Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

Cuantificación de impactos en materiales composites con termografía infrarroja activa. Resultados preliminares.

(Quantification of impacts on composite materials with active infrared thermography. Preliminary results.)

Para acceder al Título de

Máster Universitario en Ciencia e Ingeniería de la Luz

Autor: Alex Alberto González Antuch

Septiembre 2022



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA LUZ CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

Realizado por:	Alex Alberto González Antuch
Directores del TFM:	Francisco Javier Madruga Saavedra
Título:	"Cuantificación de impactos en materiales composites con
	termografía infrarroja activa. Resultados preliminares."

Presentado a examen el día: 29 de septiembre de 2022

para acceder al Título de

Máster Universitario en Ciencia e Ingeniería de la Luz

Composición del tribunal:

Presidente:	José Luis Arce Diego
Secretario:	Antonio Quintela Incera
Vocal:	Olga M ^a Conde Portilla

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFM

 $\mathbf{V}^{\underline{\mathbf{0}}}$ $\mathbf{B}^{\underline{\mathbf{0}}}$ del Subdirector

Trabajo Fin de Máster N^{Q} (a asignar por Secretaría)

Trabajo realizado gracias a los medios aportados por el proyecto del Plan Nacional PID2019-107270 RB-C21/ AEI / 10.13039/501100011033.

Resumen.

Los materiales compuestos basadas en fibra de carbono y vidrio son cada vez más utilizados en ramas de gran impacto social como es el caso de la industria aeroespacial e incluso en recipientes contenedores de gases a alta presión tanto para uso industrial como medicinal. Defectos apenas perceptibles pueden provocar fallas estructurales en estos materiales durante su tiempo de servicio, la mayoría de estos defectos suelen producirse por impactos, debido a esto surge la necesidad de inspeccionar estos materiales de una forma no destructiva para detectar estas imperfecciones sin que este proceso afecte el uso de los mismos. Entre los métodos para inspeccionar los materiales compuestos no destructivamente se encuentra la Termografía Infrarroja Activa. En este trabajo se analizan los fundamentos teóricos de este método, así como las principales técnicas de pre-procesado, procesado y post-procesado de las imágenes termográficas. Posteriormente utilizando un software se simulan defectos con diferentes profundidades en materiales con propiedades térmicas similares a la fibra de carbono v vidrio v se desarrolla un procedimiento con el cual se logra establecer una correspondencia entre la profundidad de penetración de los impactos y la energía con que estos han sido creados. Posteriormente se efectúa un montaje experimental con el cual se pretende validar el procedimiento antes mencionado.

Palabras claves: Energía de impactos, materiales compuestos, profundidad de penetración, Termografía Infrarroja Activa.

Abstract

Composite materials based on carbon fiber and glass are increasingly used in branches of great social impact as is the case of the aerospace industry and even in high pressure gas containers for both industrial and medical use. Barely perceptible defects can cause structural failures in these materials during their service time, most of these defects are usually caused by impacts, due to this arises the need to inspect these materials in a non-destructive way to detect these imperfections without this process affects the use of them. Among the methods to inspect composite materials non-destructively is Active Infrared Thermography. In this work the theoretical foundations of this method are analyzed, as well as the main techniques of pre-processing, processing and post-processing of thermographic images. Subsequently, using software, defects with different depths in materials with thermal properties similar to carbon fiber and glass are simulated and a procedure is developed with which a correspondence between the penetration depth of the impacts and the energy with which they have been created is established. Subsequently, an experimental setup is carried out in order to validate the aforementioned procedure.

Keywords: Impact energy, composite materials, penetration depth, Active Infrared Thermography.

Acrónimos

- AC: Contraste Absoluto
- AE: Prueba de Emisión Acústica
- ANN: Redes Neuronales Artificiales
- ASNT: Sociedad Americana de Ensayos no Destructivos
- BVID: Daños por Impactos Apenas Visible
- CCD: Dispositivo de Carga Acoplada
- CFRP: Polímero Reforzado con Fibra de Carbono
- CFT: Transformada de Fourier Continua
- CNG: Gas Natural Comprimido
- DAC: Contraste Absoluto Diferencial
- DAC: Corrección de Amplitud-Distancia
- DFT: Transformada de Fourier Discreta
- ECT: Prueba Eddy-Current
- EOF: Funciones Ortogonales Empíricas
- ET: Prueba Electromagnética
- FBP: Proyección Posterior Filtrada
- FPA: Arreglo de Plano Focal
- FPN: Patrón de Ruido Fijo
- FT: Transformada de Fourier
- GFRP: Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio
- HFECT: Prueba Eddy-Current de Alta Frecuencia
- HOS: Estadísticos de Alto Orden
- IR: Radiación Infrarroja
- IRT: Prueba Térmica/Infrarroja
- LM: Métodos de Prueba Láser
- LS: Shearografía Láser
- LT: Prueba de Fugas
- LT: Termografía Lock-In

- MFL: Prueba de Flujo Magnético
- MT: Prueba de Partículas Magnéticas
- NDT: Ensayos no Destructivos
- NESB: Rama de Ciencias de la Evaluación no Destructiva
- NR: Prueba Radiográfica de Neutrones
- PCT: Termografía de Componentes Principales
- PPT: Termografía de Fase Pulsada
- PT: Prueba de Líquidos Penetrantes
- PT: Termografía Pulsada
- RT: Prueba Radiográfica
- SH: Termografía Step-Heating
- SVD: Descomposición de Valores Singulares
- TSR: Reconstrucción de la Señal Termográfica
- UT: Prueba Ultrasónica
- VA: Análisis de Vibración
- VT: Prueba Visual
- XCL: Laminografía Computarizada de Rayos X
- XCT: Tomografía Computarizada de Rayos X

Índice

Índice de figuras	V
Índice de tablas	vii
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	3
2. Ensayos No Destructivos	5
2.1. Inspección Visual	6
2.2. Líquidos penetrantes	6
2.3. Ultrasonidos	6
2.4. Corrientes Inducidas	8
2.5. Shearografía Láser	10
2.6. Radiografía Industrial	11
2.6.1. Tomografía Computarizada de Rayos X	12
2.6.2. Laminografía computarizada	14
2.7. Termografía infrarroja	14
3. Termografía	16
3.1. Tipos de Termografía Activa en función de la fuente de excitación	16
3.1.1. Termografía Lock-In	17
3.1.2. Termografía Pulsada	18
3.1.3. Termografía Step-Heating	19
3.2. Análisis de Termogramas	20
3.2.1. Pre-Procesado	20
3.2.2. Procesado	22
3.2.3. Post-Procesado	27
4. Materiales y Simulación	32
4.1. Matriz	33
4.2. Refuerzo	34
4.3. Simulación de defectos	36
4.4. Análisis de defectos empleando PPT	38
4.4.1. Selección de parámetros de adquisición	39
4.5. Cuantificación de defectos mediante análisis de frecuencia ciega luego de efectua PPT en CFRP.	r 40
4.6. Cuantificación de defectos mediante análisis de frecuencia ciega luego de efectua PPT en GFRP.	ır 44

4.7.	Evaluación de la técnica PPT mediante el empleo de la métrica SNR	47
5. Ana	álisis experimental de impactos en CFRP y GFRP	50
5.1.	Montaje experimental propuesto	50
5.2.	Probetas	51
5.3.	Análisis de los termogramas	52
5.4.	Análisis del montaje experimental	53
6. Co	nclusiones y líneas futuras	54
6.1.	Conclusiones	54
6.2.	Recomendaciones y líneas futuras	55
Referen	icias	56
Anexos		60
Códig	jo empleado para PPT	60
Códig	o empleado para obtener Frecuencia Ciega en CFRP	61
Códig	o empleado para obtener Frecuencia Ciega en GFRP	62
Códig	jo empleado para obtener valores de SNR	64

Índice de figuras

Figura 1.1. Composición Boeing 787	. 1
Figura 1.2. Composición LCA. [2]	. 2
Figura. 2.1. Fundamentos de la inspección por ultrasonidos. [4]	. 7
Figura. 2.2. Esquema representativo de la técnica ultrasónica de pulso eco por inmersión. [5]	. 7
Figura. 2.3. Equipo de inspección utilizado. [4]	. 8
Figura. 2.4. Principio de ECT. [3]	. 9
Figura. 2.5. Fundamentos de la shearografía digital. [3]	.10
Figura. 2.6. Proceso de CT. [3]	.13
Figura. 2.7. Muestra de impactos. [19]	.13
Figura. 2.8. Bandas infrarrojas en el espectro electromagnético. [25]	15
Figura 3.1. Representación esquemática de los diferentes tipos de termografía	.17
Figura 3.2. Metodología para el análisis de defectos mediante imágenes termográficas	.20
Figura 3.3. Curva calentamiento - enfriamiento de un material.	.21
Figura 3.4. Espécimen de CFRP con inclusiones de Teflón: a) Perfiles de temperatura, b) perf	fil
del contraste térmico absoluto. [16]	.22
Figura 3.5. Perfil del contraste térmico absoluto para 4 regiones distintas del espécimen de	
CFRP con inclusiones de Teflón. [16]	.23
Figura 3.6. Termografía de Fase Pulsada (PPT) [10]	23
Figura 3.7. Reordenación de los datos termográficos de una secuencia 3D a una matriz A 2I	C
para aplicar SVD. [16]	.25
Figura 3.8. Reordenación de la matriz U (2D) en una matriz 3D que contiene los EOF. [16]	.25
Figura 3.9. Diferencia de propagación entre zona sana y zona con defecto	.27
Figura 3.10. (a) Perfil de temperatura; (b) Respuesta de amplitud y (c) Respuesta de fase para	а
un pixel no defectuoso en el dominio de la frecuencia con coordenadas (i,j).[16]	.28
Figura 3.11. Cuantificación de la profundidad con contraste de fase y frecuencia ciega. [16]	.29
Figura 4.1. Representación esquemática de un material compuesto. [1]	.32
Figura 4.2. Componentes principales para la creación de materiales compuestos. [2]	32
Figura 4.3. Esquema con los principales refuerzos. [2]	.34
Figura 4.4. Muestra de fibra de vidrio. [3]	.35
Figura 4.5. Muestra de fibra de carbono. [4]	.35
Figura 4.6. Vista principal del software ThermoCalc-3D™	.36
Figura 4.7. Ventanas de caracterización de a) Material, b) Defecto	.37
Figura 4.8. Ventanas de caracterización de a) Tiempo de adquisición de muestras y método c	le
calentamiento de la muestra, b) Forma de obtención de termogramas	.37
Figura 4.9. Aproximación de diferentes tipos de ondas empleando armónicos. [5]	.38
Figura 4.10. Ejemplificación de selección de las zonas de señal y ruido	40
Figura 4.11. Contraste de fase para defectos de 1mm, 2mm, 2.5mm y 2.7mm en CFRP	.40
Figura 4.12. Acercamiento al contraste de fase para defectos de 1mm, 2mm, 2.5mm y 2.7mn	n
en CFRP	41
Figura 4.13. Contraste de fase para defectos comprendidos entre 6e-13m y 20e-9m en CFRF	Э.
	43
Figura 4.14. Contraste de fase para defectos de 6e-13m y 10e-9m con $\Delta t = 0.1$ segundos en	
CFRP	43
Figura 4.15. Contraste de fase para defectos de 1mm, 2mm, 2.5mm y 2.7mm en GFRP	44
Figura 4.16. Acercamiento al contraste de fase para defectos de 1mm, 2mm, 2.5mm y 2.7mm	n
en GFRP	45

Figura 4.17. Contraste de fase para defectos comprendidos entre 6e-13m y 20e-9m en Gl	FRP.
	46
Figura 4.18. Acercamiento al contraste de fase para defectos de 6e-13m, 10e-9m, 15e-9r	пу
20e-9m en GFRP	47
Figura 4.19. Comportamiento SNR en fasegramas en CFRP para defectos en el intervalo	de a)
6e-13mm – 20e-9m y b) 1mm-2.7mm	48
Figura 4.20. Comportamiento SNR en fasegramas en GFRP para defectos en el intervalo	de a)
6e-13mm – 20e-9m y b) 1mm-2.7mm	48
Figura 4.21. Comportamiento SNR en termogramas de amplitud en CFRP para defectos e	en el
intervalo de a) 6e-13 m - 20e-9m y b) 1mm - 2.7mm	49
Figura 4.22. Comportamiento SNR en termogramas de amplitud en GFRP para defectos e	en el
intervalo de a) 6e-13mm – 20e-9m y b) 1mm-2.7mm	49
Figura 5.1. Montaje experimental propuesto.	50
Figura 5.2. Probeta de CFRP	51
Figura 5.3. Probeta de GFRP	52
Figura 5.4. Fasegramas de impactos de a) 15J y b) 20J	52
Figura 5.5. Fasegramas de impactos de a) 5J y b) 10J	53
Figura 5.6. Fasegrama de impacto de 20J en GFRP.	53

Índice de tablas

Tabla 2.1. Métodos convencionales de (NDT) [2]	5
Tabla 4.1. Ventajas y desventajas de las técnicas PT y LT	3
Tabla 4.2. Relación entre energía de impacto y profundidades de penetración asumidas en	
CFRP4	1
Tabla 4.3. Relación entre energía de impacto y profundidades de penetración reales en CFRP.	
	2
Tabla 4.4. Relación frecuencia ciega con profundidad de penetración real en CFRP42	2
Tabla 4.5. Relación entre energía de impacto y profundidades de penetración asumidas en	
GFRP4	5
Tabla 4.6. Relación entre energía de impacto y profundidades de penetración reales en GFRP.	
	5
Tabla 4.7. Relación frecuencia ciega con profundidad de penetración real en GFRP4	3

1. Introducción

1.1. Motivación

En la industria aeronáutica, la optimización de los componentes estructurales, se traduce en una reducción del peso de las aeronaves que, a su vez, reduce la cantidad de combustible necesaria para realizar cada trayecto. Este factor supone una gran ventaja en términos de eficiencia ya que el peso del combustible representa un porcentaje considerable del peso total de la aeronave.

En aras de reducir el peso, los costes de mantenimiento, aumentar la vida útil y la eficiencia de las estructuras aeroespaciales los fabricantes de esta industria están apostando por el aumento del porcentaje de materiales compuestos en la fabricación de los aviones.

El Boeing 787 "Dreamliner", aeronave con fuerte presencia en las aerolíneas más prestigiosas del mundo, alcanza la mayor eficiencia de los aviones de tamaño medio mediante el uso de varias tecnologías innovadoras, incluyendo materiales compuestos ligeros que representan aproximadamente el 50% del peso del avión como se muestra en la figura 1.1. La prestigiosa aerolínea japonesa All Nippon Airways reportó que el avión es un 21% más eficiente en el ahorro de combustible que su predecesor. [1]



Figura 1.1. Composición Boeing 787.

La industria de la aviación militar también ha apostado por la utilización de los materiales compuestos basados en Polímeros Reforzados con Fibra de Carbono (CFRP, Carbon Fiber-Reinforced Polymer) como muestra de esto se encuentra el Light Combat Aircraft (LCA)[2] mostrado en la figura 1.2 que posee un 45% de su cuerpo fabricado con materiales compuestos.



Figura 1.2. Composición LCA. [2]

Los materiales compuestos basados en Polímeros Reforzados con Fibra de Vidrio (GFRP, Glass Fiber Reinforced Polymer) son igualmente utilizados en la industria aeroespacial, no se utilizan para la construcción de fuselajes primarios, ya que hay materiales alternativos como los compuestos de fibra de carbono, pero son empleados en el motor, portaequipajes, cajas de instrumentos, mamparas, conductos, depósitos y recintos de antenas.

Por otro lado, para el almacenamiento a alta presión de gases comprimidos, los materiales compuestos de fibra de vidrio ofrecen las relaciones más competitivas relación resistencia-peso. Las aplicaciones incluyen el Gas Natural Comprimido (CNG, Compressed Natural Gas), combustible de hidrógeno y el aire respirable para uso personal y rescate de emergencia. [3]

Defectos internos pueden generarse en los materiales compuestos durante su fabricación o en el transcurso de su vida útil. Los defectos en servicio suelen ser causados por impactos [4]. Los impactos producen reducciones significativas en las propiedades mecánicas y en la resistencia a la fatiga de las estructuras de materiales compuestos incluso como resultado de impactos de baja energía, por ejemplo, daños por Impactos Apenas Visibles (BVID, Barely Visible Impact Damage). Algunos de estos defectos que pueden ser encontrados en materiales compuestos son: porosidad, delaminación, rotura de fibra, mal alineamiento de la fibra y rotura de la matriz.

En la literatura se han reportado diversos estudios con el fin de detectar y medir daños producidos por impactos en materiales compuestos de fibra de vidrio y carbono utilizando técnicas de Ensayos no Destructivos (NDT, Non Destructive Testing) para mantener la integridad de las muestras inspeccionadas.

Empleando la técnica de ultrasonidos en [5] y [6] se analizaron impactos a baja velocidad sobre laminados de tejido de fibra de carbono con matriz epoxi utilizando una torre de caída con percutor y un sistema neumático capaz de impulsar proyectiles de hielo respectivamente, mientras que en [7] se analizaron impactos con 4 niveles de energía diferentes provocados por un percutor sobre materiales compuestos de fibra de vidrio.

Con corrientes inducidas de alta frecuencia fue posible visualizar en materiales compuestos de fibra de carbono daños por impactos en [8] mientras que en [9] estas visualizaciones se llevaron a cabo empleando corrientes de baja frecuencia. En [10] utilizando técnicas para mejorar la

conductividad de materiales compuestos de fibra de vidrio se determinaron distintos defectos como las delaminaciones provocadas en este tipo de materiales por impactos.

Entre las técnicas de shearografía láser una de la más empleada para generar el patrón de interferencia es la basada en vibración, en [11] se empleó esta técnica para identificar agujeros en un material compuesto de fibra de carbono mientras que en [7] se utilizó esta misma técnica para inspeccionar delaminaciones producidas por impactos en GFRP.

Mediante el uso de radiografía industrial en [12] se caracterizó el daño provocado por impactos en estructuras de GFRP y CFRP mientras que en [13]–[15] se analizaron impactos con diferentes niveles de energía en laminados epoxídicos de fibra de carbono.

A pesar de los buenos resultados obtenidos con cada uno de estos estudios, estas técnicas como se demostrará más adelante en este trabajo no son las más idóneas para cuantificar impactos en grandes superficies como los existentes en la industria aeroespacial o en los recipientes contenedores de gases a altas presiones.

Por todo lo antes expuesto y debido a su amplio uso en industrias de gran interés social y económico en el siguiente trabajo se medirán y cuantificarán defectos e impactos sobre materiales compuestos de fibra de carbono y vidrio utilizando termografía infrarroja activa.

1.2. Objetivos

Se establece como objetivo principal de este trabajo utilizar técnica NDT basada en Termografía Infrarroja Activa para medir y cuantificar impactos en materiales compuestos basados en CFRP y GFRP.

Para lo cual se proponen objetivos parciales como:

- Analizar el estado del arte de los distintos NDTs en la detección y caracterización de impactos realizados en materiales compuestos.
- Definir los distintos métodos de pre-procesado, procesado y post-procesado de termogramas.
- Simular probetas con impactos de diferentes energías y desarrollar método capaz de cuantificar la energía con la que se efectuaron estos impactos.
- Medir en laboratorio probetas de materiales compuestos con distintos impactos.
- Manejar instrumentación necesaria para realizar Termografía Infrarroja Activa.
- Analizar los resultados obtenidos.

Para cumplir los objetivos antes expuestos el trabajo se ha estructurado de la siguiente forma: En el capítulo 2 se lleva a cabo un análisis del estado del arte de los principales ensayos no destructivos, así como sus principios de operación. En el capítulo 3 se abordan las distintas técnicas de termografía en cuanto a los diferentes métodos de excitación y los principales métodos de pre-procesado, procesado y post-procesado para interpretar los termogramas obtenidos en aras de medir y cuantificar los defectos existentes. En el capítulo 4 se hace referencia a los principales materiales compuestos con especial énfasis en los reforzados con fibras de vidrio y carbono, a su vez se explica la metodología llevada a cabo para analizar los datos simulados. En el capítulo 5 se discutirán los resultados obtenidos luego de emplear la técnica de termografía activa en el laboratorio para cuantificar los defectos existentes en dos probetas de CFRP y GFRP respectivamente dando paso de esta forma al capítulo 6 donde se exponen las principales conclusiones a las que se arribaron tras la realización de este trabajo.

2. Ensayos No Destructivos

Los NDT son el proceso de inspección, ensayo o evaluación de materiales, componentes o conjuntos para detectar discontinuidades o diferencias en las características sin destruir la capacidad de servicio de la pieza o el sistema. En otras palabras, una vez finalizada la inspección o la prueba, la pieza puede seguir utilizándose. [16]

Hoy en día, los modernos ensayos no destructivos se utilizan en la fabricación y en las inspecciones en servicio para garantizar la integridad y la fiabilidad de los productos, controlar los procesos de fabricación, reducir los costes de producción y mantener un nivel de calidad uniforme. Durante la construcción, los ensayos no destructivos se utilizan para garantizar la calidad de los materiales y los procesos de unión durante las fases de fabricación y montaje mientras que las inspecciones no destructivas en servicio se utilizan para garantizar que los productos en uso siguen teniendo la integridad necesaria para asegurar su utilidad y la seguridad del público.

Los nombres de los métodos de ensayo suelen hacer referencia al tipo de medio de penetración o al equipo utilizado para realizar dicho ensayo. Los métodos actuales de NDT reconocidos por la Sociedad Americana de Ensayos no Destructivos (ASNT, American Society for Nondestructive Testing) son: [16]

- Prueba de emisión acústica (AE, Acoustic Emission Testing).
- Prueba electromagnética (ET, Electromagnetic Testing).
- Métodos de prueba láser (LM, Laser Testing Methods).
- Prueba de fugas (LT, Leak Testing).
- Prueba de flujo magnético (MFL, Magnetic Flux Leakage).
- Prueba de líquidos penetrantes (PT, Liquid Penetrant Testing).
- Prueba de partículas magnéticas (MT, Magnetic Particle Testing).
- Prueba radiográfica de neutrones (NR, Neutron Radiographic Testing).
- Prueba radiográfica (RT, Radiographic Testing).
- Prueba térmica/infrarroja (IRT, Thermal/Infrared Testing).
- Prueba ultrasónica (UT, Ultrasonic Testing).
- Análisis de vibración (VA, Vibration Analysis).
- Prueba visual (VT, Visual Testing).

En la tabla 2.1 se muestran los NDT más utilizados en la industria, así como el fenómeno físico en el que se basan.

Método	Fenómeno Físico
Inspección visual	Luz visible
Líquidos penetrantes	Capilaridad
Partículas magnéticas	Campo magnético
Corrientes inducidas	Corriente eléctrica
Radiografía industrial	Ondas electromagnéticas
Ultrasonidos	Ondas elásticas
Emisión acústica	Ondas elásticas

Tabla 2.1. Métodos convencionales de (NDT) [2]

Termografía infrarroja Ondas electromagnéticas
--

2.1. Inspección Visual

La VT es el tipo más básico de NDT para inspeccionar daños. Es rápida, económicamente viable y flexible, mientras que sus desventajas están asociadas a: [17]

- Psicología de la visión. Sobre todo, en lo referente a la fatiga.
- Iluminación, su medida y su evaluación en función del trabajo de inspección a realizar.
- Teoría de la percepción e identificación del color.
- Medios auxiliares de inspección (lupas, endoscopios, sistemas de TV, etc)

El análisis por VT es un procedimiento líder en el control de las imperfecciones de la superficie para la aceptación y rechazo durante la producción de piezas ya que permite detectar defectos macroscópicos, como uniones deficientes, dimensiones erróneas, acabado superficial deficiente y ajustes superficiales deficientes.

2.2. Líquidos penetrantes

Esta técnica no destructiva está basada en la utilización de un líquido que posee características físico-químicas como el efecto de capilaridad, que le hace capaz de penetrar en discontinuidades abiertas a la superficie, de forma que, al limpiar el exceso de líquido superficial, quede solamente el introducido en las grietas, para posteriormente, ayudado casi siempre por la acción de un agente denominado revelador, salir y señalar sobre la superficie las zonas en las que existen discontinuidades. El campo de aplicación de los líquidos penetrantes se extiende a cualquier tipo de industria de fabricación o de mantenimiento en donde sea necesario detectar discontinuidades superficiales en materiales metálicos o no metálicos con la única condición de que la superficie no sea porosa. [17]

2.3. Ultrasonidos

Es una técnica muy empleada en la inspección de materiales compuestos y consiste en la detección de defectos internos por cambios en la propagación de ondas de sonido de alta frecuencia en el interior del material.

Entre los diferentes tipos de métodos de representación de ultrasonidos el C-Scan de ultrasonidos es una herramienta valiosa para supervisar las pérdidas de transmisión causadas por la delaminación, los defectos volumétricos, incluidos los vacíos y la detección de daños en los laminados compuestos bajo impactos de baja energía y de alta energía. Esta técnica proporciona una imagen de los defectos a través del espesor del laminado (dirección C). [18]

En este método, un transductor piezoeléctrico emite un pulso sonoro (0.5-20 MHz) que se transmite a través del medio en contacto hasta alcanzar un punto de discontinuidad. En este punto, la propagación de ondas se ve interrumpida por la diferencia de impedancia acústica que provoca dicha discontinuidad, haciendo que parte de las ondas se vean reflejadas mientras que el resto continúa hasta alcanzar la siguiente discontinuidad. Las ondas reflejadas son captadas por un receptor colocado en el transductor piezoeléctrico. En ausencia de defectos, la primera discontinuidad se corresponde con el final del espécimen de inspección, provocando el eco de fondo como se observa en la figura 2.1. La identificación de este punto resulta de gran importancia para la correcta interpretación de los resultados de la inspección por ultrasonidos, ya que proporciona el punto de referencia con el que comparar los ecos producidos por defectos

o daños en el interior del material inspeccionado. Estos ecos provocados por daños o defectos en el material reflejarán parte del pulso emitido, proporcionando información sobre la ubicación (profundidad) y extensión de los defectos. A mayor atenuación, mayor será el defecto detectado [5].



Figura. 2.1. Fundamentos de la inspección por ultrasonidos. [4]

En [6] se llevó a cabo un estudio de materiales compuestos CFRP frente al impacto de esferas de hielo. Para llevar a cabo el estudio experimental se utilizó un sistema neumático capaz de impulsar los proyectiles de hielo a la velocidad deseada. Haciendo uso de técnicas no destructivas (B-Scan y C-Scan) de forma combinada fue posible estudiar la fuerza ejercida por el impacto de los proyectiles esféricos de hielo, así como la influencia sobre esta de la velocidad de impacto y de la masa del proyectil lo que permitió determinar el peso de diferentes variables en el daño producido por el impacto: espesor del laminado, energía de impacto y diámetro del proyectil. En dicho experimento para obtener una transferencia optima de las ondas y garantizar la continuidad entre el emisor y el material se sumergió tanto el emisor como el material en un medio acuoso de baja impedancia acústica. De esta forma la presencia de discontinuidades en el laminado (delaminaciones) en el que se transmiten las ondas provoca su atenuación. Para poder cuantificar la atenuación se mantuvo una superficie de reflexión de referencia como se aprecia en la figura 2.2.



Figura. 2.2. Esquema representativo de la técnica ultrasónica de pulso eco por inmersión. [5]

En [5] se llevó a cabo un estudio de impactos a baja velocidad sobre laminados de CFRP. En este estudio se analizaron los daños provocados por este tipo de impactos sobre distintas probetas del material compuesto, variando la energía de impacto y modificando el espesor y la secuencia de apilamiento de los laminados. Para ello se usó la técnica C-SCAN utilizando un transductor de 5 MHz para emitir el pulso sonoro, siendo agua dulce el medio transmisor. Además, se aplicó una Corrección de Amplitud-distancia (DAC, Distance-Amplitude Correction) para eliminar la atenuación producida por la propagación del pulso a través de la probeta intacta.

Aplicando esta técnica es posible identificar de forma más precisa la atenuación debida a los daños internos. En la figura 2.3 se observa el equipo de inspección utilizado.



Figura. 2.3. Equipo de inspección utilizado. [4]

En [7] utilizando la técnica C-Scan se analizaron impactos de cuatro niveles distintos de energía realizados sobre una probeta de GFRP, para ello se utilizó un transductor de 1MHz para emitir el pulso sonoro y se sumergió el espécimen a inspeccionar en un tanque de agua. Los autores reportaron que a pesar de la complejidad del montaje para realizar la inspección y la demora de la adquisición de las medidas utilizando esta técnica fue posible detectar los cuatro impactos apenas visibles.

El notable desajuste de impedancias entre el aire y los materiales sólidos hace que los materiales compuestos puedan ser difíciles de inspeccionar. Un enfoque común es acoplar el sonido del transductor a un objeto sumergiendo el transductor y el objeto en un tanque de agua, un procedimiento llamado prueba de inmersión por ultrasonidos que suele proporcionar mejores resultados. La técnica de inmersión por ultrasonidos requiere que se desmonte el objeto de ensayo de la estructura, lo que puede causar algunos trastornos en el funcionamiento de las estructuras aeroespaciales.

2.4. Corrientes Inducidas

Los compuestos de carbono-epoxi presentan propiedades eléctricas que dependen del tipo de fibras de carbono y de su fracción de volumen en el material, teniendo la conductividad eléctrica transversal entre 10 S/m y 100 S/m, y la conductividad longitudinal entre 5×10³ S/m y 5×10⁴ S/m. [19]

En su forma más básica la sonda Eddy-Current Testing (ECT) de un solo elemento, una bobina de alambre conductor se excita con una corriente eléctrica alterna. Esta bobina de alambre produce un campo magnético alterno a su alrededor. El campo magnético oscila a la misma frecuencia que la corriente que pasa por la bobina. Cuando la bobina se acerca a un material conductor, se inducen en el material corrientes opuestas a las de la bobina, es decir, corrientes de Foucault.

Las variaciones en la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética del objeto de ensayo, así como la presencia de defectos, provocan un cambio en la corriente de Foucault y el correspondiente cambio de fase y amplitud que puede detectarse midiendo los cambios de impedancia en la bobina, lo que es un signo revelador de la presencia de defectos. En la figura 2.4 se muestra el principio de funcionamiento de ECT.



Figura. 2.4. Principio de ECT. [3]

En [8] se desarrolló una Prueba Eddy-Current de Alta Frecuencia (HFECT, High Frecuency Eddy-Current Testing) para visualizar la orientación de las fibras, las fluctuaciones de la fracción de las fibras, las regiones de alcance de la resina, la delaminación y los daños por impacto en los compuestos de CFRP. Las HFECT se consideran más adecuadas para los materiales menos conductores.

Cuando se aplican altas frecuencias (por ejemplo, 50 MHz o más), la profundidad de penetración se limitará a las pocas capas superiores por debajo de la superficie de la muestra y, por lo tanto, sólo se pueden caracterizar los defectos cercanos a la superficie. [18]

Con frecuencias más bajas, es posible evaluar la integridad del material de la muestra a mayor profundidad por debajo de la superficie. Por lo tanto, la ECT de baja frecuencia es más popular para las estructuras tipo sándwich. En [20] investigaron las corrientes de Foucault de barrido de baja frecuencia para caracterizar los diferentes tipos de defectos en los laminados de CFRP y los defectos internos insertados en los paneles sándwich de nido de abeja y se demostró que la intensidad del campo magnético se ve más afectada por el impacto de baja energía, mientras que la delaminación tiene más influencia en la conductividad local.

En [9] desarrollaron un ECT de alta precisión y baja frecuencia (hasta 250 kHz) e informaron la detección y visualización en las imágenes escaneadas de varios defectos, como la orientación de las fibras, los haces de fibras desalineados, las grietas, las delaminaciones y los daños por impacto.

Los GFRP son no conductores por tanto emplear la técnica de ECT para detectar defectos no es factible. En [10] se introdujeron piezas de metal en laminados de fibra de vidrio para evaluar la posibilidad de emplear ECT como técnica no destructiva para determinar distintos defectos (agujeros, delaminaciones por impactos y delaminaciones por inserción de membranas de Polytetrafluoroethylene (PTFE)). Luego de realizar este procedimiento se demostró que, mejorando la conductividad de las fibras de vidrio con la inserción de metales de alta permeabilidad magnética, baja conductividad eléctrica, bajo espesor y baja conductividad térmica se obtienen buenos resultados a la hora de la determinación y caracterización de defectos.

La ECT tiene algunas limitaciones cuando se aplica a los ensayos no destructivos de los materiales compuestos. Las señales medidas son difíciles de interpretar, por ejemplo, es difícil distinguir la delaminación de las grietas interlaminares. La profundidad de penetración no es demasiado alta y detecta principalmente defectos superficiales y subsuperficiales. La técnica está limitada a los materiales compuestos que contienen fibras conductoras, por ejemplo, la fibra de carbono, y la mayoría de las veces es necesario modificarla para estructuras menos conductoras. [18]

2.5. Shearografía Láser

La Shearografía Láser (LS, Laser Shearography) aplicada a la industria aeroespacial ofrece varias ventajas potenciales, como la alta velocidad y la supervisión en tiempo real de grandes paneles de material compuesto. Debido a estas ventajas, la LS se aplica actualmente a los ensayos no destructivos de una gran variedad de aeronaves, como el F-22, el F-35 JSF, el Airbus, el Cessna Citation X, el Raytheon Premier I y el transbordador espacial de la NASA. [21]

En la figura 2.5 se ilustra un montaje típico de LS digital. El principio físico de la técnica se basa en el procesamiento de las imágenes de interferometría conseguidas mediante dos haces láser con una longitud de onda idéntica que se vuelve casi colineal. El objeto de ensayo se visualiza mediante un Dispositivo de Carga Acoplada (CCD, Charge-Coupled Device). Debido a la rugosidad inherente de la superficie del objeto de prueba, la interferencia produce un patrón aleatorio conocido como patrón de manchas. El patrón de manchas se altera ligeramente cuando el objeto se carga o deforma externamente. La carga es necesaria para inducir alguna deformación o alterar el estado de deformación de la superficie de la muestra.



Figura. 2.5. Fundamentos de la shearografía digital. [3]

A continuación, se evalúa la integridad del objeto mediante dos patrones de manchas digitalizados secuencialmente (antes y después de la deformación). La sustracción de los dos patrones de manchas produce un patrón de franjas que representa la derivada del desplazamiento con respecto a la dirección de la shearografía. Esto puede hacerse en tiempo real.

La shearografía al vacío ha demostrado ser muy eficaz para obtener imágenes de la desconexión de las fibras en los laminados de CFRP [22], los paneles de nido de abeja de aluminio/aluminio, así como en un panel de elementos compuestos de la unidad de cola de un helicóptero (núcleo de nido de abeja y dos pieles externas de grafito/epoxi) [23], las delaminaciones, los daños en el núcleo y las separaciones de las uniones del núcleo [21]. Por lo tanto, los defectos tenderán a manifestarse como una anomalía de franja durante la shearografía al vacío. Sin embargo, la aplicación de la carga de vacío se limita a los enlaces con límites cerrados (por ejemplo, los enlaces metal/metal en forma de panal) y puede no ser aplicable si el defecto está abierto a la atmósfera. [22]

La shearografía por vibración se ha aplicado con éxito para inspeccionar la espuma del tanque externo del transbordador espacial [21] de la NASA, así como para revelar los agujeros del fondo plano realizados con diferentes tamaños y colocados a diferentes profundidades en los laminados de CFRP. [11]

En [7] también se empleó la shearografía por vibración para inspeccionar delaminaciones producidas por impactos en GFRP y se obtuvieron buenos resultados en la determinación y caracterización de los defectos cuando estos fueron inspeccionados por la superficie donde se ocasionaron los impactos no siendo así cuando el análisis se llevó a cabo por la superficie trasera que apenas fue posible determinar las zonas dañadas.

Una notable limitación de la shearografía es la necesidad de aplicar incrementos de carga externa adecuados al objeto de ensayo durante la inspección. Por ello, se requieren métodos de carga adecuados. Además, los cambios observados en la derivada del patrón de desplazamiento disminuyen a medida que aumenta la profundidad del defecto o su diámetro. En consecuencia, una aplicación exitosa de la shearografía digital para la caracterización de los defectos (excepto la delaminación) de los materiales compuestos aeroespaciales es extremadamente difícil y sigue dependiendo de muchos factores, como la profundidad y el tipo de defectos, el tipo de materiales y la iluminación láser, entre otros. Por lo tanto, la shearografía a veces se combina con otros tipos de técnicas de evaluación no destructivas que pueden ayudar a identificar ciertos defectos. [24]

2.6. Radiografía Industrial

En la radiografía industrial de rayos X, se utilizan radiaciones electromagnéticas de longitud de onda corta (fotones de rayos X de alta energía) para penetrar en diversos materiales y generar una imagen de sombra del objeto de prueba. Cuanto más denso es el material, más larga es la trayectoria y más alta es la absorción de los rayos X, más se atenúan las radiaciones de rayos X al pasar por el objeto de prueba hacia un detector de rayos X. Las interacciones de los rayos X de una energía específica con la materia se caracterizan por la ley de Beer-Lambert que se muestra en (2.1):

$$\ln(\frac{l}{l_0}) = \int \mu(x, y, z) dl$$
(2.1)

Donde I es la intensidad del rayo transmitido, lo es la intensidad del rayo incidente, μ es el valor del coeficiente de atenuación lineal en el punto (x,y,z) de la trayectoria del rayo que se produce debido a los efectos fotoeléctricos y a la dispersión, y donde la integración es sobre la línea L entre la fuente de rayos X y el detector. Por lo tanto, la variación de la oscuridad de la imagen (densidad) en diferentes lugares indica que hay una diferencia en la densidad del material, el espesor del material o ambos entre los puntos correspondientes en el objeto de prueba. De este modo se pueden caracterizar diferentes defectos.

La radiografía industrial es una de las técnicas más populares para la detección de defectos no planares, como inclusiones sólidas, desalineación de fibras y agrietamiento de la matriz en materiales compuestos aeroespaciales si su orientación no es perpendicular al haz de rayos X. Sin embargo, los defectos superpuestos no pueden separarse si los defectos se superponen a una superficie plana, y la cuantificación de la profundidad es imposible a menos que se tomen radiografías desde múltiples ángulos [18]. Para visualizar las características interiores de los

componentes, y para obtener información digital sobre sus geometrías tridimensionales se han desarrollado técnicas tomográficas más avanzadas.

2.6.1. Tomografía Computarizada de Rayos X

La Tomografía Computarizada de Rayos X (XCT, X-Ray Computed Tomography) proporciona una excelente técnica de obtención de imágenes para caracterizar el tamaño y los detalles volumétricos con gran precisión y en tres dimensiones, lo que resulta especialmente útil para los ensayos no destructivos de materiales compuestos aeroespaciales, en los que es fundamental inspeccionar la integridad estructural de los componentes. En los NDT computacionales, como área de investigación activa de la Rama de Ciencias de la Evaluación no Destructiva (NESB, Non-Destructive Evaluation Branch of Science) de la NASA los resultados de la XTC se aplican para mostrar la naturaleza compleja de los daños en los laminados compuestos. Estos resultados se introducen en un software de técnica de integración finita elastodinámica. [25]

Para generar y extraer información útil de un conjunto de datos de XCT, se requiere una cadena de pasos como se muestra en la figura 2.6. La información tomográfica se adquiere a partir de una serie de radiografías (o proyecciones) tomadas sistemáticamente desde una secuencia de ángulos de visión crecientes (o "ángulos de proyección") colocando el objeto en una placa giratoria entre la fuente de rayos X (monocromática o policromática) y el detector. Una vez adquiridas las proyecciones, el objeto se reconstruye introduciendo las imágenes de proyección en un algoritmo de reconstrucción. La mayoría de los sistemas de XCT implementan una forma del algoritmo de reconstrucción de Proyección Posterior Filtrada (FBP, Filtered Back Projection) debido a la naturaleza predecible de los algoritmos FBP en términos de coste computacional y tiempos de reconstrucción. Para lograr una aproximación del objeto escaneado mediante FBP (no existe una solución exacta lejos del corte central), las integrales de los rayos para cada trayectoria de los rayos se proyectan hacia atrás a través del objeto. [18]

Las técnicas de FBP funcionan bien si se dispone de suficientes imágenes de proyección de bajo ruido; sin embargo, en entornos más difíciles, los métodos alternativos de reconstrucción iterativa pueden tener ventajas significativas [26]. Una vez que se ha reconstruido un volumen de XCT, se puede extraer información útil utilizando técnicas de visualización y procesamiento de imágenes, un paso conocido como visualización.



Figura. 2.6. Proceso de CT. [3]

En [12] se llevó a cabo un procedimiento para caracterizar la propagación del daño provocado en estructuras de GFRP y CFRP por impactos utilizando XCT. Con esta técnica fue posible obtener discontinuidades internas con una precisión de 50 µm en impactos de 30 y 50nm de diámetro. Una muestra de estos impactos es mostrada en la figura 2.7.



Figura. 2.7. Muestra de impactos. [19]

La XCT se ha utilizado para analizar los daños por impacto en materiales de CFRP, incluida la determinación de la delaminación distribuida a lo largo del grosor de un panel de CFRP unidireccional [13], en [14] se llevó a cabo un examen del comportamiento ante el impacto de laminados epoxídicos de fibra de carbono tejida bajo diferentes niveles de energía de impacto y la demostración de la iniciación de grietas en lugares de costura de laminados unidireccionales cosidos a través del grosor fue evaluada en [15].

El control in situ de los paneles de materiales compuestos aeroespaciales, por ejemplo, la iniciación y la progresión de los daños bajo cargas de fatiga, es extremadamente difícil con los sistemas de XCT de rayos X y, por lo tanto, se ha informado con menos frecuencia en la literatura. Esto se debe, por un lado, a la elevada relación de aspecto de las estructuras aeroespaciales y, por otro, a los requisitos de montaje de los bancos de pruebas en los sistemas de XCT de laboratorio. El objeto de ensayo debe colocarse lo más cerca posible de la fuente para conseguir la máxima resolución especial para la obtención de imágenes de haz cónico.

2.6.2. Laminografía computarizada

La Laminografía Computarizada de Rayos X (XCL, X-Ray Computed Laminography) es similar a la XCT, sin embargo, el movimiento de la muestra y el método de reconstrucción de los datos escaneados difieren de la XCT convencional. A diferencia de la XCT, en la adquisición de datos laminográficos sólo se requiere una cantidad limitada de información tomográfica. Por lo tanto, el tiempo de escaneo utilizando la XCL es menor, lo que la hace apropiada para las aplicaciones aeroespaciales, ya que suele utilizar pocas radiografías adquiridas con un solo pico de energía. Además, esta disposición garantiza que la transmisión de los rayos X sea similar en cada ángulo de rotación incremental y permite obtener imágenes de muestras extendidas lateralmente a altas resoluciones locales (aproximadamente 1 μ m). [27]

En las aplicaciones aeroespaciales, la XCL es una técnica alternativa a la exploración por XCT estándar. La XCL también proporciona una alternativa viable a la inspección por ultrasonidos, como método de NDT obligatorio certificado en aplicaciones aeronáuticas, cuando se inspeccionan estructuras de aeronaves extremadamente planas o ligeramente curvadas. La laminografía ya ha sido calificada en Airbus desde 2008 para la inspección de grietas en las carcasas del plano de cola vertical del A400M permitiendo la detección de defectos con un porcentaje de desviación del 90% dentro de un intervalo de confianza del 95%. [18]

La aplicación exitosa de la XCL para la detección de defectos en materiales compuestos aeroespaciales utilizando paneles de materiales compuestos aún más grandes también ha sido reportada en la literatura. En [28] examinaron la capacidad de XCL para detectar los defectos en diferentes profundidades de un objeto de prueba de 240 mm x 140 mm que tenía 12,5 mm de espesor. El laminado de CFRP tenía un conjunto de perforaciones, cada una de ellas de 3,0 mm de diámetro y de profundidad conocida, que incluían algunas fibras de vidrio.

2.7. Termografía infrarroja

Todo objeto que posee una temperatura por encima del cero absoluto emite Radiación Infrarroja (IR, Infrared Radiation). La IR abarca la banda del espectro electromagnético comprendida entre 740nm y 1 mm [29] como se muestra en la figura 2.8. Cuando la energía térmica se propaga en el interior del objeto por difusión y alcanza un defecto del material como inclusiones, delaminaciones, grietas en la matriz, porosidad e impactos, se genera un gradiente térmico debido a los diferentes coeficientes de emisividad lo que es utilizado para evaluar el daño [30]. La salida térmica del material, en la banda electromagnética infrarroja del detector utilizado (cámara de infrarrojos), se analiza para obtener un mapa de temperatura de la superficie de la estructura objeto de inspección.



Figura. 2.8. Bandas infrarrojas en el espectro electromagnético. [25]

La IRT es una modalidad rápida y sin contacto para detectar el tamaño y la forma de daños ocasionados por impacto en grandes paneles de material compuesto, es considerada el mejor método para inspeccionar grandes áreas con una geometría constante y permite cuantificar los daños en muy poco tiempo, por estas ventajas en este trabajo se utilizará como (NDT) para inspeccionar las muestras de fibra de vidrio y carbono la termografía infrarroja activa. Cabe destacar que se empleará este tipo de termografía ya que ambos materiales no se encontrarán a una temperatura superior al ambiente y entonces no radiarán calor. En el próximo capítulo se abordará más a fondo las diferencias entre los distintos tipos de termografía.

3. Termografía.

La IRT se clasifica en termografía pasiva y activa [31]. La IRT pasiva se utiliza para objetos o características de interés que no están en equilibrio térmico y tienen un contraste térmico con el entorno circundante. Como ejemplo, la IRT pasiva puede aplicarse para detectar la entrada de agua tras el aterrizaje de un avión debido a un gradiente de temperatura significativo entre el agua y el avión como se demuestra en [32]./// Termografía de Fase Pulsada (PPT) [10]

En la IRT activa, sin embargo, la estructura se expone externamente a energía térmica para inducir una diferencia de temperatura entre las regiones de interés utilizando diferentes fuentes de calor. La IRT activa se ha aplicado con frecuencia para los ensayos no destructivos de componentes aeroespaciales.

3.1. Tipos de Termografía Activa en función de la fuente de excitación.

Basándose en la fuente de calor externa empleada para inducir un contraste térmico relevante en el objeto bajo inspección, la IRT activa se subdivide generalmente en termografía estimulada ópticamente, termografía estimulada por ultrasonidos, termografía estimulada por corrientes de Foucault y termografía basada en metales. La termografía estimulada ópticamente es la configuración más utilizada en la IRT de estructuras aeroespaciales y para el análisis de objetos fabricados con CFRP y GFRP debido a que se pretende que la excitación externa a implementar tenga carácter remoto.

La termografía estimulada ópticamente se centra en el uso de energía radiante (aquella existente en un medio físico y es causada por ondas electromagnéticas mediante las cuales se propaga directamente sin desplazamiento de la materia) y más concretamente en rangos de longitudes de onda donde las radiaciones no tienen suficiente energía como para romper enlaces atómicos (radiación no ionizante). [33]

Otro factor importante, a la hora de establecer la excitación externa necesaria para generar un frente térmico en el material bajo inspección, es el determinar la duración de la misma. Así, se puede liberar o transferir la misma energía de forma pulsada (de mayor o menor temporalidad) o de forma modulada. Esto da lugar, en el caso de la termografía activa, a la Termografía Pulsada (PT, Pulsed Thermography), la Termografía Step-Heating (SH, Step-Heating Thermography) y la termografía Lock-In (LT, Lock-In Thermography) [33]. Una representación esquemática de estos tipos de termografías se aprecia en la figura 3.1. En los siguientes apartados se hará una introducción a cada una de estas excitaciones.



Figura 3.1. Representación esquemática de los diferentes tipos de termografía.

De igual manera, la adquisición de imágenes puede realizarse en reflexión (del mismo lado) o en transmisión (lado contrario). En general, el modo reflexión es utilizado para defectos internos relativamente cercanos a la superficie, mientras que el modo transmisión lo es para defectos profundos (siempre y cuando se tenga acceso a los dos lados de la pieza). [33]

3.1.1. Termografía Lock-In.

La LT de excitación óptica es una técnica de inspección no destructiva y sin contacto que se basa en la propagación y reflexión de ondas térmicas. Para la medición, la superficie de la muestra se ilumina con fuentes externas moduladas sinusoidalmente (por ejemplo, lámparas halógenas sincronizadas, láseres). A medida que el calor es absorbido por la muestra, se genera una onda térmica en la superficie que se propaga a través del material compuesto y se refleja en cualquier tipo de superficie límite interna y, por tanto, también por los defectos internos. [34]

En el análisis LT el sistema recoge una serie de imágenes y compara su temperatura extrayendo el patrón de onda sinusoidal en cada punto de la imagen. La transferencia periódica de calor en la superficie (profundidad z = 0) da lugar a una onda térmica dependiente del tiempo.

El análisis es realizado únicamente a la frecuencia de la excitación y en una situación estabilizada (régimen permanente o estacionario). Se trata por lo tanto del análisis de un acoplo coherente de ondas. La terminología Lock-In viene referida a esa necesidad de controlar la dependencia en el tiempo entre la temperatura registrada con el sistema termográfico como señal de salida y la señal de referencia o entrada que alimenta los equipos de la excitación. Así, es necesaria, por lo menos, la medida de un ciclo entero de excitación para poder eliminar precisamente ese patrón sinusoidal de la colección de imágenes capturadas. [33]

En la técnica LT, el comportamiento de la onda térmica está condicionado por la morfología del material. Por lo general la onda térmica se propaga en el interior del objeto y se refleja cuando llega a partes en las que cambian los parámetros de propagación del calor (in-homogeneidades). La onda reflejada interfiere con la onda superficial dando lugar a un patrón de interferencia oscilante, que puede medirse en términos de amplitud (imagen de amplitud) o ángulo de fase (imagen de fase). La imagen de fase no se ve perturbada por las variaciones de emisividad ni por el calentamiento no homogéneo. En este caso, los resultados se presentan como imágenes

de fase que pueden mostrarse como imágenes en color o en blanco y negro en el monitor del ordenador; un cambio de color (o nivel de gris) indica un cambio de ángulo de fase.

El patrón de la superficie depende en gran medida de la difusividad térmica de los materiales (a, a su vez, depende de varias características del material, como la porosidad, la densidad, etc.). Así, el ángulo de fase puede asumirse como un parámetro característico del material específico; obviamente, promediar el valor del ángulo de fase en una zona determinada permite reducir el ruido del instrumento.

La posibilidad de visualizar claramente los defectos de un material depende de la diferencia entre las características térmicas del material básico y las de las probables in-homogeneidades. Si dicha diferencia es demasiado pequeña, el contraste de la imagen no es bueno y empeora para los defectos más profundos debido a la difusión térmica dentro del material. Por otra parte, los materiales de muy alta conductividad térmica están sometidos a una propagación del calor demasiado rápida, con el consiguiente contraste de imagen débil. En estos casos, los instrumentos de alta sensibilidad como algunos detectores de matriz de plano focal son necesarios. [35]

La LT se ha aplicado con éxito para detectar delaminaciones en estructuras de panal de aleación de titanio para los ensayos no destructivos de BVID en materiales compuestos gruesos de GFRP [36], para detectar defectos subsuperficiales en CFRP [37], para caracterizar la delaminación en CFRP [38] y para investigar el comportamiento a la fatiga de CFRP [32].

El principal problema de la LT es que requiere observar al menos un ciclo de modulación, y cada prueba se realiza para frecuencias que estudian una profundidad a la vez, lo que aumenta el tiempo de inspección. Es común comenzar con la primera prueba, cubriendo defectos de poca profundidad a una alta frecuencia, y luego reducir gradualmente la frecuencia hasta escanear todo el espesor o alcanzar la frecuencia mínima disponible en el dispositivo.

3.1.2. Termografía Pulsada

El método de la termografía pulsada es uno de los métodos más populares utilizados actualmente en los ensayos no destructivos de materiales compuestos. Este tipo de investigación consiste en utilizar una lámpara para generar un pulso de excitación térmica que dura varios milisegundos [39]. Este método está indicado para la inspección de materiales con una alta conductividad térmica ya que previene el daño a los componentes y contribuye a que el proceso de inspección pueda ser considerado rápido.

Después de apagar la fuente de radiación (potentes flashes) el objeto se enfría automáticamente hasta alcanzar la temperatura ambiente. Durante la fase de enfriamiento, se determina la distribución de la temperatura en la superficie del objeto en función del tiempo y se someten a análisis los termogramas para determinar entre otros la diferencia con un punto de referencia o una imagen de referencia y el cambio de temperatura en el dominio de la frecuencia (amplitud y respuesta de fase).

El calor absorbido crea un frente térmico, donde su propagación puede verse alterada por cualquier defecto interno (variación de la conductividad térmica, etc...) en el material[40]. La temperatura del material cambia rápidamente según el frente térmico aplicado se propaga por difusión bajo la superficie y también a causa de las pérdidas por convección y radiación. La presencia de un defecto reduce el ratio de difusión produciendo un contraste en la temperatura

superficial sobre ese punto una vez que el frente térmico le alcanza. De esta manera, el contraste de defectos más profundos aparecerá más tarde y con menor diferencia de temperaturas. De hecho, el tiempo al que se observa el contraste es proporcional, en primera aproximación, al cuadrado de la profundidad. [33]

Es de vital importancia la velocidad en la captura de los mapas térmicos y el detalle de cómo debe ser la secuencia capturada para evitar en la medida de lo posible la pérdida de información ya que el análisis se realiza en un estado transitorio. Para ello primeramente se recoge una imagen fría que es aquella en la que el contraste térmico producido aún no ha alcanzado la superficie de la muestra bajo inspección y que resulta de interés al permitir eliminar reflexiones espurias debidas a variaciones de emisividad. En los instantes inmediatos y posteriores a la entrada en contacto del frente de excitación con la superficie del material será posible la detección de imperfecciones en el interior del material según el frente térmico se propague y difunda por el mismo.

La termografía pulsada ha sido aplicada por la NASA para la supervisión in situ de los componentes de CFRP del transbordador espacial [41]. En [42] aplicaron la IRT pulsada a los laminados de CFRP, así como a las estructuras en forma de panal y sándwich, e informaron que se obtenía un seguimiento en tiempo real de todas las características mediante el termógrafo pulsado. No obstante, informaron que el éxito de la técnica depende en gran medida de la profundidad y el tamaño del defecto, lo que restringe su aplicación a la obtención de imágenes de defectos cercanos a la superficie.

3.1.3. Termografía Step-Heating.

Al igual que en el caso de la termografía pulsada, la termografía SH analiza la transferencia de calor en un sólido en su estado transitorio [33]. En la SH, la superficie del espécimen que se está inspeccionando se expone a un pulso de calor de duración más larga (varios segundos) que la termografía pulsada y por tanto utiliza una densidad de energía mucho menor que esta. Este pulso de calor es producido por fuentes como lámparas halógenas o láseres de barrido.

En la SH la excitación es lo suficientemente larga como para permitir el calentamiento de los defectos, cuyas temperaturas locales se vuelven más altas que las del entorno. El calentamiento relativamente lento permite probar estructuras de múltiples capas y evaluar uniones entre las capas [39], estos defectos pueden aparecer también durante el calentamiento como un punto de diferentes temperaturas en el mapa térmico de la superficie. [43]

La diferencia entre la excitación de pulso largo o de pulso corto no está solo en la forma en que se libera la energía, sino también en las diferentes condiciones de contorno que surgen durante el calentamiento y el enfriamiento. Ambos métodos pueden lograr un calentamiento superficial con propiedades similares, sin embargo, la distribución de temperatura en el interior del material es muy diferente en el momento en que comienza el enfriamiento. Mientras que para la termografía pulsada el resto de la muestra se mantiene a una temperatura inicial uniforme, en la termografía SH ya existe un gradiente cuando cesa el enfriamiento o la excitación. Estas condiciones cambian por completo el modelado y por ende el análisis del material.

3.2. Análisis de Termogramas.

Indistintamente del método de excitación empleado el resultado es una secuencia de termogramas que por lo general presentan diversas fuentes de degradación como: ruido ligado al equipo de adquisición (electrónico); calentamiento no uniforme debido a imperfecciones de la fuente de energía (térmico); diferencias de emisividad e irregularidades en la superficie de la pieza inspeccionada (estructural); reflexiones provenientes de otros objetos; atenuación atmosférica, etc. [33]. Debido a esto se hace imprescindible en aras de obtener una adecuada detección y clasificación de los defectos pre-procesar los termogramas obtenidos. Una vez que estos estén acondicionados serán analizados con diferentes métodos de procesado para finalmente arribar a una caracterización certera de los defectos en el post-procesado.

Cuando la secuencia de termogramas se obtiene mediante la simulación de un software no es necesario realizar un pre-procesado de la misma ya que las imperfecciones existentes en la obtención de las imágenes como resultado de las fuentes de degradación anteriormente mencionadas son inexistentes.

En la figura 3.2 se muestra un esquema de la metodología de análisis para la determinación y caracterización de defectos mediante imágenes termográficas.



Figura 3.2. Metodología para el análisis de defectos mediante imágenes termográficas.

3.2.1. Pre-Procesado.

Para garantizar la precisión y exactitud en la medida de temperaturas existe una algorítmica con la que se pretenden minimizar los efectos del ruido del sistema, de la óptica y la electrónica que capturan los valores de temperatura. La primera etapa del pre-procesado consiste en adecuar y regenerar los píxeles que presentan niveles anormales de intensidad, así como el encuadre (vignetting) que consiste en un obscurecimiento de las esquinas de los termogramas respecto al centro de los mismos debido a una exposición limitada en esas áreas. El procedimiento de

corrección de encuadre requiere una etapa de calibración que involucra la toma de termogramas de cuerpo negro a diferentes temperaturas. [33]

El siguiente paso es la corrección del patrón de ruido fijo (FPN, Fixed Pattern Noise) causado por diferencias en la responsividad de los detectores. Para la eliminación del FPN los métodos existentes pueden clasificarse en basados en la referencia (también conocidos como basados en la calibración) o basados en la escena. Los enfoques basados en la referencia primero calibran el arreglo de plano focal (FPA, Focal Plane Arrays) utilizando (al menos) dos objetivos infrarrojos homogéneos con temperaturas diferentes y conocidas, y luego estiman linealmente las no uniformidades de los datos.

Otro de los métodos empleados para corregir el FPN se basa en enfoques basados en la escena los cuales son capaces de compensar el ruido directamente a partir de los datos adquiridos, modelando la naturaleza estadística del FPN. Esto se consigue normalmente aprovechando la autosimilitud no local y/o la redundancia temporal presente a lo largo de la dirección de movimiento [44]. Para ello se toman imágenes frías las cuales son promediadas y el resultado de esta operación se sustrae al resto de imágenes que contienen información relevante de acuerdo a la curva de calentamiento - enfriamiento como se muestra en la figura 3.3.



Figura 3.3. Curva calentamiento - enfriamiento de un material.

La curva de calentamiento – enfriamiento de cualquier material producida por termografía pulsada se corresponde con la mostrada anteriormente donde se aprecian 5 estados fundamentales. En el 1er estado la muestra aún no ha sido calentada mediante el empleo de los flashes y por tanto el termograma capturado durante este tiempo es empleado como imagen fría siendo utilizada para corregir el FPN, para mejorar el contraste térmico y para eliminar las reflexiones espurias debido a las variaciones de emisividad. En el 2do estado se produce el pico máximo de calentamiento del material a inspeccionar, pero estos termogramas no aportan información relevante ya que en este período de tiempo las imágenes captadas por la cámara infrarroja están saturadas. El número de termogramas saturados depende de la frecuencia de muestreo y de las propiedades térmicas del material bajo inspección ya que materiales con baja conductividad permanecen saturados más tiempo que aquellos materiales con alta conductividad. La secuencia de termogramas que se almacenará y será utilizada para su

posterior procesamiento en aras de determinar y caracterizar los defectos existentes en la muestra comienzan en el 3er estado, transitan por el 4to estado donde el material comienza a enfriarse hasta llegar al 5to estado donde la temperatura del mismo es aproximadamente igual a la del comienzo del 1er estado y en este punto se interrumpe el proceso de almacenamiento de termogramas. De esta forma se obtiene una secuencia de imágenes frías y calientes que permiten caracterizar cualquier tipo de material.

3.2.2. Procesado.

Debido a que los datos proporcionados en el pre-procesado no son suficientes para una buena interpretación del material en estudio se hace necesario realizar un procesado de los mismos. Las técnicas de procesado se suelen clasificar en 4 grandes grupos:

- Técnicas que emplean el contraste térmico.
- Técnicas basadas en transformadas.
- Técnicas que emplean métodos estadísticos.
- Técnicas Híbridas.

3.2.2.1. Contraste Absoluto

El contraste térmico en su modo más simple, Contraste Absoluto (AC, Absolute Contrast), puede definirse como la diferencia entre la temperatura en un área defectuosa o el valor promedio de un grupo de pixeles Td y un área no defectuosa Tsa [5] como se aprecia en (3.1).

$$\Delta T(t) = T_d(t) - T_{sa}(t)$$
(3.1)

En la figura 3.4 se muestran los perfiles de temperatura y el perfil del contraste térmico absoluto de un espécimen de CFRP con inclusiones de Teflón de diferentes tamaños.



Figura 3.4. Espécimen de CFRP con inclusiones de Teflón: a) Perfiles de temperatura, b) perfil del contraste térmico absoluto. [16]

El principal inconveniente de las técnicas basadas en el contraste térmico es establecer Sa, especialmente si se pretende realizar un análisis automatizado. Incluso cuando la definición de Sa es sencilla, se observan variaciones considerables en los resultados al cambiar su ubicación. [45]

3.2.2.2. Contraste Absoluto Diferencial

En el método de Contraste Absoluto Diferencial (DAC, Differential Absolute Contrast), en lugar de buscar una zona no defectuosa Tsa(t) se calcula localmente en un pixel (p) suponiendo que en las primeras imágenes el punto local p se comporta como un área sin defectos. El primer paso es definir t' como un valor de tiempo determinado entre el instante inicial en que se lanza el pulso (t_0), y el momento preciso en que se detecta el primer punto defectuoso en la secuencia del termograma (t_1). En t', no hay todavía ningún indicio de la existencia de una zona defectuosa, por lo que la temperatura local para un área sin defectos T(t') es exactamente la misma que para una zona defectuosa. De este resultado Tsa(t) puede ser calculado para cada pixel en el instante t y substituyendo en la ecuación 3.1 del Contraste Absoluto se obtiene la ecuación (3.2) que define el Contraste Absoluto Diferencial:

$$\Delta T \operatorname{dac}(t) = T_d - \sqrt{\frac{t'}{t} * T(t')}$$
(3.2)

En la figura 3.5 se muestra el perfil del contraste térmico absoluto para 4 diferentes regiones del mismo espécimen de CFRP con inclusiones de Teflón de diferentes tamaños analizado con el contraste absoluto.



Figura 3.5. Perfil del contraste térmico absoluto para 4 regiones distintas del espécimen de CFRP con inclusiones de Teflón. [16]

3.2.2.3. Termografía de Fase Pulsada

La idea fundamental del procesamiento de imágenes infrarrojas a través de la Termografía de Fase Pulsada (PPT, Pulsed Phase Termography) es transformar la secuencia de imágenes en el dominio de la frecuencia para analizar la respuesta de la muestra inspeccionada. La extracción de las frecuencias es llevada a cabo con una Transformada de Fourier (FT, Fourier Transform) unidimensional sobre cada píxel de la secuencia de termogramas [40] como se muestra en la figura 3.6.



Figura 3.6. Termografía de Fase Pulsada (PPT) [10]

 Re_n , Im_n se definen mediante la (3.3).

$$F(n) = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) e^{(-j2nk)/N} = Re_{n} + Im_{n}$$
(3.3)

Donde n corresponde a los incrementos de frecuencia n=0,1, . . .N, t es el intervalo de tiempo entre adquisiciones, Re_n y Im_n son las partes real e imaginaria de la FT que pueden combinarse para extraer la amplitud A_n y la fase Φ_n . A su vez la amplitud y fase de cada pixel están definidas por (3.4) y (3.5).

$$A_n = \sqrt{Ren^2 + Imn^2} \tag{3.4}$$

$$\Phi_{n} = \arctan(Im_{n}/Re_{n})$$
(3.5)

La termografía de fase pulsada es menos afectada que otras técnicas por el calentamiento no uniforme, las variaciones de emisividad y la geometría de la superficie inspeccionada. Esto se explica con la expresión 3.5 en donde los efectos multiplicativos como el calentamiento no uniforme y las variaciones de emisividad tienden a cancelarse debido a la división entre la parte imaginaria y la parte real. Además, dado que la fase es en buena parte una medida del retardo en el tiempo, se puede concluir que los efectos de las variaciones espaciales sobre esta son pequeños [46].

3.2.2.4. Termografía de componentes principales

La Termografía de Componentes Principales (PCT, Principal Components Termography) es una técnica que procesa la secuencia de imágenes extrayendo las características más importantes y reduciendo en gran medida el tamaño de los datos. Está basada en la Descomposición de Valores Singulares (SVD, Singular Values Decomposition).

La PCT requiere que la secuencia de imágenes térmicas localizadas en una matriz 3D se transforme en una matriz 2D con la dimensión temporal a lo largo de las columnas mientras que la dimensión espacial se encuentra a lo largo de las filas como se muestra en la figura 3.7.



Figura 3.7. Reordenación de los datos termográficos de una secuencia 3D a una matriz A 2D para aplicar SVD. [16] La SVD de la matriz A se expresa en (3.6):

$$A = U \cdot R \cdot V^{\mathrm{T}} \tag{3.6}$$

En la matriz A, las columnas U representan las Funciones Ortogonales Empíricas (EOF, Empirical Orthogonal Functions) las cuales describen las variaciones espaciales, las columnas de la matriz V^{T} representan los componentes principales de las variaciones temporales [47] y R es una matriz diagonal de dimensiones NxN (valores singulares de A presentes en la diagonal).

Después de aplicar la SVD a la matriz 2D, la matriz U resultante, que proporciona la información espacial, puede reordenarse como una secuencia 3D, como se ilustra en la figura 3.8.



Figura 3.8. Reordenación de la matriz U (2D) en una matriz 3D que contiene los EOF. [16]

3.2.2.5. Termografía basada en estadísticos de alto orden

Los datos obtenidos con la termografía infrarroja son una secuencia de valores numéricos. En consecuencia, estos valores numéricos pueden ser tratados por funciones estadísticas que describan ciertos comportamientos y detectar cambios significativos entre unos valores y otros. Por esta razón, se utilizan diferentes momentos estadísticos de alto orden (HOS, High Order Statistics) que ofrecen resultados diferentes [48]. De esta forma se reduce el conjunto de datos obtenidos en el ensayo concentrando toda la información de las imágenes obtenidas en una sola
imagen. Esta imagen proporciona la información necesaria acerca de las zonas sanas y de los defectos del objeto de estudio.

Skewness es el tercer momento estadístico estandarizado de una distribución. Utilizando Skewness, es posible medir la asimetría de la distribución de probabilidad de una variable aleatoria de parámetros reales. Este método es una técnica de procesamiento adecuada para las imágenes infrarrojas, y se ha comprobado que la aplicación de este método estadístico apenas se ve afectada por el calentamiento no uniforme o por la forma de la superficie del material analizado.

La fórmula matemática utilizada para calcular el Skewness se aprecia en (3.7), donde μ es el valor medio y σ es la desviación estándar de la variable aleatoria x, E es la esperanza matemática, definida como (3.8), donde n es el número de puntos de datos. [48]

$$S_3 = \frac{E[(x-\mu)^{\land}3]}{\sigma^{\land}3}$$
(3.7)

$$E[X] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} Xi$$
 (3.8)

Kurtosis es el cuarto momento estadístico estandarizado de una distribución. Generalmente se define como una medida que refleja el grado en que una distribución tiene forma de pico.

En particular, la Kurtosis proporciona información sobre la altura de la distribución en relación con el valor de la desviación estándar. Matemáticamente, se define como (3.9).

$$K_4 = \frac{E[(x-\mu)^{4}]}{\sigma^{4}}$$
(3.9)

La distribución de la temperatura de un defecto en una imagen tiene un valor de kurtosis diferente al de una zona sin defectos, dependiendo de la difusividad térmica de la zona del defecto. Por lo tanto, es posible estimar los valores de kurtosis para cada píxel de la secuencia de imágenes y obtener una imagen única que muestre estos valores: un kurtograma. El kurtograma da una indicación de la ubicación de los defectos en la subsuperficie y de su difusión térmica. [48]

3.2.2.6. Reconstrucción de Señal Termográfica

La reconstrucción de la señal termográfica (TSR, Thermographic Signal Reconstruction) es una técnica que aumenta la resolución espacial y temporal de una secuencia, reduciendo la cantidad de datos que son tratados al mismo tiempo. La TSR se basa en la teoría de que los perfiles de temperatura de los píxeles no defectuosos deben seguir la curva de decaimiento dada por la solución unidimensional de la ecuación de Fourier expresada en su forma logarítmica como se aprecia en (3.10): [45]

$$\ln(\Delta T) = \ln(Q/e) - \frac{1}{2}\ln(\pi t)$$
 (3.10)

Este método mejora y filtra los datos termográficos reduciendo el contenido de ruido. También puede utilizarse como paso previo a otros tipos de técnicas de procesamiento. Para mejorar los resultados, se calcula una conversión logarítmica de la historia temporal de cada píxel siguiendo la expresión (3.11): [48]

$$\ln(\Delta T) = a_0 + a_1 \ln(t) + a_2 \ln^2(t) + \dots + a_n \ln^n(t)$$
(3.11)

En estas curvas logarítmicas se puede observar la diferencia de propagación térmica entre un píxel con un defecto y un píxel sin defectos como se muestra en la figura 3.9. Las derivadas segunda y tercera de los polinomios ofrecen más información sobre los defectos. Las secuencias de imágenes de los derivados pueden observarse cualitativamente para detectar los defectos, o usarse cuantitativamente para evaluar la profundidad de un defecto a partir de tiempos característicos.



Figura 3.9. Diferencia de propagación entre zona sana y zona con defecto.

3.2.3. Post-Procesado.

En este punto del análisis de termogramas mediante el empleo de distintas técnicas se consigue cuantificar sin necesidad de la intervención humana la magnitud y localización de los impactos presentes en los materiales inspeccionados. Estas técnicas pueden ser clasificadas en 4 grandes grupos:

- Inversión de la profundidad con la fase.
- Algoritmos de detección de defectos.
- Modelos estadísticos.
- Basadas en redes neuronales.

3.2.3.1. Inversión de la profundidad con la fase

La figura 3.10 a) presenta un perfil de temperatura típico para un píxel de una matriz de termograma. Como se observa en la figura 3.10 b) y c), luego de procesar las imágenes con la técnica PPT, este tipo de función (real) producirá una respuesta de amplitud y fase que son pares e impares, respectivamente, con respecto a f=0 Hz tras la aplicación de la FT. Por lo tanto, de una secuencia de N termogramas, hay N/2 componentes de frecuencia útiles; la otra mitad de los espectros sólo proporciona información redundante.



Figura 3.10. (a) Perfil de temperatura; (b) Respuesta de amplitud y (c) Respuesta de fase para un pixel no defectuoso en el dominio de la frecuencia con coordenadas (i,j).[16]

Los primeros parámetros que hay que determinar son la frecuencia de muestreo F_S , y el tiempo de adquisición T_{acq} . Estos dos parámetros están íntimamente relacionados y están limitados por la capacidad máxima de almacenamiento del sistema IR: Nmax= F_S - T_{acq} , donde N_{max} es el número de muestras máximas. La selección adecuada de F_S depende principalmente de las propiedades térmicas de la muestra. En general, los materiales de alta conductividad requieren un F_S más rápido (para evitar la pérdida de información), pero un T_{acq} más bajo (dado que las variaciones térmicas terminan más rápidamente) que los malos conductores térmicos. [49]

La anchura de la ventana de truncamiento w(t) está dada por (3.12):

$$W(t) = N^* \Delta t \tag{3.12}$$

El muestreo requiere que se establezcan valores específicos para dos de los tres parámetros siguientes: el tamaño de la ventana de truncamiento W(t), el número total de puntos que se van a muestrear N, y el espaciado entre ellos Δt . Una vez seleccionados los parámetros de la ecuación 3.12 para el dominio del tiempo, se definen también las contrapartidas de los espectros de frecuencia como se observa en (3.13):

$$W(f) = N^* \Delta f = 1/ \Delta t = F_s$$
(3.13)

Deben utilizarse N puntos para calcular la FT, ya que más puntos introducirían redundancia, y menos puntos no aprovecharían toda la información disponible. Sin embargo, como se ha dicho antes, sólo es necesario conservar la mitad del espectro, lo que reduce el número total de componentes de frecuencia a N/2. Los componentes de frecuencia N/2 están separados Δf entre sí, donde estos son calculados según (3.14):

$$\Delta f = 1/N^* \Delta t = 1/W(t)$$
(3.14)

La figura 3.11 representa los perfiles de fase y de contraste de fase para el caso de defectos gruesos de dos profundidades diferentes. En la parte inferior de este gráfico se muestran los perfiles de fase de los espectros para dos defectos de diferentes profundidades (Φ_{z1}, Φ_{z2}), y para una zona no defectuosa (Φ_{zs}). El contraste de fase ($\Delta \Phi_{z1}, \Delta \Phi_{z2}$), mostrado en la parte superior del gráfico se puede calcular a partir de los perfiles de fase como: $\Delta \phi = \Phi_d - \Phi_{sa}$ donde Φ_d es la fase de un píxel defectuoso, y Φ_{sa} es la fase de un píxel no defectuoso. El valor negativo del contraste de fase se utiliza para facilitar la visualización. Los defectos son visibles (es decir,

 $\Delta \Phi > 0$) desde f=0 Hz hasta una frecuencia determinada, denominada frecuencia ciega fb, es decir, la frecuencia en la que el contraste de fase es suficiente para que un defecto sea visible, que es menor para los defectos más profundos (fb_{z1} > fb_{z2}). Los perfiles de fase de los píxeles defectuosos se funden con el perfil de fase de una zona sana en una línea recta para frecuencias superiores a las correspondientes frecuencias ciegas (f > fb). En consecuencia, los defectos poco profundos tienen un rango de frecuencia de visibilidad mayor que los defectos profundos. [45]



Figura 3.11. Cuantificación de la profundidad con contraste de fase y frecuencia ciega. [16]

Existe una relación lineal entre la profundidad del defecto, y la raíz cuadrada de la frecuencia ciega. La longitud de difusión térmica expresada por: $\mu = (2\alpha/\omega)$ siendo $\alpha = k/\rho Cp$ la difusividad térmica y $\omega = 2\pi f$ la frecuencia angular, pueden utilizarse para ajustar los datos experimentales de la forma expresada en (3.15):

$$Z = C_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\pi * fb}} + C_2$$
(3.15)

Siendo C₁ y C₂ las constantes de regresión.

Se ha observado que, $C_1 = 1$ cuando se utilizan datos de amplitud, mientras que los valores obtenidos cuando se trabaja con la fase están en el rango 1,5< $C_1 < 2$.[49]

3.2.3.2. Algoritmos de detección de defectos

La inspección visual por parte de un operador certificado es la forma más comúnmente adoptada para la detección de defectos. Sin embargo, diferentes métodos automatizados pueden ayudar a reducir la subjetividad y, en algunos casos, eliminar por completo la intervención humana en el proceso de detección.

Existe un gran número de métodos de segmentación propios de post-procesado de imágenes en el espectro visible que pueden perfectamente ser adaptados para el infrarrojo. Como, por ejemplo, operadores de detección de bordes como Sobel o Canny.

Otro método muy común y con el que se obtienen buenos resultados consiste en la umbralización. En él se establece un umbral de temperatura (en la imagen, un valor determinado de brillo) que se considera "normal", considerando valores anormales por encima de este umbral. Una vez procesadas y umbralizadas las imágenes se obtienen termogramas donde se aprecian los diferentes defectos y mediante la cuantificación de los pixeles dañados y los no dañados es posible caracterizar cada uno de los defectos utilizando la Relación Señal a Ruido (SNR, Signal to Noise Ratio).

Esta métrica se utiliza para evaluar cuantitativamente la relación señal-ruido de los datos adquiridos y procesados. La cuantificación de un defecto se basa en la definición de dos áreas: el área defectuosa y el área de referencia. El área defectuosa abarca los píxeles en los que aparece el defecto en la imagen infrarroja. Esta zona se considera la señal. El área de referencia que es un área libre de defectos se utiliza para calcular el contraste térmico. Esta zona se considera el ruido. La zona de referencia se selecciona de forma independiente para cada defecto y debe estar situada cerca de él. De este modo, se sabe que el área de referencia ha recibido la misma energía de excitación que el defecto, lo que minimiza los errores en los cálculos de la SNR debidos al calentamiento no uniforme. [48]

La métrica SNR para un defecto se calcula como se muestra en (3.16), donde Def_{μ} es la media aritmética de todos los píxeles dentro del área defectuosa, Ref_{μ} es la media aritmética de todos los píxeles dentro del área de referencia y Ref_{σ} es la desviación estándar de los píxeles dentro del área de referencia.

$$SNR = 20\log_{10}(\frac{|\text{Def}\mu - \text{Ref}\mu|}{\text{Ref}\sigma})$$
(3.16)

3.2.3.3. Modelos estadísticos

El comportamiento estadístico de las regiones de interés, tales como los fondos y los defectos también se aprovecha para la clasificación de profundidad. El punto de partida es que la temperatura, la fase y la amplitud se pueden modelar bajo algunas circunstancias (como en el caso de las fuentes de ruido "blanco") por un proceso aleatorio de Gauss.

Primero se realiza una calibración o "fase de aprendizaje", en la que se dispone de imágenes con defectos localizados y de profundidad conocida, de manera que el medio m y la desviación estándar σ , se calculan en cada incremento de tiempo y para cada zona de interés. En la posterior etapa de análisis, los píxeles desconocidos se analizan y se calculan las probabilidades individuales de un píxel dado con m y σ , para ser parte de una clase dada. Suponiendo estadísticamente sucesos independientes, las probabilidades individuales (en diferentes incrementos de tiempo) se pueden multiplicar entre sí para formar una probabilidad global. De esta forma la regla es sencilla: la más grande gana. [50]

3.2.3.4. Técnicas basadas en redes neuronales

Las Redes Neuronales Artificiales (ANN, Artificial Neural Network) son un paradigma de procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los

animales. Se trata de un sistema de neuronas artificiales interconectadas en una red que colaboran para producir un estímulo de salida como respuesta a una información de entrada. Para ello cada neurona está conectada con otras a través de enlaces en los cuales el valor de salida de la neurona anterior es multiplicado por un peso específico. Dichos pesos son actualizados en cada iteración hasta obtener el mínimo valor posible de la función de pérdida.

Son conocidas por su capacidad para realizar mapeos entre conjuntos de variables, su baja sensibilidad al ruido y sus capacidades de aprendizaje y generalización. Estas han sido empleadas en los últimos años como detectores de discontinuidades y estimadores de parámetros de defectos en NDT.

Se pueden emplear distintas arquitecturas, utilizando como entradas para estas redes curvas de evolución del contraste térmico respecto al tiempo, curvas de temperatura, el valor de las derivadas de las curvas de temperatura o curvas de fase y amplitud extraídas a partir de la PPT. [50]

4. Materiales y Simulación.

Un material compuesto se define como un material formado por la unión de dos o más constituyentes, denominados matriz y refuerzo como se observa en la figura 4.1, para conseguir una combinación de propiedades superiores que no es posible obtener en los materiales originales. Estos compuestos se diseñan para aprovechar las características de los materiales originales y conseguir combinaciones poco comunes de rigidez, resistencia, peso, rendimiento a alta temperatura, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad.[5]



Figura 4.1. Representación esquemática de un material compuesto. [1]

En la figura 4.2 se muestran los componentes principales para la creación de materiales compuestos.



Figura 4.2. Componentes principales para la creación de materiales compuestos. [2]

4.1. Matriz

Los materiales compuestos se clasifican, según el tipo de matriz, en tres categorías: orgánicos, minerales y metálicos. Entre los materiales compuestos orgánicos se encuentran el cartón (resinas y fibras de celulosa), las cubiertas laminadas (caucho, acero, resinas orgánicas, fibras de vidrio, carbono y boro) y los plásticos reforzados (resinas y fibras cortas). Entre los compuestos minerales se encuentran el hormigón (cemento, arena y aditivos), los compuestos de carbono-carbono (carbono y fibras de carbono) y los compuestos cerámicos (cerámica y fibras cerámicas). Y también, los compuestos metálicos (fibras de aluminio/boro y fibras de aluminio/carbono). Estos materiales compuestos se emplean en varios campos de aplicación como la automoción, las estructuras ligeras, la ingeniería civil, la aviación, el deporte, la biomedicina, los componentes termomecánicos y la industria aeroespacial. [51]

El papel de la matriz es enlazar las fibras de refuerzo, distribuir la fuerza, proporcionar la resistencia química de la estructura, dar la forma deseada al producto final, proteger a los materiales de refuerzo frente a agentes externos como la humedad, corrosión o impactos, así como evitar la propagación de grietas durante un proceso de fractura. Debido al contexto de esta tesis solo se hará alusión a los materiales compuestos formados por matrices orgánicas.

La matriz orgánica puede ser de tipo termoplástica, termoestable y/o elastómero.

- Matriz termoplástica: Las matrices termoplásticas tienen forma de cadenas lineales que pueden transformarse en estado fundido. En la mayoría de los procesos de fabricación las matrices termoplásticas se calientan, luego se forman por moldeo, inyección, extrusión o termoformado antes de ser enfriadas para que el producto final conserve su forma. Hoy en día existen muchos tipos de termoplásticos con una amplia gama de interesantes propiedades. Pueden ser tan flexibles como el caucho, tan rígidos como el metal y el hormigón, o tan transparentes como el vidrio, para utilizarlos en muchos productos. No se oxidan, tienen una gran resistencia a la corrosión y son excelentes aislantes térmicos y eléctricos. Gracias a su ligereza, su alta resistencia mecánica y su resistencia mecánica y a los efectos del medio ambiente, los termoplásticos son un material ideal para muchas aplicaciones. [51]
- Matriz de elastómero: Los polímeros elastómeros tienen las mismas cualidades elásticas que el caucho. Un elastómero en reposo está formado por largas cadenas moleculares plegadas sobre sí mismas. Bajo la acción de una fuerza, las moléculas pueden deslizarse entre sí y deformarse. Para que el material de base tenga una buena elasticidad, se somete a una vulcanización. Elementos como el azufre, el carbono y diversos agentes químicos se introducen en el elastómero durante la vulcanización lo que posibilita la producción de cauchos sintéticos para usos específicos. Los elastómeros se utilizan en la fabricación de cojines, ciertos aislantes, suelas de zapatos o neumáticos.
- Matriz Termoestable: Son generalmente líquidas a temperatura ambiente, se solidifican durante su aplicación bajo la influencia del calor y de un aditivo endurecedor. Se transforman así por cocción, que es una modificación química que consiste en una unión muy fuerte entre las moléculas en tres dimensiones. Este proceso es irreversible y el material así tratado se vuelve infusible e insoluble en la mayoría de los disolventes (alcoholes cetonas e hidrocarburos). En general, son más rígidos que las matrices termoplásticas, resisten mejor la fluencia y son adecuadas para moldear piezas grandes

con fibras cortas, largas o tejidas. Las matrices termoestables más utilizadas son los poliésteres, los fenoplastos, las resinas epoxi, poliuretanos y poliamidas.

Para la fabricación de elementos que deban someterse a elevados esfuerzos mecánicos y térmicos como los materiales compuestos de fibra de vidrio y carbono las matrices empleadas son las resinas epoxy. Las resinas epoxi se caracterizan por una buena resistencia mecánica y térmica superior a la de los poliésteres, una buena resistencia a los agentes químicos, una muy baja captación de humedad en inmersión y una excelente adhesión a las fibras y los metales.

4.2. Refuerzo

El refuerzo constituye el esqueleto que proporciona la resistencia mecánica (resistencia a la tracción y rigidez). Es, por definición, de naturaleza filamentosa (fibra orgánica o inorgánica) pasando de la partícula alargada a la fibra continua. La más utilizada es la fibra de vidrio E, que representa más del 95% de las aplicaciones. Además, la fibra de aramida (Kevlar) también es de gran interés. En general, en una estructura compuesta (anisotrópica), las fibras funcionan bien en tracción, pero en comparación con las estructuras metálicas (isotrópicas), el rendimiento en compresión es menos bueno y la resistencia al cizallamiento sigue siendo débil [51]. En la figura 4.3 se muestra un esquema con los principales refuerzos.



Figura 4.3. Esquema con los principales refuerzos. [2]

Debido al contexto de este trabajo solo se hará alusión a los materiales de refuerzo formados por fibras de vidrio y carbono.

Actualmente, las fibras de vidrio, figura 4.4, representan la mayoría de los refuerzos más empleados para el refuerzo de materiales compuestos avanzados en diversos campos de aplicación industrial debido a su bajo coste, peso ligero, alta resistencia y sus características dieléctricas y aislantes del calor. Las fibras de vidrio constituyen el refuerzo esencial de los materiales compuestos de gran difusión y alto rendimiento. Existen cinco clases de fibras de vidrio con disímiles características por lo que son empleadas en diferentes aplicaciones como se muestra a continuación.

• Tipo E: es el tipo de fibra más empleado, se caracteriza por sus propiedades dieléctricas, representa el 90% de refuerzo para materiales compuestos.

- Tipo R: se caracteriza porque tiene muy buenas prestaciones mecánicas, demandándose en los sectores de aviación, espacial y armamento.
- Tipo D: su principal característica es su excelente poder dieléctrico, de ello su aplicación en radares y ventanas electromagnéticas.
- Tipo AR: posee un alto contenido en óxido de circonio, el cuál le confiere una buena resistencia a los álcalis.
- Tipo C: se caracteriza por su alta resistencia a agentes químicos.



Figura 4.4. Muestra de fibra de vidrio. [3]

Las fibras de carbono, figura 4.5, se emplean ampliamente en la elaboración de materiales compuestos termoestables. Se emplean en varios campos industriales como la construcción espacial, la aeronáutica, la aviación y la automoción ya que ofrecen unas características de resistencia mecánica y térmica excepcionales, una resistencia a la tracción y a la compresión extremadamente alta y una gran rigidez.



Figura 4.5. Muestra de fibra de carbono. [4]

Las fibras derivadas del poliacrilonitrilo (PAN) destacan por su mayor resistencia y mejor equilibrio de propiedades mecánicas de entre todos los materiales compuestos. Hay disponibles diferentes productos comerciales clasificados según el nivel del módulo de elasticidad. Estas fibras se emplean en aplicaciones que requieren materiales con alta resistencia y retención eficiente de propiedades.

Las fibras basadas en brea se desarrollaron posteriormente a las fibras de PAN. Estas fibras tienen menos resistencia que las fibras PAN pero ofrecen ciertas ventajas en aplicaciones de rigidez crítica debido a su facilidad para procesar materiales de alto módulo de elasticidad. Por el contrario, el elevado coste de la materia prima limita en gran medida la aplicación de este tipo de fibras.

4.3. Simulación de defectos.

Para simular defectos con diferentes profundidades para su posterior procesado se empleó el software comercial ThermoCalc-3D[™] el cual es utilizado con éxito por varios equipos de investigación de NDT en todo el mundo. Se escogió este software porque a diferencia de la mayoría de softwares comerciales disponibles actualmente, permite modelar defectos muy finos en materiales bastante gruesos sin perder precisión de cálculo, además permite calcular distribuciones de temperatura en 3D en sólidos anisotrópicos de tres capas que pueden contener hasta nueve defectos subsuperficiales. El correspondiente problema matemático de conducción de calor se modela en coordenadas cartesianas y se resuelve utilizando un esquema numérico implícito de elementos finitos.

En la figura 4.6 se muestra la vista principal del software ThermoCalc-3D[™] donde se ha representado un defecto.



Figura 4.6. Vista principal del software ThermoCalc-3D™.

Posteriormente como se observa en la figura 4.7 a) se procede a introducir los parámetros característicos del material como son el calor específico, la densidad y la conductividad térmica (para el caso mostrado en específico se corresponde con los datos del GFRP, los valores de calor específico, densidad y conductividad térmica empleados para el CFRP son 800 J/Kg*K,1750 Kg/m³ y 0.64 W/m*K respectivamente). En la figura 4.7 b) se muestra la ventana donde se introducen las características del defecto ocasionado como son la localización en coordenadas cartesianas y la profundidad (para el caso mostrado en específico se corresponde con un defecto de aire con 2.5mm de profundidad).



Figura 4.7. Ventanas de caracterización de a) Material, b) Defecto.

Una vez caracterizados el material y el defecto ocasionado en este se configuran como se ejemplifica en las figuras 4.8 a) y b) el tiempo de adquisición de muestras en conjunto con el método de calentamiento inducido al material y la forma en que se obtienen las imágenes correspondientes a los termogramas (reflexión o transmisión) respectivamente. En el ejemplo mostrado en ambas figuras el cual se corresponde con la simulación realizada del GFRP se ha configurado el experimento en 6 segundos con una fuente de calor correspondiente a una señal pulsada y recepción de termogramas en reflexión.

🖏 Parameters	×	🗤 Parameters 🗙 🗙
Specimen Layers Defects Timing Heat source Output Heating Pulsed C Harmonic		Surfaces © Front © Rear © Custom
Heat time [s] 0.01 End time [s] 6 Time step (s) 0.01		Output time step (s) 0.01
Heb		Help
a)		b)

Figura 4.8. Ventanas de caracterización de a) Tiempo de adquisición de muestras y método de calentamiento de la muestra, b) Forma de obtención de termogramas.

Una vez introducidos todos los parámetros se procede a ejecutar el programa el cual generará una secuencia de ficheros con extensión .txt los cuales se corresponden con los termogramas en cada instante de tiempo.

4.4. Análisis de defectos empleando PPT.

PPT puede ser visto como una unión entre PT y LT dado que combina interesantes características de ambas técnicas. En la tabla 4.1 se muestran las principales ventajas y desventajas de ambas técnicas lo que permitirá comprender la relevancia de la técnica PPT como técnica de análisis y cuantificación de defectos.

	PT	LT
	Experimentos llevados a cabo son sencillos.	La cuantificación de la profundidad
Ventajas	La adquisición de los datos es rápida.	
	Un único experimento permite la obtención de varias ondas térmicas a diferentes frecuencias.	Permite la reconstrucción de imágenes de fase las cuales son muy poco afectadas por fenómenos como calentamiento no uniforme, reflexiones del ambiente y variaciones de la emisividad.
Desventajas	Técnicas de inversión de la profundidad son complejas.	Los experimentos llevados a cabo con LT requieren equipamiento especializado como una fuente de calor sinusoidal y un amplificador Lock-In.
	Afectado por fenómenos como calentamiento no uniforme, reflexiones del ambiente y variaciones de la emisividad	Requiere un ensayo para cada profundidad analizada lo que provoca tiempos de adquisición de datos elevados.

Tabla 4.1. Ventajas y desventajas de las técnicas PT y LT.

La unión entre la PT y la LT se establece mediante el principio de superposición el cual plantea que cualquier forma de onda, periódica o no, puede ser aproximada por la suma de ondas armónicas oscilando a diferentes frecuencias como se muestra en la figura 4.9.



Figura 4.9. Aproximación de diferentes tipos de ondas empleando armónicos. [5]

Por tanto, es posible extraer un cierto número de ondas térmicas de un único pulso térmico, cada una con una frecuencia, amplitud y fase distinta empleando para ello la FT.

Aunque la Transformada de Fourier Continua (CFT, Continuous Fourier Transform) constituye una invaluable herramienta analítica para la formulación de soluciones la Transformada de Fourier Discreta (DFT, Discrete Fourier Transform) es preferida a la hora de trabajar con señales muestreadas en gran medida debido al bajo consumo computacional en comparación con la CFT. Para realizar una equivalencia entre ambas técnicas sin que ocurran fenómenos como aliasing y rizado de la señal se tienen que cumplir una serie de condiciones:

- La función temporal tiene que ser periódica.
- La función en frecuencia tiene que estar limitada en banda.
- El teorema del muestreo tiene que cumplirse.
- La ventana de truncamiento no puede ser cero en el período de la función en el espacio temporal.

A pesar de que los perfiles de temperatura en termografía activa en estado transitorio (como es el caso de la PT) son catalogados en general como señales no periódicas y no limitadas en banda se puede establecer una buena relación entre la CFT y la DFT haciendo uso de una apropiada selección de los parámetros de adquisición.

4.4.1. Selección de parámetros de adquisición.

De acuerdo con el teorema del muestreo de Shannon una función continua, como es el caso del perfil de temperatura mostrado en la figura 3.10 a) puede ser completamente recuperado de datos muestreados sin la ocurrencia de aliasing si la frecuencia de muestreo es al menos dos veces más grande que la máxima frecuencia disponible ($F_S \ge 2F_C$). Tanto para el análisis de defectos en CFRP como GFRP se escogió un espaciado (Δt) entre las muestras tomadas (N) de 0.01 segundos lo que equivale, hacienda uso de la expresión 3.13, a una F_S de 100Hz para el CFRP y de 99.6Hz para el GFRP.

La ventana de truncamiento está limitada por el inicio y el fin de la secuencia de adquisición de termogramas seleccionada. Este análisis se lleva a cabo sobre un número finito de termogramas (N) igualmente espaciadas por un intervalo de tiempo (Δt) sobre un período de tiempo N* Δt .

La ventana de truncamiento en el dominio del tiempo está dada por la expresión 3.12. En el caso del CFRP se escogió como tiempo de análisis de la curva de calentamiento - enfriamiento 4 segundos lo que equivale a 400 imágenes térmicas con un Δt de 0.01 segundos entre ellas mientras que en el caso del GFRP al ser un material con menos conductividad térmica se escogió como tiempo de análisis 6 segundos lo que equivale a 600 termogramas. Por tanto, la frecuencia inferior de la ventana de truncamiento en el dominio frecuencial se corresponde con 0.25Hz y 0.17 Hz (Fs/N) para el caso del CFRP y GFRP respectivamente mientras que la frecuencia superior está asociada de acuerdo con el teorema del muestreo de Shannon con la mitad de la frecuencia de muestreo (Fs) siendo 50 Hz y 49.8 Hz para el CFRP y el GFRP respectivamente.

4.5. Cuantificación de defectos mediante análisis de frecuencia ciega luego de efectuar PPT en CFRP.

Como se abordó en el epígrafe 3.2.3.1 una vez procesada la secuencia de termogramas con la técnica PPT uno de los métodos de post-procesado empleado para la cuantificación de defectos se basa en el análisis de la frecuencia ciega.

Para efectuar este análisis se eligen dos zonas dentro de cada fasegrama, la zona de señal la cual es estimada como la media aritmética del área defectuosa en cada caso y una zona catalogada como ruidosa la cual ha sido estimada como el promedio de todos los pixeles de cada fasegrama dentro del mismo material ya que en [49] se demostró que de esta forma se reduce la influencia de la variabilidad de los resultados como consecuencia de la diferencia de contrastes de temperatura entre todas las posibles zonas a elegir como ruido. En la figura 4.10 se ejemplifica cómo han sido seleccionadas ambas zonas en este trabajo.



Figura 4.10. Ejemplificación de selección de las zonas de señal y ruido.

En la figura 4.11 se muestra el comportamiento general del contraste de fase correspondiente a cuatro defectos simulados los cuales presentan profundidades comprendidas entre 1mm y 2.7mm.



Figura 4.11. Contraste de fase para defectos de 1mm, 2mm, 2.5mm y 2.7mm en CFRP. 40

En la figura 4.12 se ha realizado un acercamiento sobre la región de la gráfica donde se encuentran las intersecciones de las cuatro curvas con el eje x = 0 lo que se corresponde con las frecuencias ciegas de cada uno de los defectos simulados.



Figura 4.12. Acercamiento al contraste de fase para defectos de 1mm, 2mm, 2.5mm y 2.7mm en CFRP.

Analizando los valores de frecuencia ciega para el CFRP a profundidades entre 1mm y 2.7mm se aprecia que mientras mayor es la profundidad del defecto menor es la frecuencia ciega, resultado esperado luego del análisis efectuado en el epígrafe 3.2.3.1.

Una vez hallada la correspondencia entre los distintos valores de profundidades de cada defecto y su frecuencia ciega asociada es posible hallar la relación existente entre cada frecuencia ciega y las energías de impacto con la que se realizan los defectos (U). Para ello es necesario conocer de igual manera la energía de penetración (U_P), pero debido a que esta energía está directamente relacionada con el espesor del material y el diámetro del impactador [52] en este trabajo se seguirá una metodología iterativa basada en datos experimentales de [52], [53].

En [53] se demostró que para el caso del CFRP se cumple que la profundidad de penetración (I) está dada por (4.1):

$$I = I_0 (U/U_P)^{\beta}$$
 (4.1)

Donde I_0 y β son constantes experimentales cuyos valores quedaron fijados en 6.77mm y 2.535 respectivamente. A su vez la relación (U/U_P) en el caso del CFRP suele estar entre 0 y 1.[53]

En la tabla 4.2 se muestra una correspondencia entre las energías de impacto y las profundidades de penetración asumidas para estimar la relación U/U_P.

rabia 4.2. Relation entre energia de impacto y protanalidades de penetración asamidas en or Rr.			
U(J)	l(mm)	U/U _P	Frecuencia Ciega (Hz)
5	1	0.473	4.75
10	2	0.622	3.9
15	2.5	0.679	3.8
20	2.7	0.7	3.75

Tabla 4.2. Relación entre energía de impacto y profundidades de penetración asumidas en CFRP.

Mediante (4.2) se obtiene la profundidad de penetración real asociada a cada una de las energías de impacto:[52]

$$I = k[10^{\gamma(Ua/Up)} - 1]$$
(4.2)

Donde k y γ son constantes experimentales cuyos valores han sido estimados en 0.221 y 1.68 respectivamente para el CFRP [52]. A su vez U_a hace alusión a la energía absorbida la cual se define como la energía no transmitida de regreso al impactador en los casos donde el impacto no provoca perforación del material.

La razón U_a/U_p queda definida por (4.3): [52]

$$U_a/U_p = 0.962 * U/U_p - 0.0609 \tag{4.3}$$

En la tabla 4.3 se relacionan las energías de impacto con sus correspondientes penetraciones para el CFRP.

U(J)	U/U _p	U_a/U_p	l(mm)
5	0.473	0.394126	0.794135
10	0.622	0.537464	1.546388
15	0.679	0.592298	1.964007
20	0.7	0.6125	2.141611

Tabla 4.3. Relación entre energía de impacto y profundidades de penetración reales en CFRP.

Tomando los valores de frecuencia ciega asociados a las profundidades de penetración representados en la tabla 4.2 se realizó una regresión polinomial de 2do orden (y = $0.3707x^2 - 1.9483x + 6.326$) con el fin de estimar cuales serían los valores de frecuencia ciega que se asociarían a los valores reales de profundidad de penetración. Los nuevos valores se representan en la tabla 4.4.

l(mm)	Frecuencia Ciega (Hz)	U(J)	
0.794135	5.0126	5	
1.546388	4.1996	10	
1.964007	3.9294	15	
2.141611	3.8537	20	

Tabla 4.4. Relación frecuencia ciega con profundidad de penetración real en CFRP.

Con el objetivo de analizar si el método de la frecuencia ciega es viable para el análisis de defectos con profundidades en el rango de 6e-13m y 20e-9m se simularon defectos con estas características y se efectuó el mismo análisis que en los casos anteriores como se muestra en la figura 4.13 donde se observa el comportamiento general del contraste de fase correspondiente a cuatro defectos comprendidos en este rango.



Figura 4.13. Contraste de fase para defectos comprendidos entre 6e-13m y 20e-9m en CFRP.

En la figura anterior se aprecia que para estas profundidades existe un alto contenido de ruido lo que hace imposible determinar con precisión los valores de frecuencia ciega además de que todos tienden a cero en la misma frecuencia ciega de aproximadamente 8Hz. Este comportamiento es un claro indicador de que existe una resolución temporal deficiente. Para ello se realizó una nueva simulación de los defectos, pero esta vez aumentando el espaciado entre la toma de muestras (Δ t) a 0.1 segundos y manteniendo el mismo tiempo de adquisición de 4 segundos.

En la figura 4.14 se muestra el contraste de fase para los defectos de 6e-13m y 10e-9m con el nuevo valor de toma de muestras en 0.1 segundos.



Figura 4.14. Contraste de fase para defectos de 6e-13m y 10e-9m con $\Delta t = 0.1$ segundos en CFRP.

Luego de analizar la figura anterior se puede apreciar que el ruido ha disminuido, pero bajo estas nuevas condiciones es imposible determinar la frecuencia ciega, como alternativa es posible determinar valores de frecuencias ciegas aparentes estableciendo un nuevo umbral en 0.005 en vez de 0. Utilizando este nuevo umbral se aprecia que como sucedió con los defectos comprendidos entre 1mm y 2.7mm mientras menos profundo es el defecto mayor es la frecuencia ciega aparente.

4.6. Cuantificación de defectos mediante análisis de frecuencia ciega luego de efectuar PPT en GFRP.

De igual forma que en el sub-epígrafe anterior se cuantificarán defectos simulados mediante el análisis de la frecuencia ciega luego de procesar la secuencia de termogramas con la técnica PPT.

En la figura 4.15 se muestra el comportamiento general del contraste de fase correspondiente a cuatro defectos simulados con profundidades comprendidas entre 1mm y 2.7mm con respecto a zonas sanas dentro del mismo material. La selección de las zonas de señal y ruido se llevó a cabo de forma similar al análisis efectuado para el CFRP.



Figura 4.15. Contraste de fase para defectos de 1mm, 2mm, 2.5mm y 2.7mm en GFRP.

En la figura 4.16 se ha realizado un acercamiento sobre la región de la gráfica donde se encuentran las intersecciones de las cuatro curvas con el eje x = 0 lo que se corresponde con las frecuencias ciegas de cada uno de los defectos simulados.



Figura 4.16. Acercamiento al contraste de fase para defectos de 1mm, 2mm, 2.5mm y 2.7mm en GFRP.

Analizando los valores de frecuencia ciega para el GFRP a profundidades entre 1mm y 2.7mm se aprecia, al igual que lo sucedido con el CFRP, que mientras mayor es la profundidad del defecto menor es la frecuencia ciega.

A continuación, se emplea la misma metodología para calcular la relación entre la frecuencia ciega y la energía de impacto.

En la tabla 4.5 se muestra una correspondencia entre las energías de impacto y las profundidades de penetración asumidas para estimar la relación U/U_P en GFRP.

U(J)	l(mm)	U/U _P	Frecuencia Ciega (Hz)
5	1	0.473	1.19
10	2	0.622	1.05
15	2.5	0.679	1.02
20	2.7	0.7	0.95

Tabla 4.5. Relación entre energía de impacto y profundidades de penetración asumidas en GFRP.

Haciendo uso de la expresión (4.2) se obtiene la profundidad de penetración real que se le asocia a cada una de las energías de impacto, en el caso del GFRP los valores k y γ son 1.06mm y 0.931 respectivamente [52]. A su vez, la razón U_a/U_p se obtiene mediante la expresión (4.3)

En la tabla 4.6 se relacionan las energías de impacto con sus correspondientes penetraciones para el GFRP.

Tabla 4.0. Relacion entre energia de impacto y protundidades de penetracion reales en Or Rr.			
U(J)	U/Up	U _a /U _p	l(mm)
5	0.473	0.394126	1.407386
10	0.622	0.537464	2.294941
15	0.679	0.592298	2.713421
20	0.7	0.6125	2.880428

Tabla 4.6. Relación entre energía de impacto y profundidades de penetración reales en GFRP.

Tomando los valores de frecuencia ciega asociados a las profundidades de penetración representados en la tabla 4.5 se realizó una regresión polinomial de 2do orden (y = $-0.0047x^2 - 0.1131x + 1.3063$) con el fin de estimar cuáles serían los valores de frecuencia ciega que se asociarían a los valores reales de profundidad de penetración. Los nuevos valores se representan en la tabla 4.7.

l(mm)	Frecuencia Ciega (Hz)	U(J)	
1.407386	1.1378	5	
2.294941	1.0220	10	
2.713421	0.9648	15	
2.880428	0.9415	20	

Tabla 4.7. Relación frecuencia ciega con profundidad de penetración real en GFRP.

Con el objetivo de analizar si el método es viable para el análisis de defectos con profundidades en el rango de 6e-13m y 20e-9m se simularon defectos con estas características. En la figura 4.17 se observa el comportamiento general del contraste de fase correspondiente a cuatro defectos comprendidos en este intervalo con respecto a zonas no defectuosas dentro del mismo material.



Figura 4.17. Contraste de fase para defectos comprendidos entre 6e-13m y 20e-9m en GFRP.

A diferencia de lo ocurrido al analizar defectos con estas características en el CFRP las curvas no presentan un alto contenido de ruido lo que indica que el tiempo tomado entre muestras es correcto y capaz de detectar no solo defectos entre 1mm-2.7mm sino de ordenes mucho menores como es el caso de la figura anterior.

En la figura 4.18 se ha realizado un acercamiento sobre la región de la gráfica donde se encuentran las intersecciones de las cuatro curvas con el eje x = 0 lo que se corresponde con las frecuencias ciegas de cada uno de los defectos simulados.



Figura 4.18. Acercamiento al contraste de fase para defectos de 6e-13m, 10e-9m, 15e-9m y 20e-9m en GFRP.

Luego de observar la figura anterior se aprecia que, además de ser prácticamente imposible diferenciar las frecuencias ciegas de estas cuatro profundidades en el caso del GFRP, la relación entre profundidad de defecto y frecuencia ciega no se cumple ya que el menor valor de frecuencia ciega es el correspondiente a la curva de 6e-13m cuando este debería ser el mayor. Por tanto, debido a las características térmicas de este material no es posible analizar y cuantificar defectos tan poco profundos con este método.

4.7. Evaluación de la técnica PPT mediante el empleo de la métrica SNR.

Luego de obtener los perfiles de fase y amplitud para cada defecto simulado mediante la técnica PPT es posible cuantificar cuales defectos son visibles en la imagen infrarroja haciendo uso de la métrica SNR, de esta forma, los valores con SNR positiva indican que los defectos son visibles en este tipo de imágenes. Para calcular la SNR en cada caso se empleó la ecuación 3.16 y se tomó de igual manera como señal la media aritmética de la zona defectuosa mientras que el ruido se asumió como la media aritmética de todos los pixeles de cada uno de los perfiles de fase y amplitud respectivamente para reducir la influencia de la variabilidad de los resultados como resultado de la diferencia de los contrastes de temperatura entre todas las posibles zonas a elegir como ruido.

En la figura 4.19 a) y b) se muestran los comportamientos de los valores de SNR en los perfiles de fase para defectos en CFRP con distintas profundidades.



Figura 4.19. Comportamiento SNR en fasegramas en CFRP para defectos en el intervalo de a) 6e-13mm – 20e-9m y b) 1mm-2.7mm.

Luego de analizar ambas figuras se aprecia que para ambos intervalos de profundidades de defectos con excepción de los defectos superiores a 2mm la SNR es positiva y por tanto sería posible identificar los defectos en las imágenes termográficas. El método analizado anteriormente basado en el análisis de la frecuencia ciega adquiere mayor relevancia a la hora de determinar defectos con profundidades superiores a 2mm ya que a pesar de no ser visibles de acuerdo al valor de SNR calculado es posible caracterizarlos con dicho método.

En la figura 4.20 a) y b) se muestran los comportamientos de los valores de SNR en los perfiles de fase para defectos en GFRP con distintas profundidades.



Figura 4.20. Comportamiento SNR en fasegramas en GFRP para defectos en el intervalo de a) 6e-13mm – 20e-9m y b) 1mm-2.7mm.

En la figura anterior se aprecia que a diferencia de lo ocurrido con el CFRP el único intervalo donde sería posible visualizar los defectos es el comprendido entre 1mm y 2mm ya que es el único que posee SNR positiva.

En la figura 4.21 a) y b) se muestra el comportamiento de los valores de SNR calculados para los defectos simulados en los intervalos de 6e-13m - 20e-9m y 1mm - 2.7mm respectivamente en los termogramas de amplitud para el CFRP.



Figura 4.21. Comportamiento SNR en termogramas de amplitud en CFRP para defectos en el intervalo de a) 6e-13 m - 20e-9m y b) 1mm - 2.7mm.

En la figura anterior se observa que todos los defectos son visibles ya que la métrica SNR adquiere valores positivos para todo el rango de defectos con excepción de los defectos que poseen profundidades superiores a 2.4 mm.

En la figura 4.22 a) y b) se muestra el comportamiento de los valores de SNR calculados para los defectos simulados en los intervalos de 6e-13m – 20e-9m y 1mm – 2.7mm respectivamente en los termogramas de amplitud para el GFRP.



Figura 4.22. Comportamiento SNR en termogramas de amplitud en GFRP para defectos en el intervalo de a) 6e-13mm – 20e-9m y b) 1mm-2.7mm.

Luego de analizar la figura anterior se aprecia que con los termogramas de amplitud no es posible visualizar defectos en GFRP ya que para todo el rango de profundidades de defectos analizados el valor de SNR es negativo.

5. Análisis experimental de impactos en CFRP y GFRP.

En el presente capítulo se realiza un montaje experimental con el cual se obtendrán imágenes termográficas a las cuales se le aplicarán las mismas técnicas de procesado y post-procesado efectuadas en el capítulo anterior para detectar y cuantificar impactos sobre probetas de materiales compuestos.

5.1. Montaje experimental propuesto.

En la figura 5 se muestra una imagen del montaje experimental propuesto.



Figura 5.1. Montaje experimental propuesto.

Para realizar este montaje se dispone de dos probetas de diferente composición. Una placa rectangular de CFRP con ocho impactos en su superficie y otra placa de similares dimensiones de GFRP igualmente con ocho impactos en su superficie. Cada impacto tiene asociado un nivel de energía de impacto correspondiente. Además, se cuenta con dos flashes potentes con los cuales se calentarán ambas probetas para inducir la diferencia de temperatura entre las zonas a inspeccionar y el medio que las rodea, así como de una cámara termográfica conectada directamente a un ordenador mediante un cable de datos para almacenar y pre-procesar las imágenes adquiridas en tiempo real.

Para realizar la medición primeramente se han de acotar las zonas correspondientes a cada uno de los defectos de cada probeta ya que se realiza un ensayo por cada impacto. Para ello, se fija un área alrededor del defecto con cinta adhesiva, acto seguido se sitúan las probetas en un soporte dejando en una posición centrada la zona del impacto que se pretende inspeccionar y se colocan los flashes de forma tal que ambos se encuentren a la misma distancia de la zona afectada para de esta forma obtener un calentamiento uniforme del área que se pretende inspeccionar.

Posteriormente se establece la posición de la cámara térmica de tal manera que el impacto que se desea localizar y observar quede lo más centrado posible en la imagen. La cámara térmica dispone de un software que permite, en tiempo real, comprobar la imagen que está tomando, de este modo se puede ajustar el enfoque de la imagen cuanto sea necesario. Gracias a este software es posible realizar la primera etapa del pre-procesado descrita en el epígrafe 3.2.1 ya que es posible localizar los pixeles defectuosos en la cámara, así como realizar una corrección de vignetting automática. Por cada impacto analizado se toman 600 imágenes para el caso del CFRP y 800 imágenes para el caso del GFRP debido a que este último presenta una conductividad térmica inferior.

El ensayo comienza ejecutando la captura de imágenes durante un tiempo breve para obtener las imágenes frías y posteriormente se procede al calentamiento de las probetas con los flashes mientras se siguen capturando imágenes. Es necesario antes de repetir cualquier ensayo esperar un tiempo prudencial hasta que la superficie de la probeta que se ensaya vuelva a la temperatura inicial. Este tiempo depende de la emisividad del material.

5.2. Probetas

En la figura 5.2 se muestra la probeta de CFRP, se trata de una placa rectangular con unas dimensiones aproximadas de 30 centímetros de largo, 20 centímetros de ancho y menos de 0.5 centímetros de espesor. La superficie presenta ocho defectos producidos por impactos de 5J, 10J, 15J y 20J respectivamente.



Figura 5.2. Probeta de CFRP.

En la figura 5.3 se observa la probeta de GFRP. Es una probeta rectangular con las mismas dimensiones que la probeta de CFRP. Al igual que esta última, también se le han ocasionado ocho impactos distribuidos a lo largo de su superficie con niveles de energía de 5J, 10J, 15J y 20J respectivamente. Las zonas donde se localizan los impactos han sido pintadas de un color negro mate para mejorar la emisividad del GFRP.



Figura 5.3. Probeta de GFRP.

5.3. Análisis de los termogramas

Luego de obtener los termogramas y limpiar la secuencia substrayendo las imágenes frías promediadas para eliminar el FPN y otros ruidos externos como reflexiones del ambiente y calentamiento no uniforme de la muestra se adecuaron los termogramas resultantes para realizar la técnica de procesado PPT de igual forma que en el capítulo anterior. En la figura 5.4 a) y b) se muestran los fasegramas correspondientes a los impactos de 15J y 20J en CFRP.



Figura 5.4. Fasegramas de impactos de a) 15J y b) 20J.

Luego de analizar las figuras anteriores se aprecia que no se han podido distinguir los impactos y por tanto no es posible aplicar el método de post-procesado basado en la inversión de la profundidad con la fase ya que es imposible efectuar los contrastes de fase entre las zonas sanas y las dañadas al no poder delimitar ambas regiones.

En la figura 5.4 a) y b) se aprecian los fasegramas correspondientes a los impactos de 5J y 10J respectivamente en CFRP.



Figura 5.5. Fasegramas de impactos de a) 5J y b) 10J.

En ambos casos ha ocurrido lo mismo que en la figura anterior, no ha sido posible delimitar las zonas sanas y las defectuosas.

En la figura 5.5 se muestra el fasegrama correspondiente a uno de los impactos de 20J ocasionado en la probeta de GFRP.



Figura 5.6. Fasegrama de impacto de 20J en GFRP.

En el caso del GFRP ha sucedido lo mismo que en los fasegramas de la probeta de CFRP, al no diferenciarse la zona dañada de la sana no ha sido posible llevar a cabo el método de postprocesado del capítulo anterior.

5.4. Análisis del montaje experimental.

Si bien los resultados obtenidos después de procesar las imágenes termográficas adquiridas en el laboratorio no han sido satisfactorios ya que no ha sido posible determinar la ubicación de los impactos y por consiguiente no se han podido estimar los contrastes de fase entre las zonas sanas y las dañadas para obtener las frecuencias ciegas correspondientes a cada energía de impacto, luego de analizar a fondo las imágenes de fase se aprecia que en algunas zonas de estas imágenes se distingue la textura de las fibras con la que han sido confeccionadas las probetas y por tanto, incrementando la energía térmica suministrada por los flashes o ajustando mejor los tiempos de captura de las imágenes sería posible identificar estos impactos.

6. Conclusiones y líneas futuras.

6.1. Conclusiones

En este trabajo se han estudiado a fondo diversos métodos de NDT utilizados para caracterizar impactos en GFRP y CFRP. Debido a que los resultados obtenidos con cada uno de estos métodos dependen en gran medida de la geometría de la muestra a inspeccionar ninguno de los métodos se puede considerar como referente para determinar todos los posibles daños existentes en estos materiales, pero el análisis del estado del arte evidenció que con el empleo de la Termografía Infrarroja Activa se pueden visualizar diversos tipos de impactos en múltiples geometrías los cuales pueden ser posteriormente caracterizados.

En el proceso de toma de imágenes termográficas se obtienen termogramas que presentan ruido debido a la electrónica y la óptica de los sistemas termográficos, así como provenientes de factores externos, motivo por el cual se requiere efectuar un pre-procesado para mitigar estos efectos. Cuando las imágenes termográficas son generadas mediante simulación no es necesario realizar ningún pre-procesado ya que estas no presentan ninguno de los ruidos antes mencionados.

Se analizaron los fundamentos teóricos de disímiles técnicas de procesado de termogramas, pero debido a la simplicidad de los experimentos, la rapidez de la adquisición de los datos, el poco efecto que tiene en la reconstrucción de las imágenes de fase fenómenos como el calentamiento no uniforme y las reflexiones del ambiente y que la cuantificación de la profundidad es sencilla se analizaron las imágenes termográficas con la técnica PPT.

Debido a que para hallar una relación directa entre la profundidad de los impactos y la energía con que estos fueron realizados se requiere el previo conocimiento de factores como el diámetro del impactador así como su masa, factores habitualmente desconocidos a la hora de caracterizar defectos, se desarrolló en este trabajo un procedimiento iterativo basado en datos experimentales con el que fue posible determinar la energía de impacto con la que se ocasionó un defecto conociendo la frecuencia ciega obtenida luego de procesar las imágenes con la técnica PPT de fase. Además, como resultado de este procedimiento se observó que al provocar un defecto con la misma energía de impacto en ambos materiales la profundidad de penetración estimada es mayor en el GFRP que en el CFRP.

Con el montaje experimental se intentaron validar los análisis teóricos efectuados, pero a pesar de que no se consiguió este objetivo luego de analizar las imágenes obtenidas se aprecia que mejorando los tiempos de captura de termogramas y aumentando la energía de la señal flash sería posible identificar los impactos.

6.2. Recomendaciones y líneas futuras

Una vez expuestas las conclusiones se plantean las líneas futuras correspondientes al estudio realizado.

- Realizar más simulaciones con el software Thermocalc 3D para defectos con distintas profundidades para de esta forma obtener una regresión polinomial de segundo orden de mayor precisión.
- Realizar nuevamente el montaje experimental con flashes más potentes y calculando mejor los tiempos de adquisición de muestras en función de las características térmicas del material para conseguir identificar los impactos en las probetas.

Referencias

- [1] R. Slayton y G. Spinardi, «Radical innovation in scaling up: Boeing's Dreamliner and the challenge of socio-technical transitions», *Technovation*, vol. 47, pp. 47-58, ene. 2016, doi: 10.1016/j.technovation.2015.08.004.
- «Use Of Composites In India's Aircraft Programs SARAS & amp; LCA Tejas». https://www.aame.in/2012/12/use-of-composites-in-india-aircraft.html (accedido 21 de agosto de 2022).
- [3] J. M. Stickel y M. Nagarajan, «Glass Fiber-Reinforced Composites: From Formulation to Application», *Int. J. Appl. Glass Sci.*, vol. 3, n.º 2, pp. 122-136, 2012, doi: 10.1111/j.2041-1294.2012.00090.x.
- [4] R. D. Rawlings, *MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING -Volume III*. EOLSS Publications, 2009.
- [5] P. González Rodríguez, «Análisis y modelización del comportamiento de placas de tejido carbono/epoxi ante impacto», jun. 2021, Accedido: 21 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/33545
- [6] J. P. Sánchez, «Análisis y simulación de impactos de hielo sobre laminados carbono/epoxi», http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universidad Carlos III de Madrid, 2013. Accedido: 21 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=78979
- [7] G. Kim, S. Hong, K.-Y. Jhang, y G. H. Kim, «NDE of low-velocity impact damages in composite laminates using ESPI, digital shearography and ultrasound C-scan techniques», *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 13, n.º 6, pp. 869-876, jun. 2012, doi: 10.1007/s12541-012-0113-4.
- [8] G. Mook, R. Lange, y O. Koeser, «Non-destructive characterisation of carbonfibre-reinforced plastics by means of eddy-currents», *Compos. Sci. Technol.*, vol. 61, n.º 6, pp. 865-873, may 2001, doi: 10.1016/S0266-3538(00)00164-0.
- [9] J. Cheng, J. Qiu, H. Ji, E. Wang, T. Takagi, y T. Uchimoto, «Application of low frequency ECT method in noncontact detection and visualization of CFRP material», *Compos. Part B Eng.*, vol. 110, pp. 141-152, feb. 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.11.018.
- [10] C. Xu, W. Zhang, C. Wu, J. Xie, X. Yin, y G. Chen, «An improved method of eddy current pulsed thermography to detect subsurface defects in glass fiber reinforced polymer composites», *Compos. Struct.*, vol. 242, p. 112145, jun. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112145.
- [11] G. De Angelis, M. Meo, D. P. Almond, S. G. Pickering, y S. L. Angioni, «A new technique to detect defect size and depth in composite structures using digital shearography and unconstrained optimization», *NDT E Int.*, vol. 45, n.º 1, pp. 91-96, ene. 2012, doi: 10.1016/j.ndteint.2011.07.007.
- [12] V. M. Yurov, V. I. Goncharenko, S. L. Vasiliev, S. A. Dmitriev, y S. A. Yurgenson, «X-ray computed tomography-based analysis of impact damage propagation in composite materials», *Eurasian Phys. Tech. J.*, vol. 16, n.º 2 (32), pp. 31-35, 2021.
- [13] D. D. Symons, «Characterisation of indentation damage in 0/90 lay-up T300/914 CFRP», Compos. Sci. Technol., vol. 60, n.º 3, pp. 391-401, 2000.
- [14] A. Enfedaque, J. M. Molina-Aldareguía, F. Gálvez, C. González, y J. Llorca, «Effect of glass fiber hybridization on the behavior under impact of woven carbon fiber/epoxy laminates», *J. Compos. Mater.*, vol. 44, n.º 25, pp. 3051-3068, 2010.
- [15] K. T. Tan, N. Watanabe, y Y. Iwahori, «X-ray radiography and micro-computed tomography examination of damage characteristics in stitched composites subjected to impact loading», *Compos. Part B Eng.*, vol. 42, n.º 4, pp. 874-884, 2011.

- [16] «Introduction to Nondestructive Testing». https://www.asnt.org/MajorSiteSections/About/Introduction_to_Nondestructive_Te sting.aspx (accedido 21 de agosto de 2022).
- [17] Royo, Pastor R. y Cañada, Soriano M., TERMOGRAFIA INFRARROJA, NIVEL II. Accedido: 21 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.agapea.com/Rafael-Royo-Pastor/Termografia-infrarroja-nivel-II-9788416671106-i.htm
- [18] H. Towsyfyan, A. Biguri, R. Boardman, y T. Blumensath, «Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures», *Chin. J. Aeronaut.*, vol. 33, n.º 3, pp. 771-791, 2020.
- [19] R. Grimberg, R. Steigmann, S. Leitoiu, A. Andreescu, y A. Savin, «Ultrasound and eddy current data fusion evaluation of carbon–epoxy composites delaminations», *Emerg. Technol. Nondestruct. Test.*, pp. 349-355, 2008.
- [20] Y. He, G. Tian, M. Pan, y D. Chen, «Non-destructive testing of low-energy impact in CFRP laminates and interior defects in honeycomb sandwich using scanning pulsed eddy current», *Compos. Part B Eng.*, vol. 59, pp. 196-203, 2014.
- [21] J. W. Newman, «Aerospace NDT with advanced laser shearography», en 17th world conference on nondestructive testing, 2008, pp. 1-6.
- [22] Y. Y. Hung, N. Ng, R. Ng, S. M. Shepard, Y. Hou, y J. R. Lhota, «Review and comparison of shearography and pulsed thermography for adhesive bond evaluation», *Opt. Eng.*, vol. 46, n.º 5, p. 051007, 2007.
- [23] D. Francis, R. P. Tatam, y R. M. Groves, «Shearography technology and applications: a review», *Meas. Sci. Technol.*, vol. 21, n.º 10, p. 102001, 2010.
- [24] S. Gholizadeh, «A review of non-destructive testing methods of composite materials», *Procedia Struct. Integr.*, vol. 1, pp. 50-57, 2016.
- [25] C. A. Leckey, M. D. Rogge, y F. R. Parker, «Guided waves in anisotropic and quasi-isotropic aerospace composites: Three-dimensional simulation and experiment», *Ultrasonics*, vol. 54, n.º 1, pp. 385-394, 2014.
- [26] M. Jiang y G. Wang, «Convergence of the simultaneous algebraic reconstruction technique (SART)», *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 12, n.º 8, pp. 957-961, 2003.
- [27] A. J. Moffat *et al.*, «In situ synchrotron computed laminography of damage in carbon fibre–epoxy [90/0] s laminates», *Scr. Mater.*, vol. 62, n.º 2, pp. 97-100, 2010.
- [28] M. Rehak, U. Hassler, y R. Hanke, «Acquisition trajectories for X-ray tomosynthesis applied to planar samples», en 2nd International Symposium on NDT in Aerospace, 2010, vol. 22, p. 24.
- [29] C. Ibarra-Castanedo, M. Genest, J.-M. Piau, S. Guibert, A. Bendada, y X. P. Maldague, «Active infrared thermography techniques for the nondestructive testing of materials», en *Ultrasonic and advanced methods for nondestructive testing and material characterization*, World Scientific, 2007, pp. 325-348.
- [30] S. Pickering y D. Almond, «Matched excitation energy comparison of the pulse and lock-in thermography NDE techniques», Ndt E Int., vol. 41, n.º 7, pp. 501-509, 2008.
- [31] J. Erazo-Aux, H. Loaiza-Correa, A. D. Restrepo-Giron, C. Ibarra-Castanedo, y X. Maldague, "Thermal imaging dataset from composite material academic samples inspected by pulsed thermography", *Data Brief*, vol. 32, p. 106313, 2020.
- [32] J. Montesano, Z. Fawaz, y H. Bougherara, «Use of infrared thermography to investigate the fatigue behavior of a carbon fiber reinforced polymer composite», *Compos. Struct.*, vol. 97, pp. 76-83, 2013.
- [33] D. A. González Fernández, *Contribuciones a las técnicas no destructivas para evaluación y prueba de procesos y materiales basadas en radiaciones infrarrojas.* Universidad de Cantabria, 2007.

- [34] T. Ullmann, Y. Shi, y R. Aoki, «Capabilities of lock-in thermography for nondestructive inspection of fibre reinforced composites», Web-Based Proc. QIRT2012, 2012.
- [35] C. Meola, G. M. Carlomagno, A. Squillace, y A. Vitiello, «Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 13, n.º 3, pp. 380-388, 2006.
- [36] R. Montanini y F. Freni, «Non-destructive evaluation of thick glass fiber-reinforced composites by means of optically excited lock-in thermography», *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 43, n.º 11, pp. 2075-2082, 2012.
- [37] L. Junyan, W. Fei, L. Yang, y W. Yang, «Inverse methodology for identification the thermal diffusivity and subsurface defect of CFRP composite by lock-in thermographic phase (LITP) profile reconstruction», *Compos. Struct.*, vol. 138, pp. 214-226, 2016.
- [38] C. Meola y G. M. Carlomagno, «Lock-in thermography to detect delamination in carbon fibres reinforced polymers», en *Damage Growth in Aerospace Composites*, Springer, 2015, pp. 263-279.
- [39] P. Kamińska, J. Ziemkiewicz, P. Synaszko, y K. Dragan, «Comparison of pulse thermography (pt) and step heating (sh) thermography in non-destructive testing of unidirectional gfrp composites», *Fatigue Aircr. Struct.*, 2019.
- [40] H. D. B. Restrepo, «Contribución a la Caracterización de Defectos en Termografia Infrarroja Mediante Máquinas de Aprendizaje», PhD Thesis, Universidad del Valle.
- [41] K. E. Cramer, «Research Developments in Nondestructive Evaluation and Structural Health Monitoring for the Sustainment of Composite Aerospace Structures at NASA», Daejeon, sep. 2016. Accedido: 21 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: https://ntrs.nasa.gov/citations/20160012012
- [42] N. P. Avdelidis, D. P. Almond, A. Dobbinson, B. C. Hawtin, C. Ibarra-Castanedo, y X. Maldague, «Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT», *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 40, n.º 3, pp. 143-162, abr. 2004, doi: 10.1016/j.paerosci.2004.03.001.
- [43] R. Marani, D. Palumbo, U. Galietti, y T. D'Orazio, «Deep learning for defect characterization in composite laminates inspected by step-heating thermography», *Opt. Lasers Eng.*, vol. 145, p. 106679, oct. 2021, doi: 10.1016/j.optlaseng.2021.106679.
- [44] M. Maggioni, E. Sánchez-Monge, y A. Foi, «Joint Removal of Random and Fixed-Pattern Noise Through Spatiotemporal Video Filtering», *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 23, n.º 10, pp. 4282-4296, oct. 2014, doi: 10.1109/TIP.2014.2345261.
- [45] C. Ibarra-Castanedo, D. A. González, F. Galmiche, A. Bendada, y X. P. Maldague, «On signal transforms applied to pulsed thermography», *Recent Res Dev Appl Phys*, vol. 9, pp. 101-127, 2006.
- [46] N. Rajic, «Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures», *Compos. Struct.*, vol. 58, n.º 4, pp. 521-528, 2002.
- [47] M. Ortiz Aja, «Determinación del grado de impactos en materiales composites mediante termografía activa», 2021.
- [48] R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, J. Molleda, y F. G. Bulnes, «Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing», *Sensors*, vol. 14, n.º 7, pp. 12305-12348, jul. 2014, doi: 10.3390/s140712305.
- [49] C. Ibarra-Castanedo, «Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase [ressource électronique] /», ene. 2005.
- [50] F. J. Villaescusa Egea, «Aplicación de los ensayos no destructivos : análisis de pérdidas energéticas mediante termografía infrarroja en un remolcador», jul.

2013, Accedido: 21 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.upct.es/handle/10317/3383

- [51] R. Hsissou, R. Seghiri, Z. Benzekri, M. Hilali, M. Rafik, y A. Elharfi, «Polymer composite materials: A comprehensive review», *Compos. Struct.*, vol. 262, p. 113640, abr. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113640.
- [52] «Damage and energy absorption in GFRP laminates impacted at low-velocity: Indentation model», *Procedia Eng.*, vol. 10, pp. 2298-2311, ene. 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.380.
- [53] G. Caprino, A. Langella, y V. Lopresto, «Indentation and penetration of carbon fibre reinforced plastic laminates», *Compos. Part B Eng.*, vol. 34, n.º 4, pp. 319-325, 2003.

Anexos

```
Código empleado para PPT
```

```
% function PPT_rutina(directorio,fichero)
%Script para el cálculo de Phase Pulse Thermography.
```

```
%Limpiar
clc;
clear all;
close all;
```

```
%Defintion of variables
```

```
imafria=single([]);
Cap=single([]);
tam=single([]);
x=single([]);
y=single([]);
ICC=single([]);
```

```
%Carga de datos
directorio=input('path: ','s');
fichero=input('file: ','s');
file=[directorio, '\Limp_',fichero,'.mat'];
load(file);
Cap=Limp;
file=[directorio, '\imgfria_',fichero,'.mat'];
load(file);
imafria=fria;
tam=size(Cap);
numero=tam(3);
for i=1:1:numero
        B(:,:,i)=Cap(:,:,i)-imafria;
end
clear Cap imafria i;
% Proceso de calculo
disp='Start PPT'
tic;
tam=size(B);
Transformada = fft(B,tam(3),3);
modulo=abs(Transformada);
fase=angle(Transformada);
t=toc;
file=[directorio, '\DFT_',fichero,'.mat'];
save(file,'t', 'modulo','fase');
```

```
clear all;
disp='End PPT'
```

Código empleado para obtener Frecuencia Ciega en CFRP

```
clc;
clear all;
name =
["DFT 1mmCarbono.mat", "DFT 2mmCarbono.mat", "DFT 2.5mmCarbono.mat", "DFT 2.7mmC
arbono.mat"];
% name = [ "DFT_6toDefCarbono.mat","DFT_4toDefCarbono.mat",
"DFT_3erDefCarbono.mat", "DFT_2doDefCarbono.mat"];
vector = zeros(length(name) ,400);
vector delta =zeros(length(name) ,400);
freclimite = zeros(1,length(name));
delta_tiempo = 0.01;
%delta tiempo = 0.1;
Profundidad = [1e-3,2e-3,2.5e-3,2.7e-3];
%Profundidad = [6e-13,10e-9,15e-9,20e-9];
for i= 1:length(name)
    load(name(i));
    visual = mean(fase,3);
    figure
    imagesc(visual)
    Roi = drawrectangle;
    Roi2 = drawrectangle;
    Pos = Roi.Position;
    Pos2 = Roi2.Position;
    roi sel = fase(Pos(2):(Pos(2) + Pos(4)),Pos(1):(Pos(1)+ Pos(3)),:);
    roi_sel2 = fase(Pos2(2):(Pos2(2) + Pos2(4)),Pos2(1):(Pos2(1)+
Pos2(3)),:);
    prom = mean(roi_sel,[1 2]);
    prom2 = mean(roi_sel2,[1 2]);
    prom = reshape(prom,[size(prom,3),1]);
    prom2 = reshape(prom2,[size(prom2,3),1]);
    delta = prom-prom2;
    vector(i,:)= prom';
    vector delta(i,:)= -delta;
end
muestras = length(fase)./2;
delta_frecuencia = 1./(length(fase)*delta_tiempo);
figure
for z = 1:i
    plot(linspace(delta_frecuencia,(length(fase) *
delta_frecuencia)/2,muestras),vector(z,1:muestras))
    hold on
    grid on
```

end
```
legend('1e-3','2e-3','2.5e-3','2.7e-3')
%legend('6e-13','10e-9','15e-9','20e-9')
xlabel('Frecuencia[Hz])')
ylabel('0[radianes]')
title('Frecuencia Limite')
figure
for z = 1:i
    plot(linspace(delta frecuencia,(length(fase) *
delta_frecuencia)/2,muestras),vector_delta(z,1:muestras))
    hold on
    grid on
end
legend('delta 1e-3','delta 2e-3','delta 2.5e-3','delta 2.7e-3')
%legend('delta 6e-13','delta 10e-9','delta 15e-9','delta 20e-9')
xlabel('Frecuencia[Hz])')
ylabel('Δθ[radianes]')
title('Frecuencia Ciega en CFRP')
for j = 1:length(name)
    for i = 1: length(fase)/2
        if i+1 > length(fase)/2
            break
        elseif vector_delta(j,i+1)<0</pre>
            freclimite(j)= i*delta frecuencia;
             break
        end
    end
end
  figure
  plot(Profundidad, freclimite)
  grid on
  xlabel('Profundidad[mm]')
  ylabel('Frecuencia Ciega[HZ]')
  title('Relacion Frecuencia Ciega vs Profundidad')
Código empleado para obtener Frecuencia Ciega en GFRP
clc;
clear all;
name =
["DFT_1mmV6s.mat","DFT_2mmV6s.mat","DFT_2.5mmV6s.mat","DFT_2.7mmV6s.mat"];
%name = [ "DFT 6e-13mmV6s.mat", "DFT 10e-9mmV6s.mat", "DFT 15e-
9mmV6s.mat", "DFT_20e-9mmV6s.mat"];
vector = zeros(length(name), 600);
vector_delta =zeros(length(name) ,600);
freclimite = zeros(1,length(name));
delta_tiempo = 0.01;
Profundidad = [1e-3,2e-3,2.5e-3,2.7e-3];
%Profundidad = [6e-13,10e-9,15e-9,20e-9];
for i= 1:length(name)
```

```
load(name(i));
    visual = mean(fase,3);
    figure
    imagesc(visual)
    Roi = drawrectangle;
    Roi2 = drawrectangle;
    Pos = Roi.Position;
    Pos2 = Roi2.Position;
    roi_sel = fase(Pos(2):(Pos(2) + Pos(4)),Pos(1):(Pos(1)+ Pos(3)),:);
    roi_sel2 = fase(Pos2(2):(Pos2(2) + Pos2(4)),Pos2(1):(Pos2(1)+
Pos2(3)),:);
    prom = mean(roi_sel,[1 2]);
    prom2 = mean(roi sel2,[1 2]);
    prom = reshape(prom,[size(prom,3),1]);
    prom2 = reshape(prom2,[size(prom2,3),1]);
    delta = prom-prom2;
    vector(i,:)= prom';
    vector delta(i,:)= -delta;
end
muestras = length(fase)./2;
delta_frecuencia = 1./(length(fase)*delta_tiempo);
figure
for z = 1:i
    plot(linspace(delta_frecuencia,(length(fase) *
delta_frecuencia)/2,muestras),vector(z,1:muestras))
    hold on
    grid on
end
legend('1e-3m','2e-3m','2.5e-3m','2.7e-3m')
%legend('6e-13','10e-9','15e-9','20e-9')
xlabel('Frecuencia[Hz])')
ylabel('0[radianes]')
title('Frecuencia Limite')
figure
for z = 1:i
    plot(linspace(delta_frecuencia,(length(fase) *
delta frecuencia)/2,muestras),vector delta(z,1:muestras))
    hold on
    grid on
end
legend('delta 1e-3m','delta 2e-3m','delta 2.5e-3m','delta 2.7e-3m')
%legend('delta 6e-13','delta 10e-9','delta 15e-9','delta 20e-9')
xlabel('Frecuencia[Hz])')
ylabel('\00[radianes]')
title('Frecuencia Ciega en GFRP')
for j = 1:length(name)
    for i = 1: length(fase)/2
        if i+1 > length(fase)/2
            break
        elseif vector_delta(j,i+1)<0</pre>
            freclimite(j)= i*delta_frecuencia;
```

```
break
end
end
figure
plot(Profundidad,freclimite)
grid on
xlabel('Profundidad[mm]')
ylabel('Frecuencia Ciega[HZ]')
title('Relacion Frecuencia Ciega vs Profundidad')
```

Código empleado para obtener valores de SNR

```
clc;
clear all;
%name
=["DFT 1mmCarbono.mat","DFT 2mmCarbono.mat","DFT 2.5mmCarbono.mat","DFT 2.7mm
Carbono.mat"];
name
=["DFT_1mmV6s.mat","DFT_2mmV6s.mat","DFT_2.5mmV6s.mat","DFT_2.7mmV6s.mat"];
%name = [ "DFT_6e-13mmV6s.mat", "DFT_10e-9mmV6s.mat", "DFT_15e-
9mmV6s.mat", "DFT_20e-9mmV6s.mat"];
%name =
["DFT_6toDefCarbono.mat", "DFT_4toDefCarbono.mat", "DFT_3erDefCarbono.mat", "DFT
_2doDefCarbono.mat", "DFT_5toDefCarbono.mat"];%sentido
vector_snr = [];
relacion = [];
vector = zeros(length(name) ,600);
vector delta =zeros(length(name) ,600);
freclimite = zeros(1,length(name));
delta_tiempo = 0.01;
Profundidad = [1e-3,2e-3,2.5e-3,2.7e-3];
%Profundidad = [6e-13,10e-9,15e-9,20e-9];
for i= 1:length(name)
    load(name(i));
    visual = mean(fase,3);
    figure
    imagesc(visual)
    Roi = drawrectangle;
    Roi2 = drawrectangle;
    Pos = Roi.Position;
    Pos2 = Roi2.Position;
    roi_sel = fase(Pos(2):(Pos(2) + Pos(4)),Pos(1):(Pos(1)+ Pos(3)),:);
    roi_sel2 = fase(Pos2(2):(Pos2(2) + Pos2(4)),Pos2(1):(Pos2(1)+
Pos2(3)),:);
    prom = mean(roi_sel,[1 2]);
    prom2 = mean(roi_sel2,[1 2]);
    prom = reshape(prom,[size(prom,3),1]);
    prom2 = reshape(prom2,[size(prom2,3),1]);
```

```
delta = prom-prom2;
    vector(i,:)= prom';
    vector_delta(i,:)= prom2';
 end
 for i= 1:length(name)
    R = snr(vector(i,:),vector_delta(i,:));
        vector_snr(i)=R;
 end
 plot(Profundidad,vector snr)
xlabel('Profundidad[m]')
ylabel('SNR[dB]')
grid on
title('Comportamiento SNR para distintas profundidades de penetracion en
GFRP')
%%
clc;
clear all;
%name =[ "PCARajic_6e-13mmV6s.mat","PCARajic_10e-9mmV6s.mat","PCARajic_15e-
9mmV6s.mat", "PCARajic 20e-9mmV6s.mat"];
name = [
"PCARajic 6toDefCarbono.mat", "PCARajic 4toDefCarbono.mat", "PCARajic 3erDefCar
bono.mat", "PCARajic_2doDefCarbono.mat", "PCARajic_5toDefCarbono.mat"];
%name = [
"PCARajic 1mmV6s.mat", "PCARajic 2mmV6s.mat", "PCARajic 2.5mmV6s.mat", "PCARajic
2.7mmV6s.mat"];
%name = [
"PCARajic_1mmCarbono.mat", "PCARajic_2mmCarbono.mat", "PCARajic_2.5mmCarbono.ma
t"];
vector_snr = [];
vector = zeros(length(name) ,20);
vector_delta =zeros(length(name) ,20);
%Profundidad = [1e-3,2e-3,2.5e-3];
Profundidad = [6e-13,10e-9,15e-9,20e-9,5e-8];
for i= 1:length(name)
    load(name(i));
    visual = mean(PCARajic,3);
    figure
    imagesc(visual)
    Roi = drawrectangle;
    Roi2 = drawrectangle;
    Pos = Roi.Position;
    Pos2 = Roi2.Position;
    roi_sel = PCARajic(Pos(2):(Pos(2) + Pos(4)),Pos(1):(Pos(1)+ Pos(3)),:);
    roi sel2 = PCARajic(Pos2(2):(Pos2(2) + Pos2(4)),Pos2(1):(Pos2(1)+
Pos2(3)),:);
    prom = mean(roi sel,[1 2]);
    prom2 = mean(roi_sel2,[1 2]);
```

```
prom = reshape(prom,[size(prom,3),1]);
    prom2 = reshape(prom2,[size(prom2,3),1]);
    delta = prom-prom2;
    vector(i,:)= prom';
    vector_delta(i,:)= prom2';
end
for i= 1:length(name)
    R = snr(vector(i,:),vector_delta(i,:));
        vector_snr(i)=R;
%
           imshow(I)
end
plot(Profundidad,vector_snr)
xlabel('Profundidad[m]')
ylabel('SNR[dB]')
grid on
title('Comportamiento SNR para distintas profundidades de penetracion en
CFRP')
```