POSGRADO INTERINSTITUCIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA



# DETECCIÓN DE DELAMINACIONES EN MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRA DE CARBONO CON CÁMARA **INFRARROJA TESIS** PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN LA ESPECIALIDAD DE DISEÑO Y **DESARROLLO DE SISTEMAS MECÁNICOS** PRESENTA **GERARDO RAMSES REYES FUENTES**

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, MAYO 2017

# INDICE

RESUMEN	vi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.3 JUSTIFICACIÓN	3
1.4 OBJETIVOS	4
1.5 HIPÓTESIS	4
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1 ANTECEDENTES	11
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA	11
2.2.1 Ventajas de las pruebas con termografía infrarroja	14
2.2.2 Condiciones de las pruebas con termografía infrarroja	14
2.3 TÉCNICAS DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA.	16
2.3.1 Termografía infrarroja Pasiva	16
2.3.2 Termografía infrarroja Activa	17
2.3.2.1 Termografía infrarroja pulsada	
2.4 TEORÍA BÁSICA DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA	20
2.4.1 Conducción de calor y la ley del enfriamiento de Newton	21
2.4.2 Relación de aspecto de la discontinuidad	23
2.5 VIABILIDAD DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA (TIR) COMO ENSAYO NO DESTRUCTIVO (END)	24
2.6 CONSIDERACIONES EN PRUEBAS DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA A COMPUESTOS	26
2.6.1 Resolución espacial y distancia de medición (IMFOV).	27
2.6.2 Sensibilidad térmica y tamaño del defecto	28
2.6.3 Detectores infrarrojos	29
2.6.4 Bandas espectrales y velocidad de adquisición de datos	29
2.6.5 Almacenamiento de datos	
2.6.6 Repetibilidad	
2.6.7 Excitación térmica a compuestos en termografía infrarroja activa	30 i

2.6.8 Excitación térmica por radiación infrarroja (sin contacto).	31
2.7 LIMITACIONES E INTERFERENCIAS DURANTE LA PRUEBA DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA A COMPUESTOS	31
2.8 CONSIDERACIONES DE GEOMETRÍA Y TAMAÑO EN LAS PRUEBAS DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA EN COMPUESTOS	32
2.9 SEGURIDAD Y PELIGROS EN PRUEBAS TÉRMICAS INFRARROJAS	32
2.10 ESTÁNDARES FÍSICOS DE REFERENCIA PARA TERMOGRAFÍA INFRARROJA	33
2.10.1 Estándar de detectabilidad (Estándar de defecto conocido)	33
2.10.2 Estándar de uniformidad	34
2.11 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS	34
2.11.1 Digitalización	34
2.11.2 Operaciones aritméticas en el procesamiento de imágenes	35
2.11.3 Filtrado en el procesamiento de imágenes.	36
2.12 CONDICIONES AMBIENTALES EN LAS PRUEBAS TERMOGRÁFICAS	37
2.12.1 Temperatura ambiente	37
2.12.2 Fuentes de radiación (fondo de contaminación térmica)	37
2.12.3 Corrientes de aire (convección)	38
3. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN	39
3. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN ANTECEDENTES PREVIOS AL EXPERIMENTO	39 39
<ul> <li>3. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN</li> <li>ANTECEDENTES PREVIOS AL EXPERIMENTO</li></ul>	39 39 A 41
<ol> <li>PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN.</li> <li>ANTECEDENTES PREVIOS AL EXPERIMENTO.</li> <li>3.1 PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN DE DELAMINACIONES EN LÁMINAS DE FIBR DE CARBONO POR IMÁGENES INFRARROJAS.</li> <li>3.1.1 Alcance.</li> </ol>	39 39 A 41 41
<ol> <li>PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN.</li> <li>ANTECEDENTES PREVIOS AL EXPERIMENTO.</li> <li>3.1 PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN DE DELAMINACIONES EN LÁMINAS DE FIBR DE CARBONO POR IMÁGENES INFRARROJAS.</li> <li>3.1.1 Alcance.</li> <li>3.1.2 Resumen de la técnica.</li> </ol>	39 A 41 41 42
<ol> <li>PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN.</li> <li>ANTECEDENTES PREVIOS AL EXPERIMENTO.</li> <li>3.1 PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN DE DELAMINACIONES EN LÁMINAS DE FIBR DE CARBONO POR IMÁGENES INFRARROJAS.</li> <li>3.1.1 Alcance.</li> <li>3.1.2 Resumen de la técnica.</li> <li>3.1.3 Aplicación.</li> </ol>	39 A 41 41 42 43
<ol> <li>PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN.</li> <li>ANTECEDENTES PREVIOS AL EXPERIMENTO.</li> <li>3.1 PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN DE DELAMINACIONES EN LÁMINAS DE FIBR DE CARBONO POR IMÁGENES INFRARROJAS.</li> <li>3.1.1 Alcance.</li> <li>3.1.2 Resumen de la técnica.</li> <li>3.1.3 Aplicación.</li> <li>3.1.4 Equipo y Materiales.</li> </ol>	39 A 41 41 42 43 44
<ol> <li>PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN.</li> <li>ANTECEDENTES PREVIOS AL EXPERIMENTO.</li> <li>3.1 PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN DE DELAMINACIONES EN LÁMINAS DE FIBR DE CARBONO POR IMÁGENES INFRARROJAS.</li> <li>3.1.1 Alcance.</li> <li>3.1.2 Resumen de la técnica.</li> <li>3.1.3 Aplicación.</li> <li>3.1.4 Equipo y Materiales.</li> <li>3.1.5 Estándares de Referencia.</li> </ol>	39 A 41 41 42 43 44 47
<ol> <li>PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN.</li> <li>ANTECEDENTES PREVIOS AL EXPERIMENTO.</li> <li>3.1 PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN DE DELAMINACIONES EN LÁMINAS DE FIBR DE CARBONO POR IMÁGENES INFRARROJAS.</li> <li>3.1.1 Alcance.</li> <li>3.1.2 Resumen de la técnica.</li> <li>3.1.3 Aplicación.</li> <li>3.1.4 Equipo y Materiales.</li> <li>3.1.5 Estándares de Referencia.</li> <li>3.1.6 Ajustes.</li> </ol>	39 A 41 41 42 43 43 47 47
<ol> <li>PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN.</li> <li>ANTECEDENTES PREVIOS AL EXPERIMENTO.</li> <li>3.1 PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN DE DELAMINACIONES EN LÁMINAS DE FIBR DE CARBONO POR IMÁGENES INFRARROJAS.</li> <li>3.1.1 Alcance.</li> <li>3.1.2 Resumen de la técnica.</li> <li>3.1.3 Aplicación.</li> <li>3.1.4 Equipo y Materiales.</li> <li>3.1.5 Estándares de Referencia.</li> <li>3.1.6 Ajustes.</li> <li>3.1.7 Procedimiento .</li> </ol>	39 A 41 41 42 42 43 47 47 49
<ol> <li>PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN</li></ol>	39 A 41 41 42 42 43 43 47 47 49 50
<ol> <li>PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN</li></ol>	39 A 41 41 42 42 43 43 47 47 49 50 50
<ol> <li>PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN</li></ol>	39 A 41 41 42 42 43 43 47 47 47 49 50 50 51
<ol> <li>PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN</li></ol>	39 A 41 41 42 42 43 43 44 47 47 49 50 50 51 52
<ol> <li>PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN</li> <li>ANTECEDENTES PREVIOS AL EXPERIMENTO</li></ol>	39 A 41 41 42 43 43 44 47 47 47 47 47 47 47 50 50 51 52 53

4. RESULTADOS
4.1 EXPERIMENTO56
4.1.1 Cuantificación del contraste C para el análisis del diseño de experimentos (DOE)56
4.2 OBSERVACIONES
4.2.1 Detección visual directa por contraste máximo
4.2.2 Resultados del Diseño de experimentos
4.2.2.1 Gráfica de efectos principales para C 59
4.2.2.2 Gráfica de interacción para C 61
4.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS62
4.4 VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA64
4.4.1 Validación de la metodología utilizando el ultrasonido65
5. CONCLUSIONES
6. RECOMENDACIONES
REFERENCIAS
ANEXO A. GLOSARIO DE TÉRMINOS.
ANEXO B. CUANTIFICACIÓN DEL CONTRASTE C PARA EL ANÁLISIS DEL DISEÑO DE
EXPERIMENTOS (DOE).
ANEXO C. LEY DEL ENFRIAMIENTO DE NEWTON.

# **INDICE DE FIGURAS.**

Figura 1.1 E	Delaminac	ión por impact	o en placa o	de fibra de cark	ono		2
Figura 1.2.	Idea prin	cipal del func	ionamiento	de detección	de defectos	s subsuperficia	ales con
termografía	infrarroja	y excitación té	érmica por ra	adiación óptica			6
Figura 2.1 E	Espectro e	lectromagnétio	co, luz visibl	e e infrarrojo			12
Figura 2.2 I	Emisividad	d, Reflectivida	d, transmisi	vidad y la ley	de conserva	ación de la en	ergía de
radiación							de
Kirchhoff						13	
Figura 2.3 E	Emisividad	l de la superfic	ie y tempera	atura aparente			13
Figura 2.4 <sup>-</sup> avión	Termograt	fía pasiva, del	ección de i	ngreso de agu	a (humedad	d) en estructu	ra de un 14
Figura 2.5 C	Contraste	de defectos se	gún su prof	undidad y tiem	po de apario	;ión	19
Figura 2.6	Objeto	identificable	más peque	eño (IFOV) y	Objeto m	edible más j	pequeño
(IMFOV)	27						
Figura	3.1	Equipo	de	inspección	У	estándares	de
referencia			45				
Figura		3.2	Soft	ware	de		Análisis
FIJI					.46		
Figura		3.3		E	stándar		de
detectabilida	ad				47		
Figura 3.4 F	loteo de l	perfil para dete	erminar el ta	maño de la ind	licación		53
Figura 4.1.	Imágene	s utilizadas p	ara el diser	io de experim	entos de tre	es variables (	potencia
lámparas V	V, tiempo	de exposici	ón s, profu	indidad delam	inación mr	n) y tres nive	eles. Se
distinguen r	nejor (me	jor contraste)	las indicacio	ones blancas e	en fondo osc	uro, esto dep	ende del
calor aport	ado a la	muestra y	la profundi	dad de la in	dicación. M	lás profundas	menos
contraste	58						
Figura 4.2 C	Gráfica de	efectos princi	oales para C	)			60
Figura 4.3 C	Gráfica de	interacción pa	ara C				61
Figura 4.4.	Profundid	ad y tiempo de	e exposición	. La simetría d	de esta gráfi	ca llama la ate	ención, a
cualquier tie	omno do					al contrasta	
gráfica se ir	empo de	exposición se	presenta u	in aumento pr	oporcional c	contraste.	De esta
	ituye pode	exposición se er medir la pro	ρresenta ι fundidad ο e	in aumento pr el espesor	oporcional c		De esta 64
Figura 4.5 I	ntuye pode mágenes	exposición se er medir la pro de C-scan de	presenta u fundidad o e muestras (	in aumento pr el espesor CFRP multidire	oporcional c	ompuestas (0	De esta 64 °/90°)
Figura 4.5 I sometidas a	ntuye pode mágenes impacto	exposición se er medir la pro de C-scan de en: a) 30 J;	presenta u fundidad o e muestras ( B) 20 J coi	in aumento pr el espesor CFRP multidire n elevadores c	oporcional c eccionales co le tensión a	ompuestas (0 12 mm; C) 2	De esta 64 ° / 90 °) 20 J con

Figura 6.1. Restando una imagen b) previa (antes del calentamiento) a una imagen a) muy tenue (500W, 1 s) durante el enfriamiento, se logró detectar el cambio que existió entre estas dos imágenes. Aumentando el contraste al resultado de estas dos imágenes aumento la detección c), sin recurrir а mayor aporte de calor......70 Figura 6.2. Se mejora la detección transformando cada píxel de la imagen en un punto de intensidad y graficando en x, y, z......71 Figura 6.3. Mediante un filtro Gaussiano se suavizó el ruido producto del tramado (CFRP 90°) y se mejoró la detección, sin sacrificar el *contraste* (C).....71 Figura 6.4. Las ventajas del ploteo de perfil con filtro se ven mejoradas con un ploteo tridimensional al poder manipular las vistas y asignando color a cada valor de intensidad con de una paleta 

# **INDICE DE TABLAS.**

Tabla 1.1:	Detección	de defectos po	r END en	compuestos de	matriz pol	imérica usade	os en
aplicacione	es aeroespa	aciales					7
Tabla 1.2.	Descripciór	n general de los r	nétodos d	e END establecido	os para coi	mpuestos de i	matriz
polimérica							8
Tabla 1.3	Comparad	ción de métodos	s de END	) utilizados para	la inspece	ción de mate	eriales
compuesto	os (adaptad	o de 2)					9
Tabla 1.4.	ASTM E 2	533 TABLA 14 R	esumen de	e la termografía in	frarroja (m	étodos sin coi	ntacto
usando cá	mara infrarr	oja)					10
Tabla	4.1	Valores	del	contraste	С	para	el
DOE				.59			

# RESUMEN

La industria de alto desempeño (como la aeroespacial, automotriz, producción de energía, etc.) está incorporando cada día más el uso de materiales compuestos de fibra de carbono en componentes estructurales. Durante la fabricación y uso de estos se inducen defectos en su estructura, por lo que resulta importante detectarlos antes de que terminen en una catástrofe. Uno de los defectos más perjudiciales en placas de fibra de carbono son las delaminaciones. En vista de lo anterior resulta necesario desarrollar una metodología rápida, no invasiva y remota para detectar este defecto. El análisis de indicaciones térmicas en la superficie con una cámara de infrarrojos y un sistema activo puede ser útil para la detección.

Durante un ciclo de calentamiento y enfriamiento, una zona sana y una con delaminaciones se comportan diferentes, una zona delaminada luce más caliente que una zona sana. La delaminación actúa como una barrera térmica dificultando la difusión del calor a capas más profundas en el material. Esta pequeña diferencia en el gradiente de temperatura, puede ser observada por una cámara infrarroja, el calor es aportado por un pulso de luz de un arreglo de lámparas halógenas, seguido por el análisis del comportamiento de la radiación infrarroja en la superficie a través del tiempo. No es necesario el contacto físico con el componente durante la inspección y el periodo de tiempo entre el pulso y el análisis es de unos segundos.

Existen variables que afectan la observación de la radiación infrarroja en la superficie de inspección como son: cantidad de calor aportado y la profundidad del defecto a encontrar (algunas otras son: condiciones atmosféricas, acabado superficial, tipo de material). La sensibilidad de la cámara, el software de tratamiento de imágenes, así como un procedimiento específico, adquieren gran importancia en la sensibilidad y alcance de detección de la técnica. En este estudio se analizó el comportamiento infrarrojo, en la superficie, con varias delaminaciones simuladas artificialmente en una placa de fibra de carbono a diferentes profundidades, por medio de barrenos de fondo plano. La finalidad es desarrollar un procedimiento de inspección rápido y remoto, útil para fines de escaneo para detectar delaminaciones en placas de fibra de carbono.

# 1. INTRODUCCIÓN

# **1.1 ANTECEDENTES**

La elección de un método de Ensayos No Destructivos (END) óptimo para una aplicación en particular, es una decisión que depende de muchos factores entre los que destacan el material a inspeccionar, los defectos que se deben detectar, el coste del equipo, la velocidad de escaneado y algunos otros requisitos específicos del usuario final.

Muchos de los métodos de END tales como rayos X, ultrasonidos, electromagnéticos y termografía, transmiten cierto tipo de energía a través de un objeto, ya sea en forma de ondas y/o partículas. Parte de la energía se absorbe, rebota o pierde durante la trayectoria y el resto se detecta después de pasar a través de todo el material de la pieza. Si se utiliza un método de END apropiado, la intensidad de la energía varía cuando encuentra en su trayecto defectos estructurales y se revela tanto la presencia, como la localización de estos.

Por décadas, los metales han constituido la mayor parte de las aplicaciones de END. Defectos típicos en metales incluyen huecos, grietas y poros. Los defectos superficiales, pueden ser detectados de manera efectiva por medio de una prueba superficial como líquidos penetrantes (PT) o corrientes inducidas (ET). Defectos más profundos en metales son detectados comúnmente por pruebas de END volumétricas como rayos X u ondas ultrasónicas.

#### **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la actualidad la fabricación con metales cada vez es menor y resulta evidente el aumento de materiales compuestos, en industrias de alto desempeño (como la aeroespacial, automotriz, producción de energía, etc.), por sus prestaciones (fuerza, ligereza y resistencia a la corrosión), pero plantean retos a las técnicas tradicionales de END antes mencionadas debido a lo siguiente: los rayos X son débilmente absorbidos

por materiales no metálicos; El ultrasonido puede ser fuertemente dispersado, o absorbido en materiales compuestos; las corrientes inducidas no pueden generarse en no-metales; los líquidos penetrantes sólo pueden detectar defectos abiertos a la superficie y no aplica a materiales porosos como los materiales compuestos.

La cada vez más demandante producción de compuestos de fibra de carbono obliga a la industria a desarrollar técnicas de inspección más productivas, para garantizar la calidad requerida. Métodos como la termografía, ampliamente usado en el mantenimiento predictivo de maquinaria electromecánica, en aislamiento de edificaciones e incluso diagnóstico médico contra epidemias en aeropuertos, está surgiendo como un método de inspección a considerar en la inspección de estructuras fabricadas con fibra de carbono.

La fibra de carbono al igual que los materiales convencionales no está exenta de fallar o sufrir daño en su estructura durante su uso. Las delaminaciones son las fallas o defectos más comunes y perjudiciales, ya que reduce las propiedades mecánicas de resistencia. Las delaminaciones se producen por la separación de algunas de las distintas capas (plies) apiladas una sobre otras contenidas en la matriz polimérica. Estas delaminaciones se producen por fatiga, sobre esfuerzos o golpes (Figura 1), que origina que se separen entre sí algunas capas internas de la lámina. Es importante detectar este tipo de defectos durante la inspección y mantenimiento, para repararlos antes de volver al servicio o durante su fabricación.



Figura 1.1 Delaminación por impacto en placa de fibra de carbono.

#### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Procedimientos de inspección específicos de termografía infrarroja para la detección de delaminaciones en fibra de carbono son escasos. Algunas normas genéricas, tal como aparece en la ASTM E 2533 Tabla 1 y 2 [1] muestra algunas técnicas que pueden ser usadas para detectar delaminaciones en compuestos de matriz polimérica (fibra de carbono). En la Tabla 3 la termografía también aparece como método de detección y escaneo rápido [2], detecta dislocaciones, delaminaciones, huecos, picadura, grietas, inclusiones y oclusiones, especialmente en piezas delgadas que tienen baja conductividad térmica, baja reflectividad / alta emisividad y en materiales que disipan la energía eficientemente (Tabla 2, ASTM E 2533). Esta información es demasiado genérica y se debe particularizar, con las condiciones específicas de inspección a fin de determinar la viabilidad de la técnica.

En este alentador escenario se pretende reducir el tiempo de inspección que se consume con otras técnicas como el ultrasonido (UT) o rayos X (RT) (Tabla 4), beneficiando económicamente el costo de mantenimiento por medio del recorte de horas de inspección. Eso sin contar que la inspección se realizaría sin la necesidad de tener contacto físico con la pieza, y en condiciones seguras para el personal. No existe la necesidad de evacuar al personal durante la inspección como con rayos X, evitando así tiempos muertos de producción, ya que la radiación infrarroja no tiene efectos dañinos sobre la salud.

La configuración de inspección que se obtenga, el equipo que se fabrique durante esta investigación, así como el procedimiento específico que se desarrolle, tienen como finalidad práctica, la oferta de servicios de termografía activa con excitación térmica por radiación infrarroja, útil para fines de cribado y/o escaneo, así como también incursionar tempranamente en el desarrollo e investigación de esta tecnología.

De los resultados, conclusiones y recomendaciones que de este estudio se desprenderán nuevas líneas de investigación en este nuevo y excitante campo de la

termografía Infrarroja activa. Según la tendencia de investigación e innovación la termografía se perfila como una de las grandes apuestas en la inspección de materiales compuestos [3]. Entre los estudios futuros que pretendemos realizar se encuentra: la medición de espesores sin contacto por infrarrojos, la elaboración de un catálogo de curvas de tiempos de exposición térmica pulsada en materiales compuestos, el desarrollo de equipo portátil con teleobjetivos y excitación térmica por láser para inspección a distancia sin exponer al operador, la detección de grietas por vibrotermografía en materiales metálicos y compuestos, la comparación de curvas teóricas con curvas reales para determinar fórmulas de cálculo en termografía pulsada. El potencial de esta técnica IR para utilizarla en otras aplicaciones y otros materiales radica en la forma en como generemos el diferencial térmico entre la discontinuidad y el material base. Debido a que el calor es una forma básica de transmisión de energía y se encuentra relacionada con la temperatura y radiación infrarroja, sus aplicaciones son limitadas únicamente por nuestra imaginación.

#### **1.4 OBJETIVOS**

**Objetivo general.** El objetivo principal de esta investigación es el desarrollo de un procedimiento específico de inspección por termografía activa pulsada, con excitación óptica, con el cual no habrá necesidad de tener contacto físico con el área de inspección para la detección de delaminaciones en placas de fibra de carbono.

**Objetivos específicos**. Para alcanzar el objetivo principal es necesario determinar experimentalmente los parámetros que influyen en la sensibilidad de detección (detectabilidad), por tal motivo se analizará el comportamiento infrarrojo, en la superficie de varias delaminaciones simuladas artificialmente en una placa de fibra de carbono a diferentes profundidades, para determinar la eficacia y rango de detección de la técnica.

# **1.5 HIPÓTESIS**

Sabemos que la Termografía Infrarroja es un proceso difusivo en el que el calor que se propaga en un sólido se atenúa en el espacio y se desplaza en el tiempo. La ecuación

diferencial que describe la conducción de calor es muy diferente de aquellos que describen la propagación de rayos X y/o ultrasonido. Por lo tanto, la técnica de END por termografía infrarroja está estrechamente relacionada con la física de la conducción de calor y las ondas infrarrojas (IR).

El principio físico en que se basa esta técnica es la detección de radiación infrarroja que emiten todos los cuerpos. Esta radiación es electromagnética también, igual a la de la luz, pero de longitud de onda más larga, razón por la cual no podemos verla (Figura 2.1), para ello nos valemos de miles de pequeños sensores que tienen las cámaras infrarrojas similar a los pixeles que componen las cámaras normales de video. Estos sensores no ven la temperatura, lo que ven es la radiación infrarroja que emiten la superficie de todos los cuerpos en función de la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Es decir un pequeño cambio en la temperatura produce un gran cambio en la emisión de radiación infrarroja ( $E=T^4$ ). Con esta cámara podremos detectar pequeñas diferencias de temperatura en la superficie de inspección.

**Hipótesis**. La idea principal de esta técnica es calentar por unos segundos una pieza con un pulso de luz uniforme y observar la superficie en busca de anomalías térmicas. *"Durante el enfriamiento una zona con delaminación aparecerá más caliente que una zona sana",* debido a que la delaminación actúa como una barrera térmica para difundir el calor a las capas más profundas y su velocidad de disipación disminuye (Figura 2).

Existen variables que afectan la observación de la radiación infrarroja en la superficie de inspección como son la cantidad de calor aportado y la profundidad del defecto a encontrar (algunas otras son, las condiciones atmosféricas, acabado superficial y el tipo de material). Por lo tanto se estudiará la relación del calor aportado, la profundidad del defecto y su efecto en la sensibilidad de detección por medio de un diseño de experimentos (DOE) de tres variables, potencia de lámpara, duración del pulso y profundidad de delaminación.

La sensibilidad de la cámara, el software de tratamiento de imágenes, así como un procedimiento específico, adquieren gran importancia e impactan positivamente en la capacidad de detección de la técnica.



correspondiente flujo de radiación es detectada en la superficie por la cámara de infrarrojos.

(comparación contraste)

#### 

Figura 1.2. Idea principal del funcionamiento de detección de defectos subsuperficiales con termografía infrarroja y excitación térmica por radiación óptica.

Tabla 1.1: Detección de defectos por END en compuestos de matriz polimérica usados en aplicaciones aeroespaciales

Defecto					-			
	Emisión acústica	Tomografía por computador	Prueba de fuga	Radiografía / Radioscopia	Interferometría	Termografía	Ultrasonido	END Visual
Contaminación		х		х			х	х
Filamentos dañados	х	Х		х				
Delaminación	х	Х			Х	Х	Х	х
Variación de densidad		Х		х		Х	Х	
Deformación bajo carga					Х			
Desprendimiento					Х	Х	Х	Х
Desprendimiento de fibras	Х	Xa				Х	Х	
Desalineación de fibras		Х		х		Х		
Fracturas	Х	Х		Х		Х	Х	Х
Inclusiones		Х				Х	Х	Х
Fugas	Х		Х				Х	
Huelgos y partes moviles	Х							
Microgrietas	Х	Xp		X <sup>b,c</sup>	Х		Х	
Humedad		Х		X <sup>d,e</sup>		Х		
Porosidad	Х	Х		Х		Х	Х	
Variación de espesor		Х		X <sup>f</sup>	Х	Х	Х	
subcurado							Х	
Vacios	Х	Х	Х	Х		Х	Х	
a Se puede detectar después del i	mpacto.							
b Depende de la abertura de la gri	eta.							
		-						

c Depende del ángulo del haz planar al defecto y apertura.

d Solo en proyección central.

e Modo radioscópico.

f Para radiografía.

Fuente: Detección de defectos por END (Adaptado de ASTM E2533-09)

Tabla 1.2. Descripción general de los métodos de END establecidos para compuestos de matriz

polimérica.

1					
Método de END	Aplicaciones	Ventajas	Limitaciones	Lo visto y lo reportado	Otras consideraciones
Interferometría	Detecta subsuperficialmente Imperfecciones o Discontinuidades o Cambios en el módulo o Deformación fuera del plano.	Bien adaptado para alta velocidad en inspecciones automatizadas en ambientes de producción	La imperfección o discontinuidad subsuperficial debe ser suficientemente grande para causar una deformación superficial medible bajo carga. El estado de la superficie, especialmente el brillo, puede interferir con la detección interferométrica exacta, requiriendo así el uso de agentes de matizado superficial (excepto:	Un patrón de interferencia creado por sustracción o superposición de imágenes del artículo sometido a prueba antes y después de la carga, revelando así concentraciones de deformación localizadas.	Se requiere equipo adicional para determinar los cambios en la pendiente derivativa de la superficie, y por lo tanto utiliza el método como una herramienta cuantitativa.
Termografía	Detecta dislocaciones, delaminaciones, huecos, picadura, grietas, inclusiones y oclusiones, especialmente en artículos finos sometidos a ensayo que tienen baja conductividad térmica, baja reflectividad / alta emisividad y en materiales que disipan la energía eficientemente,	Observación rápida de superficies grandes e identificación de regiones que deben ser examinadas con más cuidado.	Los compuestos tienen límites de temperatura más allá de los cuales pueden producirse daños irreversibles de la matriz y la fibra. La detección de imperfección o discontinuidad depende de la orientación de una imperfección o discontinuidad con respecto a la dirección del flujo de calor. En materiales más gruesos, sólo son posibles indicaciones cualitativas de imperfecciones o discontinuidades.	La distribución de la temperatura superficial se mide trazando contornos de igual temperatura (isotermas), produciendo así un patrón de emisión de calor relacionado con defectos superficiales y subsuperficiales.	Ambos métodos de contacto (requiere la aplicación de un revestimiento) y sin contacto (se basa en la detección de radiación de cuerpo negro infrarrojo) están disponibles. La termografía es pasiva o activa, la termografía activa puede subdividirse en técnicas de pulso o bloqueo (lock-in).
Ultrasonido	Detecta imperfecciones sub- superficiales o discontinuidades. Hay dos técnicas principales; Pulso-Eco para inspecciones unilaterales y por transmisión a través para inspecciones de dos caras.	Detecta imperfecciones sub- superficiales o discontinuidades incluyendo porosidad, inclusiones y delaminaciones.	Requiere una superficie relativamente plana y lisa. El tipo de material puede afectar a la inspección.	Las imperfecciones o discontinuidades se registran directamente en las imágenes de amplitud.	Posible atrapamiento de fluido; Posible absorción de fluidos en materiales porosos tales como los compuestos. Numerosas técnicas disponibles, incluyendo ondas longitudinales, cortantes o superficiales. La atenuación puede ser comparativamente alta en compuestos en comparación con los artículos metálicos.

Fuente: TABLE 2 General Overview of Established NDT Methods (of ASTM E2533-16a)

Tabla 1.3: Comparación de métodos de END utilizados para la inspección de materiales compuestos (adaptado de 2)

Método de END	Costo del equipo	Velocidad de escaneo	Una y/o dos inspeccio nesª	Requisitos especiales	Limitaciones
Termografía (IR)	Moderado	Rápido	1, 2	Superficie no- reflectante, alta emisividad	La detectabilidad del defecto disminuye con el aumento del espesor del laminado
Interferometría laser	Moderado	Rápido	1	Superficie reflectiva <sup>b</sup>	La detectabilidad del defecto disminuye con el aumento del espesor del laminado
Ultrasonido (UT)	Moderado	Lento	1, 2	Requiere acoplante°	Materiales porosos tales como compuestos de matriz cerámica.
Ultrasonido no contacto (UT)	Moderado	Lento	1, 2	Sin acoplante	Baja frecuencia. Solución espacial baja. Aplicaciones posibles limitadas
Ultrasonido con laser	Muy alto	Lento	1, 2	Sin acoplante, pulso-eco	Muy caro Seguridad láser Tratamiento de superficies No es bueno para los paneles de sandwich
Rayos X <sup>d</sup>	Moderado	Lento	2	Preocupaciones de seguridad	No es muy bueno para compuestos
Terahertz	Moderado	Rápido	1, 2	Utilizado para materiales de baja densidad incluyendo espuma	Limitaciones de material Problemas de conductividad Buena sensibilidad al contenido de humedad
Prueba del martillo (tap testing)	Muy barato	Lento	1	Sólo debe utilizarse en zona tranquila. Prueba de audición para los operadores.	Método no cuantitativo, no confiable No se debe utilizar en nada importante

a Algunos métodos sólo funcionan de un lado y algunos métodos sólo funcionan con acceso a ambos lados (a través de la transmisión). Algunos métodos pueden usarse tanto desde un lado como desde ambos lados.

b Las superficies de prueba no necesitan ser altamente reflectantes, pero deben reflejar la luz hasta cierto punto.
c La prueba de exploración C-ultrasónica a gran escala "normal" usa un acoplante a base de agua. Esto crea un problema para los materiales compuestos, ya que el agente de acoplamiento es absorbido por la parte que debe secarse en un horno o autoclave. Esto agrega coste y tiempo de procesamiento. Existen sistemas de ultrasonidos acoplados al aire y los sistemas de ultrasonidos por láser no requieren un acoplador, pero ambos métodos tienen otras limitaciones.
d Los rayos X tienen una aplicación limitada para materiales compuestos. La radiografía generalmente no muestra huecos y otros defectos comunes de los materiales compuestos. Puede mostrar FOD y agua atrapada, dependiendo de la concentración y las propiedades del material

# Tabla 1.4. ASTM E 2533 TABLA 14 Resumen de la termografía infrarroja (método sin contacto usando cámara infrarroja)

Ventajas

#### Aplicaciones

Puede usarse para detectar delaminaciones, desencolados, vacíos, grietas, inclusiones y oclusiones, especialmente en laminados más delgados. El límite de espesor depende de la difusividad térmica del material compuesto y del equipo y técnica empleados.

Muy adecuado para el escaneado rápido de grandes superficies. Las áreas sospechosas pueden ser identificadas para una evaluación más completa.

Ideal para superficies de alta emisividad (baja re fl ectividad). Una superficie negra proporciona resultados óptimos, pero la mayoría de las superficies opacas funcionan bien.

Puede configurarse para una inspección de un solo lado o de dos lados. Una cámara de vídeo de infrarroios (IR) visualiza la distribución de temperatura superficial a través de la superficie del artículo bajo prueba durante o poco después de calentar (o enfriar) el área de interés. Las discontinuidades subsuperficiales afectan el flujo de calor, dando lugar a variaciones de temperatura localizadas en la superficie.

Funcionamiento

La difusión térmica es el mecanismo por el cual los defectos internos se encuentran en un artículo bajo prueba. Es una propiedad de material definida como la relación de su conductividad térmica y capacidad calorífica.

Los cambios en la tasa de flujo de calor debido a las discontinuidades subsuperficiales afectan la distribución de la temperatura superficial observada.

La difusión térmica puede iniciarse por calentamiento (radiación, convección o conducción), o por enfriamiento (convección o conducción), o mecánica (vibración). Relativamente rápido porque es un método de inspección de áreas. En algunos casos, detalles de inspección son comparables a los métodos de rayos X o ultrasónicos a una fracción (típicamente 20%) del tiempo de inspección. La inspección puede ser completamente sin contacto.

No requiere acceso al lado opuesto de la estructura. Proporciona información suplementaria a otros procedimientos de END.

No se emiten radiaciones nocivas, y los requisitos de calentamiento superficial son generalmente pequeños (no más de 5 a 10 ° C). Gran versatilidad de aplicaciones. Se puede utilizar en una amplia variedad de materiales térmicamente conductores. La cámara de infrarrojos requiere una vista directa de la superficie del artículo sometido a prueba y se requiere holgura para enfocar. La aplicación no uniforme de calefacción o refrigeración puede dar lugar a imágenes termográficas confusas.

Limitaciones

El equipo de calefacción puede ser inseguro para operar en entornos de combustible. La temperatura de contraste superficial debido a un defecto interno disminuye exponencialmente con su profundidad, limitando generalmente el uso a laminados más delgados (menos de 8.4 mm [0.33 pulgadas] de grosor en la mayoría de los casos).

No es efectivo en superficies de baja emisividad a menos que se aplique un recubrimiento de alta emisividad (tal como una pintura de color negro mate). Lo visto y lo reportado

La cámara IR presenta una imagen de vídeo de la distribución de temperatura superficial. La velocidad de fotogramas A 60 Hz es común, pero otras velocidades de fotogramas están disponibles. Algunas cámaras proporcionan una salida de vídeo analógica para la grabación y / o la entrada / salida digital para la conexión a una computadora.

Las áreas defectuosas aparecen como variaciones en la temperatura de la superficie vista por la cámara infrarroja. Estas variaciones de temperatura se presentan en paletas de color o en escala de grises.

Las imágenes de defectos internos son transitorias. El tiempo de aparición, la imagen de contraste máximo y el posterior desvanecimiento dependen de las propiedades térmicas del artículo bajo ensayo y las del defecto, así como del tamaño y la profundidad del defecto. En algunos casos, la temperatura de contraste es muy débil y / o de corta duración. Es posible que se requiera almacenamiento de imágenes y / o procesamiento de datos adicionales.

# 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 ANTECEDENTES.

Todos los objetos irradian energía infrarroja de su superficie, cuanto más caliente está, más irradía. Una cámara de infrarrojos detecta esta radiación y la convierte en una imagen infrarroja, que muestra diferencias de temperatura superficial aparente y patrones térmicos en objetos. Estos patrones se ocupan para diagnosticar un dispositivo o la composición de un material. A partir de mediados de los años 1600, se desarrolló una multitud de dispositivos de medición de la temperatura entre ellos el bolómetro inventado por el astrónomo estadounidense Samuel P. Langley alrededor del año 1880, culminando con el desarrollo de cámaras de imágenes térmicas en la década de 1950 por la Milicia de los Estados Unidos, estas cámaras comenzaron a comercializarse en los años sesenta. Desde ese momento, su costo ha disminuido y sus capacidades han aumentado, ha habido un crecimiento exponencial en el uso de esta tecnología. Los sistemas modernos de infrarrojos de hoy vienen en una amplia variedad de resoluciones y sensibilidades térmicas y están disponibles en casi todos los rangos de precios.

# 2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA

La radiación térmica es una forma de radiación electromagnética con longitudes de onda más largas que las de la luz visible (Figura 2.1). Todos los objetos por encima del cero absoluto (0°K, [-273°C]) emiten radiación infrarroja en función de la cuarta potencia de su temperatura absoluta. En otras palabras, a medida que un objeto cambia la temperatura, la cantidad de radiación que emite cambia exponencialmente (T<sup>4</sup>). Para ilustrar esto, una superficie de 20° C ((293)<sup>4</sup>) que cambie tan solo a 21° C ((294)<sup>4</sup>) tendría un aumento proporcional de radiación de 101 131 295. Esto explica porque las cámaras infrarrojas son tan sensibles a los pequeños cambios de temperatura, pueden distinguir hasta 0.018 K de diferencia de temperatura entre una superficie y otra.



Figura 2.1 Espectro electromagnético, luz visible e infrarrojo.

De importancia es el hecho de que todos los objetos también tienen cierto grado de reflectividad térmica como una característica de su superficie. Lo que esto significa es que parte de la energía que detecta una cámara termográfica proveniente de un objeto reflejado que no tiene conexión con la temperatura real de la superficie.

La radiación al incidir en una superficie se absorbe, se transmite y se refleja, la misma cantidad que absorbe la emite, a este valor se le conoce como emisividad. Se representa comúnmente como un cociente de comparación a un cuerpo negro, por lo que nunca tendrá un valor igual o mayor a la unidad.

La *emisividad*  $\varepsilon$  es la medida de la capacidad de un material de emitir radiación infrarroja (IR), es complementaria, de la *reflectividad* r y la *transmisividad*  $\tau$ , según la ley de conservación de la energía de radiación de Kirchhoff que dice que  $\varepsilon + r + \tau = 1$ , como casi no existen cuerpos translucidos la *transmisividad* se desprecia y la ecuación queda  $\varepsilon + r = 1$  donde una parte emite y otra siempre refleja (Figura 2.2). Mientras la *emisividad*  $\varepsilon$  de la superficie se acerque a 1, será mejor para la medición. La *emisividad* disminuye en una superficie pulida y aumenta su *reflectividad*, cualquier medio que disminuya la *reflectividad* en la superficie aumentará la *emisividad* y viceversa (Figura 2.3). Una capa ligera de pintura negra mate (removible con agua) es un truco común, cuando se tienen superficies altamente reflectivas.



Figura 2.2 Emisividad, Reflectividad, transmisividad y la ley de conservación de la energía de radiación de Kirchhoff.

Material	Emisividad (ɛ)
Cuerpo negro	1
Piel humana	0.98
Agua	0.98
Amianto	0.95
Cerámica	0.95
Barro	0.95
Cemento	0.95
Tejido	0.95
Grava	0.95
Papel	0.95
Plástico	0.95
Goma	0.95
Madera	0.95
Cobre (oxidado)	0.68
Acero inoxidable	0.1
Cobre (pulido)	0.02
Alumínio (pulido)	0.05

Figura 2.3 Emisividad de la superficie y temperatura aparente.

Una multitud de factores internos y externos que afectan la temperatura de la superficie también son motivo de preocupación, requiriendo tener un conocimiento profundo de la física de las radiaciones y la transferencia de calor básica, así como una conciencia de las influencias ambientales que afectan la temperatura de la superficie.

La termografía es un método superficial, su profundidad de detección es de apenas 1 milésima de pulgada de la superficie, lo que suceda térmicamente en el fondo llegó a la superficie por medio de la conducción del calor a través del material, factores como la difusividad térmica y la distancia recorrida por la energía a través del espesor de la pieza, desempeñan un papel importante en la diferencia de temperatura que se observa en la superficie de un objeto.

La termografía no ve a través del material, como los rayos X o el ultrasonido, la termografía solo ve sobre la superficie, la proyección térmica de lo que sucede en su interior.

# 2.2.1 Ventajas de las pruebas con termografía infrarroja

La termografía tiene varias ventajas en relación con otras tecnologías de ensayos no destructivos (END). Una ventaja es que la termografía es muy rápida, una imagen o una serie de imágenes se pueden capturar prácticamente al instante, con el equipo adecuado, áreas relativamente grandes también se pueden inspeccionar rápidamente. En segundo lugar, no hay necesidad de tocar el objeto que se está inspeccionando, permitiendo así una inspección in-situ rápida de grandes áreas o muchos objetos. La termografía también es ambientalmente benigna, la cámara térmica sólo recibe la energía radiante que sale de la superficie del objeto que se está inspeccionando.

# 2.2.2 Condiciones de las pruebas con termografía infrarroja.

Una condición de la termografía es que la inspección se debe hacer cuando el objeto está en una situación térmica que revelará la información deseada (transitorio térmico). En una imagen térmica de un objeto a la misma temperatura que su entorno es difícil de encontrar algo, si es que existe algo. Se debe esperar las condiciones que generen el contraste térmico o inducir una diferencia de temperatura en los objetos a fotografiar. Esto requiere el conocimiento de las propiedades térmicas del objeto y del ambiente circundante.

Se requiere observar el objeto a probar cuándo esté pasando por una transición térmica que provoque un cambio en la imagen térmica de la superficie. La termografía por infrarrojos funciona bien en objetos que son calentados o enfriados internamente (motores, cojinetes, edificios, animales y más), o en aquellos dispositivos que están pasando por una transición térmica normal. Al inspeccionar estos tipos de equipo, debemos tener el conocimiento adecuado del objeto, así como una comprensión de las causas de las discontinuidades térmicas internas.

Uno de los errores más comunes es adquirir una imagen térmica de un objeto en un momento en que las discontinuidades subsuperficiales no se revelan en la superficie. Si la imagen no muestra ninguna indicación, la mala interpretación es pensar que no hay ningún problema interno. La necesidad de adquirir todos los datos relevantes para cada imagen térmica capturada es crítica en el análisis de imágenes. La temperatura del aire ambiente, la velocidad del viento, la hora del día, el estado operativo del objeto y las influencias térmicas externas (como el sol o los equipos de calefacción y aire acondicionado) son sólo algunos de los puntos de datos que deben considerarse. Si el objeto a ensayar está en equilibrio térmico interno, no habrá indicación superficial de una discontinuidad subsuperficial. Si, por ejemplo, se pretende probar una estructura de sándwich (honeycomb y material compuesto) para detectar ingreso de agua, se debe probar la parte cuando el agua en la estructura es más fría que las celdas secas adyacentes, o sea justo después de aterrizar (Figura 2.4). Esto raramente es el caso cuando se prueban componentes estructurales (láminas de plástico reforzado con fibra de carbono). Este tipo de END térmico requiere termografía activa.



Figura 2.4 Termografía pasiva, detección de ingreso de agua (humedad) en estructura de un avión.

La termografía activa implica la inducción de algún tipo de estímulo térmico externo o interno para crear una situación térmica que revelará las discontinuidades subsuperficiales, si estas existen. Hay una amplia variedad de técnicas para inducir un gradiente térmico en una estructura.

# 2.3 TÉCNICAS DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA.

Hay una variedad de técnicas utilizadas para detectar discontinuidades subsuperficiales en estructuras con termografía infrarroja. La diferenciación entre las técnicas de ensayo se basa principalmente en la resistencia y duración de la indicación térmica (imagen termográfica). Estas técnicas pueden ser vagamente clasificadas como pasivas o activas. La técnica seleccionada depende de varios factores, incluyendo: las características térmicas de la pieza; los tipos, tamaños y orientación de la discontinuidad a detectar; la técnica de inducción de calor al componente; la sensibilidad y la resolución espacial de la óptica infrarroja; y las restricciones presupuestarias respecto al costo total del sistema.

# 2.3.1 Termografía infrarroja Pasiva.

En la termografía pasiva, la pieza o componente se inspecciona durante o después de un ciclo de funcionamiento térmico. Este ciclo térmico podría ser parte del proceso de fabricación o parte del funcionamiento normal de un componente aeroespacial. Cuando se utiliza la termografía pasiva, se debe estar en el lugar correcto en el momento adecuado (prueba de ingreso de agua en honeycomb tipo sándwich). Otro ejemplo de prueba pasiva es la fabricación de componentes que pasan por un proceso térmico tal como un curado en autoclave. Si una pieza es inspeccionada inmediatamente a medida que emerge del ciclo térmico, puede ser posible observar imágenes térmicas comparativas. En la industria automotriz, la unión de pegamento de materiales laminados y compuestos se ensaya comúnmente con sistemas de imágenes térmicas. La termografía pasiva proporciona oportunidades únicas para probar rápidamente grandes áreas de una estructura sin tener que poner el equipo fuera de servicio. Es más eficaz cuando se buscan fuertes indicaciones térmicas que tienen persistencia, como el agua o la entrada de otros fluidos. La termografía pasiva no siempre requiere costosos equipos de imagen térmica.

#### 2.3.2 Termografía infrarroja Activa.

La termografía activa requiere el calentamiento o enfriamiento controlado de la superficie del componente para crear un gradiente térmico en la pieza. El componente se monitorea continuamente con la cámara infrarroja a medida que pasa por el proceso de regreso al equilibrio térmico.

Para muchos tipos de materiales y componentes, las indicaciones superficiales se revelan pronto en este proceso, lo que permite un análisis muy rápido. La termografía activa proporciona un mayor control del ciclo térmico que en la técnica pasiva. Esto es crítico porque podemos controlar cuando comienza el ciclo térmico y ajustar la intensidad y duración del pulso térmico con las características térmicas del componente. Una indicación superficial persistente a menudo resultará de ensayar materiales de baja difusividad que tienen diferencias termo-físicas significativas entre el material huésped y la discontinuidad interna. Hay muchas formas de inducir la excitación térmica en estos materiales. Fuentes de calefacción como pistolas de aire caliente, lámparas de cuarzo, láseres, vibración, ultrasonido, mantas de calor y otras fuentes que pueden ser controlados.

La persistencia de la indicación depende de la difusividad térmica del material o capacidad para difundir el calor y de su espesor, por lo tanto en algunos materiales veremos indicaciones térmicas persistentes, incluso para identificarlas sobre la superficie, y en otros no lograremos verlas, por la rapidez del transitorio.

Con el fin de encontrar indicaciones térmicas sutiles, se requiere un mayor control del proceso. A medida que la técnica de excitación térmica es controlada y aplicada con mayor precisión (por ejemplo, un pulso de flash sub-milisegundo comparado con el calentamiento solar), la respuesta térmica del componente se vuelve más predecible. Esto hace posible desarrollar algoritmos que detecten desviaciones del comportamiento ideal. Como resultado, los modernos sistemas de termografía activa son capaces de detectar discontinuidades y características que no son visibles a simple vista usando calentamiento pasivo o simplemente visualizando la salida de la cámara infrarroja. La termografía pulsada es un ejemplo de termografía activa que permite tal control.

#### 2.3.2.1 Termografía infrarroja pulsada.

La termografía pulsada es un tipo de termografía activa que consiste en aplicar un pulso corto de calor sobre el objeto (de 3 msg. a 2 s. dependiendo del material) y grabar el enfriamiento del espécimen. El frente térmico aplicado se propaga en el material y cuando encuentra un defecto la velocidad de difusión (dQ/dt) se reduce produciendo un contraste de la temperatura sobre ese punto. De esta manera, el contraste de defectos más profundos (x) aparecerá más tarde y con menor diferencia de temperaturas, [1] (Figura 2.5). La termografía pulsada es usada, por ejemplo, en la inspección de componentes estructurales de aviones, control de calidad de soldadura por puntos, álabes de turbina, detección de desuniones, delaminaciones, grietas o corrosión [3].



En la secuencia de calentamiento (0.1 s - 1 s) y enfriamiento (1-1.7s) se observa como en 0.3 segundos solo aparecen 2 indicaciones y a 0.9 segundos se aprecian ya 6 indicaciones de delaminaciones.a diferente profundidad. Las más cercanas a la superficie aparecieron primero.



Figura 2.5 Contraste de defectos según su profundidad y tiempo de aparición.(1s, 1500W).

# 2.4 TEORÍA BÁSICA DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA

Cuando un objeto está en equilibrio térmico interno, no hay movimiento neto de calor en todo el volumen del material. Cuando un objeto es sometido a una excitación térmica (calentada o enfriada), el calor comienza a moverse a través de ella por conducción térmica.

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{\lambda}{x}S(T_1 - T_2) \qquad \text{ec. 1}$$

Donde:

dQ/dt =Calor transmitido por unidad de tiempo (W)

 $(T_1 - T_2)$ = Diferencia de temperatura entre superficie caliente y fría (K)

 $\lambda$  = conductividad térmica (W/(m K)).

x = Espesor del material (m)

S =Área de la superficie de conducción (m<sup>2</sup>)

Si un pulso de calor se aplica muy uniformemente sobre la superficie, el calor (dQ/dt)sólo tiene una dirección en la que moverse. Esa dirección es perpendicular a la superficie (S) y hacia el interior (espesor x) y la parte posterior del material. Si el objeto es de naturaleza homogénea (misma conductividad térmica  $\lambda$ ), el material debe enfriarse uniformemente después de que se aplique el pulso de calor a la superficie (-). Si no sucede así, entonces hay algo interno al objeto que interrumpe la conducción uniforme del calor a través del material, esto producirá un patrón térmico superficial sobre el área interna que está causando la interrupción. Si la discontinuidad retarda el movimiento del calor, como sería el caso de una discontinuidad aislante, entonces el punto sobre él parecerá más caliente que el área circundante. Se debe observar que el punto caliente no está calentando; sólo se está enfriando más lentamente que el área circundante. Del mismo modo, si la discontinuidad es más conductiva, o tiene una mayor capacidad térmica (dQ/dT = mc), el calor se moverá en la discontinuidad más rápido que el área circundante y crear un lugar más fresco en la superficie. Es la disparidad entre las propiedades térmicas del material huésped y la discontinuidad que causa la indicación de la superficie. Teniendo todas las variables iguales, cuanto mayor

sea esta disparidad térmica, mayor será la diferencia de temperatura superficial que se verá sobre el área causando la interrupción.

Un factor limitante en el uso de la termografía es que la conducción de calor se utiliza para sondear la estructura. La conducción de calor es un proceso de difusión, lo que significa que cuanto más profundo (x) el calor conduce o difunde en la estructura, más débil se vuelve. Esto se explica mejor con la ley del enfriamiento de Newton.

# 2.4.1 Conducción de calor y la ley del enfriamiento de Newton

Esta ley describe que la razón de pérdida de calor de un cuerpo es proporcional a la diferencia entre la temperatura del cuerpo y el medio ambiente que lo circunda.

Se dice que Newton realizó un pequeño experimento, donde utilizando un horno de carbón de una pequeña cocina, calentó al rojo vivo un bloque de hierro, al retirarlo lo colocó en un lugar a temperatura ambiente y observó cómo se enfriaba el bloque de metal en el tiempo. Sus conjeturas sobre el ritmo al cual se enfriaba el bloque dieron lugar a lo que hoy conocemos con el nombre de ley enfriamiento Newton.

$$\frac{dQ}{dt} = C_T S(T - T_a)$$
ec. 2

Esta ley establece que cuando la diferencia de temperaturas entre un cuerpo y su medio ambiente no es demasiado grande, el calor transferido en la unidad de tiempo (dQ/dt) hacia el cuerpo o desde el cuerpo (*S* superficie), ya sea por conducción, convección y radiación es aproximadamente proporcional ( $C_T$ ) a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el medio externo ( $T - T_a$ ), siempre y cuando el medio se mantenga constante.

De esta ley junto con la capacidad calorífica especifica del sistema (*calor específico* c), la cual se define como la cantidad de calor (dQ) que hay que suministrar a la unidad de masa (m) de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad (dT),

$$\frac{dQ}{dT.m} = c$$

Se obtiene una expresión que relaciona los parámetros que influyen en el enfriamiento de los materiales.

$$T = T_a + (T_0 - T_a)e^{-\frac{C_T S}{m.c}t}$$
 ec. 4

Donde se observa que la velocidad de enfriamiento es exponencial y su pendiente está en función de la *conductancia térmica* ( $C_T = \lambda/x$  conductividad térmica  $\lambda$ / espesor x), de la *superficie* (S), de la *masa* (*densidad* por *volumen*  $\rho V$ ) y el *calor específico* del cuerpo (c).

Esta fórmula se puede aplicar a láminas con delaminaciones simuladas, que han sido calentadas y se dejan enfriar a temperatura ambiente. Después de un tiempo (*t*) la diferencia de temperatura superficial de una delaminación ( $T_{fd}$  -  $T_a$ ) y una zona sana ( $T_{fs}$  -  $T_a$ ) será igual ( $T_{fd}$  -  $T_a$ =  $T_{fs}$  -  $T_a$ ) y muy cercana a la del ambiente  $T_a$ .

$$(T_{0d} - T_a)e^{-\frac{\alpha}{x_d^2}t} = (T_{0s} - T_a)e^{-\frac{\alpha}{x_s^2}t}$$
 ec. 5

Donde:

 $T_{0s}$  =Temperatura inicial de zona sana (°C)

 $T_{0d}$  =Temperatura inicial de zona delaminada (°C)

 $T_a$  = Temperatura ambiente (°C)

 $\alpha$  = Difusividad térmica (m<sup>2</sup>/s).

 $x_s$  = Espesor de una zona sana o espesor de la placa (m)

 $x_d$  = Espesor de una zona delaminada o profundidad de la delaminación determinada con UT (m)

t = Tiempo total de enfriamiento hasta conseguir  $T_{fd} - T_a = T_{fs} - T_a$  medido en (s).

De esta fórmula se observa que el espesor de la zona delaminada ( $x_d$ ) siempre será menor que el de una sana ( $x_s$ ) por lo que la temperatura inicial de una zona delaminada ( $T_{od}$ ) también siempre será mayor al de una sana ( $T_{os}$ ) (ANEXO C). El enfriamiento de una lámina está directamente relacionado con el espesor de la muestra. La difusividad térmica  $\alpha$  es un índice que expresa la velocidad de cambio, y flujo de temperaturas, en un material hasta que alcanza el equilibrio térmico. En otras palabras es un parámetro para averiguar la capacidad que tiene un material para difuminar la temperatura en su interior. Esta expresado por el valor obtenido de la conductividad térmica  $\kappa$  de un cierto material dividida entre el producto del valor de su densidad  $\rho$  y el calor específico *c* del mismo, su unidad es el  $m^2/s$  ( $\alpha = \lambda / \rho c$ .).

El espesor de la muestra tiene relevancia en función de la profundidad de detección que se desea, no hay que olvidar que la termografía sigue siendo una técnica superficial, las fallas internas detectadas son producto del comportamiento térmico interno que se ve reflejado en la superficie. Un espesor más delgado en la muestra, producto de una delaminación (o un barreno de fondo plano), aparecerá más caliente que el resto del material circundante de espesor más grueso, en esa misma muestra.

Al igual que los espesores la geometría tiene influencia en la interacción de la radiación infrarroja y su detección con la óptica de la cámara, la observación óptima es perpendicular a la superficie, si la superficie presenta curvatura, la perpendicular de la cámara no debe exceder de 30° de desviación para una correcta observación.

Una delaminación subsuperficial por el lado opuesto a la observación será muy difícil de detectar, por lo que en la medida de lo posible una inspección realizada por ambos lados se considera más completa.

# 2.4.2 Relación de aspecto de la discontinuidad

Existe una clara y distinta limitación a la detectabilidad basada en la relación entre la profundidad y el diámetro de una anomalía. Una gran discontinuidad cercana a la superficie suele crear una mayor diferencia de temperatura que una discontinuidad más profunda y menor. Se acepta generalmente que la relación diámetro / profundidad debe ser igual o mayor que uno [4].

# 2.5 VIABILIDAD DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA (TIR) COMO ENSAYO NO DESTRUCTIVO (END)

Al igual que con todas las metodologías de END, se debe realizar una evaluación de factibilidad para determinar si una técnica de END térmica será viable para identificar discontinuidades de material. Cuando el tipo, el tamaño, la profundidad, la orientación, la cantidad y otros aspectos de la discontinuidad se establecen, se puede comenzar a determinar si la termografía Infrarroja (TIR) es una posible metodología de inspección. A menudo, todos estos datos no están disponibles al principio del proceso, pero el trabajo de investigación y desarrollo de factibilidad normalmente puede comenzar con información sobre el tamaño y la profundidad de la discontinuidad. Existen varios enfoques para determinar la viabilidad de la termografía infrarroja. Estos pueden incluir el calentamiento de la superficie con una pistola de aire caliente y la inspección de la superficie para ver si aparecen patrones de superficie anormal, o hacer a alta definición, una alta tasa de captura de fotogramas utilizando termografía flash, junto con software de procesamiento de imágenes. La conclusión es que todos los ítems de las siguientes listas afectan la viabilidad de la termografía infrarroja [5]. Se debe estar consciente de estas influencias para determinar la capacidad del END térmico para detectar discontinuidades, así como la repetibilidad del proceso de prueba. La siguiente lista esboza estas importantes consideraciones.

#### Propiedades físicas y térmicas de la muestra

Material base

Proceso de manufactura

Emisividad espectral de superficie (<0.9 la emisividad es mejor en superficies opacas)

Absorción óptica superficial (mayor absorción mejor emisividad)

Transmisión térmica de la superficie

Difusividad térmica del material (capacidad o velocidad de un material para difundir o transmitir calor  $\alpha = \lambda / \rho c$ , conductividad térmica / capacitancia térmica)

Grosor de la muestra (espesores gruesos se dificulta su inspección)

Geometría de la muestra (útil durante la interpretación)

Acceso o no acceso a ambos lados

# Propiedades físicas y térmicas de la discontinuidad

Difusividad (se requiere que sea significativamente diferente a las del material base, entre menor sea, más aislante será y mejor indicaciones se obtendrán)

Profundidad (entre más cercana a la superficie mejor detección y viceversa)

Orientación (paralela a la superficie, entre mejor bloquee el flujo de calor, mejor detección)

Tamaño (entre más pequeño se dificulta su detección)

# Selección de imágenes térmicas

Distancia de trabajo (distancia desde el sensor al objeto)

Resolución espacial (densidad del detector en relación con la distancia del sensor al objeto)

Resolución térmica (diferencia de temperatura mínima de resolución)

Selección de la banda de ondas (cercana NIR, corta SWIR, media MWIR, larga LWIR, muy larga VLWIR) Figura 2.1

Rango térmico (captador de imágenes capaz de detectar las temperaturas del objeto inspeccionado)

Tasa de captura de imágenes (cuadros por segundo)

Óptica disponible (lentes 13 mm, 25 mm, 50 mm, 100 mm)

# Selección de Excitación Térmica

Pistola de aire caliente Luz (sol, lámparas incandescentes, de cuarzo o flash de xenón, o halógenas) Horno, autoclave Mantas térmicas Refrigeración Vibraciones inducidas mecánicamente Láseres

# Opciones de procesamiento de imágenes

Imagen nativa (RAW, mapa de bits)

Gráfica tiempo / temperatura, evaluación del contraste máximo, gráfica log / log Datos térmicos reconstruidos (datos de imagen temporales nativos convertidos a funciones matemáticas)

# **Condiciones ambientales**

Temperatura ambiente (muy alta vuelve más lento el enfriamiento y viceversa) Fuentes de contaminación térmica (objetos calientes en contacto con la muestra) Control de la convección espuria (corrientes de aire sobre la superficie) Fondo de alta temperatura (luces, calentadores, cafeteras)

# 2.6 CONSIDERACIONES EN PRUEBAS DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA A COMPUESTOS

El equipo de inspección por infrarrojos puede ser muy simple (una cámara de infrarrojos portátil y una pistola de calor) hasta muy complejo (un sistema totalmente controlado por computadora), lo que se requiere depende de la aplicación. Estas consideraciones incluyen:

- Propiedad de los defectos (difusividad, tamaño, profundidad),

- Capacidad de la cámara infrarroja (sensibilidad, ancho de banda, velocidad de fotogramas, etc.)

- Captura y almacenamiento de datos

- Precisión y repetibilidad.

- Algunos defectos detectables con termografía incluyen poros, inclusiones, grietas, delaminaciones y la presencia de líquidos.

Las aplicaciones potenciales incluyen la supervisión / control de los procesos de fabricación, el aseguramiento de la calidad de las piezas recién fabricadas y la inspección de ensambles para diversos tipos de daños. El menor tamaño observable de defecto está limitado por la distancia entre la cámara y la superficie de la pieza y por el campo visual instantáneo (IFOV) de la cámara.

# 2.6.1 Resolución espacial y distancia de medición (IMFOV).

Se deben tener en cuenta tres variables para determinar la distancia de medición apropiada y el tamaño máximo del objeto a medir que se puede visualizar o medir: el campo de visión (FOV), el objeto identificable más pequeño (IFOV) y el objeto medible a la zona de medición más pequeña (IMFOV).

El campo de visión (FOV) de la cámara termográfica describe el área visible con la misma. Este depende del objetivo utilizado (por ejemplo un gran angular de 32° de serie o un teleobjetivo de 9°).

Además, es necesario conocer la especificación del objeto identificable más pequeño (IFOV) de la cámara termográfica. Dicha especificación establece el tamaño de un píxel según la distancia (Figura 2.6).



Figura 2.6 Objeto identificable más pequeño (IFOV) y Objeto medible más pequeño (IMFOV)

Con una resolución espacial del objetivo de 1.3 mrad a una distancia de medición de 1 m, el objeto identificable más pequeño (IFOV) tiene un tamaño de 1.3 mm y se muestra en la pantalla como un píxel. Para medir correctamente, el objeto de medición debe ser 3 veces mayor que el objeto identificable más pequeño (IFOV), o sea para este caso deberíamos acercar la cámara a 33.3 cm (x) de la superficie para poder medir el objeto de 1.3 mm con la resolución requerida (IMFOV) (Figura 2.6).

Para conocer el IFOV en caso de que no se nos mencione, se puede calcular con el ángulo de visión horizontal entre el número de pixeles horizontal con la siguiente fórmula:

Ejemplo:

Resolución del sensor = 160(H) x 120(V) pixeles horizontales y verticales

 $FOV = 12^{\circ}(H) \times 9^{\circ}(V)$ 

IFOV= 0.0175 (12 %160pixel) =0.0013 rad=1.3 mrad

La siguiente fórmula se aplica como regla general para el objeto medible más pequeño (IMFOV):

IMFOV ≈ 3 \* IFOV = 3 (0.0013) = 0.0039 rad = 3.9 mrad

Un teleobjetivo permite obtener una buena resolución espacial, ya que sus ángulos son más cerrados (12°, 9°). Entre más pequeño el IMFOV tendremos mejor resolución para determinar nuestra medición logrando resolver puntos muy pequeños, pero también tendremos un campo de visión más estrecho.

#### 2.6.2 Sensibilidad térmica y tamaño del defecto.

La temperatura de contraste que aparece en la superficie cae exponencialmente con la profundidad del defecto (1 / [profundidad]<sup>3</sup>) y también puede verse afectada negativamente por el flujo de calor alrededor del área del defecto (defectos pequeños). Como regla general, el menor defecto observable en condiciones ideales es igual o mayor que su profundidad. Por lo tanto, un hueco de 6.35 mm (0.25 pulgadas) de

diámetro en un laminado compuesto generalmente no será observable a una profundidad mayor de 1/4 de pulgada.

En general, las temperaturas de contraste causadas por la presencia de defectos en los materiales compuestos son muy pequeñas. La mayoría de las cámaras IR están diseñadas para tener un rango de medición de unos pocos cientos de grados centígrados. Para la inspección de materiales, la temperatura de contraste no suele ser mayor de unas pocas décimas de grado, y a menudo es mucho menor, por lo tanto, las cámaras IR son comúnmente operadas cerca de sus límites de detección. Una amplia variedad de cámaras IR están disponibles hoy en día.

#### 2.6.3 Detectores infrarrojos.

Es muy importante evaluar la cámara IR ensayando una muestra representativa con defectos conocidos (estándar de defecto conocido) similares a lo que se necesita encontrar en la práctica. Las cámaras con detectores refrigerados son más sensibles y menos ruidosas que sus contrapartes no enfriadas, lo que generalmente resulta en una detección más fácil de discontinuidades subsuperficales. Las cámaras IR más recientes suelen tener detectores de arreglos de plano focal (FPA), mientras que las cámaras más antiguas tienen un único detector y un par de prismas girados mecánicamente para crear una imagen IR analizada.

#### 2.6.4 Bandas espectrales y velocidad de adquisición de datos.

Se dispone de diferentes rangos espectrales, aproximadamente 2-5  $\mu$ m (onda corta) y aproximadamente 7-14  $\mu$ m (onda media / onda larga). Muchas cámaras IR funcionan a una velocidad de fotogramas de 30 o 60 Hz, lo que suele ser suficiente para la inspección de conjuntos compuestos. Algunas cámaras IR son radiométricas (lo que significa que la radiación IR capturada por la cámara se traduce en una medición de temperatura). Las cámaras radiométricas a menudo no son necesarias, porque las pequeñas temperaturas de contraste debido a defectos subsuperficiales son a menudo difíciles de medir con precisión.
## 2.6.5 Almacenamiento de datos.

El almacenamiento de datos puede ser una imagen única que muestra un defecto en el tiempo de visualización óptimo, o puede ser una secuencia de imágenes que muestren el desarrollo y posterior desvanecimiento de la indicación de defecto.

# 2.6.6 Repetibilidad.

La repetibilidad de la inspección depende tanto del equipo como de la técnica utilizada. Por ejemplo, el calentamiento por convección con aire caliente o frío es difícil de aplicar con repetibilidad. La aplicación no uniforme de calefacción (o refrigeración) puede causar variaciones de temperatura localizadas que pueden ser malinterpretadas como localizaciones de defectos. La mejor repetibilidad se logra mediante la adquisición y almacenamiento automatizado de datos que se sincroniza con la aplicación del estímulo térmico.

# 2.6.7 Excitación térmica a compuestos en termografía infrarroja activa.

La termografía activa requiere el uso de estimulación externa para hacer que el calor fluya (por difusión) en una muestra bajo prueba. El calor puede ser introducido (1) colocando la muestra bajo prueba en contacto con un objeto a una temperatura diferente (conducción térmica), o (2) fluyendo aire o líquido a través de la muestra bajo la superficie de prueba (calentamiento por convección), o (3) exponiendo la muestra de prueba a una lámpara reflectora (halógena) o una lámpara de flash (calefacción por radiación).

El método por enfriamiento es igualmente efectivo, pero sólo está disponible la transferencia conductiva y convectiva. Otra forma de estimulación externa es la deformación mecánica cíclica de la muestra bajo prueba. Ejemplos son: (1) resonancia del cuerpo, o (2) resonancia local utilizando un transductor ultrasónico. En general, frecuencias cíclicas entre 5 y 30 hertz son comunes para materiales compuestos.

# 2.6.8 Excitación térmica por radiación infrarroja (sin contacto).

La energía radiante no requiere de ningún medio para transferir calor de la fuente a la superficie de la muestra bajo prueba. Las lámparas de calor (flash o lámparas reflectoras) se usan comúnmente en calefacción sin contacto. Adicionalmente, el calentamiento de aire forzado (o enfriamiento) se considera generalmente sin contacto (calentamiento por convección / enfriamiento).

Por lo general, es más fácil obtener un patrón de emisión térmica uniforme sobre un área relativamente grande usando calentamiento radiante. Los métodos de calentamiento radiante también son adecuados para las muestras sometidas a prueba que tienen forma irregular o superficie imperfecta. Los patrones de emisión de calor adquiridos por calentamiento radiante son generalmente más reproducibles y susceptibles de interpretación cuantitativa que los adquiridos por calentamiento convectivo.

# 2.7 LIMITACIONES E INTERFERENCIAS DURANTE LA PRUEBA DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA A COMPUESTOS.

La efectividad de las técnicas de inspección por termografía depende de muchos factores que se resumen en los siguientes párrafos.

Orientación de una imperfección o discontinuidad con respecto a la dirección principal del flujo de calor.

Profundidad de la imperfección o discontinuidad de la superficie vista y tamaño de la imperfección o discontinuidad en relación con su profundidad.

La reflexión de la energía radiante incidente en la superficie de la muestra de prueba (suponiendo que tenga una superficie reflectante) debido a la reflexión de la lámpara de calor o a los objetos calientes cercanos puede interferir con los intentos de interpretar el patrón de emisión de calor, aunque una diferencia es que las señales debidas a defectos son transitorias, mientras que las debidas a otras fuentes (objetos calientes cercanos) son a menudo constantes. Por lo tanto, ver los patrones térmicos en evolución a lo largo del tiempo normalmente proporciona información adicional importante.

# 2.8 CONSIDERACIONES DE GEOMETRÍA Y TAMAÑO EN LAS PRUEBAS DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA EN COMPUESTOS

Como la termografía sin contacto trabaja sobre la base de técnicas de campo óptico, puede aplicarse a la rápida observación de grandes superficies.

Para materiales muy delgados tales como laminados compuestos, se ha demostrado que la fidelidad de los patrones térmicos superficiales a las imperfecciones o discontinuidades interiores es buena. Para materiales compuestos más gruesos, los defectos más profundos aparecerán más grandes de lo que realmente son debido al flujo lateral del calor (los métodos de procesamiento de imagen están disponibles para compensar esto). Además, como las dimensiones de sección transversal del área de defecto se hacen comparables a la profundidad de defecto, el tamaño aparente será mayor que el tamaño de defecto real.

La capacidad de la cámara IR para detectar pequeñas temperaturas de contraste está en función del ángulo relativo entre la superficie de la muestra bajo ensayo y la cámara, con ángulos de visión directo se obtienen resultados óptimos. Se deben evitar ángulos de visión de más de 30 grados respecto a lo normal.

#### 2.9 SEGURIDAD Y PELIGROS EN PRUEBAS TÉRMICAS INFRARROJAS.

Los procedimientos termográficos involucran el uso de equipos calentados o energizados eléctricamente, por lo que no se permitirá el funcionamiento de pistolas de aire caliente, lámparas de flash, ni lámparas de combustión en ambientes ricos en combustible.

# 2.10 ESTÁNDARES FÍSICOS DE REFERENCIA PARA TERMOGRAFÍA INFRARROJA.

Siempre que sea posible, es conveniente disponer de un patrón de referencia fabricado que sea representativo de la muestra sometida a prueba. El estándar de referencia o detectabilidad debe contener áreas de imperfección o discontinuidad real o artificial que sean representativas de los requerimientos de detección de imperfección o discontinuidad requerida. Defectos típicos que se sabe que ocurren en la estructura de interés.

#### 2.10.1 Estándar de detectabilidad (Estándar de defecto conocido).

Un patrón de referencia con discontinuidades térmicas conocidas se utiliza para establecer los parámetros de funcionamiento de los aparatos y los límites de detección para una aplicación en particular, y para verificar periódicamente el funcionamiento correcto del aparato.

Al menos cinco defectos conocidos de un tipo particular deben ser incluidos en el estándar de referencia. Las fallas conocidas deben representar la gama de relaciones de aspecto de defectos previstos, y deben incluir el tamaño requerido de falla mínima detectable para una aplicación determinada, según lo determinado por la organización de ingeniería responsable, o algún criterio de aceptación/rechazo establecido.

Si diferentes tipos de defectos conocidos se van a utilizar, por lo menos cinco casos de cada tipo deben ser incluidos. Defectos conocidos se prepararán de forma que la separación de borde a borde de las fallas adyacentes es al menos un diámetro de la mayor falla de vecinos, deben estar dispuestos de manera que los bordes de cada defecto son por lo menos un diámetro desde el borde de la muestra de ensayo.

Si un estándar de ensayo que contiene defectos reales o simulados no está disponible, uno puede ser construido usando agujeros de fondo plano mecanizados en el lado posterior del panel.

### 2.10.2 Estándar de uniformidad.

La uniformidad de la distribución de luz del arreglo de lámparas halógenas se puede determinar con el estándar de referencia de zona sana. El espesor del estándar es el mismo que el de la zona a inspeccionar y de las mismas condiciones de fabricación. La superficie de la placa debe cubrir completamente el campo de visión del aparato. La superficie de exploración de la placa debe tener un acabado de alta emisividad uniforme (por ejemplo, pintura negro mate). En condiciones estáticas, la capa de pintura debe aparecer uniforme cuando se ve con una cámara de infrarrojos. En su defecto se puede ocupar una placa de aluminio de 3 mm.

# 2.11 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS.

## 2.11.1 Digitalización

La digitalización comienza con un sensor o detector que transforma la radiación infrarroja en una señal electrónica. El detector proporciona un voltaje proporcional a la radiación recibida. Los más comunes pueden clasificarse como pertenecientes a dos familias principales: detectores microbolométricos no enfriados y detectores enfriados utilizados para cámaras de alta sensibilidad. Estos detectores están basados en diferentes tecnologías, tales como InSb, InGaAs, PtSi, HgCdTe y GaAs / AlGaAs estratificados para detectores de fotones de infrarrojos cuánticos (QWIP. Existen dos tipos de cámaras de infrarrojos: un solo sensor y una matriz de plano focal (FPA). Para obtener mediciones bidimensionales, las cámaras de un solo sensor utilizan un espejo giratorio, y en cada barrido va formando la imagen por medio de líneas. El sensor mide la energía irradiada sobre la superficie de un objeto reflejado en el espejo.

El otro enfoque consiste en utilizar una matriz de detectores denominada matriz de plano focal. Cada detector proporciona información sobre la radiación en un punto. Una

imagen infrarroja se puede describir como una función f (x, y). El valor de amplitud de f en coordenadas espaciales (x, y) es un valor escalar positivo, que corresponde a la cantidad de energía irradiada desde una región de un plano. La función f es continua en el espacio y la amplitud. Por lo tanto, para convertir esta función a un formato digital, debe ser muestreada tanto en espacio como en amplitud.

La digitalización del espacio de la imagen se llama muestreo, mientras que la digitalización de la amplitud se llama cuantificación [6]. El muestreo se define por la resolución de la cámara infrarroja, es decir, el número de detectores del FPA. La resolución describe la cantidad de información que la cámara puede adquirir y está indicada por dos parámetros: M y N, generalmente de la forma M × N, el número de filas por el número de columnas. Los valores típicos varían en el rango de 120 × 140 - 1280 × 1024. La cuantificación está definida por el número de bits que se usan para representar un valor concreto de la radiación medida. Para llevar a cabo el proceso de cuantificación, es necesario que se determinen los niveles que la señal puede tomar. El intervalo de señal se divide entonces en ese número de niveles, y el valor continuo se asigna al nivel en el que se localiza. El valor típico es 14bits, es decir, 16,384 niveles o tonos de gris, para 8 bits son 256 tonos. La cuantificación también es afectada por la sensibilidad, es decir, la diferencia mínima de temperatura entre los puntos de referencia. Esto se expresa comúnmente como la diferencia de temperatura equivalente al ruido (NETD). Los valores típicos están alrededor de 20-50mK.

Un tercer aspecto de la digitalización es el muestreo temporal, es decir, el número de imágenes o cuadros por segundo que una cámara de infrarrojos puede adquirir. Las velocidades de fotogramas típicas son 30 Hz y 60 Hz para fotogramas completos. Sin embargo, utilizando ventanas, es decir, adquiriendo sólo desde una región de la trama, la velocidad de cuadros se puede aumentar significativamente, más de 30 kHz es algunas cámaras.

#### 2.11.2 Operaciones aritméticas en el procesamiento de imágenes.

Suma: p + q (por eje. en el promediado para la eliminación de ruido).

Resta: p – q (para la eliminación de información estática en la detección de movimiento). Multiplicación: αp (para aumentar los niveles de gris). División: p/α.

Las operaciones sobre una imagen a nivel de punto (por ejemplo, umbralización), a nivel local sobre una vecindad mediante las máscaras de convolución (por ejemplo, suavizado o detección de bordes), y las operaciones a nivel global que dependen de toda la imagen (por ejemplo, la transformada de Fourier o el histograma) [7].

#### 2.11.3 Filtrado en el procesamiento de imágenes.

Los filtros digitales constituyen uno de los principales modos de operar en el procesamiento de imágenes digitales. Pueden usarse para distintos fines, pero en todos los casos, el resultado sobre cada píxel depende de los píxeles de su entorno. Una imagen se puede filtrar en el dominio del espacio, trabajando directamente sobre los píxeles de la imagen, o en el dominio de la frecuencia, donde las operaciones se llevan a cabo en la transformada de Fourier de la imagen.

Distintos objetivos para el uso de filtros son:

- Suavizar la imagen, reducir las variaciones de intensidad entre píxeles vecinos.
- *Eliminar ruido*: modificar aquellos píxeles cuyo nivel de intensidad es muy diferente al de sus vecinos.
- *Realzar la imagen*: aumentar las variaciones de intensidad, ahí donde se producen.
- *Detectar bordes*: detectar aquellos píxeles donde se produce un cambio brusco en la función intensidad.

Los filtros se pueden clasificar en: filtros en el dominio del espacio y filtros en el dominio de la frecuencia. Dentro de los filtros en el dominio del espacio existe el filtrado Gaussiano.

El filtro Gaussiano simulan una distribución gaussiana bivariante (en x, en y). El valor máximo aparece en el pixel central y disminuye hacia los extremos tanto más rápido cuanto menor sea el parámetro de desviación típica  $\sigma$ . El resultado será un conjunto de valores entre 0 y 1.

$$G_{(x,y)} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{\frac{-x^2 + y^2}{2\sigma^2}}$$

La ventaja de este filtrado es que produce un suavizado más uniforme y no genera valores de grises que no estén en la imagen.

### 2.12 CONDICIONES AMBIENTALES EN LAS PRUEBAS TERMOGRÁFICAS.

#### 2.12.1 Temperatura ambiente.

En muchas aplicaciones, la temperatura reflejada corresponde a la temperatura ambiente. Siempre que haya una gran diferencia de temperatura entre el objeto a medir y la ambiente, es de vital importancia ajustar correctamente la emisividad.

Evite medir sobre pintura en mal estado (distorsión de la temperatura debido a bolsas de aire). Al medir en superficies lisas, tenga en cuenta cualquier posible fuente de radiación cercana (p.ej. el sol, radiadores, etc.).

#### 2.12.2 Fuentes de radiación (fondo de contaminación térmica).

Todo objeto con una temperatura superior al cero absoluto (0 Kelvin = -273 °C) emite radiación infrarroja. Aquellos objetos cuya temperatura sea muy diferente a la del objeto a medir pueden alterar la medición por infrarrojos a causa de su radiación. En la medida de lo posible, se deben evitar estas fuentes de interferencia. Incluso las lámparas deben estar encerradas en un reflector y cubiertas por una ventana ópticamente transparente que suprima la radiación IR en el rango de longitudes de onda de la cámara (por ejemplo, vidrio de borosilicato) siempre que sea posible.

Tenga también en cuenta el efecto de la radiación infrarroja emitida por usted mismo. Varíe su posición durante la medición para identificar reflexiones. Si cambia la perspectiva, la reflexión se moverá, mientras que las posibles discontinuidads térmicas del objeto permanecen inmóviles. Evite medir cerca de objetos muy fríos o calientes, o bien apantállelos. Si va trabajar en exteriores evite la luz directa del sol, mida a primera hora de la mañana o con el cielo nublado.

#### 2.12.3 Corrientes de aire (convección).

El viento y las corrientes de aire en interiores afectan a la medición de temperatura con la cámara termográfica. Como resultado del intercambio de calor (por convección), el aire cercano a la superficie tiene la misma temperatura que el objeto medido. Si hay corrientes de aire, esta capa desaparece sustituida por otra capa cuya temperatura todavía no se ha adaptado a la del objeto. Por medio de la convección, el objeto medido desprende o absorbe calor hasta que la temperatura de su superficie y la del aire se igualan. El efecto del intercambio de calor es mayor cuanto mayor es la diferencia entre la temperatura de la superficie del objeto a medir y la temperatura ambiente.

# 3. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

### ANTECEDENTES PREVIOS AL EXPERIMENTO.

El objetivo principal de la investigación fue conseguir una técnica rápida y no invasiva de inspección de discontinuidades en materiales compuestos. Por lo que se realizaron pruebas piloto con dos cámaras infrarrojas (una Thermacam P25 y una SC4000 MWIR de la marca FLIR), y una placa con delaminaciones.

El gradiente térmico se aplicó en la placa con una pistola de aire caliente por convección y observando con la cámara se detectaron las delaminaciones. Las delaminaciones eran muy grandes y evidentes, por lo que se pudieron observar con facilidad.

Durante estas pruebas se realizaron las siguientes observaciones:

1. La cantidad de calor aportado tenía relación directa con la observación de las delaminaciones, entre más calor mejor se observaban.

2. La falta de uniformidad durante el calentamiento de la superficie dificultaba la observación de las delaminaciones, sobre todo su extensión y forma.

Se decidió aplicar calor por medio de radiación, en vez de convección, para uniformizar la observación del patrón térmico superficial, por medio de una lámpara de luz UV de vapor de mercurio, este tipo de lámparas tienden a calentarse durante el uso, y al apagarse tarda en volver a encender.

Con el uso de luz la capacidad de detección mejoró, junto con la definición del área de daño de las delaminaciones, pero al permanecer encendida todo el tiempo calentaba demasiado la muestra dificultando con el tiempo la interpretación y detección.

Se decidió diseñar un arreglo de 20 lámparas halógenas MR16 comerciales de 50 W cada una, 5 líneas de 4 lámparas contiguas sobre una base aislante de madera, para

proporcionar un área uniforme de iluminación y se colocó un interruptor con temporizador para tener control del tiempo de aplicación del pulso de luz. Este tipo de lámparas tienden también a calentarse pero se pueden apagar y prender al instante sin necesidad de esperar como con las de vapor de mercurio.

La placa contenía delaminaciones muy grandes y de fácil detección relativamente hablando, por lo tanto se decidió fabricar una muestra con delaminaciones simuladas de distintos tamaños y colocadas a distintas profundidades dentro de la placa por medio de insertos de teflón. Estos insertos harían las veces de pequeñas laminaciones cuadradas, esto para determinar la sensibilidad de la técnica.

Durante el ensayo de esta nueva placa no se lograron detectar las indicaciones, se ensayó también con un equipo de interferometría laser por un instructor calificado, sin resultados de detección, esto se debe a que el teflón tiene propiedades térmicas similares al material base (fibra de carbono), siendo esta una condición de detección: que el material huésped y el defecto tengan distintas características térmicas.

Se consiguió una lámina de fuselaje hecha con especificaciones aeronáuticas reales para un avión de fibra de carbono, se verifico su sanidad con UT, y en la cara posterior se practicaron varios barrenos de fondo plano a distintas profundidades, los cuales simularían delaminaciones a distintas profundidades.

La cámara P25 solo detectó las más cercanas a la superficie, y la SC4000 detectó todas. El problema era que a veces las lograba detectar todas y otras no, según como se ajustaran la cámara, las lámparas, el tiempo del pulso de luz, la distancia, etc.

Estas observaciones, me motivaron a investigar los parámetros que influyen en la sensibilidad de detección de delaminaciones por termografía infrarroja, con la finalidad de establecer un procedimiento de inspección rápido y no invasivo.

# 3.1 PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN DE DELAMINACIONES EN LÁMINAS DE FIBRA DE CARBONO POR IMÁGENES INFRARROJAS

#### 3.1.1 Alcance.

Este procedimiento describe una metodología para detectar delaminaciones de hasta 1 mm de profundidad en láminas de fibra de carbono utilizando termografía activa, donde por medio de una cámara de infrarrojos (IR) detectamos comportamientos anómalos durante el enfriamiento de una superficie de una muestra después de haber sido calentada por un pulso de luz espacialmente uniforme de unos segundos con un arreglo de lámparas halógenas.

Este procedimiento de inspección no es invasivo, por lo que puede utilizarse para detectar delaminaciones en paneles nuevos o en servicio, sin el peligro de alterar o dañar la muestra.

Este procedimiento fue específico para materiales laminados de fibra de carbono aunque su uso se puede extender a otros materiales poliméricos laminados, por medio de una recalificación con muestras de estándar de defecto conocido (estándar de detectabilidad).

Este procedimiento utilizó las imágenes adquiridas por el sensor infrarrojo de la cámara en formato nativo por lo que la cámara no realizó cálculos de medición de temperatura, únicamente mostró una secuencia de imágenes infrarrojas en 8 bit para su análisis.

Este procedimiento se limitó únicamente a la detección de delaminaciones, no determinó profundidad o tamaño de las mismas.

En este procedimiento no se especificaron criterios de aceptación / rechazo, fue utilizado únicamente para inspección.

A pesar de ser una prueba sin ningún riesgo, durante jornadas prolongadas, se contemplaron algunos requisitos de seguridad e higiene durante la prueba, para evitar accidentes o lesiones.

#### 3.1.2 Resumen de la técnica.

En la termografía activa, después de calentar una muestra con luz, por unos segundos, la superficie de esta se enfría en forma gradual y homogénea. Una discontinuidad (por ejemplo una delaminación, un vacio o una inclusión) presenta un patrón térmico distinto de radiación en su superficie durante el enfriamiento. Esta pequeña diferencia térmica entre la discontinuidad y la zona sana adyacente circundante es detectada por la cámara de infrarrojos.

Refiriéndonos únicamente a la muestra, la detectabilidad propia de un defecto dependerá de su tamaño, profundidad y grado en que sus propiedades térmicas difieran de las del material huésped circundante. Para una combinación falla-huésped dado, la detectabilidad está en función de *la relación de aspecto* de la falla. El tamaño mínimo de defecto detectable aumenta con la profundidad del defecto. La detectabilidad es más alta para las fallas más grandes que están más cerca de la superficie de la muestra y que tienen propiedades térmicas significativamente diferentes a las del material huésped (matriz).

Refiriéndonos únicamente a la imagen, los parámetros operacionales que afectan a la detectabilidad incluyen la emisividad superficial y la reflectividad óptica, el período de adquisición de datos, la energía de la lámpara, la longitud de onda de la cámara, la velocidad de fotogramas, la sensibilidad, la óptica y la resolución espacial.

Este procedimiento describe la inspección por un solo lado, la colocación del arreglo de lámparas (fuente de excitación) y la cámara de infrarrojos (detector) están ubicados en el mismo lado (inspección) del componente o material bajo examen.

Durante la inspección, el programa FIJI de procesamiento de imágenes se utilizó para

mejorar la detectabilidad de los defectos que no son detectables en la imágen original (imagen nativa) de la cámara IR, y para ayudar en la interpretación y caracterización de las indicaciones.

#### 3.1.3 Aplicación

Comúnmente la termografía activa se usa para detectar defectos que se producen en la fabricación de estructuras de materiales compuestos, o para rastrear el desarrollo de fallas durante el servicio. Los defectos detectados incluyen delaminación, falta de adherencia (disbonds), huecos, inclusiones, restos de objetos extraños, porosidad o la presencia de agua que está en contacto con la superficie posterior. Con un procesamiento de imágenes adecuado y el uso de muestras de ensayo representativas (placas de defecto conocido para calibración), la caracterización del tamaño y profundidad del defecto, o la medición del espesor del componente, así como su difusividad térmica también se podrían realizar.

Dado que la termografía activa se basa en la difusión de la energía térmica de la superficie de inspección de la muestra a la superficie opuesta (o el plano de profundidad de interés), la práctica requiere que la adquisición de datos permita un tiempo suficiente para que este proceso ocurra, y que al terminar el proceso de adquisición, la señal de temperatura de la superficie radiada recogida por la cámara IR sea lo suficientemente fuerte como para distinguirse de las indicaciones de IR no esenciales procedentes de fuentes de fondo o de ruido del sistema.

Este método se basa en la detección exacta de cambios en la energía IR emitida que emanan de la superficie de inspección durante el proceso de enfriamiento. A medida que la emisividad de la superficie de inspección se desvía del comportamiento de cuerpo negro ideal (emisividad = 1), la señal detectada por la cámara de infrarrojos puede incluir componentes que se reflejan desde la superficie de inspección. La mayoría de los materiales compuestos pueden ser examinados sin una preparación especial de la superficie. Sin embargo, puede ser necesario cubrir la baja emisividad de

una superficie de inspección translucida ópticamente, con una opticamente opaca, capa de pintura lavable con agua de alta emisividad.

Esta práctica se aplicó a la detección de defectos con relación de aspecto mayor que uno.

Esta práctica se basó en la respuesta térmica de una muestra a un pulso de luz que se distribuye uniformemente sobre el plano de la superficie de inspección. Para asegurarse de que el calor fluye de la superficie al interior de la muestra, el principal mecanismo de refrigeración durante el período de adquisición de datos, es que las dimensiones de largo y ancho de la zona calentada deben ser significativamente mayor que el espesor de la muestra, o profundidad del plano de interés.

Esta práctica se aplicó solo a paneles planos, pero si se quisiera realizar a paneles curvos, la superficie normal local debería ser menor de 30 grados desde el eje óptico de la cámara de infrarrojos.

# 3.1.4 Equipo y Materiales

Cámara de infrarrojos (IR)- La cámara fue capaz de monitorear ininterrumpidamente la superficie de la muestra en toda la duración de la adquisición. La cámara tiene una salida digital ETHERNET en tiempo real de la señal adquirida. La longitud de onda de la cámara está en el rango de 2-5 micrones. La óptica y plano focal fue suficiente para que la proyección de nueve píxeles contiguos en el plano de la muestra fuera menor que o igual a la superficie mínima del defecto que se quiere detectar, se colocó a 350 mm de la muestra, para detectar hasta 3.8 mm Ø de defecto, su campo de visión instantáneo es de 1.2 mrad, 320 x 256 pixeles y una óptica de 25 mm.

Arreglo de las lámparas de luz halógena: Un arreglo espaciado uniformemente se empleó para proporcionar una iluminación uniforme a la superficie de la muestra. Se utilizó un reflector de 500 W y se construyó un arreglo de 1000 W con 20 lámparas halógenas (5 X 4) MR16 de 50 W. El tiempo del pulso de luz fue de 2, 10 y 30 segundos

a la potencia de 500 W, 1000 W y 1500 W, con una distancia de las lámparas de 35 cm al plano de inspección. El arreglo fue colocado para evitar un camino directo de la energía del flash a la abertura del lente de la cámara de infrarrojos, para evitar reflejos. Es buena práctica que el arreglo de la lámpara este rodeado por una cubierta de protección para evitar que los trabajadores en la zona de inspección queden expuestos directamente al brillo, o alternativamente, el aparato debe ser operado en un área con particiones y advertencias de seguridad adecuadas para evitar la exposición involuntaria, en este caso no fue posible.

Sistema de Adquisición - El sistema de adquisición incluyó la cámara de infrarrojos, las lámparas de halógeno y un equipo de cómputo interconectado con la cámara (Figura 3.1). El sistema permitió que los datos fueran adquiridos antes, durante y después de que el pulso de luz se produjo.



Figura 3.1 Equipo de inspección y estándares de referencia.

Software de Análisis - El software permitió adquirir secuencias para ser archivadas y recuperadas para su evaluación, y permitió la visualización en tiempo real de la señal de la cámara de infrarrojos, así como la visualización cuadro-por-cuadro de secuencias que fueron archivadas previamente. Operaciones adicionales de procesamiento de imágenes (por ejemplo, de promedio, resta disparo previo de imagen, reducción de

ruido, ploteo de perfil, suavizado de imagen, ploteo en 3D superficial) se pueden realizar para mejorar la detectabilidad de las discontinuidades subsuperficiales (Figura 3.2).







Figura 3.2 Software de Análisis FIJI.

#### 3.1.5 Estándares de Referencia.

*El estándar de detectabilidad* para este procedimiento incluyó una placa con 3 defectos conocidos o barrenos de fondo plano posteriores a distintas profundidades (0.3 mm, 0.6 mm, 1.0 mm) simulando delaminaciones, un barreno pasado para determinar el tamaño por pixel del campo de vista (para medir longitud) y una zona sana contigua donde se verificó la uniformidad del disparo de luz (Figura 3.3).



Barreno de enfoque y medición de tamaño por pixel

Figura 3.3 Estándar de detectabilidad.

*Estándar de validación*. También se contó con probetas con delaminaciones reales inducidas por golpes a distintas magnitudes (15, 20 y 30 J) para evaluar el daño en placas de fibra de carbono de 2 mm de espesor con tramado bidireccional, que se utilizaron para validar el sistema (Figura 3.1).

# 3.1.6 Ajustes

Calibración. La cámara de IR se encontraba calibrada y con mantenimiento a intervalos regulares, siguiendo el procedimiento recomendado por el fabricante.

Se calibró las dimensiones de un campo de un solo píxel de vista en el plano de la muestra mediante la colocación de un objeto de dimensiones conocidas (barreno

pasado del estándar de detectabilidad) en el campo de vista en el plano de la muestra, y determinar el número de píxeles que abarcan todo el objeto en la dirección horizontal o vertical.

#### Tamaño por píxel del campo de vista = longitud del objeto /número de píxeles

Estandarización (recalificación del procedimiento). Los parámetros de operación para la inspección variarán con el espesor, características de la superficie y la composición del componente sometido a prueba, así como la geometría y las características termofísicas de un defecto rechazable, tal como lo determina el criterio de evaluación (o el departamento de ingeniería responsable). La estandarización debe realizarse previo al examen de un componente o material, en un estándar de referencia de detectabilidad (ver 3.1 y 3.3) que es representativo de la estructura a ser examinada, para establecer los parámetros de funcionamiento adecuados.

Se adquirió una secuencia de datos para el estándar de referencia utilizando el procedimiento normal de inspección, comenzando con un pulso de luz de 1000 w durante 10 segundos a una distancia de la superficie de 35 cm, verificando que no existieran reflejos de la propia lámpara en la imagen.

Usando el software de análisis, se observó la secuencia de imágenes seleccionando las correspondientes al primer segundo después del disparo de luz se observaron las indicaciones más profundas en alguna de estas imágenes, el software utilizado fue FIJI de ImageJ.

Se observó la secuencia de imágenes e identificó cada indicación que corresponde a un defecto conocido en el estándar de referencia de detectabilidad. La relación de aspecto más pequeño detectado debe corresponder a la relación de aspecto mínima de falla detectable (para el tipo de material y falla) en el estándar de prueba. La indicación más profunda en el estándar fue detectada. El método usado para detectar el defecto mínimo detectable fue por contraste.

Se comprobó la uniformidad del arreglo de lámparas utilizando el patrón de referencia de uniformidad del estándar de detectabilidad (zona libre, sin fallas) y el software de análisis (FIJI, Analyze, 3D Surface plot, zona plana sin declives, ni crestas, ni valles).

Se adquirió un segundo de secuencia de datos para el patrón de referencia de uniformidad mediante el procedimiento normal de inspección (véase la sección 3.1.7).

Se usó el software de análisis, para graficar la temperatura (o radiación) a lo largo de las líneas horizontales y verticales en la superficie de inspección a los 50 milisegundos después de la calefacción por radiación de luz. La variación de la señal fue inferior al 15% del valor medio.

En el software FIJI abrimos la imagen, y con la función Analyze, seleccionamos del submenú 3D Surface plot, para representar nuestra imagen en un plano en relieve 3D. El relieve fue plano sin picos ni valles o declives abruptos. Esto significa que nuestra iluminación fue uniforme.

En caso contrario, ajuste la posición o las amplitudes de la lámpara individuales para corregir una excesiva falta de uniformidad.

#### 3.1.7 Procedimiento

Se apoyó el aparato de manera que la superficie de inspección quedó en el campo de visión de la cámara de IR y del arreglo de lámparas. La muestra fue colocada para minimizar la conducción térmica con el aparato de montaje.

Se enfocó la cámara IR con el barreno pasado del estándar de detección, se ajustó la lente de la cámara hasta que los bordes del agujero aparecieron claramente.

La superficie de inspección estuvo limpia y libre de suciedad o grasa. Indicaciones o marcas visuales obvias se tuvieron también en cuenta.

Comenzar la adquisición de datos y la grabación con la cámara de infrarrojos a 100 fps, puerto Ethernet con la dirección IP 169.254.99.254 en el programa Pleora Technologies Inc. Coyote iPORT 3.3.3 (build 1743) de GigE Vision® la Image seleccionada de 320 X 240 mapa de bit; pixel /grayscale 8-bit. Esperamos 2 minutos para poder visualizar la imagen, ya que la cámara requiere enfriar el sensor para poder ver.

La secuencia de datos contuvo al menos un cuadro adquirido antes de encender las lámparas, y 100 imágenes adquiridas después que se apagó (enfriamiento). El periodo de adquisición de datos fue de 10 segundos después que se apagaron las lámparas.

Se activó el arreglo de las lámparas halógenas (500 W, 1000 W y 1500 W según el DOE). Se calentó la superficie por radiación de luz durante unos segundos (2, 10 y 30 segundos respectivamente según el DOE. Un segundo antes de apagar las lámparas comenzó la adquisición de datos.

Terminó la adquisición de datos de la cámara de infrarrojos después de un tiempo de exposición (Texp) según el Diseño de Experimentos (DOE). Con periodos de enfriamiento entre disparos para permitir regresar a la temperatura inicial de 26°C.

#### 3.1.8 Interpretación de los resultados

La secuencia de imágenes en mapa de bits se revisó como una secuencia de imágenes, tal que todo el volumen de interés del material de ensayo fue investigado.

# 3.1.8.1 Análisis de la secuencia.

El análisis de la secuencia capturada en mapa de bits se basó en la identificación visual del contraste entre las indicaciones de defectos y las áreas intactas en el campo de visión. Este análisis es apropiado para la detección de defectos discretos que son más pequeños que el campo de vista (FOV) de la inspección, pero más grande que el tamaño mínimo de defecto detectable.

En la secuencia de datos, defectos subsuperficiales que obstruyen el flujo de calor (por ejemplo, huecos o delaminaciones) tendrán valores de temperatura (o radiación IR) más alta que en las zonas de las inmediaciones intactas.

Análisis de Contraste. Fallas discretas aparecieron durante la secuencia, teniendo una mayor, y luego una menor amplitud que las regiones libres de fallas en el campo de visión.

Análisis numérico. Fallas tanto discretas como extendidas tuvieron valores numéricos (3.1.10.2 contraste C) que fueron sustancialmente distintos a los valores obtenidos para las zonas libres de falla en el estándar de referencia.

# 3.1.8.2 Cuantificación de valores para el Análisis numérico.

Fue necesario definir cuantitativamente la capacidad de la técnica para distinguir delaminaciones a distintas profundidades. Las imágenes o fotogramas por segundo que se recolectaron del experimento fueron grabado en formato mapa de bits en escala de grises, esta escala ocupa 8 bit para generar los 256 tonos de gris con que cuenta una imagen. Un bit tiene 2 valores 0 y 1 para representar tonos, 8 bits =  $2^8$  = 256 tonos para formar la imagen.

En 8 bits, el cero representa el color negro y así toda la tonalidad de grises hasta llegar al color blanco 256, esta escala fue designada como Intensidad y se graficó en el eje Y de casi todas las tablas.

Los puntos de interés (datos) de la imagen se describen a lo largo de una línea trasversal que comienza en un extremo sano atraviesa toda la delaminación y termina al otro extremo sano. A una longitud de la mitad del diámetro antes de la delaminación y medio diámetro después, 10 mm para este caso.

Los valores a lo largo de la línea fueron listados en una hoja de cálculo, donde el primer y último cuarto del listado de valores se promedió como zona sana (I<sub>prom*Sana*</sub>) (extremos) y el segundo y tercer cuarto como delaminación (I<sub>prom*falla*</sub>)(centro).

Al restar estos dos valores se obtuvo el *Contraste* ( $C = I_{prom falla} - I_{prom Sana}$ ), el contraste fue el valor que ocupamos para el DOE (ver ANEXO B).

### 3.1.8.3 Procesamiento de imágenes

**Ploteo de Superficie 3D en FIJI**. Abrir archivo, seleccionar la imagen que queremos analizar, vamos a la función Analyze y seleccionamos del submenú 3D Surface plot, para representar nuestra imagen en un plano en relieve 3D.

**Suavizado de imagen en FIJI**. En el menú seleccionamos Process, en submenú Filters, y después seleccionamos Gaussian Blur y obtendremos un suavizado de la imagen que mejora la sensibilidad de detección reduciendo el ruido producido por el entramado del tejido de la fibra de carbono.

**Sustracción de imagen en FIJI**. Abrir dos imágenes, seleccionar Process, en submenú image calculator se despliega una ventana y seleccionamos las imágenes a restar con substract. Esta operación es utilizada para distinguir cambios entre imágenes, mejora la detección al ajustar el contraste.

**Mejorar Contraste de imagen en FIJI**. Abrir la imagen seleccionar Image, seleccionar Adjust, y después Brightness/contrast se abrirá una ventana donde se ajustan los diferentes parámetros de contraste.

**Gráfico Análisis log**. Las indicaciones pueden ser evaluadas mediante la visualización del gráfico logarítmico de temperatura-tiempo (intensidad-tiempo) para los puntos que sean representativos de la indicación. Un defecto se distingue si el gráfico de registro es sustancialmente diferente a la zona libre de defecto en el estándar de referencia.

#### 3.1.8.4 Tamaño de Falla.

Las dimensiones laterales de un defecto discreto pueden ser determinadas por la medición del ancho completo en la imagen a media amplitud máxima, a lo largo de un segmento de línea que divide en dos el defecto (o trazando los ejes mayor y menor de un rectángulo equivalente), como se muestra en la Figura. 3.4. El tamaño de píxeles del campo de vista, (ver 3.1.6) puede ser usado para convertir las dimensiones de defectos medidos en píxeles, a unidades físicas apropiadas. Usando FIJI trazar una línea en una dimensión conocida, en este caso nuestro barreno de 5 mm y después establecer una escala con Analyze, y el submenú set scale, colocar nuestro valor conocido de 5.5 y nuestra unidad mm. Ahora nuestra escala esta lista y cualquier línea nueva que tracemos podremos medirla con Analyze / Measure.



Figura 3.4 Ploteo de perfil para determinar el tamaño de la indicación.

La ubicación, el tamaño y la naturaleza de las indicaciones detectadas en cualquiera

imagen de las secuencias de datos nativos o de mapa de bits deben ser registrados e informados.

En los casos donde se detectó una indicación, la superficie de inspección, se examinó visualmente para determinar si la indicación es superficial, debida a la suciedad o marcas en la superficie.

# 3.1.9 Informe

Para garantizar la validez de la prueba, incluyendo la reproducibilidad y la repetibilidad, información esencial como: el método de prueba, la geometría de la muestra, la condición y la preparación, el equipo de prueba, la óptica, la velocidad de fotogramas de la cámara y el periodo de integración, la energía de destello de la lámpara, distancia de trabajo entre el aparato y la muestra, y el procesamiento de datos fueron registrados de la siguiente manera.

# De la imagen infrarroja

- Distancia de trabajo (de la cámara al objeto) = 35 cm
- Resolución espacial (Densidad de detección relativa a la distancia de la cámara con el objeto) = 1.2 mrad
- Resolución térmica (Diferencia mínima de temperatura posible de detectar) = 18
  mK
- Rango térmico = **3-5 μm**
- Adquisición de imagen = **100 fps** en mapa de bits

# De la excitación térmica (Pulso de Luz Halógena)

- Distancia (de la fuente al objeto) = 35 cm (se evitó ángulos de reflejo con la cámara)
- Energía = 500 W, 1000 W y 1500 W

- Duración = 2, 10 y 30 segundos
- Rango de detección = hasta 1 mm de profundidad
- Tamaño mínimo de detección = **3.8 mm \phi** a 350 mm de distancia

## De la probeta o muestra

- Material = Placa de fibra de carbono tejido bidireccional 90°
- Espesor = 2 mm
- Indicaciones = 5 con espesores de 0.3, 0.4, 0.6, 1.0, 1.1 mm
- Cuando se quiera inspeccionar otro material, o se quiera alcanzar más profundidad (espesor) se deberá construir otra probeta y realizar nuevo experimento.

# Del hardware y software

- Lap top 8 Gig RAM core i5 o superior
- Adquisición = 100 fps, puerto Ethernet IP 169.254.99.254 (Pleora Technologies Inc. Coyote iPORT 3.3.3 (build 1743) GigE Vision® ) Image /320X240; pixel /grayscale 8-bit
- Cámara = FLIR SC4000 MWIR InSb
- Reflector halógeno 500 W y 1000 W (20 MR16 de 50W)
- FIJI Is Just ImageJ Software

# 4. RESULTADOS.

# 4.1 EXPERIMENTO.

Siguiendo la metodología descrita en el procedimiento de inspección se realizaron ensayos para el diseño de experimentos de 3 variables, con 3 niveles (3<sup>3</sup>). Fueron varias secuencias de excitación térmica o calor aportado, tres niveles de potencia, con tres tiempos de exposición cada nivel, para detectar tres profundidades.

### Las variables estudiadas fueron:

Excitación térmica o *potencia* de lámparas con tres niveles: 500 W, 1000 W y 1500 W. Duración de la excitación térmica o duración del pulso de luz con tres niveles: 2, 10 y 30 segundos.

Profundidad de la delaminación en tres niveles: 0.3, 0.6 y 1 mm

El objetivo del experimento fue analizar la influencia que tienen estas variables en la detección de las delaminaciones en placas planas de fibra de carbono.

Se obtuvieron secuencias de imágenes antes, durante y después del pulso de excitación, pero únicamente después del pulso (enfriamiento) se obtuvieron datos para el análisis.

El valor a analizar para determinar la influencia de las variables en la detectabilidad fue el *contraste* (4.1.1).

# 4.1.1 Cuantificación del contraste C para el análisis del diseño de experimentos (DOE).

El valor del *contraste C* se obtuvo de la resta de los promedios de intensidad en la escala de grises (0 a 256) de una imagen de 8 bits, de una zona delaminada menos el valor promedio de una zona sana.  $C = I_{prom f} - I_{prom S}$ 

Los promedios de intensidad se obtuvieron de una lista de valores de una línea transversal que corta en dos a la indicación (delaminación) y se extiende hacia los lados una longitud igual a la indicación (mitad a cada lado). Se promedió la zona sana (zona oscura) y se obtuvo un valor. Lo mismo se hizo para la zona con delaminación (zona clara) (Ver Anexo B).

**Valores de Intensidad**. Los valores de intensidad al igual que el contraste van desde 0 a 256, donde 0 representa el color negro en la escala, hasta el 256 el color blanco, los demás valores intermedios son la escala gradual de grises.

Valor de C en el DOE. El *contraste* como valor de análisis fue necesario para establecer la respuesta de cada una de las combinaciones del diseño de experimentos y establecer la influencia en la detectabilidad de cada variable por separado y en su conjunto.

Las imágenes se observaron visualmente para localizar las delaminaciones (indicaciones más claras) y se seleccionaron las que ofrecían mejor contraste para el análisis (zonas más claras en fondos más oscuros). Las observaciones fueron las siguientes.

#### 4.2 OBSERVACIONES.

Las observaciones se dividieron en dos secciones: 1. Detección visual directa por contraste máximo y 2. Resultados del diseño de experimentos (DOE). En la primera sección se seleccionaron las imágenes con mejor contraste observado (indicación vs fondo) de cada una de las 9 secuencias tomadas. En esta parte el contraste es cualitativo.

#### 4.2.1 Detección visual directa por contraste máximo.

Durante la inspección, las zonas más delgadas (delaminaciones, indicaciones) se calentaron más rápido que las zonas más gruesas, estas se aprecian en color más claro (blanco) que las zonas sanas (oscuras) ver Figura 4.1.



Figura 4.1. Imágenes utilizadas para el diseño de experimentos de tres variables (potencia lámparas W, tiempo de exposición s, profundidad delaminación mm) y tres niveles. Se distinguen mejor (mejor contraste) las indicaciones blancas en fondo oscuro, esto depende del calor aportado a la muestra y la profundidad de la indicación. Más profundas menos contraste.

La intensidad (tono en gris) fue distinta en cada indicación (es diferente para cada profundidad).

Durante el calentamiento aparecieron antes las indicaciones más próximas a la superficie (menor espesor, profundidad) y al final las más profundas.

Las imágenes con mejor contraste de cada secuencia se encontraron durante el primer segundo de enfriamiento, y fueron las que se usaron para el análisis (Figura 4.1).

Se observó que a mayor potencia (W) las indicaciones se ven más claras (tono escala de grises), la mayor diferencia fue al comparar 500 W y 1000 W, luego la diferencia se apreció un poco menos entre 1000 W y 1500 W.

También se observó que a mayor tiempo de exposición y/o mayor potencia del pulso de luz (calor aportado) las indicaciones se notaban más claras, pero también se observó una saturación de calor en la muestra con 1000 y 1500 W a los 30 segundos y el patrón uniforme se perdió, provocando una imagen confusa y difícil de leer.

# 4.2.2 Resultados del Diseño de experimentos.

En la segunda sección se cuantificó el contraste C en un valor, para ingresarlo al DOE (Minitab) y analizarlo. Los resultados se presentaron en dos gráficas: Efectos principales para C (contraste) e Interacción para C (contraste). En la primera gráfica se observan los efectos principales de las variables en el contraste (detectabilidad). En la segunda gráfica se presenta la interacción de las variables entre si y su influencia en el contraste (detectabilidad). Los valores ingresados al DOE fueron los siguientes:

Potencia	500			1000			1500		
T <sub>exp</sub>	2	10	30	2	10	30	2	10	30
0.3 mm (3)	10	12	18	42	62	61	25	38	89
0.6 mm (2)	5	7	11	15	28	39	15	28	49
1.0 mm (6)	2	5	7	8	19	28	9	18	36

Tabla 4.1 Valores del contraste C para el DOE.

# 4.2.2.1 Gráfica de efectos principales para C.

Los resultados que nos arrojó el diseño de experimentos que pudimos leer en la gráfica de efectos principales para C (detectabilidad, en este caso representada por el contraste C) fueron:



Figura 4.2 Gráfica de efectos principales para C.

# Potencia.

La *potencia* (W) de las lámparas tuvo un aumento significativo en el contraste sobre todo de 500 a 1000 W, se observa también algo curioso que de 1000 a 1500 W el aumento es muy ligero. En general, del análisis de esta gráfica se deduce que a mayor potencia mejor contraste.

# Profundidad.

La *profundidad* tiene una disminución en el contraste al aumentar la profundidad de la indicación, a mayor profundidad menor contraste.

# Tiempo de exposición Texp.

El *contraste* aumenta al aumentar el tiempo de exposición, mayor tiempo de exposición mejor contraste.

# 4.2.2.2 Gráfica de interacción para C.

La gráfica de interacción para *C*, nos dice cómo influye la interacción entre las variables en la detectabilidad representada en este caso por el *contraste* C, de esta leemos:



Figura 4.3 Gráfica de interacción para C.

# Potencia y profundidad.

En esta gráfica 1000 y 1500 W presentan más alto *contraste* que con 500 W en todas las profundidades. También se observa que no existe mucha diferencia en usar 1000 o 1500 W los resultados son similares, pero si existe mucha diferencia en usar 1000 en vez de 500 W; el *contraste* es mejor al usar 1000 o 1500 W.

# Potencia y tiempo de exposición (Texp).

En la gráfica se obtuvieron mejores contrastes con 1000 y 1500 W en cualquier tiempo de exposición, curiosamente en 2 y 10 segundos presenta mejor contraste 1000 que 1500 W, pero a 30 segundos de exposición el aumento de contraste se vuelve muy significativo con 1500 W. El mejor tiempo de exposición usando 1000 W es 10 segundos, pero el mejor tiempo de exposición es usando 1500 W durante 30 segundos.

# Profundidad y tiempo de exposición (Texp).

Esta gráfica llama la atención por su simetría, la profundidad de 0.3 mm presentó mejor contraste a cualquier tiempo de exposición. La profundidad de 0.6 mm presentó mejor contraste que 1.0 mm a cualquier tiempo de exposición. El contraste aumenta al aumentar el tiempo de exposición en todas las profundidades. 0.3 mm presentó mejor contraste a 30 segundos de exposición.

En resumen, la interacción entre la potencia y la profundidad es alta, especialmente a poca profundidad.

La interacción entre la potencia y el tiempo de exposición es alta también, en especial al incrementar el tiempo.

La interacción entre la profundidad y el tiempo de exposición es pequeña.

Lo que significa que incrementando la potencia y el tiempo de exposición se mejora la detección, pero la detección no incrementa mucho si solo se incrementa el tiempo de exposición sin incrementar la potencia.

# 4.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

#### Potencia.

A mayor *potencia* (W) mayor *contraste*. Esto se debe a que a mayor *potencia* mayor calor aportado a la muestra, una observación interesante de la gráfica es que el aumento es significativo de 500 a 1000 W, pero muy poco de 1000 a 1500 W.

# Profundidad.

A mayor profundidad menor *contraste*. En otras palabras a menor profundidad se tendrá mejor *contraste* (más temperatura) y por tanto mejor detección.

Una zona delaminada disipará con más dificultad el calor que una zona sana, por lo que aparecerá en color más blanco (más calor) que una zona sana, la cual aparecerá en color más oscuro (más frío).

Una zona sana puede distribuir mejor el calor a través de todo su espesor ya que las capas del material compuesto se encuentran perfectamente unidas una encima de la

otra facilitando la distribución de calor ganado desde la superficie (pulso) a las capas inferiores. Una zona delaminada, en cambio, no cuenta con una buena unión entre capas (plies) y esa desunión es una barrera térmica que dificulta la transmisión de calor a las capas inferiores.

El calor se concentrará más en capas delaminadas más delgadas y de mayor tamaño o área paralela a la superficie. La mayor detección se tendrá en indicaciones grandes (plano paralelo a la superficie) y poco profundas. Indicaciones pequeñas no actúan como una barrera para distribuir el calor a capas más profundas, por lo que resulta complicada su detección. En general se considera 1 / 1 la relación de tamaño con la profundidad para una correcta detección.

### Tiempo de exposición Texp.

Mayor *tiempo de exposición* mejor *contraste*; esta variable al igual que la *potencia* tiene relación directa con la cantidad de calor aportado a la muestra, entre más tiempo de exposición mejor se aprecian las indicaciones más profundas, pero también se observó en las imágenes de 1000 W y 1500 W, que el patrón de uniformidad se perdió, provocando una imagen difícil de leer. Un tiempo largo (30 segundos) puede ser perjudicial para la detección si se inspecciona con lámparas muy potentes (de más de 1000 W) sobre todo en espesores pequeños (2 mm), debido a que el patrón de uniformidad se pierde, dificultando la interpretación de indicaciones. Pueden omitirse o mal interpretarse indicaciones en estas condiciones.

#### Potencia y profundidad.

A menor profundidad se observó mejor contraste, y también a mayor *potencia* (W) se mejora el contraste, esto se observó al usar 1000 W (o 1500W) en lugar de 500 W, aunque con 1000 y 1500 W se obtuvieron resultados similares, el *contraste* con el fondo (uniforme) fue mejor al usar 1000 W, obteniendo los mismos resultados con menor energía. Las delaminaciones más cercanas a la superficie son más fáciles de detectar.

#### Potencia y tiempo de exposición.

Estas dos variables tiene relación directa con el calor aportado a la muestra, al aumentar cualquiera de las dos aumenta el *contraste*. El mejor contraste a los 2 y 10 segundos se consigue con 1000 W, pero el mejor *contraste* se consigue usando 1500 W durante 30 segundos, aunque no se recomienda ya que la falta de uniformidad del fondo generada por el exceso de temperatura dificultó la interpretación de las indicaciones y por tanto la capacidad de detección (detectabilidad).

### Profundidad y tiempo de exposición.

El *contraste* (detección) aumentó al aumentar el *tiempo de exposición*. La simetría de esta gráfica llamó mucho la atención, pareciera no existir interacción pero la pendiente en 0.3 mm es distinta, por lo que a mayor tiempo de exposición se obtiene mejor contraste. Se observó también que a cualquier tiempo de exposición se presentó un aumento proporcional del *contraste*. De esta gráfica se intuye poder medir la *profundidad* o el espesor con esta técnica, por lo que se incluirán dos espesores más (0.4 mm y 1.1 mm) para validar esta observación.

# 4.4 VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA.

Para analizar mejor este comportamiento se amplió la gráfica con más profundidades disponibles en el estándar de detectabilidad.



Duración del pulso

Figura 4.4. Profundidad y tiempo de exposición. La simetría de esta gráfica llama la atención, a cualquier tiempo de exposición se presenta un aumento proporcional del contraste. De esta gráfica se intuye poder medir la profundidad o el espesor.

El tiempo de exposición ayudó a diferenciar las distintas profundidades, al aumentar el tiempo de exposición se amplía el contraste proporcionalmente, lo que permite distinguir entre una profundidad (espesor) y otra en la gráfica. Los valores introducidos de 0.4 mm y 1.1 mm se ajustan en el lugar que corresponde en la gráfica. El estudio actual se limita a la detección de delaminaciones, pero con esta observación se intuye que la medición de espesores con esta técnica es posible.

### 4.4.1 Validación de la metodología utilizando el ultrasonido.

Tres probetas con delaminaciones naturales inducidas por golpes [8] fueron inspeccionadas utilizando primero ultrasonido y después con esta técnica, para comprobar su efectividad. Las probetas ensayadas son de fibra de carbono preimpregnado en matriz polimérica y curado en autoclave, con arreglos de fibra multidireccional [0 %90 °] (10 capas de fibra unidireccional).



Figura 4.5 Imágenes de C-scan de muestras CFRP multidireccionales compuestas (0 ° / 90 °) sometidas a impacto en: a) 30 J; B) 20 J con elevadores de tensión a 12 mm; C) 20 J con elevadores de tensión a 18 mm.
En las tres placas por ambos métodos se detectaron delaminaciones de forma y tamaño similar.

Algunas zonas con daño plástico no presentan detección en termografía ya que logran difundir el calor a capas más profundas. Esto se presenta en el centro del golpe. Se detectan por el patrón de delaminación característico en sus bordes (Figura 4.5 a y c).

## **5. CONCLUSIONES**

El objetivo de esta investigación fue el desarrollo de una metodología rápida y no invasiva (sin contacto) para la detección de delaminaciones en placas de fibra de carbono. La técnica que cumplió con los requisitos anteriores fue la Termografía Infrarroja con excitación óptica, resultó rápida (5% del tiempo comparada con UT) y no requirió el contacto físico con la pieza inspeccionada.

Aplicando calor por radiación (sin contacto y uniformemente espaciado) se generó un transitorio térmico en una probeta con delaminaciones (simuladas) conocidas, las delaminaciones fueron detectadas por la cámara infrarroja como puntos calientes debido a la dificultad de una delaminación para difundir el calor a capas más profundas.

Encontramos variables que afectaron la observación de la radiación infrarroja en la superficie de inspección como: cantidad de calor aportado y profundidad del defecto. Por lo tanto se estudió la relación del calor aportado, la profundidad del defecto y la capacidad de detección o detectabilidad (contraste) con un diseño de experimentos.

De los resultados del experimento sabemos que la potencia y el tiempo de exposición tienen relación directa con el calor aportado y por tanto con el contraste (detectabilidad) al aumentar aumenta la profundidad de detección, pero se debe tener cuidado, porque también se pierde uniformidad en el fondo de la imagen y se dificulta distinguir las indicaciones, se vuelve confuso. De aquí la importancia de tener un pulso de luz igual en toda la superficie: Mejor detectabilidad y mejor interpretación de las indicaciones en la imagen. La potencia de 1000 W (pulso de luz) durante 10 segundos presentó los mejores resultados para nuestra aplicación en 2 mm de espesor de lámina.

Un detalle interesante con el tiempo de exposición es que al aumentar, aumenta también la sensibilidad para distinguir entre una profundidad y otra, de esta observación se intuye la posibilidad de medir espesores con termografía infrarroja con excitación óptica.

La eliminación del ruido en la imagen proveniente del tejido de la fibra de carbono por medio de filtros aumenta la sensibilidad de detección. También con algunos algoritmos aumenta el contraste (detectabilidad), obteniendo imágenes sencillas de interpretar (sustracción de imágenes Figura 4.6). El graficar la intensidad en el eje z (Figura 4.7 y 4.8) y el graficar la superficie de la intensidad en tres dimensiones (Figura 4.9) mejora mucho la detección, al facilitar la interpretación de las indicaciones.

El estándar de detección o también llamado estándar de defecto conocido, nos permitió ajustar los parámetros de la inspección lo más cercano a las condiciones reales que se presentaron durante la inspección y validación de nuestro método.

La validación del método de termografía infrarroja (TIR) se logró detectando delaminaciones reales encontradas en tres placas distintas ensayadas por Ultrasonido (UT) para otra investigación (Figura 4.5) [8]. El tiempo de detección con TIR fue mucho menor que con UT (5% del tiempo destinado a UT aprox.), también la interpretación fue mucho más sencilla, comprobando así la productividad del método. Aunque conviene aclarar que el ultrasonido es mucho más preciso al cuantificar la falla (profundidad). Una combinación de estos dos métodos elevaría el estándar de inspección al utilizar la productividad de la termografía como técnica de cribado y escaneo y el Ultrasonido como técnica de precisión y medición de falla.

El desarrollo de una lámpara espacialmente uniforme, la fabricación de un estándar de detectabilidad real con indicaciones representativas, la sensibilidad de la cámara, el software de tratamiento de imágenes sencillo y amigable, así como un procedimiento específicamente desarrollado para esta aplicación, todo esto tuvo un impacto positivo en la sensibilidad y alcance de detección de esta técnica.

La configuración de inspección obtenida, el equipo fabricado durante esta investigación, así como el procedimiento específico diseñado, tiene como finalidad práctica, la oferta de servicios de inspección por medio de termografía infrarroja activa para la detección de delaminaciones por medio de excitación óptica sin contacto (radiación), útil para fines de inspección en láminas estructurales de fibra de carbono.

El potencial de esta técnica IR para utilizarla en otras aplicaciones y otros materiales radica en la forma en como generemos el diferencial térmico entre la discontinuidad y el material base del estándar de detección adecuado.

## 6. RECOMENDACIONES

Debido a que el principio físico en el que se basa la inspección infrarroja es el diferencial térmico falla-material, resulta interesante el imaginar nuevas y mejores formas de generar este gradiente entre la discontinuidad y el material de la muestra. Por métodos mécanicos como el ultrasonido, vibraciones, inducción electromagnética, laser, frío, son solo algunas opciones para nuevos experimentos.

Mejores algoritmos en el tratamiento de las imágenes (Figura 4.6), la integración y construcción de equipo portable, ligero, y económico, para inspecciones en campo, son ideas para futuros desarrollos.



a) Imagen con el mejor contraste

b) Imagen previa calentamiento

b) Imagen procesada resta y aumento de contraste (en

Figura 6.1. Restando una imagen b) previa (antes del calentamiento) a una imagen a) muy tenue (500W, 1 s) durante el enfriamiento, se logró detectar el cambio que existió entre estas dos imágenes. Aumentando el contraste al resultado de estas dos imágenes aumento la detección c), sin recurrir a mayor aporte de calor.

al



Figura 6.2. Se mejora la detección transformando cada píxel de la imagen en un punto de intensidad y graficando en x, y, z.



Figura 6.3. Mediante un filtro Gaussiano se suavizó el ruido producto del tramado (CFRP 90°) y se mejoró la detección, sin sacrificar el *contraste* (C).



Figura 6.4. Las ventajas del ploteo de perfil con filtro se ven mejoradas con un ploteo tridimensional al poder manipular las vistas y asignando color a cada valor de intensidad con una paleta de color.

De los resultados, conclusiones y recomendaciones de este estudio se desprenderán nuevas líneas de investigación en este nuevo y cada vez más creciente campo de la termografía Infrarroja activa, entre estos estudios futuros que pretendemos realizar se encuentra entre otros: la medición de espesores sin contacto por infrarrojos, la elaboración de un catálogo de curvas de tiempos de exposición térmica pulsada en materiales compuestos, el desarrollo de equipo portátil con teleobjetivos y excitación térmica por láser para inspección a distancia sin exponer al operador, la detección de grietas por vibrotermografía en materiales metálicos y compuestos, la comparación de curvas teóricas con curvas reales para determinar fórmulas de cálculo en termografía activa pulsada. En fin son infinitas las aplicaciones que se pueden encontrar debido a que el calor es una forma básica de transmisión de energía, que se encuentra relacionado con la temperatura y la radiación infrarroja que emiten todos los cuerpos, por esta razón resulta excitante imaginar el futuro próximo que le espera a esta técnica.

# REFERENCIAS

- 1. ASTM, ASTM E2533 16a *Standard Guide for Nondestructive Testing of Polymer Matrix Composites Used in Aerospace Applications* ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 2017.
- BURLEIGH D.: Portable, combined thermography/shearography NDT system for inspecting large composite structures. In: Proceeding of SPIE "Thermosense-XXIV" vol. 4710, pp. 578–587 (2002)
- 3. ASNT, *Nondestructive Testing Handbook*, Third Edition: Volume 3, *Infrared and Thermal Testing*, American Society for Nondestructive Testing, Inc., Columbus, Ohio, 2001, pp. 318–338.
- SHEPARD, S. AND T. AHMED, "Characterization of Active Thermographic System Performance," Thermosense XXI, Proceedings of SPIE, Vol. 3700, 1999, pp. 388– 392.
- 5. BURLEIGH, D., "Practical Aspects of Thermal Nondestructive Testing," Proceedings of Thermosense XVIII, An International
- 6. USAMENTIAGA, R., VENEGAS, P. et al, Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing, Sensors 2014.
- 7. GONZÁLEZ, R.C., WINTZ, P., *Procesamiento digital de imágenes. Addison Wesley,* Tema 2, pág 23-56. (1996).
- 8. Rubio-González C., Chávez Hernández F., José-Trujillo E.; "Evaluación experimental del daño por impacto de baja velocidad de materiales híbridos: fibra de carbono– aluminio", Memorias del XXI Congreso internacional anual de la SOMIM, 2015.
- Shepard Steven and Lhota James *Thermography: More than a Pretty Picture* from Materials Evaluation, Vol. 72, No. 1, pp: 32–41. The American Society for Nondestructive Testing, Inc. Copyright ©2014

### ANEXO A

GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Absorción.** Cuando la radiación electromagnética alcanza un objeto, este absorbe una parte de la energía incidente. La absorción de radiación infrarroja produce el calentamiento del objeto. Un objeto caliente emite más radiación infrarroja que otro más frío. La radiación infrarroja absorbida se convierte en radiación infrarroja emitida por el objeto. El coeficiente de absorción corresponde a la emisividad. La radiación infrarroja incidente sobre el objeto que no se absorbe, se refleja o se transmite (a través).

**Aislador**, **aislamiento.** Definido como un material que restringe el flujo de calor, especialmente en comparación con materiales que conducen el calor bien (conductores).

**Bolómetro.** El primer bolómetro ideado por el pionero de la aviación e inventor estadounidense Samuel Pierpont Langley consistía en dos tiras de platino cubiertas con negro de carbón. Una de las tiras estaba protegida de la radiación y la otra expuesta a ella. Las tiras formaban las dos ramas de un puente de Wheatstone, equipado con un galvanómetro muy sensible conectado a una batería. La radiación electromagnética calienta la tira expuesta sobre la que incide y modifica su resistencia.

**Calor.** También conocido como energía térmica; Energía transferida desde regiones de temperatura más alta a áreas de temperatura más baja cuando un material cambia de temperatura.

**Calor específico (c).** Cantidad de energía necesaria para aumentar en 1 °C la temperatura de 1 kg de material. Indica la mayor o menor dificultad que presenta una sustancia para experimentar cambios de temperatura bajo el suministro de calor. Los materiales que presenten un elevado calor específico serán buenos aislantes. Sus unidades del sistema internacional son J/(kg·K), aunque también se suele presentar como kcal/(kg·°C); siendo 1 cal = 4,184 J. Por otra parte, el producto de la densidad de un material por su calor específico ( $\rho \cdot C$ ) caracteriza la inercia térmica de esa sustancia, siendo esta la capacidad de almacenamiento de energía.

**Calibración.** Procedimiento por el cual se determinan y comparan los valores de medición de un instrumento (valores reales) y los valores de medición de un instrumento de referencia (valores teóricos). El resultado indica si los valores de

medición de un instrumento en uso están o no dentro de un rango de límites de tolerancia admisible. Al contrario de lo que sucede en el ajuste, durante una calibración las desviaciones respecto a los valores teóricos detectadas no se corrigen sino que tan solo se documentan. Los intervalos de calibración varían según las distintas tareas y requisitos de medición.

**Cámara termográfica.** Cámara que mide la radiación infrarroja y convierte las señales en imágenes térmicas. Mediante una cámara termográfica es posible visualizar distribuciones de temperatura no visibles para el ojo humano de superficies de objetos. Algunas de las aplicaciones típicas son la termografía de edificios así como la termografía eléctrica e industrial.

**Capacidad térmica.** La capacidad de un material para almacenar energía térmica. Se define como la cantidad de energía calorífica (en julios) requerida para elevar la temperatura de un kilogramo de material de un grado Kelvin. Se llega a multiplicar el calor específico de un material por su densidad.

**Cero absoluto.** El cero absoluto son -273,15 °C (0 Kelvin = -459,69 °F). Todo cuerpo cuya temperatura esté por encima del cero absoluto emite radiación infrarroja.

Coeficiente de conductividad térmica. Véase Conductividad Térmica.

**Conducción.** Transferencia de calor de las zonas más cálidas (más enérgicas) a las más frías (menos energéticas) de una sustancia debido a la interacción de átomos y moléculas. Esta es la única manera en que el calor se transfiere en sólidos. La transferencia de calor por conducción también está presente en fluidos (líquidos y gases) cuando átomos o moléculas de diferentes niveles de energía entran en contacto entre sí.

**Conductividad térmica (k).** Capacidad de un material para transferir calor. La conducción térmica es el fenómeno por el cual el calor se transporta de regiones de alta temperatura a regiones de baja temperatura dentro de un mismo material o entre diferentes cuerpos. Las unidades de conductividad térmica en el Sistema Internacional son W/(m·K), aunque también se expresa como kcal/(h·m·<sup>o</sup>C), siendo la equivalencia: 1 W/(m·K) = 0,86 kcal/(h·m·<sup>o</sup>C).

**Conductor.** Definido libremente como un material que conduce el calor bien, generalmente en comparación con los materiales que no conducen bien (aisladores). La mayoría de los metales son buenos conductores de calor.

**Contraste.** Valor de una imagen de 8 bits que se obtiene de restar el promedio de la Intensidad de una zona delaminada, menos el promedio de Intensidad de una zona sana.

**Convección.** El movimiento de los fluidos en respuesta a una diferencia de temperatura.

**Convección forzada.** Convección causada por el viento, los ventiladores, las bombas, la agitación o alguna otra fuerza añadida.

**Cuerpo Negro.** Una superficie que absorbe y reemite toda la energía incidente sobre él. Los cuerpos negros perfectos no existen, pero las superficies que están cerca de cuerpos negros existen y, si se rastrean a una fuente estándar, se pueden usar para comprobar la calibración de un sistema.

**Densidad (p).** Masa de material por unidad de volumen:  $\rho = m / V$  (kg/m3).

**Detector.** El detector recibe la radiación infrarroja y la transforma en una señal eléctrica. La resolución geométrica del detector se indica en píxel y la resolución térmica con la NETD.

**Difusividad térmica** ( $\alpha$ ). Es un índice que expresa la velocidad de cambio, y flujo de temperaturas, en un material hasta que alcanza el equilibrio térmico. Es por esta razón que un material A, con difusividad térmica mayor que otro B, alcance el equilibrio en menor tiempo. En otras palabras es un parámetro para averiguar la capacidad que tiene un material para difuminar la temperatura en su interior. Esta expresado por el valor obtenido de la conductividad térmica  $\kappa$  de un cierto material dividida entre el producto del valor de su densidad  $\rho$  y el calor específico c del mismo, su unidad es el m2/s ( $\alpha = \kappa / \rho$ c.).

**Espectro electromagnético**. Radiación electromagnética en todas las longitudes de onda posibles, desde los rayos gamma hasta las ondas de radio.

**Emisividad.** Propiedad de un material que describe su capacidad para irradiar energía comparándola con un cuerpo negro (un radiador perfecto) a la misma temperatura. Los valores de emisividad varían de cero a uno. La emisividad varía según las propiedades de la superficie, el material, y, (para algunos materiales) según la temperatura del objeto.

Estándar de defecto conocido (KDS). Ver estándar de detectabilidad.

**Estándar de detectabilidad**. Es una probeta con discontinuidades o fallas posibles a encontrar del mínimo tamaño detectable por el sistema, estas pueden ser simuladas o reales. Deben ser fabricadas del mismo material y características dimensionales al material a inspeccionar.

**Frecuencia de actualización.** Valor en hercios que indica la frecuencia con que se actualiza la imagen mostrada (p.ej. 9 Hz / 33 Hz / 60 Hz). Una frecuencia de actualización de imagen de 9 Hz significa que la cámara actualiza la imagen térmica mostrada en la pantalla nueve veces por segundo.

Flujo de calor transitorio (Transitorio). Condición térmica en la que el flujo de calor a través de un material o sistema está cambiando con el tiempo.

**Flujo de calor en estado estacionario**. Una condición térmica hipotética en la que la diferencia de temperatura a través de un material o sistema no cambia.

**Fondo térmico**. Objetos radiantes que son reflejados por una superficie al instrumento infrarrojo, generalmente desde "detrás" del instrumento.

**FOV.** Campo de visión; Una medida de la vista angular para un sistema dado y una combinación de lentes, usualmente medidos en grados.

**IFOV (Campo de visión instantáneo).** Una medida del área más pequeña que puede ser vista por el sistema en cualquier instante, es decir, resolución espacial.

**IMFOV (Campo instantáneo de visión-medición).** Una medida del área más pequeña que puede ser medida por el sistema en un instante cualquiera. Es una medida, no una especificación de la resolución espacial.

**Intensidad (imagen)**. Valor tomado de la escala de gris de una imagen de 8 bits, esta escala tiene 256 tonos que comienzan con el negro = 0, y continua así hasta llegar al blanco = 256.

**InSb**. ("Ins-bee" o antimonido de indio.) Un material detector de fotones con excelente rendimiento en la banda de onda corta.

**Isoterma.** Una función de software que describe áreas de aparente similar temperatura o radiosidad en la imagen.

La ley de Fourier. La ecuación de velocidad que describe la transferencia de calor conductiva, donde la energía es igual a la conductividad térmica × área × diferencia de temperatura.

**Ley de Stefan-Boltzmann.** La energía total radiada por una superficie de cuerpo negro es proporcional a su temperatura absoluta a la cuarta potencia.

**Ley de Kirchhoff.** Para un objeto opaco, la energía radiante absorbida es igual a la energía radiante emitida.

Ley de refrigeración de Newton. La velocidad de transferencia de calor para un objeto de enfriamiento es proporcional a la diferencia de temperatura entre el objeto y su entorno LWIR (Long- wavelength Infrared). Radiation con longitudes de onda entre 8-15 µm.

Convección natural: la convección se produce sólo debido a cambios en la densidad del líquido.

MWIR (Mid- wavelength Infrared). Radiación con longitudes de onda entre 3-5 µm.

**NETD (Noise Equivalent Temperature Difference).** Cifra característica que indica la mínima diferencia de temperatura que es capaz de detectar la cámara. Cuanto menor el valor, mayor la resolución de medición de la cámara termográfica.

**Objetivos.** Según el objetivo utilizado varía el tamaño del campo de visión de la cámara termográfica y, por lo tanto, el tamaño de la zona de medición. Un objetivo gran angular es ideal para hacerse una idea de la distribución de temperaturas de una superficie de gran tamaño. Un teleobjetivo es muy útil para medir con precisión pequeños detalles a grandes distancias, están fabricados en germanio, uno de los pocos materiales que es muy permeable (capaz de transmitir) a la radiación infrarroja. No obstante, este material es muy sensible y se ralla con facilidad, por lo que las lentes se deben tratar con sumo cuidado.

**Primera ley de la termodinámica.** La energía en un sistema cerrado es constante; No se crea o destruye.

**Radiación infrarroja.** La radiación infrarroja es radiación electromagnética (Figura 2.1). Todo objeto con una temperatura superior al cero absoluto (0 Kelvin = -273,15 °C) emite radiación infrarroja. La radiación infrarroja va en el rango de onda desde 1000 µm (= 1 mm) hasta 0,78 µm y colinda con la longitud de onda de la luz visible (0,78–0,38 µm). Las cámaras termográficas miden por lo general la radiación infrarroja de onda larga en el rango de 8 µm a 14 µm, otras de 3-5 µm, ya que la atmósfera transmite la radiación infrarroja especialmente bien en esta zona espectral.

**Radiación**. La transferencia de energía térmica por ondas electromagnéticas o radiación.

**Radiación electromagnética.** Vibración de campos eléctricos y magnéticos en forma de ondas que viajan a la velocidad de la luz.

**Radiométrico.** Una imagen o sistema que se calibra para inferir las mediciones de temperatura de la radiación infrarroja detectada.

**Reflectividad (p).** Capacidad de un material de reflejar la radiación infrarroja. La reflectividad depende de las propiedades de la superficie, la temperatura y el tipo de material.

**Resistividad.** La medida de la resistencia térmica de un material. Se define como la inversa de la conductividad térmica.

**Resistencia térmica.** La medida de la capacidad de un material para resistir el flujo de energía por conducción. Su valor es el recíproco de su conductividad.

**Resolución espacial (IFOV)**. Una especificación, usualmente en milliradios (mRad), del objeto de tamaño más pequeño que puede ser visto por el sistema.

**Resistencia térmica.** Inversa de la conductividad térmica. Es la medida de la capacidad de un material para resistir el flujo de energía térmica.

**Segunda ley de la termodinámica.** El calor no puede fluir de un objeto más frío a uno más cálido a menos que se agregue trabajo o energía adicional. También se dice que "el calor no puede ser totalmente transformado en trabajo mecánico".

Stefan-Boltzmann, Constante.  $5,7 \times 10-8 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ 

**Tamaño de punto.** El tamaño de un área que puede medirse a una distancia determinada mediante un sistema radiométrico.

**Temperatura.** Variable de estado que indica la energía contenida en un cuerpo. La medida relativa de calor o frialdad de un material o sustancia.

**Termodinámica.** El estudio de la energía, cómo cambia y cómo se relaciona con los estados de la materia.

Termograma. Véase "Termografía".

**Termografía cualitativa.** Imagen térmica utilizando equipos no radiométricos o imágenes para comparar la radiación procedente de varios objetivos sin realizar mediciones radiométricas de la temperatura.

**Termografía cuantitativa.** Imágenes térmicas utilizando equipos radiométricos (radiómetros) o imágenes radiométricas para realizar mediciones radiométricas de la temperatura objetivo.

**Tiempo de adaptación**. El tiempo de adaptación es el tiempo que la cámara termográfica necesita para adaptarse a la temperatura ambiente del lugar de medición para poder medir dentro de las especificaciones. Consulte el tiempo de adaptación de su cámara termográfica en el manual de instrucciones.

**Termografía.** De las palabras raíz para "imágenes de calor", una imagen visual de datos térmicos; Una imagen térmica.

Termógrafo. Una persona calificada para usar equipos de termografía.

**Transmisividad** (τ). Medida de la capacidad de un material de dejar pasar radiación infrarroja. Esta depende del espesor y las propiedades del material. La mayoría de los materiales no dejan pasar la radiación infrarroja de onda larga.

### ANEXO B

CUANTIFICACIÓN DEL CONTRASTE C PARA EL ANÁLISIS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DOE).

Primero se seleccionaron las imágenes con mejor contraste observado de cada una de las 9 secuencias tomadas (0.5 segundos) (Figura 1).



Figura 1. Imágenes utilizadas para el diseño de experimentos de tres variables (potencia lámparas W, tiempo de exposición s, profundidad delaminación mm) y tres niveles. Se distinguen mejor (mejor contraste) las indicaciones blancas en fondo oscuro, esto depende del calor aportado a la muestra y la profundidad de la indicación. Más profundas menos contraste.

Para cada profundidad (0.3, 0.6, 1 mm) se determinó el valor de C en cada secuencia (imagen) de la siguiente manera:

1. Se realizó un tratamiento a cada imagen con un filtro gaussiano (sigma 2) para disminuir ruidos producto del tejido de la fibra.



2. Se traza una línea para obtener los datos de la intensidad de cada pixel a lo largo de esta línea.



3. Para obtener los valores de intensidad de cada pixel a lo largo de la línea se utiliza Plot profile en FIJI desde Analyze y se despliega la lista con List. El centro de la línea debe concordar con el centro de la indicación y en proporciones iguales a cada lado. Procurar siempre que sea posible que la zona sana tengan igual o más puntos que la zona de la indicación.



- 4. Se promedian las lecturas de la indicación y también se promedian las de la zona sana. La resta de estos dos valores corresponde al contraste C.
- 5. Esto mismo se repite para las demás indicaciones moviendo la línea y colocándola al centro de cada indicación.

# ANEXO C

### LEY DEL ENFRIAMIENTO DE NEWTON

Esta ley describe que la razón de pérdida de calor de un cuerpo es proporcional a la diferencia entre la temperatura del cuerpo y el medio ambiente que lo circunda. Se dice que Newton realizó un pequeño experimento, donde utilizando un horno de carbón de una pequeña cocina, calentó al rojo vivo un bloque de hierro, al retirarlo lo colocó en un lugar a temperatura ambiente y observó cómo se enfriaba el bloque de metal en el tiempo. Sus conjeturas sobre el ritmo al cual se enfriaba el bloque dieron lugar a lo que hoy conocemos con el nombre de ley enfriamiento Newton.

Esta ley establece que cuando la diferencia de temperaturas entre un cuerpo y su medio ambiente no es demasiado grande, el calor transferido en la unidad de tiempo hacia el cuerpo o desde el cuerpo, ya sea por conducción, convección y radiación es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el medio externo, siempre y cuando el medio se mantenga constante

$$\frac{dQ}{dt} = -C_T S(T - T_a)$$

Donde  $C_T$  es la *conductancia térmica* o medida de transferencia de calor a través de los materiales, formados por una o varias capas (es el inverso de la resistencia térmica) y *S* es la superficie del cuerpo.

Si la temperatura *T* del cuerpo es mayor que la temperatura del medio ambiente  $T_a$ , el cuerpo pierde una cantidad de calor dQ en el intervalo de tiempo comprendido entre *t* y *t*+*dt*, disminuyendo su temperatura *T* en *dT*.

El cuerpo para transferir calor a su medio debió ser calentado previamente dQ, el calor que gana un cuerpo en relación a su gradiente de temperatura dT en un sistema está dado por la **Capacidad Calorífica** o capacidad térmica de un cuerpo y se define como: el cociente entre la cantidad de energía calorífica transferida a un cuerpo o sistema en un proceso cualquiera y el cambio de temperatura que experimenta.

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

En una forma más rigurosa, es la energía necesaria para aumentar la temperatura de una determinada sustancia en una unidad de temperatura.

Esta **capacidad calorífica** (*C*) de un sistema físico depende de la cantidad de sustancia o masa (*m*) de dicho sistema. Para un sistema formado por una sola sustancia homogénea se define además el calor específico o **capacidad calorífica específica** (*c*) a partir de la fórmula de calor específico (c)

$$c = C/m$$
,

Donde C es la capacidad calorífica del sistema, entre la masa m del cuerpo, de donde se tiene la siguiente relación:

$$C = \frac{dQ}{dT} = m.c$$

Entonces el calor absorbido por el sistema queda así:

$$dQ = m.c.dT$$

Donde  $m=\rho V$  es la masa del cuerpo en kg ( $\rho$  es la densidad kg/m<sup>3</sup> y V es el volumen m<sup>3</sup>), y *c* el calor específico J/kg.K.

Completando la ecuación La ecuación que nos da la variación de la temperatura *T* del cuerpo en función del tiempo es

$$\frac{m.\,c.\,dT}{dt} = -C_T S(T - T_a)$$

o bien,

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{C_T S}{m. c} (T - T_a)$$

$$K = \frac{C_T S}{m. c}$$
$$\frac{dT}{dt} = -K(T - T_a)$$

Integrando esta ecuación con la condición inicial de que en el instante t=0, la temperatura del cuerpo es  $T_0$ .

$$\frac{dT}{(T-T_a)} = -Kdt$$
$$\int_{T_0}^T \frac{dT}{(T-T_a)} = -K \int_0^t dt$$

Obtenemos la relación lineal siguiente.

$$\ln(T - T_a) - \ln(T_0 - T_a) = -Kt - K(0)$$
$$\ln\left(\frac{T - T_a}{T_0 - T_a}\right) = -Kt$$

Despejamos T

$$\frac{T-T_a}{T_0-T_a} = e^{-Kt}$$

$$T = T_a + (T_0 - T_a)e^{-Kt}$$

La velocidad de enfriamiento es exponencial y su pendiente está en función de K por lo que es necesario definirla.

$$K = \frac{C_T S}{m.c} = \frac{\lambda.S}{x.m.c}$$

La conductancia térmica  $C_T = \lambda/x$  se obtiene de dividir  $\lambda$  o conductividad térmica entre x el espesor de la capa o placa del material, sus unidades son W/m<sup>2</sup>.K.

El valor de la masa se obtiene del producto de la densidad por el volumen del cuerpo:  $m=\rho V$  donde m es la masa del cuerpo en kg ( $\rho$  es la densidad kg/m<sup>3</sup> y V es el volumen m<sup>3</sup>),

$$K = \frac{\lambda . S}{x . \rho V . c}$$

y el **calor específico** *c* se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad y se mide en J/kg.K.

Al agrupar los parámetros térmicos obtenemos un valor conocido como **Difusividad térmica** ( $\alpha$ ) que representa la velocidad de cambio y flujo de temperaturas en un material hasta que alcanza el equilibrio térmico. Se obtiene de dividir el valor de su conductividad térmica ( $\lambda$ ) entre el producto del valor de su densidad ( $\rho$ ) y la capacidad calorífica específica del mismo (c), sus unidades son m<sup>2</sup>/s.

$$K = \frac{\lambda . S}{x . \rho V . c} = \frac{\alpha . S}{x . V}$$

Los valores dimensionales como el volumen V, producto de la superficie S por el espesor x para una placa o capa de material, se reducirán hasta obtener:

$$K = \frac{\alpha}{x^2}$$

Donde  $\alpha$  es la difusividad térmica y *x* el espesor de la placa.

$$T = T_a + (T_0 - T_a)e^{-\frac{\alpha}{x^2}t}$$

### Ejemplo experimental.

Para una lámina de fibra de carbono calentada por una cara con radiación proveniente de una lámpara halógena donde se encuentran delaminaciones a la mitad de un espesor x, se analiza que pasado un tiempo *t* suficientemente largo de enfriamiento, el diferencial de temperatura T- $T_a$  será el mismo al comparar una zona sana y una delaminada. De la formula deducida anteriormente en la ley de enfriamiento de Newton se analizará esto.

$$\frac{T_f - T_a}{T_0 - T_a} = e^{-\frac{\alpha}{x^2}t}$$

Donde  $\alpha$  es la difusividad térmica y *x* el espesor de la placa.

 $T_f$  = Temperatura final de la placa al tiempo t

 $T_a$  = Temperatura ambiente

 $T_{0}$ = Temperatura inicial al inicio del enfriamiento

t = tiempo transcurrido

Suponiendo el mismo material al mismo tiempo de enfriamiento donde lo único que cambia es el espesor x. En una delaminación el espesor es menor que en el resto del material, por lo que se calienta con mayor rapidez. La delaminación se encuentra justo a la mitad de un espesor de 2 mm.

$$T_{fs} - T_a = (T_{0s} - T_a)e^{-\frac{\alpha}{x_s^2}t}$$
$$T_{fd} - T_a = (T_{0d} - T_a)e^{-\frac{\alpha}{x_d^2}t}$$

Donde:

 $T_{fs}$  =Temperatura final de zona sana (°C)

 $T_{fd}$  =Temperatura final de zona delaminada (°C)

 $T_{Os}$  =Temperatura inicial de zona sana (°C)

 $T_{Od}$  =Temperatura inicial de zona delaminada (°C)

 $T_a$  = Temperatura ambiente (°C)

 $\alpha$  = Difusividad térmica (m<sup>2</sup>/s).

 $x_s$  = Espesor de una zona sana (m)

 $x_d$  = Espesor de una zona delaminada (m)

*t* = Tiempo total de enfriamiento hasta conseguir  $T_{fd} - T_a = T_{fs} - T_a$  (s).

Al final del evento transitorio  $T_f$  -  $T_a$  serán iguales en una zona con delaminación ( $T_{fd}$  -  $T_a$ ) y una sana ( $T_{fs}$  -  $T_a$ ). Por lo que la igualdad queda de la siguiente manera:

$$(T_{0d} - T_a)e^{-\frac{\alpha}{x_d^2}t} = (T_{0s} - T_a)e^{-\frac{\alpha}{x_s^2}t}$$

Espesor de una zona sana  $x_s^2 = (0.002)^2 = 4x10^{-6} m$ Espesor de una zona delaminada  $x_d^2 = (0.001)^2 = 1x10^{-6} m$ Difusividad de la fibra de carbono  $\alpha = 4.7 \times 10^{-7} m^2/s$ . Tiempo de enfriamiento 100 segundos. Temperatura ambiente de 27° C

Introduciendo datos de espesor y difusividad en la igualdad

$$(T_{0d} - T_a)e^{-0.47t} = (T_{0s} - T_a)e^{-0.1175t}$$

Para un tiempo de 100 segundos y 27°C de temperatura ambiente

 $(T_{0d} - 27)3.874 = (T_{0s} - 27)7.889$ 

 $3.874T_{0d} - 104.59 = 7.889T_{0s} - 213$ 

$$T_{0d} = 2.0364T_{0s} - 27.9839$$

Para una temperatura inicial de enfriamiento de una zona sana  $T_{0s}$ =30 °C (al apagar lámparas) sustituyendo en la formula anterior, se tiene una temperatura inicial de zona delaminada  $T_{0d}$  = 33.1 °C. En general para cualquier temperatura inicial de una zona sana superior a la ambiente se tendrá siempre una temperatura de zona delaminada mayor.