

Nuevo contraste térmico para el ensayo termográfico no destructivo de materiales

Hernán D. Benítez*[§], Clemente Ibarra-Castanedo**, Abdelhakim Bendada**, Xavier Maldague**, Humberto Loaiza*, Eduardo Caicedo*

* Grupo de Investigación en Percepción y Sistemas Inteligentes, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Cali, Colombia

** Computer Vision and Systems Laboratory, Department of Electrical Engineering, Université Laval, Quebec, Canadá

§ e-mail: hbenitez@univalle.edu.co

(Recibido: Septiembre 08 de 2006 - Aceptado: Marzo 27 de 2007)

Resumen

Es bien conocido que los métodos de ensayo termográfico no destructivo (ETND) basados en el contraste térmico son afectados fuertemente por el calentamiento no uniforme sobre la superficie. Por lo tanto, los resultados obtenidos con estos métodos dependen considerablemente del punto de referencia escogido. El contraste absoluto diferencial (CAD) fue desarrollado para eliminar la necesidad de escoger un punto de referencia que defina el contraste térmico respecto a un área ideal (no defectuosa). A pesar de que la técnica CAD es muy útil para tiempos cortos, su precisión disminuye para tiempos largos cuando el frente de calor alcanza la cara opuesta de la muestra. En este artículo, se propone una nueva versión del CAD, al considerar explícitamente el grosor de la muestra y usar la teoría de cuadrupolos térmicos. Se demuestra que la validez de esta nueva técnica se incrementa para tiempos largos, mientras se preserva para tiempos cortos.

Palabras clave: Termografía infrarroja, Contraste térmico, Ensayo no destructivo, Cuadrupolos térmicos.

A new thermal contrast for non-destructive thermographic testing of materials

Abstract

It is known that methods of thermographic non destructive testing (TNDT) based on thermal contrast are strongly affected by non-uniform heating at the surface. Hence, the results obtained from these methods considerably depend on the chosen reference point. The differential absolute contrast (DAC) method was developed to eliminate the need of determining a reference point that defines the thermal contrast with respect to an ideal (sound) area. Although DAC is very useful at early times, the DAC accuracy decreases at later times when the heat front approaches the sample rear face. In this article, a new DAC version is proposed by explicitly introducing the sample thickness and using the thermal quadrupoles theory. It is shown that the validity of the new DAC version increases for long times while being preserved at short times.

Keywords: Infrared thermography, Thermal contrast, Nondestructive testing, Thermal quadrupoles.

1. Introducción

Actualmente, el control de calidad se ha convertido en un tema indispensable para la productividad de la industria. Diversos métodos de evaluación no destructiva de materiales tales como los ultrasonidos, los rayos X, las corrientes de remolino, los penetrantes de color y las perturbaciones de flujo magnético solucionan un buen número de problemas de inspección y ayudan a mantener normas de calidad y productividad en la industria actual. Las técnicas de ensayo no destructivo de materiales (END) permiten detectar anomalías, descubrir defectos térmicamente no conductores tales como fisuras, laminaciones y detectar la presencia de objetos extraños sin afectar la integridad física del objeto bajo inspección ni su uso futuro (Shull, 2002).

Una técnica adicional dentro del END es el ensayo termográfico no destructivo (ETND) en el cual la superficie de una muestra de material es estimulada térmicamente para producir una diferencia de temperatura entre las áreas no defectuosas y las áreas defectuosas. Esta técnica se ha convertido en un método poderoso para la detección de defectos en varios tipos de materiales, desde compuestos hasta metales (Krapez, 2001).

En el ETND, se usa el contraste térmico con el fin de evaluar la visibilidad de un defecto, mejorar la calidad de la imagen y para determinar la profundidad, grosor y tamaño de los defectos dentro de un material. Varios tipos de contraste han sido definidos tales como el contraste absoluto, el contraste relativo y el contraste normalizado (Maldague, 2001; Bendada et al., 1998; Krapez, 2001).

Todos estos tipos de contraste requieren del uso de la temperatura de un área sobre la muestra del material definida como no defectuosa. La definición de esta área es un asunto crítico. En un sentido amplio, su localización no se define precisamente ya que no se conoce con anterioridad donde están ubicados los defectos, en caso de que los haya. Sólo se pueden hacer suposiciones sobre la ubicación de estas zonas sanas. Esta es la principal limitación que surge en la aplicación de métodos basados en el contraste

térmico. Además, es bien sabido que los métodos usados para conocer la profundidad, grosor o tamaño de un defecto basados en el contraste térmico son fuertemente afectados por el calentamiento no uniforme. El contraste diferencial absoluto (CAD) (Pilla et al., 2002; González et al., 2004) fue desarrollado con el fin de calcular adecuadamente la temperatura de un área no defectuosa a través de la solución unidimensional de la ecuación de Fourier de conducción de calor para materiales homogéneos y semi-infinitos estimulados con un impulso térmico del tipo función delta de Dirac. Sin embargo, este modelo no incluye el grosor del material y por lo tanto la validez del CAD disminuye para tiempos largos después del calentamiento cuando el frente de calor alcanza la cara de la muestra opuesta a la radiación.

En este artículo, se propone una versión modificada del CAD introduciendo explícitamente el grosor de la muestra por medio de la teoría de cuadrupolos térmicos. Tomando en cuenta el grosor de la muestra, se demuestra que la validez de esta nueva técnica se incrementa para tiempos largos (después de la excitación térmica), mientras se preserva para tiempos cortos.

Se ensaya esta nueva técnica con dos muestras de PRFC (plástico reforzado con fibra de carbono): *PFRC006* y *PFRC007*, de las cuales la primera es plana y la segunda es curvada, y cada una tiene 25 inserciones de *Teflon* que se usan para simular laminaciones de distintos tamaños, profundidades y localizaciones. También se prueba con una muestra de *Plexiglas* que tiene un grosor diferente a las muestras de PRFC.

2. Metodología

2.1 Modificación del CAD usando cuadrupolos térmicos

Los cuadrupolos térmicos son una técnica empleada para resolver problemas de transferencia de calor y está basada en la transformada de Laplace (Maillet et al., 2000). Esta técnica transforma las ecuaciones diferenciales desde el dominio espacio-tiempo hasta el dominio de Laplace en donde se puede

tener una representación simple y explícita del problema tratado. Después de aplicar la transformada de Laplace, el problema puede ser resuelto en el dominio de Laplace para después ser transformado de vuelta al espacio original por transformada inversa (Stehfest, 1970). Por esta razón, este método es usado para la solución del problema directo (cálculo de la respuesta térmica de un sistema) y del problema inverso (determinación de parámetros del sistema con base en la respuesta térmica). Sin embargo, dada la base analítica de este método, se restringe a problemas lineales con geometrías simples. Aprovechando estas características, se hace un estudio de una placa finita que recibe un impulso de calor del tipo delta de Dirac y se quiere conocer la temperatura sobre la cara que recibe este impulso.

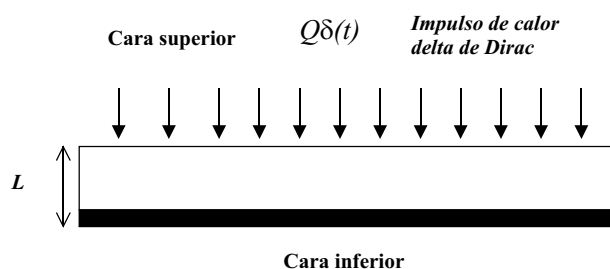


Figura 1. Placa finita de material compuesto sometida a un impulso térmico del tipo delta de Dirac.

La Figura 1 muestra una placa hecha de material compuesto con espesor L (m) que es sometida a un impulso de calor del tipo delta de Dirac Q (J/m^2) depositado sobre su cara superior ($x=0$), mientras que su cara inferior ($x=L$) permanece térmicamente aislada.

Mediante la técnica de cuadrupolos térmicos mencionada anteriormente es posible encontrar la temperatura de la cara superior de este sistema en el dominio de Laplace (Maillet et al., 1996):

$$\theta_{\text{sup}}(p) = \frac{Q}{b} \frac{\coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}}}{\sqrt{p}} \quad (1)$$

donde $\theta_{\text{sup}}(p)$ es la temperatura en la cara superior de la placa en el dominio de Laplace, p es la variable del dominio de Laplace, Q es la densidad total de energía entregada por el impulso delta de Dirac, L es el espesor de la muestra, α es la difusividad térmica del material y b es la efusividad térmica de éste. Los pasos siguientes describen la deducción del nuevo CAD corregido con cuadrupolos térmicos.

El contraste térmico absoluto se define como

$$\Delta T(t) = T_{\text{def}}(t) - T_{\text{no_def}}(t) \quad (2)$$

donde T es la señal de temperatura, t es la variable de tiempo, y los subíndices *def* y *no_def* se refieren a áreas defectuosas y no defectuosas, respectivamente.

Con base en la formulación de cuadrupolos térmicos, el objetivo es definir la temperatura en la zona no defectuosa $T_{\text{no_def}}(t)$. Para este fin, se define primero la temperatura $T_{\text{no_def}}(t)$ en un tiempo t con base en la formulación de cuadrupolos térmicos:

$$T_{\text{no_def}}(t) = \frac{Q}{b} L^{-1} \left[\frac{\coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}}}{\sqrt{p}} \right]_{|t} \quad (3)$$

donde $L^{-1} []$ es la transformada inversa de Laplace. Luego se define la temperatura $T_{\text{no_def}}(t')$ en un tiempo t' que es el intervalo de tiempo entre la llegada a la muestra del impulso de calor delta de Dirac y el instante en el cual se observa por primera vez un defecto en el experimento:

$$T_{\text{no_def}}(t') = \frac{Q}{b} L^{-1} \left[\frac{\coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}}}{\sqrt{p}} \right]_{|t'} \quad (4)$$

Apartir de la Ec.(4) se obtiene:

$$L^{-1} \left[\frac{\coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}}}{\sqrt{p}} \right]_{|t'} = \frac{Q}{b} \quad (5)$$

Reemplazando la Ec.(5) en la ecuación Ec.(3), se obtiene:

$$\frac{T_{no_def}(t)}{T_{no_def}(t')} = \frac{L^{-1} \left[\frac{\coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}}}{\sqrt{p}} \right]_{|t}}{L^{-1} \left[\frac{\coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}}}{\sqrt{p}} \right]_{|t'}} \quad (6)$$

Despejando $T_{no_def}(t)$ de la Ec. (6) y reemplazando en la Ec.(2), se obtiene la definición del nuevo CAD corregido con cuadrupolos térmicos:

$$\Delta T_{CAD_{CORR}} = T(t) - \frac{L^{-1} \left[\frac{\coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}}}{\sqrt{p}} \right]_{|t}}{L^{-1} \left[\frac{\coth \sqrt{\frac{pL^2}{\alpha}}}{\sqrt{p}} \right]_{|t'}} T(t') \quad (7)$$

Es importante observar que la Ec.(7) contiene explícitamente al grosor L de la muestra y además no depende de las condiciones de calentamiento dadas por Q (Benítez et al., 2006).

En esta sección se explica la metodología empleada para deducir el nuevo CAD y en la próxima sección se ilustra la validación experimental del nuevo CAD modificado con cuadrupolos térmicos y se comparan estos resultados con los obtenidos mediante el CAD anterior.

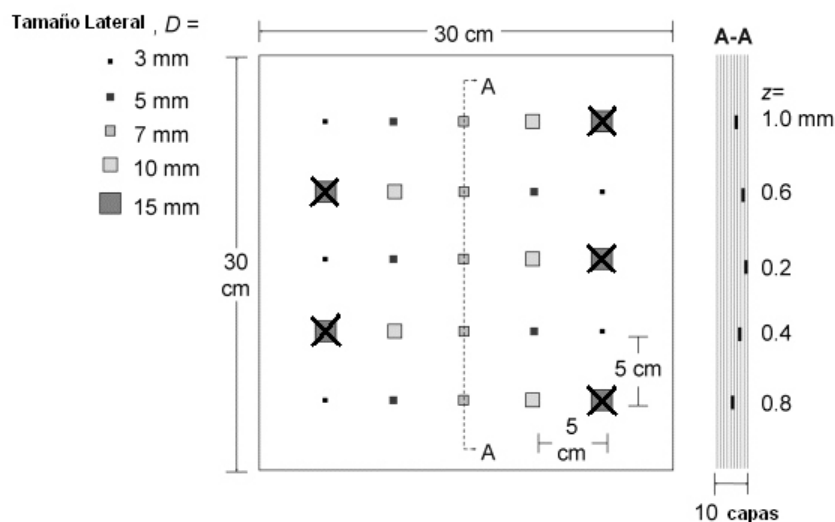


Figura 2. Configuración de muestra plana de PRFC (PRFC006) con inserciones de Teflon.

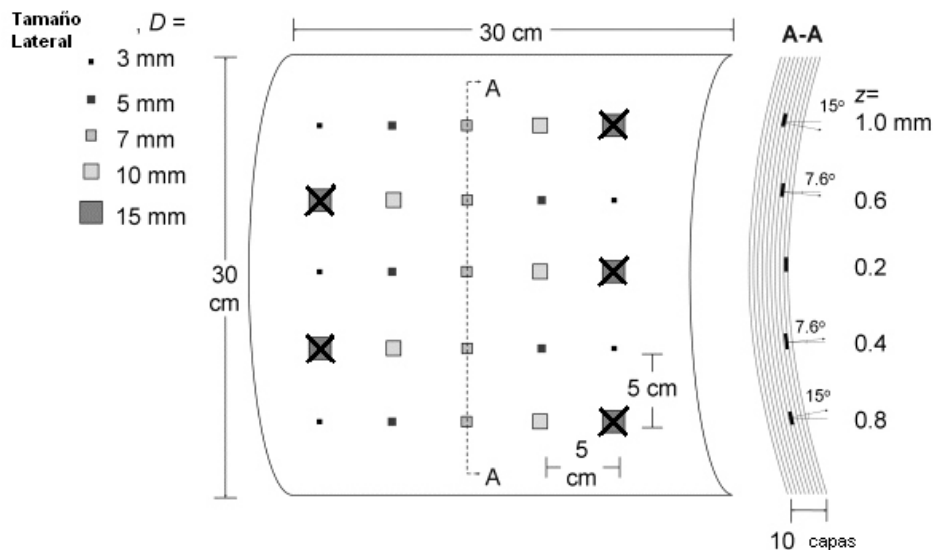


Figura 3. Configuración de muestra curvada de PRFC (PRFC007) con inserciones de Teflon.

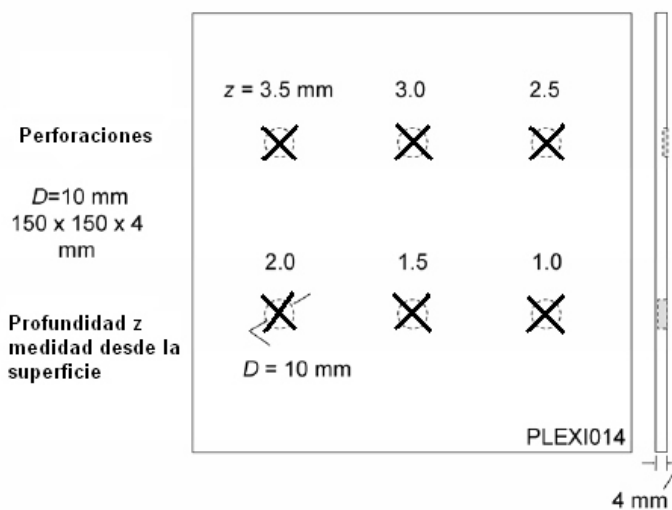


Figura 4. Configuración de la muestra Plexiglas (Plexi014).

3. Resultados y discusión

3.1 Validación experimental del nuevo método CAD

El nuevo método CAD se ensaya con dos muestras de PRFC de las cuales una es plana (PRFC006) y la otra es curvada (PRFC007) (Ibarra-Castanedo, 2005) que tienen cada una un espesor de 2 mm y

cada una contiene 25 inserciones de Teflon usadas para simular delaminaciones. Además, también se prueba con una muestra de Plexiglas (Plexi014) que tiene un espesor de 4 mm y contiene perforaciones circulares de distintos tamaños y profundidades para simular diferentes grados de corrosión.

Las configuraciones de estas muestras se ilustran en las Figuras 2, 3 y 4.

Tabla 1. Tiempos de muestreo y de adquisición empleados para cada muestra inspeccionada.

Muestra	Tiempo de muestreo Δt (ms)	Tiempo de adquisición T (s)
PFRC006	6.3	6.23
PFRC007	6.3	6.23
PLEXI014	888	533.33

Tabla 2. Parámetros usados para calcular las difusividades térmicas de las muestras inspeccionadas.

Muestras	α (m^2/s)	t_{min} (s)	L (m)
PFRC006	4.60×10^{-7}	2.28	0.002
PFRC007	3.97×10^{-7}	2.68	0.002
PLEXI014	0.60×10^{-7}	72.00	0.004

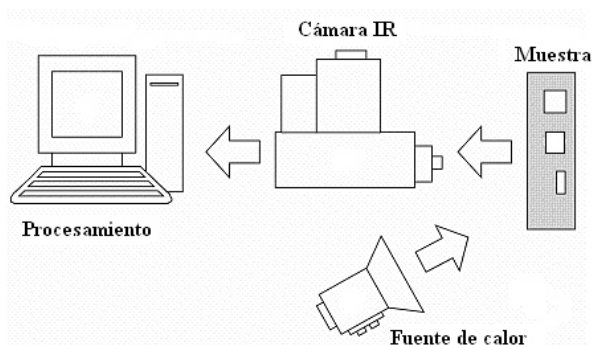


Figura 5. Configuración experimental para termografía activa pulsada por reflexión.

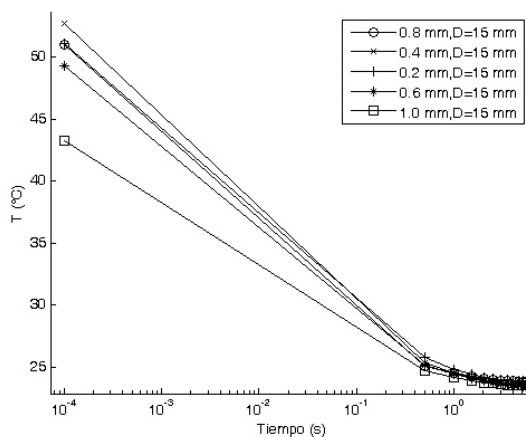


Figura 6. Curvas de temperatura de los defectos con 15 mm de diámetro mostrados en la Figura 2.

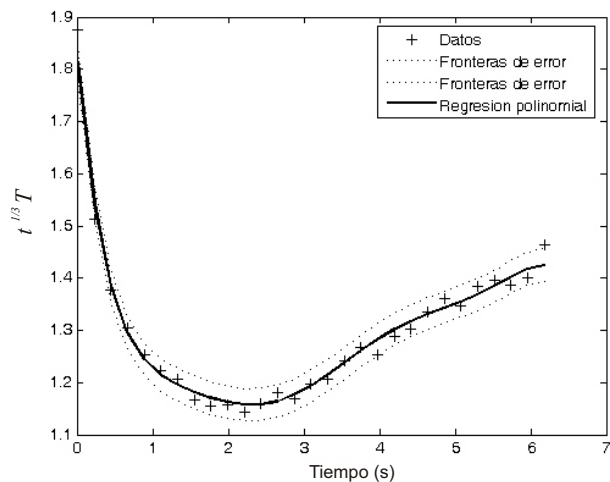


Figura 7. Curva de $t^{1/3} T$ para calcular experimentalmente la difusividad térmica de la muestra PFRC006.

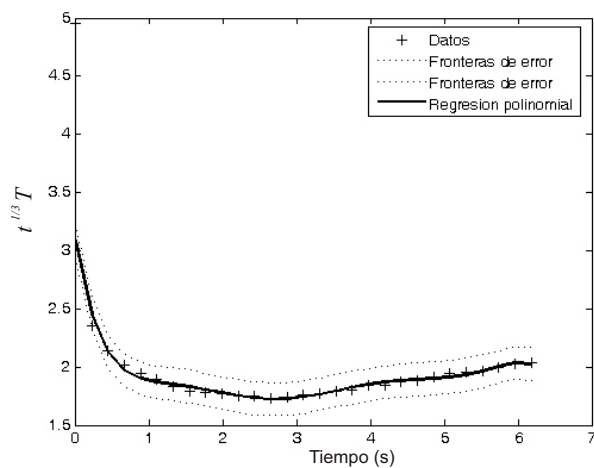


Figura 8. Curva de $t^{1/3} T$ para calcular experimentalmente la difusividad térmica de la muestra PFRC007.

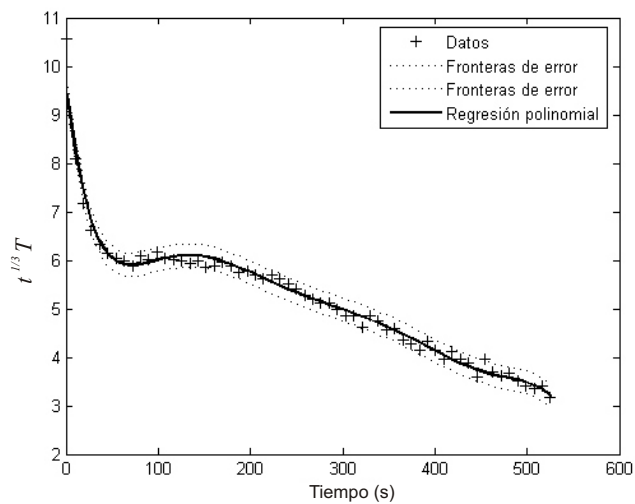


Figura 9. Curva de $t^{1/3} T$ para calcular experimentalmente la difusividad térmica de la muestra PLEXI014.

Los defectos marcados con X en estas figuras son aquellos en los cuales se estudia la evolución temporal del contraste térmico.

Para la toma de las imágenes se empleó una cámara infrarroja *Santa Barbara Focal Plane SBF 125*. Los tiempos de muestreo y adquisición empleados para la inspección de cada muestra se presentan en la Tabla 1. Para estos experimentos se usó como fuente de calor un *flash Balcar FX 60* que entrega una potencia de 3.2 kJ en 5 ms en modo reflexión como se observa en la Figura 5. Se usa solo un *flash* con el fin de generar el calentamiento no-uniforme observado en la Figura 6, el cual se evidencia en los valores iniciales (que varían hasta aproximadamente 10°C entre sí) de las curvas de temperatura de los defectos de 15 mm distribuidos a través de la muestra *PFRC006*.

Como la Ec.(7) del nuevo CAD depende de la difusividad térmica del material inspeccionado se debe encontrar este parámetro con el fin de aplicar el nuevo CAD. Para este fin se determinan las difusividades térmicas de las muestras *PRFC006*, *PRFC007* y *PLEXI014* a partir de un método experimental (Bison et al., 2002) en el cual se multiplica la evolución de temperatura en el tiempo de un punto de la muestra por la raíz cúbica del tiempo (Figuras 7, 8 y 9) y se analiza la función resultante para encontrar un valor mínimo de 0.2656 para el número de Fourier $Fo=t/L^2$. Mediante este análisis se obtiene la siguiente relación para la medición de la difusividad térmica del material:

$$\alpha = \frac{0.2656L^2}{t_{\min}} \quad (8)$$

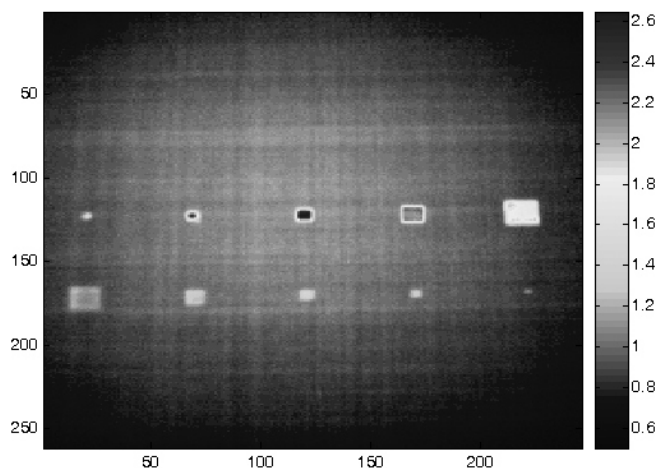


Figura 10. Imagen de máximo contraste de la muestra *PFRC006* calculado con el CAD clásico.

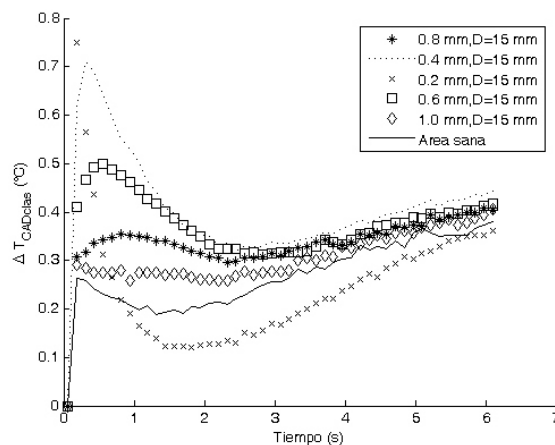


Figura 11. Curvas de CAD clásico de los defectos de 15 mm de diámetro en la muestra *PFRC006*.

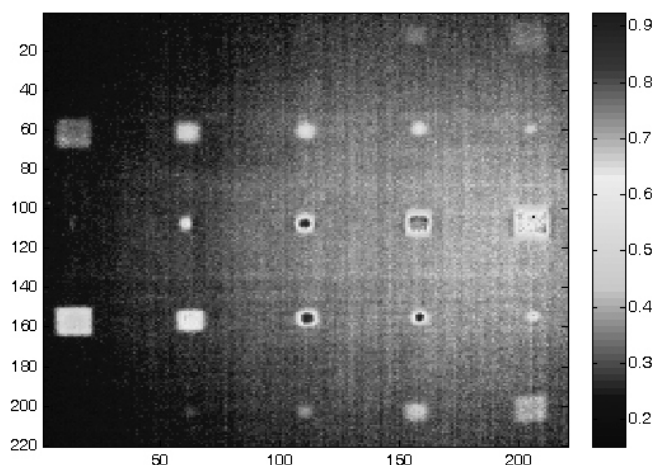


Figura 12. Imagen de máximo contraste de la muestra PFRC006 calculado con el nuevo CAD.

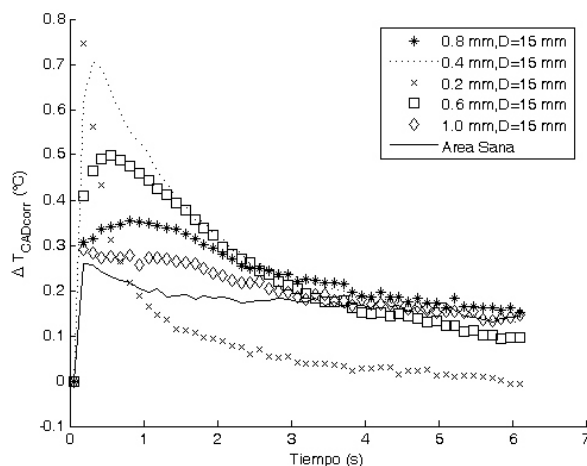


Figura 13. Curvas de nuevo CAD de los defectos de 15 mm de diámetro en la muestra PFRC006.

donde L es el grosor de la muestra, t_{min} es el tiempo en el que se alcanza el mínimo en las curvas producidas al multiplicar la temperatura por la raíz cúbica del tiempo y α es la difusividad térmica del material. En la Tabla 1 se presentan las difusividades térmicas y los parámetros t_{min} y L usados para calcularlas.

El CAD clásico también se aplica a la secuencia de imágenes obtenidas a partir de la muestra de *PRFC006* y se usa la imagen de máximo contraste (*maxigrama*) para comparar el desempeño del CAD clásico con el desempeño del nuevo CAD. Para ambos casos el valor de t' seleccionado fue 50.5 ms.

El maxigrama obtenido a partir del CAD clásico sólo revela 10 defectos en la muestra (Figura 10). Además, las curvas del CAD clásico observadas en la Figura 11 se desvían del comportamiento del modelo unidimensional para tiempos largos (aproximadamente $t > 2.5$ s), tal y como se esperaba, ya que en el modelo teórico se asume una placa semi-infinita mientras que en el experimento se tiene una placa con un grosor finito. Por otro lado, el maxigrama obtenido a partir del nuevo CAD (Figura 12) revela al menos 19 defectos en la muestra y las curvas de contraste térmico (Figura 13) muestran que el rango de validez del nuevo CAD se mantiene tanto para tiempos largos como para tiempos cortos después de la excitación térmica.

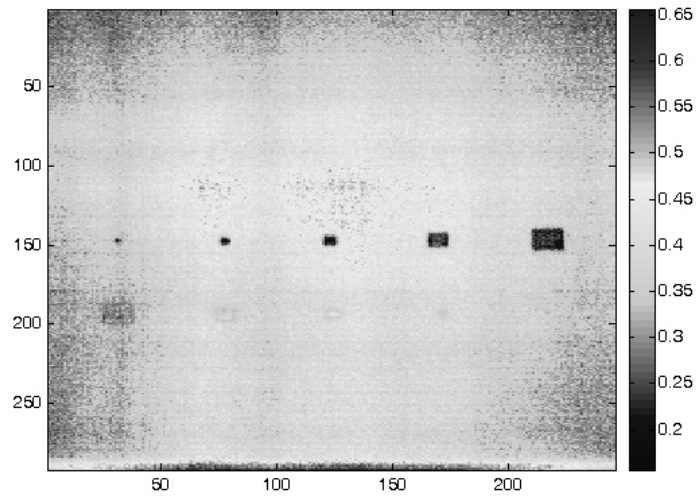


Figura 14. Imagen de máximo contraste de la muestra PFRC007 calculado con el CAD clásico.

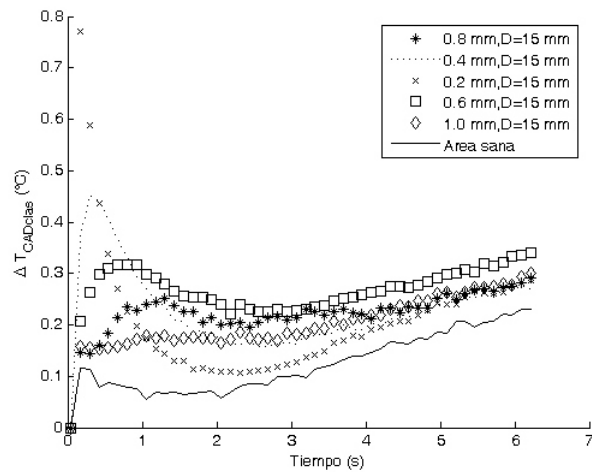


Figura 15. Curvas de CAD clásico de los defectos de 15 mm de diámetro en la muestra PFRC007.

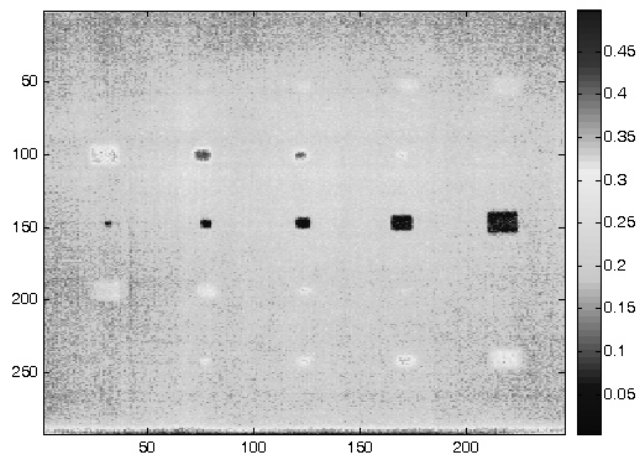


Figura 16. Imagen de máximo contraste de la muestra PFRC007 calculado con el nuevo CAD.

Además, a pesar del considerable calentamiento no-uniforme inducido en el experimento mediante el uso de un solo *flash* que calentó parcialmente la muestra, con este nuevo CAD la mayor parte de los defectos presentes en la muestra se hacen evidentes.

Por otro lado, el nuevo CAD también fue probado con una muestra cuya geometría es curvada (*PFRC007*), ya que este tipo de condiciones se encuentra con frecuencia en el campo industrial,

como, por ejemplo, la aeronáutica, en donde se hace necesario la inspección de las alas de aviones hechas de material compuesto que usualmente poseen geometrías complejas (Guizzo, 2006).

Se usó la cara cóncava de la muestra *PFRC007* para estos experimentos y el tiempo t' para cada caso fue 56.7 ms. Las Figuras 14 y 15 representan la imagen de máximo contraste y las curvas del CAD clásico para los defectos con 15 mm de diámetro en la muestra *PFRC007*.

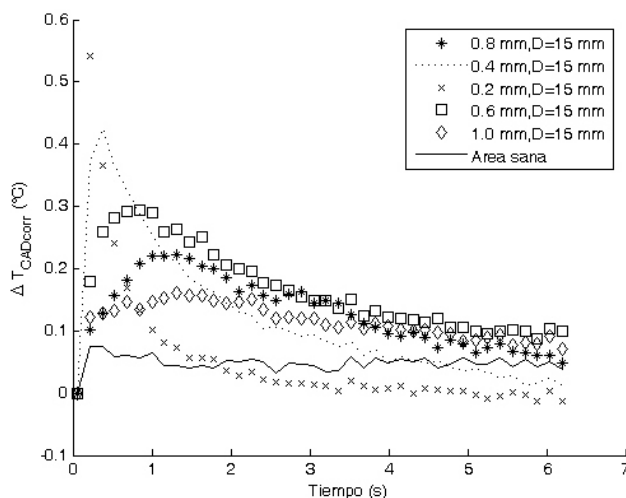


Figura 17. Curvas de nuevo CAD de los defectos de 15 mm de diámetro en la muestra *PFRC007*.

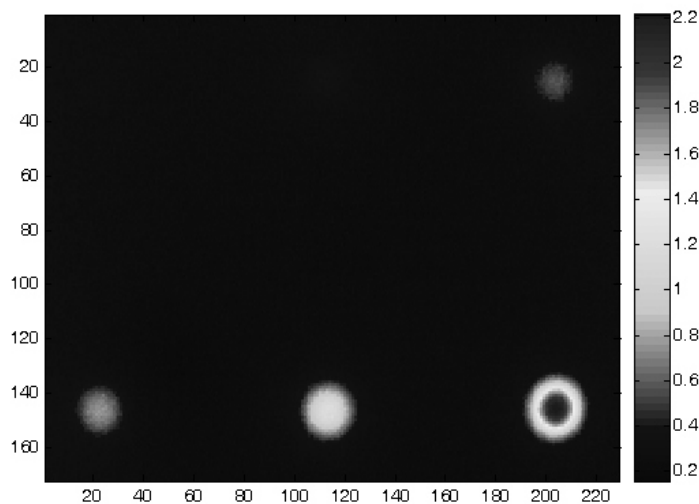


Figura 18. Imagen de máximo contraste de la muestra *PLEXI014* calculado con el CAD clásico.

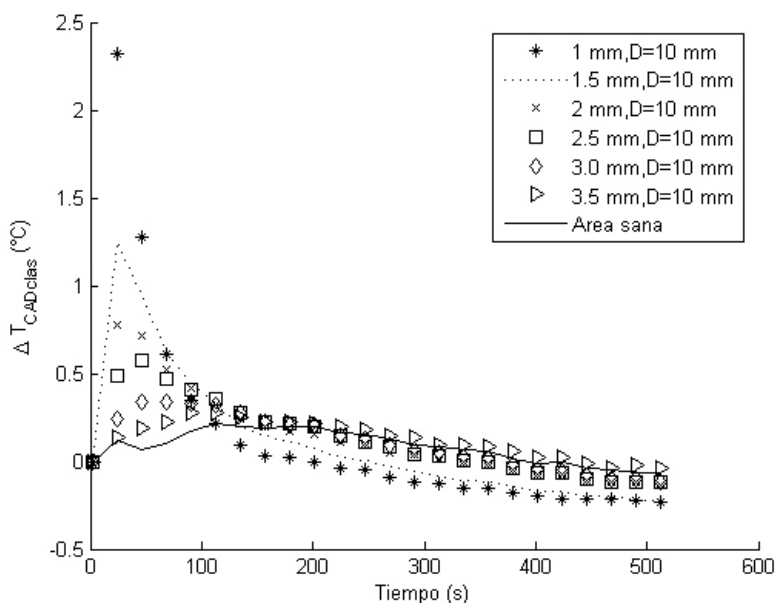


Figura 19. Curvas de CAD clásico de los defectos en la muestra PLEXI014.

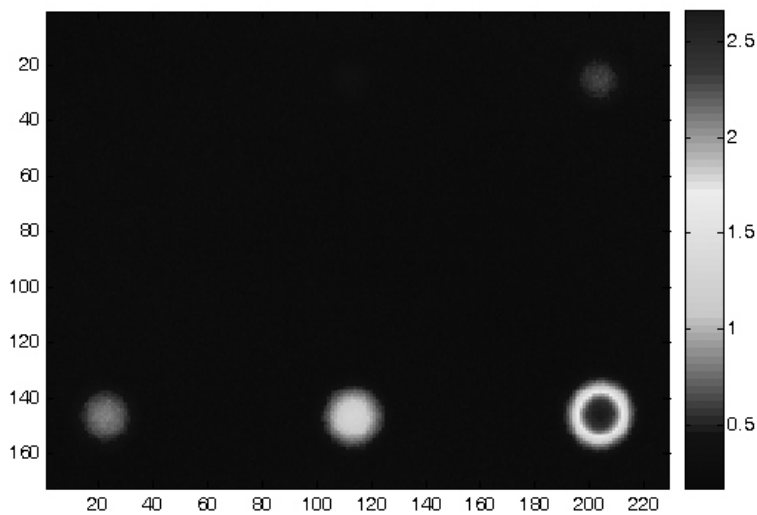


Figura 20. Imagen de máximo contraste de la muestra PLEXI014 calculado con el CAD modificado.

Se observa que en la imagen de máximo contraste solo se alcanzan a observar los defectos más superficiales (0.2 mm de profundidad) mientras que los otros no aparecen, debido a la característica del CAD clásico y a la geometría curvada de la muestra. Adicionalmente, las curvas del CAD clásico de esta muestra confirman que, para tiempos largos, el desempeño de este contraste no se mantiene. Cuando se aplica el nuevo CAD a la muestra *PFRC007*, se observa que en la imagen de máximo contraste (Figura 16)

se evidencian varios defectos de diferentes diámetros que se encuentran a distintas profundidades (0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1 mm).

Además, las curvas del nuevo CAD (Figura 17) decrecen hacia cero para tiempos cortos conservando su validez. Este resultado confirma la capacidad cualitativa que posee el nuevo CAD para detectar defectos en muestras cuya geometría es compleja.

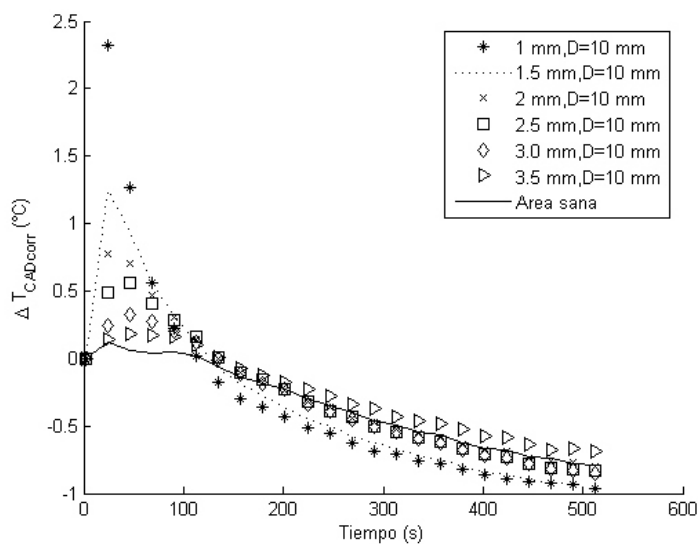


Figura 21. Curvas del nuevo CAD de los defectos en la muestra PLEXI014.

Con el fin de extender los resultados del nuevo CAD a una muestra de grosor y material diferente al empleado hasta el momento, se usa una muestra de *Plexiglas (Plexi014)*. En este caso, t' tomó el valor de 3.6 s para el CAD propuesto y el CAD clásico.

En la imagen de máximo contraste entregada por el CAD clásico se evidencian los 4 defectos más superficiales de la muestra *Plexi014* que tienen profundidades de 1, 1.5, 2 y 2.5 mm (Figura 18). Además, las curvas del CAD clásico (Figura 19) muestran que para esta muestra de mayor grosor (4 mm), el desempeño del CAD clásico se mantiene para tiempos hacia al final de la secuencia. Los valores negativos tomados por las curvas se deben a los efectos de pérdidas de calor por convección.

Por otro lado, en la imagen de máximo contraste entregada por el CAD modificado (Figura 20) se evidencia el mismo número de defectos que con el CAD clásico. Las curvas del CAD modificado (Figura 21) tienen un comportamiento similar al del CAD clásico para los tiempos iniciales de la secuencia de imágenes. Sin embargo, a partir de los 100 s estas curvas toman valores negativos debido a los efectos de pérdidas de calor por convección.

4. Conclusiones

El nuevo CAD propuesto hizo visibles más defectos en la imagen de máximo contraste que el CAD clásico en dos experimentos con muestras de material compuesto fuertemente afectado por calentamiento no uniforme y con geometrías curvadas.

Adicionalmente, las imágenes de máximo contraste obtenidas a partir del CAD propuesto y del CAD clásico de una muestra de *Plexiglas* con 4 mm de espesor revelaron el mismo número de defectos y el comportamiento de las curvas de contraste fue similar para tiempos iniciales en las secuencia, aunque fue afectado por la presencia de corrientes de aire no controladas durante el experimento. Esto evidencia que el CAD propuesto funciona para materiales con diferentes propiedades térmicas y diferentes grosores.

Además, el CAD modificado conserva su validez tanto para tiempos largos como para tiempos cortos y no se necesita hacer una valoración subjetiva sobre la localización de un área posiblemente no defectuosa, lo que facilita la inspección termográfica automática en la línea de producción ya que la intervención humana disminuye.

Para este nuevo CAD se necesita como dato de entrada la difusividad térmica del material a inspeccionar que puede ser encontrada experimentalmente mediante el método descrito por Bison et al. (2002).

5. Agradecimientos

Los autores reconocen a COLCIENCIAS la ayuda financiera prestada a Hernán Benítez para realizar una pasantía de investigación en la Universidad de Laval, en Québec, Canadá.

6. Referencias bibliográficas

- Bendada, A., Maillet, D., Batsale, J. C. & Degiovanni, A. (1998). Reconstitution of a non uniform interface thermal resistance by inverse heat conduction—Application to infrared thermography testing. *Inverse Problems in Engineering* 6, 79-123.
- Benítez H., Ibarra-Castanedo C., Bendada A., Maldague, X., & Loaiza, H. (2006). *Modified Differential Absolute Contrast Using Thermal Quadrupoles for the Nondestructive Testing of Finite Thickness Specimens by Infrared Thermography*. In Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE 2006), Paper No. 398, Ottawa, Canada.
- Bison P. G., Cernuschi, F., Grinzato, E., & Marinetti, S. (2002). *Comparison of thermal diffusivity measurement techniques*. In Proceedings of the 6th International Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT 2002), Dubrovnik, Croatia.
- González, D. A., Ibarra-Castanedo, C., Pilla, M., Klein, M., López-Higuera, J.M., & Maldague, X. (2004). *Automatic interpolated differentiated absolute contrast algorithm for the analysis of pulsed thermographic sequences*. In Proceedings of the 7th International Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT 2004), von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode Saint Genèse p. H.16.1-H.16.6.
- Guizzo, E. (2006). Carbon Takeoff. *IEEE Spectrum* 43 (1), 24-28.
- Ibarra-Castanedo, C. (2005). *Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase*. Thèse du doctorat en génie électrique, Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec, Canada.
<http://www.theses.ulaval.ca/2005/23016/23016.html>
- Krapez, J.C. (2001). Thermal contrasts in pulsed infrared thermography. In: X. Maldague & P. O. Moore (editors), *Nondestructive Testing Handbook, Volume 3, Infrared and Thermal Testing*, American Society for Nondestructive Testing, (Chapter 13).
- Maillet, D., Batsale, J.C., Bendada, A., & Degiovanni, A. (1996). Integral methods and non destructive testing through stimulated infrared thermography. *Revue Générale de Thermique* 35 (409), 5-13.
- Maillet, D., André, S., Batsale, J.C., Degiovanni, A., & Moyne, C. (2000). *Thermal quadrupoles: solving the heat equation through integral transforms*. West Sussex, England: John Wiley & Sons.
- Maldague, X. (2001). *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. New York: Wiley Interscience.
- Pilla, M., Klein, M., Maldague, X., & Salerno, A. (2002). *New absolute contrast for pulsed thermography*. In Proceedings of the 6th International Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT 2002), Dubrovnik, Croatia.
- Shull, P. J. (2002). *Nondestructive evaluation: theory, techniques and applications*. New York: Marcel Dekker.
- Stehfest, H. (1970). Algorithm 368: numerical inversion of Laplace transforms. *Communications of the Association of Computing Machinery* 13 (1), 47-49.