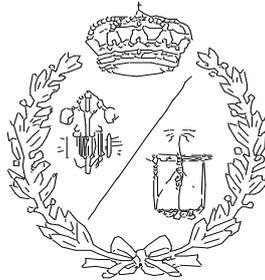


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Máster

**Algorítmica de reconstrucción de
respuesta térmica 3D ante calentamientos
lineales**

**(Algorithm of Thermal response 3D data
reconstruction obtained from linear heating
excitation)**

Para acceder al Título de

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERIA INDUSTRIAL**

Autor: Adrián Roderó Ramón
Tutor: Francisco Javier Madruga Saavedra

RESUMEN

La búsqueda constante de nuevos métodos de ensayos no destructivos, entre los que se encuentra la termografía infrarroja, hace necesario la creación de nuevas funciones y formas de ensayar las piezas deseadas. En el caso de objetos muy largos en uno de sus ejes y que no permiten un calentamiento uniforme en toda la pieza de una vez, se propone la aplicación de un preprocesado a una secuencia térmica en la que la pieza está en movimiento mientras sufre un calentamiento lineal. El objetivo será obtener una secuencia de enfriamiento de toda la pieza en una secuencia de imágenes 2D, a la cual se le podrá aplicar varios procesados, típicos de termografía infrarroja para identificar sus defectos subsuperficiales.

ABSTRACT

Non-destructive testing research is keep improving its methods, one of them is the infrared thermography which is developing new functions and ways to inspect materials. The aim on this document is to develop a new algorithm to examine a large item in one of his longitude and which cannot be heated in one step. The record needs a pre-processing to adapt the movement between the camera and the test piece, getting a unique image 2D with the cooling sequence. Finally, some processing technique will be applied in order to see the defects

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Método de uso de líquidos penetrantes	7
Ilustración 2. Uso de partículas magnéticas	8
Ilustración 3. Examinación de una pieza por rallo X	9
Ilustración 4. Detección de defectos por ultrasonidos	10
Ilustración 5. Componentes necesarias en el análisis por termografía infrarroja.....	13
Ilustración 6. Set para la recopilación de datos en el laboratorio	19
Ilustración 7. Probeta bajo estudio por termografía	20
Ilustración 8. Cámara infrarroja.....	20
Ilustración 9. Fotograma de la probeta (1)	21
Ilustración 10. Fotograma de la probeta (2)	22
Ilustración 11. Secuencia de movimiento en la grabación.	23
Ilustración 12. Secuencia de movimiento de la probeta en la grabación.....	24
Ilustración 13. Relación entre la imagen global 2D y la matriz de referencia	24
Ilustración 14. Obtención de la imagen global 2D	25
Ilustración 15. Imagen global 2D de la probeta.....	25
Ilustración 16. Ajuste del marco a los pixeles de interés.....	29
Ilustración 17. Imagen 2D global recortada y ajustada a la probeta.....	29
Ilustración 18. Fila de pixeles de la pieza en diferentes fotogramas	30
Ilustración 19. Secuencia de enfriamiento de la probeta	31
Ilustración 20. Curva de enfriamiento ideal	31
Ilustración 21. Curva de enfriamiento con defecto en la pieza	32
Ilustración 22. Curvas de enfriamiento con defecto subsuperficial y más profundos	32
Ilustración 23. Gráfica de enfriamiento de 3 puntos de la pieza	33
Ilustración 24. Media móvil aplicada a los mismos puntos.....	37
Ilustración 25. Curva enfriamiento con velocidad 66 y temperatura 250°C.....	37
Ilustración 26. Imagen 2D completa sin media móvil (arriba) y con media móvil de 4 puntos (abajo)	38
Ilustración 27. Procesado DAC	41
Ilustración 28. Procesado DFT	41
Ilustración 29. Procesado PPT.....	42
Ilustración 30. Procesado PCT	42
Ilustración 31. Procesado DFT. Defectos de diferentes formas	42
Ilustración 32. Procesado PCT. Defectos de diferentes formas	43
Ilustración 33. Esquema de una grabación con cierta inclinación en la cámara	47

ÍNDICE

Resumen.....	I
Abstract.....	III
Tabla de ilustraciones	V
Capítulo 1 Introducción	3
1.1 Ensayos no destructivos	5
1.1.1 Inspección visual (VT).....	6
1.1.2 Líquidos penetrantes (PT).....	7
1.1.3 Partículas magnéticas (MT)	8
1.1.4 Corrientes inducidas (ET)	8
1.1.5 Radiografía (RT).....	9
1.1.6 Ultrasonidos (UT)	10
1.1.7 Emisión acústica (AE)	10
1.1.8 Termografía infrarroja	11
1.2 Tratamiento de señales en ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja.....	13
1.3. Motivación del trabajo de fin de master.....	15
Capítulo 2 Objetivos del proyecto	17
2.1 Set para la recopilación de la secuencia térmica	19
2.2 Objetivos parciales	21
2.2.1 Velocidad de la pieza y distancia de la cámara	22
2.3. Grabación infrarroja	23
2.4 Reconstrucción 2D	24
Capítulo 3 Algoritmo de respuesta térmica	27
3.1. Selección de los pixeles característicos.....	29
3.2. Construcción de la matriz de enfriamiento	30
3.3 Curvas de enfriamiento	31
Capítulo 4 Resultados	35
4.1. Media móvil	37
4.3. Técnicas de procesado.....	38
4.3.1 Contraste térmico.....	39
4.3.2. Transformadas	40
4.4. Aplicación de procesados.....	41
Capítulo 5 Conclusiones	45
Capítulo 6 Posibles puntos de mejora	47

Anexo 1. Código con el algoritmo.....	49
BIBLIOGRAFÍA.....	53

El uso cada vez más recurrente de los ensayos no destructivos en los diferentes procesos de fabricación, ha conllevado al desarrollo de múltiples técnicas menos convencionales. Entre todas estas, se encuentra el tratamiento digital de imágenes térmicas mediante termografía infrarroja, la cual permite localizar e identificar los posibles defectos y discontinuidades presentes en el espécimen bajo estudio. En este capítulo se presentará una breve introducción a las principales técnicas de ensayos no destructivos, identificando sus carencias y analizando las posibles soluciones y alternativas que ofrecen los ensayos mediante termografía infrarroja, de la cual se hará una breve introducción a las tres etapas principales que comprende el tratamiento de imágenes térmicas: pre-procesado, procesado y análisis

1.1 Ensayos no destructivos

Se denomina ensayo no destructivo (END, o en inglés NDT de nondestructive testing) a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo. Los diferentes métodos de ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada. [1]

Para garantizar la correcta realización de las diferentes técnicas de END es necesario hacer uso de patrones de calibración y estándares de referencia (ASME, ASTM, AWS, ISO) a partir de los cuales se pueden comparar los resultados obtenidos. La cualificación de los inspectores encargados de realizar estos ensayos se obtiene a través de la ASNT (American Society for Nondestructive Testing), donde la capacitación de los mismos se desarrolla según los niveles I, II y III de cada técnica a desarrollar. En España, el organismo encargado de realizar estas certificaciones es CERTIAEND siguiendo los requisitos establecidos por la normal UNE-EN ISO 9712:2012.

Los diferentes métodos para ensayos no destructivos se pueden clasificar en dos grupos principales según su aplicación y la profundidad del defecto: Pruebas superficiales y pruebas volumétricas.

Pruebas no destructivas superficiales

Estas pruebas proporcionan información acerca de la sanidad superficial de los materiales inspeccionados.

- VT – Inspección Visual,
- PT – Líquidos Penetrantes
- MT – Partículas Magnéticas
- ET – Electromagnetismo

En el caso de utilizar VT y PT se tiene la limitante para detectar únicamente discontinuidades superficiales (abiertas a la superficie); y con MT y ET se tiene la posibilidad de detectar tanto discontinuidades superficiales como sub-superficiales, las que se encuentran debajo de la superficie pero muy cercanas a ella.

Pruebas no destructivas volumétricas

Estas pruebas proporcionan información acerca de la sanidad interna de los materiales inspeccionados.

- RT – Radiografía Industrial
- UT – Ultrasonido Industrial
- AE – Emisión Acústica

Estos métodos permiten la detección de discontinuidades internas y sub-superficiales, así como bajo ciertas condiciones, la detección de discontinuidades superficiales.

En el caso de los ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja, a partir de la técnica empleada puede aplicarse tanto en inspecciones superficiales como en volumétricas.

1.1.1 Inspección visual (VT)

Las técnicas de Inspección visual (Visual testing – VT) es la más comúnmente empleada en la industria. Como su nombre lo indica, consiste en la inspección visual del objeto de estudio para evaluar la presencia de discontinuidades en la superficie.

Existe tres formas de realizar la inspección visual: por visión directa del objeto, por visión mejorada mediante el empleo de instrumentos ópticos tales como lupas, espejos, endoscopios, etc. y por visión remota haciendo uso de sistemas de visualización asistida por ordenador.

A pesar de las diversas ventajas que ofrece el uso de esta técnica (bajo coste, aplicable a cualquier etapa del proceso industrial, etc.), presenta algunas carencias significativas:

- La calidad de la inspección visual depende directamente de la experiencia del inspector y de los conocimientos que se tengan de las características del objeto a analizar.
- La identificación de discontinuidades está limitada a la superficie del objeto
- La inspección mediante visión directa depende de la agudeza visual del inspector

1.1.2 Líquidos penetrantes (PT)

El ensayo por líquidos penetrantes es un método de END que permite la determinación de discontinuidades superficiales en materiales sólidos no porosos. El procedimiento está limitado a discontinuidades que se encuentren abiertas a la superficie, si por el contrario el defecto es subsuperficial no se puede detectar usando esta técnica. El procedimiento se basa en que la aplicación de un líquido sobre la superficie limpia de la pieza, penetrando en las discontinuidades que afloran a la superficie debido al efecto capilar, de forma que, al limpiar el exceso de líquido de la superficie, quede solamente el líquido introducido en las discontinuidades. Al salir posteriormente ese líquido, ayudado normalmente por la acción de un agente denominado revelador, señala sobre la superficie las zonas en las que existen discontinuidades. [2]

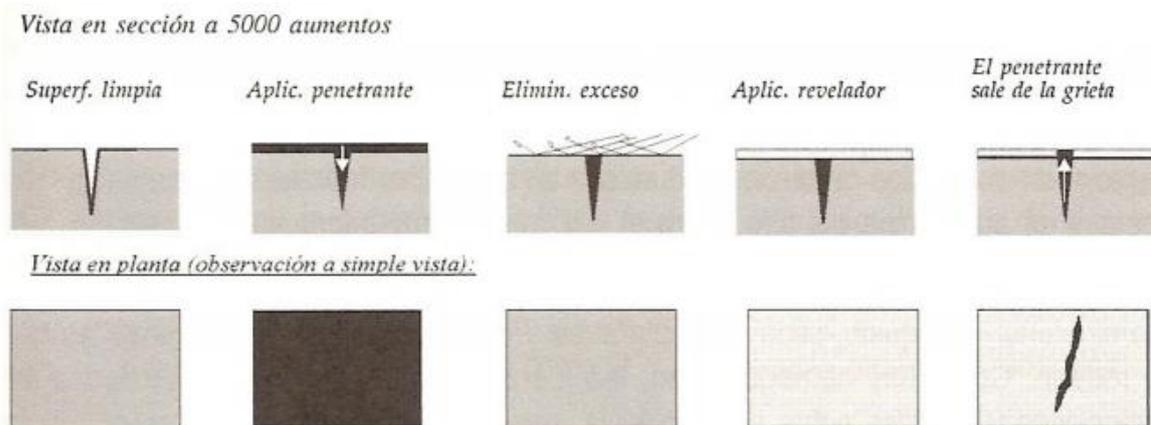


Ilustración 1. Método de uso de líquidos penetrantes

El empleo de esta técnica permite la identificación de defectos de forma relativamente rápida y económica mostrando los defectos superficiales del material a simple vista ya sea por contraste o por fluorescencia [3]. A pesar de estas ventajas, esta técnica de ensayos no destructivos presenta algunas limitaciones significativas:

- Solo detecta fallas superficiales
- Difícil establecimiento de patrones
- La superficie para inspeccionar debe estar limpia y sin recubrimientos
- No se puede inspeccionar materiales demasiado porosos

1.1.3 Partículas magnéticas (MT)

Estos ensayos tienen la misión de detectar en una pieza las posibles discontinuidades (en materiales ferromagnéticos) que haya no solo en la superficie, sino también en las proximidades de ella (discontinuidades subsuperficiales).

El método se basa en la atracción de un polvo metálico aplicado sobre la superficie hacia las discontinuidades presentes en el material bajo la acción de un campo magnético. La acumulación de este polvo metálico en torno a las discontinuidades revelará la localización de las mismas. Esta peculiaridad hace que este ensayo pueda realizarse en ciertas circunstancias a piezas pintadas o con imprimación.

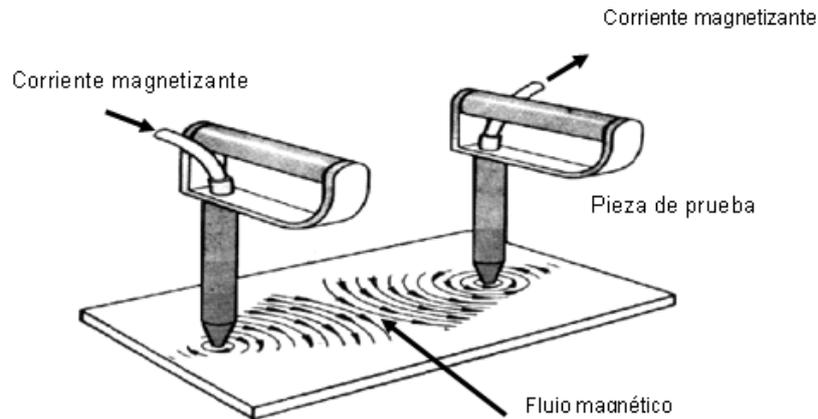


Ilustración 2. Uso de partículas magnéticas

La técnica de ensayos no destructivos mediante partículas magnéticas presenta un gran número de variantes entre las cuales destacan cuatro métodos principales, el de magnetización por yugo, por puntas de contacto, por bobina y por cabezales. Para mejorar el contraste y facilitar la identificación de los defectos en esta técnica se emplean colorantes visibles o fluorescentes.

El empleo de esta técnica permite realizar inspecciones que requieren un grado menor de limpieza previa respecto a las técnicas mencionadas anteriormente. Permite identificar discontinuidades en el material con mayor resolución. Presenta un amplio abanico de métodos que pueden ser aplicados en dependencia de las características presentes en la instalación a inspeccionar. A pesar de estas ventajas, esta técnica de ensayo no destructivo presenta algunas limitaciones significativas:

- Su aplicación está limitada a materiales ferromagnéticos
- Requiere de una limpieza previa del material a inspeccionar.
- El flujo magnético debe ser perpendicular al defecto
- Al finalizar la inspección la pieza debe ser desmagnetizada

1.1.4 Corrientes inducidas (ET)

Las pruebas por corrientes inducidas se basan en la inducción electromagnética generada por una bobina de corriente alterna aplicada en un material electro-conductor.

Como consecuencia del campo magnético aplicado, se genera otro de signo contrario en la pieza. El patrón de flujo de la corriente secundaria (corriente de Eddy) se verá afectado

por las discontinuidades presentes en el material, las cuales podrán ser caracterizadas a partir de los cambios en la densidad de la corriente inducida. [4] [5].

Las características del material y la versatilidad del ensayo, le confiere tres aplicaciones esenciales: Detección de discontinuidades, medición de propiedades de los materiales y mediciones dimensionales. Además su alta velocidad de prueba permite la automatización en inspección de geometrías sencillas. Sin embargo, a pesar de estas ventajas, esta técnica de ensayos no destructivos presenta algunas limitaciones significativas:

- La detección de discontinuidades subsuperficiales es limitada y dependerá de la frecuencia de excitación empleada.
- Requiere una limpieza previa del material a inspeccionar
- Presenta una alta sensibilidad a las características y composición del material, lo cual puede producir ocultaciones o identificaciones falsas de defectos.
- Requiere el empleo de una bobina de prueba la cual variara en dependencia de la pieza a inspeccionar

1.1.5 Radiografía (RT)

La técnica de END de inspección volumétrica mediante radiografía consiste en la evaluación de materiales mediante la exposición de estos a rayos X o Gamma. La capacidad de penetración de estas radiaciones permite identificar los defectos y discontinuidades presentes en el interior del material inspeccionado. Al atravesar la pieza, la radiación electromagnética empleada es adsorbida o atenuada. [6]

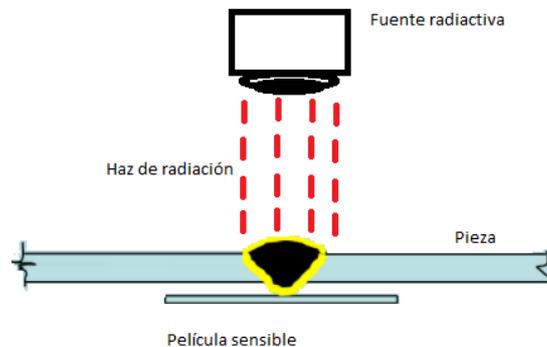


Ilustración 3. Examinación de una pieza por raios X

La radiografía es un registro permanente, puede ser realizada en un gran número de materiales y permite identificar la naturaleza de la discontinuidad. No obstante, el empleo de esta técnica posee algunas carencias significativas:

- Es una técnica que requiere del cumplimiento de estrictas medidas de seguridad
- Los elementos a inspeccionar deben ser de fácil acceso puesto que se emplean los dos lados en el análisis
- Presenta limitaciones a partir de la geometría de la pieza y la orientación de la radiación

1.1.6 Ultrasonidos (UT)

La técnica de inspección con ultrasonidos se basa en la impedancia acústica, la cual depende de la velocidad máxima de propagación del sonido en el material inspeccionado y de la densidad del mismo. Las ondas ultrasónicas se pueden propagar en el material principalmente de forma longitudinal o de forma transversal, aunque también se emplean otros modos de propagación como pueden ser de forma superficial, de barra o de Lamb. referencia. [7]

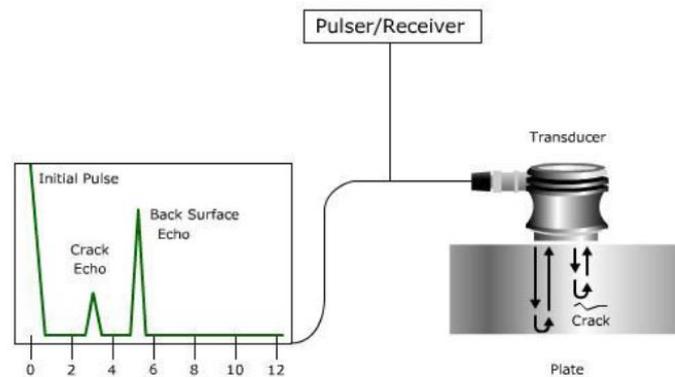


Ilustración 4. Detección de defectos por ultrasonidos

En este tipo de ensayos es recomendable el uso de algún acoplante (aceite, grasa, glicerina, etc.) que reduzca las pérdidas entre la interface del transductor y la pieza a inspeccionar. La viscosidad del acoplante a emplear estará condicionada por la rugosidad superficial del material a inspeccionar. Los ensayos no destructivos mediante ultrasonidos presentan varios tipos de métodos de aplicación, a partir del tipo de acoplamiento acústico empleado se pueden aplicar el método por contacto (pulso-eco o por transmisión) o el método por inmersión (en tanque, chorro de agua o de rueda)

Las técnicas mediante ultrasonidos pueden ser aplicadas para inspeccionar un amplio rango de materiales y procesos industriales permitiendo la identificación de discontinuidades tanto superficiales como subsuperficiales o internas, dependiendo siempre del tipo de palpador y de la frecuencia empleados. No obstante, el empleo de esta técnica posee algunas carencias.

- Requiere del empleo previo de varios tipos de palpadores para poder seleccionar el más adecuado para el objeto bajo análisis.
- Presenta limitaciones en piezas de geometría irregular.
- Requiere de estándares de referencia para la correcta calibración de los equipos.
- El operario debe tener una alta cualificación y experiencia.
- Es necesario un acoplante para una mejor detección.

1.1.7 Emisión acústica (AE)

El ensayo por medio de emisión acústica se basa en la propagación de ondas elástica transitorias a través del material a inspeccionar generadas a partir de la liberación rápida de energía a partir del empleo de fuentes externas localizadas con el objetivo de captar la información respecto al movimiento de las dislocaciones internas del material producto de las ondas de tensión generadas. Esta información es captada mediante el empleo de

transductores (sensores piezoeléctricos) similares de los palpadores empleados en los ensayos mediante ultrasonidos, pero en este caso funcionan de forma inversa (la emisión acústica captada es transformada en impulsos eléctricos) [8].

Esta técnica permite la detección de los defectos internos o fracturas presentes en el material de forma rápida y temprana, así como el crecimiento y movimientos de estos, con una alta sensibilidad permitiendo realizar inspecciones en tiempo real. Mediante el uso de patrones de referencia se pueden realizar evaluaciones del comportamiento del material para detectar las fisuras que pueden producirse producto de las cargas de trabajo a las que se somete la pieza durante su explotación [9]. Entre sus limitaciones y carencias se encuentran:

- Requiere de una selección previa de las frecuencias de rastreo en función de las discontinuidades que se desean detectar.
- Debido a su alta sensibilidad, los ensayos pueden verse afectados por el ruido de fondo
- Los operarios deben tener una alta experiencia debido a la complejidad en la interpretación de los resultados así como en el uso del equipamiento y accesorios.
- Los equipos empleados en los ensayos presentan costes relativamente elevados
- En muchas ocasiones es necesario el empleo de técnicas complementarias, ya que esta técnica no permite realizar análisis cuantitativos.

1.1.8 Termografía infrarroja

La técnica de END mediante termografía infrarroja se basa en la reproducción de imágenes visibles a partir de la luz infrarroja (invisible para el ojo humano) emitida por todos los cuerpos debido a su condición térmica (temperatura superior a 0 K)

Su origen data de principios del siglo XIX, aunque no es hasta la década de los 60 cuando comienza a aplicarse en la medida de transferencia de calor. Producto de la aplicación de esta técnica se obtienen imágenes infrarrojas (termogramas) o fotografías del calor, emitido por los objetos a partir de las cuales se puede obtener su temperatura [10]. Estas técnicas termográficas se clasifican en activas o pasivas, a partir de la existencia o no de fuentes de excitación externas. La termografía activa ofrece la ventaja de evaluar objetos a temperatura ambiente evaluando el valor reemitido por el material previa aplicación de una excitación externa. Como resultado se obtienen termogramas con un patrón térmico que posibilita una caracterización cuantitativa del interior del espécimen [11]. Las técnicas de ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja, y al igual que el resto de técnicas END anteriormente mencionadas, poseen ventajas y carencias. A continuación se muestran las principales carencias que presentan las técnicas END por termografía infrarroja activa.

- Problemas con la presencia de valores diferentes de emisividad en el material.
- Limitaciones en la profundidad de los defectos a detectar.
- Limitaciones y perturbaciones a partir de las pérdidas de calor ocasionadas por los diferentes mecanismos de transferencia de calor (convección, radiación y conducción).

- Limitaciones en las medidas a partir de la distancia entre el sensor IR y la superficie a evaluar debido a la absorción de la radiación infrarroja por la atmósfera en grandes distancias.

A pesar de las carencias mencionadas anteriormente, los ensayos mediante termografía infrarroja ofrecen un amplio rango de ventajas respecto al resto de técnicas de ensayos no destructivos, aportando soluciones alternativas de forma rápida y fiable frente a las técnicas convencionales. Entre estas ventajas [12] encontramos que:

- Permiten la identificación de discontinuidades superficiales y subsuperficiales, obteniendo datos relativamente fáciles de interpretar de forma rápida y sencilla, a diferencia de los ensayos mediante inspección visual (VT).
- La calidad de las inspecciones no siempre estará condicionada por la experiencia del operario, ya que, muchos de los algoritmos de tratamiento de secuencias de imágenes térmicas permiten la identificación de los defectos de forma automática.
- Las técnicas IR no son invasivas y permiten realizar ensayos sin contacto. Estas características dan solución a algunas de las carencias que se detectan en los ensayos mediante líquidos penetrantes (PT), en los ensayos mediante corrientes inducidas (ET) y en los ensayos mediante partículas magnéticas (MT), donde se requiere realizar una limpieza previa de la pieza a inspeccionar y donde, al concluir los ensayos se hace necesario o bien desmagnetizar la pieza (en ensayos MT) o realizar otra limpieza de la pieza para retirar los compuestos aplicados sobre la misma (en ensayos PT).
- Permiten analizar todo tipo de materiales, a diferencia de los ensayos MT, los cuales están limitados a materiales ferromagnéticos.
- En el caso de los ensayos mediante radiografía (RT), las técnicas infrarrojas ofrecen una ventaja significativa, puesto que carecen de exposición a radiaciones ionizantes, aportan mayor seguridad a los operarios e inspectores durante los ensayos y no requieren de zonas aisladas o controladas para su uso. Al permitir realizar ensayos en reflexión, las técnicas termográficas permiten analizar elementos que presentan ciertas limitaciones en sus condiciones de acceso, al contrario de las técnicas mediante RT, que requieren el empleo de ambos lados de la pieza.
- Las técnicas de ensayos no destructivos mediante ultrasonido (UT) requieren del empleo previo de estándares de referencia, varios tipos de palpadores, así como la utilización de diversos equipos y accesorios de alto coste durante los ensayos. Por lo cual, los ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja (IR) ofrecen una solución alternativa a estos, permitiendo obtener buenos resultados de forma más rápida, sencilla y sin contacto. Lo mismo sucede cuando se analizan las carencias de los ensayos emisión acústica (AE), además, en este caso específico, las técnicas infrarrojas permiten realizar análisis cualitativos y cuantitativos sin necesidad de emplear técnicas complementarias, como sucede en los ensayos mediante AE.

1.2 Tratamiento de señales en ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja

Los ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja se basan en el análisis de la respuesta térmica de un espécimen ante una excitación, la cual puede ser debida a iluminación, ultrasonidos, a corrientes inducidas, etc. Y que permite la detección de defectos y discontinuidades presentes en el mismo.

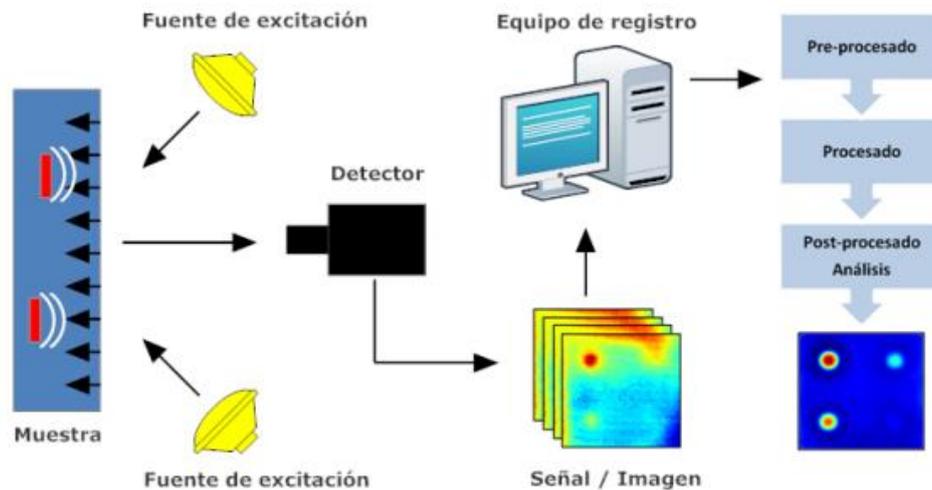


Ilustración 5. Componentes necesarias en el análisis por termografía infrarroja

La instrumentación necesaria para este ensayo se compone básicamente de la fuente de excitación, un detector y un equipo de registro que recoja la señal y le aplique el pre-procesado, procesado y post-procesado.

Ahora bien, la fuente de excitación puede colocarse en la misma cara que la cámara infrarroja o bien en la cara opuesta, según el empleado se estará haciendo el ensayo por reflexión o transmisión, respectivamente. El primero es más útil para detectar defectos superficiales, mientras que el segundo es mejor para defectos más profundos.

Además, existen varios modos de excitar la pieza, entre ellos se encuentra el modo puntual, lineal o de superficie. Según el método utilizado, el preprocesado será diferente.

En el caso de las fuentes de excitación puntual, como puede ser con un puntero laser, se observa una distribución Gaussiana, debido a la difusión uniforme del calor por la pieza. De existir un defecto se observará que esta curva gaussiana presenta una irregularidad [13].

Por otra parte, la fuente de excitación puede ser lineal, y la principal ventaja es que se puede observar piezas en movimiento. Además de poder analizarse piezas de gran longitud en uno de sus ejes [14].

Con las imágenes adquiridas se pasa a la etapa de preprocesamiento, donde se eliminan fenómenos tales como: píxeles defectuosos, patrones fijos de ruido, efecto de viñeteo, etc. El efecto de viñeteo consiste en una reducción de la intensidad en los bordes de la imagen causada por una apertura limitada de los lentes de la cámara [15].

En la etapa de procesado y dependiendo de la aplicación concreta en cada caso se pueden emplear una gran variedad de técnicas con el fin de mejorar la identificación de defectos y discontinuidades en especímenes bajo estudio mediante termografía infrarroja [16] y [17]. La mayoría de estos algoritmos de procesado han sido desarrollados para ensayos de termografía activa pulsada, ya que ésta es la técnica más comúnmente empleada en ensayos no destructivos. Aunque estos algoritmos pueden modificarse y adaptarse a otras técnicas de inspección térmica. Las técnicas de procesado se pueden clasificar principalmente en tres grupos: Las técnicas que utilizan contraste térmico, las técnicas basadas en transformadas y las técnicas que emplean métodos estadísticos.

En la etapa de post-procesado, las técnicas de análisis pretenden obtener dos datos, la identificación automática de un defecto y la determinación de la profundidad a la que se encuentra. El primer objetivo se consigue aplicando técnicas conocidas en el mundo de la inspección visual o visión artificial. Las principales son las técnicas de búsqueda de gradientes térmicos en imágenes tales como filtros Robert, Prewitt, Sobel, Laplaciano, gaussiano y Canny.

La detección de la profundidad se basa en la relación entre la profundidad y el momento de aparición del defecto obtenida desde la aproximación unidimensional de la conducción del calor dada por la ecuación de propagación de Fourier resumida en [18]:

$$t \cong \frac{z^2}{\alpha} \quad (1.1)$$

La obtención del valor del instante temporal se puede alcanzar por muchos caminos, (contraste máximo, temperatura de corte, pendiente máxima, FWHM (Full Width at Half Maximum, etc...), en todos los casos las soluciones propuestas toman formas similares y la profundidad viene dada por la expresión (1.2).

$$z = A \cdot t_{max}^{1/2} \cdot \Delta T_{max}^h \quad (1.2)$$

1.3. Motivación del trabajo de fin de master

El empleo de técnicas de medida termográfica en materiales y procesos está condicionado por las características y condiciones propias de los componentes a analizar, así como por los objetivos específicos del análisis. Estas limitaciones influyen de forma directa en la selección de los métodos a emplear en la excitación de la pieza y en el tratamiento de las imágenes térmicas obtenidas.

En esta tesis se quiere alcanzar un preprocesado preciso para piezas de gran longitud en uno de sus ejes, donde una excitación en un solo paso no cubre toda el área de la pieza. Se propone una excitación de calor lineal, utilizando una línea laser que se mueve a lo largo de toda la superficie para conseguir una excitación completa de la pieza. El objetivo final es obtener una secuencia de imágenes térmicas 2D que permitan ver la evolución de enfriamiento de toda la pieza del mismo modo que si hubiese obtenido con una excitación que abarcase el área de una sola vez.

Para testear y comprobar la validez del algoritmo a desarrollar en esta tesis, se hace uso de instrumentos de laboratorio desarrollados por otros docentes en diversas investigaciones y proyectos académicos.

La obtención de secuencias térmicas mediante este método podría permitir el análisis de defectos en procesos de fabricación continuo, donde se podría examinar piezas en movimiento. Para ello, será conveniente que el algoritmo a desarrollar sea rápido y tenga una alta fiabilidad.

En este capítulo se va a tratar los objetivos principales de este proyecto, así como los pasos a seguir para conseguirlos. Además se presentarán algunos objetivos parciales que pueden aportar mayor versatilidad al algoritmo que se va a desarrollar más adelante. Por último se mostrarán algunas tomas de la grabación térmica realizada durante uno de los ensayos y la reconstrucción 2D inicial.

2.1 Set para la recopilación de la secuencia térmica

La inspección termográfica activa para piezas de un tamaño muy largo en uno de sus ejes es el objeto principal de este proyecto. Por ello mismo, se requiere de una serie de equipos que permitan la recogida de una secuencia térmica lo más limpia y precisa posible.

El enfoque principal es que existe un movimiento relativo entre la cámara térmica y la pieza a examinar, por comodidad y mayor exactitud, se ha optado por el uso de un tornillo sin fin con unas abrazaderas que sujetan la pieza. La velocidad de desplazamiento puede ser controlada por medio de una placa Arduino que regula la velocidad de giro del tornillo sin fin.

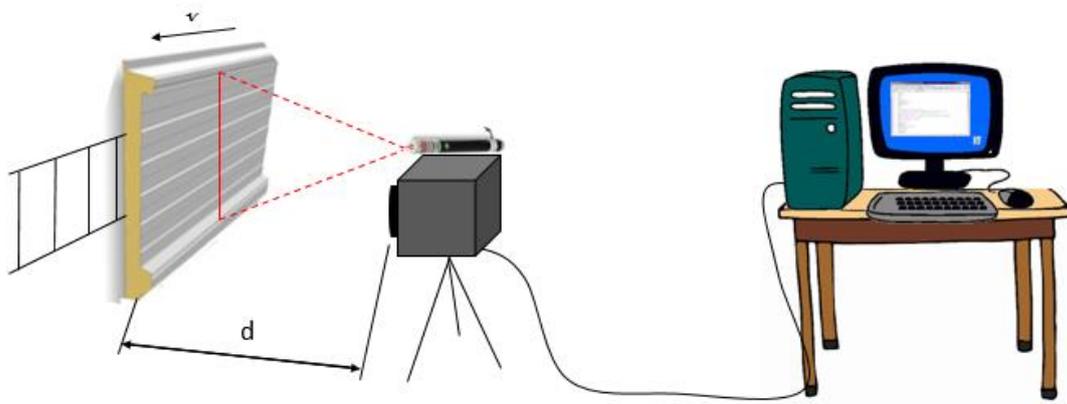


Ilustración 6. Set para la recopilación de datos en el laboratorio

Por otra parte, la fuente de excitación lineal debe estar justo en la frontera de la cámara, ocupando lo menos posible en la resolución de la misma, de lo contrario, estaríamos perdiendo píxeles en la curva de enfriamiento y por tanto la medida sería menos precisa.

Tanto la placa Arduino como la cámara térmica están conectadas a un ordenador que va recopilando la secuencia de imágenes térmicas y controlando la velocidad de giro del tornillo sin fin.

Unos de los parámetros principales a fijar es la distancia entre la cámara y la pieza. Esta debe ser aquella que presente un mayor enfoque y además permita una gran apertura de la lente, de manera que la resolución sea adecuada. Como se verá más adelante, esta distancia, junto con algunos otros parámetros de la cámara, fijaran la velocidad de movimiento de la pieza y por tanto del tornillo sin fin.

La probeta que se han utilizado en este estudio está hecha de metacrilato. Tiene unos defectos calibrados, con diferentes profundidades, formas y tamaños.

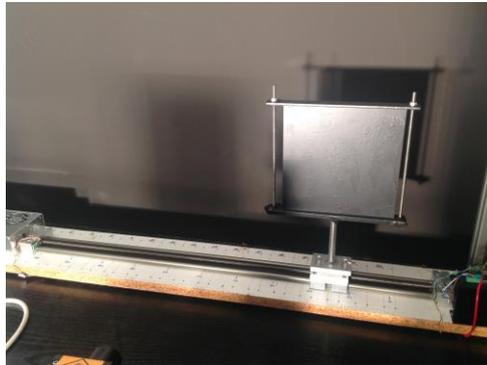


Ilustración 7. Probeta bajo estudio por termografía

La cámara, diseñada en laboratorio para otros proyectos académicos [19] , cuenta con una resolución de 384x288, una apertura horizontal de 21° y una velocidad de captura media de 8.3 FPS. Además tiene una sensibilidad entre pixel y pixel de 0.1°C



Ilustración 8. Cámara infrarroja

La fuente de excitación empleada es una pistola de aire caliente con una boquilla que proyecta un chorro de aire lineal. La temperatura de expulsión puede ser controlada en un rango entre 90°C y 300°C.

Por último, el tornillo sin fin está accionado por un motor eléctrico que puede ser regulado gracias a una placa Arduino. Los dos parámetros que pueden ser controlados son la velocidad de desplazamiento de la probeta, comprendida entre 1.588 y 4.5454 mm/s; y el punto de partida y finalización del recorrido.

2.2 Objetivos parciales

Para un pre-procesado de la imagen adecuado, la grabación debe estar comprendida desde el momento en que la pieza entra en la visión de la cámara por la derecha, hasta que sale de ella por su izquierda, o viceversa. De esta forma se consigue el mismo número de imágenes de cada pixel para la posterior reconversión.

Por otra parte, es necesario ajustar la velocidad de movimiento de la probeta para que la reconstrucción global de la grabación coincida con un desplazamiento de pixel por imagen con un número entero.

Cada pixel de cada fotograma se corresponde con una posición en una matriz del tamaño la resolución de la cámara

14831	14943	14929	14934	14940	14946	14932	14940	14934
17892	14926	14932	14930	14924	14926	14940	14925	14933
14926	14923	14927	14919	14935	14931	14924	14924	14924
14924	14922	14924	14933	14916	14924	14915	14924	14924
14926	14924	14928	14932	14920	14916	14929	14928	14920
14924	14921	14923	14924	14914	14921	14926	14922	14926
14939	14923	14928	14927	14928	14918	14937	14917	14925
14920	14923	14928	14931	14927	14932	14922	14934	14931
14931	14931	14935	14923	14928	14926	14924	14939	14921

Esto es el ejemplo de una imagen térmica de resolución 9x9, cada pixel tiene recogida la energía media que ha recibido durante la captura. Dado que la pieza está en movimiento, es necesario cuadrar el número de pixeles por imagen que se desplazan de un fotograma a otro para que sea un número entero, de esta forma se podrá identificar las posiciones en cada fotograma de un mismo punto en la pieza. Para entender esto mejor se expondrá un ejemplo:

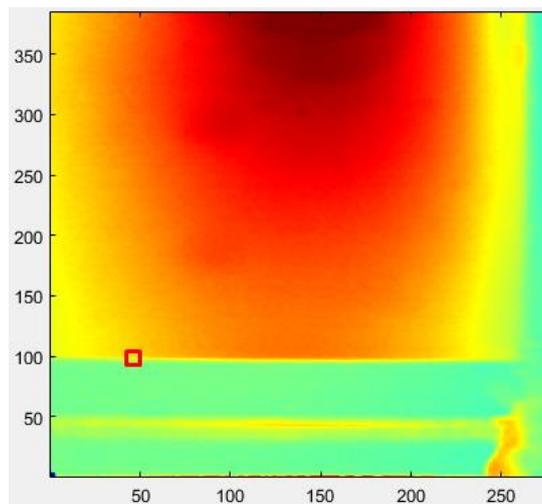


Ilustración 9. Fotograma de la probeta (1)

Ese punto de la pieza corresponde a la posición (50,100) de ese fotograma. Sin embargo, en el siguiente fotograma, ese mismo punto de la pieza estará en otra posición

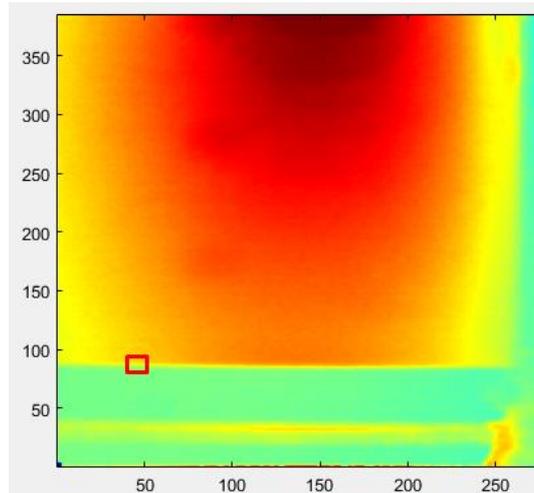


Ilustración 10. Fotograma de la probeta (2)

En este caso sin ninguna calibración el mismo punto de la pieza se encuentra en la posición (50,92).

Para que esto no se convierta en un problema a la hora de hacer la reconstrucción 2D y su evolución, es necesario fijar una serie de parámetros para así determinar el número de píxeles por imagen con el que se mueve la pieza.

2.2.1 Velocidad de la pieza y distancia de la cámara

Con el objeto de conseguir el mayor número de imágenes para cada punto de la pieza, se ha fijado una velocidad en píxeles por fotograma de 1 y una distancia de la cámara a la pieza de 422mm.

Como se conoce la velocidad de captura de la cámara, se puede calcular la velocidad necesaria en píxeles por segundo.

$$V_{pix} = v \cdot FPS = 1 \cdot 8.3 = 8.3 \text{ pix/seg} \quad (3)$$

Por otro lado, conociendo la apertura de la cámara y su distancia a la pieza, se puede determinar la longitud real del eje horizontal:

$$L = d \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot 2 = 422 \cdot \tan\left(\frac{21}{2}\right) \cdot 2 = 156 \text{ mm} \quad (4)$$

Con la resolución horizontal, se acaba calculando a qué velocidad hay que mover la pieza:

$$vel = \frac{V_{pix} \cdot L}{resolucion} = \frac{8.3 \frac{pix}{seg} \cdot 156mm}{384 \text{ pix}} = 3.37mm/seg \quad (5)$$

Esta velocidad entra dentro del rango de control del tornillo sin fin al que está acoplado la probeta.

2.3. Grabación infrarroja

Una vez se ha calibrado las distancias y velocidades pertinentes, se procede a realizar la grabación de la pieza en movimiento.

Como se ha dicho, es conveniente que la grabación comience en el instante que la pieza aparece por uno de los extremos de la visión de la cámara, hasta que desaparece por el otro. De esta forma se conseguirá el mismo número de datos de cada pixel de la pieza.

Para evitar la aparición de ruido en la grabación, la cámara dispone de una función de barrido de pixeles muertos. Consiguiéndose así una imagen más limpia.

Existe la posibilidad de descartar algunas imágenes de la grabación, pero esto desencadenaría en una variación de la velocidad de la pieza en pixeles por fotograma, por este motivo se ha decidido no descartar ninguna imagen.

De la grabación se obtiene una matriz (384,288, X) siendo X el número de imágenes que se han tomado y que dependerá tanto del tamaño de la probeta como de la velocidad de movimiento. Las dos primeras componentes de la matriz corresponden a la resolución de la cámara.

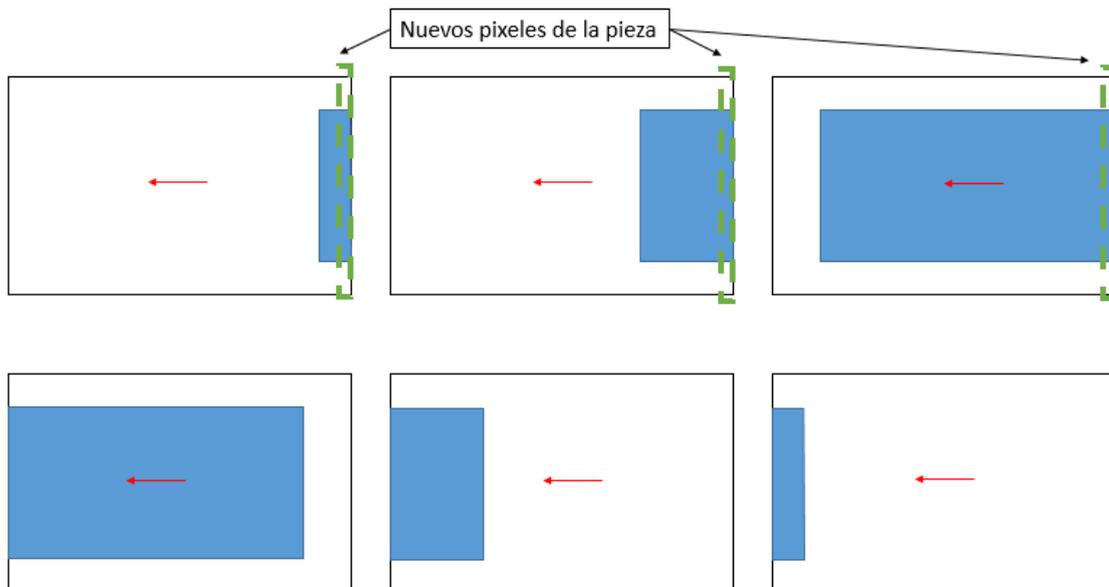


Ilustración 11. Secuencia de movimiento en la grabación.

Esta matriz inicial será el punto de partida en la reconstrucción 2D que se explicará a continuación.

Algunas imágenes de la grabación se muestran en la siguiente ilustración para poder observar el movimiento de la probeta y la aparición de algunos defectos conforme la pieza se va enfriando.

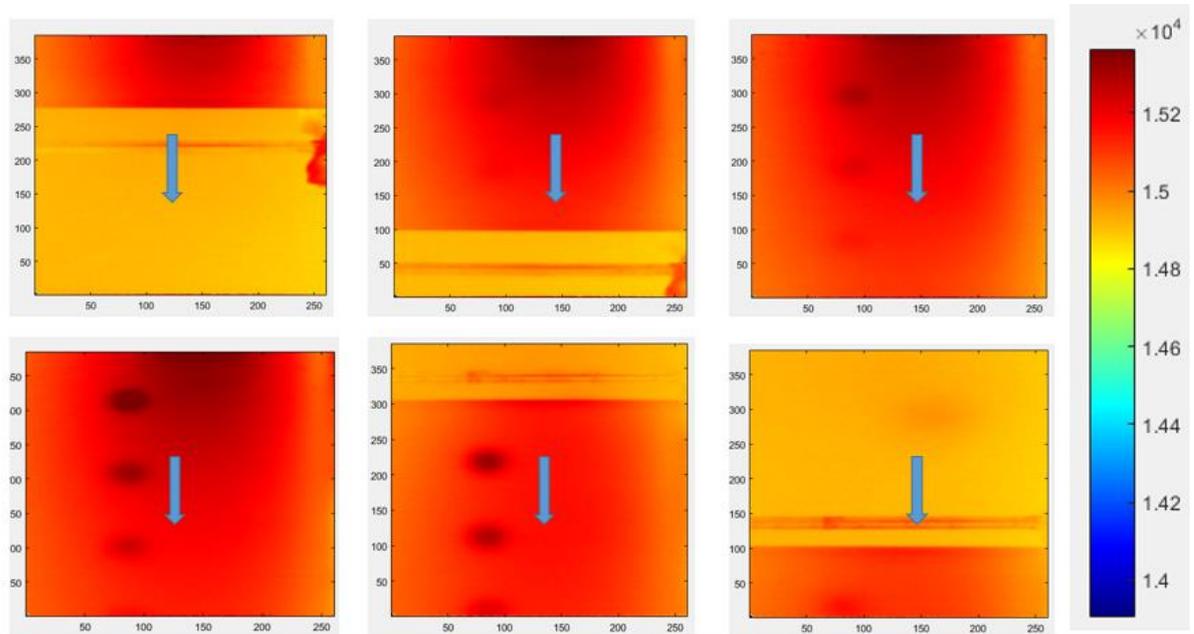


Ilustración 12. Secuencia de movimiento de la probeta en la grabación

2.4 Reconstrucción 2D

Partiendo de la primera imagen, se crean dos matrices. Una es la imagen 2D que se irá incrementando su tamaño a razón del número de imágenes y el desplazamiento de píxeles por fotograma de la grabación. La otra será una matriz de referencia del mismo tamaño que la imagen 2D que establecerá la posición de cada píxel de la pieza en el fotograma correspondiente.

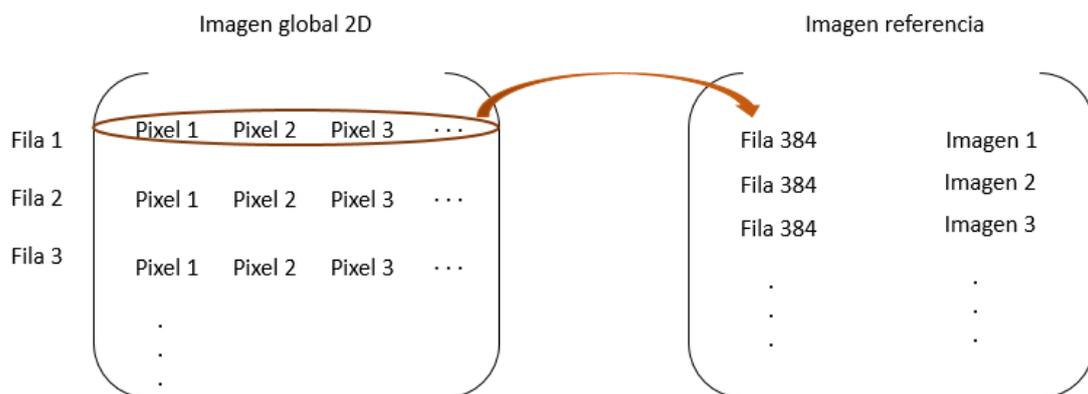


Ilustración 13. Relación entre la imagen global 2D y la matriz de referencia

En este caso, todos los píxeles de la fila 1, tienen su origen en la fila 384 de la primera imagen, por otra parte, de la fila 2 de la imagen 2D se comienza a tener datos en la fila 384 del segundo fotograma de la grabación.

Para la formación de la imagen 2D, se toma como partida la primera instantánea y a continuación se añaden los valores de la última fila del siguiente fotograma. En el caso de que la velocidad en píxeles por fotograma sea mayor de uno, se agregaran a la imagen 2D tantas filas como velocidad de píxeles por fotogramas tenga la grabación. Procediendo de esta forma, se consigue una única imagen 2D a partir de la grabación.



Ilustración 14. Obtención de la imagen global 2D

Como la pieza solo se mueve en uno de sus ejes, el otro queda fijado y siempre es del mismo tamaño.

La siguiente ilustración muestra el instante inicial de cada punto de la pieza que ha sido tomado en la grabación.

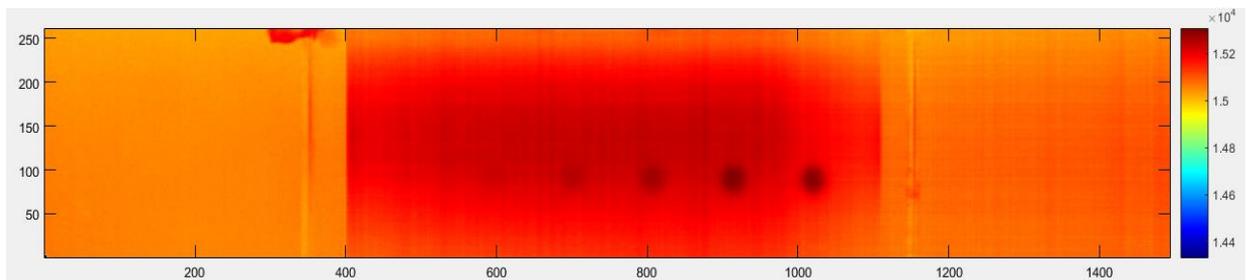


Ilustración 15. Imagen global 2D de la probeta

CAPÍTULO 3 ALGORITMO DE RESPUESTA TÉRMICA

En este capítulo se va a desarrollar y explicar el funcionamiento del algoritmo que pre-procesa el conjunto de imágenes recopiladas para llegar a obtener una serie de imágenes 2D de toda la pieza que muestren como se enfría cada punto de la misma. Se podrá observar como los defectos van apareciendo y formándose la esperada aureola alrededor del mismo, debido a la difusión del calor acumulado en el defecto a su entorno.

3.1. Selección de los píxeles característicos

En primer lugar es conveniente realizar un acondicionamiento del número de píxeles al que se le quiere aplicar el algoritmo, ya que gran cantidad de ellos en la imagen 2D no contienen a la pieza, y esto es en gran parte debido a que al comienzo de la grabación la pieza se encuentra entrando por uno de sus extremos y al final de la misma, sale por el extremo contrario. Por este mismo motivo, es necesario realizar un acortamiento de la imagen.

Si la grabación ha sido controlada y realizada con las pautas citadas anteriormente, será suficiente con recortar la imagen con la resolución horizontal de la cámara. En el caso de estudio, eliminando las 384 primeras filas y las 384 últimas. De esta forma la imagen 2D resultante queda enmarcando a la pieza



Ilustración 16. Ajuste del marco a los píxeles de interés

Al evitar el pre-procesado de todos esos píxeles que no contenían a la pieza, el algoritmo es capaz de ser ejecutado en prácticamente la mitad de tiempo.

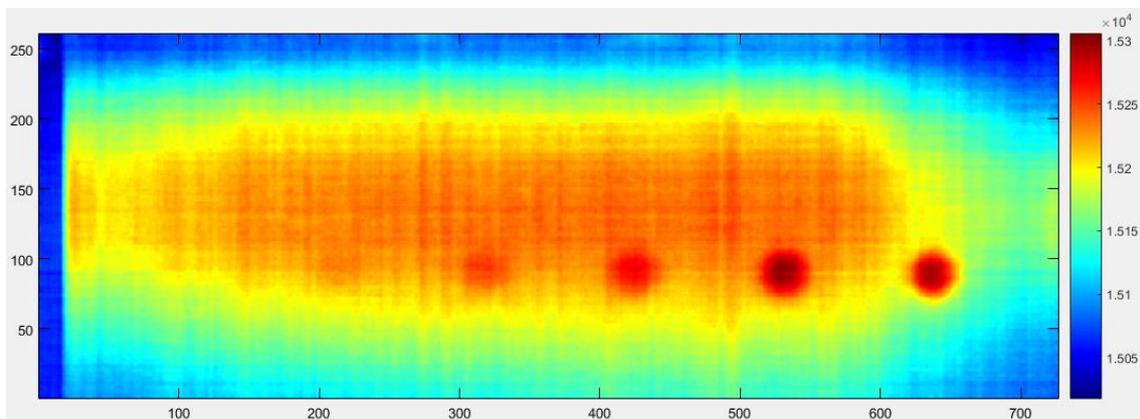


Ilustración 17. Imagen 2D global recortada y ajustada a la probeta

Del mismo modo en que se recorta la imagen 2D de toda la pieza, es necesario aplicar el mismo cambio a la matriz de referencia, de lo contrario, se estaría mezclando información y el algoritmo no funcionaría correctamente.

3.2. Construcción de la matriz de enfriamiento

Con la imagen 2D global de la pieza acondicionada y de la misma forma la matriz de referencia, se puede comenzar a aplicar el algoritmo para obtener la evolución de enfriamiento de toda la pieza.

Los parámetros de entradas a la función son la imagen 2D de la pieza, la matriz de referencia, la grabación infrarroja, la cantidad de secuencias que se quiere obtener del enfriamiento de la pieza y por último, la velocidad en pixeles por fotograma a la que se ha realizado la grabación.

En primer lugar se crea una nueva matriz de 3 componentes, las dos primeras corresponden a la resolución de la imagen global 2D y la tercera a las distintas imágenes que compondrán la secuencia de enfriamiento. La primera de todas esas imágenes por tanto, corresponde a la imagen 2D obtenida en el apartado anterior.

A continuación se recorre fila a fila la imagen de la pieza y al mismo tiempo la matriz de referencia, se busca en que fila e imagen aparecen dichos pixeles y a continuación se va completando las siguientes imágenes de la matriz de evolución.

Al conocer la velocidad de grabación, en pixeles por fotograma, se hace la siguiente operación:

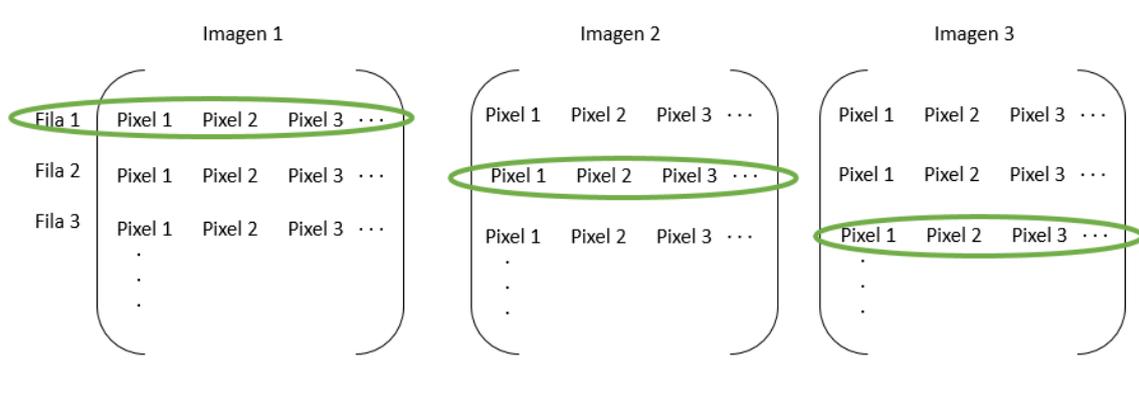


Ilustración 18. Fila de pixeles de la pieza en diferentes fotogramas

Todos esos pixeles rodeados en verde, corresponden a un mismo punto de la pieza, ya que esta se encuentra en movimiento. Por tanto se va seleccionando toda la fila de pixeles correspondiente en cada imagen y se va completando las diferentes secuencias de la matriz de evolución de enfriamiento,

El número máximo de fotogramas que se puede llegar a conseguir para una velocidad de 1 pixel por fotograma corresponde a la resolución horizontal de la cámara, en este caso de estudio, 384 imágenes.

De este algoritmo y para una evolución de enfriamiento de dicho número de secuencias, la matriz resultante es de un tamaño (727, 260, 384)

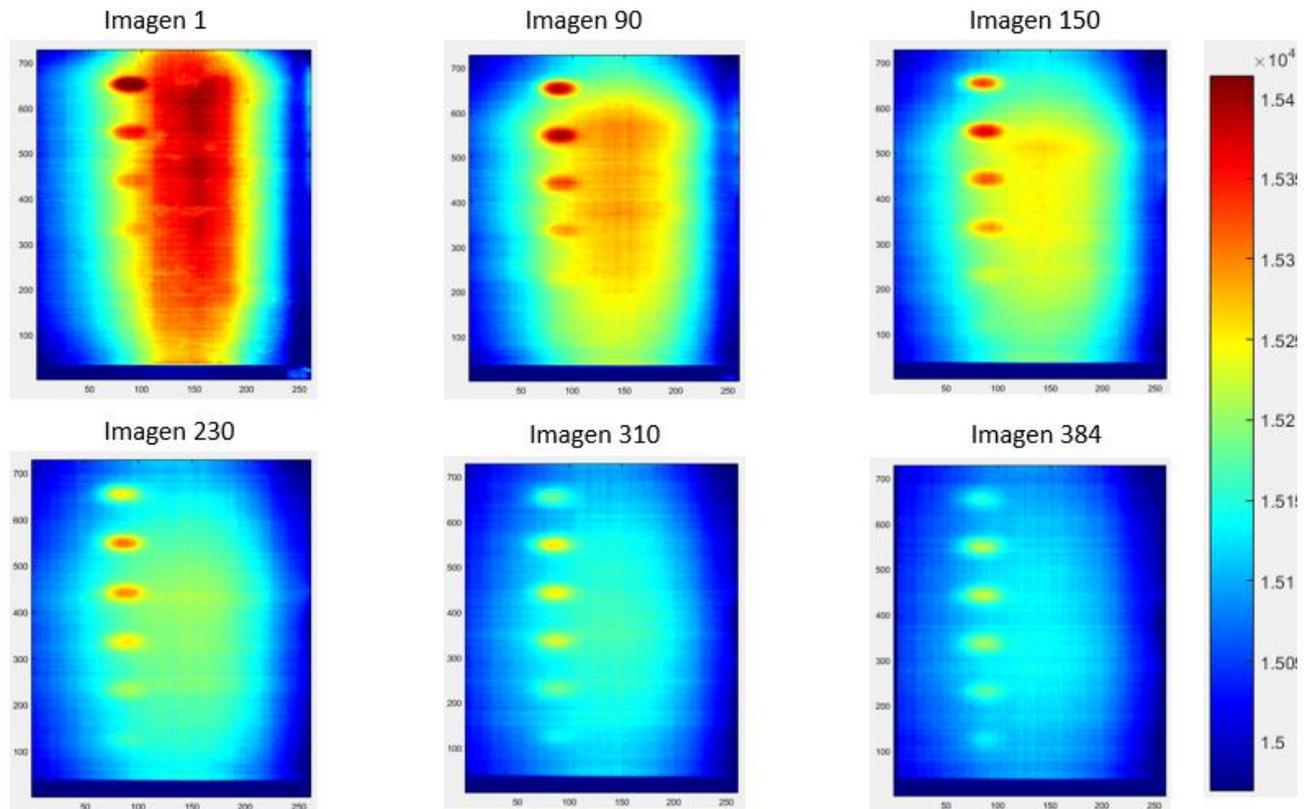


Ilustración 19. Secuencia de enfriamiento de la probeta

3.3 Curvas de enfriamiento

Las curvas de enfriamiento son un instrumento indispensable en el análisis de defectos por termografía infrarroja. Por tanto es conveniente reseñar algunos aspectos básicos de las mismas.

Cualquier objeto que reciba un calentamiento puntual y se deje enfriar en el ambiente dará como resultado una gráfica de comportamiento como la siguiente ilustración

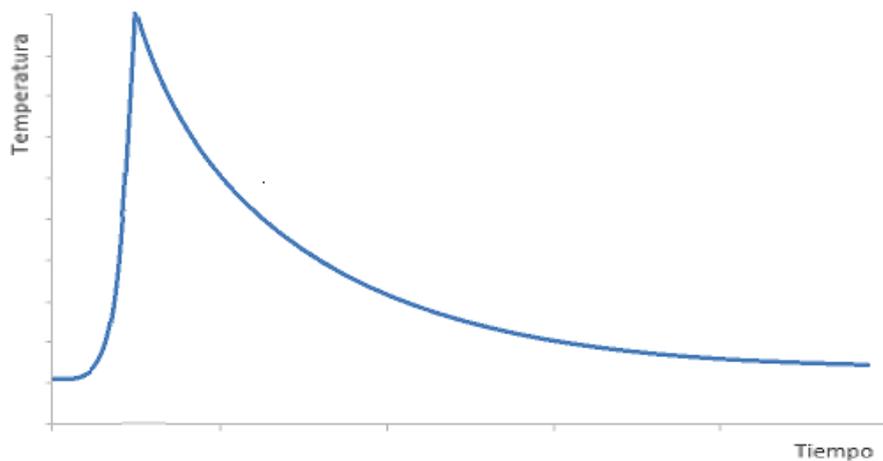


Ilustración 20. Curva de enfriamiento ideal

La pendiente de la curva dependerá tanto del material que se esté analizando como del grosor del mismo.

Ahora bien, si la pieza en cuestión tiene algún defecto, la gráfica variará ligeramente.

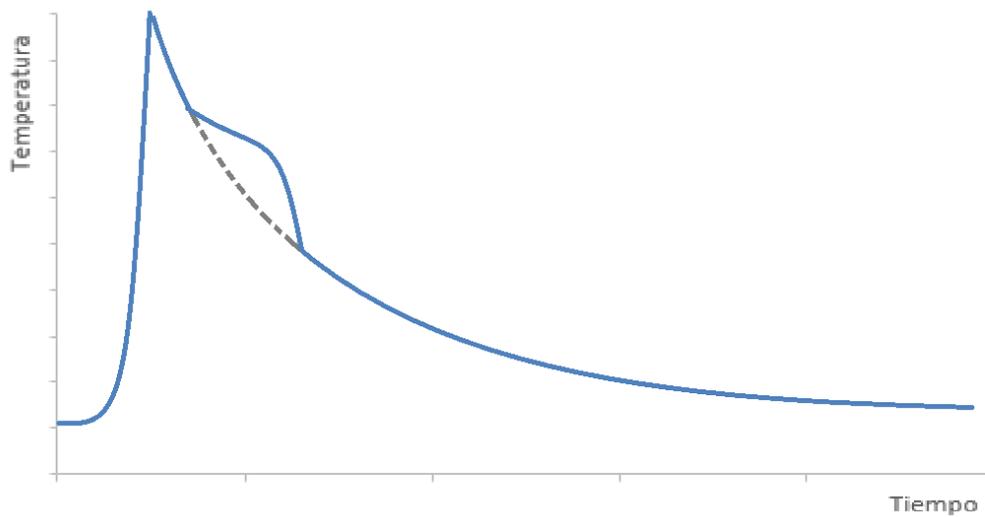


Ilustración 21. Curva de enfriamiento con defecto en la pieza

El motivo principal es que dicho defecto interfiere en la conductividad térmica de la pieza, de manera que se comporta como un obstáculo en la transferencia de calor a lo largo del espesor. Esto provoca un aumento de la energía por cm^2 en la zona del defecto y como consecuencia en el enfriamiento aparece una pequeña joroba.

Además, se puede averiguar la profundidad del defecto, ya que aquellos más superficiales se reflejarán en la parte temprana del enfriamiento, mientras que los más profundos aparecerán más tarde.

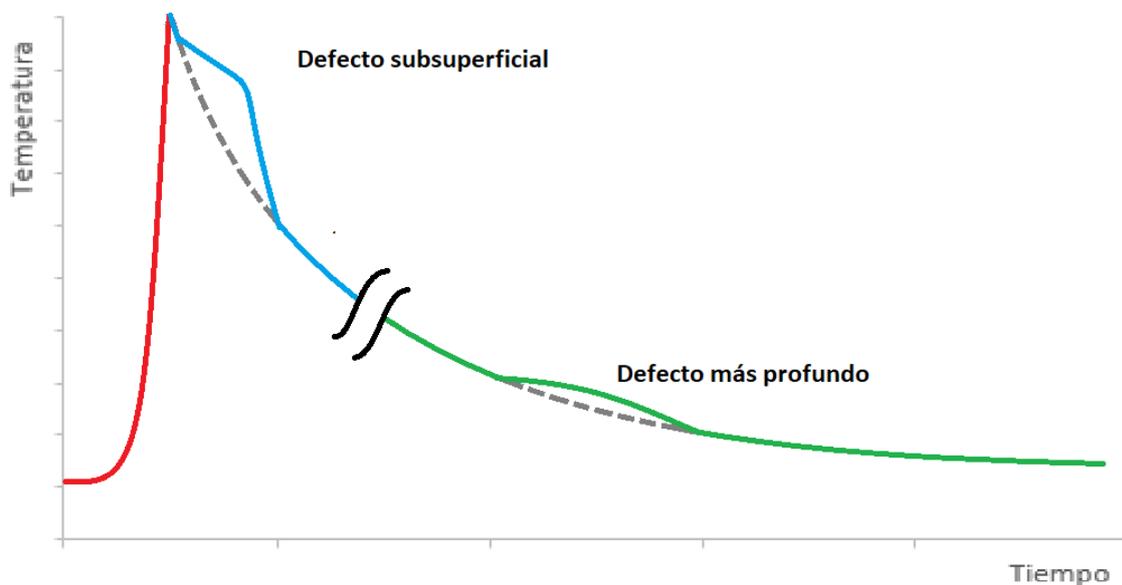


Ilustración 22. Curvas de enfriamiento con defecto subsuperficial y más profundos

Para tener un control más riguroso de las piezas a examinar, es conveniente que se conozca de forma precisa la curva de enfriamiento de una probeta sin defectos.

En el caso de estudio, al disponer de una probeta con defectos calibrados, se puede tener una mejor visibilidad de estas “chepas” en las curvas de enfriamiento.

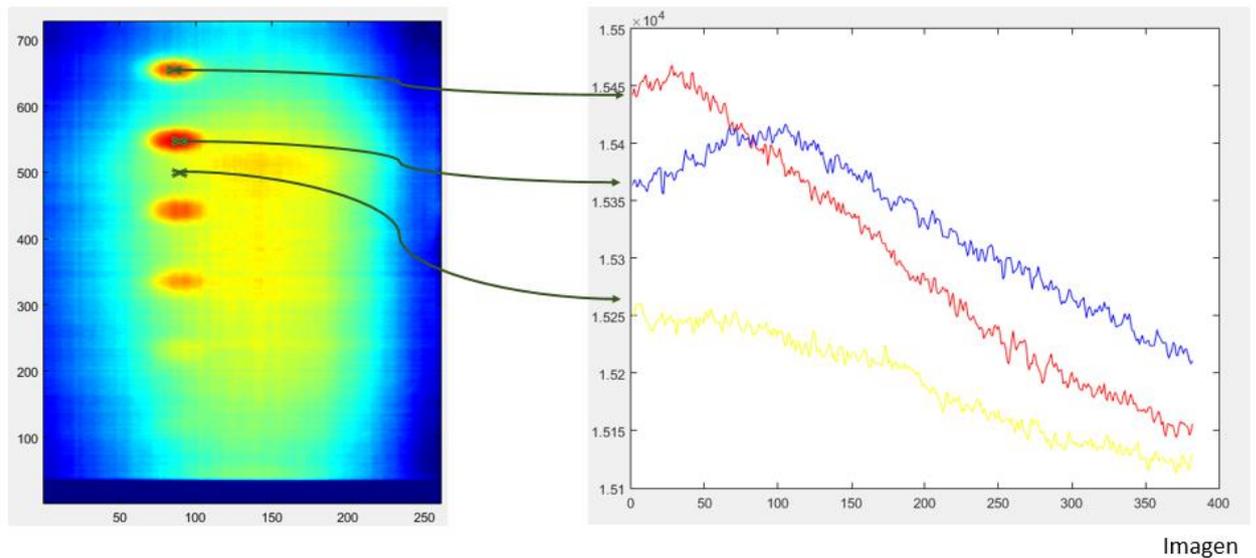


Ilustración 23. Gráfica de enfriamiento de 3 puntos de la pieza

Como el calentamiento no es ideal y uniforme en toda la pieza se puede observar que los niveles de partidas de diversos puntos corresponden a un nivel de energía térmica emitida diferente. La imagen y secuencia deben ser corregidas para que todos los puntos alcancen su máximo valor al principio y se estudie solamente la secuencia de enfriamiento.

Con el algoritmo ya desarrollado, en este capítulo se procede a aplicarlo a varias grabaciones de la pieza con defectos de varias formas y profundidades para posteriormente aplicar algunos métodos de procesado.

4.1. Media móvil

El ruido presente en la grabación es elevado, por tanto, es conveniente realizar una media móvil a los puntos de interés, para que los resultados a analizar sean más visibles.

Para ello, se crea una función en Matlab que recorre aquellos vectores que se quieran analizar y realiza una media al número de puntos consecutivos marcados por el usuario.

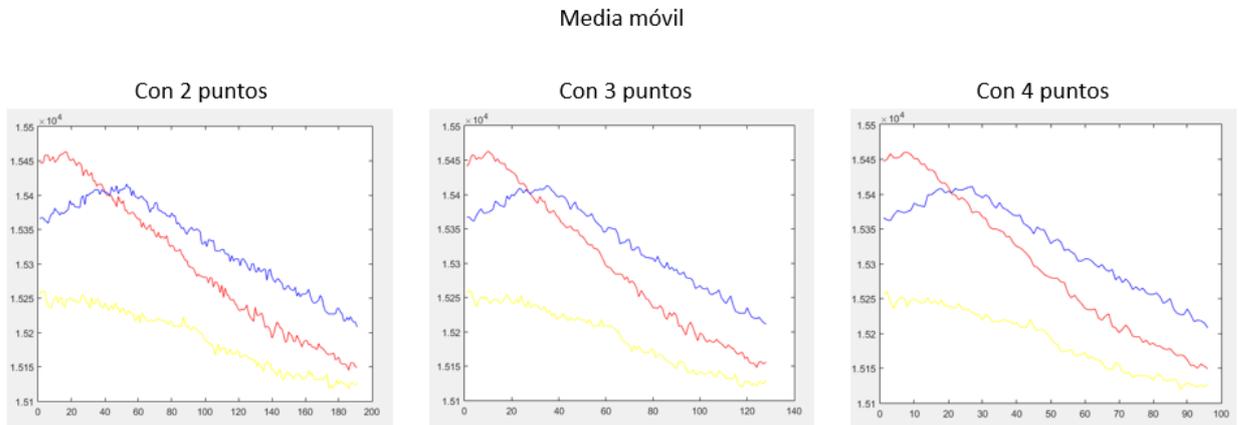


Ilustración 24. Media móvil aplicada a los mismos puntos

El ruido se reduce de forma significativa y permite observar de una forma más clara las curvas de enfriamiento.

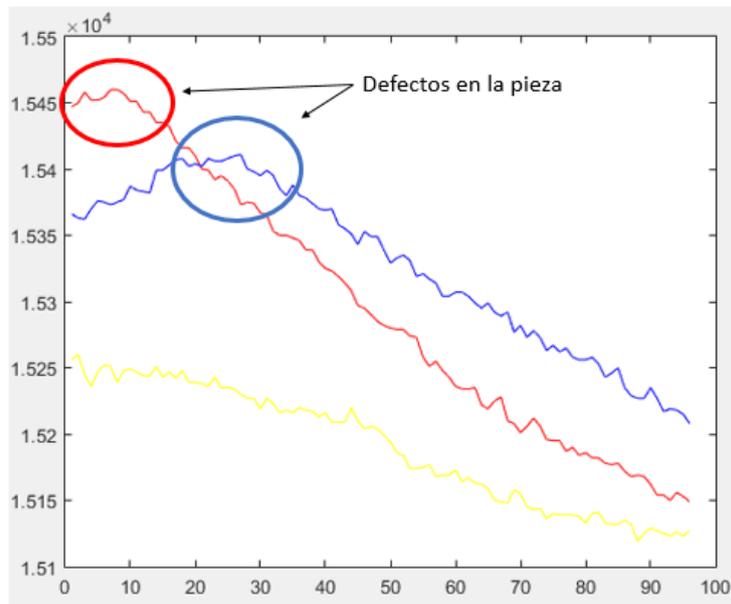


Ilustración 25. Curva enfriamiento con velocidad 66 y temperatura 250°C

Aplicando la media móvil a toda la imagen se obtiene una visión más clara de la misma.

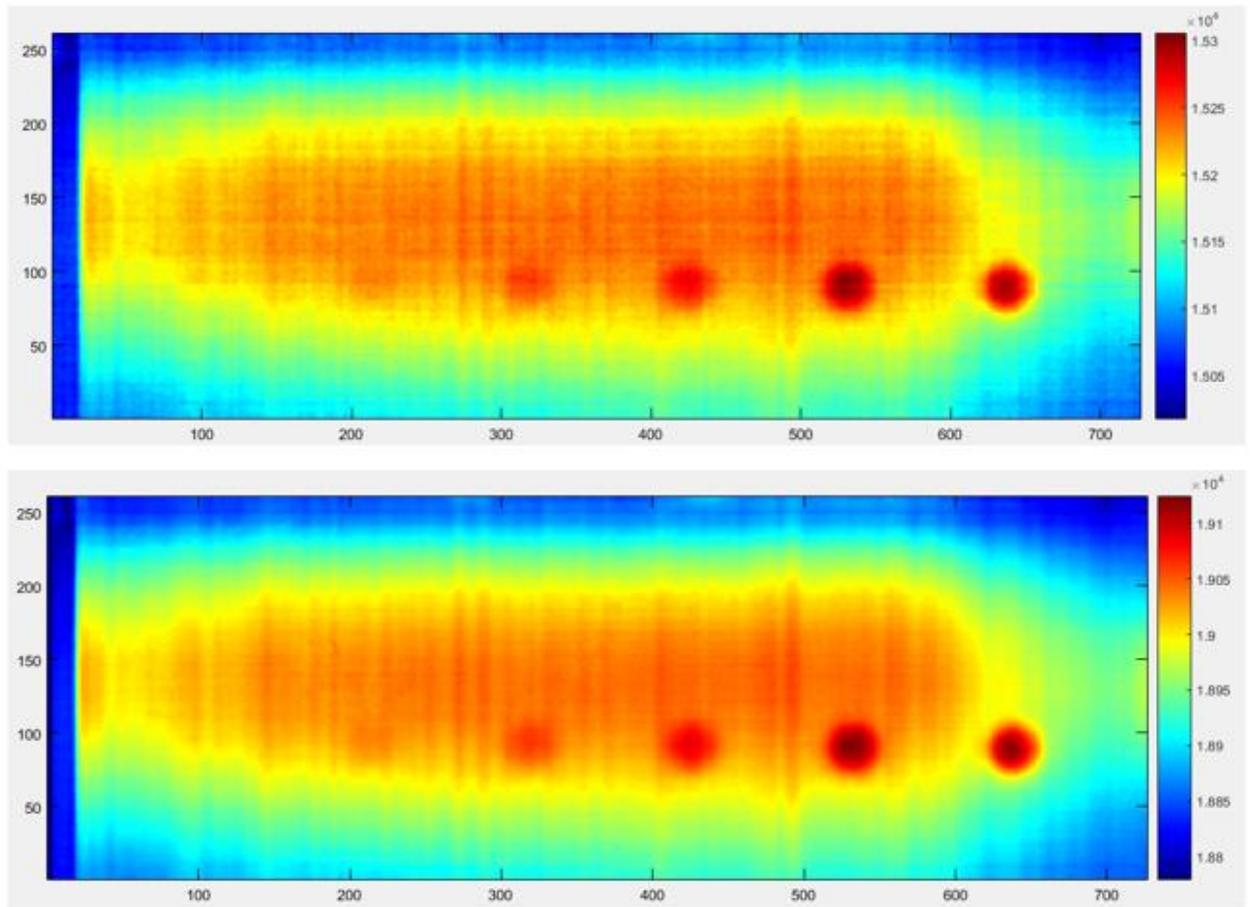


Ilustración 26. Imagen 2D completa sin media móvil (arriba) y con media móvil de 4 puntos (abajo)

Además se podrá obtener unos mejores resultados tras aplicar las técnicas de procesado que se van a introducir a continuación.

4.3. Técnicas de procesado

Existen multitud métodos de procesados, que se pueden clasificar principalmente en cuatro grupos: Aquellos que utilizan contraste térmico, los basados en transformadas, nuevas técnicas que utilizan métodos estadísticos y las técnicas híbridas. Algunas de las principales técnicas de estos grupos se explican a continuación.

4.3.1 Contraste térmico

- **Contraste absoluto diferencial (DAC)**

La técnica de procesado empleando el contraste absoluto diferencial (DAC) (4.3) se desarrolló como una solución para la limitación de la técnica de contraste térmico absoluto (4.1), que se define por la diferencia entre las temperaturas de una zona T_d defectuosa y una zona sin defectos T_{sa} [20], donde los resultados obtenidos dependerán de la necesidad de localizar previamente una zona sana.

La técnica de procesado empleando el contraste absoluto diferencial se basa en la solución para una dimensión de la ecuación de difusión de Fourier para una onda térmica pulsada (función delta de Dirac) (4.2).

$$\Delta T(t) = T_d(t) - T_{sa}(t) \quad (4.1)$$

$$T(t) = T_0 + \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \quad (4.2)$$

A partir de las ecuaciones (4.1) y (4.2) se obtiene la expresión para el cálculo del contraste absoluto diferencial:

$$\Delta TDAC = T_d + \sqrt{\frac{t'}{t}} T(t') \quad (4.3)$$

Donde t es el tiempo y t' el instante en el que el frente térmico alcanza la superficie del espécimen.

La aplicación de esta técnica de procesado permite modelar los perfiles de evolución en el tiempo de la temperatura de la superficie de la muestra, obteniendo los valores de la energía térmica transferida en cada punto de la superficie y reduciendo los efectos del calentamiento no uniforme de la superficie. La limitación en el proceso de selección de t' se elimina con el método de automatización diseñado para esta técnica (IDAC) [17].

4.3.2. Transformadas

• Termografía pulsada de fase (PPT)

La termografía pulsada de fase (PPT – Pulsed Phase Thermography) es una técnica de procesamiento de secuencias de imágenes capturadas mediante termografía infrarroja activa que permite cambiar del dominio temporal al dominio de la frecuencia [21] la señal de la respuesta térmica de la secuencia, que está definida unidimensional, a partir de la transformada discreta de Fourier (DFT).

$$F_n = \Delta T \sum_{k=0}^{N-1} T(k \Delta t) \cdot e^{-i 2 \pi n k / N} = Re_n + i Im_n \quad (4.4)$$

Donde Re_n y Im_n son la parte real e imaginaria de la DFT respectivamente, Δt es el intervalo de tiempo entre adquisiciones y n representa los incrementos de frecuencia ($n=0,1,\dots,N$).

Analizando la evolución en el tiempo de la secuencia de imágenes mediante PPT, se aplica la transformada unidimensional de Fourier a cada píxel de la secuencia de imágenes, obteniendo dos nuevas secuencias de imágenes: amplitud y fase. Las secuencias de imágenes de amplitud (A_n) y fase (ϕ_n) son simétricas respecto a la frecuencia $f = 0$ Hz, lo que hace redundante la mitad de los datos resultantes, lo que permite reducir el tiempo de cálculo necesario para el procesamiento.

$$A_n = \sqrt{Re_n^2 + Im_n^2} \quad , \quad \phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{Im_n}{Re_n}\right) \quad (4.5)$$

Entre las secuencias resultantes de la aplicación de la PPT, la secuencia de fases o fasegrama debe destacarse ya que este componente es el menos afectado por los efectos de la degradación de la señal [22] y permite estimar la profundidad de los defectos existentes en la muestra. El cálculo de la profundidad del defecto está dado por la frecuencia ciega, donde, a partir de la definición de contraste de fase, las curvas de la fase del defecto y de la zona sana se cruzan.

• Termografía de componentes principales (PCT)

La técnica de procesamiento de secuencias de imágenes térmicas que utilizan el análisis por componentes principales se basa en la reducción de la información a partir de la descomposición en valores singulares (SVD – Singular Value Decomposition) para extraer de forma compacta la información espacial y temporal de la secuencia de imágenes mediante funciones empíricas ortogonales o EOF [23] y [24]. Antes de aplicar la descomposición, la matriz en 3D de la secuencia de imágenes se transforma en una matriz 2D. Cada secuencia de imágenes se transforma de 3D a 2D.

Las columnas contienen la dimensión temporal y las filas contienen la dimensión espacial, por lo que la secuencia completa será una matriz en 3D ($N_x \times N_y \times N_t$ con $N_t =$ número total de imágenes).

$$A = U \cdot R \cdot V^t \quad (4.6)$$

En la matriz A de descomposición, las columnas U representan las funciones ortogonales empíricas (EOF) las cuales describen las variaciones espaciales, y las columnas VT representan los componentes principales de las variaciones temporales.

4.4. Aplicación de procesados

Habiendo introducido algunos de los diferentes tipos de procesados, se procede a aplicarlos sobre la probeta bajo estudio.

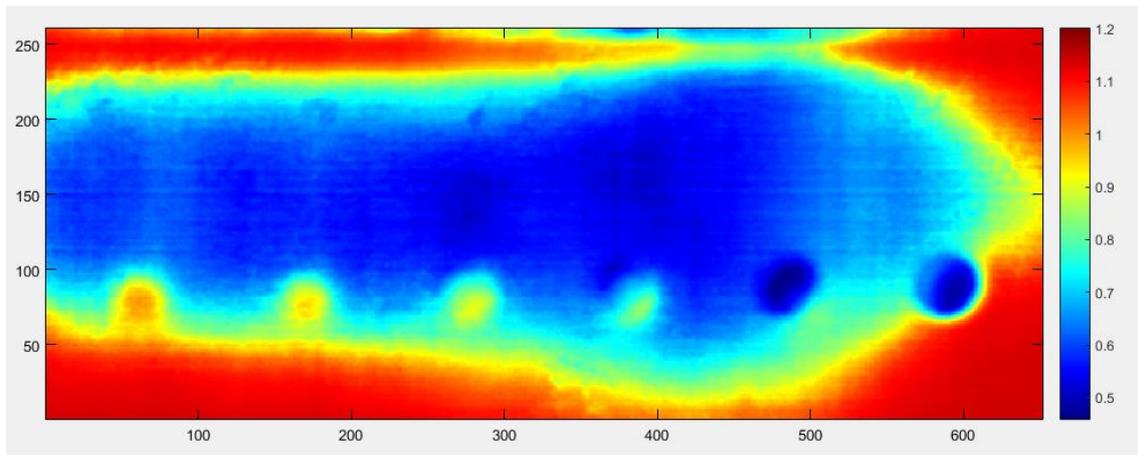


Ilustración 27. Procesado DAC

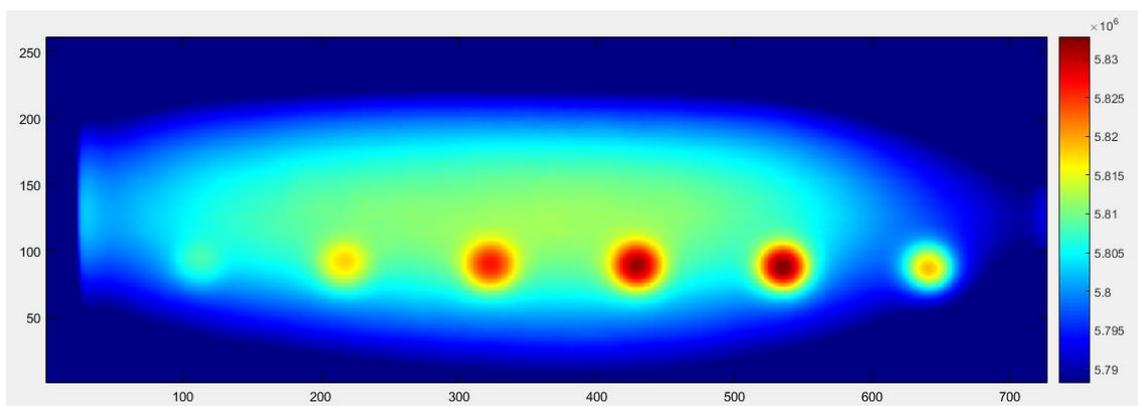


Ilustración 28. Procesado DFT

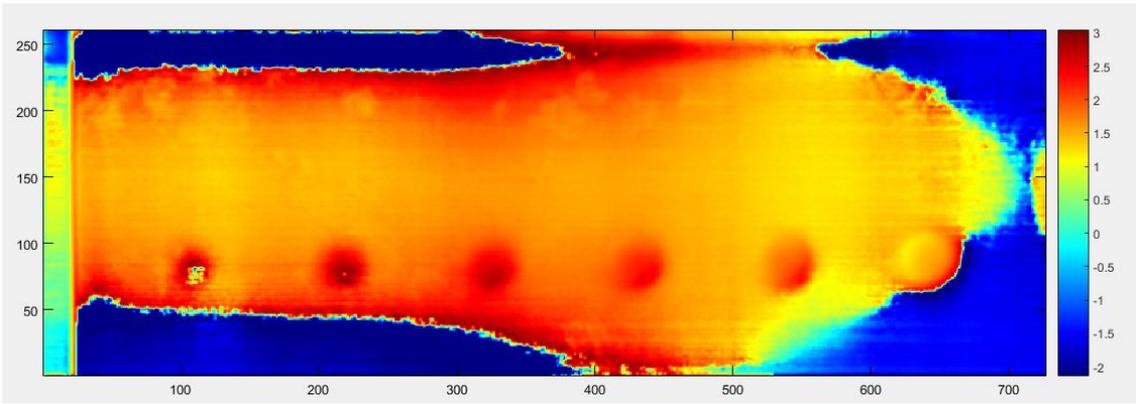


Ilustración 29. Procesado PPT

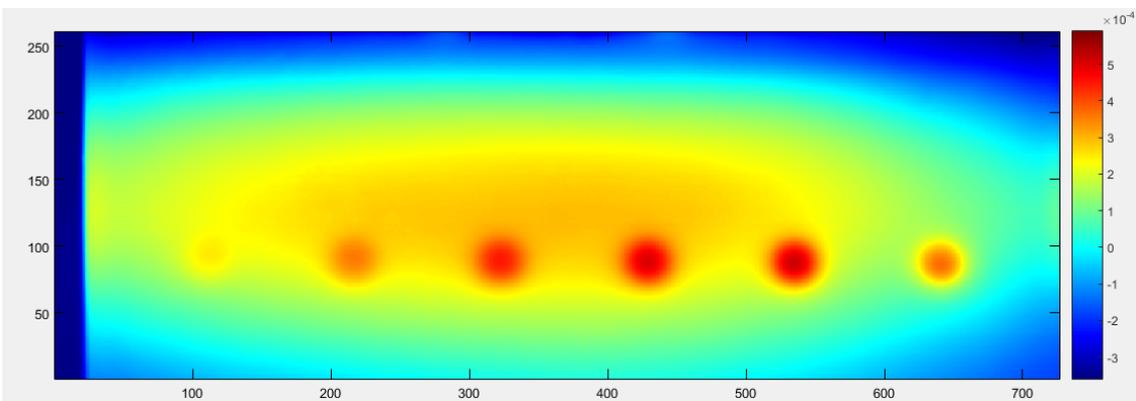


Ilustración 30. Procesado PCT

El procesado PCT y el DFT muestran de una forma precisa los defectos de la pieza, por otra parte el procesado DAC y PPT deja una vista menos clara, en comparación.

Para contrastar aún más la validez del algoritmo de pre-procesado con las técnicas de procesado se realizan pruebas con una probeta que contiene diferentes formas y a dos profundidades.

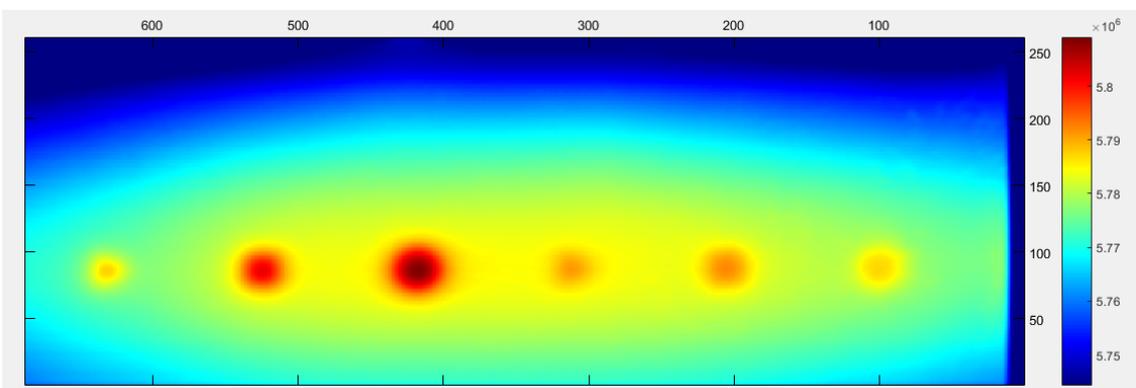


Ilustración 31. Procesado DFT. Defectos de diferentes formas

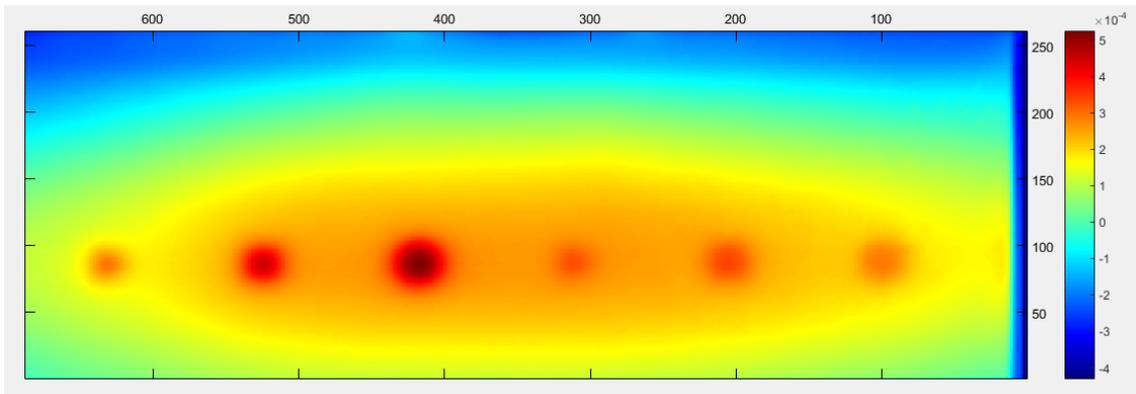


Ilustración 32. Procesado PCT. Defectos de diferentes formas

En ambos procesados aunque más en el procesado PCT se puede intuir las formas de los defectos. Triangulo, cuadrado y circulo, de izquierda a derecha.

También es reseñable el rastro que deja impreso el aire caliente que sigue en contacto con la probeta tras el choque del “chorro”

La aplicación de un algoritmo de pre-procesado de imágenes térmicas para el acondicionamiento de una grabación en movimiento a una secuencia de enfriamiento estática ha sido desarrollada con validez y demostrada con la aplicación de diferentes métodos de procesados.

Es muy importante a la hora de aplicar el algoritmo que se tenga en cuenta los factores de FPS, ángulo de apertura de la cámara, la distancia hasta la probeta a estudiar y la velocidad de movimiento relativa entre ambos. Ya que una selección incorrecta entre estos parámetros puede desembocar en una reconstrucción fallida, dando lugar a superposición de píxeles de diferentes puntos de la pieza.

Por otro lado, la posibilidad de aplicar este algoritmo al análisis de piezas fabricadas en serie abre la posibilidad de mejorar la calidad total a un coste no muy alto, ya que los equipos necesarios no requieren de una inversión millonaria.

Debido a las herramientas disponibles durante el desarrollo de este proyecto, la fuente de excitación utilizada ha sido una pistola de aire caliente, la cual no calienta de forma totalmente lineal y uniforme la pieza. De hecho, la corriente que choca con la pieza se desvía lateralmente, provocando que el enfriamiento sea diferente, ya que el aire sigue caliente tras el impacto con la probeta.

Una solución adecuada a este problema sería un calentamiento con una línea laser, pero ello conllevaría la necesidad de una cámara de alto FPS y una velocidad de movimiento de la pieza más elevada. De lo contrario, puede ser que no se observe todo el proceso de enfriamiento de la pieza.

Otro punto interesante a estudiar es la adaptación y aplicación del algoritmo para grabaciones con una inclinación de la cámara con respecto a la pieza.

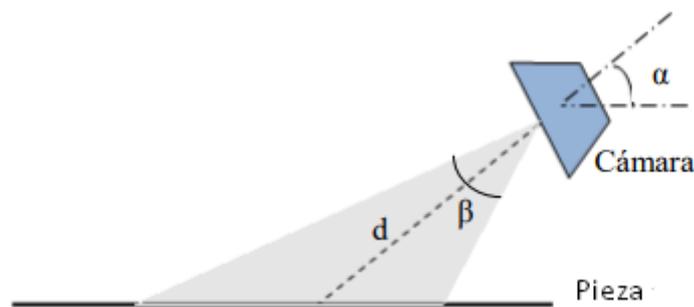


Ilustración 33. Esquema de una grabación con cierta inclinación en la cámara

Por último, el algoritmo podría integrar de otros métodos de pre-procesado para acondicionar más la grabación, disminuyendo posibles ruidos.

ANEXO 1. CÓDIGO CON EL ALGORITMO

%Función de inicio

```
velocidad = 77; % Velocidad desplazamiento de la probeta 1-100
fps = 8.35;
d = 460; % Distancia (mm) del cristal al objeto enfocado

%Eliminar la parte de pixeles muertos
thermos = thermos(1:384,1:260,:);
sizeThermos = size(thermos);

%Creación de la primera imagen
img_2D = thermos(:,:,1);
sizeThermos = size(thermos);

%Se crea la matriz de referencia
%img_ref(1) la imagen -- img_ref(2) la fila
img_ref = zeros(1,1);

%Parámetros de velocidad
vel = 3.2523/99*velocidad + 124.7646/99; % Velocidad en mm/s
alpha = 21/360*2*pi; % Ángulo(radian) de la camara
L = d*tan(alpha/2)*2; % Tamaño horizontal de la imagen
velPix = vel*sizeThermos(1)/L; % Numero de pix/seg
v = velPix/fps; % Velocidad en pix/img

disp(['Píxeles por imágenes: ',num2str(v)]);

v = floor(v); %Redondeo al entero inferior

for i=1:sizeThermos(3)

    %funcion que va creando la img2D
    %La imagen debe moverse de derecha a izquierda
    %nuevos pixeles aparecen por la fila 384 (resolucion horizontal
max)
    [img_2D,img_ref] = img2D(img_2D,thermos(:,:,i),i,img_ref,v);
End

%Se recortan los pixeles de la primera y ultima imagen
aux = size(img_2D);
img_2D = img_2D(sizeThermos(1):aux(1)-sizeThermos(1),:);
img_ref = img_ref(sizeThermos(1):aux(1)-sizeThermos(1),:);

%se crea la evolucion a partir de la imag 2D
cantidad = 384; % Numero total de transiciones
img_2Devol = img2Devol(img_2D,img_ref,thermos,cantidad,v);
```

```

%Media movil a toda la sucesión de imagenes
k=1;
for i=1:n:size(img_2D_evolution,3)

    img_2D_media(:,:,k) = sum(img_2D_evolution(:,:,i:i+n),3)/n;
    k=k+1;
end

%Script para girar la imagen
for i=1:size(img_2D_media,3)
B(:,:,i)=img_2D_media(:,:,i)';
End

%Se representa la evolucion
out = ir_view(B);

```

%Función que crea la imagen 2D

```

function [img_2D,img_ref] = img2D(img_2D,thermos,num,img_ref,v)

    size_img = size(img_2D);
    siz_ther = size(thermos);
    %Los nuevos pixeles se añaden a la imagen 2D
    if v~=0
        %Agregamos a la img_2D todos los nuevos pixeles
        img_2D(size_img(1)+1:size_img(1)+v,:) = thermos((siz_ther(1)-
v+1):siz_ther(1),:);

        img_ref(size_img(1)+1:size_img(1)+v,2) = num;
        aux = 0;
        for i = size_img(1)+1:size_img(1)+v
            img_ref(i,1) = siz_ther(1)-v+aux;
            aux = aux+1;
        end
    end
end

```

```

%Función que crea la evolución de toda la imagen 2D
function img_2Devol = img2Devol(img_2D,img_ref,thermos,cantidad,v)

    %La primera imagen de la evolucion es la creada anteriormente
    img_2Devol(:, :, 1) = img_2D;
    size_img = size(img_2D);
    size_thermos = size(thermos);
    %Se recorre pixel a pixel (menos los de la primera y ultima
imagen)
    for i = 1:size_img(1)

        %y se contruye los pixeles consecutivos uno a uno desde la ref

        inicio = img_ref(i,2)+1;

        if img_ref(i,2)+cantidad-1 < size_thermos(3)
            fin = img_ref(i,2)+cantidad-1;
        else
            fin = size_thermos(3);
        end

        aux = 1;
        for k = inicio:fin

            fila = img_ref(i,1);

            if (fila-v*aux)>1 && fila-v*aux<size_thermos(1)

                img_2Devol(i,:,aux+1) = thermos(fila-v*aux,:,k);
                aux = aux + 1;
            end
        end
    end
end
end

```


BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Wikipedia. Ensayos no destructivos,» 12 2016. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_no_destructivo.
- [2] R. Serrano, Ensayos no destructivos: Líquidos penetrantes.
- [3] UPIICSA-IPN, Apuntes para el Laboratorio de Pruebas No Destructivas, Mexico D.F., 2002.
- [4] S. Udpa y P. Moore, Electromagnetic testing, American Society for Nondestructive Testing, 2004.
- [5] R. McMaster, P. McIntire y M. Mester, Electromagnetic testing: eddy current, flux leakage, and microwave nondestry active testing, 1986.
- [6] R. Bossi, F. Iddings y G. Wheeler, Radiographic testing, ASNT.
- [7] C. Chen, Ultrasonic and advanced methods for nondestructive testing and material characterization, World Scientific, 2007.
- [8] C. Grosse y M. Ohtsu, Acoustic emission testing, Springer Science & Business Media, 2008.
- [9] H. Dunegan, D. Harris y C. Tatro, Fracture analysis by use of acoustic emission, 1983.
- [10] T. Astarita, G. Cardone y G. Carlomagno, Infrared thermography.
- [11] R. Hidalgo-Gato, J.R.Andrés, J. M. Lopez-Higueras y F. J. Madruga, Ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja, AEND, 2013.
- [12] R. Hidalgo-Gato, Contribución al preprocesado, procesado y analisis en termografía infrarroja aplicados a ensayos no destructivos, 2015.
- [13] A. Vandone, P. Rizzo y M. Vanali, Image processing for the laser spot thermography of composite materials.
- [14] S. Hwanga, Y.-K. Anb y H. Sohna, Continious lune laser thermography for damage imaging of rotatinf wind turbine blades.
- [15] M. S., M. X. y P. M., «Calibration procedure for focal plane array camaras and noise equivalent material loss for quantitative thermographic NDT».
- [16] H. Benitez Restrepo, «Procesamiento de imagenes infrarrojas para la deteccion de defectos en materiales,» *Tecnura*, 2007.
- [17] D. González, Contribuciones a las tecnicas no destructivas para evaluacion y prueba de procesos y materiales basadas en radiaciones infrarrojas, Universidad de Cantabria, 2006.

- [18] R. Hidalgo-Gato, J.R. Andrés., J. M. Lopez-Higuera y F. J. Madruga, «Ensayos no destructivos mediante termografía infrarroja,» AEND, 2013, pp. 24-35.
- [19] A. Sierra, «Sistema motorizado para inspeccion de materiales usando termografía infrarroja y excitacion por linea laser,» Santander, 2017.
- [20] X. Maldague, «Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing,» 2001.
- [21] C. Ibarra-Castanedo y M. X., «Pulsed phase thermography reviewed.,» 2004.
- [22] C. Castanedo, «Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase,» 2005.
- [23] N. Rajic, «Principal component thermography for flaw contrast enahncement and flaw depth characterisation in composite structures,» 2002.
- [24] H. Benítez, «Procesamiento de imágenes infrarrojas para la detección de defectos en materiales».

