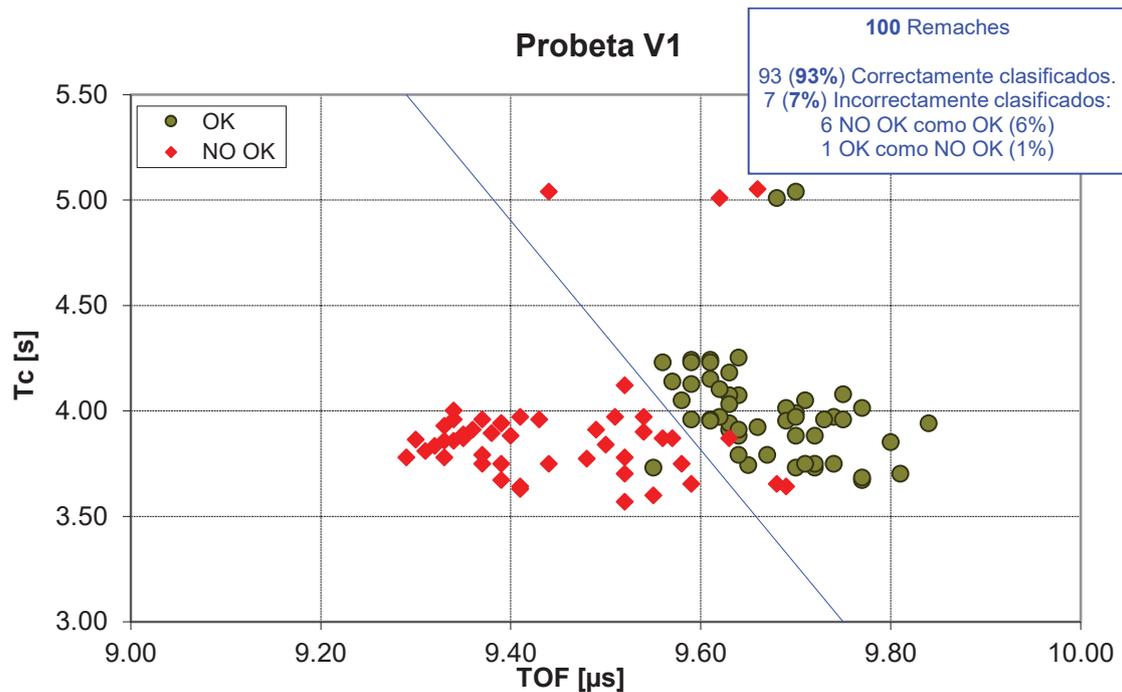


Figura 4.7.12. Clasificación de los remaches con avellanado dentro de tolerancias: probeta V1.

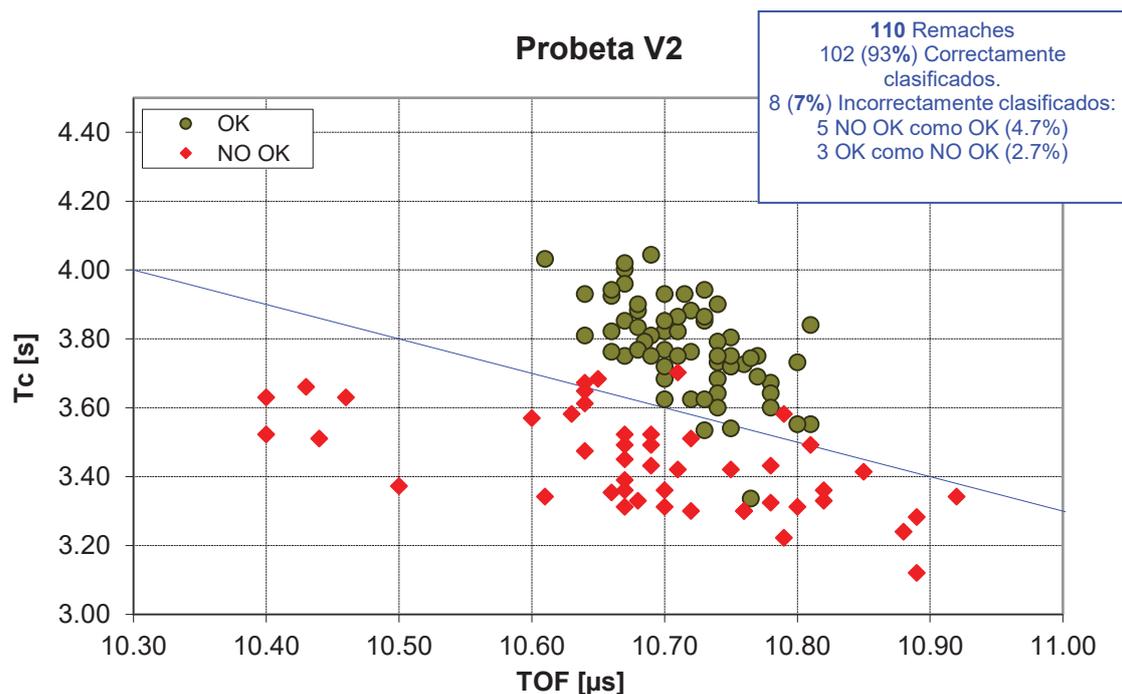


Figura 4.7.13. Clasificación de los remaches con avellanado dentro de tolerancias: probeta V2.

4.7.4. Análisis de la ley TOFvsTc y su validación

Tras desechar los remaches con avellanados demasiado profundos, remaches cuyos defectos son identificados en producción real, se ha observado cómo la ley de clasificación TOFvsTc es capaz de agrupar los remaches correctamente e incorrectamente instalados entre sí, tal y como muestran las Figura 4.7.12 y Figura 4.7.13. En consecuencia, y a la vista de los resultados obtenidos en las

probetas B, C, y las nuevas probetas de validación V1 y V2, se considera que la ley de clasificación TOFvsTc es apta para la inspección de la instalación de remaches ciegos ABS0257.

Se ha demostrado la capacidad de la ley TOFvsTc. La definición clara de una frontera entre las regiones de remaches correctos e incorrectos en el plano TOF-Tc, no obstante, aunque delimitada como rectas en los resultados obtenidos, requiere de un estudio más profundo para ajustarla y optimizar la tasa de acierto del método. Las fronteras actuales se han obtenido ajustando la frontera a una recta, a la vista de los resultados. Para que la forma de la frontera sea válida, deberá ajustarse correctamente a los dos tamaños de remache distintos contenidos en las probetas V1 y V2.

Tal y como se ha descrito, para las fronteras se ha propuesta una recta, obteniendo de este modo una ley de clasificación lineal. La Tabla 4.7.2 muestra las leyes de clasificación concretas obtenidas, y la extensión a una forma genérica de la ley de clasificación. El cumplimiento de las leyes obtenidas conlleva clasificar el remache como correctamente instalado, y el incumplimiento como remache incorrectamente instalado.

Probeta	Expresión de la ley TOFvsTc	Comentarios
Probeta V1	Instalación = $TOF [\mu s] > 10.3 - 0.184 \cdot Tc$ [s]	Verdadero: Correcto Falso: Incorrecto
Probeta V2	Instalación = $TOF [\mu s] > 14.3 - Tc$ [s]	
<i>forma genérica de la ley</i>	Instalación = $TOF > b - a \cdot Tc$	a & b deben ser obtenidas para cada tamaño de remache

Tabla 4.7.2. Leyes de clasificación TOFvsTc de las probetas V1 y V2, y forma genérica de la ley.

La Tabla 4.7.3 resume los resultados obtenidos tras clasificar los remaches de las probetas V1 y V2 siguiendo la ley TOFvsTc. Como puede observarse, el método tiene una capacidad de acierto que ronda el 93%.

Probeta	Remaches en la probeta		Clasificaciones correctas		Clasificaciones incorrectas					
					#	%	OK como NO OK		NO OK como OK	
	#	%	#	%			#	%		
V1	100	100%	93	93%	7	7%	6	6%	1	1%
V2	110	100%	102	93%	8	7%	5	4.7%	3	2.7%

Tabla 4.7.3. Resumen de la capacidad de clasificación del método TOFvsTc.

4.8. Resumen del capítulo

El análisis de viabilidad de las tecnologías base ha resultó en un método de con capacidad parcial de clasificación, atendiendo al TOF de los remaches. Con el objetivo de extender la capacidad de dicho método, se ha propuesto analizar la evolución temporal de las magnitudes principales del proceso de remachado e incluir dicha información.

Se ha diseñado una instrumentación adaptada a las máquinas herramienta reales de producción, teniendo en cuenta las limitaciones asociadas y la necesidad de llevar a cabo una monitorización de manera no invasiva.

Con la máquina instrumentada y el proceso monitorizado, se han construido dos probetas de con 84 remaches cada una, de tamaños de remache cercanos pero diferentes.

Tras un análisis de las señales temporales del proceso, se han identificado puntos característicos de las señales temporales y en base a ellos, se han obtenido 32 valores de evaluación (adicionales al TOF) por remache.

Estos conjuntos de valores de evaluación se han postprocesado siguiendo varias estrategias (valores por sí mismos, identificación en base a patrones y siguiendo técnicas de inteligencia artificial).

De entre las leyes de clasificación obtenidas, se han desechado aquéllas que no sean de aplicación para ambos tamaños de remache, bajo la creencia de que la ley de clasificación, en caso de existir, debe ser homogénea para todos los tamaños de remaches (si bien puedan existir coeficientes particulares para cada tamaño).

El resultado ha sido una ley de clasificación que, atendiendo a dos variables (TOF y Tiempo de ciclo T_c), es capaz de clasificar todos los remaches contenidos en las dos probetas cometiendo únicamente un error, lo que supone una tasa de acierto de en torno al 98%.

Adicionalmente, se ha expuesto una hipótesis que asocia la ley TOFvs T_c a fenómenos físicos y que justifica su efectividad.

5. Validación de la metodología

5.1. Preámbulo

El tiempo de vuelo combinado con el análisis de las señales del proceso ha resultado una ley de clasificación TOFvsTc con una tasa de acierto elevada, capaz de clasificar remaches de diferentes tamaños. No obstante, la ley de clasificación ha demostrado su capacidad en un total de $69+76 = 145$ remaches sobre las que se ha desarrollado, y dos nuevas probetas de $100 + 110 = 210$ remaches. Teniendo en cuenta el número de remaches ciegos instalados en una única aeronave, se ha considerado oportuno aplicar la ley de clasificación desarrollada a un producto real.

Como producto real se ha escogido un cajón de TBH, subconjunto estructural que contiene en torno a 1200 remaches ciegos tipo ABS0257. El cajón de análisis se ha extraído de la producción habitual, sin condicionantes debidos al proceso de validación de la metodología. Por una parte, se han recogido los datos relativos a los remaches instalados obtenidos de la propia máquina:

- Espesor real medido
- Tamaño de remache instalado
- Tiempo de ciclo

Por otra parte, se ha desarrollado un sistema de medida de TOF portable para la medida de TOF de cada uno de los remaches. Aquellos remaches que se encontraban en un punto inaccesible por un operario para la medida TOF no se han tenido en cuenta en el análisis de validación.

De este modo, se han obtenido datos reales de en torno a 1200 remaches, de tamaños diferentes, instalados durante la producción real.

5.2. Metodología de validación

Al dejar de lado las condiciones de laboratorio, instalando remaches sobre planchas de CFRP en las que la cara ciega es inaccesible, y evaluar remaches instalados en producción real, no es posible acceder a la cara ciega de las uniones para examinar y conocer la calidad de la instalación de cada remache.

Sin embargo, sí es posible analizar los datos reales de producción relativos al espesor real medido y al tamaño de remache instalado en cada punto de la unión. Teniendo en cuenta los rangos de espesor correspondientes a cada grip,

se han encontrado las siguientes no concordancias entre espesor real medido y tamaño de remache instalado recogidas en la Tabla 5.2.1. Estos errores de instalación de grip no han sido forzados, ni su instalación ha sido influenciada, ni durante su producción han ocurrido condicionantes debido al posterior uso del cajón como elemento para la validación del método. La fabricación del cajón de validación ha sido completamente independiente de su posterior uso como elemento de validación del método.

Punto	Grip que corresponde	Remache que corresponde	Grip instalado	Remache instalado
1195	300	ABS0257-5-300	250	ABS0257-5-250
1231	300	ABS0257-5-300	250	ABS0257-5-250
1077	350	ABS0257-5-350	300	ABS0257-5-300
1101	350	ABS0257-5-350	300	ABS0257-5-300
1204	350	ABS0257-5-350	300	ABS0257-5-300
1219	350	ABS0257-5-350	300	ABS0257-5-300
684	400	ABS0257-6-400	350	ABS0257-6-350

Tabla 5.2.1. Listado de remaches instalados con grip incorrecto en el cajón extraído de producción.

En consecuencia, se ha analizado la situación relativa de los remaches incorrectamente instalados en el plano TOF-Tc. Se ha construido el plano TOF-Tc teniendo en cuenta los remaches incorrectamente instalados y los remaches existentes en el cajón del tamaño que corresponde y cuyo tamaño ha sido correctamente seleccionado. Este análisis se ha llevado a cabo para cada uno de los tamaños de remache en los que se han detectado remaches de tamaño incorrecto: i) ABS0257-5-300, ii) ABS0257-5-350 y iii) ABS0257-6-400. Las figuras Figura 5.2.1, Figura 5.2.2 y Figura 5.2.3 muestran los planos TOF-Tc resultantes.

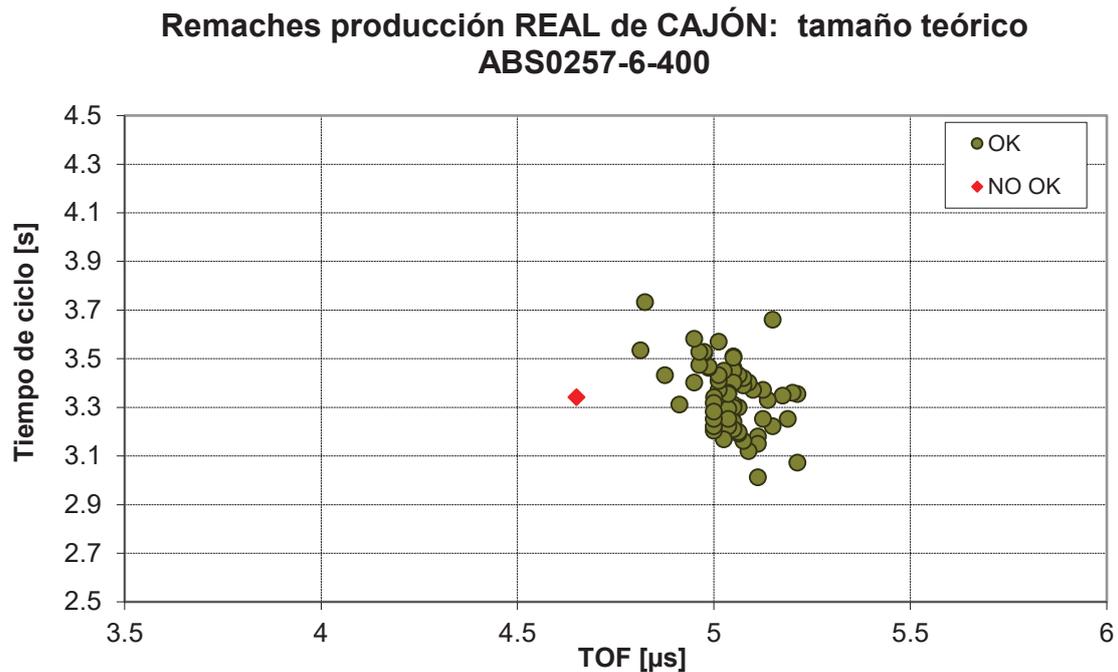


Figura 5.2.3. Plano TOF-Tc correspondiente al tamaño ABS0257-6-400: los remaches del cajón de tamaño incorrecto se posicionan en la zona correspondiente a remaches incorrectamente instalados.

El posicionamiento de los remaches obtenidos de producción en el plano TOF-Tc muestra que, si bien no se tienen datos suficientes como para definir fronteras, los remaches incorrectamente instalados ocupan la posición que les corresponde según la ley de clasificación TOF-Tc. Este fenómeno de posicionamiento de los remaches incorrectos en la zona correspondiente a remaches incorrecto atendiendo a la ley de clasificación TOF-Tc se verifica en los tres tamaños de remache en los que se han producido errores durante la producción.

En consecuencia, se demuestra la capacidad del método TOF-Tc desarrollado en este trabajo como método de inspección no destructivo apto para la identificación de remaches ciegos tipo ABS0257 incorrectamente instalados accediendo al elemento de unión únicamente desde la cara vista.

5.3. Sensibilidad del método para detectar los tipos de defectos en la instalación de remaches

Una vez validado el método de clasificación TOF-Tc, se considera conveniente evaluar su capacidad para detectar los diferentes tipos de defectos de instalación que pueden ocurrir en la cabeza de cierre.

Atendiendo a lo descrito en el apartado 1.3 *Transcendencia del control de calidad de la instalación de remaches ciegos como estrategia de mitigación de*

incertidumbre, sobredimensionamiento y sobrecostes., y tal y como se ha mostrado en la Figura 1.3.4, los tipos de defectos que aparecen en la cabeza de cierre son:

- A. Cabeza de cierre que no hace contacto con la cara ciega.
- B. Aparición de grietas o fisuras en la cabeza de cierre.
- C. Cabeza de cierre pandeada
- D. Rotura del fondo de la cabeza de cierre
- E. Aplastamiento de la cabeza de cierre

Estos defectos se muestran en la Figura 5.3.1 junto con una valoración de la capacidad del método TOFvsTc para su detección. No se considera el defecto correspondiente debido a rotura incorrecta del vástago dado que este defecto es detectado actualmente desde la cara vista.

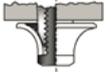
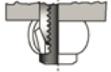
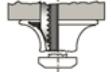
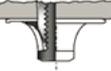
	Correct installation	—	
	Sleeve not in contact with the structure (loose joint)	Unacceptable	➔ TOF excesivo: DETECTADO
	Split or cracked sleeve	Unacceptable	➔ Requiere análisis de sensibilidad
	"buckled" sleeve	Unacceptable	➔ Requiere análisis de sensibilidad
	Blind head failure	Unacceptable	➔ TOF demasiado corto: DETECTADO
	Nut head failure	Unacceptable	➔ no aplica
	Flared sleeve	Unacceptable if limits in Tables 4, 5 and 6 are not accomplished	➔ TOF demasiado corto: DETECTADO

Figura 5.3.1. Capacidad de detección de cada tipo de defecto del método TOFvsTc.

- A. Cabeza de cierre que no hace contacto con la cara ciega: Detectado debido a la longitud excesiva de la cabeza del remache, que provocará un TOF demasiado largo.
- B. Aparición de grietas o fisuras en la cabeza de cierre: Se desconoce la capacidad del método, requiere un análisis de sensibilidad específico. Si la fisura provoca una resistencia a la deformación de la cabeza de cierre menor, la longitud final de la cabeza de cierre será más corta de lo debido, provocando un TOF corto. Sin embargo, para confirmar esta hipótesis se requiere un análisis de sensibilidad específico.
- C. Cabeza de cierre pandeada: Se desconoce la capacidad del método. En este caso, también se prevén desviaciones en la longitud de los remaches. Requiere un análisis de sensibilidad específico.

- D. Rotura del fondo de la cabeza de cierre: La rotura de la cabeza de cierre provoca un acortamiento severo de la cabeza de cierre, que es detectado por resultar en un TOF excesivamente corto. Defecto detectado.
- E. Aplastamiento de la cabeza de cierre: Siendo el defecto más común de entre los posibles defectos, el método detecta el aplastamiento de las cabezas de cierre mediante la combinación TOF y Tc.

5.4. Resumen del capítulo

Se ha aplicado el método de clasificación TOFvsTc al conjunto de remaches instalados durante la producción real de AIRBUS sobre un cajón de TBH. El cajón contiene en torno a 1200 remaches de variedad de combinaciones de guión y grip.

Si bien no es posible acceder a las caras ciegas de las uniones en el cajón para conocer la calidad de la instalación de los remaches, sí se han identificado errores en la producción que han conllevado la instalación de remaches de grip inadecuado.

Analizando los tres conjuntos de remaches del tamaño para los que se han detectado los remaches incorrectamente instalados mediante la ley TOFvsTc, los remaches incorrectos se posicionan en la zona del plano correspondiente a los remaches incorrectos. Adicionalmente, se ha realizado un análisis descriptivo de la capacidad del método relativo a cada tipo de fallo posible en la cabeza de cierre.

En resumen, se ha validado la capacidad del método mediante el análisis de los remaches instalados en un cajón de TBH fabricado en condiciones de producción real.

6. Contribuciones al estado del arte y líneas futuras de investigación

6.1. Contribuciones al estado del arte

El trabajo de investigación desarrollado y descrito en la memoria ha consistido en el desarrollo de una metodología de inspección para evaluar la correcta o incorrecta instalación de remaches ciegos aeronáuticos ABS0257.

Partiendo de una revisión bibliográfica acerca de posibles técnicas y tecnologías actuales para la evaluación no destructiva, se ha comprobado que si bien existen multitud de métodos para inspección no destructiva, no existe actualmente un método capaz de valorar la correcta o incorrecta instalación de los remaches; centrándose los métodos en la valoración de defectos en torno a los remaches.

Las principales contribuciones al estado del arte del presente trabajo son:

1. Se han analizado las capacidades de las cuatro tecnologías base como base de un método de inspección no destructivo:
 - i. La termografía activa, shearografía, y los métodos basados en respuesta en frecuencia han sido descartados por los motivos expuesto en el capítulo 3.
 - ii. Se ha identificado la existencia de sensibilidad del tiempo de vuelo de un pulso ultrasónico a través del vástago del remache a la calidad de la instalación del mismo.

2. Se ha desarrollado un sistema de monitorización del proceso de remachado:
 - i. Adaptable a una máquina de producción de manera que se permita el registro de señales del proceso de remachado de manera mínimamente invasiva.
 - ii. Capaz de registrar señales de proceso que han demostrado contener información relevante sobre la calidad de la instalación de los remaches.

3. Se han combinado los resultados de tiempos de vuelo junto con las señales de monitorización del proceso de remachado, obteniendo una base que contiene información sobre la correcta o incorrecta instalación de los remaches.
4. La aplicación de diferentes métodos de análisis ha resultado en la obtención de una ley de clasificación de la instalación de remaches ciegos:
 - i. La capacidad de clasificación parcial mostrada por el TOF se ha combinado con información extraído de la monitorización del proceso. Como consecuencia, se ha obtenido una ley de clasificación basada en dos parámetros: TOF y Tiempo de ciclo.
 - ii. Esta ley de clasificación TOFvsTc se ha obtenido tras el análisis de dos probetas con en torno a 70 remaches cada una; y posteriormente validada en dos probetas de en torno a 100 remaches cada una.

El método de clasificación se caracteriza por lo siguiente:

 - Relaciona dos magnitudes, TOF y Tc, de la forma universal siguientes:
$$\text{instalación} = TOF > \mathbf{b} - \mathbf{a} \cdot Tc$$

· en donde:

 - las constantes a y b deben obtenerse para cada tamaño de remache
 - el cumplimiento de la inecuación supone una instalación correcta de remache.
 - Tiene una tasa de acierto de en torno al 90-95%, con una tasa de falsos positivos cercano al 5%.
 - Es un método capaz de ser automatizado e integrado en máquina.
 - Es un método que cumple con los 1 a 2 segundos disponibles para la inspección.
5. Además, se ha observado una justificación física entre lo descrito por la ley de clasificación y la calidad de la instalación de los remaches.

En resumen, la principal contribución del presente trabajo de investigación al estado del arte es el innovador método de clasificación desarrollado. El método desarrollado es de interés para los fabricantes aeronáuticos, habiendo obtenido AIRBUS su patente [Camacho 2012].

6.2. Líneas futuras de investigación

Como continuación del presente trabajo de investigación se proponen las siguientes líneas de desarrollo:

1. Inclusión del espesor de unión en el método y generalización de la ley de clasificación:

El método desarrollado requiere la obtención de las constantes **a** y **b** para cada uno de los tamaños de remache, lo que puede conllevar una gran cantidad de trabajo de generación y medida de muestras para el cálculo de las constantes.

Es opinión del autor que el método desarrollado, basado únicamente en dos parámetros (TOF y Tc), puede ser en realidad la superposición en el plano TOF-Tc de un método cuya esencia es tridimensional.

Es decir, se postula que en oposición a obtener una pareja de constantes **a** y **b** para cada tamaño de remache, podría extenderse la ley de clasificación mediante la adición de un tercer eje tenga en cuenta alguna magnitud relacionada con el espesor de la unión o el tamaño del remache.

Esta hipótesis se ilustra de forma gráfica en la Figura 6.2.1. Asumiendo la veracidad de la hipótesis planteada, existe un espacio en 3 dimensiones (TOF, Tc, y una variable relacionada con el espesor) en el que los remaches correctamente e incorrectamente instalados se encuentran divididos por una frontera, de la que no se espera que cumpla con la forma lineal establecida en el presente trabajo de investigación para un tamaño de remache dado. La Figura 6.2.2 muestra una representación gráfica de la proyección del espacio 3D sobre el plano TOF-Tc. De este modo, la agrupación de remaches sigue existiendo, y la frontera se podrá asemejar a una recta siempre y cuando se trabaje en un tamaño de remache o espesor de unión determinado.

Se propone como principal vía de continuación del presente trabajo de investigación la expansión del método bidimensional desarrollado a un método tridimensional, con el objetivo de lograr una ley completamente universal, en la que el espesor de unión, o una variable relacionada con él (espesor, espesor efectivo, diferencia de espesor medio del rango de aplicación y espesor real, u otros) sea una variable de entrada más.

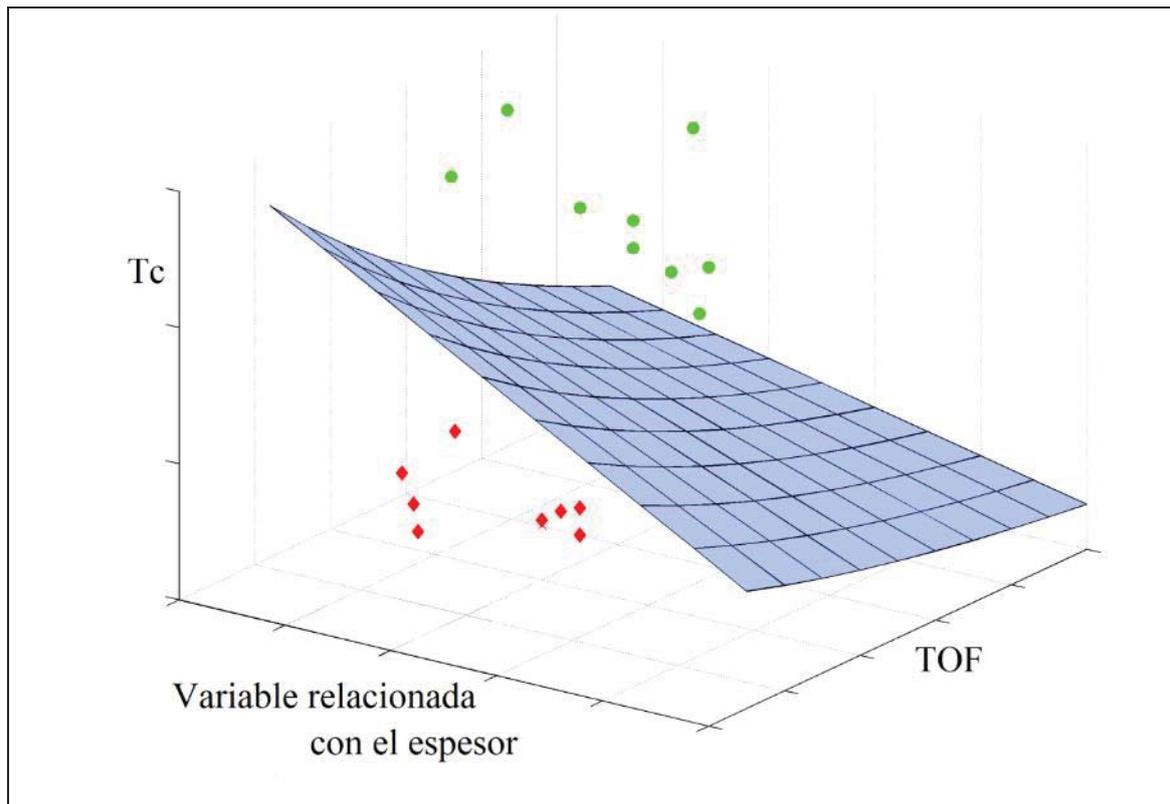


Figura 6.2.1. Representación gráfica de la hipótesis de extensión a una ley de clasificación 3D mediante la adición de un eje con información relativa al espesor de unión.

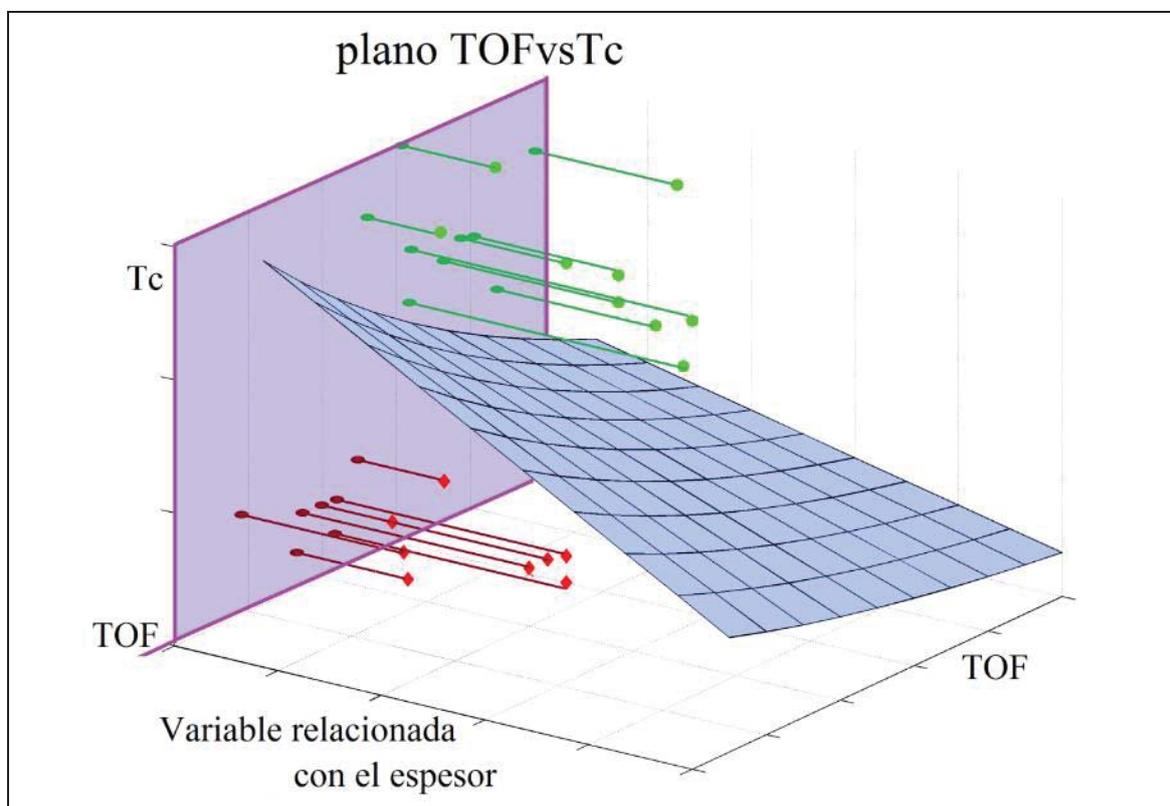


Figura 6.2.2. Representación gráfica de la proyección del espacio 3D sobre el plano TOF- T_c .

2. Optimización del método basado en respuestas en frecuencia:

Se propone la investigación en profundidad de la respuesta en frecuencia de los remaches. Si bien en el presente trabajo, llegado el momento de evaluación y selección de tecnologías base para el desarrollo del método, los resultados obtenidos y la relación directa entre la deformación del remache y su comportamiento dinámico, se considera de interés su análisis en profundidad. El inconveniente de la duración de la medida experimental podría reducirse ajustando las frecuencias de excitación a aquellas que resulten realmente de interés.

3. Desarrollo de un método sin el uso de tecnologías basadas en ultrasonidos

Por una parte, la medida del tiempo de vuelo supone añadir una etapa más en el ciclo de remachado, lo que conllevará un aumento del tiempo de ciclo de en torno a 2 – 3 segundos (considerando el ciclo de remachado completo, desde posicionamiento inicial hasta el fin del montaje de un remache). Este tiempo añadido supone en torno a un 10% del tiempo de ciclo de remachado actual.

Por otra parte, existe además una corriente en la industria aeronáutica con tendencia a la eliminación del uso de ultrasonidos en los nuevos métodos de inspección no.

En consecuencia, se propone trabajar en el desarrollo de un método de evaluación no destructiva, con el condicionante de que no se utilicen tecnologías basadas en ultrasonidos.

De hecho, esta línea de trabajo está actualmente desarrollándose (véase por ejemplo el proyecto Blindfast [Blindfast 2019]). Con un mejor acceso y mayor disponibilidad para la puesta a punto de máquina y para la fabricación de probetas, ha sido posible la medida del par de remachado. El análisis del diagrama par – ángulo ha demostrado tener potencial para discernir entre remaches correctamente o incorrectamente instalados; sin la necesidad de etapas posteriores al montaje (ver [Camacho 2019]). Si bien el método demuestra potencial, es necesario continuar desarrollándolo en el futuro.

7. Referencias

- [Airbus 2013a] <http://www.airbus.com/galleries/photo-gallery/dg/idp/23309-airbus-lycee-students/?backURL=galleries/photo-gallery/filter/manufacturing/cache/0/?p=7>. (visitada el 26/07/2013).
- [Airbus 2013b] AIRBUS PROCESS SPECIFICATION. "01-04-28 Installation of Blind Bolts Threaded_type."
<http://amis2000.aerolineas.com.ar/PMS/data/01-04-28.pdf> (visitada el 03/Ago/2013)
- [Ali 2018] Ali, S., Zhang, J., Velichko, A. Drinkwater, B.W. "Assessment methodology for defect characterisation using ultrasonic arrays". NDT & E International, ISSN: 0963-8695, Vol: 94, Page: 126-136, 2018.
doi: 10.1016/j.ndteint.2017.12.005
- [Avdelidis 2004] Avdelidis, N.P.; Almond, D.P.; Dobbinson, A.; Hawtin, B.C.; Ibarra-Castanedo, C.; Maldague, X. "Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT," Progress in Aerospace Sciences, vol. 40, Abr. 2004, págs. 143-162.
doi:10.1016/j.paerosci.2004.03.001
- [Ayorinde 2008] Ayorinde, E.; Gibson, R.; Kulkarni, S.; Deng, F.; Mahfuz, H.; Islam, S.; Jeelani, S. "Reliable low-cost NDE of composite marine sandwich structures," Composites Part B: Engineering, vol. 39, 2008, págs. 226-241.
doi:10.1016/j.compositesb.2007.02.028
- [Blindfast 2019] BLINFAST. <https://cordis.europa.eu/project/rcn/199336/factsheet/es>
(visitada el 11 Abril 2019).
- [Brown 2003] Brown, R. L.; Adams, D.E. "Equilibrium point damage prognosis models for structural health monitoring." Journal of Sound and Vibration, vol. 262, May. 2003, págs. 591-611.
doi:10.1016/S0022-460X(03)00113-5
- [Byrne 1997] Byrne, D. S.; Chitty, E.J. "Blind rivet set verification system and method," U.S. Patent US 5661887. September 1997.

- [Caccese 2004] Caccese, V.; Mewer, R.; Vel, S. S. "Detection of bolt load loss in hybrid composite/metal bolted connections". *Engineering Structures*. 2004
doi:10.1016/j.engstruct.2004.02.008
- [Camacho 2012] Camacho, J.; Rivero, A.; Guzmán, D.; Astorga, J.; Saenz, A. "Method for evaluating the installation of blind rivets, method and system for installing blind rivets, method and system for obtaining a pattern, and aircraft." EP 12382106.8. Marzo 2012.
- [Camacho 2019] Camacho, J.; Veiga, F.; Penalva, M.L.; Diez-Olivan, A.; Deitert, L.; López de Lacalle, N. On-Line Monitoring of Blind Fastener Installation Process. *Materials* 2019, 12, 1157.
doi: doi.org/10.3390/ma12071157
- [Campbell 2006] Campbell, F.C. Chapter 11 - Structural Assembly. In *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials*. Elsevier Ltd, 2006, Pages 495-537.
doi: 10.1016/B978-185617495-4/50011-1
- [Collrep 2002] Collrep, J.; Mayer, T.; Sun, J.; Scherling, D. "Shearography testing on aerospace CFRP components and other compounds", National Seminar of the Indian Society for Non-Destructive Testing 2002.
- [Crane 2018] Crane, R. L. "7.17 Introduction to Structural Health Monitoring". *Comprehensive Composite Materials II*, 2018, [355–357].
doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.10350-9
- [Dwivedi 2018] Dwivedi, S. K., Vishwakarma, M., & Soni, P. A. "Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review". *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(2), 3690–3698..
doi:10.1016/j.matpr.2017.11.620
- [Fraunhofer 2006] "Quality rivet by rivet." *Fraunhofer Magazine* 1. (2006) 46-47
- [Fritzen 2009] Fritzen, C. P.; Kraemer, P. "Self-diagnosis of smart structures based on dynamical properties". *Mechanical systems and signal processing*. 2009.
doi:10.1016/j.ymssp.2009.01.006
- [Groves 2018] Groves, R. M. „3.12 Inspection and Monitoring of Composite Aircraft Structures“. *Comprehensive Composite Materials II*, 2018, 300–311.
doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.10340-6

- [Hendorfer 2006] Hendorfer, G. "Neue Mess- und Prüftechnikverfahren: Aktive Thermografie & Shearografie," FH-Campus Wels: 2006.
- [Hung 1997] Y.Y. Hung, "Digital shearography versus TV-holography for non-destructive evaluation," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 26, Mar. 1997, págs. 421-436.
doi:10.1016/0143-8166(95)00141-7
- [Hung 1999] Y.Y. Hung, "Applications of digital shearography for testing of composite structures." *Composites Part B: Engineering*, Vol. 30, Oct. 1999, págs. 765-773.
doi:10.1016/S1359-8368(99)00027-X
- [Hung 2004] M. Y. Y. Hung, "Shearography and applications in the non destructive evaluation", Montreal 2004.
- [Hung 2005] Y. Hung y H. Ho, "Shearography: An optical measurement technique and applications," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 49, Abr. 2005, págs. 61-87.
doi:10.1016/j.mser.2005.04.001
- [Hung 2009] Y. Hung, Y. Chen, S. Ng, L. Liu, Y. Huang, B. Luk, R. Ip, C. Wu, y P. Chung, "Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. In Press, Corrected Proof. 2009.
doi:10.1016/j.mser.2008.11.001
- [Huynh 2018] Huynh, T.C.; Dang, N.-L.; Kim, J.T. Preload monitoring in bolted connection using piezoelectric-based smart interface. *Sensors* 2018, 18, 2766.
doi:10.3390/ma12071157
- [Ibrahim 2005] R. A. Ibrahim, C. L. Pettit. "Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners". *Journal of Sound and Vibration* 279 (2005) 857-936.
doi:10.1016/j.jsv.2003.11.064
- [Jaroslav 2003] Jaroslav Mackerle. "Finite element analysis of fastening and joining: A bibliography (1990-2002)". *Pressure Vessels and Piping* 80 (2003) 253-271.
doi:10.1016/S0308-0161(03)00030-9

- [Jeong 2006] Jeong Kim, Joo-Cheol Yoon, Beom-Soo Kang. "Finite element analysis and modeling of structure bolted joints. Applied Mathematical modeling 31 (2007) 895-911. 2006.
doi:10.1016/j.apm.2006.03.020
- [Kittel 2004] C. Kittel. "Introduction to Solid State Physics". John Wiley & Sons, 2004.
- [Le 2018] Le, M.; Kim, J.; Kim, S.; Lee, J. B-scan ultrasonic testing of rivets in multilayer structures based on short-time fourier transform analysis. Measurement 2018, 128, 495–503.
doi: 10.1016/j.measurement.2018.06.049
- [Liu 2018] Liu, H., Liu, M., Zhang, L., Chen, Y. F., Tan, C. Y., Guo, S., & Cui, F. "Directed Acoustic Shearography for Crack Detection around Fastener Holes in Aluminum Plates". NDT & E International. 2018.
doi:10.1016/j.ndteint.2018.09.007
- [Mayer 2002] T. Mayer, D. Scherling, J. Sun, "Shearography testing on aerospace CFRP components." Barcelona 2002.
- [Mohan 2008] Mohan D, Saygin C, Sarangapani J. "Real-time detection of grip length deviation during pull-type fastening: a Mahalanobis–Taguchi System (MTS)-based approach." International Journal of Advanced Manufacturing Technology. (2008).
doi:10.1007/s00170-007-1280-9
- [Monogram 2019] Monogram Aerospace Composi-lok® Blind Fastener Flush Break 130 Flush Shear Head for Advance Composite Material and Metallic Structures. Titanium. Rev R. Monogram Aerospace Fasteners. 2017.
<https://trsaero.com/monogramaerospace/wp-content/uploads/technical-drawings/composi-lok/MBF2313-REV-R.pdf>
(visitada en Febrero 2019)..
- [Monogram 2013] Monogram Aerospace. "Installation & inspection specification for Composi-Lok® II blind fasteners." Specification MBF2003. Rev. AG. 2008.
- [Nageswaran 2006] Nageswaran, C.; Bird, C.R.; Takahashi, R. "Phased array scanning of artificial and impact damage in carbon fibre reinforced plastic (CFRP)." NDT 2005, the 44 the Annual British Conference on NDT, Harrogate, UK, September 2005.

- [Pkmtricept] <http://www.pkmtricept.com/aplicaciones/index.php?id=en&Naplica=1240239668>
Consulta web: Última visita: 14/08/2013.
- [Rexroth BG] Rexroth Bosch Group. "Higher Levels of Automation Lift Productivity for Airbus A380 Wing Assembly Process." Drive & Control profile. Consulta web: Última consulta: 30/08/2013.
http://www.boschrexroth.com/country_units/america/united_states/en/Trends_and_Topics/Case_Studies_and_Tech_Papers/a_downloads/BUS_Airbus-Electroimpact_Profile.pdf
- [Riegert 2002] Riegert, G.; Zweschper, T.; Busse, G. "Inspection of rivets and cracks in metal using thermography methods." QIRT Conference, Dubrovnik. 2002.
- [Rodríguez 2011] Rodríguez Gude, María. "Adhesivos nanorreforzados de base epoxi para la unión de laminados de fibra de carbono." Tesis Doctoral. Escuela Superior de Ciencias experimentales y tecnología. Universidad Rey Juan Carlos. 2011.
- [Sampaio 1999] Sampaio, R. P. C.; Maia, N. M. M.; Silva, J. M. M. "Damage detection using the frequency-response-function curvature method. Journal of Sound and Vibration. 1999.
doi:10.1006/jsvi.1999.2340
- [Saygin 2010] Saygin C, Mohan D, Sarangapani J (2010) Real-time detection of grip length during fastening of bolted joints: a Mahalanobis-Taguchi system (MTS) based approach. 2010. Journal of Intelligent Manufacturing. págs.377–392.
- [Shepard 2018] Shepard, S. M. "7.12 Thermal Nondestructive Evaluation of Composite Materials and Structures." Reference Module in Materials Science and Materials Engineering Comprehensive Composite Materials II. Volume 7, 2018, Pages 250-269
- [Steinchen 1995] W. Steinchen, L.X. Yang, M. Schuth, y G. Kupfer, "Application of shearography to quality assurance." Journal of Materials Processing Technology, Vol. 52, May. 1995, págs. 141-150.
doi:10.1016/0924-0136(94)01435-4
- [Steinchen 1999] Steinchen, W., Kupfer, G., Mäckel, P., Vössing, F. "Determination of strain distribution by means of digital shearography," Measurement, vol. 26, Sep. 1999, págs. 79-90.
doi:10.1016/S0263-2241(99)00008-1

- [Stepinski 2006] Stepinski, T. "Method and apparatus for assessing quality of rivets using ultrasound." WO2006/110089. 2006.
- [Sung-Jin 2007] Sung-Jin Song, L. W. S. J. "Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems." Springer, 2007.
- [TheGuardian 2006] The Guardian. "Wings of desire." Thursday 23 February 2006. Consulta web: Última consulta: 30/08/2013
<http://www.theguardian.com/business/2006/feb/23/theairlineindustry.travelnews>
- [Venkateswarlu 2013] Venkateswarlu, V., Tripathy, D., Rajagopal, K., Thomas, K., Tharian P. "Failure Analysis and Optimization of Thermomechanical Process Parameters of Titanium alloy (Ti-6Al-4 V) Fasteners for Aerospace Applications". (2013).
doi: 10.1016/j.csefa.2013.04.003
- [Wang 2008] Wang, P.; Wells, J. W. "Method for monitoring the installation of blind rivets," U.S. Patent US7313851, 2008.
- [Weeks 2006] Weeks, G.; Hull, D.; Godwin, S.; Jackson, G. "Method and apparatus for monitoring blind fastener setting." U.S. Patent US 2006/0191120 A1, 2006.
- [White 2008] White, C.; Li, H.; Whittingham, B.; Herszberg, I.; Mouritz, A.P. "Damage detection in repairs using frequency response techniques". Composite Structures, May 2008.
doi:10.1016/j.compstruct.2008.05.010
- [Zaiß 2017] Zaiß, M., Demmerle, J., Oergele, J.-N., Lanza, G. "New Concepts for Quality Assurance of Lightweight Material". Procedia CIRP 66:259–264. 2017.
doi: 10.1016/j.procir.2017.03.224
- [Zhang 2017] Zhang, Z.; Liu, M.; Su, Z.; Xiao, Y. Continuous monitoring of residual torque of loose bolt in a bolted joint. Procedia Eng. 2017, 188, 278–285.
doi: doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.485
- [Zweschper 2001] Zweschper, T.; Dillenz, A.; Busse, G. "NDE of adhesive joints and riveted structures with lock-in thermography methods." Proc. SPIE 4360, Thermosense XXIII, 567. 2001. doi:10.1117/12.421041