

# SIMULACIÓN NUMÉRICA Y ESTUDIO PARAMÉTRICO DE UN MÉTODO TÉRMICO PARA LA DETECCIÓN DE DAÑOS EN METALES Y MATERIALES COMPUESTOS TIPO CARBONO-CARBONO

Arlex Chaves<sup>1</sup>, Sandra Coutin<sup>2</sup> y Frederick Just<sup>2</sup>

**Resumen** Esta investigación se propuso estudiar la factibilidad de aplicar un método térmico como alternativa para detectar daños en materiales compuestos tipo Matriz de Carbono-Fibra de Carbono. Se estudian los cambios mostrados en los perfiles de temperatura cuando se hace pasar un flujo de energía calorífica a través de un material. Estos cambios se usan como criterio para localizar el daño. Usando el método de elementos finitos se modelaron placas de aluminio y material compuesto, lográndose validar el método analíticamente. Se evaluó la influencia de varios factores en la sensibilidad del método, tales como: la profundidad del daño, el intervalo de detección del daño y las dimensiones geométricas del daño.

**Palabras Claves:** detección de daño, elementos finitos, ensayos no destructivos, materiales compuestos, métodos termográficos.

## NUMERICAL SIMULATION AND PARAMETRIC STUDY OF A THERMAL METHOD FOR DAMAGE DETECTION IN METALS AND CARBON-CARBON TYPE COMPOSITE MATERIALS

**Abstract:** This research work studied the viability of applying a thermal method to detect damages in metals and carbon-carbon type composite materials. Relevant changes in the temperature profiles were used as the main criterion when a heat flux travels through the material. Aluminum and composite plates were numerically simulated using the finite elements method. The influence of various parameters in the thermal method sensitivity was also evaluated, parameters such as: the damage depth, time interval for the damage detection and geometric dimensions of the damage.

**Keywords:** composite materials, damage detection, finite element, non-destructive tests, thermography based methods.

### INTRODUCCIÓN

Los métodos no destructivos son todos aquellos métodos de prueba usados para examinar un objeto, material o sistema sin deteriorar su utilidad en el futuro. Son usados para detectar variaciones en las propiedades de las estructuras, cambios diminutos en superficies finas, fallas u otras discontinuidades físicas. Estos métodos han logrado gran aceptación dentro del mercado de los materiales tanto metálicos como compuestos, ya que con su uso se asegura la integridad del material, se evitan fallas previniendo accidentes y se reducen costos de manufactura. La termografía está considerada dentro de una de las categorías básicas de los métodos de prueba no-destructivos. Se distingue por utilizar como fuente de energía radiación térmica sobre el espécimen de prueba, para luego a partir del perfil de enfriamiento (recuperado por medio de una cámara termográfica), interpretarlos para detectar daños en el material (The American Society for Non-destructive Testing, 2003; Mendelis, 1994).

Esta técnica presenta mayor utilidad en materiales compuestos, debido a que éstos son sensibles a impactos que pueden producir daños internos invisibles sobre la superficie, mientras los materiales metálicos son más sensibles a

---

<sup>1</sup> Estudiante Graduado, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, PR 00681-9045. arlexchaves@hotmail.com

<sup>2</sup> Catedrático, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, PR 00681-9045. fjust@me.uprm.edu

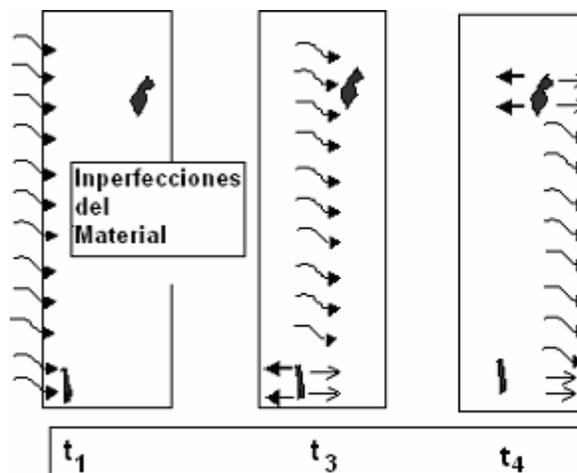
corrosión y a fallas por fatiga. En el estudio sobre la viabilidad de estos métodos, la modelación mediante métodos numéricos ofrece gran ayuda en la investigación de los efectos de la geometría del daño sobre la detección y en el diseño de la configuración experimental de la prueba. La simulación numérica también permite responder preguntas surgidas a lo largo de la experimentación, como lo es el definir de forma precisa el límite de detectabilidad de la prueba y el campo de aplicación de la misma (en cuanto a materiales se refiere).

En estudios registrados en la literatura sobre termografía transitoria se han realizado trabajos de modelación con el objetivo de aumentar el conocimiento del fenómeno físico de la transferencia de calor y de resolver el problema de falta de especímenes con determinados tipos de daños para el conocimiento de algunos efectos específicos. Dentro de estos se destaca el realizado por Dutton (1996), quien utilizó diferencias finitas para modelar la ecuación de difusión de calor en una dimensión. Se estudió los efectos producidos por bolsas de aire o cuerpos extraños en la conductividad y difusividad térmica del material compuesto vidrio/ poliéster, cuando éste es expuesto a una fuente de calor radiante. También se ha utilizado termografía para detectar fallas en especímenes de concreto (Shih y Hsin, 2000), utilizando el mismo principio y procedimiento experimental utilizado para materiales metálicos y compuestos. En este trabajo se utilizó un programa comercial de elementos finitos. Toda la modelación fue hecha en dos dimensiones. La distribución de temperatura obtenida en la modelación concordó bien con los resultados experimentales. Dentro del trabajo realizado por Hobbs y Temple (1993) se creó un programa de elementos finitos en 1-D y 2-D, que puede ser corrido en una computadora personal y diseñados para ser fáciles de usar y controlar. Esto permitió su implementación en el trabajo de campo (por ejemplo, en el entendimiento de algunas imágenes).

En el presente trabajo se pretende realizar una modelación más completa del método de detección de daños en material de aluminio y en un material compuesto tipo Fibra de Carbono Reforzada (“CFRP” por sus siglas en inglés), utilizando el programa comercial para elementos finitos (EF) Algor™.

## PRINCIPIO DEL MÉTODO TÉRMICO PARA DETECTAR DAÑO

El principio de funcionamiento del método se basa en el efecto producido en el perfil de temperatura del material cuando éste es expuesto a un flujo de calor por un periodo de tiempo, sobre una de sus superficies. Cuando el material es homogéneo (sin daño), la energía calorífica depositada se difunde hacia la superficie posterior, a través del espesor del material en forma uniforme. Cuando el material presenta una falla (material no-homogéneo), ésta actúa como una resistencia térmica a la energía difundida. Esta situación produce un aumento de temperatura, justamente encima del defecto, alterando así el perfil de temperatura de la superficie que recibe el flujo de energía calorífica, como se resume en la Figura 1.



**Figura 1: Efecto del daño en difusión de la energía térmica a través del material (Bates y Smith, 2000).**

Este efecto permitirá detectar el daño cuando el cambio (salto) en el perfil de temperatura alcance un nivel perceptible por un sensor de temperatura. Esto se esquematiza en la Figura 2.

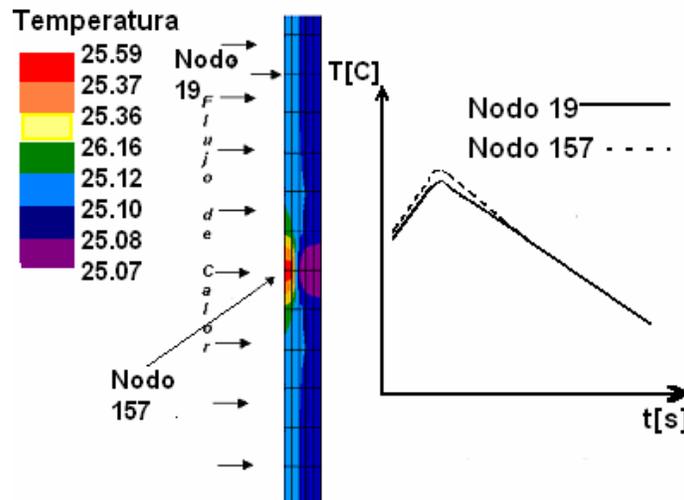


Figura 2: Perfil de temperatura para la sección transversal de una placa con daño.

### MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

El modelo de EF es usado para obtener una aproximación del modelo matemático que describe la transferencia de calor por conducción en dos dimensiones en estado transitorio. Los elementos finitos son formas geométricas simples en dos dimensiones que aproximan el dominio y la solución. Así, en un problema en dos dimensiones no sólo se aproxima la solución del problema, sino también el dominio, por medio de una malla de elementos finitos. Esta malla consiste de elementos en una, dos o tres dimensiones que permitan la derivación de funciones de interpolación únicas (Reddy, 1984).

Para una placa plana (dos dimensiones), la ecuación que describe la transferencia de calor en estado transiente, está dada por la ecuación de difusión de calor:

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - f(x, y) = 0 \quad (1)$$

donde  $T$  es la temperatura,  $k_x$  y  $k_y$  son las conductividades térmicas en las direcciones  $x$  y  $y$ , respectivamente  $\rho$  es la densidad,  $C_p$  es el calor específico, y  $f$  es la generación interna de calor por unidad de volumen (en  $W/m^3$ ). Para una frontera convectiva, la condición de frontera natural es un balance de energía, a través de la frontera debido a la convección y/o conducción.

$$k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \beta (T - T_\infty) = \hat{q}_n \quad (2)$$

En este punto sólo se muestra la forma final de la ecuación del modelo elemento finito, la cual se logra después de obtener la forma débil de la ecuación diferencial, y de utilizar un esquema de integración de diferencias finitas para aproximar la derivada del tiempo.

$$([M] + \Delta t(I - \alpha)[K] + \Delta t(I - \alpha)[H])\{T\}_{s+1} = ([M] - \Delta t \alpha [K] - \Delta t \alpha [H])\{T\}_s + \Delta t(I - \alpha) (\{Q_i\}_{s+1} + \{P_i\}_{s+1}) + \Delta t \alpha (\{Q_i\}_s + \{P_i^e\}_s) \quad (3)$$

donde  $\{T\}$  es el vector de temperaturas (perfil de temperaturas),  $[M]$  es la matriz asociada al término transitorio de la ecuación de difusión de calor,  $[K]$  = Matriz asociada al término de conducción de la ecuación de difusión de calor,  $[H]$  es la matriz de convección de calor,  $\{Q\}$  es el vector que da cuenta por los flujos de calor de los alrededores hacia el cuerpo o viceversa,  $\{P_i^e\}$  es un vector que resulta de la condición de frontera de convección y esta ligado a la temperatura de los alrededores,  $\Delta t$  = Incremento en el tiempo o tamaño del paso de integración en el tiempo. El valor del parámetro  $\alpha$  representa un esquema de integración en el tiempo. Un valor de  $\alpha = 1/2$  fue usado en este trabajo, lo cual corresponde al modelo de Crack-Nicholson.

## PARÁMETROS GENERALES DE LA SIMULACIÓN

Toda la modelación realizada en este trabajo fue hecha para placas de aluminio o de material compuesto de dimensiones 0.15 m x 0.15 m x 0.006 m, a menos que se especifique lo contrario.

Para la modelación en 2-D, se realizó una simulación perpendicular al plano de la superficie, por lo que la frontera de la malla es un rectángulo de 0.15m x 0.006m (que corresponde a la sección transversal de la placa). Para el caso de la modelación en 3-D, las dimensiones de las mallas son las mismas de la placa real (0.15 m x 0.15 m x 0.003 m).

Para la etapa de calentamiento, las placas son expuestas a un flujo de calor por una de sus superficies, por un período de tiempo de 5 segundos, luego del cual es interrumpido dando inicio al enfriamiento de la placa por convección. El valor del coeficiente de convección es de  $10 \text{ J s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ , valor que se asume permanece constante durante el análisis. Para efectos del análisis por EF, este comportamiento es manejado por curvas de carga (de calor o de convección) como las que se muestran en la Figura 3.

El factor mencionado en la Figura 3 se multiplica por el valor de flujo de calor ( $5000 \text{ J.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) o del coeficiente de convección durante todo el tiempo de cálculo y representa la magnitud y períodos de tiempo durante el cual son aplicados en el análisis. No se tuvo en cuenta dentro de la modelación las pérdidas de calor por radiación, debido a que las temperaturas a la que se realizaría la prueba en una situación real son bajas. Por tal razón las pérdidas por radiación son despreciables en comparación a las pérdidas por convección (Gil, 2002).

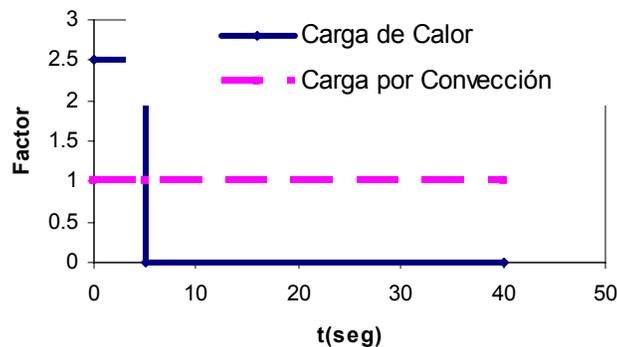


Figura 3: Curvas de carga de calor y de convección.

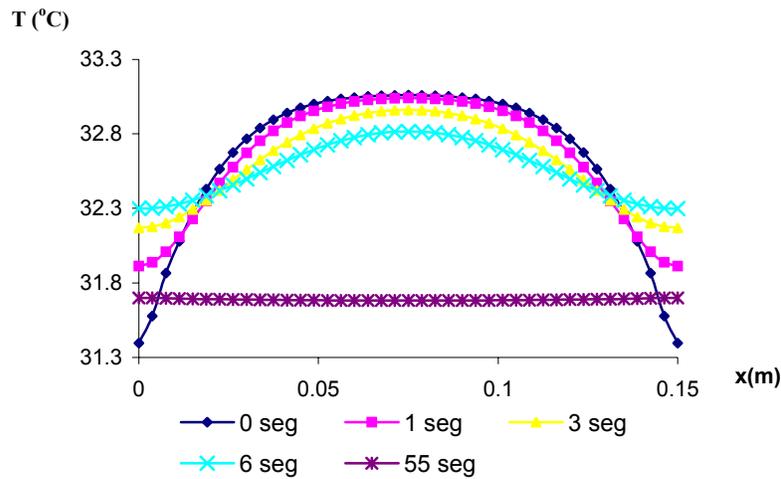
Tabla 1: Propiedades térmicas de materiales.

Material	Aleación de Aluminio	Fibra de Carbón Reforzada
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	2789	1550
Calor Específico J/(Kg.°C).	917.35	700
Conductividad Térmica J/(s.m.°C)	192.15	⊥ al plano 75 = al plano 275

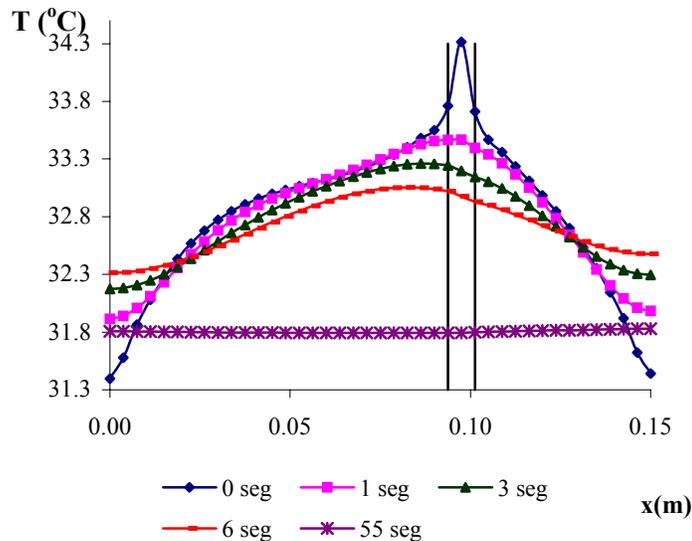
## VALIDACIÓN NUMÉRICA DEL MÉTODO (2D)

Para validar numéricamente el principio bajo el cual funciona el método de detección de daño, se modeló una placa sana y otra con daño. El material es aleación de aluminio AA 1100 H14, y los valores de las propiedades térmicas se muestran en la Tabla 1. En la modelación de la placa sana, se aplicó el procedimiento ya descrito y se utilizó un modelo en 2D. En los perfiles de enfriamiento obtenidos para la superficie que se muestran en la Figura 4 se puede notar que las

curvas de temperatura versus espacio en cualquier instante de tiempo, son simétricas respecto al punto  $x$  igual a  $0.075$  m que representa la mitad de la placa.



**Figura 4: Perfiles de enfriamiento a diferentes tiempos para una placa sana.**



**Figura 5: Perfiles de enfriamiento a diferentes tiempos para una placa con daño.**

La placa con daño es modelada en este caso bajo idénticas condiciones a la de la placa sana. El daño se simula dando valores de propiedades térmicas diferentes sobre los elementos que lo representan, y está ubicado dentro del espesor de la placa a una altura de  $9.4$  cm con un diámetro de  $7.5$  mm y profundidad de  $0.6$  mm desde la superficie que recibe el flujo de calor. En este caso a los elementos que simulan el daño les fueron dados propiedades térmicas para el aire a  $31.85$   $^{\circ}\text{C}$ . Los perfiles de temperatura corresponden a los nodos sobre la superficie expuesta al calor, y los daños están ubicados bajo ésta. En la Figura 5 se puede observar cómo cambia el perfil de temperatura para la placa con daño, aumentando la temperatura de los nodos ubicados sobre el lado derecho de  $x = 0.75$  m, región sobre la cual está ubicado el daño. También se observa que a medida que aumenta el tiempo de enfriamiento el perfil va recuperando su simetría, lo que indica que sólo dentro de un corto intervalo de tiempo, este efecto podrá ser registrado por un sensor de temperatura.

## CURVAS DE DETECTABILIDAD

Como herramienta para detectar la presencia del daño en el material, se generaron curvas de detectabilidad aprovechando las características de simetría de los perfiles de temperatura obtenidos para la placa sana. Estas curvas permiten el identificar anomalías en los perfiles de temperatura y, por consiguiente, el detectar el daño. Para el caso de la placa con daño que se muestra en la Figura 6, se dividió el perfil de temperatura en dos, una primera sección de la curva (perfil 1) que representa el lado sano y otra que representa el lado con daño (perfil 2). En la Figura 7 se presentan los dos perfiles de temperatura. Con el objeto de determinar la diferencia de temperatura producida por el daño entre lados simétricos de la placa, se restaron los valores de temperatura de los perfiles 1 y 2, de lo que se obtiene una curva de aumento de temperatura similar en forma a las de la Figura 8, que nos garantiza la presencia del daño y, dependiendo del tiempo de enfriamiento al cual hayan sido registradas las temperaturas, nos da también la ubicación. Otra ventaja de esta curva es que muestra la diferencia de temperatura máxima que se puede obtener por la presencia del daño, lo que permite predecir si el daño es o no detectable por una cámara termográfica (Technical Information Radiant Infrared Heating Theory & Principles, 2003).

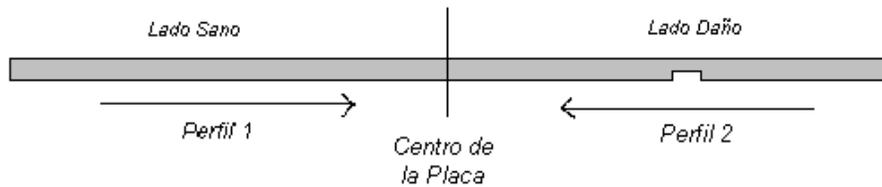


Figura 6: Esquema de la sección transversal de la placa y la forma en que se obtuvieron los perfiles de la figura 7.

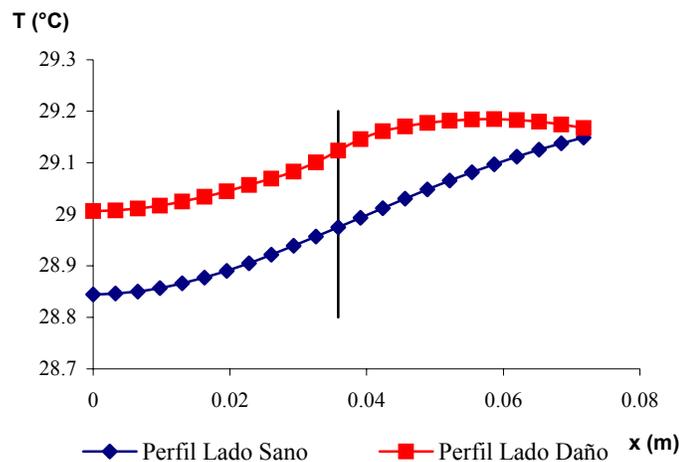


Figura 7: Perfiles para ambos lados de la placa de la Figura 6 para obtener la diferencia de temperatura entre lado con y sin daño.

## ESTUDIO DE PARÁMETROS QUE AFECTAN LA DETECCIÓN DE DAÑOS: INTERVALO DE DETECCIÓN DE DAÑO

En la validación del método se observó que los perfiles de enfriamiento muestran la presencia del daño durante un corto período de tiempo. Para obtener el tiempo estimado durante el cual se pueda detectar el daño después de la aplicación del calor, se realizó el análisis para una placa con un daño de 7.5 mm de diámetro y profundidad de 3mm. Se tomaron los perfiles de enfriamiento y a partir de éstos se obtuvieron las curvas de detectabilidad. Los perfiles de temperatura fueron tomados para 3, 5, 10, 15 y 20 segundos de enfriamiento, como se muestra en la Figura 8. La línea vertical indica la ubicación del daño. Se observa que el contraste de temperatura producido por el daño sólo es visible dentro de un intervalo de tiempo aproximado de 3 a 5 segundos de enfriamiento para esta profundidad en particular.

## PROFUNDIDAD CRÍTICA DEL DAÑO

La profundidad del daño fue identificada como un parámetro que puede afectar los límites de detectabilidad del método. La detectabilidad del daño está sujeta a que se produzca una diferencia de temperatura igual o mayor a  $0.01^{\circ}\text{C}$  (que es la resolución de la cámara termográfica). Se obtuvieron perfiles de enfriamiento para profundidades de 1.2, 3, 3.6 y 4.2 mm. Los perfiles de temperatura fueron tomados cinco segundos después de que se inició el enfriamiento, para todas las profundidades, y de nuevo a partir de éstas se obtuvieron las curvas de detectabilidad para diferentes profundidades. La Figura 9 muestra que hasta una profundidad de 3.6 mm se alcanza a distinguir un ligero cambio en el perfil de temperatura. Basados en el hecho que la diferencia de temperatura entre ambos lados es mayor a  $0.1^{\circ}\text{C}$ , se puede decir que el daño es percibido hasta una profundidad de 3.6 mm. La profundidad de 4.2 mm estaría en el límite de percepción por parte de la cámara, y a profundidades mayores a 4.2 mm sería muy difícil poder predecir la presencia de un daño ya que la diferencia de temperatura sólo alcanza  $0.05^{\circ}\text{C}$ .

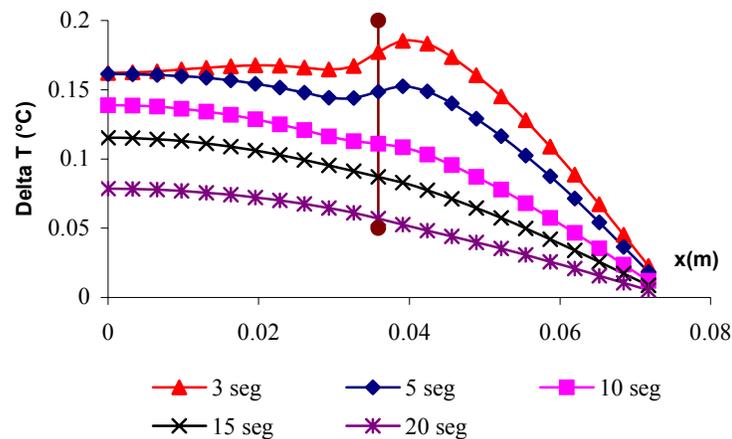


Figura 8: Curvas de detectabilidad para una profundidad fija a diferentes tiempos de enfriamiento.

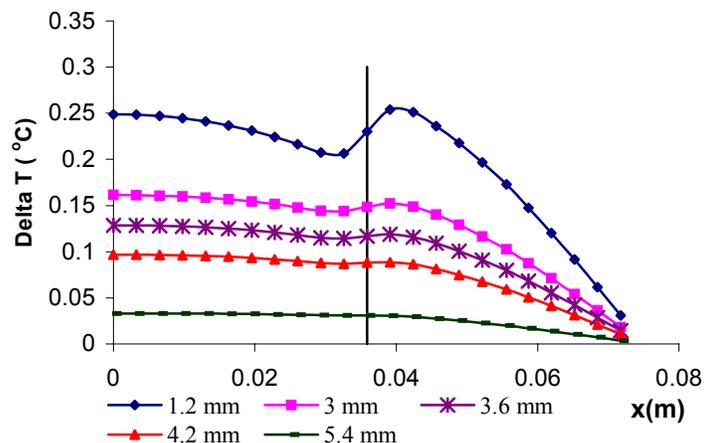
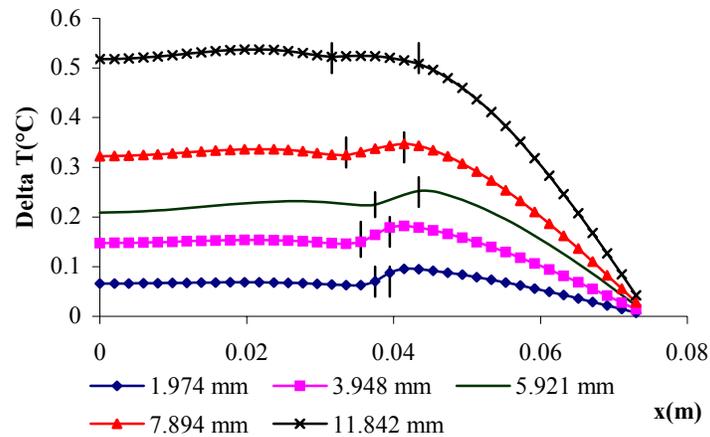


Figura 9: Curvas de detectabilidad para un tiempo fijo ( $t=5$  seg.) y diferentes profundidades de daño.

## DIÁMETRO DEL DAÑO

Otra pregunta que ha surgido a lo largo de la experimentación del método (Hobbs y Temple, 1993), es el efecto del diámetro del daño en su detección. Para responder a esta pregunta se modelaron varios casos para la placa de aleación de aluminio con un daño de profundidad 1.2 mm en uno de sus extremos. La profundidad del daño fue mantenida

constante, y se varió únicamente el diámetro a valores de 1.97, 3.95, 5.92, 7.89 y 11.84 mm. Los datos de temperatura fueron tomados para un tiempo de 3 segundos después de iniciado el enfriamiento. Las curvas obtenidas para cada diámetro se muestran en la Figura 10. Las líneas verticales que cruzan cada curva, representan el diámetro del daño bajo el cual fueron modelados.

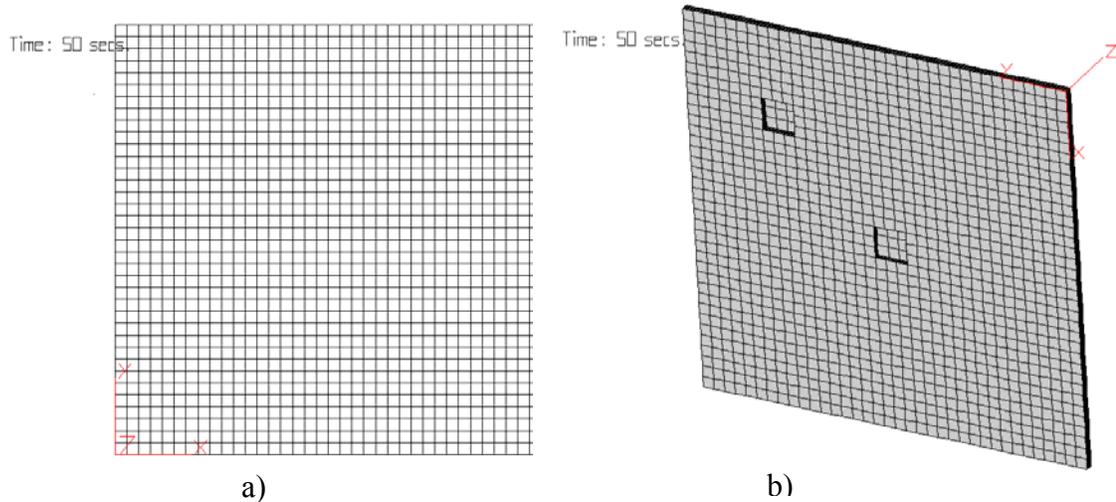


**Figura 10. Curvas de detectabilidad para una placa con daño a una profundidad de 1.2 mm, tiempo de 3 segundos y diferentes diámetros de daño.**

De estas curvas se puede observar que a medida que aumenta el diámetro del daño, las curvas se desplazan a temperaturas más altas, hecho relacionado, con el principio de conservación de energía, que implica la concentración de una cantidad fija de energía sobre placas de distintas masas. Además, con el aumento del diámetro, disminuye la posibilidad de una ubicación más precisa, debido a que como se observa en las curvas, para los diámetros mayores el pico de máxima temperatura que precede al daño prácticamente desaparece, disminuyendo la posibilidad de detección de alguna diferencia en temperatura por la cámara termográfica.

### MODELACIÓN EN TRES DIMENSIONES (3-D)

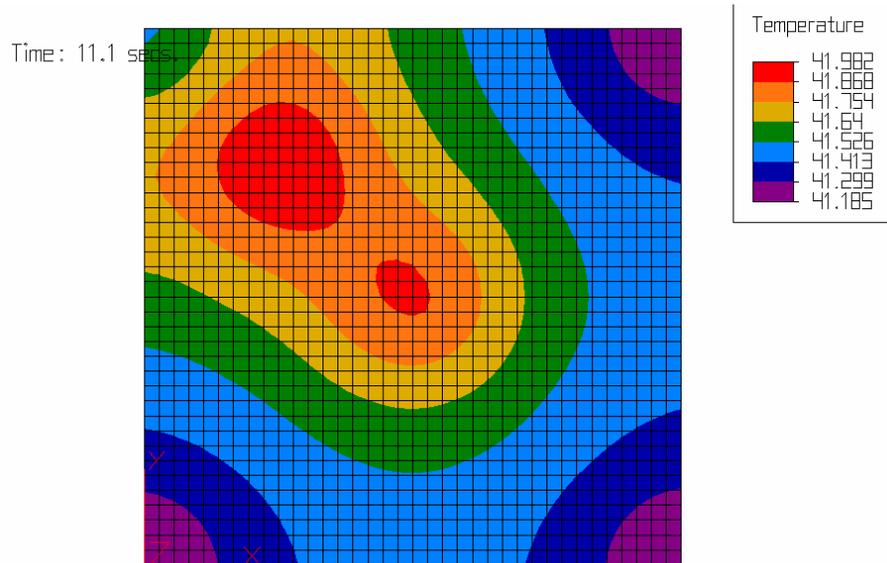
Para la modelación en 3-D se utilizó elementos tipo sólidos “bricks” (ladrillos). Para el caso en particular en el que se modeló una placa con dos daños en total se usaron 7695 elementos y 9547 nodos. Esta placa se muestra en la Figura 11.



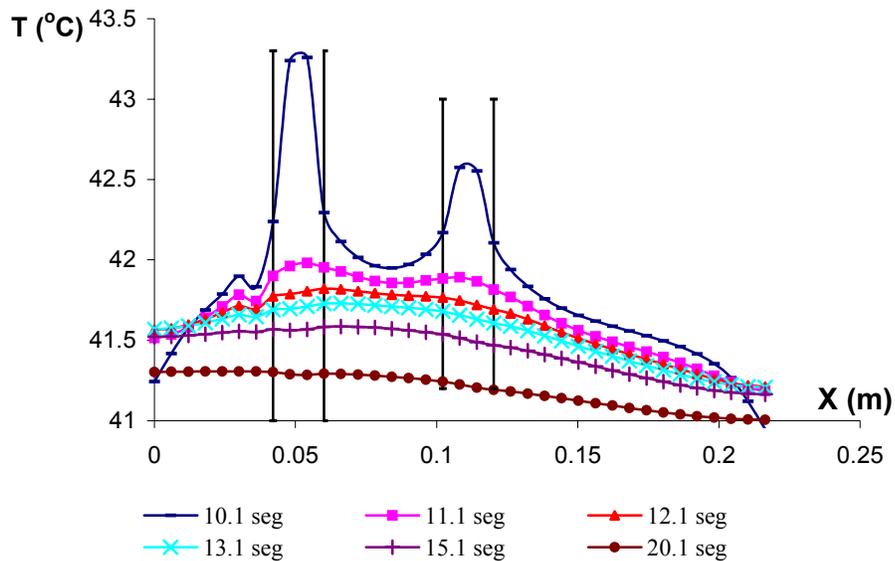
**Figura 11: Malla para placa de aleación de aluminio modelada por EF en 3-D. a) Lado que recibe el flujo de calor. b) Lado que muestra los dos daños por orificios de fondo plano.**

Los perfiles de temperatura obtenidos ratifican lo que se encontró con los modelos en 2-D y muestran con mayor claridad los efectos térmicos producidos por el daño sobre la superficie que recibe el flujo de calor. La Figura 12 muestra

un perfil de temperatura de la placa en la Figura 11. Además, los resultados en 3-D dan una mejor idea de los perfiles de temperatura que se deben esperar en los termogramas para diferentes casos de daños.



**Figura 12: Perfil de temperatura obtenido por modelación en EF en 3-D para una placa con dos daños.**



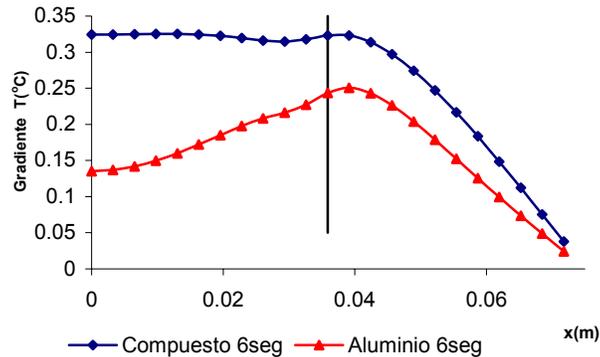
**Figura 13: Perfil de temperatura trazado sobre la línea diagonal de la Figura 12 para diferentes tiempos de enfriamiento.**

La Figura 13 muestra el perfil de temperatura sobre una línea diagonal de la placa, en la cual se encuentran dos daños, uno ubicado en el extremo superior izquierdo de la diagonal (con una profundidad de 0.5 mm) y el otro en el centro de la diagonal (de 1 mm de profundidad). Las líneas horizontales representan el lugar donde se han hecho los orificios. De nuevo se nota que un instante después de terminado el calentamiento, el daño puede ser claramente observado: esta curva fue tomada 0.1 segundos después de iniciado el tiempo de enfriamiento.

### MODELACIÓN DE DAÑOS EN UN MATERIAL COMPUESTO

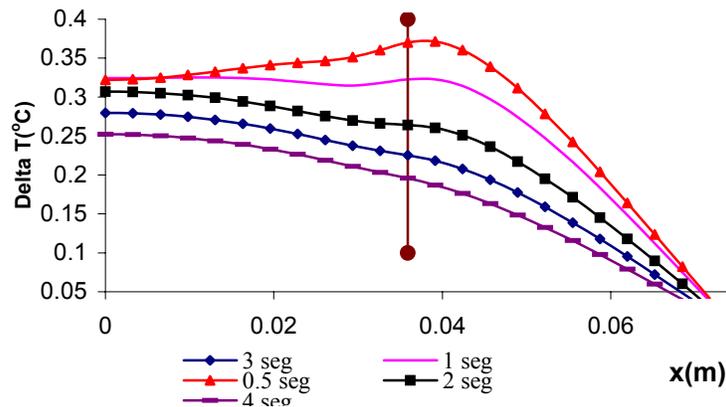
El material compuesto modelado es del tipo matriz de carbono y fibra de carbono (CFRP), y para modelarlo se tuvo en cuenta que es un material anisotrópico. La Tabla 1 muestra la conductividad térmica en dos direcciones ortogonales. Esta simulación se realizó bajo las mismas condiciones generales de la modelación en 2D.

En la Figura 14 se comparan las curvas de detectabilidad para la placa de aleación de aluminio y de material compuesto para un tiempo de enfriamiento de 1 segundo. Se observa que la curva para el material compuesto no permite predecir una ubicación aproximada del daño, a diferencia de la curva para la aleación de aluminio, ya que la primera no presenta un pico perceptible sobre la ubicación del daño. Este efecto es producido por el hecho de que la conductividad térmica en dirección perpendicular al plano del material compuesto es baja en comparación a la de la aleación de aluminio. Esto permite inferir que el período de tiempo para el enfriamiento durante el cual se podría registrar el daño por medio de la cámara termográfica es menor para el material compuesto que para la aleación de aluminio.



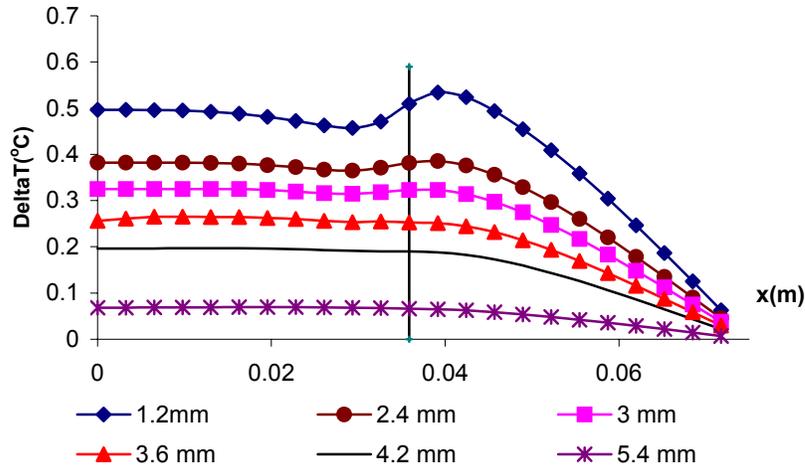
**Figura 14: Curvas de detectabilidad para material compuesto y aleación de aluminio obtenidas bajo idénticas condiciones de modelación.**

La Figura 15 muestra las curvas sólo para el material compuesto, para una profundidad del daño de 3mm y diferentes tiempos de enfriamiento. Se detecta un pico en el perfil de temperatura a un tiempo de 1 segundo de enfriamiento para el material compuesto. Esto representa una dificultad mayor al tratar de ubicar el daño experimentalmente.



**Figura 15: Curvas de detectabilidad para placa de material compuesto, para diferentes tiempos de enfriamiento.**

En la modelación realizada para determinar el límite de detectabilidad con respecto a profundidad (para el material compuesto) la ubicación, diámetro y profundidades del daño son las mismas que las modeladas en la placa de aleación de aluminio. Las placas de nuevo fueron sometidas a calentamiento por espacio de 5 segundos, después de los cuales se tomaron los perfiles de enfriamiento. A diferencia del análisis hecho en la aleación de aluminio, en este caso se comparó los perfiles de temperatura a un tiempo de 1 segundo después de iniciado el tiempo de enfriamiento. Las curvas de detectabilidad obtenidas se muestran en la Figura 16.



**Figura 16: Curvas de detectabilidad para una placa de material compuesto con daño a diferentes profundidades y tiempo de enfriamiento  $t=1$  seg.**

Para detectar daños en la placa de material compuesto, el aumento de temperatura debe ser al menos mayor a  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , debido a la restricción de la cámara termográfica. De la Figura 16 se observa que a una profundidad de daño de un máximo de  $3.6\text{ mm}$  se puede detectar el daño a un tiempo máximo de 1 segundo de enfriamiento. Sin embargo ninguno de ellos podría ser ubicado con precisión, ya que la diferencia de temperatura alcanzada entre el nodo ubicado sobre el daño (es decir el nodo de máxima temperatura) y el nodo con temperatura más próxima a la de éste (nodo en  $x = 0$ ) llega a ser de sólo  $0.0374\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## CONCLUSIONES

En este trabajo se demostró numéricamente que es posible detectar daños a través de los cambios en los perfiles de temperatura, cuando éstos son producidos por resistencias al flujo de calor bajo la superficie del material. Estos efectos de resistencias pueden ser producidos por cambios en la geometría del material, tales como los causados por incrustaciones de partículas extrañas durante su construcción, burbujas de aire, delaminaciones, etc.

La modelación por elementos finitos demostró ser una técnica eficaz en la modelación de los efectos térmicos. Como era de esperarse, la modelación en tres dimensiones produjo los mejores resultados, ya que como se vio, los perfiles obtenidos permiten ubicar el daño exactamente en el tiempo de enfriamiento pertinente, a diferencia de los perfiles obtenidos en la modelación en dos dimensiones, donde la ubicación del daño está ligeramente desplazada de su posición real.

La modelación por elementos finitos hizo posible predecir para placas de aluminio y de material compuesto CFRP (material no-isotrópico), un límite aproximado de detección.

Las simulaciones con elementos finitos pueden determinar el efecto en el tiempo de detección del diámetro y profundidad del daño.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el Recinto Universitario de Mayagüez de la Universidad de Puerto Rico, Departamento de Ingeniería Mecánica. La ayuda financiera para la investigación fue otorgada por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, DOD-ONR.

## REFERENCIAS

- The American Society for Nondestructive Testing (NDT). <http://www.asnt.org/ndt/primer1.htm> Activa en junio del 2003.
- Dutton, A.G. (1996). "Flaw detection in composite materials using infrared thermography by the method of external heating", *Journal of Mechanical Engineering Science*. Vol. 210, No. 5, pp. 309-407.
- Shih, J.K.C. y M. Hsin. (2000). "Application of Infrared Thermography for Damage Detection in Structural Concrete", *a Preliminary Report- NDT. Net*. Vol. 5(2), February. <http://www.ndt.net/article/vc05n02/shih/shih.htm>

- Hobbs, C. y A. Temple (1993). "The inspection of aerospace structures using transient thermography". *British Journal of NDT*. Vol. 35, No. 4, pp 183-189.
- Bates, D. G. y D. Smith (2000). "Rapid thermal non-destructive testing of aircraft components composites", *Part B: Engineering*. Vol. 31, No. 3, pp 5-185.
- Reddy, J. N. (1994). *An Introduction To The Finite Element Method*. Second Edition. McGraw-Hill, New York.
- Gil, J. (2002). "Detección de Daño en un Material Compuesto Usando Transferencia de Calor por Conducción", tesis de Maestría en Ciencias, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico.
- Mendelis (1994). *A. Non-Destructive Evaluation (NDE) - Volumen II*, Prentice Hall.
- Technical Information Radiant Infrared Heating Theory & Principles. <http://www.infraredheaters.com/radiant.pdf>, <http://www.infraredheaters.com/techman.pdf>. Activa Noviembre 2003.