

## Capítulo II

### Detección de daño en placas metálicas mediante pruebas termográficas

#### **2.1 Inspección no destructiva mediante pruebas termográficas**

Los ensayos con técnicas termográficas consisten en métodos de inspección no destructivos, que miden la radiación que emiten los materiales por sí mismos (método pasivo) o cómo ésta se propaga a lo largo de la muestra cuando se la excita de manera externa (método activo). Esto permite detectar ciertos defectos del material como grietas, discontinuidades, vacíos internos...etc. Este tipo de ensayos no destructivos son esenciales en la industria para garantizar una calidad y seguridad a la hora de la fabricación, algo de vital importancia en el sector aeroespacial.

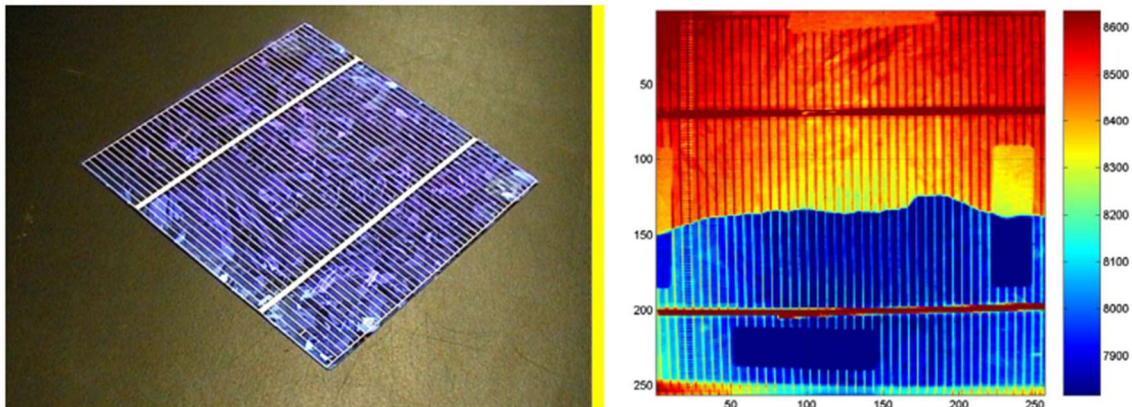


Figura 1: Panel solar agrietado y su imagen termográfica. Fuente: [6]

En la Figura 1 se muestra una placa solar agrietada junto a su imagen termográfica. En la imagen de la derecha, se puede apreciar cómo la técnica termográfica ilustra la fractura interna del material debido a la diferencia de temperaturas.

En este TFG nos centraremos en un método de inspección que consiste en excitar una placa de aluminio bidimensional de manera externa con lámparas térmicas, mientras

que un detector térmico capta los diferentes niveles de radiación de la muestra, véase un esquema del mismo en la Figura 2.

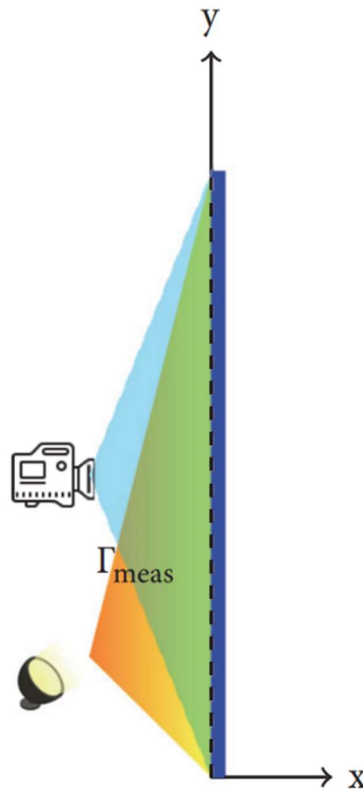


Figura 2: Configuración del experimento. Fuente: [3]

Para conseguir información a partir de estas imágenes termográficas, se procede a realizar el mismo experimento con la placa (la placa que se quiere analizar y que posiblemente tenga algún tipo de defecto) y otro con una placa sana. La diferencia de temperatura captada por estas dos imágenes termográficas es la información que se procesará con las redes neuronales para saber a qué profundidad se encuentran los defectos. También se aplicará la derivada topológica a las termografías como método complementario para la resolución del problema en cuestión. Aunque, como se ha mencionado al principio, esta derivada no muestra la forma y posición de los defectos en el eje de la profundidad, sí puede dar una información extra para encontrar la solución mediante las redes neuronales.

Ante la falta de imágenes termográficas reales, capturadas mediante una cámara termográfica en un experimento real, en este trabajo utilizaremos termografías sintéticas, es decir, generadas numéricamente utilizando un ordenador. Estas termografías sintéticas se han realizado mediante software, con el programa de cálculo FreeFem++, que es un código de software libre [7]. A éstas se les ha añadido un ruido aleatorio para simular la imprecisión que surgiría a la hora de realizar el ensayo en la realidad. Por lo tanto, la red neuronal que se va a construir debe tener la capacidad de distinguir el ruido de la información relevante, para el resolver el problema.

A continuación, se plantea la base teórica para la simulación de este tipo de pruebas termográficas.

## 2.2 Planteamiento teórico del problema térmico

Como se ha mencionado anteriormente, el problema, extraído de los artículos de los tutores de este proyecto, [3] y [4], consiste en excitar térmicamente una placa bidimensional de aluminio con un defecto en una posición específica en el interior con lámparas modelizadas como radiadores isotrópicos ideales. Se trata de una placa esbelta rectangular bidimensional, donde una de sus longitudes es mucho mayor que la otra (véase la Figura 2). Además, está aislada térmicamente por sus extremos más estrechos mientras el calor se transmite a través de sus extremos más anchos. Se realizan dos tipos experimentos: en el primero se calienta la placa de manera continua y se captura la imagen termográfica; en el segundo, la placa se excita de manera armónica, se captura la imagen termográfica y se realiza un postproceso mediante la derivada topológica.

El núcleo de este trabajo consiste en analizar termografías, por lo tanto, el primer problema a resolver consiste en calcular las temperaturas de la placa sabiendo todos los parámetros involucrados, la posición de las lámparas y el lugar de los defectos. A este problema vamos a denominarlo el problema directo, descrito mediante la ecuación del calor en la placa:

$$\rho c \partial_t T - \nabla \cdot (\kappa \nabla T) = 0, \quad (2.1)$$

donde  $\rho$ ,  $c$  y  $\kappa$  corresponden a la densidad másica, el calor específico y la conductividad térmica. El espacio que ocupa la placa está definido mediante la región  $\Omega = [0, L_x] \times [0, L_y]$ , donde  $L_y \gg L_x$ . La región que ocupa el defecto está definida mediante  $\Omega_i$  mientras que la región de la placa sin el defecto se define mediante  $\Omega_e$ .

Para excitar térmicamente la placa, se usa una lámpara que se modela como un radiador isotrópico localizado en  $s = (s_x, s_y)$  y se describe matemáticamente mediante la función

$$q_s(x, y) = \frac{P}{2\pi} \frac{x - s_x}{(x - s_x)^2 + (y - s_y)^2}, \quad (2.2)$$

donde  $P > 0$  corresponde a la potencia continua de la lámpara en el caso del experimento de excitación continua. En el caso de la excitación armónica, la lámpara se modela mediante la función:

$$\begin{aligned} q_s(x, y, t) &= \tilde{q}_s(x, y) + \operatorname{Re}(Q_s(x, y)e^{-i\omega t}) = \\ &= \frac{\tilde{P}}{2\pi} \frac{x - s_x}{(x - s_x)^2 + (y - s_y)^2} + \operatorname{Re}\left(\frac{Pe^{-i\omega t}}{2\pi} \frac{x - s_x}{(x - s_x)^2 + (y - s_y)^2}\right) \end{aligned} \quad (2.3)$$

donde  $\omega > 0$  es la frecuencia de la excitación,  $\tilde{q}_s$  es la distribución estacionaria de la lámpara que tiene una potencia  $\tilde{P} > 0$  y  $P$  corresponde a la amplitud del término complejo de la potencia.

En el caso estacionario, la distribución de la temperatura solo depende de la variable espacial, es decir,  $T_s(\mathbf{x}, t) = T_s(\mathbf{x})$ , donde el subíndice "s" enfatiza la dependencia de la temperatura según la posición de la lámpara. Por lo tanto, considerando las excitaciones

térmicas modeladas por radiadores isotrópicos de la fórmula (2.2), el problema térmico se define mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 \nabla \cdot (k_e \nabla T_s) &= 0, & en \Omega_e \\
 \nabla \cdot (k_i \nabla T_s) &= 0, & en \Omega_i \\
 T_s^+ - T_s^- &= 0, & en \partial\Omega_i \\
 \kappa_e \partial_n T_s^+ - \kappa_i \partial_n T_s^- &= 0, & en \partial\Omega_i \\
 \partial_y T_s &= 0, & en y = 0 \\
 \partial_y T_s &= 0, & en y = L_y \\
 \kappa_e \partial_x T_s - (h + 4\varepsilon\sigma T_{air}^3)T_s &= -(hT_{air} + (\alpha + 3\varepsilon)\sigma T_{air}^4) - \alpha q_s, & en x = 0 \\
 \kappa_e \partial_x T_s + (h + 4\varepsilon\sigma T_{air}^3)T_s &= hT_{air} + (\alpha + 3\varepsilon)\sigma T_{air}^4, & en x = L_x
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

donde  $h$  corresponde al coeficiente convectivo de transferencia de calor entre la placa y el aire y  $\alpha$ , la absorptancia de la superficie de la placa.  $T_s^+$  y  $T_s^-$  corresponden a las temperaturas en el límite exterior e interior de la región  $\Omega_i$ . Los parámetros  $\varepsilon$  y  $\sigma$  se tratan de la emisividad de la superficie y el constante de Stefan-Boltzmann respectivamente.

En el caso armónico, en el que la excitación se modela por la función  $q_s(x, y, t)$  definida en (2.3), la temperatura se comportará también de manera análoga, siendo de la forma  $T_{s,\omega}(x, t) = \tilde{T}_s(x) + \mathcal{R}e(T_{s,\omega}(x) e^{-i\omega t})$ , donde  $\tilde{T}_s > 0$  corresponde a la media y  $T_{s,\omega}(x)$  es la amplitud del término complejo. Por lo tanto, las ecuaciones que modelan el problema en el caso armónico son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 \nabla \cdot (\kappa_e \nabla T_{s,\omega}) + i\omega\rho_e c_e T_{s,\omega} &= 0, & en \Omega_e \\
 \nabla \cdot (\kappa_i \nabla T_{s,\omega}) + i\omega\rho_i c_i T_{s,\omega} &= 0, & en \Omega_i \\
 T_{s,\omega}^+ - T_{s,\omega}^- &= 0, & en \partial\Omega_i \\
 \kappa_e \partial_n T_{s,\omega}^+ - \kappa_i \partial_n T_{s,\omega}^- &= 0, & en \partial\Omega_i \\
 \partial_y T_{s,\omega} &= 0, & en y = 0 \\
 \partial_y T_{s,\omega} &= 0, & en y = L_y \\
 \kappa_e \partial_x T_{s,\omega} - (h + 4\varepsilon\sigma T_{air}^3)T_{s,\omega} &= -\alpha Q_s, & en x = 0 \\
 \kappa_e \partial_x T_{s,\omega} + (h + 4\varepsilon\sigma T_{air}^3)T_{s,\omega} &= 0, & en x = L_x.
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

En este caso, la temperatura  $T_{s,\omega}$ , depende tanto de la posición de la lámpara  $s = (s_x, s_y)$  como de su frecuencia  $\omega$ .

La distribución de la temperatura o amplitud compleja de ésta que se obtiene, mediante las ecuaciones (2.4) y (2.5), en la cara exterior  $x = 0$ , se denotará como  $T^{med}$  y se corresponde con la temperatura que captaría la cámara termográfica. En caso de disponer de termografías experimentales, no sería necesario resolver el problema directo, ya que  $T^{med}$  sería un dato. Sin embargo, dado que para este TFG no se dispone de datos experimentales, las termografías utilizadas se han generado resolviendo numéricamente el problema (2.4) en la situación estacionaria, o el problema (2.5) en el caso armónico.

El problema que interesa resolver en el presente TFG es el problema inverso. En este problema se conoce la temperatura medida,  $T^{med}$ , en  $x = 0$  y se busca conocer a partir de esta temperatura la presencia de defectos, y en su caso, determinar su posición, tamaño y forma. Se trataría entonces de encontrar los defectos  $\Omega_i$  tales que al resolver el problema directo (2.4) o (2.5) se verificara que  $T_s = T^{med}$  en  $x = 0$  (en el caso estacionario) o  $T_{s,\omega} = T^{med}$  en  $x = 0$  (en el caso armónico).

En este trabajo se estudian dos posibles alternativas. Una de ellas consiste simplemente en comparar la termografía  $T^{med}$  correspondiente a la placa inspeccionada con la termografía que se obtendría en una placa sana. Se trata, por tanto, de comparar dos funciones en la superficie  $x = 0$  de la placa (véase la imagen de la Figura 3). Obviamente, a partir de esta información, sin utilizar de manera combinada con otro tipo de estrategia, lo único que se podría determinar es la altura a la que se encuentra el defecto, pero no su profundidad.

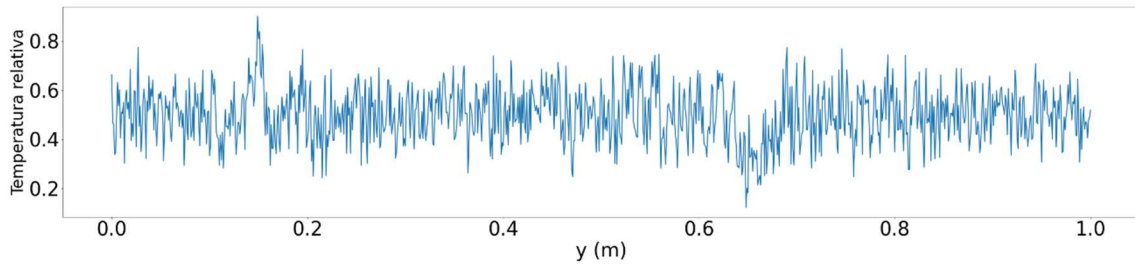


Figura 3: Termografía de la placa de ensayo excitada con una lámpara.

La otra alternativa, consiste en utilizar una herramienta adicional, la derivada topológica, que se explica en el siguiente apartado. Esta herramienta se utilizó en los artículos [3] y [4] para procesar las termografías con la finalidad de mejorar la interpretación de las mismas, consiguiendo detectar la posición del defecto de manera precisa en cuanto a su altura, pero no en cuanto a la profundidad. En las figuras 4 y 5, se puede ver esta apreciación.

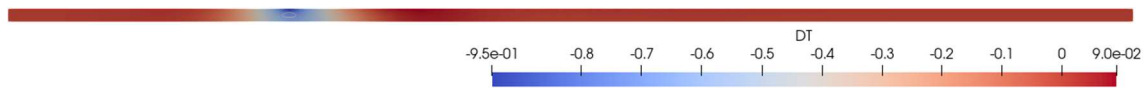


Figura 4: Valores de la derivada topológica en toda la placa.

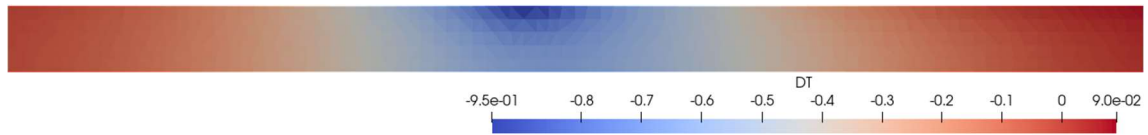


Figura 5: Ampliación de la derivada topológica de la Figura 4 en la zona del defecto.

En la Figura 4, se ha utilizado la derivada topológica para procesar los datos recogidos en las termografías. Se trata de un método numérico que sirve para procesar los datos termográficos proporcionando un mapa de color donde las zonas en las que se alcanzan los valores negativos más pronunciados (colores azules en la Figura 4) indican las zonas dañadas. Tras procesar las termografías con esta herramienta, se puede apreciar

claramente una zona anómala debido al defecto. La Figura 5 corresponde una ampliación de dicha zona, pero a simple vista, no es posible apreciar a qué profundidad se encuentra el defecto.

A continuación, se presentará la base teórica de dicha derivada topológica.

### 2.3 Definición de derivada topológica.

La derivada topológica, introducida en 1999 en el artículo [8] y explicada en el anterior trabajo [1] es una de las herramientas que va a ayudar a detectar los defectos en las muestras. Ésta representa las variaciones de un funcional cuando el dominio de éste se ve perturbado en su topología. Por lo tanto, es capaz de identificar las alteraciones de la muestra respecto al original, resaltando así, la localización de los defectos en el material.

La derivada topológica de un funcional  $J(\mathcal{R})$  es un campo escalar  $D_T$  que mide la sensibilidad del funcional cuando una bola de tamaño infinitesimal  $B_\epsilon(\mathbf{x})$  de radio  $\epsilon$  se sitúa en cada punto  $\mathbf{x} \in \mathcal{R}$ . Esto proporciona una expansión asintótica en cada punto  $\mathbf{x}$  según la siguiente formulación:

$$J(\mathcal{R} \setminus \overline{B_\epsilon(\mathbf{x})}) = J(\mathcal{R}) + D_T(\mathbf{x})\mathcal{V}(\epsilon) + o(\mathcal{V}(\epsilon)), \quad \text{con } \epsilon \rightarrow 0, \quad (2.10)$$

donde  $\mathcal{V}(\epsilon)$  es una función monótona creciente cuyo límite, cuando  $\epsilon \rightarrow 0^+$ , es igual a cero. Para el problema que nos ocupa, como se indica en los artículos [3,4], esta función es  $\mathcal{V}(\epsilon) = \pi\epsilon^2$ , es decir, coincide con el área de la bola. El objetivo es agrupar los puntos  $\mathbf{x}$  donde  $D_T(\mathbf{x})$  obtenga los valores negativos más pronunciados, ya que son los puntos que hacen que el decrecimiento del funcional sea máximo. Por lo tanto, el conjunto de defectos se aproximará como:

$$\Omega_{apr} := \left\{ \mathbf{x} \in \Omega; D_T(\mathbf{x}) < (1 - C) \min_{\mathbf{y} \in \Omega} D_T(\mathbf{y}) \right\} \quad (2.11)$$

donde el parámetro  $C$ , comprendido entre 0 y 1, se puede calibrar en función de la sensibilidad del problema.

### 2.4 Derivada topológica para el problema termográfico.

Al tener unos resultados con ruido, es muy posible que no exista ningún objeto  $\Omega_i$  para el que se verifiquen las condiciones anteriores  $T_s = T^{med}$  (ni siquiera al considerar los defectos reales se verifican las igualdades). Por ello, se va a relajar el planteamiento de manera que se minimice el cuadrado de la diferencia entre la temperatura  $T^{med}$  y la obtenida en el problema, es decir se va a buscar los objetos  $\Omega_i$  que minimicen las siguientes funciones:

$$J_s(\Omega \setminus \overline{\Omega}_i) = \frac{1}{2} \int_{\{x=0\}} |T_s - T_s^{med}|^2 dl \quad (2.6)$$

en el caso estacionario, o

$$J_{s,\omega}(\Omega \setminus \overline{\Omega}_i) = \frac{1}{2} \int_{\{x=0\}} |T_{s,\omega} - T_{s,\omega}^{med}|^2 dl \quad (2.7)$$

para el caso armónico. Se buscará entonces los objetos que minimicen estas funciones utilizando la derivada topológica.

Cuando se realizan varios experimentos con más de una lámpara o frecuencia, es conveniente promediar la contribución individual de cada experimento, para lo que consideraremos funciones de la forma:

$$J(\Omega \setminus \overline{\Omega}_i) = \sum_{j=1}^{N_{lamp}} \beta_j J_{s_j}(\Omega \setminus \overline{\Omega}_i) \quad (2.8)$$

en el caso estacionario, o

$$J(\Omega \setminus \overline{\Omega}_i) = \sum_{j=1}^{N_{lamp}} \sum_{k=1}^{N_{freq}} \beta_{jk} J_{s_j, \omega_k}(\Omega \setminus \overline{\Omega}_i) \quad (2.9)$$

para el caso armónico, siendo  $\beta_j$  y  $\beta_{jk}$  los factores que ponderan la contribución de cada experimento y que dependerá de la derivada topológica de cada una de las funciones  $J_{s_j}$  o  $J_{s_j, \omega_k}$ .

Para evaluar la derivada topológica  $D_T$  únicamente tendremos que resolver dos problemas: uno directo y otro adjunto, que tienen lugar en una placa sin defectos. Es decir, solamente con la distribución de la temperatura de la superficie, es posible la resolución del problema y no es necesaria la información sobre el número, ubicación o tamaño de los defectos desconocidos.

- **Caso estacionario:**

La derivada topológica  $D_T^s$  de la función de coste  $J_s$ , definida en la ecuación (2.6), para el caso estacionario puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$D_T^s(x) = \frac{2\kappa_e(\kappa_e - \kappa_i)}{\kappa_e + \kappa_i} \nabla T_s^0(x) \cdot \nabla V_s^0(x), \quad x \in \Omega \quad (2.12)$$

donde  $T_s^0$  corresponde a la solución del problema de la placa sin defectos:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\kappa_e \nabla T_s^0) &= 0, & \text{en } \Omega, \\ \partial_y T_s^0 &= 0, & \text{en } y = 0, \\ \partial_y T_s^0 &= 0, & \text{en } y = L_y, \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\kappa_e \partial_x T_s^0 - (h + 4\varepsilon \sigma T_{air}^3) T_s^0 = -(h T_{air} + (\alpha + 3\varepsilon) \sigma T_{air}^4) - \alpha q_s, \quad \text{en } x = 0,$$

$$\kappa_e \partial_x T_s^0 + (h + 4\varepsilon \sigma T_{air}^3) T_s^0 = h T_{air} + (\alpha + 3\varepsilon) \sigma T_{air}^4, \quad \text{en } x = L_x,$$

y  $V_s^0$  corresponde a la solución del problema adjunto asociado, que de nuevo tiene lugar en una placa sin defectos:

$$\nabla \cdot (\kappa_e \nabla V_s^0) = 0, \quad \text{en } \Omega,$$

$$\begin{aligned}
 \partial_y V_s^0 &= 0, & \text{en } y = 0, \\
 \partial_y V_s^0 &= 0, & \text{en } y = L_y, \\
 \kappa_e \partial_x V_s^0 - (h + 4\varepsilon\sigma T_{air}^3) V_s^0 &= T_s^{med} - T_s^0, & \text{en } x = 0, \\
 \kappa_e \partial_x V_s^0 + (h + 4\varepsilon\sigma T_{air}^3) V_s^0 &= 0, & \text{en } x = L_x.
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

• **Caso armónico:**

La derivada topológica  $D_T^{s,\omega}$  de la función de coste  $J_{s,\omega}$ , definida en la ecuación (2.7), para el caso armónico viene dada por la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned}
 D_T^{s,\omega}(x) = & \left( \frac{2\kappa_e(\kappa_e - \kappa_i)}{\kappa_e + \kappa_i} \nabla T_{s,\omega}^0(x) \cdot \overline{\nabla V_{s,\omega}^0(x)} \right. \\
 & \left. - i\omega(\rho_e c_e - \rho_i c_i) T_{s,\omega}^0(x) \overline{V_{s,\omega}^0(x)} \right), \quad x \in \Omega,
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

donde  $T_{s,\omega}^0$  corresponde a la solución del problema de la placa sin defectos:

$$\begin{aligned}
 \nabla \cdot (\kappa_e \nabla T_{s,\omega}^0) + i\omega\rho_e c_e T_{s,\omega}^0 &= 0, & \text{en } \Omega, \\
 \partial_y T_{s,\omega}^0 &= 0, & \text{en } y = 0, \\
 \partial_y T_{s,\omega}^0 &= 0, & \text{en } y = L_y, \\
 \kappa_e \partial_x T_{s,\omega}^0 - (h + 4\varepsilon\sigma T_{air}^3) T_{s,\omega}^0 &= -\alpha Q_s, & \text{en } x = 0, \\
 \kappa_e \partial_x T_{s,\omega}^0 + (h + 4\varepsilon\sigma T_{air}^3) T_{s,\omega}^0 &= 0, & \text{en } x = L_x.
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

y  $V_{s,\omega}^0$  corresponde a la solución del problema adjunto:

$$\begin{aligned}
 \nabla \cdot (\kappa_e \nabla V_{s,\omega}^0) - i\omega\rho_e c_e V_{s,\omega}^0 &= 0, & \text{en } \Omega, \\
 \partial_y V_{s,\omega}^0 &= 0, & \text{en } y = 0, \\
 \partial_y V_{s,\omega}^0 &= 0, & \text{en } y = L_y, \\
 \kappa_e \partial_x V_{s,\omega}^0 - (h + 4\varepsilon\sigma T_{air}^3) V_{s,\omega}^0 &= T_{s,\omega}^{med} - T_{s,\omega}^0, & \text{en } x = 0, \\
 \kappa_e \partial_x V_{s,\omega}^0 + (h + 4\varepsilon\sigma T_{air}^3) V_{s,\omega}^0 &= 0, & \text{en } x = L_x.
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

En el caso estacionario, se puede apreciar que la ecuación (2.12) únicamente depende de la conductividad interior  $\kappa_i$  mediante el factor multiplicador  $2\kappa_e(\kappa_e - \kappa_i)/(\kappa_e + \kappa_i)$ . Por lo tanto, lo único relevante es si  $\kappa_e < \kappa_i$  o si  $\kappa_e > \kappa_i$ , ya que solamente interesa saber los valores más negativos de  $D_T^s$ .

En el caso armónico, la dependencia de los parámetros es más compleja, puesto que la expresión (2.15) corresponde a una combinación lineal de dos términos,  $\nabla T_{s,\omega}^0 \cdot \overline{\nabla V_{s,\omega}^0}$  y  $T_{s,\omega}^0 \overline{V_{s,\omega}^0}$ , que dependen de los parámetros interiores. Si se desconocen dichos parámetros, se puede calcular la sensibilidad considerando a estos términos como funciones indicadoras de daño.



Finalmente, puesto que las derivadas topológicas de los funcionales  $J_s$  y  $J_{s,\omega}$  consisten en combinaciones lineales de derivadas topológicas de funcionales individuales, en el artículo [3] se propone utilizar los siguientes pesos en las definiciones (2.8) y (2.9):

$$\beta_j = \frac{1}{|\min_{y \in \Omega} D_T^{s_j}(y)|} \quad (2.18)$$

$$\beta_{jk} = \frac{1}{|\min_{y \in \Omega} D_T^{s_j, \omega_k}(y)|}$$

Esta elección de pesos evita que se pierda información de frecuencias o posiciones de lámparas (como en el caso  $\beta_j = 1$  o  $\beta_{jk} = 1$ ), puesto que de esta manera se garantiza que  $\min_{y \in \Omega} \beta_j D_T^{s_j}(y) = -1$  y  $\min_{y \in \Omega} \beta_{jk} D_T^{s_j, \omega_k}(y) = -1$ .

En la Figura 7, extraída del artículo [9], se ilustra la aplicación de las técnicas termográficas, descritas anteriormente, a una placa con los defectos situados de la forma que se indica en la Figura 6.

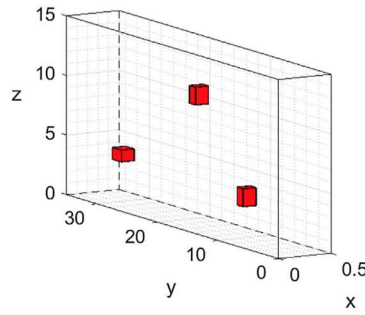


Figura 6: Ubicación de los defectos de una placa. Fuente: [9]

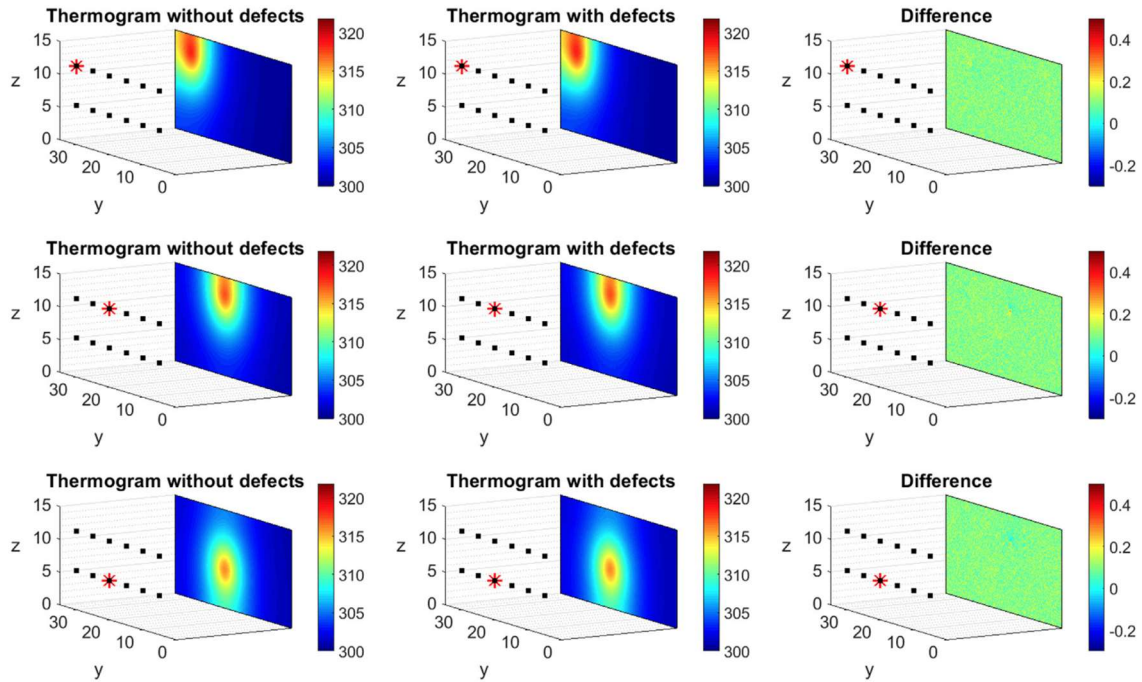


Figura 7: Aplicación de técnicas termográficas en una placa con defectos. Fuente: [9]

En la Figura 7 se puede observar en la primera columna, la medición de las temperaturas de una placa sin defectos con lámparas en distintas posiciones; en la segunda columna se realiza la misma medición con una placa con defectos y finalmente en la tercera columna se muestra la diferencia de temperatura que aparecen entre ambas mediciones. Como se puede observar, comparando ambas termografías, no es posible identificar con certeza la posición de los defectos mostrados en la Figura 6. Por ello, con el fin de llegar a un resultado, en el mismo artículo [9], se utiliza la derivada topológica para procesar estas imágenes termográficas, obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 8.

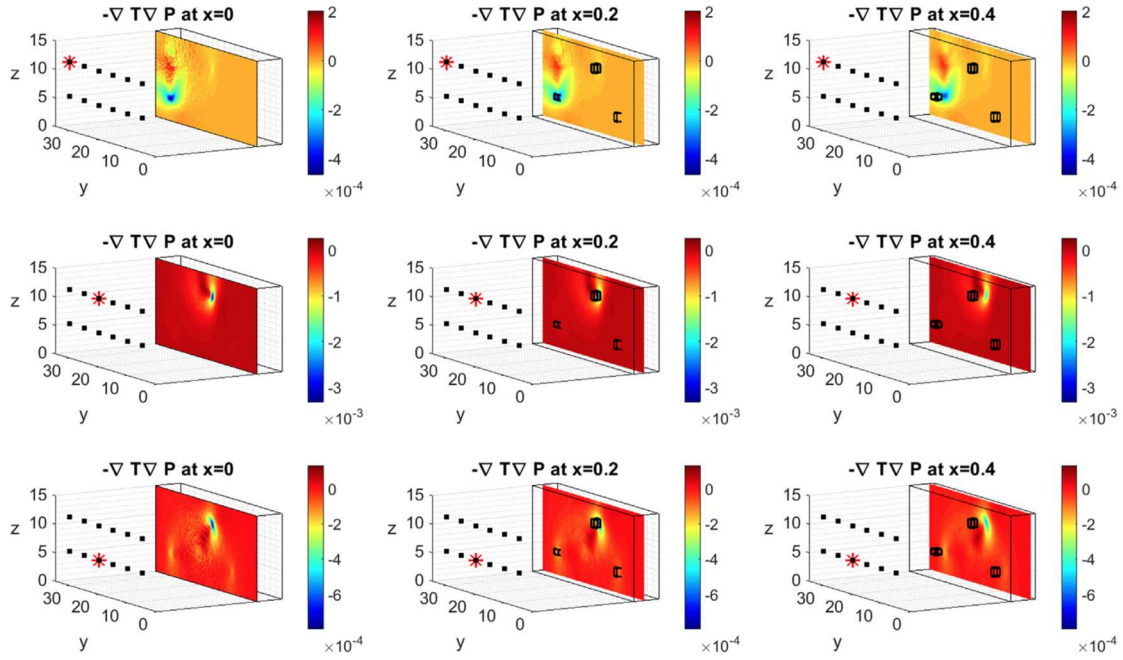


Figura 8: Aplicación de derivadas topológicas en termografías de placas con defectos. Fuente: [9]

En la Figura 8 se representan los valores de la derivada topológica en los planos  $x = 0$ ,  $x = 0.2$  y  $x = 0.4$  obtenidos al procesar las termografías mostradas en la Figura 7, de forma que las imágenes de las filas 1, 2 y 3 de la Figura 8 muestran la derivada topológica correspondiente a las termografías de las filas 1, 2 y 3 de la Figura 7. Puede observarse que la derivada topológica en termografías ayuda mucho a resaltar la posición de alguno de los defectos. Observamos también que dependiendo de la posición de la lámpara considerada se identifica un objeto u otro (en particular, ninguna las tres posiciones consideradas es idónea para detectar la presencia del defecto situado a la derecha de la placa). Para mejorar el resultado obtenido, en el mismo trabajo [9], se combina varias derivadas para distintas lámparas considerando la función promedio  $J$  definida en (2.8) con los pesos  $\beta_j$  definidos en (2.18).

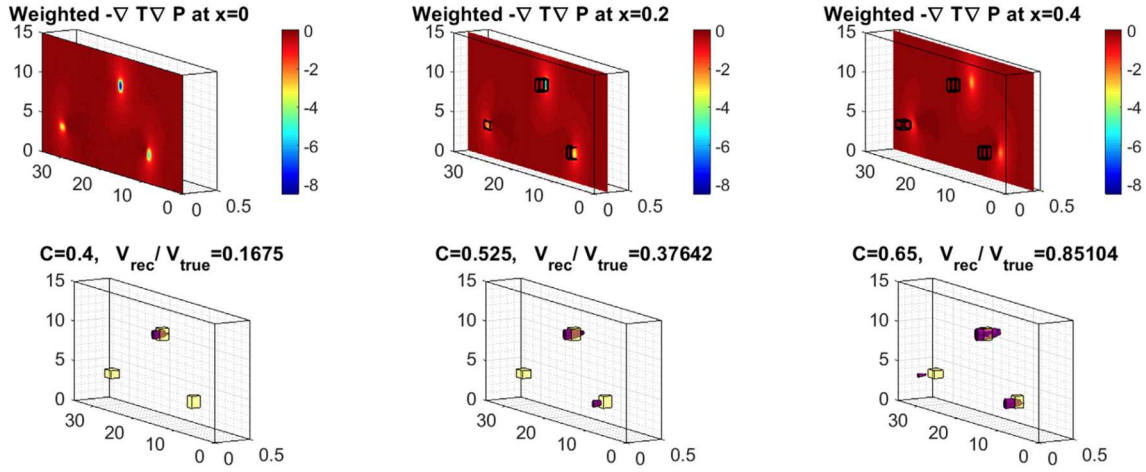


Figura 9: Valores en los planos  $x = 0$ ,  $x = 0.2$  y  $x = 0.4$  de la derivada topológica de la función (2.8) con pesos definidos en (2.18). En la segunda fila se muestran los objetos reales (en color amarillo) y los reconstruidos (en magenta) al considerar la aproximación indicada en (2.11) para tres valores distintos de la constante  $C$ . Fuente: [9]

En la Figura 9, después de combinar varias derivadas topológicas para distintas lámparas, se pueden identificar perfectamente los defectos de la placa, pero no es posible saber la profundidad a la que se encuentran estos ya que se observa que independientemente del valor seleccionado de la constante  $C$ , los defectos parecen estar localizados en la cara frontal de la placa.

Esta imprecisión de las derivadas topológicas aplicadas a termografías, no se encuentra cuando aplicamos el método en otras técnicas de inspección no destructiva, como las radiográficas, ultrasónicas o electromagnéticas. En la Figura 10, extraída del artículo [10], muestra los resultados correspondientes a la aplicación de la derivada topológica en una técnica de inspección electromagnética. Y se puede observar que el resultado del método (imagen central) es capaz de dar información muy precisa, si la comparamos con los defectos originales (imagen de la derecha), sobre la profundidad de los defectos y la forma de estos.

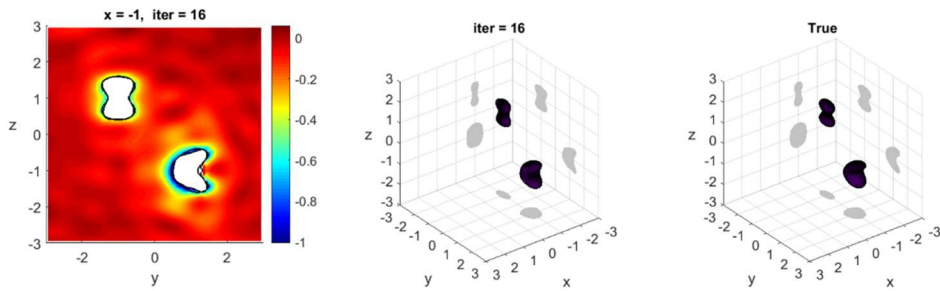


Figura 10: Aplicación de la derivada topológica en método de inspección electromagnética. [10]

Por lo tanto, este proyecto tratará de ver el comportamiento de las redes neuronales a la hora de predecir la profundidad de los defectos a dos conjuntos de datos: los valores resultantes tras contrarrestar la termografía de una placa sana y una dañada, y los valores que se obtienen tras la aplicación de la derivada topológica a dichas termografías.

## 2.5 Base de datos del experimento

Para las termografías, se ha seleccionado la base de datos “Base 7.1” realizada mediante el método de excitación estacionaria en el TFG de Á.Mateo [2]. Y para las derivadas topológicas se ha utilizado la base de datos “Harmonic DTt 30” realizadas mediante el método de excitación armónico en el TFM de S.Colubi [1].

En la Tabla 1 se muestra las características tanto de las muestras como del propio entorno:

Conductividad térmica del metal	$\kappa_{Al} = 200 \frac{W}{m \cdot K}$
Conductividad térmica del aire	$\kappa_{air} = 0,025 \frac{W}{m \cdot K}$
Emisividad del metal	$\epsilon = 0,08$
Absortancia del metal	$\alpha = 0,4$
Coefficiente de convección natural	$h = 15 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
Constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$
Temperatura ambiente del aire	$T_{air} = 290 K$
Calor específico del aluminio	$c_{Al} = 900 \frac{J}{kg \cdot K}$
Calor específico del aire	$c_{air} = 1000 \frac{J}{kg \cdot K}$
Intensidad de radiación	$I = 6000 \frac{W}{m^2}$
Posición horizontal de la lámpara	$x_s = -0,15 m$

Tabla 1: Características de las muestras y del entorno

Para ampliar la información sobre las técnicas termográficas, la creación del experimento, los ensayos correspondientes o el proceso de parametrización de las variables, se puede consultar en el TFM de Sergio Colubi [1] y en el TFG de Ángel Mateo [2]. Este trabajo va a estar enfocado en el postproceso de los datos adquiridos en dichos experimentos.