

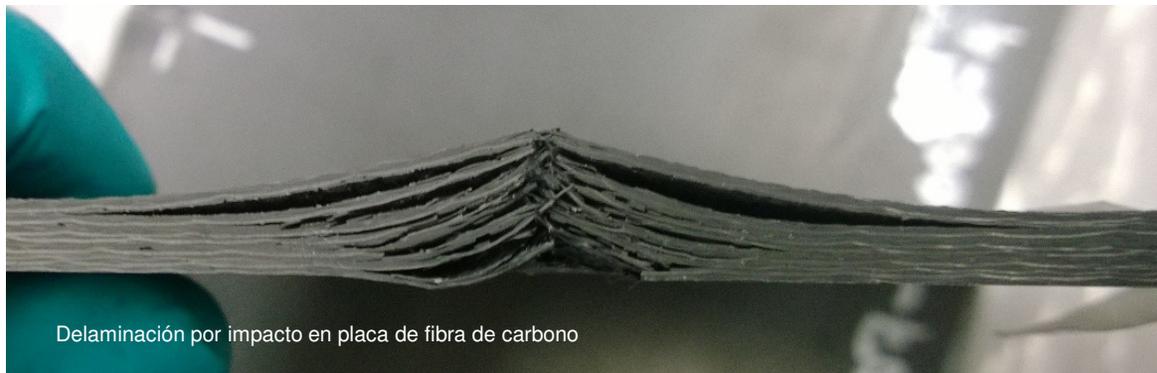
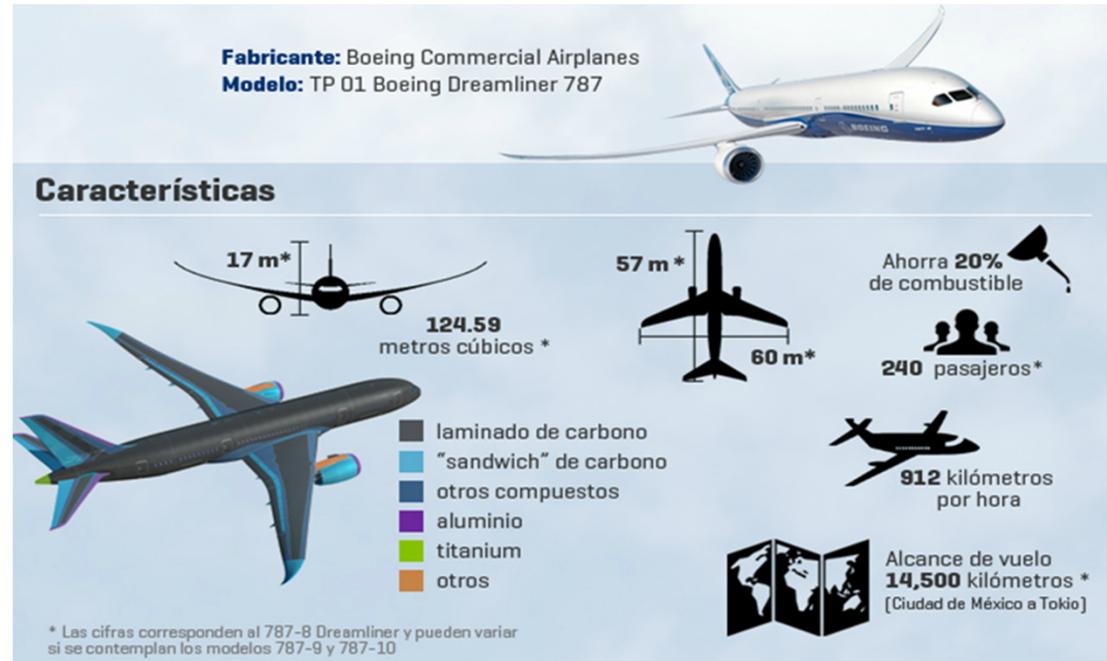
# Detección de delaminaciones en materiales compuestos de fibra de carbono con termografía infrarroja

*Desarrollo de un procedimiento específico para detectar delaminaciones en laminados de CFRP*

Gerardo Ramses Reyes Fuentes  
Ingeniero de proyectos de CIDESI  
Nivel III ASNT No 148869 PT, MT, ET,VT

# Antecedentes

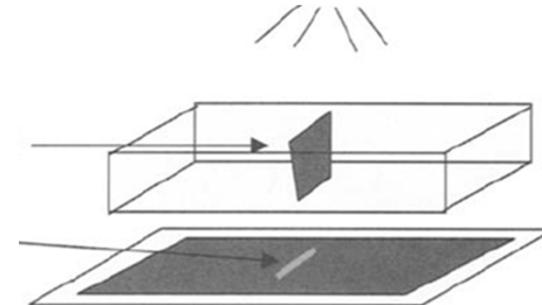
La Industria de alto desempeño demanda materiales más ligeros y resistentes como los compuestos con **fibra de carbono**. En la fabricación y el servicio se inducen **defectos** (delaminaciones) en estos. Necesitamos métodos de **inspección** más productivos para evitar catástrofes.





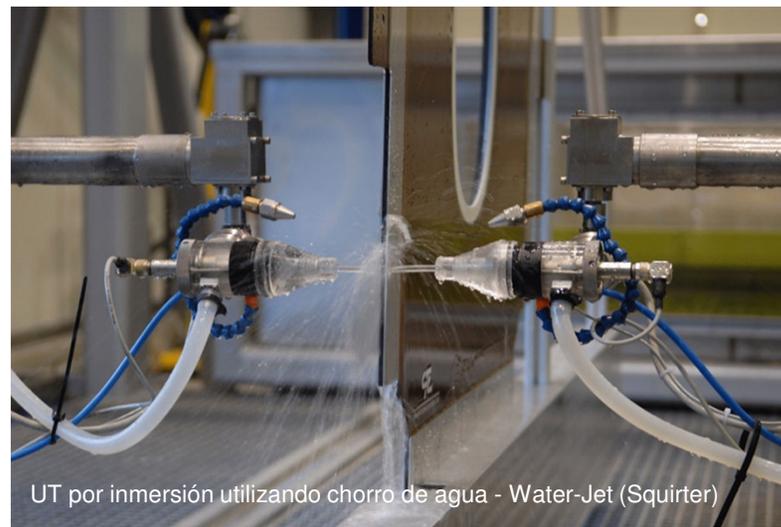
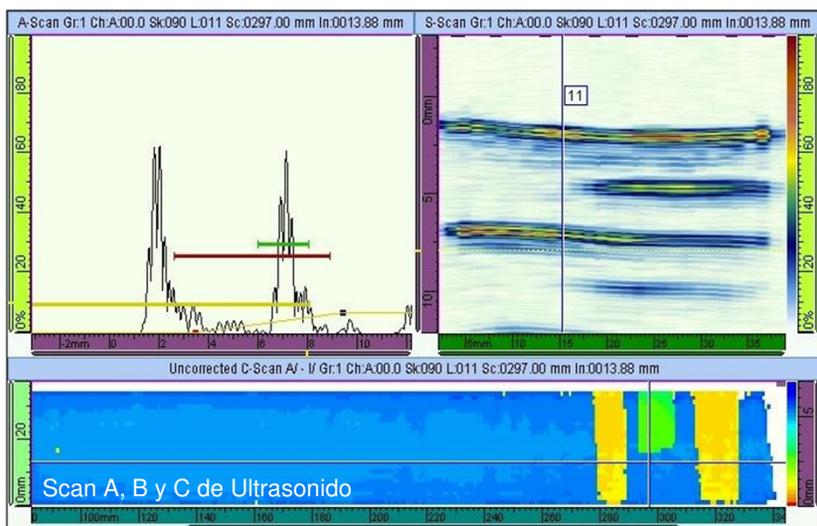
# END en materiales compuestos

UT (Ultrasonido tradicional)	RT (radiografía)	TIR (Inspección Infrarroja)
Un acoplante debe ser usado entre el palpador y la superficie a inspeccionar ya sea un gel o agua en caso de C-Scan esto en ocasiones puede contaminar el espécimen.	Desalojar al personal del hangar durante la inspección es requerido.	No se requiere tocar la superficie durante la inspección y no representa peligro alguno para el personal, ni para la pieza.
El C-Scan requiere de la remoción del componente del avión para examinarlo.	Se requieren ambos lados de inspección.	Se requiere solo una vista directa de la superficie y no se requiere desmontar la pieza
Horas de inspección	Horas de inspección	Segundos o minutos de inspección



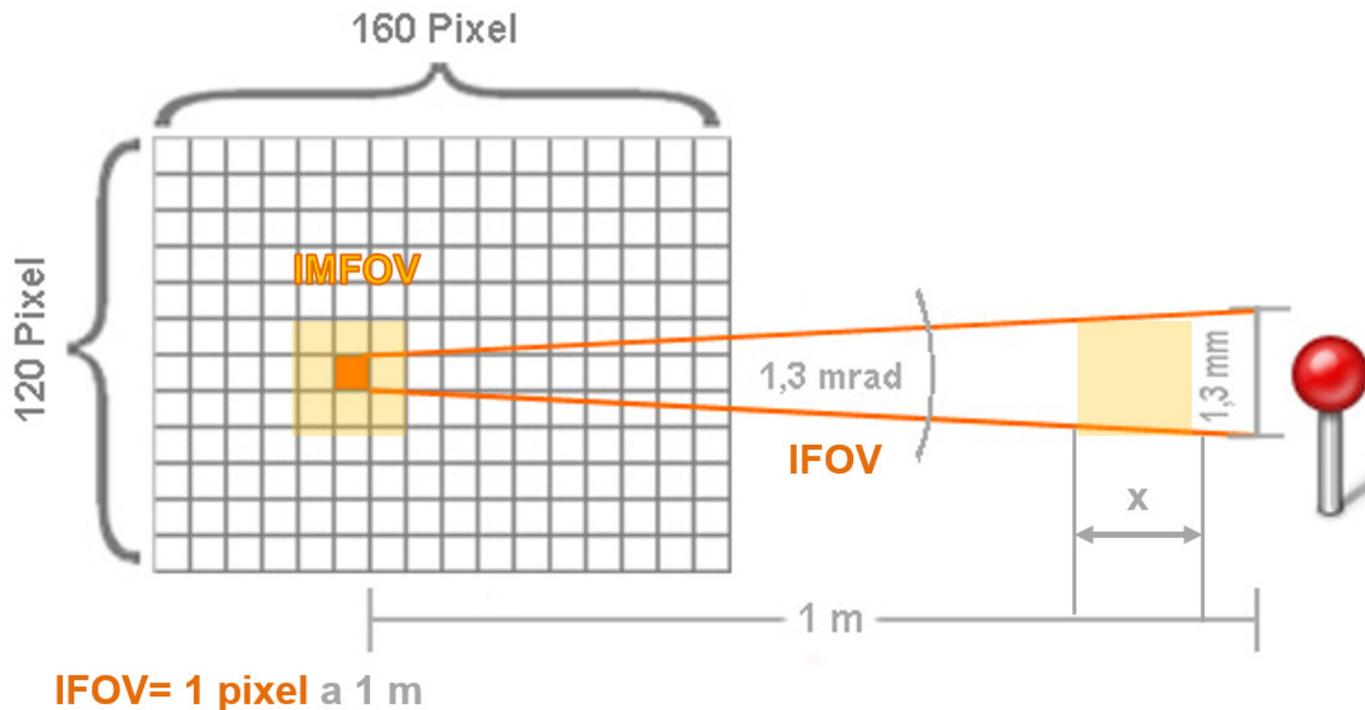
# ★ Retos de los END tradicionales

- Los métodos de inspección actuales para la fibra de carbono se encuentran en desarrollo, son abstractos (interpretación, calibración de señales), invasivos y requieren condiciones específicas de inspección (desmontar la pieza, contacto con el agua, desalojar al personal)
- Son relativamente lentos (1m<sup>2</sup> x ½ hr. aprox.)
- En UT se puede presentar daño por contaminación de agua al inspeccionar materiales compuestos por inmersión.
- Es imposible detectar delaminaciones con rayos X.



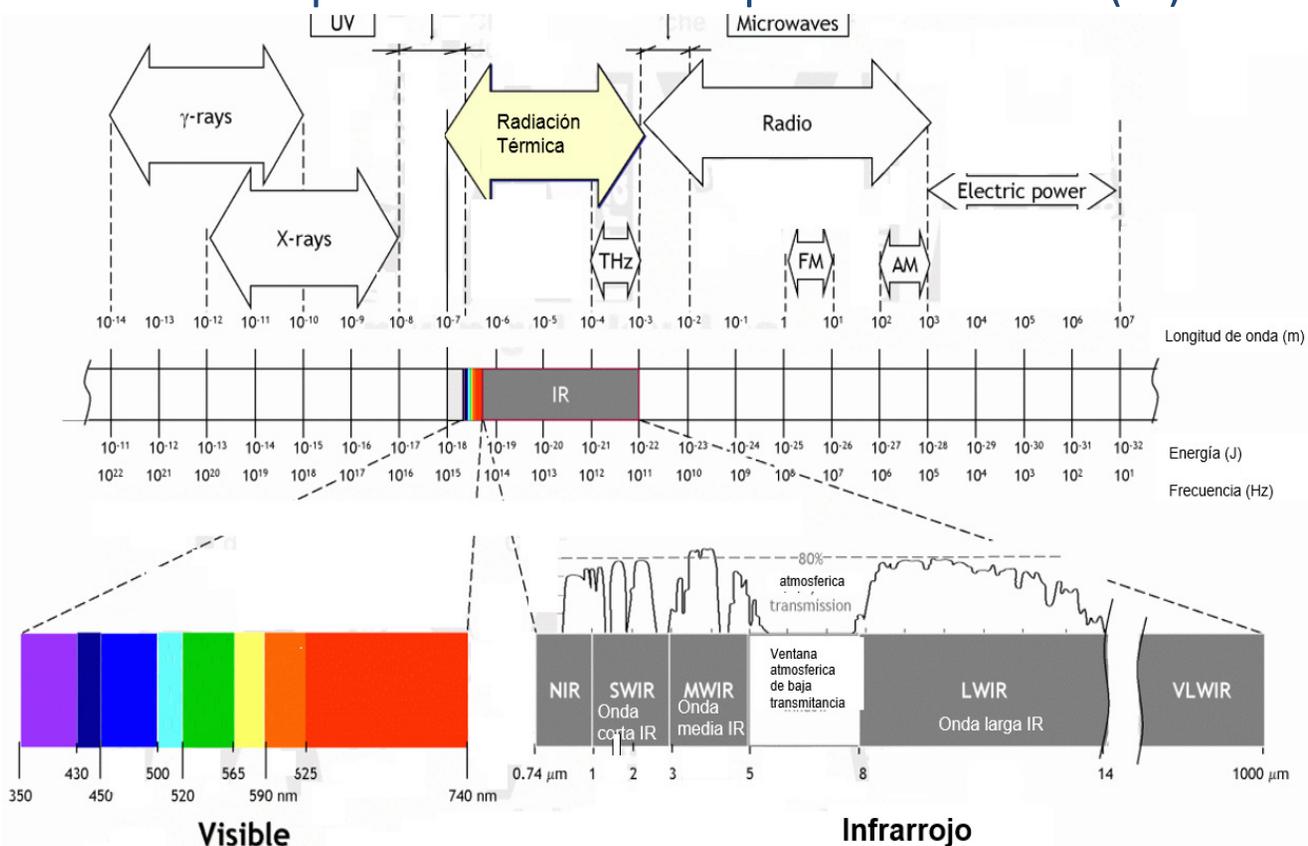
# ¿Termografía Infrarroja?

Método de END que permite ver la radiación infrarroja en la SUPERFICIE de un objeto por medio de una cámara termográfica, donde cada pixel de la imagen corresponde a un valor de radiación.



# ¿Termografía Infrarroja?

Todos los objetos por encima del cero absoluto [-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 ( $T^4$ )

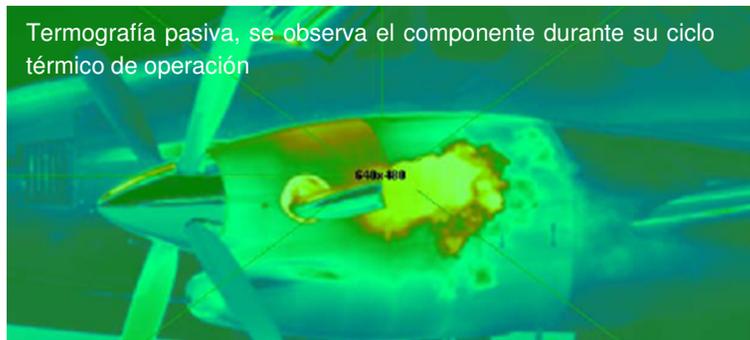


Para ilustrar esto, una superficie de 20° C ((293)<sup>4</sup>) que cambie tan solo a 21° C ((294)<sup>4</sup>) tendría un aumento proporcional de radiación de 101 131 295. Esto explica porque las cámaras infrarrojas son tan sensibles a los pequeños cambios de temperatura, pueden distinguir hasta 0.018 K de diferencia de temperatura entre una superficie y otra.



# Clasificación en termografía infrarroja

- **Termografía Pasiva.** La parte o componente se inspecciona durante o después de su ciclo térmico de operación. Este ciclo puede ser el de fabricación o durante el uso del equipo o pieza. Se debe estar colocado en el momento y lugar preciso.

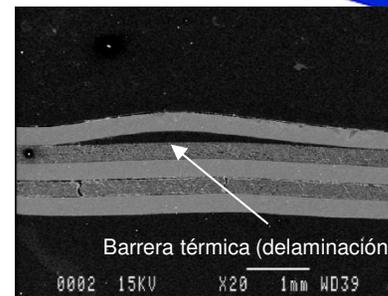
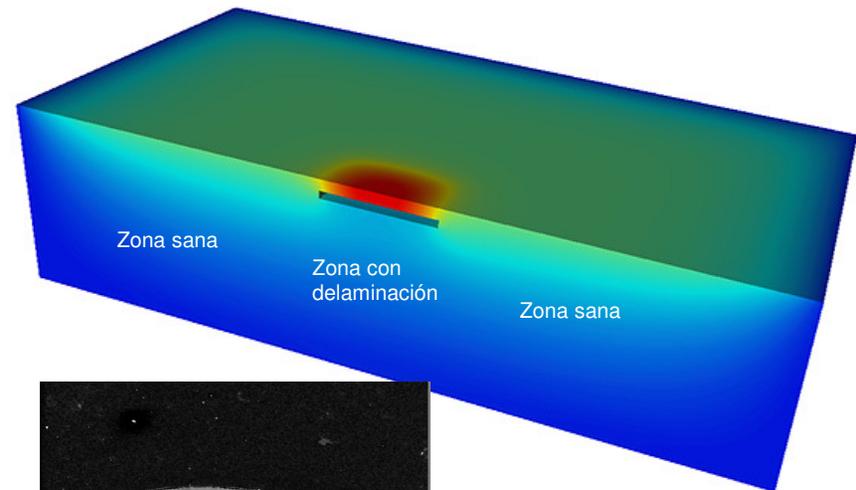
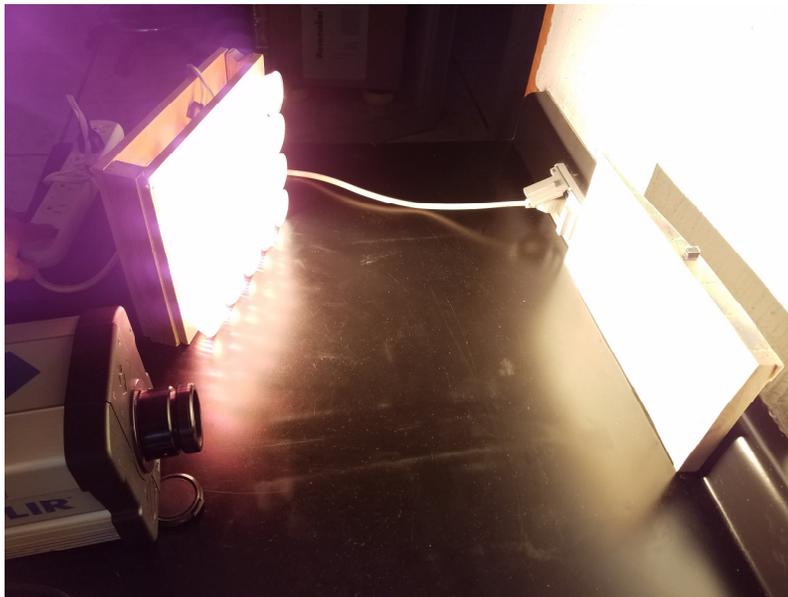


**Termografía activa.** Involucra el control del calentamiento o enfriamiento de la superficie para crear un gradiente de temperatura en la pieza. En este caso se controla el ciclo térmico por medio de fuentes generadoras de calor o gradiente de temperatura (excitación térmica), ejemplo

- pistolas de calor,
- luz(sol, incandescente, halógenas, flashes de quatz o xenón), (Termografía de Flash, termografía sincronizada o lock-in)
- hornos o autoclaves,
- mantas térmicas,
- refrigeración,
- Vibraciones inducidas mecánicamente, (Termografía ultrasónica o vibrotermografía)
- Lasers

# Termografía activa (Hipótesis)

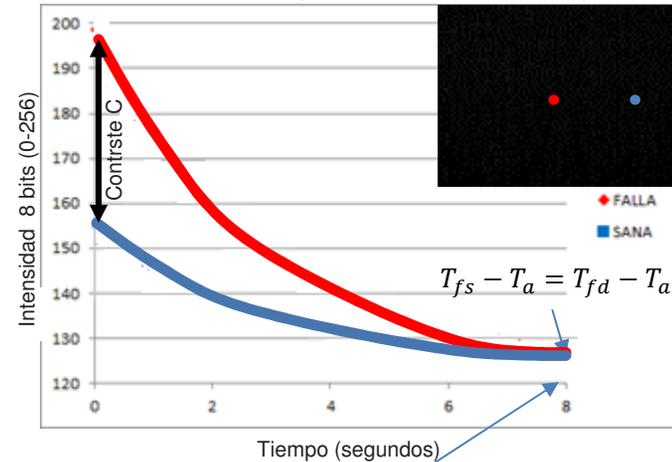
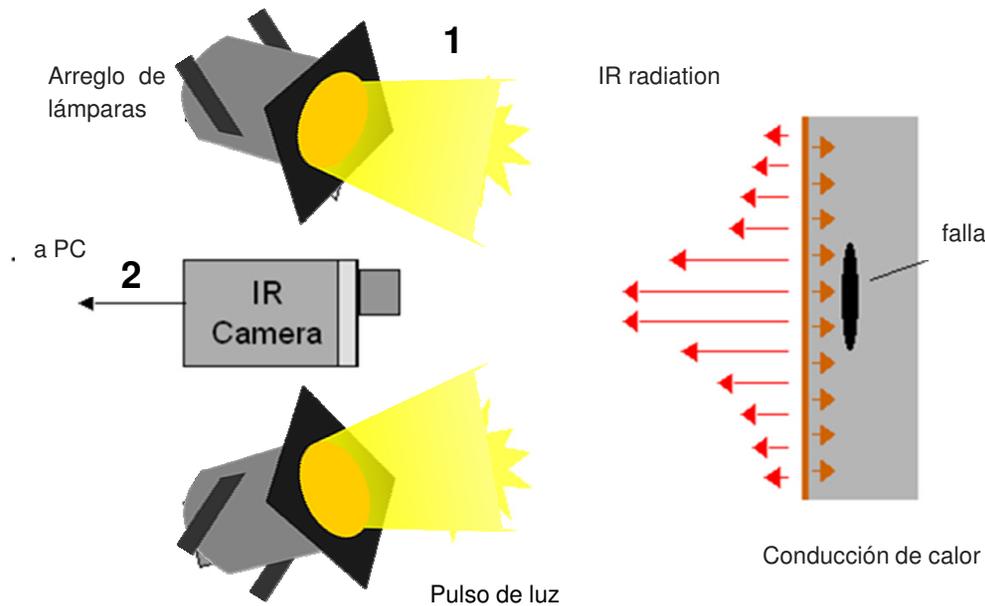
- **Hipótesis del estudio.** La idea principal es **calentar por unos segundos** una pieza (con delaminaciones conocidas) con un pulso de luz uniforme y **observar** la superficie en busca de **anomalías térmicas**. “Durante el enfriamiento una zona con delaminación aparecerá más caliente que una zona 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





# Explicación teórica

Energía (pulso de luz) de un arreglo de lámparas calienta la superficie de inspección, y una cámara IR monitorea la radiación de la superficie de la muestra cuando se enfría. La temperatura de la superficie **cae predeciblemente en forma de calor.**



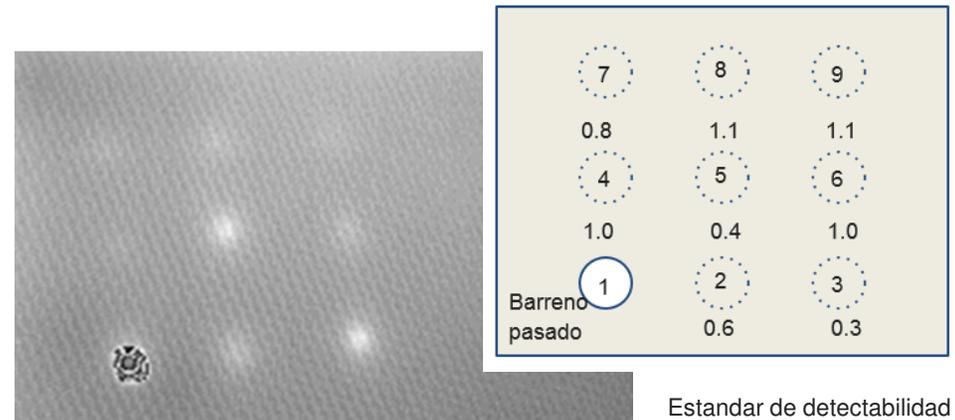
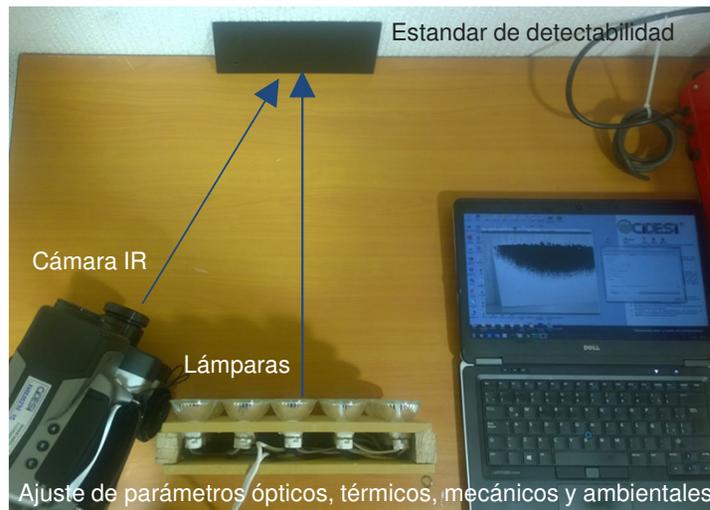
$$(T_{0d} - T_a) e^{-\frac{\alpha}{x_d^2} t} = (T_{0s} - T_a) e^{-\frac{\alpha}{x_s^2} t}$$

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

Sin embargo, las delaminaciones, un vacío o inclusión modifican el enfriamiento local de la superficie, y el correspondiente **flujo de radiación es detectada en la superficie por la cámara de infrarrojos.**

# Objetivo General

- Desarrollo de un **procedimiento específico** de inspección por termografía activa, sin contacto para la **detección de delaminaciones en placas de fibra de carbono**.



## Objetivos específicos

- **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

# Alcance del estudio

- El estudio está limitado a CFRP bidireccional (0 °, 90 °) tejido. (Secciones planas) de 2 mm de espesor.
- Detección de discontinuidades inducidas (por golpe) y delaminaciones simuladas (FHB) (estándar de detectabilidad).
- Análisis del contraste en imágenes en formato nativo (no el termograma), entre la discontinuidad (anomalía) y el área circundante (zona sana).
- Sólo se realizó la detección de delaminaciones, no la medida de discontinuidad.
- Inspección solamente (**Detección**), no para evaluación (criterios de falla).



Ajuste de parámetros ópticos, térmicos, mecánicos y ambientales

# Variables que afectan la detectabilidad en el END térmico (estudio de viabilidad)

## Parámetros asociados a la inspección por termografía activa

### a). Propiedades físicas y térmicas de la muestra

- Material y proceso de manufactura
- **Difusividad térmica del material** ( $\alpha = \lambda / \rho c$ , conductividad térmica  $\lambda$ /densidad  $\rho$ , calor específico  $c$ )
- Espesor de la muestra

### b). Propiedades físicas y térmicas de la discontinuidad (anomalía)

- **Profundidad**
- Orientación
- **Tamaño**

### c). Selección de la imagen infrarroja

- Distancia de trabajo (de la cámara al objeto)
- Resolución térmica (Diferencia mínima de temperatura posible de detectar)

### d). Selección de la excitación térmica

- **Luz** (sol, incandescente, **halógena**, flashes de quatz o xenón), (Termografía de **Flash**, termografía sincronizada o lock-in)

### e). Opciones de procesamiento de imágenes

- Imágenes Raw
- **Evaluación de contraste máximo**

### f). Condiciones ambientales

- Temperatura ambiental
- Fuentes de contaminación térmica
- Reflejos (luces, calentadores, cafeteras)

## Variables que afectan la detectabilidad en el END térmico (estudio de viabilidad)

### a). y b). Propiedades físicas y térmicas de la muestra (probeta) y la discontinuidad (anomalía)

#### TÉRMICAS

$$\alpha = \lambda / \rho c$$

Donde

$\lambda$  = Conductividad térmica [W/m.K]

$\rho$  = Densidad [kg/m<sup>3</sup>]

$c$  = Calor específico [J/kg.K]

$\alpha$  = Difusividad térmica [relación a la cual el calor se propaga (de caliente al frío)] [m<sup>2</sup>/s]

#### FÍSICAS

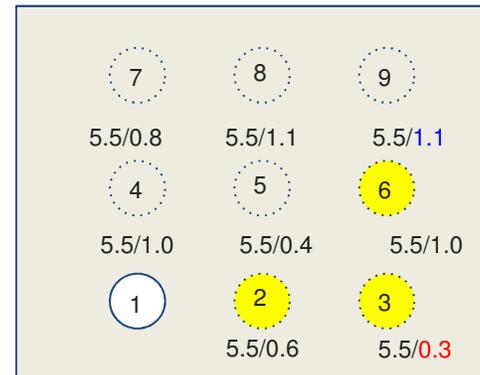
$$R_{\max} = D/d = 5.5/0.3 = 18.3$$

$$R_{\min} = D/d = 5.5/1.1 = 5$$

R = Relación de aspecto (mayor a 1)

D = Diámetro de la falla.

d = Profundidad de la falla.



Estándar de detectabilidad o de defectos conocidos

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/Kg.K)	Conductividad térmica (W/m.K)	Difusividad térmica (m <sup>2</sup> /s)
CFRP (en plano anisotrópico)	1600	1200	X=7 Y=0.92 Z=0.92	Y,Z=4.79 x10 <sup>-7</sup> X=3.64 x10 <sup>-6</sup>
AIRE	1.16	1007	0.026	2.23 x10 <sup>-5</sup>

## Variables que afectan la detectabilidad en el END térmico (estudio de viabilidad)

### c). Selección de la imagen infrarroja

- Distancia de trabajo (de la cámara al objeto) = **0-350 mm**
- Resolución espacial (Densidad de detección relativa a la distancia de la cámara con el objeto) = **3.8mm**
- Resolución térmica (Diferencia mínima de temperatura posible de detectar) = **18 mK**; (0.08 °C P25)  
Rango térmico = **3-5 μm** (7.5-13μm P25)
- Velocidad de captura = al menos **100** cuadros por evento y al menos uno antes del pulso de luz (propuesto)
- Ópticas disponibles = **25 mm** (22°(H)X17.6°(V))(24°X18° P25)

SC4000 MWIR



Cámara	Detector (Material, Rango, Resolución térmica)	Resolución (pixels) y Óptica	IFOV (FOV*0.0175 rad/pixels)	IMFOV (IFOV*9)	Distancia al objeto para detectar 5mm (defecto)	Distancia al objeto para detectar 3.8mm (defecto)
<b>FLIR SC4000 MWIR</b>	IndioAntimonio (InSb), 3-5μm, 18 mk	320(H)X256(V) 22° X 17.6° FOV	(17.6/256)*0.0175 5= 0.0012 (22°/320)*0.0175 = 0.0012	0.0012*9= 0.0108 0.0012*9= 0.0108	5mm/0.0108= 462.9 mm 5mm/0.0108 = 462.9 mm	3.8mm/0.0108 = 352 mm 3.8mm/0.0108 = 352 mm

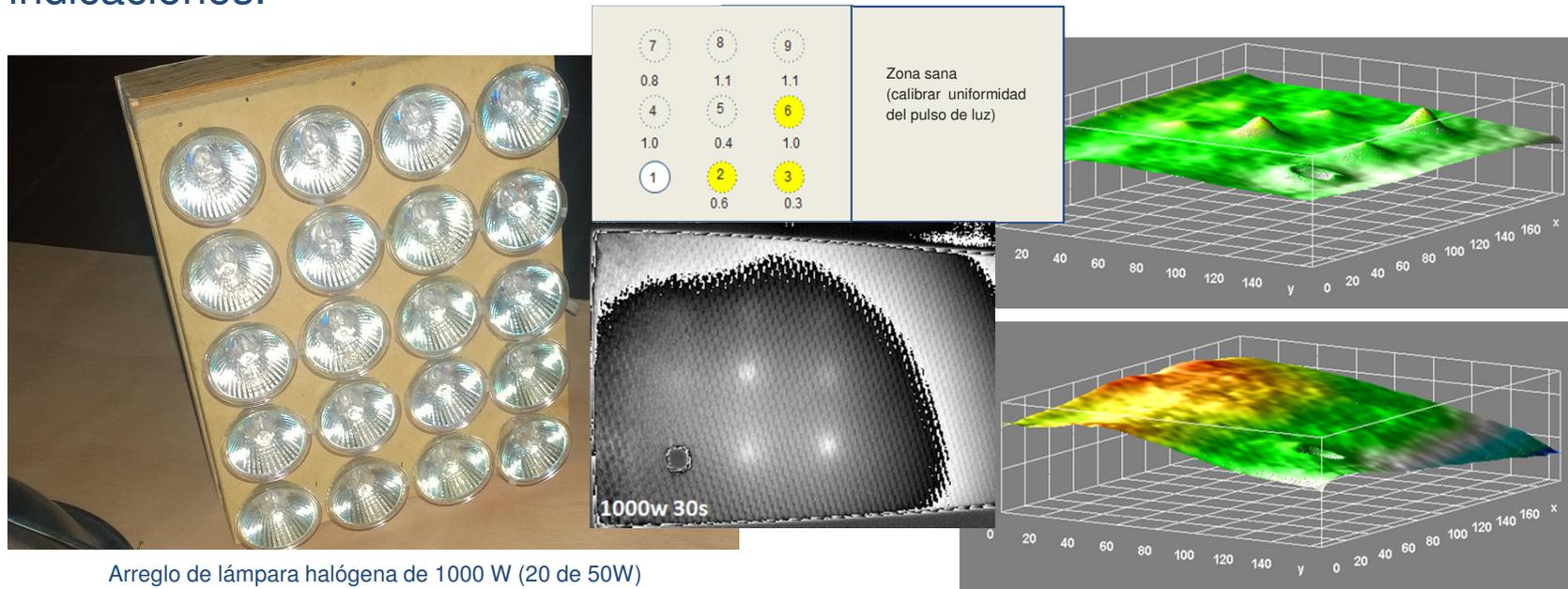
IMFOV=Instantaneous measurement field of view  
Manual de FLIR SC4000

## Variables que afectan la detectabilidad en el END térmico (estudio de viabilidad)

### d). Selección de Excitación Térmica (Luz Pulsada)

Se utilizó luz halógena, con varios pulso de potencia y tiempos de exposición, el objetivo fue proporcionar el calor necesario para detectar las indicaciones presentes.

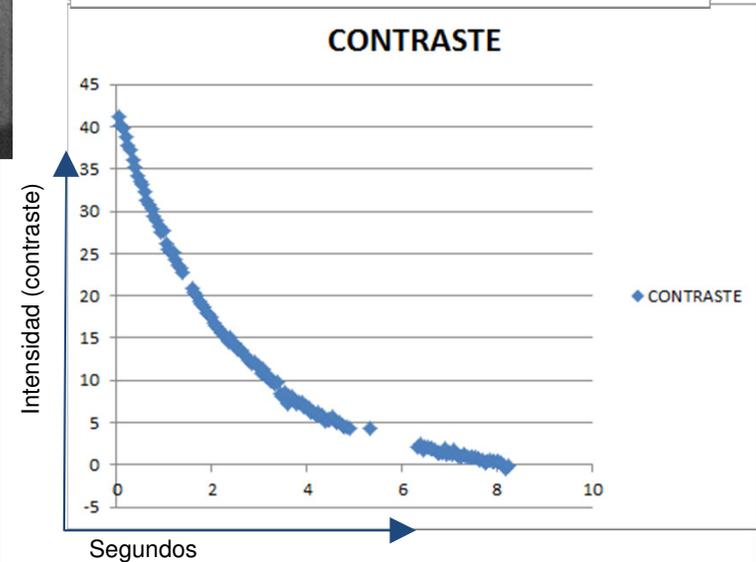
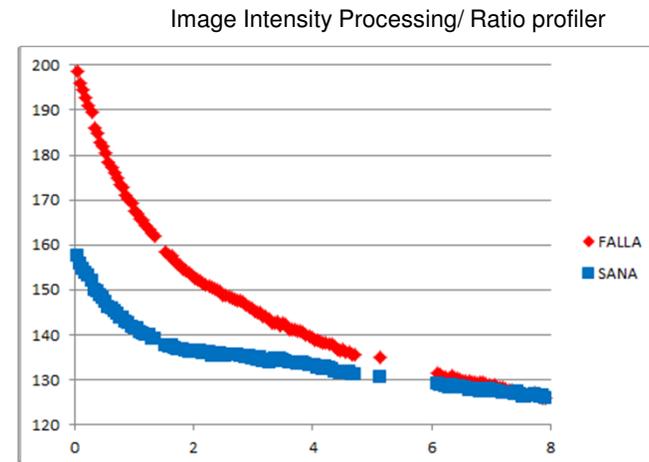
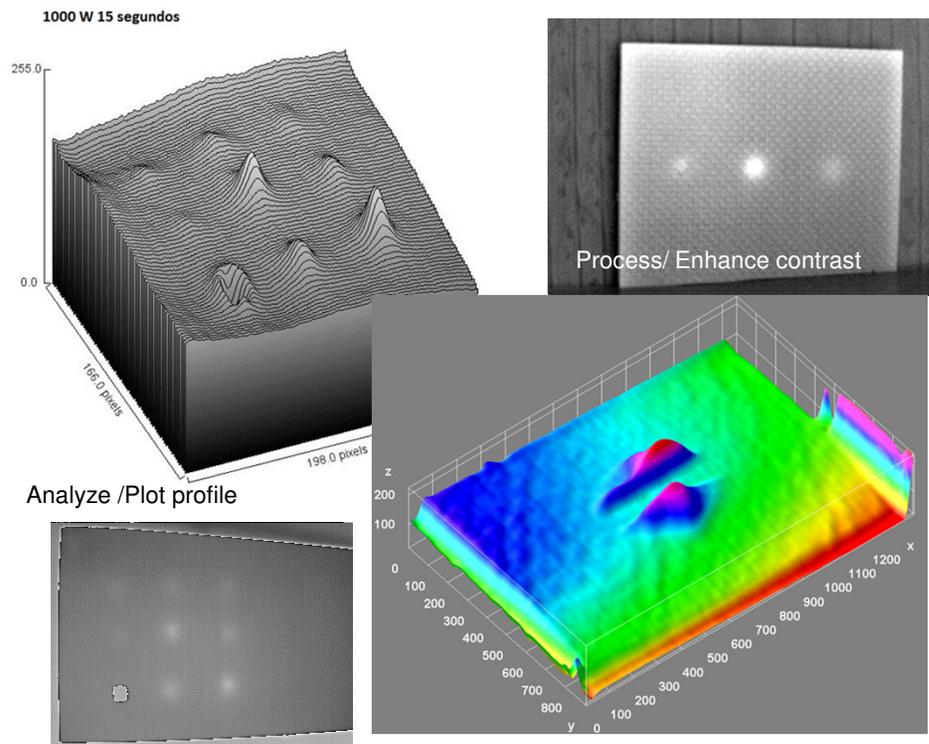
Una placa de aluminio (o una zona sana de CFRP sin defectos) se puede utilizar previamente para verificar la uniformidad espacial del pulso para evitar falsas indicaciones.



## Variables que afectan la detectabilidad en el END térmico (estudio de viabilidad)

### e), Opciones de procesamiento de imágenes

- Imágenes Raw, Mapa de bits
- Filtros (alisado y reducción de ruido)
- Ploteo Tiempo/intensidad, ploteo de perfil, ploteo 3D, evaluación de contraste máximo

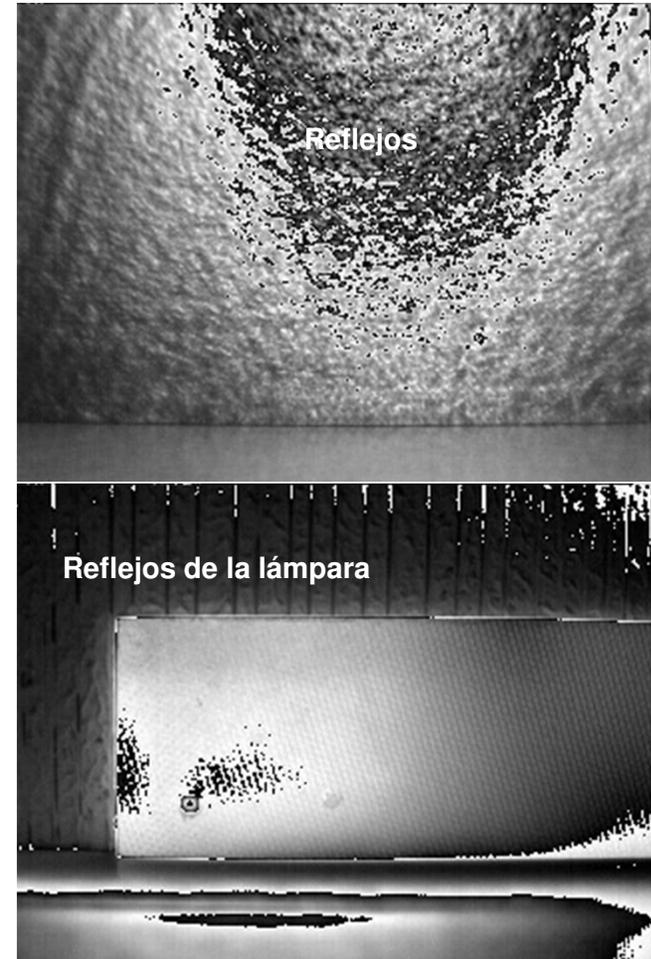


Procesamiento de imágenes y datos usando Fiji Is Just ImageJ Software

## Variables que afectan la detectabilidad en el END térmico (estudio de viabilidad)

### f). Condiciones ambientales

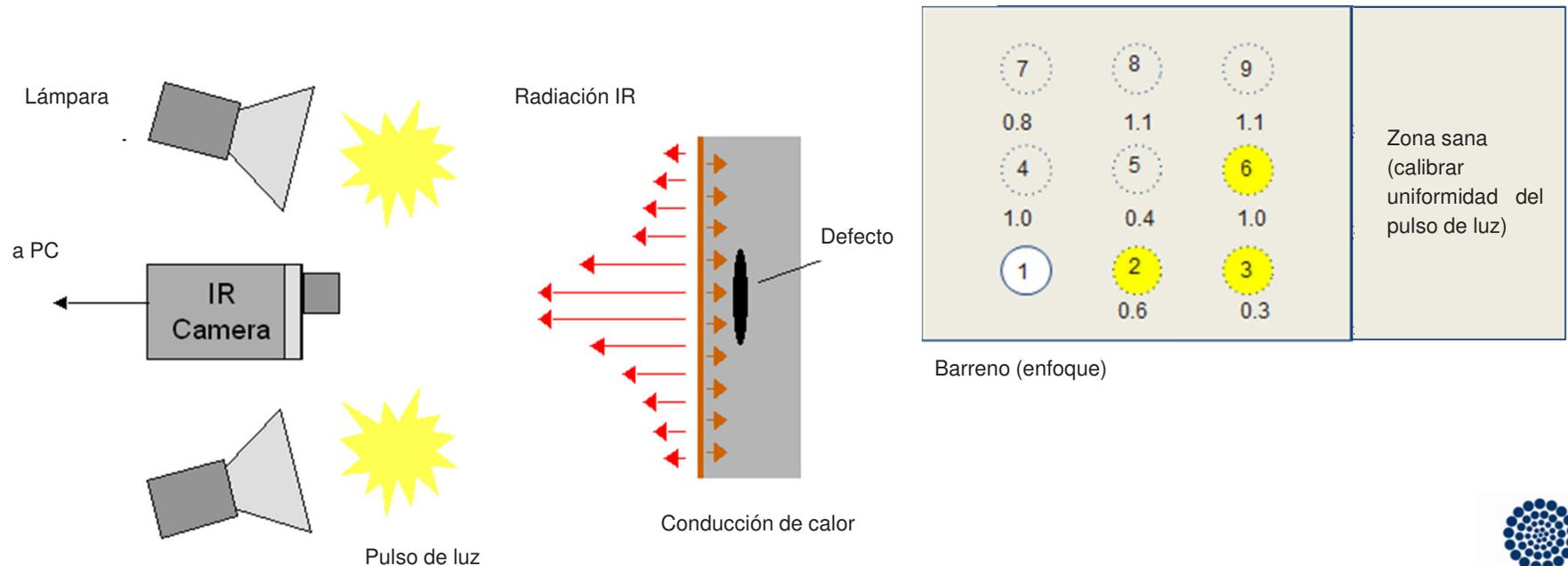
- Temperatura ambiental (25-30 °C)
- Fuentes de contaminación térmica (eliminar)
- Control de convección espuria
- Fondo de alta temperatura (luces, calentadores, cafeteras eliminar)
- Reflejos de la lámpara en la cámara (cuidar el ángulo entre cámara y lámpara reflejado en la superficie de inspección)



# ★ Metodología del diseño de experimentos

Se realizó un DOE de 3X3 seleccionando 3 variables (Potencia de lámparas, duración del pulso de excitación térmica y profundidad de la falla) en 3 niveles cada uno potencia (500w,1000w,1500w), duración (2,10,30 segundos), profundidad (0.3, 0.6, 1mm).

Se ensayó una probeta con barrenos posteriores simulando (térmicamente) delaminaciones a distintas profundidades, donde 3 se analizaron (barreno n°2,3 y 6) utilizando una combinación de lámparas para analizar la influencia que tienen estas variables en la detección de las delaminaciones.





# Ajuste inicial del experimento

## Ajuste experimental

### Sensor térmico

- Distancia de trabajo (desde el sensor al objeto de prueba) = **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**
- Selección de banda= (3-5  $\mu\text{m}$ )
- Rango térmico = -20° C to 350° C
- Velocidad de adquisición de imagen = **100 fps** en mapa de bits

### Excitación térmica (pulso de luz halógena)

- Distancia (de la fuente al objeto) = **35 cm** (Evitar ángulos de reflejo en la cámara)
- Potencia de lámparas= **500, 1000 y 1500W**
- Tiempo de exposición= **2, 10 y 30 segundos**
- Secuencias de calor aportado= 2 s 500 w, 10 s 500 w, 30 s 500 w, 2 s 1000 w, 10 s 1000 w, 30 s 1000 w, 2 s 1500w, 10 s 1500w, 30 s 1500w.



# Observaciones

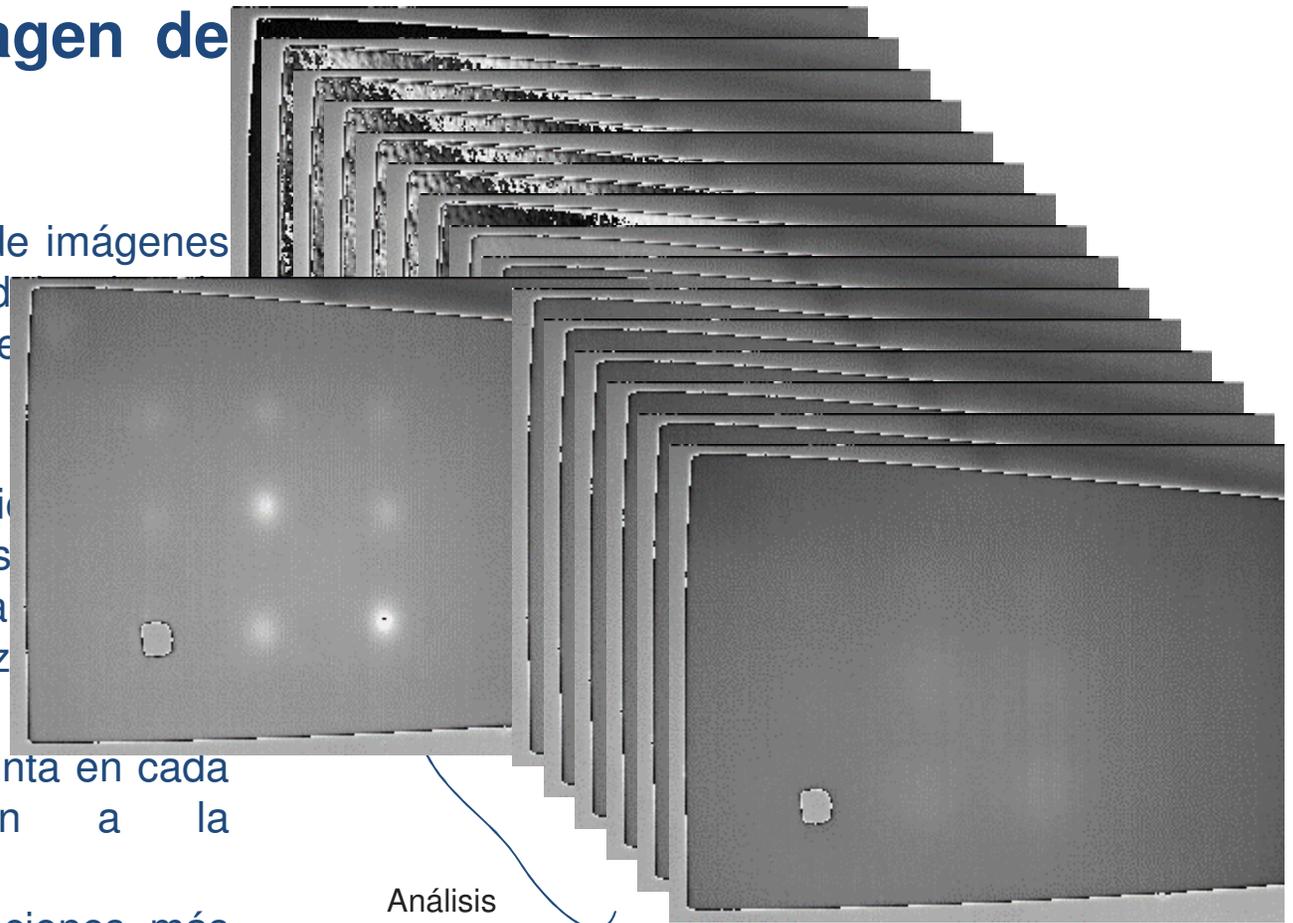
## Selección de imagen de cada secuencia

Se obtuvieron secuencias de imágenes antes, durante y después de la excitación. Únicamente el mejor de cada secuencia se analizó.

Las zonas más delgadas (delaminaciones, indicaciones) se calientan más rápido que las zonas gruesas, estas se aprecian más claro (blanco) que las zonas gruesas (oscuras).

La intensidad (tono) es distinta en cada indicación (en relación a la profundidad).

Aparecen antes las indicaciones más próximas a la superficie (menor espesor, profundidad)



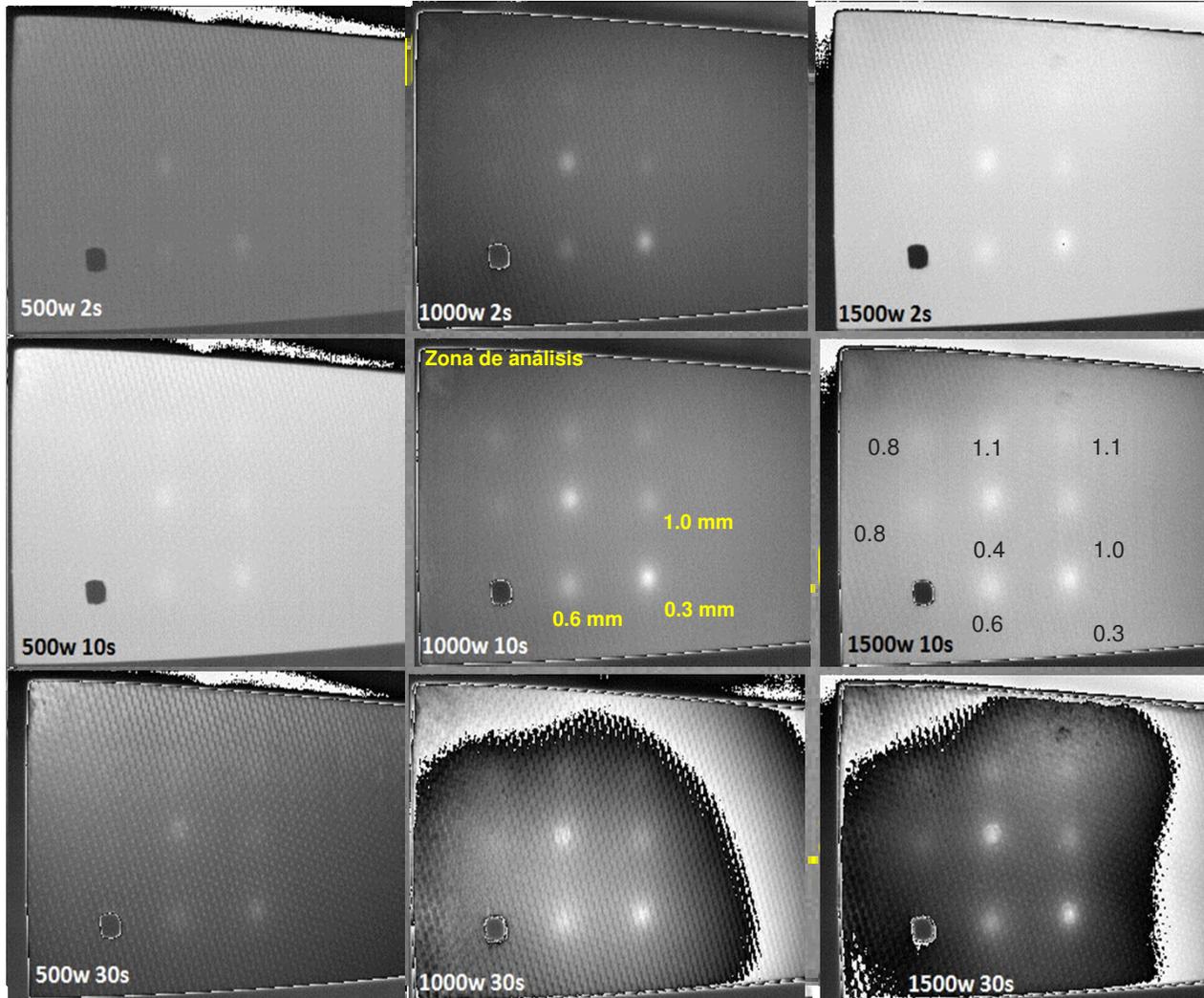
Selección de la mejor imagen en cada secuencia para los datos (valor C) del DOE.

# Observaciones



## Evaluación visual por el contraste

Se observaron las indicaciones con 500, 1000 y 1500w a 2, 10 y 30s



A mayor potencia (W) y mayor exposición térmica o excitación más energía absorbida por la muestra (Q), por lo tanto, se observó un diferencial de temperatura ( $T - T_a$ ) mayor en 1500W 30 s que 500W 2s. El punto se ve más blanco.

Este  $\Delta T$  ( $T - T_a$ ) está en proporción inversa con el espesor x (profundidad).

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



# Contraste (valor C)

## Determinación del valor de intensidad y contraste C

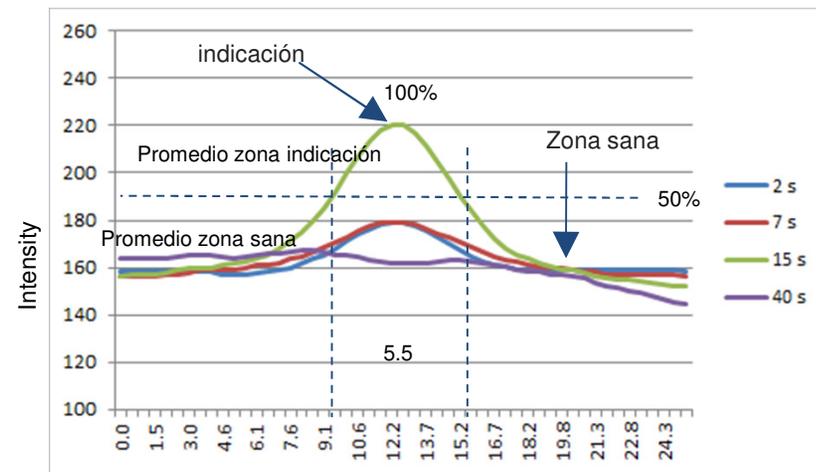
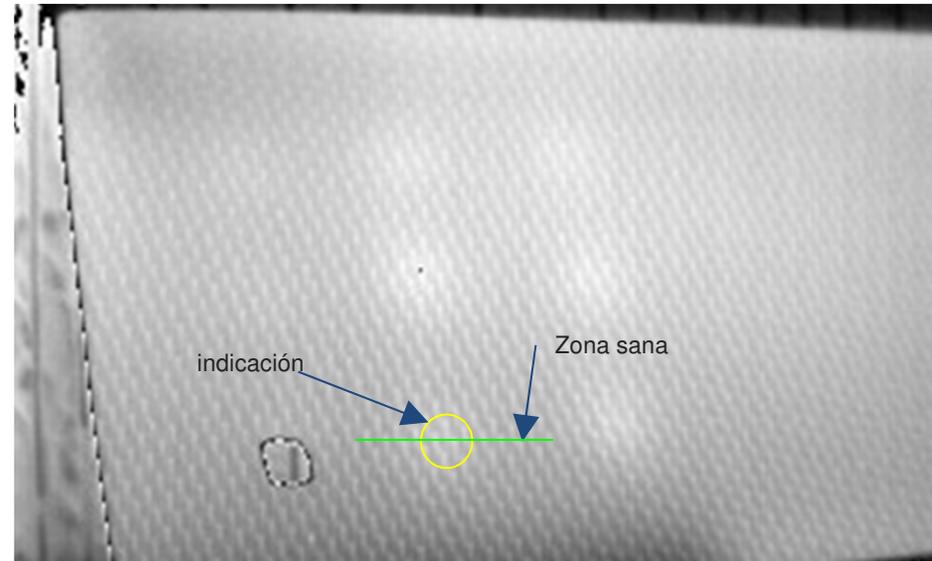
- **Intensidad** = profundidad en la escala de grises de 8 bits, valor entre 0 y 256 que representa el tono de gris (0 negro, 256 blanco)  $2^8$

A cada pixel le es asignado un valor entre 0 y 256 para representar el tono de gris.

- **Contraste**= resta del valor promedio de la intensidad de una zona con falla menos el de una sana.

$$C = I_{promf} - I_{proms}$$

- **Indicación** = señal (intensidad) proveniente de una discontinuidad, delaminación, falla, anomalía, etc.



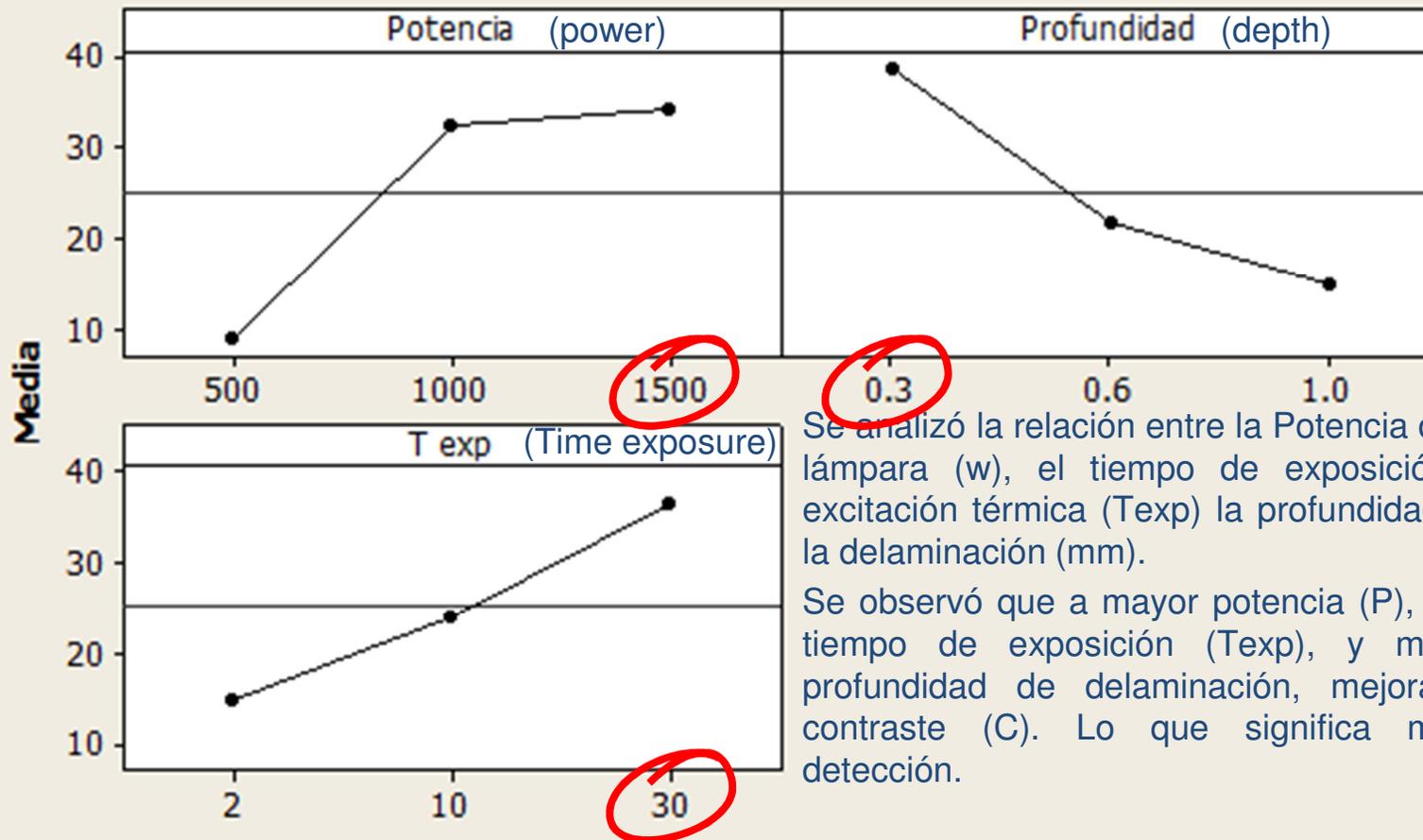


# Análisis DOE Observación de gráficas

para 500, 1000 y 1500w a 2, 10 y 30 segundos.

**Gráfica de efectos principales para C**

Medias de datos



Se analizó la relación entre la Potencia de la lámpara (w), el tiempo de exposición o excitación térmica (Texp) la profundidad de la delaminación (mm).

Se observó que a mayor potencia (P), más tiempo de exposición (Texp), y menor profundidad de delaminación, mejora el contraste (C). Lo que significa mejor detección.

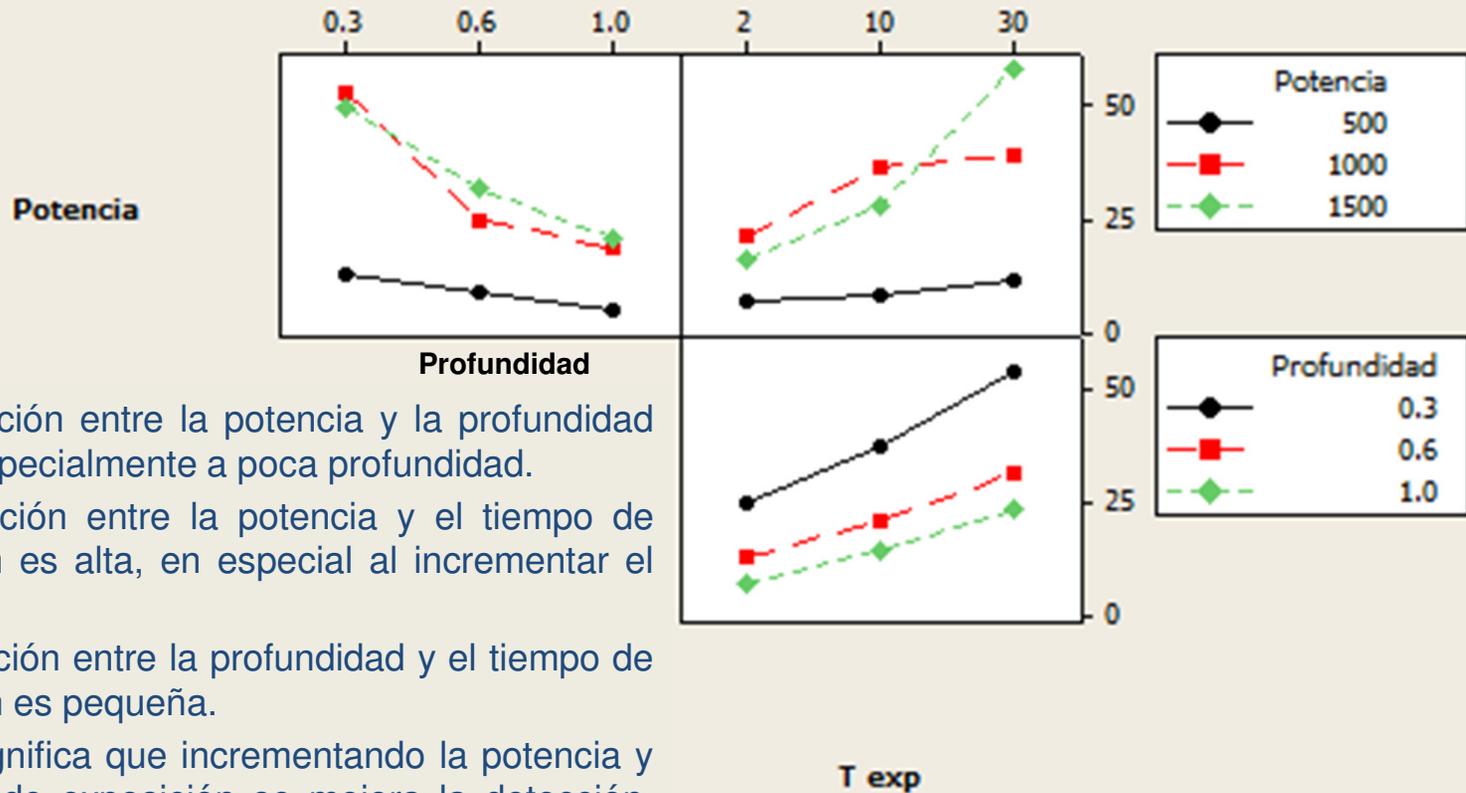


# Observación de gráficas



## Análisis DOE

**Gráfica de interacción para C**  
Medias de datos



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

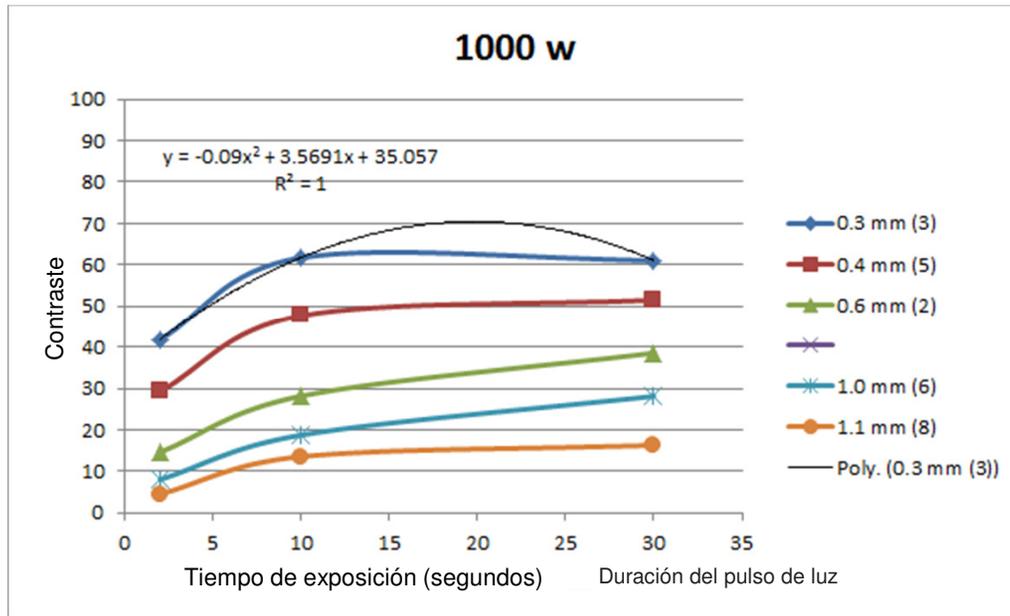
La interacción entre la potencia y el tiempo de exposición es alta, en especial al incrementar el tiempo.

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

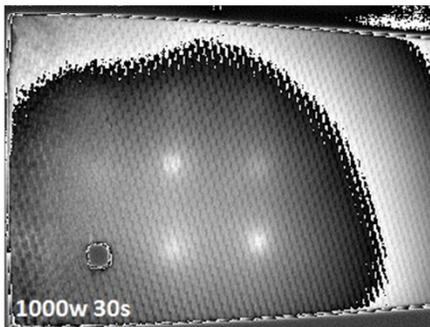
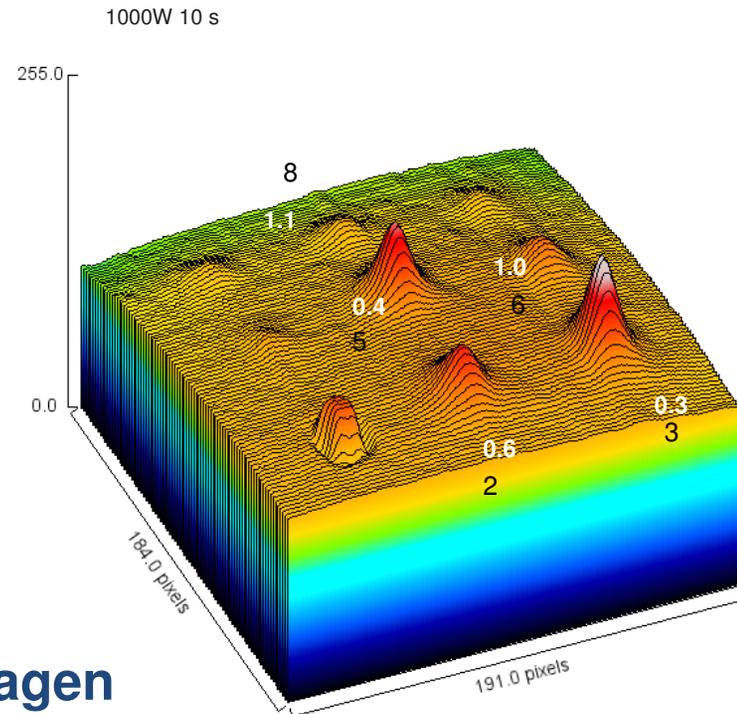
Lo que significa que incrementando la potencia y el tiempo de exposición se mejora la detección, pero la detección no incrementa mucho si solo se incrementa el tiempo de exposición sin incrementar la potencia.

# Resultados

## Detectabilidad vs. Profundidad



La profundidad de la indicación tiene relación directa con la intensidad, las más superficiales aparecen más altas en la escala



## Saturación de imagen

La duración del pulso (energía) ayuda a diferenciar las distintas profundidades, pero tiene un punto de saturación (30 segundos) donde el calentamiento en la superficie no es uniforme y resulta perjudicial



# ★ Resultados (Validación de la metodología)

## Comparación con Ultrasonido por inmersión

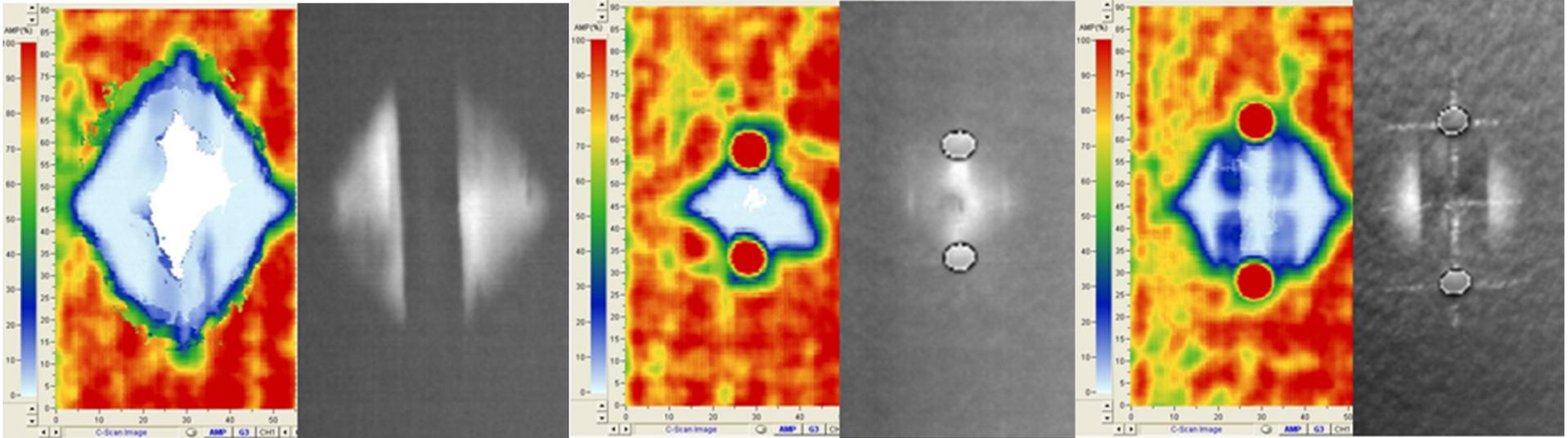
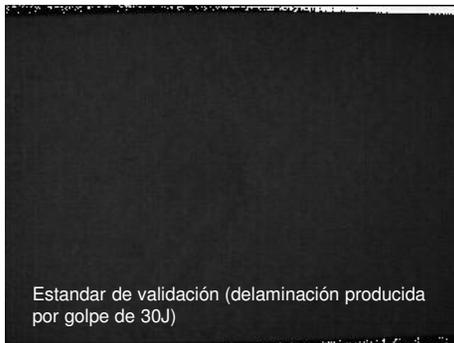


Fig. X C-scan images of composite samples subjected to impact at 30 J; CFRP multidireccional (0°/90°)

Fig. X C-scan images of composite samples subjected to impact at 20 J; CFRP multidireccional (0°/90°) with stress raisers at 12 mm.

Fig. X C-scan images of composite samples subjected to impact at 20 J; CFRP multidireccional (0°/90°) with stress raisers at 18 mm.



### Técnica rápida y sin contacto

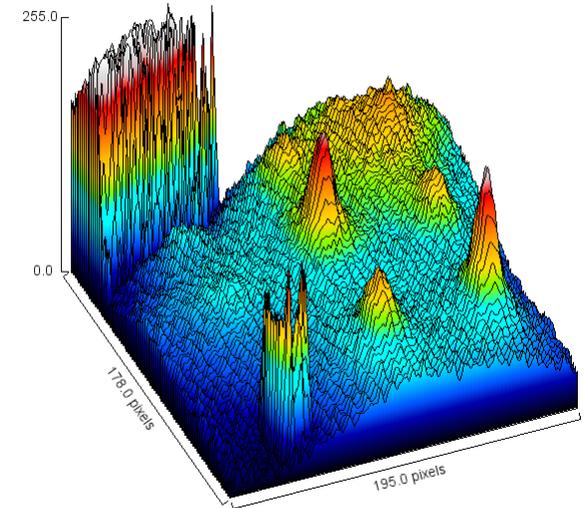
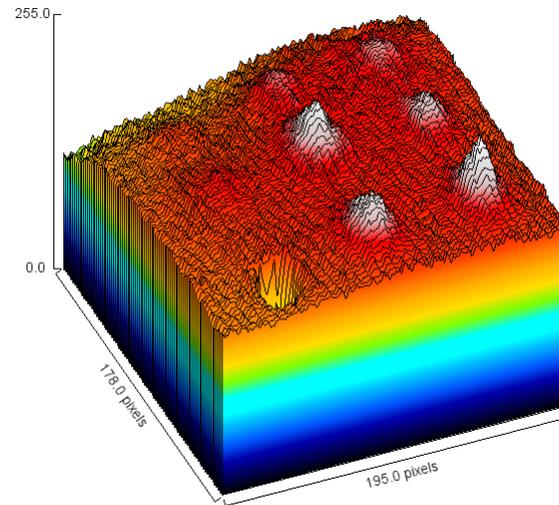
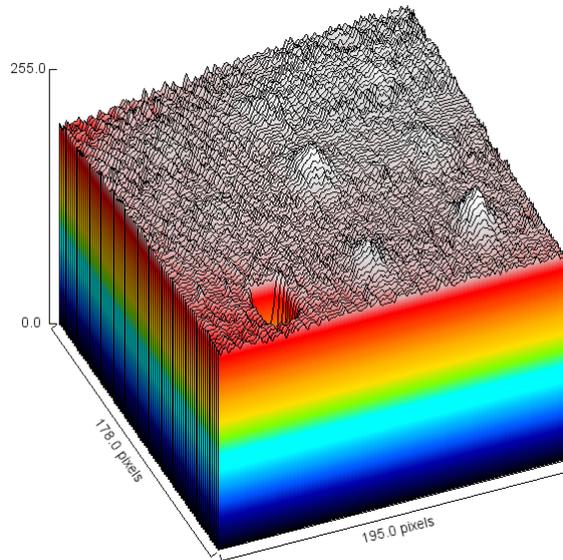
Aproximadamente 5% a 20% del tiempo destinado a UT.  
El ultrasonido es más preciso y la termografía se utiliza para la inspección superficial y exploración.

# Resultados (Mejor detectabilidad con el procesamiento de imagen)

## Plot Profile

1500 W

Representación gráfica de la intensidad en XYZ



Texp  
(segundos)

2

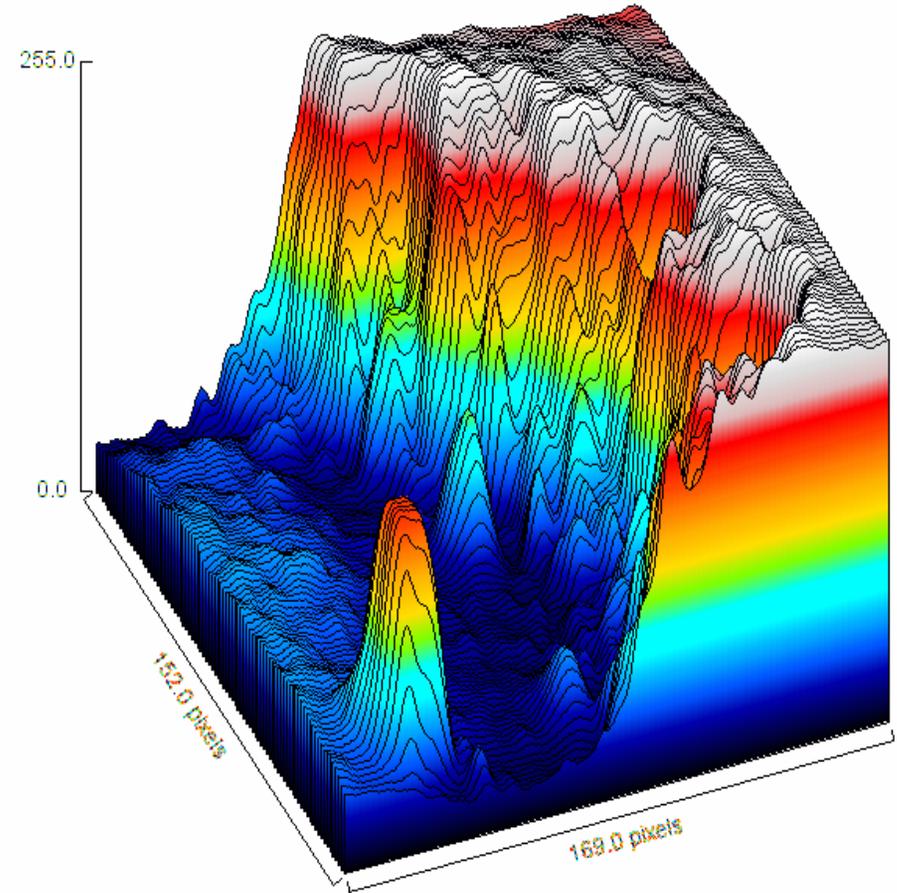
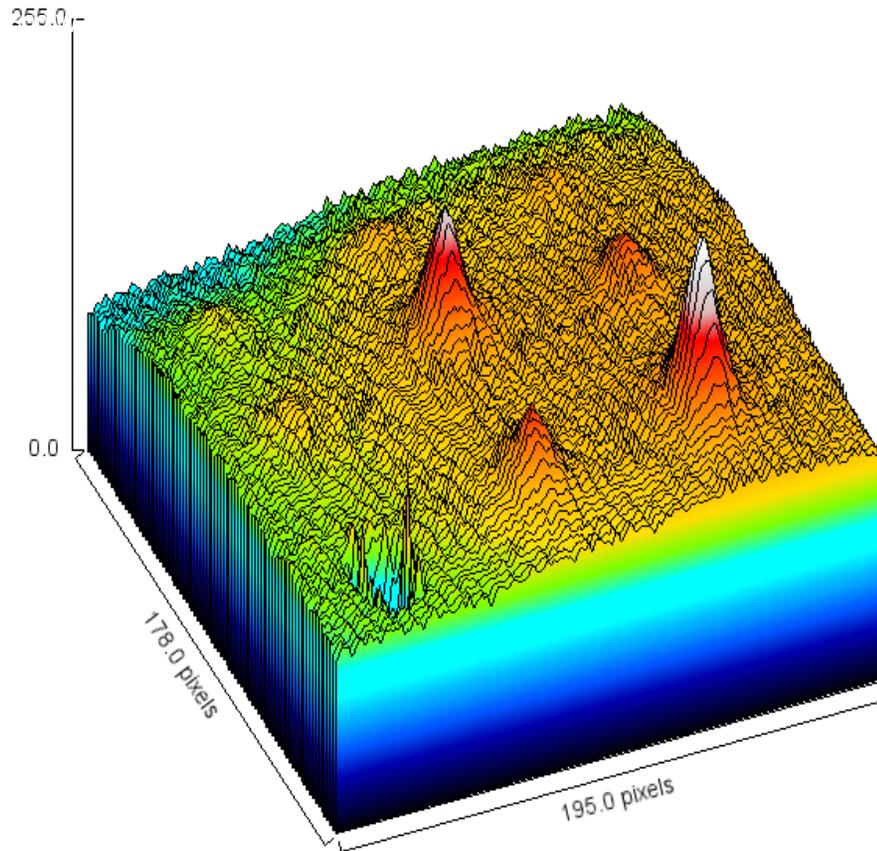
10

30

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

# Resultados (Mejor detectabilidad con el procesamiento de imagen)

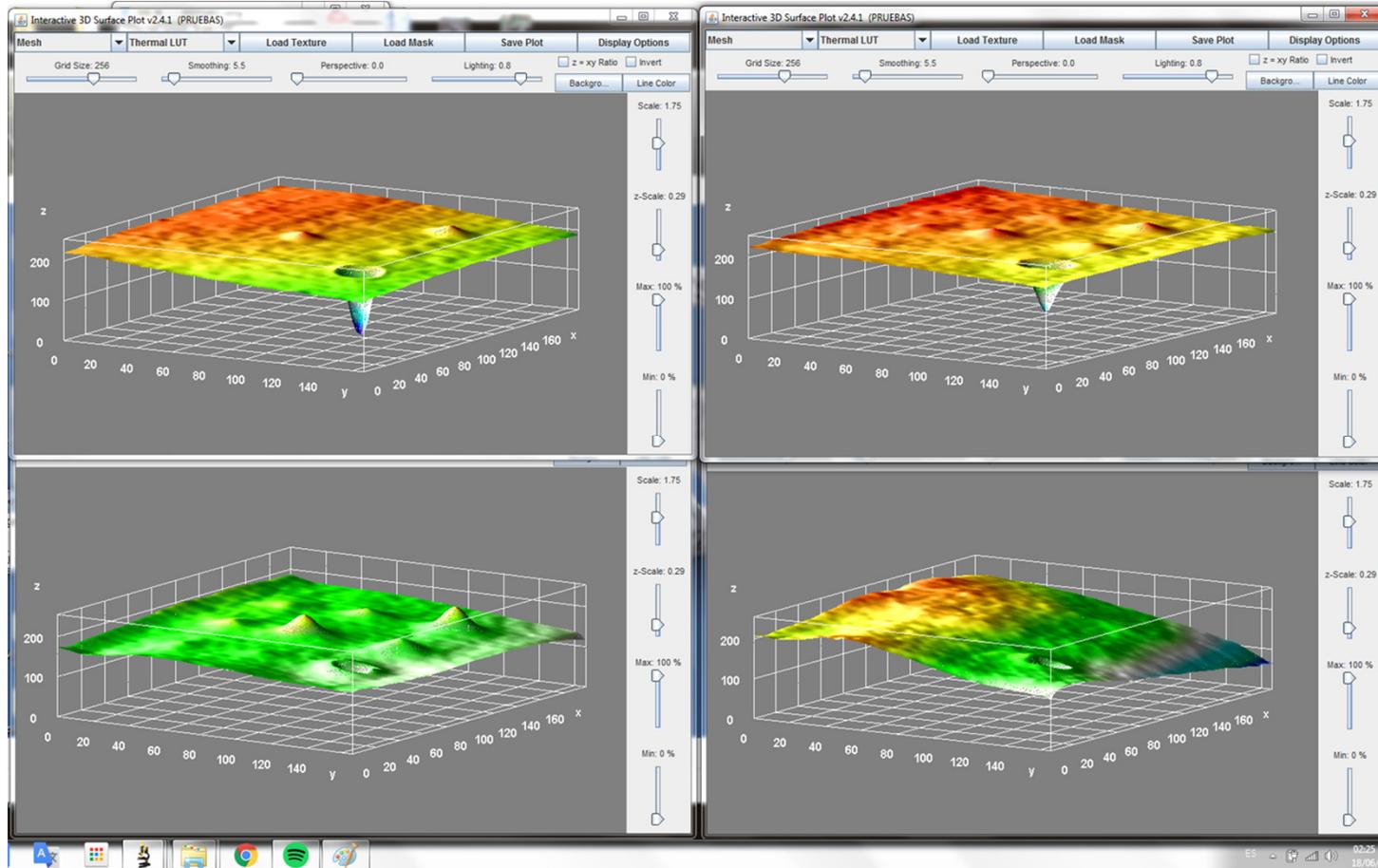
## Filtros



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

# Resultados (Mejor detectabilidad con el procesamiento de imagen)

Procesamiento de Imágenes (Ploteo Tridimensional) 3D Plot

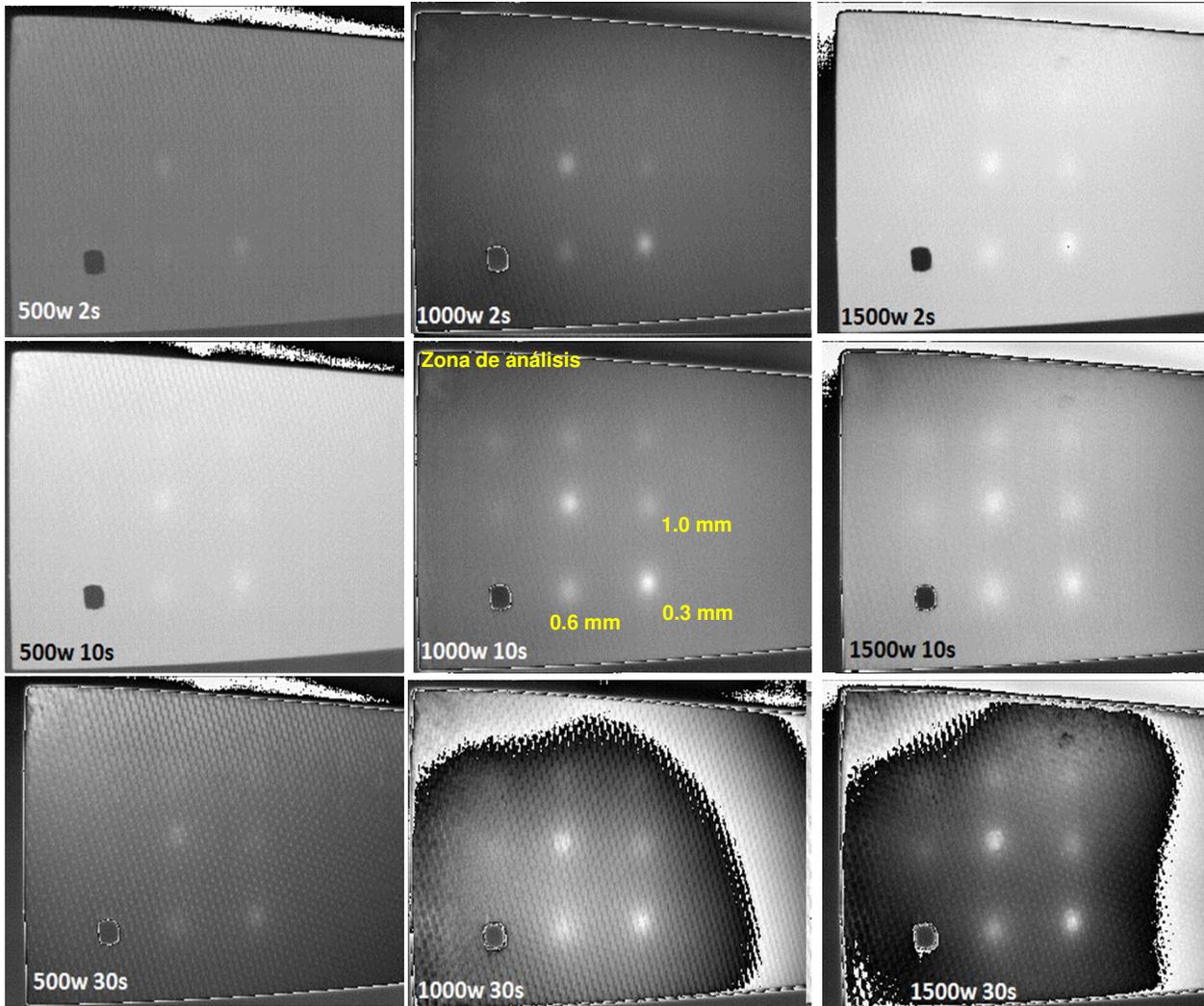


Las ventajas del ploteo de perfil con filtro se ven mejoradas con un ploteo tridimensional al poder manipular las vistas y asignando color a cada valor de intensidad con una paleta de color.

# Conclusiones



Al aumentar la Potencia y el Tiempo de exposición, aumenta la Detectabilidad.



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.

Fondo uniforme e indicaciones claras, a diferencia de 1000 W 30 s y 1500 W 30 s donde el fondo no permite distinguir e interpretar correctamente las indicaciones.



# Conclusiones

## Configuración óptima de inspección

### 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**
- Espectro de banda = **3-5  $\mu\text{m}$**
- Rango térmico = **-20 a 350 °C**
- Adquisición de imagen = **1 imagen** antes y de **0.5 segundos** después del pulso **100 fps** en mapa de bits

### De la excitación térmica (Pulso de Luz Halógena)

- Distancia (de la fuente al objeto) = **35 cm** (evitar ángulos de reflejo con la cámara)
- Energía = **1000 W**
- Duración = **2-10 segundos**
- Rango de detección = **hasta 1.1 mm de profundidad**
- Tamaño mínimo de detección = **2 mm  $\phi$**



### De la probeta o muestra

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

### Del hardware y software

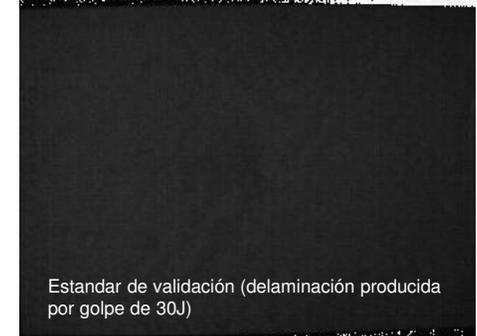
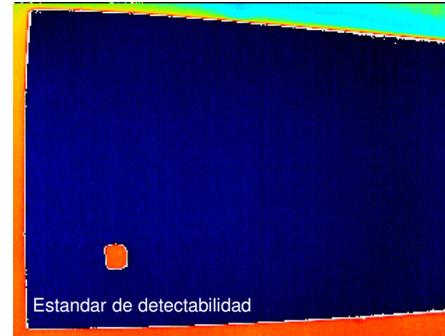
- Lap top 8 Gig RAM core i5 o superior
- Adquisición = 100 fps, puerto Ethernet IP **169.254.99.254** (Pleora Technologies Inc. Coyote iPORT 3.3.3 (build 1743) GigE Vision® ) Image /320X240; pixel /grayscale 8-bit
- Cámara = FLIR SC4000 MWIR InSb
- Reflector halógeno 1000 W (20 MR16 de 50W)

# Conclusiones

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.



Cámara Infrarroja

Lámparas halógenas

Estandar de detectabilidad y/o validación

Pulso de luz de 10 segundos

Imagen en 3D del Estándar de validación

Arreglo de lámparas halógenas

Delaminación

Trefl=20 Tatm=20 Do=2.0 FOV 23  
10/04/12 3:40:40 PM +0 - +500 e=0.96 °C

# Bibliografía

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.
2. 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.
4. 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.
9. 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

# Gracias por su atención.

gramses@cidesi.edu.mx

Agradecimiento al M.C. José Núñez, al  
M.C. Jaime González y al resto del  
Equipo del laboratorio de END.

Que el Señor te bendiga y te proteja; que el Señor te  
mire con agrado y te muestre su bondad; que el señor  
te mire con amor y te conceda la paz.

Números 6:24-26