



VNIVERSIDAD
D SALAMANCA

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

Universida de Vigo

TESiS DOCTORAL

TERMOGRAFÍA ACTIVA Y FOTOGRAMETRÍA DE OBJETO
CERCANO PARA LA DETECCIÓN, MEDICIÓN Y EVALVACIÓN
DE DEFECTOS E IMPERFECCIONES EN VNIONES SOLDADAS

MANVEL RODRÍGVEZ MARTiN

2015

Título:

Termografía activa y fotogrametría de objeto cercano para la detección, medición y evaluación de defectos e imperfecciones en uniones soldadas.

Programa de doctorado:

Geotecnologías aplicadas a la Construcción, Energía e Industria. Universidad de Salamanca y Universidad de Vigo.

Aviso legal:

Se informa al lector que la presente Tesis Doctoral ha sido realizada siguiendo el formato de presentación por compendio de publicaciones en forma de artículos establecido por la Universidad de Salamanca y se advierte a todo aquel que quiera disponer, consultar, citar, reproducir o difundir las publicaciones incluidas en esta Tesis Doctoral que deben respetar los derechos de la editorial de cada una de las revistas que las contengan.

A mis padres.

Termografía activa y fotogrametría de objeto cercano para la detección, medición y evaluación de defectos e imperfecciones en uniones soldadas

Tesis Doctoral presentada por Manuel Rodríguez Martín

Informe de los Directores de Tesis

La Tesis Doctoral "*Termografía activa y fotogrametría de objeto cercano para la detección, medición y evaluación de defectos e imperfecciones en uniones soldadas*", presentada por Manuel Rodríguez Martín, se inserta en la línea de investigación de seguridad y aplicación de técnicas no destructivas en evaluación de calidad de soldaduras utilizando para ello técnicas de termografía activa y fotogramétricas.

Los resultados obtenidos con todas y cada una de las metodologías presentadas dieron lugar a la publicación de uno o varios artículos científicos, en función de si la metodología sufrió mejoras durante el desarrollo de la tesis o se trataba de técnicas más consolidadas. Asimismo, hay que reseñar como resultado de la presente Tesis Doctoral el diseño de una patente (en trámite) por parte de la Universidad de Salamanca con el objetivo de aspirar a la monitorización de uniones soldadas en gaseoductos (ver Anexo II).

Respecto a los artículos, todos ellos fueron publicados en revistas internacionales de prestigio sometidas a un proceso de revisión anónimo por pares. Éstos, por orden de calidad de la publicación, se distribuyen del siguiente modo:

- Un artículo aceptado bajo implementación de correcciones menores en la revista "Automation in Construction", indexada en el Journal Citation Report, ocupando la 9ª posición del ranking de revistas dedicadas a la Tecnología de la Edificación y la Construcción, de un total de 58 revistas.
- Un artículo publicado en la revista internacional "Optics & Laser Technology", situada en la posición 29 del ranking de Óptica, en el que hay 83 revistas indexadas en el Journal Citation Report.
- Dos artículos en la revista "Infrared Physics and Technology", indexada en el Journal Citation Report y colocada en la posición 24 del ranking de un total de 57 revistas dedicadas al ámbito de Instrumentos e Instrumentación.
- Dos artículos publicados en la revista internacional "DYNA", indexada en Journal Citation Report en la posición 82, de 87 revistas dedicadas al campo de la Ingeniería Multidisciplinar.

Dadas las condiciones presentadas, se considera que la presente Tesis Doctoral se ajusta, de modo óptimo, a las condiciones requeridas para la presentación de la misma por la modalidad de "compendio de publicaciones", conforme los requisitos expuestos en el Reglamento de Doctorado de la Universidad de Salamanca.

La calidad de las metodologías desarrolladas así como su validación de uso en las uniones soldadas propuestas queda irrefutablemente reconocida después de su aceptación en los ámbitos internacionales de la ingeniería civil, tecnologías de la construcción, así como de las ciencias termográficas y fotogramétricas.

La presente Tesis Doctoral presenta una propuesta pionera sobre la explotación conjunta de la termografía y la geometría asociada, así como la automatización del proceso de detección de defectos superficiales y subsuperficiales en soldadura. Además, se desarrollan y verifican una serie de metodologías para la consecución de los objetivos propuestos, basados en la aplicación de principios de termografía activa y en la fusión de información con datos procedentes de la fotogrametría.

Los resultados de la presente Tesis Doctoral abren nuevas líneas de investigación de cara al estudio y extrapolación del método a más tipologías de defectos, tales como poros y grietas completamente subsuperficiales, de modo que se posibilite el estudio de la totalidad de patologías de interés en superficies soldadas. Se plantea la posibilidad de automatización de este proceso, de modo que se posibilite la inspección de soldaduras a personal con formación no específica. Asimismo, se abren líneas de investigación para la profundización en la explotación de las termografías mediante la realización de ensayos específicos in situ de cara a la detección de patologías en soldaduras reales, así como situadas en lugares de difícil acceso.

Finalmente, dadas las características cuantitativas aportadas por estas metodologías, así como el alto nivel de detalle de la información aportada, junto con el desarrollo de aplicaciones informáticas que permiten su uso por personal no experto así como la obtención de productos que proporcionan toda la información necesaria para el desempeño del trabajo de expertos en calidad de soldaduras y estabilidad de uniones soldadas, estas modernas herramientas se llegarán a convertir en herramientas fundamentales para el abordaje de inspecciones de soldaduras.

Dada la participación de coautores en los artículos presentados, se relaciona a continuación la aportación de cada autor:

Artículo 1: *Termografía Activa, Parte 1: Enfoque teórico de la captación infrarroja, procesamiento de datos y clasificación*, publicado en la revista internacional *DYNA. Ingeniería e Industria*.

Artículo 2: *Termografía Activa, Parte 2: Desarrollo y aplicaciones*, publicado en la revista internacional *DYNA. Ingeniería e Industria*.

Manuel Rodríguez Martín: estudio de bibliografía, evaluación de trabajos existentes en literatura, esquematización y resumen de sus contenidos.

Susana Lagüela López: formación en termografía infrarroja, provisión de fuentes de información y tutorización de los trabajos desarrollados por el doctorando, supervisión y asesoramiento.

Diego González Aguilera: formación y tutorización de los trabajos desarrollados por el doctorando, supervisión y asesoramiento en la interpretación de resultados.

Lucía Díaz Vilariño: colaboración en la búsqueda de fuentes, revisión de resultados.

Artículo 3: *Cooling analysis of welded materials for crack detection using infrared thermography*, publicado en la revista internacional *Infrared Physics & Technology*.

Manuel Rodríguez Martín: adquisición y procesado de datos termográficos para la detección de defectos en soldaduras, análisis de resultados.

Susana Lagüela López: diseño de la adquisición de imagen, asesoramiento en la realización de tareas de adquisición y procesado, así como de evaluación de resultados.

Diego González Aguilera: asesoramiento en la realización de tareas de procesado, así como de explotación de resultados.

Pedro Arias Sánchez: gestión de la adquisición de datos, asesoramiento de explotación de resultados.

Artículo 4: *Thermographic test for the geometric characterization of cracks in welding using thermographic image rectification*, aceptado bajo implementación de revisiones menores en la revista internacional *Automation and Construction*.

Manuel Rodríguez Martín: adquisición y procesado de datos termográficos para la detección de defectos en soldaduras, evaluación de resultados.

Susana Lagüela López: procesado de datos termográficos para la rectificación de las imágenes, asesoramiento en la explotación de resultados.

Diego González Aguilera: formación, tutorización y asesoramiento de los trabajos desarrollados por el doctorando.

Joaquín Martínez Sánchez: asesoramiento en el procesado fotogramétrico de los datos.

Artículo 5: *Procedure for quality inspection of welds based on macro-photogrammetric three-dimensional reconstruction*, publicado en la revista internacional *Optics & Laser Technology*.

Manuel Rodríguez Martín: adquisición y procesado de datos fotogramétricos para la caracterización geométrica de defectos en soldaduras, evaluación de resultados.

Susana Lagüela López: tutorización de los trabajos desarrollados por el doctorando, supervisión y asesoramiento en la interpretación de resultados.

Diego González Aguilera: formación, tutorización y asesoramiento de los trabajos desarrollados por el doctorando.

Pablo Rodríguez González: diseño de la adquisición de datos, asesoramiento en el procesado fotogramétrico.

Artículo 6: *Prediction of depth model for cracks in steel using infrared thermography*, aceptado en la revista internacional *Infrared Physics & Technology*.

Manuel Rodríguez Martín: adquisición y procesado de datos termográficos y fotogramétricos para la medición de grietas en soldaduras, análisis de resultados y cálculos de correlación.

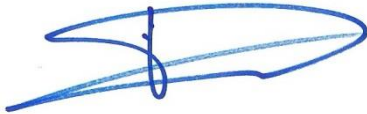
Susana Lagüela López: procesado de datos termográficos para la rectificación de las imágenes, asesoramiento en el procesado y la explotación de resultados.

Diego González Aguilera: formación, tutorización y asesoramiento de los trabajos desarrollados por el doctorando.

Joaquín Martínez Sánchez: asesoramiento de los trabajos desarrollados por el doctorando.

La Tesis Doctoral concluye con el correspondiente apartado de Conclusiones en el que de forma precisa y concreta se especifican las principales aportaciones realizadas de tal manera que puedan ser objeto de crítica y de proyección hacia el desarrollo de futuros trabajos integrados en línea de investigación.

Lo que firman, a todo los efectos oportunos, en Ávila, a 29 de Junio de 2015.



Dr. Diego González Aguilera



Dra. Susana Lagüela López

Agradecimientos:

En primer lugar quiero dirigir mis más sinceros agradecimientos a mis padres, Manuel y Julia, pues sin su incondicional apoyo, su intenso cariño y sus certeros y sabios consejos, esta Tesis Doctoral nunca se habría llegado a materializar. Gracias a ellos he logrado aprender que las cosas se hacen bien o no se hacen; que las metas se consiguen con constancia, insistencia y, sobre todo, paciencia y serenidad; que las prisas no son buenas si ello merma la entereza y que los fracasos esconden una valiosa oportunidad para fijar la vista en el presente y seguir adelante con la cabeza alta. Su constante apoyo y cariño, unido a la completa formación académica que me han permitido adquirir sin escatimar nunca en ningún medio o recurso, ha dado como fruto este trabajo que queda, a todos los efectos, dedicado a ellos.

Del mismo modo quiero agradecer a Estefanía su apoyo constante durante toda la etapa de elaboración de este trabajo que, sin duda, ha tenido un peso importante en su correcta consecución; también a mis hermanas María Luisa y Belén por su interés y cercanía, a pesar de las distancias.

Dejando el ámbito más puramente personal, quiero agradecer expresamente a los directores de la presente Tesis Doctoral, el Doctor Diego González-Aguilera y la Doctora Susana Lagüela, el hecho de confiar en la propuesta de investigación y en mi capacidad para llevarla a cabo, así como su continuo apoyo y asistencia durante todo el periodo de investigación. De ellos he podido aprender el noble oficio del investigador académico, tanto en su vertiente clásica más relacionada con el conocimiento científico y procedimental, como también en aquella otra que atañe en mayor medida a la práctica del día a día, más vinculada a las destrezas y habilidades de sentido transversal, interdisciplinar y práctico, que, por no estar escritas, resultan aún más difíciles de adquirir y cuyo valor acaba tornándose en esencial para ejercer la labor investigadora. Mi agradecimiento también al Doctor Pablo Rodríguez por el asesoramiento y asistencia que me ha brindado durante este periodo y al Doctor Pedro Arias de la Universidad de Vigo por las gestiones realizadas dirigidas a la obtención de materiales de crucial importancia para la experimentación.

Finalmente quiero agradecer a mis compañeros de laboratorio del Grupo TIDOP de la Universidad de Salamanca: los ingenieros Luís López, Manuel Gesto, Susana del Pozo, Sandra Zancajo, Luis Javier Sánchez, Mónica Herrero y Alberto Holgado, la oportunidad de trabajar con ellos y de compartir conocimientos, experiencias y aventuras.

Resumen:

La inspección de uniones soldadas constituye un requerimiento de seguridad cuya importancia a día de hoy queda lejos de toda duda. Gran parte de la defectología en uniones soldadas es de tipo superficial y por ello la normativa internacional de calidad exige la valoración de cualquier discontinuidad geométrica en los cordones de soldadura. Además de las discontinuidades existen defectos con un alto potencial de peligrosidad como son las fisuras. Estas, aunque pueden ser pequeñas, bajo estados altos de sollicitaciones térmicas o mecánicas tienden a propagarse, pudiendo provocar un colapso inminente y repentino de la unión, con drásticas consecuencias en términos de funcionalidad y, sobre todo, de seguridad. En la presente Tesis Doctoral se pretende dotar al inspector de soldadura de nuevas herramientas. Por un lado, se pretende estudiar una técnica tan ventajosa en términos de detección como es la termografía activa para diseñar protocolos de ensayo sencillos y aplicables en ambientes exteriores que permitan la detección, caracterización y medición de fisuras superficiales mediante el estudio de temperaturas y de velocidades de enfriamiento después de inducir en el material una estimulación energética ligera y segura. Por otro lado, se pretende facilitar la labor de inspección visual mediante la posibilidad de recrear modelos tridimensionales de soldaduras desde imágenes tomadas con una cámara fotográfica comercial. Estos modelos se generan en formatos tales que puedan ser exportables a software CAD para su minucioso análisis metrológico, posibilitando la medición sobre el modelo y sin necesidad de que el inspector acuda al lugar de la instalación de la soldadura ni realizar medidas con los instrumentos físicos tradicionales. A tales efectos se diseña una investigación que estudia inicialmente de forma separada la aplicación de la técnica de la termografía activa y la referente a la fotogrametría de objeto cercano para, finalmente, confluir ambas en el desarrollo de modelos predictivos de profundidad en fisuras que permita, desde una simple imagen térmica del plano superficial de la soldadura, predecir la profundidad de la fisura dentro del material.

Abstract:

Welding inspection is currently a requirement regarding security. Most defectology in welded joints is superficial, so international standards require the assessment of any geometrical discontinuity in the weld. In addition to discontinuities, there are other highly harmful potential defects, such as cracks. Although their appearance can seem reduced in dimensions, they tend to the propagation under high mechanical and/or thermal solicitations, being able to generate an imminent and sudden collapse of the weld with drastic consequences from the point of view of security and functionality. This Doctoral Thesis pretends to provide with new tools to the welding inspector. On the one hand, the study aims at the study of an advantageous detection technique, active thermography, with the objective at the design of simple testing protocols that could also be applied in outdoor conditions. The designed protocols will allow the detection, characterization and measurement of surface cracks from the study of temperature and cooling rate distributions after inducing a light and safe energy stimulation in the material. On the other hand, the author pretends to facilitate the work of the visual inspection through the generation of tridimensional models from images acquired with a photographic commercial camera. These models are generated in formats that allow the exportation to CAD software towards the implementation of a thorough metrological analysis. This way, the capability of performing measurements directly on the model removes the need of the visit of the inspector to the installation in order to perform the same measurements with traditional tools. This way, the author first performed the study of the techniques of active thermography and close range photogrammetry independently, finally combining both techniques in the development of prediction models to measure the depth of cracks from a single thermal image.

Índice

Introducción.....	15
Objetivos:	21
Sección I: La técnica termográfica: termografía activa.....	23
Capítulo 1: Enfoque teórico de la captación infrarroja, procesamiento de datos y clasificación.	23
Capítulo 2: Termografía activa: Desarrollo y aplicaciones.	35
Sección II. Aplicación de la termografía activa a la detección de fisuras en soldadura. 45	
Capítulo 3: Análisis de enfriamiento de soldaduras para la detección de fisuras mediante el uso de termografía infrarroja.	45
Capítulo 4: Ensayo termográfico para la caracterización geométrica de fisuras en soldaduras usando algoritmos de rectificación de imagen térmica.....	55
Sección III: La técnica fotogramétrica aplicada a la caracterización y evaluación de materiales soldados.....	67
Capítulo 5: Procedimiento macrofotogramétrico para la inspección de calidad en soldaduras a través de la reconstrucción de modelos tridimensionales.	67
Sección IV: Combinación de la técnica termográfica y la técnica fotogramétrica para el diseño de modelos predictivos de profundidad en grietas de soldaduras.....	81
Capítulo 6: Modelo de predicción de profundidad para fisuras en acero utilizando termografía infrarroja.....	81
Conclusiones:	93
Líneas de trabajo futuras.....	97
Referencias bibliográficas:	99
Anexo I: Datos estadísticos de la revistas	101
Anexo II: Patente diseñada.....	123

Introducción

La primera acepción del término soldadura en el diccionario de la Real Academia Española (RAE) [1] es la siguiente: “Pegar y unir sólidamente dos cosas, o dos partes de una misma cosa, de ordinario con alguna sustancia igual o semejante a ellas”. A la luz de la definición, el proceso de soldeo de acero será aquel por el cuál una pieza de acero se une a otra pieza del mismo acero o de otro semejante.

Existen distintos tipos de acero y aleaciones, los cuales requieren distintos tipos de herramientas y técnicas de soldadura, asumiendo, en primer lugar que puedan soldarse (la soldabilidad es la propiedad de los metales que indica la probabilidad de éxito en el resultado si son sometidos a un proceso efectivo de soldeo). Por regla general los aceros de bajo contenido en carbono son más aptos para la soldadura. Los aceros con un alto contenido de carbono tienden a formar uniones duras que son frágiles y poco dúctiles, lo cual deriva en un incremento de probabilidad en la formación de defectos durante o después del proceso de soldeo, aunque esta tendencia se puede reducir mediante diferentes técnicas metalúrgicas.

Los principales procedimientos de soldeo utilizados actualmente para el acero son la soldadura por arco eléctrico, la soldadura con gas tungsteno (TIG), la soldadura por gas metal inerte MIG-MAG y soldadura por rayo láser (LBW). De todas ellas, las que más interesan desde el punto de vista de los ensayos no destructivos (END) son las tres últimas, ya que son los procedimientos más utilizados en contextos que precisan de uniones de altas prestaciones que son, precisamente, las que más requerimientos de inspección necesitan y, por tanto, las que más frecuentemente son ensayadas con END.

La resistencia de la unión soldada depende del material de aportación que se utilice, de la configuración de la técnica, y de la morfología constructiva de la pieza, sin embargo el factor más determinante en la calidad de la unión radica en la habilidad del soldador. [2]. A menudo las soldaduras presentan imperfecciones o defectos visibles superficialmente o internos que suelen ser causa de rotura. Cuando se habla de *imperfecciones* en una soldadura se hace referencia a una falta de continuidad o a una interrupción de su estructura física que no afecta a la resistencia del cordón, ni tampoco a su funcionalidad. Sin embargo cuando se habla de *defecto* se hace alusión a una anomalía que pone en peligro la resistencia de la soldadura y cuya mera existencia provoca per se la necesidad de reparar o rehacer la soldadura. Sin embargo, no todo es blanco o negro y la frontera entre la aceptación y el rechazo de una soldadura con una o varias imperfecciones se valora en base a unos criterios establecidos en la normativa de calidad para soldeo por presión [3-4]. Los criterios de calidad normativizados son diferentes en función del nivel de calidad exigido a la soldadura (que suele establecerse en base parámetros funcionales y contextuales, tales como las sollicitaciones de trabajo a las que se somete a la unión, su contexto de la instalación, su aplicación funcional, etc.) y generalmente están basados en relaciones cuantitativas (principalmente geométricas)

entre distintas propiedades métricas de los defectos con respecto a propiedades métricas generales del cordón de soldadura (longitud o anchura del cordón, altura de garganta, etc.). De esta manera, una imperfección podría pasar de ser una anomalía cuya única trascendencia se contemple desde el ámbito de lo más puramente estético a considerarse un auténtico defecto que provoque la reconstrucción total o parcial de la soldadura. La persona que toma tal decisión en base a los criterios dispuestos en la normativa de calidad es el llamado “inspector de soldadura”. A dicho profesional se le suele exigir una titulación de ingeniero pero, además, debe tener una serie de conocimientos y destrezas específicas acreditadas por organismos independientes sobre el proceso de soldeo, normativa de calidad y ensayos no destructivos [6]. Su labor es valorar la calidad de las soldaduras y tomar decisiones sobre su aceptación, reparación o su destrucción en caso de que supongan un peligro para la integridad de la instalación o para la seguridad de sus usuarios.

El inspector de soldadura suele comenzar su labor supervisora con el procedimiento de la llamada inspección visual, regulado por la normativa [7]. En ocasiones ello constituye un primer paso en el proceso de inspección cuyo resultado, de ser dudoso, podrían conllevar la realización de ensayos más sofisticados, mientras que en otras ocasiones las soldaduras son directamente rechazadas en fase de inspección visual. Cabe destacar que, aunque la inspección visual parezca un procedimiento sencillo y de bajo coste, lo cierto es que el mero hecho de desplazar a un ingeniero inspector al lugar de instalación de la soldadura supone un importante gasto en transporte y manutención, más aún en proyectos de amplia extensión geográfica y/o de difícil acceso como, por ejemplo, grandes proyectos gasísticos o infraestructuras de transporte. Es por ello que la posibilidad de conseguir in-situ modelos tridimensionales a escala de los cordones, que sean exportables a software CAD, facilitaría enormemente la labor inspectora y evitaría el desplazamiento del ingeniero inspector al lugar de la soldadura con la ventaja en costes y plazos que ello conllevaría.

Además de la inspección visual, el resto de técnicas de END que pueden ser utilizadas para la inspección de soldaduras de acero son las siguientes:

- Líquidos penetrantes: Con esta técnica se detectan discontinuidades o defectos que tienen incidencia superficial pero que presentan dificultades para ser detectados a simple vista. Su desarrollo consiste en la aplicación de tintas de baja densidad que penetran en los materiales y que, al hacerlo, resaltan la posible presencia de poros, grietas o fisuras en la zona en que fueron aplicados. En ocasiones este método se utiliza como un método auxiliar de la inspección visual. Su aplicación a la evaluación de uniones soldadas viene regulada en la normativa internacional [8].
- Partículas magnéticas: Es un método de ensayo para detectar discontinuidades y defectos superficiales y levemente subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. Su desarrollo consiste en la aplicación de partículas metálicas

sobre el material a inspeccionar mientras se induce un flujo magnético en el material metálico. Las partículas se posicionarán de determinada manera en las zonas donde existan discontinuidades o defectos superficiales. Su aplicación a la evaluación de uniones soldadas viene regulada en la normativa internacional [9].

- Ultrasonidos: Se trata de un método END de extensión volumétrica para detectar tanto defectos superficiales como internos. La técnica se fundamenta en la propagación de ondas acústicas a la velocidad del sonido a través de los diferentes materiales a fin de detectar las discontinuidades dentro del material a través del reflejo de la onda por parte de dicha discontinuidad, y, posteriormente, determinar la forma y tamaño de las indicaciones o defectos encontrados. A día de hoy se trata de una de las técnicas más versátiles de ensayo por su facilidad para el transporte y por permitir el diagnóstico de numerosas patologías en soldadura. Su aplicación viene regulada por un gran abanico normativo, siendo la norma [10] la que establece el protocolo para la detección de discontinuidades y defectos.
- Radiografía: Es un método de END volumétrico que utiliza radiaciones ionizantes para penetrar a través del material y registrar su estructura en una película radiográfica. Sirve para detectar defectos internos, principalmente los rellenos de aire como son los poros, fisuras, etc. Aunque a día de hoy es el método más fiable y efectivo para la detección de defectos internos, no se puede obviar la escasa versatilidad de la técnica, ni tampoco los problemas de seguridad y salud propios del trabajo con radiaciones ionizantes. El uso de radiología industrial para soldaduras está regulado por la normativa internacional [11].

La termografía es una técnica de trabajo multidisciplinar dirigida a la obtención de imágenes térmicas a través del proceso de captación de radiación infrarroja que puede ser utilizada en diferentes metodologías de trabajo. Estaremos ante la llamada *termografía cualitativa* cuando el observable que se pretende analizar son las diferencias en la potencia de la radiación infrarroja plasmadas en una imagen térmica. En este caso no suele existir una corrección de la emisividad pues la esencia del método es la captura de un escenario con diferentes objetos, cada uno de ellos con una emisividad y/o temperatura distinta, principalmente con fines de detección. Pongamos un ejemplo como es el uso de la técnica para detección/identificación de personas en la oscuridad [12], en este caso los valores de potencia incidentes en el sensor difícilmente pueden relacionarse de manera precisa con la temperatura pues la emisividad de la piel humana no es la misma que la de la ropa o que la del suelo. Además, hay que tener en cuenta la dificultad que supone controlar los reflejos térmicos en la escena. Pero ello no es de importancia porque en este caso el fin de la aplicación de la técnica termográfica es puramente identificativo y no interesa conocer con precisión el valor absoluto de

temperatura o emisividad para cada punto de la imagen. Estaremos ante la llamada *termografía cuantitativa* cuando lo que se pretende analizar son parámetros termofísicos de un objeto. En este caso se debería de conocer la emisividad del objeto si lo que se quiere es estudiar su temperatura, enfriamiento, calentamiento o respuesta a una secuencia térmica. Un ejemplo de aplicación de la técnica cuantitativa es la medición de la temperatura corporal [13] (por ejemplo para prevención de contagios epidemiológicos en aeropuertos), en este caso, a diferencia del caso de detección de personas expuesto en el párrafo anterior, el valor temperatura deberá ser obtenido con precisión y para ello la técnica deberá estar ajustada en base a la emisividad de la piel humana. Aquí no interesa la mera detección por diferencias en la radiación infrarroja emitida o reflejada dentro del escenario monitorizado, sino la medición con precisión de una variable física como es la temperatura.

La técnica también se puede clasificar con arreglo a la existencia o no de una fuente de estimulación externa del objeto o material a analizar; en este caso estaríamos ante la termografía activa o termografía pasiva. Cuando se trabaja con una fuente de excitación externa controlada con el fin de estimular los átomos de un material nos encontramos ante la *termografía activa*, mientras que la *termografía pasiva* consiste en la monitorización o captura termográfica a temperatura ambiente [14] o a la temperatura de trabajo si lo que se pretende monitorizar es una pieza de un equipo industrial [15], sin inducir externamente ningún flujo de calor.

La termografía activa es, por tanto, un método de ensayo no destructivo a través del cual se detectan imperfecciones o defectos superficiales, subsuperficiales o internos mediante la monitorización termográfica del material, cuando este recibe una estimulación térmica, eléctrica, ultrasónica o vibro-mecánica externa. Si bien la técnica termográfica, tal como se verá en los siguientes capítulos, se viene aplicando para numerosos ámbitos en ingeniería e industria, su uso para la detección de defectos en soldaduras se sigue considerando como experimental. Este hecho se debe a que a nivel normativo, a día de hoy, no se ha establecido un protocolo claro de inspección que pueda extenderse a cualquier contexto debido a que los diferentes trabajos al respecto han sido dirigidos a materiales concretos, defectología específica y ambientes de trabajo principalmente de laboratorio (situación contradictoria con la naturaleza de un END, cuya esencia se sustancia desde la aplicabilidad in-situ). Sin embargo esta situación presenta visos de cambiar en el corto plazo debido al gran número de investigaciones que desarrollan, optimizan y extienden la técnica al campo del estudio de las soldaduras.

Por otro lado, la fotogrametría y la visión computacional han sido utilizadas para el diseño de algoritmos para el guiado de autómatas en soldadura [16]. Sin embargo no se ha utilizado la fotogrametría como método de valoración de uniones soldadas, ni como método propio, ni tampoco como complemento a otros métodos de ensayo. Es por ello que su introducción al ámbito de la inspección de soldadura supone una innovación metodológica en el ámbito de los END y la evaluación de materiales.

La presente Tesis Doctoral abarca las técnicas de la termografía activa y de la fotogrametría de rango cercano, aplicadas ambas a la evaluación de uniones soldadas, y ha sido objeto de transferencia científica a través de seis artículos científicos. El contenido que se introducirá a continuación comenzará con el planteamiento de los objetivos para, posteriormente, estructurar el corpus de la investigación a través de tres secciones. La sección I consta de dos artículos de revista e introduce los principios físicos que posibilitan la técnica termográfica, así como los fundamentos que sustentan la algoritmia de procesamiento de datos y una revisión de las principales trabajos dirigidos a la aplicación de la técnica al ámbito de la ingeniería y la industria. La sección II incluye dos artículos de revista y en ella se aplica la termografía activa como metodología única para la detección, medición y caracterización de fisuras en soldaduras, basándose en el estudio de las temperaturas y las velocidades de enfriamiento para los diferentes puntos del material cuando este es sometido a una estimulación térmica controlada. En la sección III, que incluye un artículo de revista, se detalla el establecimiento de un protocolo macro-fotogramétrico para la inspección visual de soldaduras que permite, desde una secuencia de fotografías realizadas con una cámara fotográfica comercial DSLR (Digital Single Lens Reflex), la generación de una nube de puntos densa tridimensional del cordón que, a partir de técnicas de mallado, posibilita la obtención de un modelo sólido que recrea con alta precisión la realidad geométrica de la superficie del cordón, que es, al fin y al cabo, el objeto de estudio de los inspectores de soldadura que aplican un procedimiento de inspección visual. La sección IV consta de un artículo de revista y en ella se establece un método para la predicción de profundidad en fisuras superficiales mediante la combinación de datos térmicos extraídos de los procedimientos termográficos introducidos en la sección II con datos geométricos extraídos con fotogrametría siguiendo el procedimiento establecido en la sección III. Con el método propuesto, se posibilita la predicción de la profundidad de pequeñas fisuras abiertas a la superficie a partir de una única imagen termográfica. Finalmente se enumerarán las conclusiones generales de la Tesis Doctoral y las líneas de trabajo futuras.

Objetivos:

A continuación se plantean los objetivos de esta Tesis Doctoral, clasificados en un objetivo principal y ocho objetivos secundarios.

Objetivo principal:

- Evaluar la aplicación de la técnica termográfica para la inspección de soldaduras: analizar sus capacidades y los requerimientos para su aplicación óptima, así como las posibilidades abiertas por la integración de los datos térmicos con los datos geométricos extraídos mediante procedimientos macro-fotogramétricos.

Objetivos secundarios:

- Realizar una investigación teórica sobre el fenómeno de la radiación infrarroja y el proceso de captación de imagen térmica con un enfoque que abarque: desde los principios físicos de funcionamiento de la cámara termográfica hasta los diferentes parámetros intervinientes en el proceso de captación y su fenomenología, pasando por la fundamentación de los algoritmos de procesamiento de la imagen térmica.
- Realizar una investigación bibliográfica que posibilite el establecimiento de un estado del arte de la técnica termográfica en ingeniería e industria, así como el establecimiento de diferentes clasificaciones de la técnica en base a las metodologías utilizadas por los investigadores de referencia en el sector.
- Analizar las diferencias en los resultados obtenidos para la detección y caracterización de fisuras en aceros soldados cuando se aplica una estimulación energética mediante pulso largo: estudio diferencial enfocado a la visualización de fisuras en base a temperaturas absolutas y a velocidades de enfriamiento.
- Establecer un protocolo termográfico activo que permita la detección de fisuras: desde la captura de una secuencia de termogramas y la excitación del material hasta el análisis de la velocidad de enfriamiento y la monitorización del material.
- Investigar el alcance de la termografía activa como instrumento metrológico para la medida de parámetros geométricos de fisuras en el plano superficial, aplicando técnicas 2D de rectificación de imagen. Analizar la aportación real, en términos de valoración geométrica de grietas, que conllevaría el desarrollo de un algoritmo de extracción de isotermas.

- Analizar el alcance y la viabilidad de la técnica macro-fotogramétrica para el control automatizado de sección en cordones de soldadura, así como para la detección, caracterización y medición de diferentes defectos e imperfecciones superficiales con arreglo a los estándares internacionales. Estudiar las potencialidades de la técnica de cara a la evaluación con arreglo a los estándares de calidad internacional y evaluar el error acumulado por el método en base a la secuencia seguida.
- Diseñar un protocolo de inspección visual basado en la obtención de modelos tridimensionales fotogramétricos que evite los costes y tiempos derivados del desplazamiento al lugar de la soldadura del ingeniero inspector.
- Establecer un modelo predictivo para la obtención de la profundidad de grietas en aceros soldados mediante la correlación de datos térmicos obtenidos con termografía activa y datos geométricos de profundidad obtenidos a partir de la implementación del procedimiento macro-fotogramétrico.

Sección I: La técnica termográfica: termografía activa.

Capítulo 1: Enfoque teórico de la captación infrarroja, procesamiento de datos y clasificación.

El presente capítulo contiene el artículo *Termografía activa: Enfoque Teórico de la Captación Infrarroja, Procesamiento de Datos y clasificación*, aceptado para publicación en la revista internacional de impacto (JCR) *DYNA Ingeniería e industria*.

La captación infrarroja es aquel proceso a través del cual los diferentes valores de la intensidad de la radiación infrarroja que atraviesan una lente son focalizados en un sensor que registra para cada uno de sus píxeles el valor de dicha intensidad. Dicha radiación es la porción acotada del espectro electromagnético comprendida entre 8 y 14 μm (a lo que también se denomina infrarrojo lejano o infrarrojo de onda larga), intervalo dentro del cual la materia emite energía como consecuencia de mantener una determinada temperatura, por encima de los 0 K (-273,15°C).

La Ley de Stefan-Boltzman determina que la emisión de un cuerpo negro teórico será proporcional a la cuarta potencia de la temperatura y, que a su vez, tal cuerpo, absorbe toda la radiación que a él llega sin reflejarla. Para una determinada temperatura y longitud de onda, ningún cuerpo emitirá más energía que el cuerpo negro por lo que se podría interpretar como una situación teórica ideal que sirve de patrón o estándar para modelizar situaciones reales pues los cuerpos negros no existen en la naturaleza. La realidad física de un cuerpo a una determinada temperatura se puede aproximar en base a la proporción de la radiación emitida por el cuerpo real con respecto a la radiación que hubiera emitido un cuerpo negro a la misma temperatura que el cuerpo real (radiación teórica del cuerpo negro). Tal relación entre radiación real y teórica es conocida como emisividad y su definición analítica es expuesta en la sección 2.2. del artículo contenido en este capítulo. Es por ello que, para un cuerpo real, la potencia de la radiación infrarroja emitida no es solo proporcional a la cuarta potencia de la temperatura sino que también dependerá de su emisividad. Ante esto puede ser instintivo pensar que para medir la radiación real emitida por un cuerpo real a partir de la radiación recibida por una cámara termográfica, basta con conocer su emisividad (cuya aproximación está tabulada para numerosas colecciones de materiales). Sin embargo, el razonamiento no finaliza aquí, pues la radiación es siempre captada por un sensor termográfico, el cual tiene una limitación máxima y mínima en las longitudes de onda que es capaz de registrar. Ello provoca la necesidad de corregir los resultados de intensidad de la radiación infrarroja con un coeficiente de emisión en banda que será considerado igual para todos los píxeles del sensor y cuyo desarrollo matemático se expone en la sección 2.2. del artículo.

Una vez que se conoce que la radiación emitida por un cuerpo real puede ser captada por los sensores termográficos, previo conocimiento del coeficiente de emisión en

banda, y que tal potencia se considera proporcional al producto de la emisividad por la cuarta potencia de la temperatura, no es descabellado pensar que, para un material de emisividad conocida, la radiación infrarroja incidente sobre la lente de una cámara termográfica se focaliza sobre un sensor. Este sensor registra el valor de la intensidad de la radiación para cada punto de la imagen y a partir de los valores se puede conocer la temperatura absoluta de cada punto de la imagen; siendo este el razonamiento utilizado en las investigaciones de termografía.

En base a este fenómeno el artículo que se expone a continuación desarrolla los razonamientos teóricos que sustentan el fenómeno de captación infrarroja en base a los diferentes parámetros intervinientes en el proceso (sección 2.2.), así como el enfoque de procesamiento de los datos (sección 2.3).

TERMOGRAFÍA ACTIVA, PARTE 1: ENFOQUE TEÓRICO DE LA CAPTACIÓN INFRARROJA, PROCESAMIENTO DE DATOS Y CLASIFICACION

Manuel Rodríguez Martín*¹ -- Ingeniero Industrial. Investigador Grupo TIDOP
Susana Lagüela López^{1,2} – Doctora por la Universidad de Vigo. Ingeniera de Minas. Investigadora grupo TIDOP
Diego González Aguilera¹ –Doctor por la Universidad de Salamanca. Ingeniero en Geodesia y Cartografía. Director del
Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno de la Universidad de Salamanca.
Lucía Díaz Vilariño² –Ingeniera Agrónoma. Investigadora Grupo TF1

¹ Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno. Universidad de Salamanca. Escuela Politécnica Superior de Ávila. Calle Hornos Caleros, 50, 05003, Avila

² Grupo de Investigación en Geotecnologías Aplicadas. Universidad de Vigo. Rúa Maxwell s/n, Campus Lagoas-Marcosende, 36310 Vigo

*Tf. 669999251, mail: ingmanuel@usal.es, Calle Hornos Caleros, 50, 05003, Ávila

ACTIVE THERMOGRAPHY, PART 1: THEORETICAL APPROACH OF INFRARED CAPTATION, DATA PROCESSING AND CLASIFICACION

ABSTRACT:

The technique of Infrared Thermography has been object of a great development in recent years, basically by its diversity of fields of application in engineering and industry. Given the multidisciplinary of this technique, every engineer will probably have to use infrared thermography at some point of their career . The infrared capturing process is based on the radiation heat transfer phenomena; for this reason the knowledge about the different parameters and correction factors involved in the process and the information about the data processing techniques presents enormous importance for engineering. Similarly, it is also important to know the different criteria for the classification of the thermographic technique and methods: active vs passive thermography and quantitative vs qualitative thermography.

Keywords:

Infrared thermography (IRT), active thermography, nondestructive testing (NDT), thermal image, heating source, image processing.

RESUMEN:

La técnica de la termografía infrarroja ha sido objeto de un amplio desarrollo en los últimos años, principalmente por la gran variedad de campos de aplicación dentro de la ingeniería y de la industria. Hoy en día existe una alta probabilidad de que un ingeniero no especializado en la técnica termográfica, debido a la naturaleza transversal de la técnica, se enfrente en algún momento de su carrera al reto de utilizarla. El proceso de captación infrarroja está basado en el fenómeno de la transferencia de calor por radiación; por esta razón, el conocimiento de los parámetros y factores de corrección que intervienen en el proceso así como de los métodos de extracción de la información y de procesado presenta una enorme importancia para el trabajo en ingeniería. De igual manera, es importante conocer los diferentes criterios de clasificación de la técnica y en base a ellos sus distintos modos de trabajo: termografía activa y pasiva, termografía cuantitativa y cualitativa.

Palabras clave:

Termografía infrarroja (TIR), termografía activa, ensayo no destructivo (END), imagen térmica, fuente de excitación, procesamiento de imagen.

1.- INTRODUCCIÓN

El uso de la termografía ha ido en aumento en la última década, pasando de ser un instrumento costoso y solo presente en determinados laboratorios y centros de investigación, a ser una herramienta tecnológica más en la rutina de muchos profesionales de la ingeniería. Sin embargo, a día de hoy sus usos más habituales están relacionados con la inspección cualitativa que, como se detallará más adelante, consiste a grandes rasgos en la detección de zonas calientes o frías para detectar ciertas anomalías o tratar de prevenir determinadas patologías en máquinas, edificios o fallos eléctricos o electrónicos, siempre a través de la mera visualización de la imagen termográfica. Para estos usos, el procesado de la imagen termográfica suele limitarse al ajuste de la paleta de colores, delimitación y medición de zonas y/o puntos de interés o al establecimiento de distribuciones térmicas en el espacio a través de rectas o superficies, todo ello con el fin de ilustrar el informe que, a menudo, el termógrafo tiene que redactar. Sin embargo, este uso cualitativo de la técnica como se verá más adelante, aun siendo el más extendido y utilizado a día de hoy, no abarca, ni mucho menos, todas las posibilidades que la termografía puede aportar a la ingeniería y a la industria.

La secuencia que se va a seguir en este artículo comenzará con la introducción de los principios teóricos de funcionamiento la técnica, desarrollando de modo claro y conciso las diferentes ecuaciones a través de las cuales se explica el fenómeno de la captación infrarroja y la extracción de datos. Los autores propondrán un enfoque sencillo de procesamiento fundamentado en funciones de temperatura y enfriamiento. Posteriormente se pasará a definir las principales formas de trabajo sustentadas en el uso de cámaras termográficas.

2.- ENFOQUE TEÓRICO

2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CÁMARA TERMOGRÁFICA

El funcionamiento de una cámara termográfica se asemeja al propio de una cámara fotográfica digital; de la misma manera, el comportamiento de la radiación infrarroja en lo referente a su captación por cámaras termográficas se puede asimilar con el comportamiento del espectro visible de la radiación electromagnética que se corresponde con el intervalo de longitudes de onda que el ojo humano es capaz de captar (0.4-0.7 μm). No todos los cuerpos emiten radiación dentro del espectro visible, pero los que lo hacen iluminan a otros cuerpos, los cuales absorben, reflejan o transmiten la luz de una manera u otra en función de sus características físicas y ello posibilita la distinción de distintos objetos en una fotografía o en la imagen natural captada por los propios ojos. Lo mismo ocurre con la radiación infrarroja, pero con una importante diferencia: todos los cuerpos son emisores de dicha radiación si su temperatura es superior a 0° K.

La imagen térmica es proyectada en un plano focal mediante una serie de lentes y es ahí, en el propio plano focal, donde una serie de sensores registran para cada punto de su superficie (píxel) el valor de la irradiancia (potencia de la radiación incidente por unidad de superficie). La cámara recibe la radiación infrarroja emitida por los cuerpos situados dentro del campo de visión que abarcan las lentes.

Siguiendo con el símil de la cámara fotográfica; si un objeto no emisor de luz absorbe gran parte de la radiación incidente y se sitúa dentro del campo de captación de una cámara fotográfica, esta registrará una imagen oscura debido a la ausencia de radiación electromagnética propia y/o reflejada. Si tal objeto se situara frente a una cámara termográfica todo sería distinto pues este siempre emitirá una radiación infrarroja propia (al encontrarse a una temperatura superior a 0°K) que será proporcional a la temperatura absoluta del cuerpo elevada a su cuarta potencia y que podrá ser captada por el sensor de la cámara IR (infrarroja). Aquí radica una de las diferencias principales entre las cámaras digitales y las cámaras termográficas: las primeras sólo registran la fracción visible de la radiación electromagnética emitida por fuentes de luz o reflejada por objetos de su alrededor; sin embargo, la cámara termográfica registra la fracción infrarroja (infrarrojo térmico) de la radiación electromagnética emitida por cualquier cuerpo, es decir, la parte del espectro electromagnético cuya longitud de onda queda entre 8 y 14 μm (onda larga), la cual siempre existe para temperaturas superiores a 0°K, sin necesidad de que el cuerpo refleje la radiación de otros (que

también se registraría), permitiendo realizar observaciones sin necesidad de que haya presencia de luz. Esta ventaja es la que hace de las cámaras termográficas una herramienta de enorme atractivo para la toma de imágenes nocturnas, principalmente en el ámbito de la seguridad y la defensa.

2.2 GENERACIÓN DE LA IMAGEN TÉRMICA Y EXTRACCIÓN DE DATOS: DESARROLLO TEÓRICO

La superficie de cualquier material cuya temperatura sea superior a 0 °K, , emite radiación IR. Las cargas eléctricas de los átomos que constituyen tal material están en continua vibración y ello genera la emisión de radiación IR. La relación entre el flujo energético de las radiaciones y las temperaturas depende de varios factores y se define por la ecuación de Planck (Eq. 1) donde h es la constante de Planck, λ es la longitud de onda, k es la constante de Boltzmann, c la velocidad de la luz, T la temperatura absoluta y E_b el poder emisivo espectral en función de la temperatura y de la longitud de onda.

$$E_b(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad \text{Eq. 1}$$

Un cuerpo negro es aquel cuya superficie absorbe toda la energía en forma de radiación que incide sobre él y, por tanto, no deja lugar al fenómeno de la reflexión. Así, toda la energía que recibe, la absorbe y la emite posteriormente en forma de radiación infrarroja. A través de la segunda Ley de la Termodinámica se puede llegar a una relación entre el poder emisivo de un cuerpo y la cuarta potencia de su temperatura [2]; de esta manera, la potencia emitida por el cuerpo negro viene dada por la ecuación de Stefan-Boltzmann (Eq. 2)

$$W_{CN}(T) = \int_0^\infty E_b(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad \text{Eq. 2}$$

La proporción de radiación emitida por el cuerpo real (CR) respecto a la radiación (teórica) del cuerpo negro (CN) es la emisividad total (ϵ) y esta puede ser expresada a través de la ecuación (Eq. 3) donde $\epsilon(\lambda)$ es la emisividad espectral hemisférica.

$$\epsilon(T) = \frac{W_{CR}}{W_{CN}} = \frac{\int_0^\infty \epsilon(\lambda, T) E_b(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^\infty E_b(\lambda, T) d\lambda} \quad \text{Eq. 3}$$

Teniendo presente que la cámara sólo captura la radiación en un intervalo de longitud de onda definido (λ_1 y λ_2) (banda espectral) se necesita calcular la fracción de radiación del cuerpo negro en esta banda de longitudes de onda [4]. La relación entre la porción de radiación del cuerpo negro acotada entre 0 y una longitud de onda λ es función del producto λT . Este postulado se demuestra con base en la Ley de desplazamiento de Wien (Eq. 4) que indica la existencia de una relación inversamente proporcional entre la temperatura y el pico de longitud de onda (λ_{max}).

$$\lambda_{max} = \frac{2.898 \times 10^{-3} \text{ (m.k)}}{T} \quad \text{Eq. 4}$$

$$\frac{E_b(\lambda, T)}{E_b(\lambda_{max}, T)} = f(T\lambda) \quad \text{Eq. 5}$$

Por tanto, la relación entre la radiación del cuerpo negro acotada por las longitudes de onda captadas por la cámara y la radiación teórica (Eq. 5) se podrá expresar como la diferencia de dos funciones cuyas variables son el producto de la temperatura por las respectivas longitudes de onda máxima y mínima admitidas por el sensor: $f(T\lambda_2)$ y $f(T\lambda_1)$ (Eq. 6).

$$\begin{aligned} \frac{W_{CN\lambda_1 T \rightarrow \lambda_2 T}}{W_{CN}} &= \frac{W_{CN0 \rightarrow \lambda_2 T}}{W_{CN}} - \frac{W_{CN0 \rightarrow \lambda_1 T}}{W_{CN}} = \frac{\int_0^{\lambda_2 T} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} d\lambda T}{\sigma T^4} - \frac{\int_0^{\lambda_1 T} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} d\lambda T}{\sigma T^4} \\ &= \int_0^{\lambda_2 T} \frac{2\pi hc^2}{\sigma(T\lambda)^5 (e^{hc/kT\lambda} - 1)} d\lambda T - \int_0^{\lambda_1 T} \frac{2\pi hc^2}{\sigma(T\lambda)^5 (e^{hc/kT\lambda} - 1)} d\lambda T = f(T\lambda_2) - f(T\lambda_1) = H(T, \lambda_1, \lambda_2) \end{aligned}$$

Eq. 6.

La principal ventaja de obtener una función cuya variable sea el producto de la longitud de onda por la temperatura radica en que los valores de $f[\lambda T]$ para cada λT pueden ser obtenidos experimentalmente y a tal efecto han sido tabulados por diferentes autores [5-6] pudiéndose obtener la diferencia de las funciones establecidas en el párrafo anterior (parámetro $H[T, \lambda_1, \lambda_2]$).

Teniendo en cuenta la Eq. 6 y la Eq. 3, la potencia emitida por un determinado objeto de emisividad (ε_O) y captada por la cámara será (Eq. 7):

$$W_{CR_O} = \varepsilon_O H W_{CN_O}$$

Eq. 7

Mientras que la potencia proveniente de objetos del entorno de emisividad ε_r y reflejada por el propio objeto será (Eq. 8):

$$W_{CR_R} = (1 - \varepsilon_O) H W_{CN_R}$$

Eq. 8

La potencia de la radiación total que llega a cada pixel de la cámara termográfica (W_p) vendrá determinada por la suma de la potencia emitida por el objeto (W_O) más la potencia reflejada por el objeto (W_R) (cabe mencionar que la atmósfera también emite radiación y absorbe parte de la misma, en cuyo caso sus efectos deberán de ser corregidos); es decir, por los parámetros de emisividad (ε) y temperatura (T) propios del objeto (que son indicados con el subíndice O), y por los referentes a la radiación reflejada por los objetos del entorno (indicados con el subíndice R) (Eq. 9). C es un coeficiente que indica la proporción de las pérdidas ópticas provocadas durante el proceso de captación, que son consideradas igual para todos los píxeles [7]. La relación H (Eq. 6) también se considera igual para todos los píxeles.

Eq. 9

$$W_p = CH (W_O + W_R) = CH(\varepsilon_O \sigma T_O^4 + (1 - \varepsilon_O) \varepsilon_R T_R^4)$$

Despejando en Eq. 9, obtendremos la temperatura de cada pixel del objeto (T_O) (Eq. 10):

Eq. 10

$$T_O = \sqrt[4]{\frac{\frac{W_p}{CH} - (1 - \varepsilon_O) \varepsilon_R T_R^4}{\varepsilon_O}}$$

Para cada pixel se almacena un valor de T_O y la matriz constituida a partir de todos los píxeles del sensor (M) se almacena en la cámara dando lugar a la imagen térmica (Eq.11).

Eq. 11

$$[M_{m \times n}] = \begin{bmatrix} T_{o00} & \dots & T_{o0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{om0} & \dots & T_{omn} \end{bmatrix}$$

2.3 ENFOQUES PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS TÉRMICOS

Obtenida una única matriz (M) de m filas y n columnas ($m \times n$ píxeles) se pueden obtener multitud de parámetros a través del procesamiento de datos contenidos en ella, por ejemplo, a través de la variación de temperatura entre cada uno de los elementos de la matriz se puede examinar el contraste térmico de determinadas zonas (Fig. 1), la frecuencia de repetición de temperaturas concretas o franjas térmicas (histograma térmico) o las distribuciones térmicas a través de zonas de interés (segmentos o superficies).

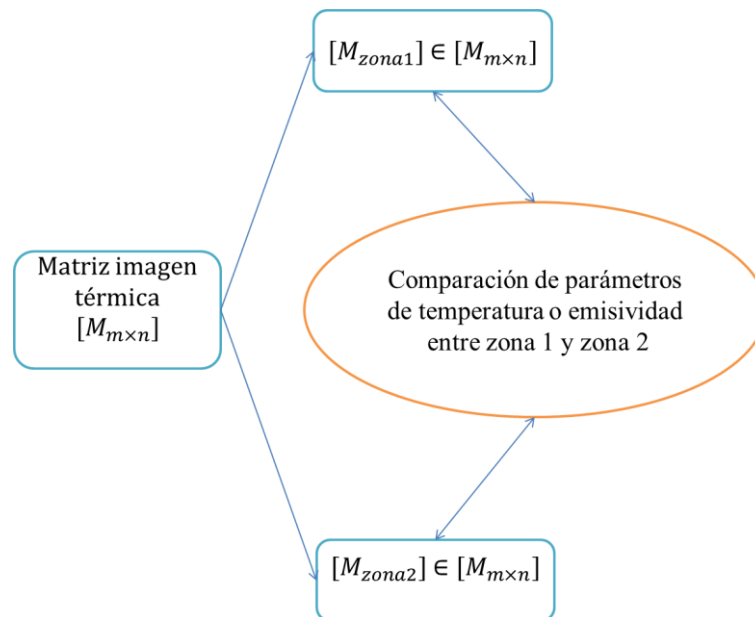


Fig. 1: Esquema del tratamiento de datos por comparaciones zonales de temperaturas.

Con una sola matriz es posible establecer ajustes estadísticos que relacionen la temperatura y el espacio si el objetivo que se pretende alcanzar así lo requiere, e incluso se puede escalar una imagen mediante técnicas fotogramétricas con el fin de relacionar las dimensiones reales del objeto analizado con el tamaño del pixel, con ello se contaría, además de con la temperatura con información de carácter métrico. Sin embargo, para algunos usos, la mayor potencialidad de la técnica no estriba en el análisis de una única matriz, ni de los parámetros que de ellas se pudieran extraer con un procesado posterior, sino en la obtención de multitud de matrices (una para cada instante de tiempo, Eq. 12) durante la monitorización del proceso; en este caso entraría el tiempo como nuevo parámetro pues tendríamos una matriz para cada unidad de tiempo.

$$M_{m \times n}[t] = \{M_{0m \times n}, M_{1m \times n}, M_{2m \times n}, \dots, M_{f m \times n}\} \text{ para cada } \{t_0, t_1, t_2, \dots, t_f\}$$

Eq. 12

Para cada pixel (elemento p_{ij} perteneciente a la matriz $M_{m \times n}$) se podrá extraer una secuencia discreta de temperaturas para cada instante de tiempo (Eq. 13) que permita ajustar los datos para calcular una función experimental y continua de calentamiento y/o enfriamiento para ese punto $p_{ij}(t)$ [8] y, de esta manera, se podrá generalizar la función de cada pixel en una matriz de funciones $P_{m \times n}(t)$ (Eq. 14).

$$p_{ij}[t] = \{p_{0ij}, p_{1ij}, p_{2ij}, \dots, p_{fij}\} \text{ para cada } \{t_0, t_1, t_2, \dots, t_f\}$$

Eq. 13

$$[P_{m \times n}(t)] = \begin{bmatrix} p_{00}(t) & \cdots & p_{0n}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m0}(t) & \cdots & p_{mn}(t) \end{bmatrix}$$

Eq. 14

De esta manera se podrá calcular la función de enfriamiento-calentamiento (Eq. 15) $q_{ij}(t)$ para cualquier punto p_{ij} perteneciente a la matriz $M_{m \times n}$.

$$q_{ij}(t) = \frac{\partial p_{ij}(t)}{\partial t}$$

Eq. 15

Pudiéndose generalizar en una nueva matriz de funciones, $Q_{m \times n}(t)$ (Eq. 16) que contenga para cada punto su función de enfriamiento-calentamiento.

$$[Q_{m \times n}(t)] = \begin{bmatrix} q_{00}(t) & \cdots & q_{0n}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{m0}(t) & \cdots & q_{mn}(t) \end{bmatrix}$$

Eq. 16

De este modo, las posibilidades para el tratamiento y el procesamiento de los datos ya no solo abarcan distribuciones térmicas en el espacio sino que es posible trabajar también con tendencias temporales de calentamiento y enfriamiento en cada pixel $Q_{ij}(t)$ a fin de analizar el comportamiento del material cuando es sometido a una excitación energética concreta mediante la utilización de fuentes de excitación externas.

3. TÉCNICAS DE ANÁLISIS CON CÁMARA TERMOGRÁFICA

La técnica termográfica se puede clasificar atendiendo a dos criterios: el tipo de información a obtener y el método de utilización de la técnica (Fig. 2).

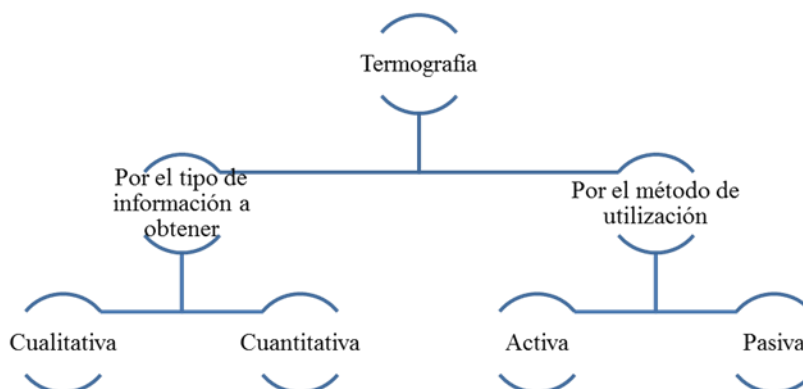


Fig. 2: Clasificación de las formas de trabajo con termografía.

La clasificación más importante es la que hace referencia al tipo de información que se pretende extraer de la aplicación de la técnica. Debido a ello se plantean dos formas de trabajo: termografía cuantitativa y termografía cualitativa.

La termografía cuantitativa se utiliza para estudiar fenómenos o anomalías mediante el estudio de las temperaturas absolutas de cada punto de la imagen. El objetivo del análisis con esta forma de trabajo es obtener de manera precisa la temperatura de cada píxel dentro del campo visual que abarque la lente (Eq. 10) conociendo la emisividad a priori. Su aplicación es muy diversa y, en la mayoría de los casos, se suele utilizar esta forma de trabajo para tomar medidas de parámetros de carácter térmico como pueden ser la velocidad de enfriamiento (Eq. 16) y la difusividad térmica [9]. Los datos presentados en forma matricial facilitan la aplicación posterior de algoritmos de procesado.

La termografía cualitativa tiene como objetivo analizar el campo térmico de la imagen para la detección de posibles anomalías o para la determinación de la posición de algún objeto. Solo se estudian temperaturas aparentes (la calculada a partir del total de la radiación que incide sobre el sensor, la cual, al no haber sido corregida, no se corresponde con los valores exactos de temperatura de cada punto) y se puede utilizar como única forma de trabajo al basarse en comparativas entre diferentes puntos y/o zonas de la imagen. Ejemplo de su aplicación es la ya muy extendida práctica de usar la cámara termográfica para la identificación de puentes térmicos en envolventes de edificación [10-11] o, también, para la detección de fallos en tuberías [12]. Al basarse en el estudio de las imágenes, es posible la automatización de los procesos de detección [13-14].

En la Fig. 3 se puede observar la aplicación de la termografía cualitativa para la detección de corrosión en tuberías. La detección se hace posible por la diferencia de emisividad térmica entre la zona corroída y la zona sin patología (Eq. 3).

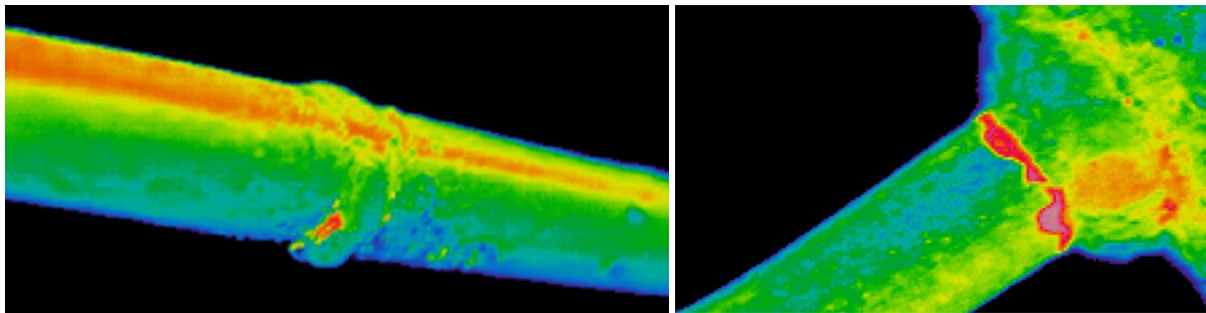


Fig. 3: Picaduras por corrosión en las soldaduras de tubería de agua caliente.

Otra clasificación posible pone el foco en la existencia o no de un mecanismo externo y artificial de excitación térmica del material. Si la inspección termográfica se realiza sin utilizar ningún medio de excitación externo (estudiando su propio patrón de emisión infrarroja en estado normal), se estará ante una forma de trabajo denominada termografía pasiva (cabe destacar que en algunos casos sí existe una fuente de excitación natural: el sol, pero su capacidad de excitación térmica salvo situaciones muy concretas no se puede considerar controlada pues varía en función de la franja horaria, de la zona e incluso, dentro de una misma zona en función del ambiente urbano o rural [15]. Un ejemplo de ello es el aprovechamiento del calentamiento solar para la evaluación de grietas en calzadas utilizando una aplicación híbrida de sensores termográficos y radar de penetración terrestre (GPR) [16]. Ejemplos de usos de la técnica de termografía pasiva hay bastantes, desde los ya indicados para el análisis de la envolvente térmica del edificio, [14], hasta los utilizados para diagnóstico de patologías en instalaciones eléctricas [17]. La termografía es activa cuando se aplica una excitación térmica al material de manera artificial con el objetivo de inducir una excitación de los electrones de los átomos del material y el consecuente incremento de la emisión en forma de radiación infrarroja. La clasificación, desarrollo y aplicaciones de la técnica de la termografía activa [18] serán expuestos y analizados en una próxima publicación.

4. CONCLUSIONES

El fenómeno de la transmisión infrarroja hace posible la captación de radiación emitida y reflejada por los diferentes cuerpos. Sin embargo, son numerosos los factores que intervienen en el proceso de captación. Su control se torna como imprescindible para el ingeniero que quiere disponer de la técnica con las debidas garantías.

La técnica termográfica posibilita el volcado de los datos discretos en forma matricial y la consideración del tiempo como dimensión (haciendo posible la obtención de valores discretos de enfriamiento-calentamiento), lo que hace posible la posterior aplicación de numerosos algoritmos de procesado en los que entra en juego la temperatura, el tiempo e incluso el tamaño del objeto en función del tamaño del pixel si se implementan técnicas fotogramétricas de procesamiento de imagen. Ello hace de la termografía una técnica de ensayo ideal para numerosos usos en industria e ingeniería. La transversalidad de la técnica y las diferentes modalidades de trabajo permiten una expansión horizontal de la termografía hacia numerosos campos y aplicaciones en el ámbito de la ingeniería pero también fuera de él, como es el caso de la extensión de la técnica a usos de seguridad y defensa o a su aplicación para el análisis, valoración y documentación del patrimonio histórico artístico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren dar su agradecimiento al Ministerio de Ciencia e Innovación, al Ministerio de Economía y Competitividad, y al CDTI, del Gobierno de España, por los recursos proporcionados a través de los proyectos ENE2013-48015-C3-1-R, IPT2012-1092-120000 y de los programas de Recursos Humanos FPD1-2013-17516. Además, todos ellos son cofinanciados por el Fondo Europeo para el Desarrollo Regional (FEDER).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Oswald-Tranta B, Maier A, Schledjewski R. “Defect depth determination in a CFRP structure using TSR technique”. *The 12 International Conference on Quantitative Infrared thermography*. (Burdeos, 7-11 de Julio de 2014)
- [2] Ishchuk N, Karpov G, Fesenko A. “The detection of hidden subsurface objects in the infrared wavelength band by identifying their thermal properties”. *Measurement Techniques*. 2009. Vol. 52-4 p. 388-393. DOI: 10.1007/s11018-009-9282-7
- [3] William H. *Heat Transmission*. New York: McGraw-Hill. 1954. p. 57-133
- [4] Vollmer M, Mollmann KP. *Infrared thermal imaging*. Weinheim: Wiley-VCH 2010. p.1-71. ISBN: 978-3-527-40717-0
- [5] Dunke R. “Thermal radiation: tables and applications” *Trans ASME* 1954 Vol. 76 p.549-560.
- [6] Sargent SL. “A compact table of blackbody radiation functions”. *Bull. Am. Meteorol.* Abril 1972. 53,360.
- [7] Krenzinger A, Vera LH. “Software de Pos-Procesamiento de Imágenes Termográficas”. *Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering* (Brasil, 5-8 de Diciembre de 2006)

- [8] Rodríguez-Martín M, Lagüela S, Gonzalez-Aguilera D et al. “Cooling analysis of welded materials for crack detection using infrared thermography”. *Infrared Physic and Technology*. 2014. 67 p.547–554 doi:10.1016/j.infrared.2014.09.025
- [9] Davis SE, Wright NT. “Optimal positioning of temperature measurements to estimate thermal diffusivity”. *International Journal of Thermophysics*. 2013 Vol. 34-6 p.1021-1038 DOI: 10.1007/s10765-013-1458-3
- [10] González-Aguilera D, Lagüela S, Rodríguez-González P, et al. “Image-based thermographic modeling for assessing energy efficiency of buildings facades”. *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 65. p. 29–36 DOI:10.1016/j.enbuild.2013.05.040
- [11] Roca D, Lagüela S, Díaz-Vilariño L, et al. “Low-cost aerial unit for outdoor inspection of building façades”. *Automation in Construction*. 2013 Vol. 36. p. 128–135. DOI:10.1016/j.autcon.2013.08.020
- [12] Dudic S, Ignjatovic I, Šešlij D, et al. “Leakage quantification of compressed air using ultrasound and infrared thermography”. *Measurement*. 2012 Vol. 45. p. 1689–1694 DOI:10.1016/j.measurement.2012.04.019
- [13] Zheng L, Genest M, Kryszewski D. “Processing thermography images for pitting corrosion quantification on small diameter ductile iron pipe”. *NDT&E International*. 2012 Vol.47 p. 105–115 DOI:10.1016/j.ndteint.2012.01.003
- [14] Cereijo J, Lagüela S, Roca D, Martínez J. Lorenzo H, Automatic detection of thermal bridges in thermographic building inspections, 40th IAHS World Congress on Housing, December 2014, Funchal – Portugal
- [15] Tumini I, Higeras E. “Alcance y limitaciones de las herramientas de simulación para el estudio del microclima urbano”. *DYNA Energía y Sostenibilidad*. 2013, Vol.2(1). <http://dx.doi.org/10.6036/ES6921>
- [16] Solla M, Lagüela S, González-Jorge H, et al. “Approach to identify crackin g in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings”. *NDT&E International*. 2014 Vol. 62 p.55–65
- [17] Jadin MS, Taib S. “Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography”. *Infrared Physics & Technology* 2012. Vol. 55. p. 236–245 doi:10.1016/j.infrared.2012.03.002
- [18] Vavilov, V. Thermal NDT: historical milestones, state-of-the-art and trends. *Quantitative Infrared Thermography*. 2014 Vol. 11 p.66-83. <http://dx.doi.org/10.1080/17686733.2014.897016>

Capítulo 2: Termografía activa: desarrollo y aplicaciones.

El presente capítulo contiene el artículo *Termografía activa: desarrollo y aplicaciones en ingeniería y en industria*, aceptado para publicación en la revista internacional de impacto (JCR) *DYNA Ingeniería e Industria*.

En termografía activa se utiliza una fuente de excitación externa con el objeto de provocar un flujo de calor interno en el objeto monitorizado. Cualquier defecto superficial, subsuperficial o interno afectaría a la dirección e intensidad del flujo calorífico produciendo en la superficie un contraste térmico detectable. No existe un criterio de clasificación único para las técnicas termográficas y por esta razón en el artículo contenido en este capítulo se exponen dos criterios de clasificación: la tipología de la fuente de estimulación externa y la distribución relativa de las fuentes de excitación con respecto al objeto a estudiar. A efecto de clasificación y modalidades para la termografía activa en fase pulsada destaca el trabajo hecho por Vavilov (2015) [17], el cual fue publicado con posterioridad a la publicación del artículo asociado a este capítulo.

La técnica de la termografía activa en sus diferentes modalidades y aplicaciones ha experimentado un gran desarrollo en los últimos tiempos, extendiéndose su aplicación dentro del ámbito de los ensayos no destructivos (END) de forma transversal hacia numerosos campos de la ingeniería, la industria y la conservación y documentación del patrimonio histórico-artístico. En muchos de estos ámbitos el desarrollo de la técnica está motivado por la necesidad de sustituir algunos métodos de ensayos no destructivos que por su complejidad o peligrosidad ven mermada su aplicabilidad en ciertos casos; es tal el caso de la inspección por rayos X, cuya eficacia queda lejos de toda duda pero, sin embargo, su uso presenta una serie de inconvenientes derivados de la peligrosidad de las radiaciones, de la aparatosidad y mala portabilidad de los equipos y de la necesidad de disponer de un transformador de alta tensión para suministrar al tubo la corriente eléctrica necesaria para la generación de los rayos X.

Aunque la técnica termográfica está teniendo un gran desarrollo, a día de hoy sus usos son adecuados para materiales concretos y válidos en determinados contextos de inspección. Es por ello que, con arreglo al estudio del estado de la técnica introducido en el artículo, no sería científicamente ortodoxo pronosticar en el corto plazo una total sustitución stricto sensu de los métodos tradicionales de END por nuevos métodos basados en termografía activa, sino que la evolución más inmediata se estima que atienda más a términos de complementariedad y sinergia entre las nuevas técnicas de ensayo y las ya asentadas.

TERMOGRAFÍA ACTIVA PARTE 2: DESARROLLO Y APLICACIONES EN INGENIERÍA E INDUSTRIA

Manuel Rodríguez Martín*₁ -- Ingeniero Industrial (MEng). Investigador Grupo TIDOP
Susana Lagüela López_{1,2} -- Doctora por la Universidad de Vigo (PhD). Ingeniera de Minas. Investigadora Grupo TIDOP
Diego González Aguilera₁ -- Doctor por la Universidad de Salamanca (PhD). Ingeniero en Geodesia y Cartografía. Director del
Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno de la Universidad de Salamanca.
Lucía Díaz Vilariño₂ -- Ingeniera Agrónoma (MEng). Investigadora Grupo TF1

₁ Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno. Universidad de Salamanca. Escuela Politécnica Superior de Ávila. Calle Hornos Caleros, 50, 05003, Ávila

₂ Grupo de Investigación en Geotecnologías Aplicadas. Universidad de Vigo. Rúa Maxwell s/n, Campus Lagoas-Marcosende, 36310 Vigo

*Tf. 669999251, mail: ingmanuel@usal.es, Calle Hornos Caleros, 50, 05003, Ávila

Recibido: -- Aceptado: - DOI: 10.(A cumplimentar por el Editor)

ACTIVE THERMOGRAPHY: THEORETICAL APPROACH, DEVELOPMENT AND APPLICATIONS FOR ENGINEERING AND INDUSTRY

ABSTRACT:

The application of infrared thermography is usually limited to qualitative thermography, ignoring the wide variety of possibilities provided by the technique when used for monitoring the behavior of the material after the application of a controlled excitation. This technique has been significantly developed in the recent years, emerging as a complete, versatile and innovative solution for non-destructive testing (NDT) in order to obtain a lot of information of materials for their evaluation in a fast way and without high economic investment. This paper aims at giving a global and structured view of the technique following a threefold approach: first, analysing the theoretical research of those steps related with data acquisition and data processing; second, providing different classifications of the technique based on the previous theoretical research; and finally defining its different applications in engineering and industry.

Keywords: Active thermography, NDT, thermal image, heating source, image processing.

RESUMEN:

La enorme aplicabilidad de la técnica termográfica se tiende a particularizar en la llamada termografía cualitativa sin prestar atención a las amplias posibilidades que la termografía aporta cuando se utiliza en combinación con una excitación controlada del material; lo que se conoce como termografía activa. Esta técnica ha tenido un desarrollo importante durante los últimos años, sin embargo ha sido en estos tiempos cuando se ha consolidado como una innovadora, completa y versátil modalidad de ensayo no destructivo (END) que posibilita una rápida obtención de información útil para la evaluación de materiales sin llegar a requerir altas inversiones económicas. En este artículo se pretende plasmar una visión global y aplicada de la técnica siguiendo un triple acercamiento: primero, repasando la investigación teórica de los procesos de captación, extracción y procesamiento de datos; segundo, aportando como resultado del trabajo diferentes clasificaciones de la técnica en base a lo establecido en la investigación teórica; y finalmente, definiendo las distintas aplicaciones dentro de la ingeniería e industria.

Palabras clave:

Termografía activa, ensayo no destructivo (END), imagen térmica, fuente de excitación, procesamiento de imagen.

1.- INTRODUCCIÓN

En los últimos años se está extendiendo la práctica de la termografía activa, técnica consistente en la excitación térmica del objeto de estudio para la medición y análisis de la respuesta térmica del material ante tal estímulo. El estudio de los patrones térmicos cuando se somete un material a una excitación controlada posibilita la detección de anomalías no solo en el plano superficial, sino también en su interior debido a que la existencia de una posible discontinuidad interna en el material modificaría el flujo de calor inducido artificialmente produciendo variaciones térmicas detectables en la superficie mediante una cámara infrarroja (IR). Es por ello que esta metodología de trabajo se aplica principalmente a la detección de diversas patologías y defectos, tanto superficiales como subsuperficiales o internos en materiales así como la caracterización geométrica de los mismos, posibilitando la tomas de medidas más allá de las propias del plano superficial, como es, por ejemplo, la predicción de profundidad. También se utiliza para la extracción de características físicas de los materiales y la evaluación del patrimonio histórico-artístico.

Cabe destacar que la técnica no es nueva; sin embargo, a día de hoy está tomando un rol más ambicioso debido a las nuevas necesidades de inspección y valoración de materiales, principalmente dentro de los sectores industrial, aeronáutico y naval, que animan a buscar técnicas de ensayo no destructivo más seguras, eficientes y rápidas que complementen las ya existentes y que permitan cubrir sus limitaciones funcionales. Es por ello que prestigiosas entidades, conscientes de su potencialidad, están realizando investigaciones para desarrollar, mejorar y/o extender la técnica hacia otros usos pero fundamentalmente dentro del ámbito de los ensayos no destructivos.

La secuencia que se va a seguir en este artículo comenzará con la introducción de la técnica de la termografía activa para ir diseccionando sus diferentes modalidades y su desarrollo, así como las investigaciones de mayor relevancia en la materia. Finalmente se expondrán el estado de la técnica y su aplicación al campo de la ingeniería industrial, la ingeniería civil, la industria aeronáutica, la ingeniería naval y la conservación y documentación del patrimonio histórico-artístico.

2. ENSAYOS CON TERMOGRAFÍA ACTIVA

Los ensayos basados en termografía activa admiten distintos esquemas de montaje en función de la situación de la fuente de calor y de la cámara termográfica con respecto del espécimen a ensayar. De esta manera, la/s fuente/s se pueden situar por detrás del espécimen (cámara situada a un lado del espécimen y fuente de excitación al lado opuesto) o en posición frontal con cierta inclinación (cámara y fuente de excitación situadas al mismo lado del espécimen); configuraciones conocidas como trabajo en transmisión o trabajo en reflexión, respectivamente (Fig. 1). La idoneidad del sistema de montaje será dada por la experiencia previa con el material concreto y con el método de ensayo elegido.

Cuando las fuentes de calentamiento se sitúan frontalmente (Fig. 1), el material será excitado por la superficie monitorizada con la cámara IR. De esta manera, los datos térmicos captados serán fruto de un proceso de transferencia compleja de calor dentro del cual predominará el efecto de la transferencia de calor por radiación; sin embargo, si el calentamiento es trasero (Fig. 1), la transferencia por conducción cobrará una mayor importancia al tenerse que transmitir el calor a través del espesor del material para lograr la excitación de los átomos de la superficie monitorizada por la cámara IR.

En la mayoría de ensayos con termografía activa, la necesidad de sincronizar la secuencia o señal de excitación con el instante de la captura de imágenes hace necesario el uso de un ordenador de control que sincronice la excitación y la captación de la cámara termográfica (Fig. 1).

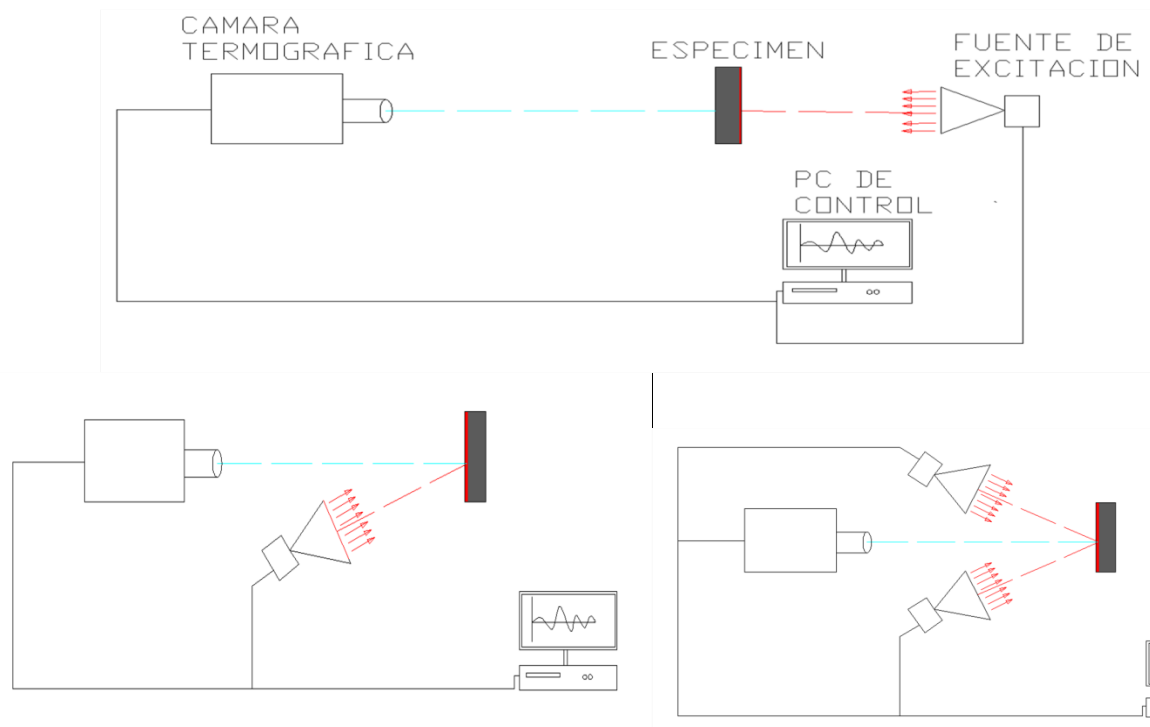


Fig. 1. Diferentes esquemas de montaje para un ensayo con termografía activa. Arriba: Termografía en transmisión. Abajo: termografía en reflexión doble (derecha), termografía en reflexión simple (izquierda).

Además de la colocación de la fuente de calor y la cámara termográfica con respecto del objeto monitorizado, también existen diferentes modalidades de la técnica en función de del mecanismo utilizado para aplicar la energía externa al material. A continuación se procede a aportar una posible clasificación actual de las diferentes técnicas de termografía activa (Tabla 1).

Tabla 1: Clasificación de técnicas de termografía activa en función del mecanismo externo de excitación del material.

Tipo de técnica termográfica	Tipo de fuente excitación	Descripción	Trabajos de referencia
Termografía óptica en fase pulsada (PPT)	Lumínica	Energía aportada en forma de pulsos cortos (del orden de <i>ms</i>). Se aplica en el material con diferentes frecuencias y proporciona con una sola inspección una completa descripción de las características térmicas de la estructura.	Maldague et al. (2002) [1]
Termografía estimulada por escalón de calor	Lumínica	Se utiliza un pulso de calor más largo que en el caso anterior. El calentamiento de la superficie será muy similar para ambos métodos, pero el momento en que comienza el enfriamiento y la distribución de temperaturas en el interior del material será diferente. En el caso anterior, cuando cesa el pulso, el resto de la superficie de la muestra se mantiene a una temperatura uniforme, mientras que en el caso presente ya existe un gradiente de	Hidalgo-Gato et al. (2015) [2]

		temperaturas cuando termina el pulso.	
Termografía Lock-in de excitación óptica (OLT)	Lumínica	Iluminación modulada en una sola frecuencia. Cada frecuencia se asocia a una longitud de onda y por ello es preciso conocer de antemano la profundidad del defecto, con vistas a escoger la longitud de onda más adecuada. Se realiza un promedio sincronizado que conduce a una señal con menor ruido y mayor sensibilidad que la metodología anterior.	G. Busse et al. (2013) [3]
Termografía asistida por ultrasonidos	Sonora	Se utiliza una excitación mecánica generalmente producida por una bocina acústica resonante a una frecuencia de 20 o 40 kHz. Las vibraciones producidas inducen un movimiento relativo en toda la estructura haciendo visibles defectos tales como grietas y exfoliaciones.	Mendioroz et al. (2014)[4] Choi et al (2011) [5]
Vibrotermografía	Mecánica	Esta técnica consiste en someter el objeto a una vibración de amplitud elevada, lo que lleva a una generación de calor alrededor de los defectos que resulta fácilmente evaluable por una cámara termográfica.	Castelo et al. (2014) [6]
Termografía asistida por microondas	Ondas (microondas)	Se utiliza un magnetrón para generar microondas que excitan térmicamente el espécimen. La reflexión de las ondas entre la fuente y el espécimen hace necesario la existencia de un algoritmo de procesamiento basado en el contraste para interpretar los resultados. Los autores concluyen que este método es ideal para ensayos no destructivos de aceros verticales en espacios exteriores. No obstante, la implementación de magnetrones industriales requiere una serie de medidas de seguridad [24], lo cual puede mermar la versatilidad de la técnica y limitar los casos y lugares de aplicación.	Palumbo et al. (2014) [7]
Termografía asistida por estimulación magnética	Magnética	Se utilizan pulsos cortos (de 0.5 a 2 s) de inducción magnética sobre materiales metálicos para excitar los electrones de los átomos del material. Se trata de una técnica eficiente porque el calor se genera directamente en el material. Ello implica que la baja emisividad y el bajo coeficiente superficial de absorción no afecten al proceso de calentamiento	Oswald-Tranta et al (2011) [8]

Cabe destacar que las ecuaciones matemáticas que definen el comportamiento térmico del espécimen y su reacción ante la aplicación de las diferentes fuentes excitación varían en función del tipo de técnica aplicada y del esquema de montaje utilizado; sin embargo, dichas ecuaciones se extraen de la aplicación de los fundamentos de la teoría de la transferencia de calor y pueden ser definidas para cada tipo de ensayo concreto [9].

3. APLICACIONES ACTUALES DE LA TERMOGRAFÍA ACTIVA

La termografía activa está principalmente enfocada a la aplicación como método de ensayo, valoración y medición; por ello, su implementación es de utilidad para un amplio abanico de disciplinas dentro de la ingeniería y la industria; siendo necesario realizar una clasificación de las mismas en función del campo de aplicación.

3.1. INGENIERIA INDUSTRIAL: ENSAYOS DE MATERIALES METÁLICOS, DE UNIONES SOLDADAS E INTEGRACIÓN EN PROCESOS DE FABRICACIÓN

En el campo de ensayo de materiales metálicos, la técnica termográfica activa se ha aplicado principalmente en ensayos de fatiga. Galietti et al. (2010) [10] proponen un método en el que, mediante la adquisición de imágenes termográficas, se analiza la evolución del cambio de fase del material durante la aplicación de las cargas. Recientemente, también se ha investigado la utilización de vibrotermografía (Tabla 1) con un algoritmo de inversión con el fin de caracterizar grietas verticales en metales [8].

Las uniones soldadas precisan de unos altos requerimientos fundamentados en las exigencias de seguridad, es por ello que los ensayos no destructivos han multiplicado su protagonismo en los últimos tiempos y actualmente se siguen desarrollando activamente. El primer ensayo de soldadura basado en el uso de la termografía se remonta a finales de la década de los noventa. Fue desarrollado y patentado por Adams y Crisman en 1989, quienes propusieron un método y un dispositivo para la evaluación termográfica de soldadura por puntos. En Meola et al. (2004) [11] se comparó esta técnica con los ensayos no destructivos tradicionales. Llegaron a la conclusión de que la termografía Lock-in (Tabla 1) es una técnica sin contacto que permite el análisis fácil, rápido e in situ; pudiéndose detectar defectos de soldadura, reconocer materiales de diferentes características y obtener información sobre el material y las modificaciones inducidas por soldadura; además, la técnica puede ser aplicada de manera selectiva con respecto de las zonas sometidas al ensayo destructivo. Concretamente, las soldaduras en tuberías constituyen un campo atractivo para la aplicación de la técnica, dada la dificultad de acceso a la superficie interior de las mismas. A tal efecto, Choi et al. (2011) [5] llevaron a cabo una investigación cuyo objetivo era la detección de defectos internos en soldaduras de tuberías usando la técnica de termografía activa asistida por ultrasonidos (Tabla 1). Actualmente se están investigando modalidades simplificadas de termografía activa que posibiliten la detección y caracterización in-situ de fisuras en uniones soldadas con excitación en forma de escalón de calor (Tabla 1) sin necesidad de implementar procedimientos de excitación más complejos [12].

En los últimos tiempos gran parte de las investigaciones de campo en termografía se han centrado en la integración y automatización de esta para los procedimientos de detección de defectos y el control de procesos industriales. Sobre este particular destaca la investigación que llevaron a cabo en 2001 Sascha et al. [13], en la cual se integran dos cámaras coaxialmente establecidas dentro de la trayectoria óptica de un láser de procesamiento. La primera cámara funciona con una iluminación externa mediante un láser de diodo mientras que la segunda cámara funciona en el espectro infrarrojo cercano. Se demuestra que dicho sistema de control es una eficiente solución para el análisis termográfico del proceso de soldadura de aluminio en tiempo real.

3.2. INGENIERÍA CIVIL Y EDIFICACIÓN: DETECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PATOLOGÍAS EN ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS. CÁLCULO DE PARÁMETROS TERMOFÍSICOS

El uso de termografía activa para el análisis de diferentes patologías en elementos constructivos y estructurales ha sido objeto de numerosos estudios durante la última década. De esta manera, Carosena et al. (2007) [14] desarrollan una experimentación con especímenes con capas de yeso sobre soporte de mármol y ladrillo que contienen pequeñas burbujas para simular un elemento constructivo de mampostería. En este trabajo, se aplican diferentes técnicas NDT, entre ellas la termografía, la cual se utiliza para analizar el estado de los azulejos que cubren las paredes del supuesto

edificio. En dicho experimento se constató que la visibilidad de los defectos es mejor durante el enfriamiento que durante el calentamiento de los elementos.

Otro estudio de relevancia es el llevado a cabo por Maierhofer et al. (2005) [15] quienes aplicaron la técnica de termografía óptica en fase pulsada (Tabla 1) para detectar cavidades internas en estructuras de hormigón situadas a profundidades de hasta 10 cm. Por otra parte, Montanini et al (2010) [16] utiliza la termografía Lock-in (Tabla 1) para evaluar cuantitativamente los defectos en una placa de Plexiglas® (metacrilato). El principal pilar de su experimentación reside en el post-procesado de las imágenes obtenidas mediante la valoración del contraste en el dominio de la frecuencia, lo cual permite estudiar la profundidad del defecto con un nivel relativamente bajo de incertidumbre (entre el 5% y el 17%). Los resultados obtenidos demuestran el potencial que atesora la técnica de termografía activa para la medición de defectos en ese tipo de materiales, de uso creciente en fachadas.

Finalmente, la técnica de termografía Lock-in (Tabla 1) también es utilizada en el ámbito de la ingeniería de materiales para obtener diferentes parámetros termo-físicos en materiales, como son la conductividad o la difusividad térmica de una manera rápida y sencilla [17], posibilitando el estudio de la transmisión de calor a través de ellos.

3.3. INGENIERÍA AEROESPACIAL Y NAVAL: DETECCIÓN DE ESTRUCTURAS INTERNAS EN MATERIALES COMPUESTOS

Los polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) son materiales compuestos que cuentan con una excelente relación entre peso, durabilidad, resistencia a la corrosión extrema y resistencia a la radiación exterior. Estos materiales también son empleados en la industria naval, donde su uso ha sido investigado y aplicado para diferentes estructuras navales. La prueba de su extensión en este ámbito es el pronunciamiento de numerosas e importantes instituciones públicas y privadas de la Unión Europea para que sea estudiado por la autoridad internacional competente: la Organización Marítima Internacional acepta el uso de CFRP para buques mercantes (expresamente prohibido hasta el momento por la regulación 17 del Convenio Solas, que solo permite el uso de acero o similares).

Recientemente [18] se ha utilizado la termografía óptica en fase pulsada (Tabla 1) seguida de un procesamiento llamado TSR (Thermographic Signal Reconstruction), en el cuál se trabaja con las respuestas a los pulsos de luz en el dominio del tiempo para obtener un mapeo tridimensional del material CFRP que permita detectar defectos de delaminación y, con algunas limitaciones, medir su profundidad. Destaca por su novedad la investigación de Palumbo et al. (2015) donde se aplica la novedosa técnica de la termografía asistida por microondas (Tabla 1), con ello consiguen detectar diferentes impactos sobre CFRP.

Los polímeros reforzados con fibra de vidrio (PRF) son materiales compuestos también muy usados en la industria aeronáutica y naval, tienen muchas de las ventajas de los CFRP como su ligereza y un menor coste; sin embargo con frecuencia presentan problemas por delaminación a causa de impactos de objetos o por deterioro en los procesos de fabricación o transporte. La presencia de tales defectos hace atractiva la aplicación de la técnica y es por ello que estos polímeros han sido objeto de investigaciones con termografía Lock-in (Tabla 1), consiguiéndose una detección de diferentes patologías tales como impactos, delaminaciones, microfisuras o roturas de fibras [19].

3.4. APLICACIONES PARA LA VALORACIÓN DEL PATRIMONIO HISTÓRICO ARTÍSTICO

Fuera de los ensayos pertenecientes al ámbito de la ingeniería, la termografía activa también es usada para la documentación y valoración del patrimonio histórico-artístico, concretamente para la evaluación de defectos o patologías en obras pictóricas y también para la identificación de las diferentes capas y/o elementos que las componen, lo que presenta amplia utilidad desde el punto de vista arqueológico. También se ha utilizado la técnica con excitación por escalón de calor (Tabla 1) mediante lámparas halógenas con calentamientos iguales o superiores a 120 segundos para detectar heterogeneidades y para implementar un barrido térmico en distintos elementos del patrimonio histórico artístico como son una estatua de Marco Aurelio y distintas colecciones de joyas [20].

4.- CONCLUSIONES

Dentro de los ensayos de materiales, la versatilidad de la técnica hace que sea ideal su aplicación como ensayo no destructivo en muchas disciplinas del ámbito de la ingeniería, la industria y la conservación del patrimonio histórico-artístico. Dentro de la ingeniería industrial, la amplia defectología que atañe a los materiales metálicos hace de estos un blanco ideal para los ensayos con termografía activa si se consiguen superar los inconvenientes propios de la aplicación de la técnica a dichos materiales, especialmente debidos a su baja emisividad. Tampoco se debe desmerecer su uso para materiales compuestos (CFRP y PRF), muy utilizados en la industria aeronáutica y naval, cuya estructura interior y las diferentes propiedades físicas de los materiales que los componen hacen de ellos un objeto ideal para la implementación de ensayos termográficos.

Sin embargo la técnica a día de hoy presenta limitaciones en multitud de modalidades y no ha alcanzado el mismo grado de versatilidad que otras técnicas de ensayo no destructivo como, por ejemplo, la inspección por ultrasonidos o la inspección radiográfica, posiblemente por tratarse de una técnica de más reciente implantación; es por ello que se sigue avanzando en el perfeccionamiento de la técnica. La consolidación científica de los fenómenos de radiación infrarroja y transmisión del calor unido al grado de sofisticación de los actuales sensores de las cámaras termográficas hace que los investigadores de campo estén planteando sus trabajos enfocados hacia una expansión horizontal de la técnica principalmente desde dos vertientes: por un lado se está investigando en nuevos mecanismos de excitación que permitan la distribución eficiente del calor deseada para el método concreto y para el objetivo del ensayo; mientras que por otro lado se trabaja en el desarrollo de nuevos algoritmos de procesado de datos térmicos en distintos dominios que permitan la consecución de los objetivos deseados. Con todo ello los investigadores pretenden construir protocolos de ensayo con termografía activa que, sin llegar a precisar de altas inversiones y/o requerimientos económicos y funcionales, permitan una rápida y concisa caracterización y valoración de materiales, elementos constructivos y objetos de interés histórico-artístico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren dar su agradecimiento al Ministerio de Ciencia e Innovación, al Ministerio de Economía y Competitividad, y al CDTI, del Gobierno de España, por los recursos proporcionados a través de los proyectos ENE2013-48015-C3-1-R, IPT2012-1092-120000 y de los programas de Recursos Humanos FPD1-2013-17516. Además, todos ellos son cofinanciados por el Fondo Europeo para el Desarrollo Regional (FEDER).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Maldague X, Galmiche F, Ziadi A. "Advances in pulsed phase thermography". *Infrared Physics & Technology*. 2002 Vol. 43 p.175–181 DOI:10.1016/S1350-4495(02)00138-X.
- [2] Hidalgo-Gato R, González de Ulloa L, Andrés JR et al. "A thermographic step-heating technique for metallic pollutant detection in soils". *Infrared Physics & Technology* 2015 Vol. 69 p. 191–197 DOI :10.1016/j.infrared.2015.01.027.
- [3] Busse G, Gleiter A, Spiessberger C. "NDE Using Lockin-Thermography: Principle and Recent Developments". *Nondestructive Testing of Materials and Structures* 2013 Vol. 6 p. 627-632. DOI 10.1007/978-94-007-0723-8_89.
- [4] Mendioroz A, Castelo A, Celorrio R et al. "Characterization and spatial resolution of cracks using lock-in vibrothermography". *NDT&E International* 2014 Vol.66 p.8–15 DOI 10.1016/j.ndteint.2014.04.004.
- [5] Choi M, Park H, Park J. et al. "Internal Defect Detection of Dissimilar Weld Pipe Using Ultrasonic Infrared Thermography". 5th Pan American Conference for NDT. Cancun: 2011.

- [6] Castelo A, Mendioroz A, Celorrio R, et al. "Vertical cracks characterization and resolution from lock-in vibrothermography". The 12 International Conference on Quantitative Infrared thermography. (Burdeos, 7-11 de Julio de 2014).
- [7] Palumbo D, Ancona F, Galietti U. "Quantitative damage evaluation of composite materials with microwave thermographic technique: feasibility and new data analysis". *Meccanica* 2015 Vol. 50(2) p.443-459 DOI 10.1007/s11012-014-9981-2.
- [8] Oswald-Tranta B, Maier A., Schledjewski R. "Defect depth determination in a CFRP structure using TSR technique". The 12 International Conference on Quantitative Infrared thermography. (Burdeos, 7-11 de Julio de 2014).
- [9] Vavilov V "Thermal NDT: historical milestones, state-of-the-art and trends". *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 2014 Vol. 11(1), p. 66-83, DOI: 10.1080/17686733.2014.897016.
- [10] Galietti, U, Palumbo D. "Application of thermal methods for characterization of steel welded joints": X International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. (Québec 27-30 de Julio de 2010).
- [11] Meola C, Squillace A, Memola F, et al. "Analysis of stainless steel welded joints: a comparison between destructive and non-destructive techniques". *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. (155). p.1893–1899. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.303.
- [12] Rodríguez-Martín M, Lagüela S, Gonzalez-Aguilera D and Arias, P. "Cooling analysis of welded materials for crack detection using infrared thermography". *Infrared Physics and Technology* 2014 Vol. (67) p.547–554. DOI 10.1016/j.infrared.2014.09.025.
- [13] Sascha F, Michael U, Rolser R. "Coaxial control of Aluminum and Steel Laser Brazing Processes". *Physics Procedia* 2011 Vol. (12) p. 752–760 DOI:10.1016/j.phpro.2011.03.094.
- [14] Meola C. "A new approach for estimation of defects detection with infrared thermography". *Materials Letters*. 2007 Vol. (61) p. 747–750. DOI:10.1016/j.matlet.2006.04.120.
- [15] Maierhofer CH, Brink A, Rollig M, et al. (2005). "Quantitative numerical analysis of transient IR-experiments on buildings". *Infrared Physics and Technology*. 2004 Vol (46), p. 173–180. DOI:10.1016/j.infrared.2004.03.022.
- [16] Montanini R, Freni F. "Non-destructive evaluation of thick glass fiber-reinforced composites by means of optically excited lock-in thermography". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2012 Vol (43). p. 2075–2082. doi:10.1016/j.compositesa.2012.06.004.
- [17] Boué C, Holé S. "Infrared thermography protocol for simple measurements of thermal diffusivity and conductivity". *Infrared Physics & Technology*. 2012 Vol.(55) p. 376–379. DOI:10.1016/j.infrared.2012.02.002.
- [18] Oswald-Tranta, B, Sorger, M. "Localizing surface cracks with inductive thermographical inspection: From measurement to image processing". *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 2011 Vol.(8) p.149-164 DOI:10.3166/qirt.8.149-164.
- [19] Meola C, Giovanni M. "Infrared thermography to evaluate impact damage in glass/epoxy with manufacturing defects". *International Journal of Impact Engineering*. 2014. Vol. 67 p. 1-11. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2013.12.010.
- [20] Bodnar JL, Candore JC, Nicolas JL, et al "Stimulated infrared thermography applied to help restoring mural paintings". *NDT&E International*. 2012 Vol. 49 p. 40–46 DOI:10.1016/j.ndteint.2012.03.007.

Sección II. Aplicación de la termografía activa a la detección de fisuras en soldadura

Capítulo 3: Análisis de enfriamiento de soldaduras para la detección de fisuras mediante el uso de termografía infrarroja.

El presente capítulo contiene el artículo *Cooling Analysis of Welded Materials for Crack Detection Using Infrared Thermography*, publicado en la revista internacional de impacto (JCR) *Infrared Physics and Technology* en octubre de 2014.

Si un material es calentado hasta un determinado instante sin llegar a alterar su estado físico y después se deja enfriar bajo las condiciones atmosféricas, dicho enfriamiento previsiblemente seguirá el comportamiento marcado por la Ley de Enfriamiento de Newton [18], la cual vaticina un enfriamiento exponencial que depende de un parámetro k . Tal parámetro se conforma en base a diferentes propiedades como el coeficiente de transferencia de calor, la superficie expuesta al enfriamiento y la masa del material. Parámetros que no solo difieren de unos materiales a otros, sino que dentro de un mismo tipo de material pueden variar si el material es sometido a acciones mecánicas y/o térmicas que afecten a su superficie, como las que suelen darse durante el proceso de soldeo. Si durante el procesado térmico que constituye el soldeo o durante el enfriamiento posterior se generan tensiones internas en el material, este puede fisurar por uno o varios puntos y dichas fisuras pueden generarse en la superficie o aflorar a ella. Las propiedades térmicas intervinientes en el proceso de enfriamiento anteriormente descrito deben ser distintas para un diferencial de material que se encuentre en una zona fisurada con respecto a otro diferencial de material que se encuentre en una zona no fisurada.

A tal efecto se diseña un procedimiento de inspección basado en termografía activa en modo cuantitativo acorde con la clasificación indicada en el capítulo 1 que consiste en ensayar dos soldaduras que contienen un defecto de fisuración, que además, es de diferente tipo: la primera cuenta con un crack denominado por la normativa internacional [4] como *toe crack* y la segunda cuenta con otro crack del tipo denominado *crack longitudinal*. El procedimiento de inspección está basado en el estudio de la velocidad de enfriamiento durante un determinado intervalo temporal.

Los resultados muestran que, utilizando un calentamiento frontal (configuración en reflexión con arreglo a la clasificación establecida en el capítulo 2), las temperaturas para cada punto son más sensibles a los defectos y a las geometrías irregulares de la superficie de la soldadura, existiendo un alto contraste entre la zona del defecto y la zona adyacente; mientras que cuando se utiliza un calentamiento trasero (configuración en transmisión) los reflejos no afectan a la superficie monitorizada y las temperaturas

captadas muestran una mayor uniformidad. Por otro lado, se demuestra la validez del procesado por líneas de contorno para diferenciar distintas tipologías de crack, ya que los contrastes en las velocidades de enfriamiento entre zonas fisuradas y no fisuradas permiten una identificación clara de las fisuras con respecto a la zona adyacente.

En cuanto a la diferenciación por contraste de las velocidades de enfriamiento de un tipo de crack a otro, los resultados muestran que para el *toe crack* existe mayor contraste con la zona adyacente cuando se aplica la configuración de estimulación en transmisión; mientras que para el crack longitudinal ocurre al contrario: existe mayor contraste con la zona adyacente cuando se aplica la configuración en reflexión.



Cooling analysis of welded materials for crack detection using infrared thermography



M. Rodríguez-Martin ^{a,*}, S. Lagüela ^b, D. González-Aguilera ^a, P. Arias ^b

^a Department of Cartographic and Terrain Engineering, University of Salamanca, Polytechnic School of Avila, Hornos Caleros, 50, 05003 Avila, Spain

^b Applied Geotechnologies Research Group, University of Vigo, Rúa Maxwell s/n, Campus Lagoas-Marcosende, 36310 Vigo, Spain

HIGHLIGHTS

- We propose a methodology to detect cracks in welds based on active infrared thermography.
- The method integrates thermal image analysis and study of the cooling data.
- Morphological characterization of defects is performed by contour lines processing.
- The method detects and characterizes cracks according to the quality standards.
- Two types of warming are used for the comparison of results.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 August 2014

Available online 13 October 2014

Keywords:

Thermography

Non-destructive techniques (NDT)

Welding

Flaw

Crack detection

ABSTRACT

Infrared thermography offers a wide range of possibilities for the detection of flaws in welding, being the main difference among them the thermal excitation of the material. This paper analyzes the application of an inexpensive and versatile thermographic test to the detection of subsurface cracks in welding. The procedure begins with the thermal excitation of the material, following with the monitoring of the cooling process with IRT (InfraRed Thermography). The result is a sequence of frames that enables the extraction of thermal data, useful for the study of the cooling tendencies in the defect and the non-defect zone. Then, each image is subjected to a contour lines algorithm towards the definition of the morphology of the detected defects. This combination of data acquisition and processing allows the differentiation between two types of cracks: toe crack and subsuperficial crack, as defined in the quality standards.

© 2014 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Welding is the metallurgical process most widely used worldwide for joining metals. Furthermore, the steel structure today is a strategic sector in Europe. The steel market in the EU is recovering gradually from the damage caused by the economic crisis, driven by improved activity in key markets [1] and forecasts are favorable due to the fact that metallic structures can be recycled and reused, highly valued aspects in the current economic situation.

Tests on weld can be destructive or non-destructive (NDT). Already in 2004 [2], made a comparison between destructive methods like macrography and Vickers test and non-destructive test like lock-in thermography, concluding that there must be a synergy between both types of tests, each of them supplementing the other.

The application of NDT to the study of welded elements is particularly relevant because of the requirement to welding to ensure safety in structures and machine elements; therefore, non-destructive techniques have been the object of numerous investigations in the last 30 years. However, the latest research shows the need of finding a technique for the detection of faults in welding that can be easily applied on site without causing any damage or malfunction to the machine or the structure.

The NDT methods recognized by international standards (ISO) are radiographic test, ultrasonic test, magnetic particle, eddy current and liquid penetrant. Among them, ultrasonic inspection and radiographic (X and gamma ray techniques) are officially regulated in Europe [3,4]. Comparative studies between these methods are presented in [5,6]. These techniques offer the possibility of automation, recording, viewing and verification of integrated inspection results, and they are also the most precise, versatile and sustainable testing methods; however, these techniques also have their limitations: in the majority of cases, they are only able to detect the defect, presenting some difficulties for its geometric

* Corresponding author.

characterization and also, sometimes, to value it in accordance with the standard. Also these methods have difficulty to detect near surface defects. Due to these limitations, the combination of any of these techniques, ultrasounds and radiographic test, with infrared thermography has been already investigated for metals like aluminum [7]. Researchers conclude that this combination produces better results than optically stimulated infrared thermography to detect internal and close cracks, although they recognize that further research should be made.

The radiographic (X and gamma ray techniques) test allows the display of a graphical profile of the interior of the piece, as well as the precise location and measurement of defects; its disadvantages are the high cost of the technique, the need of complex cooling systems in the tube, the danger derived from the radioactivity, the requirement to generate high voltage at the cathode and the low-portability of the equipment. These facts limit the use of radiographic methods to specific circumstances. In addition, the defects that do not have air inside (like inclusions of material) are not shown in the radiographic image as clearly as other defects; furthermore this method presents difficulties for small volume weld.

The application of infrared thermography to the detection of defects began in 1960–1970, when electronics and optics systems in the infrared band started to be employed in aerospace and nuclear engineering. However, the bad operation characteristics of infrared systems in those years held back its development as NDT [8]. Currently, there are different thermographic techniques depending on the heating method. Passive thermography is based on the acquisition of thermographic images of the object under study without external heat supply. In some cases, the heating caused by the incident radiation from the Sun is used to analyze the behavior of the differential surfaces and to detect pathologies like humidity or insulation defects [9]. On the other hand, active thermography is based on the use of an energy source that enables the excitation of atoms in the material. The heat source varies according to the technique employed. So far active thermography has been implemented with surface heating by pulsed laser [10,11] and flashlamps [11–16]; also no optical heat sources [12] like mechanical vibration [13,14], acoustic wave excitation [15] and microwaves [17] have been applied in active thermography. Regarding its application as NDT method, active thermography not only allows the detection and characterization of pathologies and flaws in materials [18,19], but also enables obtaining thermo-physical parameters of the objects such as thermal diffusivity and thermal effusivity [20,21]. Active thermographic methods can be applied in non-destructive testing of welding, to allow the early detection of defects in different types of materials and for quality control in predictive maintenance and prediction of faults in machines, structures and even for troubleshooting in electrical equipment [22].

The main advantage of active thermography in comparison to other non-destructive techniques, is the large surface area covered and the high rate of image acquisition [23], in addition to the possibility of providing information as complete as the own radiography or gammagraphy image together with the versatile ultrasound test.

The tendency of the research so far has been towards the application of the technique of infrared thermography as NDT only in laboratories with sophisticated heating mechanisms aforementioned, which are difficult to apply in external environment; for this reason the European standard does not contemplate the IRT technique as another NDT method. However, recent studies have discussed the possibility of applying the heat source in the weld installation place. [17] have researched the application of heat with a microwave open source directly in the weld. It is a high thermal efficiency source, portable and which allows heating in a short time, but it is also an expensive resource, which requires a rigorous

security study and presents difficulties to be used in Europe due to the safety standards for microwave heating systems [24].

The main objective of this paper is to validate a test procedure with a single, viable, safe, inexpensive heat source, which is also easy to use in outdoor environments, enabling the assessment of defects in accordance to European quality standards [25]. The proposed methodology consists on monitoring the cooling of the material after subjecting the steel to a small, continuous and homogeneous thermal excitation (lower heating at 70 °C); this thermal excitation is performed from two different positions regarding the front face of the welding: frontal and back heating. This difference in heating constitutes the core of the two methodologies analyzed. Image processing is performed with algorithms aiming at the applicability of the methodology to most existing scenarios.

The objective is to design a NDT procedure that allows the extraction of different thermal parameters and, according to them, obtain the defect situation in the weld and its characterization. For this purpose a thermographic camera is used and a heater with Joule effect is applied as excitation source. This heater is selected due to its characteristics of being accessible, safe, ergonomic and easily portable. When thermal data are obtained, the post-processing is implemented: first, a study based on temperature-isolines is performed in order to detect the defects and, once defects are detected, the cooling rates of both the defect and the healthy area are studied in order to analyze the trends in each area.

This paper is organized as follows: Section 2 presents the theoretical background of the paper; Section 3 describes the equipment involved in the essays, as well as the testing methodology; Section 4 includes a detailed data analysis for the detection of the cracks present in the weld; finally, Section 5 explains the conclusions reached after this study.

2. Theory

Newton's cooling law defends that intensity of heat energy transfer depends on the temperature difference between the different physical systems that interact [26]. Newton's cooling law (Eq. (1)) sets proportionality between the heat transferred to the environment by a body with higher temperature during its cooling Q (J) and the temperature difference (°C or K) between the material (T) and the environment (T_a). Starting with the definition of specific heat, c , of Eq. (2) and Newton's cooling law (Eq. (1)), the derivative of the temperature versus time, or what is the same, the cooling rate equation can be defined (Eq. (3)).

$$\frac{\partial(Q)}{dt} = -\alpha A(T - T_a) \quad (1)$$

$$c = \frac{1}{m} \frac{\partial Q}{dT}; dQ = -mcdT \quad (2)$$

$$\frac{\partial(T)}{dt} = -k(T(t) - T_a) \quad (3)$$

Being:

$$k = -\frac{\alpha A}{mc} \quad (4)$$

The solution to the cooling rate equation (Eq. (3)) for standard initial conditions is an exponential function with time as an independent variable (Eq. (5)), where T_0 is the material temperature at the initial time.

$$T(t) = T_a + (T_0 - T_a)e^{-kt} \quad (5)$$

The constant k (Eq. (4)) is associated to the material and geometry of the exposed surface, the constant depends on the heat

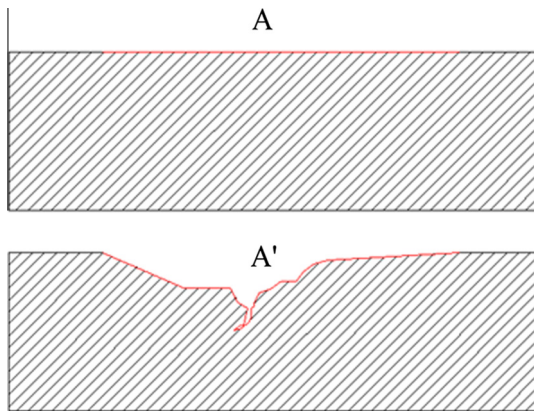


Fig. 1. Difference between the profile of a homogeneous area of the base material (A) and the crack area (A'). The first surface is always smaller than the second.

transfer coefficient, α (W/m^2), on the exposed surface, A (m^2), on the material mass m (kg.) and on the specific heat, c (J/kgK), (Eq. (2)). Thus, the cooling rate (Eq. (4)) will depend, among other parameters, on the material of the surface exposed to the cooling medium (in this case, air) and on the temperature of the medium immediately adjacent to the material.

As shown in Fig. 1, the surface of the exposed zone in the homogeneous and healthy base material (A) is always smaller than the area of the crack (A') because in the latter, the surface is not flat but uneven, and has edges and an irregular geometry. For the same flat area of the plane on the surface, the zone with the crack has more surface exposed to air than the non-crack zone.

Considering the parameters involved in the cooling equation (Eq. (1)), the behavior of homogenous steel is different from that of steel with an air bag inside (crack), because k constant is

associated to the material and the geometry of the exposed surface, and the material composition is different in the defect and the no defect zone. In addition, the geometry is different for each type of crack.

3. Materials and methods

3.1. Materials

In order to implement the test, two specimens of low carbon steel were used, with dimensions of 75 mm by 14.5 mm, and a thickness of 10 mm. Both specimens have been welded with V-groove and edge preparation. The first specimen (Fig. 2) has a longitudinal crack which propagates parallel to the longitudinal axis of the weld; this crack is denominated as toe crack according to the quality standard [27]. The second specimen (Fig. 3) has a subsurface crack, and the weld cap has been removed.

The thermal excitation of the material was performed using a heater with Joule effect, 2500 W power. The heater is located at a 2 cm distance from the specimen, where it is active during the time needed until each plate reaches a desired temperature: 40 °C for weld 1, 70 °C for weld 2. Temperature is measured in the monitored surface with a thermometer TESTO720 with Pt-100, resolution 0.1 °C, accuracy 0.2 °C. Ambient conditions (temperature and humidity) during the test are 21 °C and 78%.

The maximum heating temperature is different because each plate requires a different heating time for defect detection. It is important to emphasize that the plates present equal dimensions but different defects and also different welding (for example, the weld layer was removed in specimen 2). However, in this paper average cooling rates are obtained, allowing the comparison of cooling results regardless of the temperature.



Fig. 2. Weld 1 with a toe crack.



Fig. 3. Weld 2 with a subsurface crack (weld cap removed).

The thermographic camera used for this work is a NEC TH9260 with 640×480 Uncooled Focal Plane Array Detector (UPFA), with a resolution of 0.06°C and a measurement range from -40°C to 500°C .

During data acquisition, the camera is controlled via PC, for the establishment of the acquisition interval and duration, as well as the introduction of the correction of the atmosphere attenuation through the ambient parameters, and the distance between camera and the target.

3.2. Testing methodology

Two independent tests are performed for each specimen in order to determine the optimal methodology for defect detection in welds in general, or specifically for each type of defect.

3.2.1. Method 1

This method is based on the heating of the specimen from the front, assuming the front as the face of the weld (Fig. 4). The heat source is the Joule effect heater, located at 2 cm from the exposed surface. First, the material is thermally excited to achieve the desired surface temperature (40°C for weld 1 and 70°C for weld 2), measured with the contact thermometer.

Subsequently, the heat source is switched off, and the IRT camera is activated (Fig. 5). The camera monitors the cooling process for 300 s through the acquisition of a frame every 5 s (Fig. 5); this acquisition rate is selected in order to match the cooling rate. The optical axis of the camera is perpendicular to the specimen and situated at the height of its geometric center.

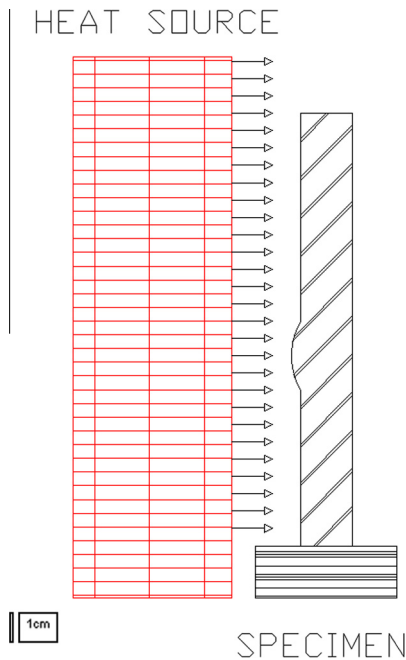


Fig. 4. Schematic illustration of the experimental setup. Weld crack excited by front heating source (Method 1).

3.2.2. Method 2

The heat source is the same Joule effect heater, located at 2 cm distance from the back surface (where the root of the weld is) (Fig. 6). As in the previous method, the material is thermally excited until the desired temperature is reached (as in the previous test, desired temperature is set on 40°C for weld 1 and 70°C for weld 2), which is measured with the thermometer. Then, the cooling of the specimen is monitored for 300 s through the acquisition of a thermographic image every 5 s (Fig. 5).

3.3. Processing methodology

For each thermal image different image-matrices (I_i) with $m \times n$ dimensions are extracted by the human operator in a delineation process; m and n are specified for each case in Table 1. Two submatrices are extracted from each image-matrix: the first covers

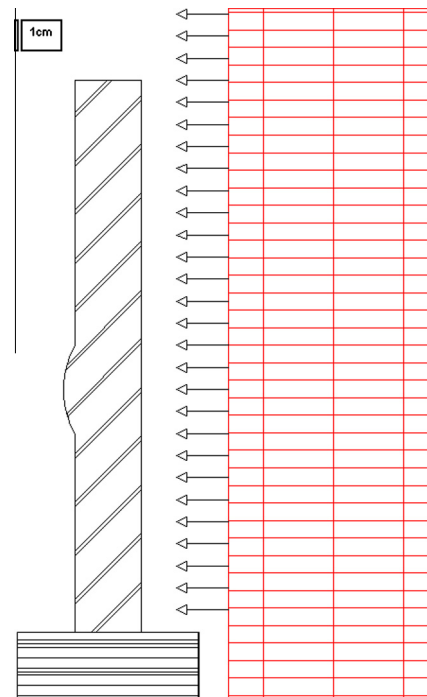


Fig. 6. Schematic illustration of the experimental setup. Weld crack excited by back heating source (Method 2).

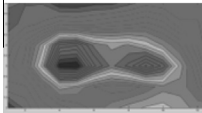
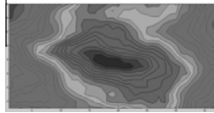
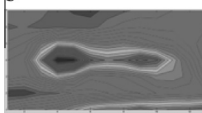
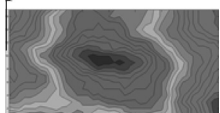
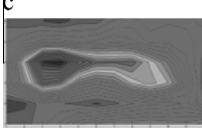
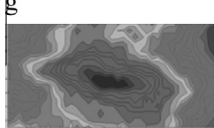
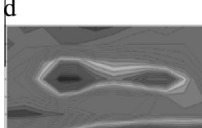
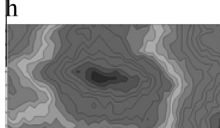
Table 1
Dimensions of different Z submatrix in defect and non-defect zone for weld 1 and weld 2.

	Dimensions of submatrix (pixels)			
	Weld 1		Weld 2	
	Z_d	Z_w	Z_d	Z_w
Method 1	2×9	2×118	6×12	6×39
Method 2	2×9	2×118	6×12	6×39



Fig. 5. Cooling monitoring with IRT.

Table 2
Contour function images of each defect submatrix for Method 1 and Method 2.

Time (s)	Method 1		Method 2	
	Weld 1 (toe crack)	Weld 2 (subsurface crack)	Weld 1 (toe crack)	Weld 2 (subsurface crack)
$t = 0$				
$t = t_{end}$				

the defect, ($Z_{d_{m_d \times n_d}}$), whereas the second covers the surrounding area where there are no material flaws (healthy material) ($Z_{W_{m_w \times n_w}}$). Submatrix dimensions are shown in Table 2. In the following step, the average temperature of the pixels of both submatrices is calculated to establish an objective comparison.

The m component is coincident for all submatrix (Table 1). This consideration has been taken in order to prevent inhomogeneities in the heated material which may be produced in the vertical plane, and also ensure that the comparison of results is made under the most neutral and independent conditions.

The test is divided into two analysis processes: on the one hand, analyses have been made based on a contour lines algorithm; on the other hand, analysis have been implemented through the analysis of the cooling process. The first provides information about morphology or defect shape, whereas the second gives information about the cooling rate in the different zones. Considering the two different results, a differential diagnosis in the cracks can be established to distinguish between different types of cracks and study the higher or lower viability of each method for each type of crack.

3.3.1. Morphology characterization

The procedure of morphology characterization is meant to identify areas with similar temperatures as the defect in order to study the different zones that constitute the cracks and their geometry. With this step, defect detection is possible because the method is based on the identification of thermal differences, allowing to obtain temperature-isolines.

The MATLAB® function (*contourf*(Z)) is used for plotting isolines in each submatrix defect ($Z_{d_{m_d \times n_d}}$), classifying the temperature values in 10 groups. Each group is given a color, so that the inside of each isoline is clearly identifiable. The number of 10 for groups is established as this is the compromise number of lines that provides enough information without overloading the image.

3.3.2. Temperature evolution

Cooling study. The average value of the pixels of each submatrix (I_i) is subjected to an exponential adjustment. This adjustment is chosen due to its relation to the Newton's cooling law as it is defined in the theory.

In this way, the temperature function in the defect region ($T_d(t)$) and the temperature function in non-defect region ($T_w(t)$) are obtained from the experimental data. The derivative of these functions, results in the cooling rate function of each zone, ($\partial T_d(t)/dt, \partial T_w(t)/dt$) whereas the integration of the cooling rate functions between the initial time (t_0) and the end time (t_{end}), provides the average cooling rate for both the defect (\bar{Q}_d) and the non-defect region (\bar{Q}_w); (Fig. 7).

The procedure is repeated for the two specimens (weld 1 and weld 2) and the two methodologies (Method 1 and Method 2), obtaining results for both experimental procedures and establishing a differential study to analyze the existence of different tendencies in the cooling rate for the defect and the non-defect region.

4. Results and discussion

Each process described in Section 3.3 results in a different product, allowing the establishment of a differential diagnosis in the crack for the identification of different types of cracks and the study of the viability of each method for the detection and evaluation of each type of crack.

4.1. Morphologic analysis with thermal image

According to the procedure established in Section 3.3.1, the morphological characterization of the two welds is performed through the extraction of the submatrix of the images corresponding to the toe crack and to the subsurface crack, respectively, and the application of the contour function with the aim at analyzing the differences in morphology between the beginning and the end of the cooling period, and between the two different heating methods applied (Method 1 and Method 2). The results are shown in Table 2.

For weld 1, in images a, b and d, two zones with higher temperature than their surrounding zones can be identified at the left and the right of the crack (higher thermal contrast). This fact is compatible with the existence of two incisions that are generated by the existence of internal ramifications in the crack. These ramifications are propagated into the material to emerge quasi-perpendicularly on the surface. However, the cooling transit has caused image c ($t = t_{end}$) to be different to image a ($t = 0$) because only one incision is visible in image c (the incision at the right is not visible) and its appearance is similar to a small superficial notch (detectable by visual inspection). When front heating is applied, thermal excitation is more superficial, so the cooling taking place between image a and c is faster and so the image c does not provide additional information, opposite to the other images (a, b and d) which provide interesting information impossible to detect for the human eye (for example, the two independent incidences within the toe crack).

In the analysis of the weld 2, when back heating (Method 2) is applied (images f and h), the most internal region of the defect is displayed with marginally higher precision (higher thermal contrast) than in the front heating test (Method 1, images e and g). In this case, there is not a great difference between images at the beginning and the end of the cooling of the two heating methods

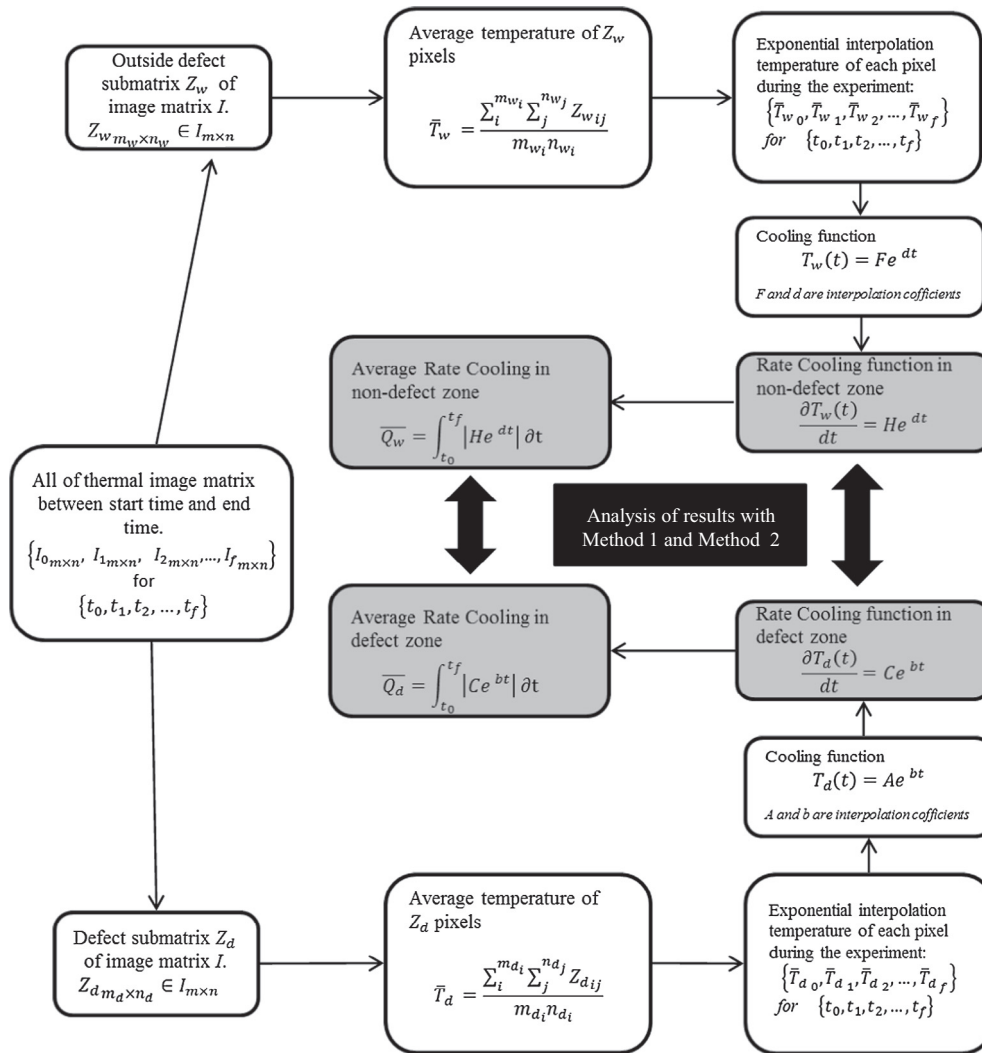


Fig. 7. Sequence for obtaining the cooling rate through the thermal images matrix.

applied (images e and g, images f and h); in all of them, the morphology is well defined. This may be because the subsurface crack has a more uniform and simple geometry than the toe crack.

The morphology variation between the toe and the subsurface crack (weld 1 and weld 2, respectively) allows differentiation between the two types of flaw simply by displaying the processed thermographic image.

4.2. Thermographic analysis of the cooling

According to the procedure established in Section 3.3.2, the different parameters of the cooling rate when the two types of heating are applied allow to distinguish between the two types of crack.

Cooling curves and temperature evolution are shown for weld 1 in Fig. 8. Cooling rate evolution and average cooling rate integrated for Method 1 and Method 2 are obtained according to the procedure in Fig. 7, and are shown in Table 3.

In view of the results, there is a considerable difference in the cooling rate between the defect and the non-defect zones. This phenomenon can be explained by the greater exposure to the outside surface of the crack area due to its irregular and abrupt surface geometry and increased roughness (Fig. 1). The results are adjusted to the exponential cooling tendency defined in the theory (Eqs. (1), (4) and (5)).

The comparison of the results obtained with Method 1 and Method 2 for the toe crack shows that the cooling rate is higher when the specimen is subjected to back heating (Method 2) than when it is subjected to front heating (Method 1). This could be justified considering the type of defect, which has a great depth and only a small notch is appreciable on the surface. When heat affects directly the toe crack opening (in the front surface), the heat penetrates into the cracks by the small surface crack opening. Since the trapped air temperature is higher than room temperature, this phenomenon slows the cooling. This is the reason why cooling after frontal heating is slower than after back heating.

Cooling curves and temperature evolution are shown for weld 2 in Fig. 9. Cooling rate evolution and average cooling rate integrated for Method 1 and Method 2 are obtained according to the procedure in Fig. 7, and are shown in Table 4.

Analogously to weld 1, the difference in the cooling rate between the defect region and the non-defect region is also clearly observed, regardless the heating method used.

Considering the comparison of results for Method 1 and Method 2, the results are reversed with respect to the previous specimen (weld 1). In the case of weld 2, the cooling rate is higher when front heating is used (Method 1) than when back heating is used (Method 2) which can be justified according to the type of defect. Subsurface crack (weld 2) is nearer to the surface than the defect weld 1 (toe crack) but it has no opening to the outside so the hot

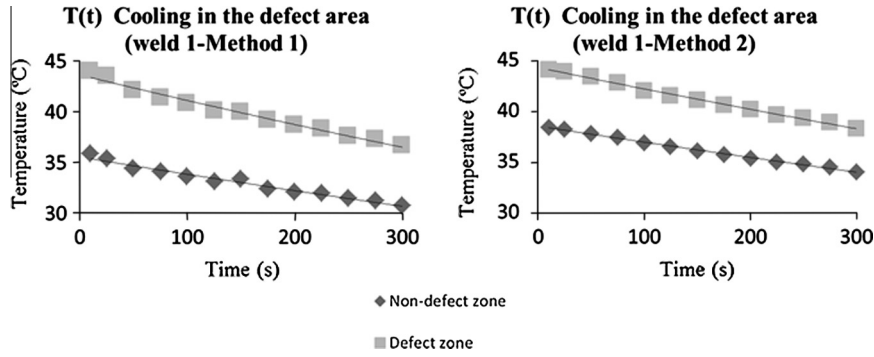


Fig. 8. Experimental cooling curves in defect and external material for weld 1.

Table 3

Thermal results for weld 1 with Method 1 and Method 2: temperature function, cooling rate function and average cooling rate.

		Weld 1-toe crack-					
		$T(t_0)$ (°C)	$T(t_f)$ (°C)	t_f (s)	$T(t)$ (°C)	$\frac{\partial(T)}{\partial t}$ (°C/s)	$\bar{Q} = \frac{\int_0^{t_f} Q(t) dt}{t_f}$ (°C/s)
Method 1	$Z_{d_{m_d} \times n_d}$	44.1	38.3	300	$44.307e^{-0.0005t}$	$-0.0221530e^{-0.0005t}$	0.0206
	$Z_{W_{m_w} \times n_w}$	38.4	34	300	$38.531e^{-0.0004t}$	$-0.0154124e^{-0.0004t}$	0.0145
Method 2	$Z_{d_{m_d} \times n_d}$	43.9	36.7	300	$43.623e^{-0.0006t}$	$-0.0261730e^{-0.0006t}$	0.0240
	$Z_{W_{m_w} \times n_w}$	35.8	30.8	300	$35.524e^{-0.0005t}$	$-0.017762e^{-0.0005t}$	0.0165

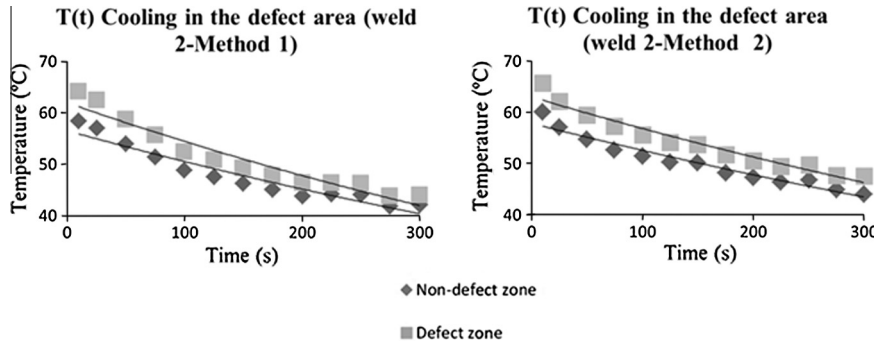


Fig. 9. Experimental cooling curves in defect and external material for weld 2.

Table 4

Thermal results for weld 2 with Method 1 and Method 2: temperature function, cooling rate function and average cooling rate.

		Weld 2-subsurface crack-					
		$T(t_0)$ (°C)	$T(t_f)$ (°C)	t_f (s)	$T(t)$ (°C)	$\frac{\partial(T)}{\partial t}$ (°C/s)	$\bar{Q} = \frac{\int_0^{t_f} Q(t) dt}{t_f}$ (°C/s)
Method 1	$Z_{d_{m_d} \times n_d}$	64.1	43.9	300	$61.996e^{-0.0013t}$	$-0.0805594e^{-0.0013t}$	0.0667
	$Z_{W_{m_w} \times n_w}$	58.4	42.1	300	$56.514e^{-0.0011t}$	$-0.062165e^{-0.0011t}$	0.0529
Method 2	$Z_{d_{m_d} \times n_d}$	65.7	47.6	300	$63.004e^{-0.0010t}$	$-0.063004e^{-0.0010t}$	0.0544
	$Z_{W_{m_w} \times n_w}$	60.1	44	300	$57.841e^{-0.00095t}$	$-0.054949e^{-0.00095t}$	0.0478

air that directly impacts the crack zone (when front heating applied) is not enclosed (in contrast to what happens with the toe crack).

When the defect is closer to the surface, the thickness of the material behind the defect (between the defect and back surface of the specimen) is higher, and the material thickness in front of the defect (between the defect and the front surface) is smaller. When the material is heated from its back surface (Method 2), the thermal excitation of the material located behind the defect is greater than that of the material located in front of defect. For this reason, heat is longer preserved and the cooling rate is lower in the back heating than in the front heating of the defect region.

5. Conclusions

The defects detected and differentiated by the technique proposed in this paper are the toe crack and the subsurface crack. For both cases, the technique has the potential to detect hidden flaws due to the influence of the physical differences between the defect and the non-defect area in the cooling parameters. However, the success in the detection of internal defects depends on the depth: greater depths require larger heating and greater ranges of precision in thermographic data acquisitions.

When detected, defects can be differentiated according to their morphology. Once the contour line post-processing is made, the

results show a big difference between the toe crack and the subsurface crack. In the first, two incisions are clearly seen, corresponding to the penetration into the material; the crack is observed from a profile perspective because it propagates in perpendicular direction to the surface plane. The second crack has a more homogeneous morphology in which the plane of propagation is parallel to the plane of the surface, and the crack is observed from the front perspective.

Morphological analysis can conclude that, regardless the type of defect under study, in the test with front heating (Method 1) temperatures are highly dependent on the defects present on the surface of the material (oxides, ridges, edges, oils, etc.), so emissivity values are highly variable and reflections have much influence. In the case of back heating (Method 2), the effect of the reflections from the heating source affects only the back surface, therefore the front face presents a uniform temperature distribution. Mainly, this is produced by the heat transfer through conduction phenomenon, consequently causing a more uniform cooling. The image processing technique of contour lines is applied to the thermographic images for the generation of a clear temperature profile for each defect. These profiles allow the classification of the cracks by their morphology according to standards defined in quality regulations for welded joints, providing a different classification between the toe crack and the subsurface crack. This differentiation is practically impossible with a visual or photographic superficial analysis because small external flaws manifestations do not give enough information. The possibility of differentiating the two defects is important because each of them presents a different level of risk, different prognoses and different propagation tendencies from the point of view of fracture mechanics.

On an alternative approach, the possibility of analyzing defects in weld through their cooling rate is shown. This paper aims at demonstrating that the fissured area presents a different cooling rate to the non-defect zone. This contrast in the cooling rate allows the identification of possible cracks in the thermographic image that could be missed if the focus was on the temperature results.

Furthermore, the comparison of results obtained for each type of heating (Method 1 and Method 2) shows interesting results. In the case of the toe crack, greater contrast exists in the cooling rates after back heating (Method 2) than after front heating (Method 1), a circumstance that is reversed in the case of the subsurface crack. In the latter, the cooling rate is higher when front heating is applied (Method 1) than when back heating is used (Method 2). These results allow to distinguish between the two types of cracks by comparing the results of the independent application of front and back heating.

This paper provides a cheap and accessible technique that can be used in situ, beating the limitations that this fact entails for other non-destructive testing techniques. The main limitation of the proposed method is the difficulty to provide homogeneous heating in welded joints with more complex geometries, for example a T-joint. Future work will deal with different heating strategies towards the inspection of this type of welding, as well as with the design of an excitation source that includes more advanced and precise heating methods.

Conflict of interest

There is no conflict of interest.

Acknowledgements

Authors would like to thank to the Consellería de Economía e Industria (Xunta de Galicia), Ministerio de Economía y Competitividad and CDTI (Gobierno de España) for the financial support given

through human resources grants (FPU AP2009-1144), and projects (IPT2012-1092-120000, ITC-20133033). All the programs are cofinanced by the Fondo Europeo para el Desarrollo Regional (FEDER). Authors would also like to thank Prof. Antonio Collazo, from the University of Vigo, for his kind collaboration and contribution to the paper.

References

- [1] Eurofer inform, Recycling rates for metal, The European Steel Association, 2012. <<http://www.eurofer.org/News%26Media/PublicationsLinksList/2012-Eurometaux-EUROFERRecyclingRatesforMetals.pdf?&wtd=CCoAvYqD3ExYsefk>>.
- [2] C. Meola, A. Squillace, F.M.C. Minutolo, R.E. Morace, Analysis of stainless steel welded joints: a comparison between destructive and non-destructive techniques, *J. Mater. Process. Technol.* 155 (2004) 1893–1899.
- [3] Non-destructive testing of welds – ultrasonic testing – techniques, testing levels, and assessment, European Committee for Standardization. UNE-EN-ISO 17640:2010, 2010.
- [4] Non-destructive testing of welds – radiographic testing – Part 1: X- and gamma-ray techniques with film, European Committee for Standardization. UNE-EN-ISO 17636-1:2013, 2013.
- [5] C. Hayes, The ABC's of nondestructive weld examination, *Welding J.* 76 (1988) 46–51.
- [6] R.J. Ditchburn, S.K. Burke, C.M. Scala, CM, NDT of welds: state of the art, *NDT&E Int.* 29 (1996) 111–117.
- [7] X. Guo, V. Vavilov, Crack detection in aluminum parts by using ultrasound-excited infrared thermography, *Infrared Phys. Technol.* 61 (2012) 149–156.
- [8] N. Ishchuk, G. Karpov, A.I. Fesenko, The detection of hidden subsurface objects in the infrared wavelength band by identifying their thermal properties, *Meas. Tech.* 52 (4) (2009) 388–393.
- [9] J. Válek, S. Kruschwithz, J. Wöstmann, T. Kind, J. Valach, C. Köpp, J. Lesák, Nondestructive investigation of wet building material: multimethodical approach, *J. Perform. Construct. Facil.* 24 (2010) 462–472.
- [10] L. Teng, D.P. Almond, D. Andrew, S. Rees, Crack imaging by scanning pulsed laser spot thermography, *NDT&E Int.* 44 (2011) 216–225.
- [11] P. Broberg, Surface crack detection in welds using thermography, *NDT&E Int.* 57 (2013) 69–73.
- [12] N. Tsopelas, N.J. Siakavellas, Experimental evaluation of electromagnetic-thermal non-destructive inspection by eddy current thermography in square aluminum plates, *NDT&E Int.* 44 (2011) 609–620.
- [13] L.D. Favro, X. Han, Z. Ouyang, G. Sun, H. Sui, R.L. Thomas, Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse, *Rev. Sci. Instrum.* 71 (2000) 2418–2421.
- [14] F. Mabrouki, M. Thomas, M. Genest, A. Fahr, Numerical modeling of vibrothermography based on plastic deformation, *NDT&E Int.* 43 (2010) 476–483.
- [15] K.A. Tsoi, N. Rajic, Interference fit fastener characterisation using sonic thermography, in: 5th Australasian Congress on Applied Mechanics, Brisbane, 2000.
- [16] N. Rajic, D. Rowlands, K.A. Tsoi, An Australian Perspective on the Application of Infrared Thermography to the Inspection of Military Aircraft, 2nd International Symposium on NDT in Aerospace 2010, Hamburg, 2010.
- [17] S.A. Keo, F. Brachelet, F. Breaban, D. Defer, Steel detection in reinforced concrete wall by microwave infrared thermography, *NDT&E Int.* 62 (2014) 172–177.
- [18] Q. Tang, J. Liu, Y. Wang, H. Liu, Subsurface interfacial defects of metal materials testing using ultrasound infrared lock-in thermography, *Procedia Eng.* 16 (2011) 499–505.
- [19] L. Junyan, T. Qingju, L. Xun, W. Yang, Research on the quantitative analysis of subsurface defects for non-destructive testing by lock-in thermography, *NDT&E Int.* 45 (2012) 104–110.
- [20] P. Bison, S. Marinetti, A. Mazzoldi, E. Grinzato, C. Bressan, Cross-comparison of thermal diffusivity measurements by thermal methods, *Infrared Phys. Technol.* 43 (2002) 127–132.
- [21] N. Tao, Z. Zeng, L. Feng, Y. Li, C. Zhang, Thermal effusivity measurement of subsurface heterogeneous materials using pulsed thermography, *Infrared Laser Eng.* 40 (11) (2011) 2098–2103.
- [22] A.S. Nazmul, S. Taib, A semi-automatic approach for thermographic inspection of electrical installations within buildings, *Energy Build.* 55 (2012) 585–591.
- [23] D. Balageas, Termografía Infrarroja: una técnica multifacética para la Evaluación No Destructiva (END), IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, 2007.
- [24] Safety in electroheat installations – Part 6: specifications for safety in industrial microwave heating equipment, European Committee for Standardization. EN 60519-6: 2011, 2011.
- [25] Welding, Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded). Quality levels for imperfections (ISO 5817:2003 corrected version.2005, including Technical Corrigendum), European Committee for Standardization. UNE-EN-ISO-5817: 2009, 2009.
- [26] I. Michael, Newton's law of cooling and its interpretation, *Int. J. Heat Mass Transf.* 55 (2012) 5397–5402.
- [27] Welding and allied processes – classification of geometric imperfections in metallic materials – Part 1: fusion welding, European Committee for Standardization. UNE-EN-ISO 6520-1:2007, 2007.

Capítulo 4: Ensayo termográfico para la caracterización geométrica de fisuras en soldaduras usando algoritmos de rectificación de imagen térmica.

El presente capítulo contiene el artículo *Thermographic Test for the Geometric Characterization of Cracks in Welding Using Thermographic Image Rectification*, aceptado con sujeción a revisión menor en la revista internacional de impacto (JCR) *Automation in Construction*.

Este segundo enfoque para la caracterización de fisuras en soldaduras se justifica desde el interés que la medición de tales grietas en el plano superficial tiene para la clasificación de la fisura entre las distintas tipologías existentes y para las previsiones de propagación, así como para el análisis de la potencialidad de la fractura del material agrietado. Las dimensiones de la fisura son importantes a la hora de tomar una decisión basada en la calidad de la soldadura. Con frecuencia los inspectores de soldadura recurren al tamaño y a la morfología de la grieta para determinar su peligrosidad y, de esta manera, tomar la decisión de mantener la soldadura, reconstruirla o destruirla y hacerla de nuevo [19]. Las prestaciones de la técnica de la termografía activa en términos de detección de defectos quedan fuera de toda duda, sin embargo el doctorando no quería dejar pasar la oportunidad de analizar las prestaciones metrológicas que pudiera aportar la técnica termográfica con respecto a otros métodos de medida en 2D. Para ello se diseña esta investigación en la cual se dota a la imagen térmica de una métrica 2D que permite la toma directa de mediciones en la misma mediante la aplicación de un algoritmo de rectificación de imagen. A fin de aumentar el contraste de la imagen térmica, se aplica un calentamiento a las dos soldaduras descritas en el capítulo anterior, por lo que este ensayo se enmarcaría también dentro de la termografía activa.

El montaje del ensayo con termografía es dispuesto siguiendo una configuración en transmisión (con arreglo a la clasificación establecida en el capítulo 2) a la vista de los mejores resultados en términos de homogeneidad en el material y de ausencia de reflejos que fueron corroborados en el capítulo anterior. Los calentamientos aplicados se diseñan experimentalmente. En el momento en el que se ha alcanzado la temperatura deseada se procede a realizar una única captura con la cámara termográfica. A las fisuras mostradas en la imagen térmica se las dota de una métrica 2D. Adicionalmente se aplica un procesado con líneas de contorno a la imagen (una vez aplicada la métrica), con el fin de establecer un mapa de isotermas que sirva como referencia para la toma de medidas y para esbozar un eje de simetría para las fisuras. Este último enfoque tiene un fin predictivo pues permite una estimación de la orientación del crack en base a su eje de simetría trazado a través de las confluencias de las distintas isotermas y con ello es posible trazar una línea de orientación que puede extenderse a la placa completa para dar una visión global de la orientación de la fisura y de su eje de propagación. Como resultado, el inspector dispone de información complementaria a la hora de predecir si

la fisura, dada su orientación, alcanzaría, en caso de propagarse, las zonas que pudieran resultar más desfavorables, dando un criterio más al inspector de soldadura para la toma de decisiones.



Thermographic test for the geometrical characterization of cracks in welding.

M. Rodríguez-Martín^{*a1}, S. Lagüela^{a,b}, D. González-Aguilera^a, J. Martínez^b

^a Department of Cartographic and Land Engineering, University of Salamanca, Polytechnic School of Avila. Hornos Caleros, 50, 05003, Avila (Spain)

^b Applied Geotechnologies Research Group, University of Vigo, Rúa Maxwell s/n, Campus Lagoas-Marcosende, 36310 Vigo (Spain)

ARTICLE INFO

ARTICLE HISTORY

Received in revised form 26 May 2015

Keywords:

Crack, weld, Infrared Thermography (IRT), image rectification, Non-destructive testing (NDT).

ABSTRACT

This paper presents a novel IR (Infrared) thermographic method based on thermographic image rectification and extraction of isotherms which allows the detection of cracks in welds, as well as the geometric characterization and orientation of the crack to assist the prediction of the direction of propagation of the crack through the material. The technique has been validated through its application to two specimens with different types of cracks, and the quality of the results obtained has been analyzed with respect to the real measurements of the cracks.

1. INTRODUCTION

The study of welded elements is particularly relevant because of their function as safety guarantors in structures and machine elements. For this reason, international quality standards [1-2] are very demanding regarding geometry of welds and presence and characteristics of imperfections or flaws. The application of NDT (Non-Destructive Testing) to these elements has been the object of numerous investigations in the last 30 years. However, the latest research shows the need of finding a technique for the detection of faults in welding that can be easily applied on site without causing any damage or malfunction [3]. Among the defects commonly present in welds, the study of the cracking process has high importance regarding safety and integrity of structures, vehicles and machines which work under high demands. The greatest innovation in the analysis of cracks happened during World War I [4], when Alan Arnold Griffith created a new discipline within the mechanical engineering called Fracture Mechanics [5]. Apart from the detection of the crack itself, the assessment and characterization of the type of crack is important, predicting the direction of propagation and measuring: *Depending on the geometry of cracks, these can be devastating to a weld because the sharp edges cause stress concentrations and cracks can grow under load* [6]. So, the knowledge of the size, orientation of the cracks presents enormous importance from the point of view of failure prediction.

Some defects in welds such as large and well-defined cracks are possible to detect by the human eye, but other defects, with small dimensions are difficult to detect through a visual

inspection and their orientation is not simple to define without using complementary techniques.

Infrared thermography (IRT) appears as an alternative technique for non-destructive inspection of materials due to its reliability, portability and its capacity for detecting, with high speed and efficiency, not only superficial defects, but also subsurface defects if active thermographic methods are approached. Nonetheless, the main professional utility to this day of IRT like NDT has been the detection of defects in composite materials [7, 8]. Nevertheless, active infrared thermography can be used to detect defects in the subsurface of the welding and inside the metal, and even to measure its depth. Different thermographic techniques can be applied mainly depending on the following aspects: type of heating, the arrangement of the sample and heating or excitation source, and the size and shape of the excitation source [9]. Excitation sources (continue or pulsed) are tasked to induce an artificial excitation of the electrons of the atoms of the material in order to show surface or subsurface defects, imperfections or discontinuities. The sources can be optical or non-optical; the first usually present the highest power density, being frequently provided by lasers [10] or halogen lamps [11]; However, using a simpler excitation source is also possible for the study of metals on some cases [12]. On the other hand, research towards the use of simple excitation sources can provide useful progress because the most potent sources such as lasers can damage the surface of the metal. In addition, the reflections of the laser if applied on low emissivity surfaces can be a limitation to the application of the technique [13]. Non-optical excitation sources like

vibrothermography [8], eddy current [14] or ultrasounds [15] are frequently used and also present an enormous interest for metal testing. Nowadays, microwaves are also being applied like an efficient non-optical excitation source [16] but it could present serious disadvantages in safety and versatility for outdoor applications. When the excitation source is pulsed, results can be analyzed either in the frequency domain (PPT, Pulse-Phase Thermography) or in the time domain (TSR, Thermographic Signal Reconstruction) [9]. When the excitation source is continuous, results can be analyzed by contrast (relative difference between a pixel of the image and its closest pixels) [17] or by time domain (cooling or heating rate) [12]. The image nature of the thermographic product allows its combination with other non-destructive techniques that provide geometric information, such as laser scanning point clouds [18] and photogrammetry [19]. This sensor integration is useful even when active thermography is applied [20], using the temperatures measured and the computed parameters as descriptive data of the elements under study.

Photogrammetry could be a non-destructive technique that provides geometric information of the elements under study using only one camera. Given that this technique uses a photographic camera as its only device, the principles of the technique are adequate for their application with IR Cameras, maximizing the information gathered from each image. Among the different photogrammetric techniques, image rectification is one of the most efficient, providing geometric information easily with little economic investment: the equipment requirements consist on the camera and a geometric reference or scale [21]. Image rectification is based on the correction of the distortion introduced in the image by the camera lens [22] and on the posterior removal of the perspective distortion present in the original image using a geometric (vanishing points) or mathematical (projective transformation) approach.

The main advantage of the combination of photogrammetric techniques with infrared thermography is that the second removes the need of using additional lighting equipment, since its measurement is based on temperature differences rather than visual characteristics. This is the reason for the development of the present research, consisting on the performance of a thermographic test using a simple excitation source for the detection of superficial and subsurface cracks in welding, followed by the rectification of the Infrared (IR) images for the geometric characterization of the defects detected: in particular, length and width of their head, and global orientation of the crack.

The procedure allows the characterization and measurement of two types of cracks in welded steel according to the international standards [1,2]. Measures over IR image usually present bad precision results, mainly due to the great size of the pixel and the diffusivity parameters. This paper

proposes a process based on contour lines for giving more accuracy to the thermographic geometrical measures and to plot a symmetry edge for the cracks, which could be used for the study of the dangers of cracks based on their pattern of propagation.

This paper is organized as follows: Section 2 presents the equipment used, and the testing methodology; Section 3 analyses the results obtained, and the information gathered from the combined thermographic and geometric knowledge of the detected defects. Last, Section 4 explains the conclusions drawn from the presented study.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials

Two plaques of low carbon with a thickness of 7.5 mm were used. The plaques, which have been welded with Tungsten Inert Gas welding (TIG), presenting butt-welding with edge preparation in V. Their geometry is shown in Figures 1 and 2. The first weld (Fig. 1) has a crack which little notch is oriented parallel to the longitudinal axis of the weld, denominated as toe crack according to the quality standard [1, 2]. The second weld (Fig. 2) has the weld cap removed and presents a longitudinal crack. The two plates have been chosen by the very different morphology their cracks present: the toe crack has a peculiar shape because it penetrates into the material, whereas the longitudinal crack is placed on the surface propagated through it.

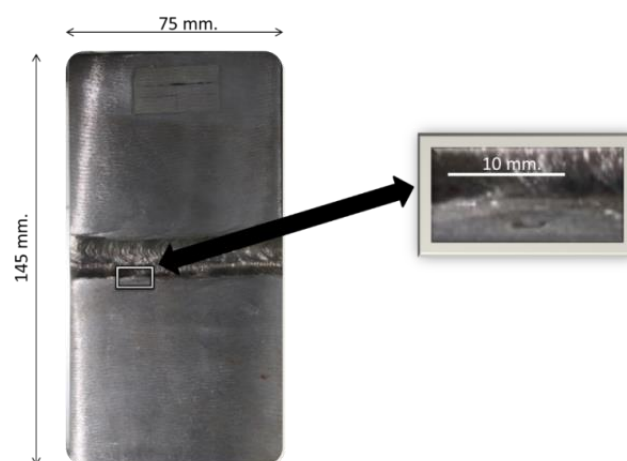


Fig. 1. Image and dimensions of the first plaque, which presents a toe crack (detail in the right image).

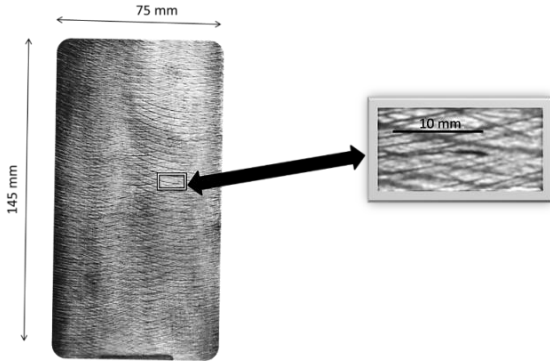


Fig. 2. Image and dimensions of the second plaque tested, which presents a longitudinal crack, nearly visible thanks to the removal of the weld cap (detail in the right image).

The thermal excitation of the material is performed with an electric heater (Joule effect heating) with 2500 W of active power. The superficial temperature is controlled with a contact thermometer TESTO720 with Pt -100, resolution 0.1 ° C and accuracy 0.2 ° C. The thermometer is held in its position on the surface of the plaques with black tape, in order to ensure total contact with the plaque and avoid the interference of the ambient conditions in the measurement.

The IR camera used for this work is a NEC TH9260 with 640 x 480 Uncooled Focal Plane Array Detector (UFPA), with a resolution of 0.06°C and a measurement range from -40°C to 500°C. The camera is geometrically calibrated prior data acquisition using a calibration grid based on the emissivity difference between the background and the targets, presented in [23]. The grid and the corresponding IR images are shown in Figure 3. The calibration parameters of the IR camera in the focus position used for data acquisition during the thermographic essays are shown in Table 1.

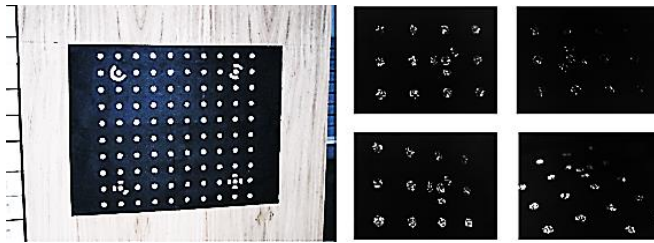


Fig. 3. Calibration grid based on emissivity differences (left) and IR images acquired for the geometric calibration of the IR camera NEC TH9260, centered in the coded target placed at the bottom left corner (right).

Table 1. Parameters for the geometric calibration of the IR camera NEC TH9260.

Focal length (mm)	14.35
Format size (mm)	5.98x4.50
Principal point (X_{pp}) (mm)	2.98

Principal point (Y_{pp}) (mm)	2.28
Lens distortion	
$K1$	$-1.32 \cdot 10^{-2}$
$K2$	$1.08 \cdot 10^{-3}$
$P1$	$-3.43 \cdot 10^{-4}$
$P2$	$1.44 \cdot 10^{-3}$

During data acquisition, the camera is controlled via PC regarding the establishment of the acquisition interval and duration, as well as the introduction of the ambient parameters (distance camera-plaque, ambient temperature and relative humidity) for the correction of the environment effect.

2.2. Methodology

2.2.1. Data acquisition: thermal test

Back heating (configuration in transmission) is applied to the plaques; that is, heat is applied to the back of each plate (root of the weld) at a distance of 10 mm of the specimen. This configuration is used because it avoids the effect of reflections on the surface, and the reflected monitored temperatures show greater uniformity. In this way, the existence of non-desired thermal zoning is less provable. The material is thermally excited until the minimum temperature required for the clear viewing of the defect is reached (Table 2). This temperature value is established through the repetition of the test for different lengths of the heating period, until the procedure is optimized and defects are detected with the minimum heating time. This target temperature is maintained for 10 minutes in order to guarantee a homogeneous temperature distribution in the entire surface. What is more, ambient conditions are controlled in order to avoid their change and the consequent disappearance of the stationary state. After the heating and temperature maintenance periods, the heater is switched off and the camera performs the acquisition of one image immediately after the end of the heating period.

The configuration is such that the focal axis of the camera is perpendicular to the welded plaques, and is focused on its geometric center.

The two specimens presented in section 2.1 have been analyzed under different heating periods (different final heating temperatures), since each crack is different and requires a different heating intensity for its complete detection in the IR images. The temperature necessary to detect the toe crack (Weld 1) is less than that required to detect a longitudinal crack (Weld 2) because the dimensions of the first are higher than the dimensions of the second, and consequently its thermal print is more clearly visible even

when its value is smaller. The different processes are summarized in Table 2.

Table 2. Heating time and desired temperature for each plaque.

	Heating time (s)	Maximum Superficial Temperature (°C)
Weld 1	1200	48
Weld 2	2400	70

2.2.2. Data processing

Once data acquisition is finished, data processing is performed using MATLAB®, following the steps shown in Figure 4.

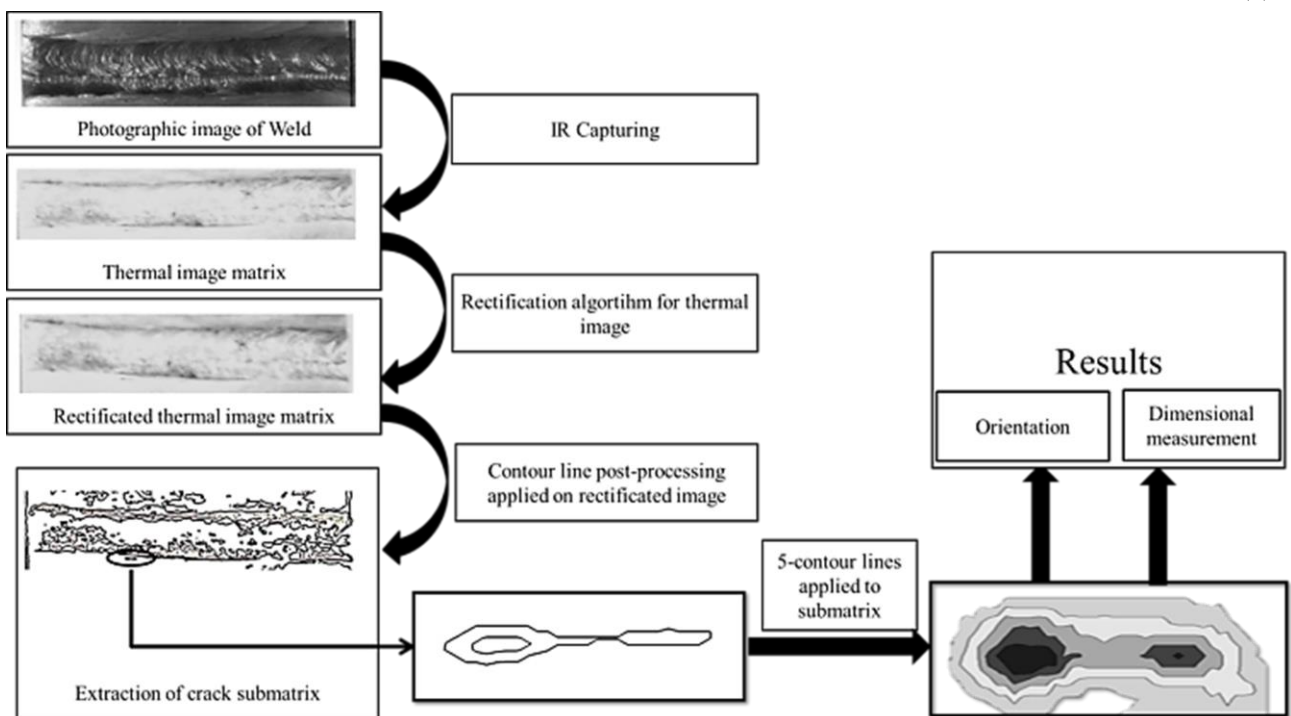


Fig. 4. Process followed for data extraction and post-processing of IR images. First, a IR image matrix is obtained, then, a rectification algorithm is applied and contour line post-processing is implemented (generation of isotherms in the image). With this, a submatrix of the crack can be extracted, enabling the establishment of a crack orientation line.

The first step consists on the extraction of the temperature matrix of each IR image: each position in the matrix contains the temperature value of the corresponding part of the object contained in the image pixel. Values are corrected on an emissivity basis, using as reference the temperature values measured at the beginning of the test (end of heating period) with the contact thermometer.

The emissivity value is calculated using Stefan-Boltzman's law, and the correction is applied to the matrix for obtaining the real temperature values. Equation 1 shows the derivation of the emissivity (ϵ) value based on Stefan-Boltzman's law, assuming the relation between the black body temperature (T_{BB}^4) and the temperature measured (T_{RB}^4) with the contact

thermometer as the real body behavior for the temperatures measured by the IR camera:

$$\epsilon = \frac{T_{RB}^4}{T_{BB}^4} \quad (1)$$

Once the temperature values are corrected, the matrix is subjected to a rectification algorithm. The core algorithm of image rectification is the plane projective transformation, ruled by equations 2 and 3:

$$X = \frac{a_0 + a_1x' + a_2y'}{c_1x' + c_2y' + 1} \quad (2)$$

$$Y = \frac{b_0 + b_1x' + b_2y'}{c_1x' + c_2y' + 1} \quad (3)$$

Where X, Y (Fig. 5) are the rectified (real) coordinates of the element, x' and y' are the pixel coordinates in the image, and $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_1, c_2$ are the mathematical coefficients of the projective matrix that encloses rotation, scale, translation and perspective. In order to solve the system of equations, the knowledge of the coordinates of 4 points in the object is the only requirement for the determination of this projective matrix, as well as the calibration parameters of the camera. The following figure (Fig. 5) outlines the in-house tool developed for the rectification of IR images.

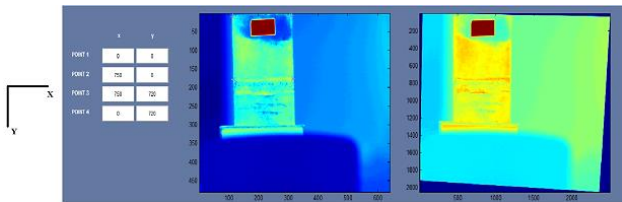


Fig. 5. Image rectification: from left to right: object coordinates (coming from the measurement of two planar dimensions: length and width), image points, and rectified image. Example illustrated using the first welded union. The rectangle in red is a mark used as scaling element and topographic support. At the left of the image, an indication of the X and Y axis established for the application of the rectification algorithm

Once IR images are rectified, isotherms are plotted using the image matrix for the classification of the temperature values in groups. Isotherms are obtained through the implementation of a MATLAB® algorithm of contour lines. It implements a contouring algorithm: it first determines the number of contour levels to draw, and their values. The algorithm scans the temperature matrix and compares the values of each block of four neighboring elements in the matrix to the contour level values established. If a contour level is placed within a cell, the algorithm performs a linear interpolation to locate the point at which the contour crosses the edges of the cell. The algorithm automatically links point to point to produce a segment of a contour line. These segments form the contour lines. Quality depends mainly on the number of levels established. When the number of levels is increased, the difference of temperature between isotherms is reduced and the thermal representation is smoother. However, a large number of lines could difficult the identification and measurement of the defect.

In this way, knowing the temperature value for each pixel, the algorithm performs a correlation between similar temperatures values, making groups of pixels according to their temperature values. Each group is plotted with a different color. With this procedure the contour of the defects is detected by thermal contrast with the surface without defect, since they are embodied within closed isotherms. When defects are detected, the submatrices of each defect are extracted for deeper analysis. The number of levels for each submatrix is established in 5, this number has been experimentally established to extract enough information from the contour plot to the characterization of the crack. The objective of this procedure is to identify areas with similar temperatures as those of the defect in order to detect cracks, study the different zones that constitute the cracks and their geometry and measure them. Measures obtained with this procedure are compared with measures derived from a high-resolution RGB image (obtained with a DSLR camera, Canon EOS 500D, with a 50 mm macro lens) which has also been rectified with a photogrammetric algorithm. Since RGB images exhibit more quality (in terms of pixel size and radiometric resolution) than IR images, the

accuracy assessment of IR analysis has been performed based on the RGB image, which performs as “ground truth”.

For each crack, the availability of isotherms provides knowledge of the contour, which would be difficult to determine otherwise given the limited temperature difference between the surface and the defect. The morphology of the contour lines (isotherms) allows the establishment of the symmetry axis of the crack, which helps in the deduction of the propagation line of the crack. In addition to this, the direction line can be defined through the analysis of the isotherms, since the deepest curve of the isotherms indicates the line of maximum slope, which establishes the crack orientation line and could be interpreted as a possible direction of propagation of the crack (Fig. 6). If we focus on the latter, the definition of the direction line should be supported by the extraction of more isotherms for the sake of precision; the number of extra isotherms depends on the complexity of the defect to be defined. That is, for the correct definition of the direction line of the toe crack the optimum number of contour levels is 20 (that is, for the correct definition of the direction line of the toe crack the optimum number of contour levels is 20 (is the experimentally calculated number of levels to generate a sufficient number of points to define the orientation of the crack), whereas the longitudinal crack can be defined with only 10 isotherms. This difference is because the information available presents more resolution in the case of the toe crack than in the case of the longitudinal crack. This methodology makes possible the prediction of a possible direction of crack propagation in the surface monitored with the IR camera.

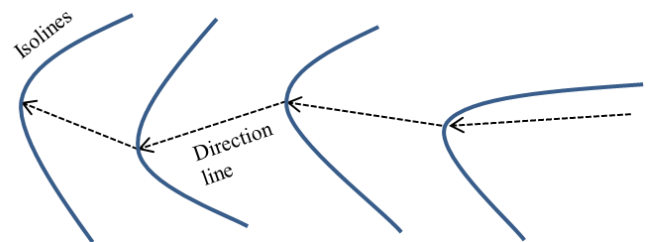


Fig. 6. The union between curves of the isotherms (isotherms in the thermographic image) defines the direction line or the orientation of the crack.

When isotherms are plotted, direction lines are drawn through the sequential union of the inflexion points for each isotherm (Fig. 6). The line defining the main direction of the crack and thus the line which supports the possible prediction of crack propagation will be determined from the average of direction lines sequentially extracted (Fig. 7).

3. EXPERIMENTAL RESULTS

The methodology presented consists on the rectification of the IR image with the aim at the exploitation of the geometric information within the image. Then, the spatial distribution of temperatures is analyzed through isotherms for the detection of defects associated with the welded union; if defects are present, the corresponding submatrices are extracted from the image, for deeper analysis of the temperature distribution within the defect. Each submatrix is subjected to the plotting of isotherms towards the study of the contour of the cracks and the analysis of the corresponding orientation line.

Following this procedure, a toe crack [1] in the base material is detected in Weld 1, propagating in the longitudinal direction, parallel to the chord axis. A little notch (in the order of $10^{-1} mm$) can be visualized by standard visual inspection. A longitudinal crack [1] on the base material is detected in Weld 2. This also presents a little notch (in the order of $10^{-1} mm$) visible through standard visual inspection under certain lighting conditions.

The geometric characterization of the cracks is performed through the application of the rectification algorithm and the extraction of the submatrix corresponding to the toe crack (Weld 1) and the longitudinal crack (Weld 2). After this, contour functions are applied for morphological analysis.

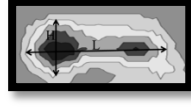

3.1. Dimensional measurement

The measurement of cracks is important to evaluate the fault from the point of view of fracture mechanics. For example, for the implementation of Griffith, Orowan or Irwin criteria [24] the knowledge of the length of the cracks and their width is required.

The measurement of the detected cracks (length, L , and width, H) is performed after the application of the rectification algorithm to the IR images where isotherms have been drawn. Measurements are shown in Table 3.

The ratios between width and length are quite different because the toe crack is propagated into the material and the longitudinal crack is propagated in a plane parallel to the surface. As a result, both the morphology and ratio between width and length are different in the thermographic images, and this criterion important for the differentiation between the two types of crack and for future predictions of failure.

Table 3. Measurements obtained from the processing procedure

	Processed IR image	Length (L) (mm)	Width (H) (mm)
Toe crack		2.9	0.7
Subsurface crack		2.8	0.2

3.2. Crack orientation line

The deepest curves of the isotherms are joined to establish the direction line of each crack. When a contour plot is used for the analysis of the toe crack, two incisions are located in the crack, which can be clearly seen in the images (Fig. 7, Fig. 8-c). This is an intrinsic feature of the toe crack because this defect penetrates into the metal through different incisions in the surface. Thus, differentiating this crack from other types of crack is possible through the contour plotting to obtain the isotherms.

There exists a high probability that the crack is propagated through a propagation plane that includes the straight line joining the two incisions. Given the importance of the position of the crack and its propagation in the integrity of the plaques, the crack is analyzed considering the plaque in its totality (global orientation of the crack in Fig. 7). As an example, a crack following the edges of the cord implies the probable fracture of the union, whereas a crack crossing the cord from one side to the other would not be considered problematic since the thickness of the area is the greatest within the plaques. What is more, the relative position of the crack and the rotation axis of the plaque subjected to fatigue actions would determine the shape of the final fracture. Consequently, the global direction line of each crack can give information to predict the future fracture plane of the welded object (Fig. 7).

The morphology of the longitudinal crack in weld 2 is more homogeneous and isotherms are not closed around the incisions (as is the case of the toe crack), but surround the entire crack (Fig. 7). Consequently, the axis of symmetry is more evident because the isotherms present a clear trend, constituting a probable direction of crack propagation. Again, the location and direction of the orientation line of the crack must be analyzed with respect to the weld position in order to be able to evaluate the effect of the crack on the

physical integrity of the welding (Fig. 7). The toe crack presents 1° orientation with respect to the horizontal line of the plaque, while the longitudinal crack presents 9° with respect to the horizontal line

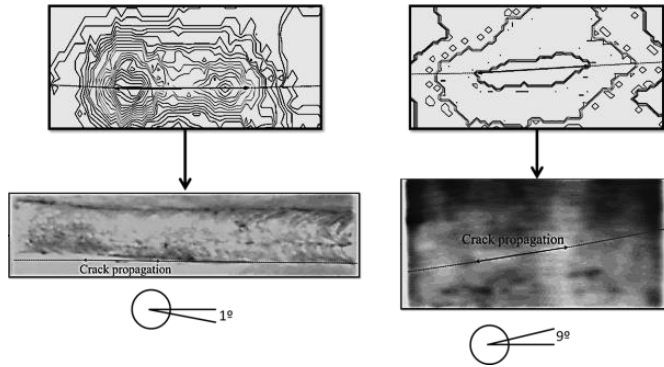


Fig. 7. Sequence to obtain a global crack orientation line. Left: toe crack orientation line (Weld 1), obtained by processing with 20 contour levels: detailed analysis of the crack followed by the study of the crack within the plaques on their entirety. Right: processing is performed with 10 contour levels: the shape of the longitudinal crack (Weld 2) is simpler than the shape of the toe crack, consequently requiring a lower number of levels for the deep analysis of the temperature distribution.

4. DISCUSSION

4.1. Quality of the detection of defects.

The differentiation process between a crack and a similar element like a corrosion point (Fig. 8) is possible for a human inspector, but it can present problems in a processed IR image (Fig. 8-b), where the differentiation between a crack and a false positive could present problems if not done according to the morphology and thermal features. When contour line post-processing is applied, the crack zone presents a determined morphology: isotherms present a quasi-elliptical geometry and the temperature presents a several increment into the crack (Fig. 8-c). In the case of a corrosion zone (zone which can be easily confused with a crack), there exist two features for its differentiation with a crack (avoiding the possibility of a false positive). On the one hand, the morphology of the isotherms: on the crack zone, isotherms present a quasi-elliptical form while isotherms on a corrosion zone are not as homogenous as on a crack zone and present a more random direction (Fig. 8-d). On the other hand, the thermal features of the two defects zone (crack and corrosion) are opposite: the difference of temperature between the defect and its adjacent zone is higher for the crack than for the corrosion. This fact is shown by the existence of a higher density of isotherms product of the higher thermal contrast (Fig. 8-c,d).

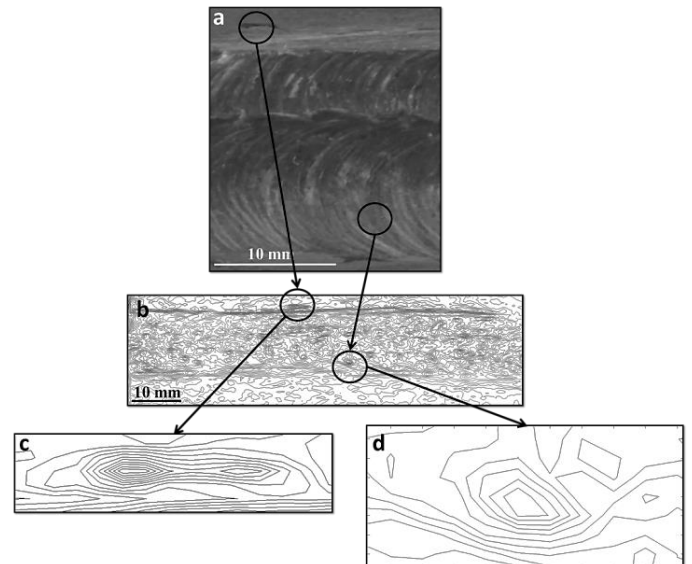


Fig. 8. Differentiation between crack and corrosion defect. (a) Up-toe crack, down-corrosion zone on the weld. (b) when processing is applied, both flaws look alike. (c, e): The disposition of isotherms is different for each defect: in the toe crack, isotherms are closer around the defect than in the rest.

4.2. Quality of the metric analysis.

2D macro-photogrammetry is an assented measuring methodology; it provides good accurate results for surface measurements due to the quality of the photographic sensor (sensor size, resolution) and the distortion parameters of the lens. The quality of the geometric measurements performed is evaluated through the comparison between the geometric values obtained with this method and the photogrammetric dimensions of the cracks. The photogrammetric dimensions of cracks are extracted from a RGB high-resolution image using a photogrammetric rectification technique. This image has a lower Ground Sample Distance (GSD) than the rectified IR image (0.017mm and 0.1 mm, respectively). This is one of the reasons why the accuracy of the photogrammetric measures is better for this study, and the reason it has been chosen to validate the quality of the analysis.

The analysis of precision consists on the determination of the error rate (ϵ) using the difference between RGB (M_{RGB}) and IR measurements (M_{IR}). The relationship between these is: $M_{RGB} = (1 + \epsilon)M_{IR}$. Results are shown in Table 4:

Table 4. Measurement accuracy. Error in the measurement is calculated as the percentage difference between RGB and IR measurements. The error is calculated in absolute value (mm) and in relative with respect RGB measures.

Quality analysis (ϵ): absolute difference between RGB and IR measurements (mm and % of RGB measures)		
	Length (L)	Width (W)
Toe crack	0.03 (1.11%)	0.21 (29.94 %)
Subsurface crack	0.07 (2.5%)	0.128 (64.06 %)

For both cracks, the error is larger in the measurement of width than in the longitudinal measurement. As the longitudinal axis of both cracks is approximately oriented in the x direction, it could be concluded that the error in the y direction measurements is much larger than in the x direction. This could be due to two reasons: on one hand, the strong relationship between length-width of the cracks (being higher in the longitudinal crack than in the toe crack, which makes the measurement error greater for the first crack than for the second). On the other hand, the greater roughness in the transverse direction (y) compared with the longitudinal direction (x) can increase the emissivity difference in the area and increase the diffusivity of the emitted infrared radiation. This would lead to the overvaluation of the size of the crack in the transverse direction in the IR images.

4. CONCLUSIONS

The method proposed in this paper allows the fast and simple assessment of the morphology of different cracks (toe crack and longitudinal crack) in welds, especially when compared to other nondestructive inspection techniques such as visual inspection, magnetic particles and liquid penetrant inspection. The main advantage of the methodology is that it makes possible the analysis of defects that could otherwise be difficult to detect by a human inspector: for example, the longitudinal crack is extremely difficult to detect with a simple visual inspection due to its reduced thickness and only a qualified inspector assisted with optimal lighting could make an accurate detection.

The application of an analysis with IR camera and subsequent image rectification allows the geometric characterization of the defects facilitating their classification according to the standards [1, 2]. This paper presents the case of two different cracks that are detected and whose differentiation could be difficult by visual inspection, but can be differentiated using the method proposed. The detection technique is validated through the comparison

with a clear false positive (a corrosion zone in the weld) through the 3D representation of temperature pixel values. In addition, the method allows the dimensional and morphology analysis of the defects with a maximum accuracy in order of tenths of a millimeter. This level of accuracy is very difficult to achieve with the traditional in-situ measuring instruments used by welding inspectors and with other methods based on image tests that need good lighting or more complex and bulky equipment.

The correspondence between measures in the IR image and RGB images is better for the longitudinal measures (length of the crack) than for the transverse measurements (width of the crack). In the latter, the accuracy of the method decreases significantly, possibly due to the strong relationship between length and width of the cracks and the higher roughness of the material in the area regarding the material without defect. However, one of the advantages over RGB method is the possibility of measuring under bad lighting conditions (without good light conditions, the photographic image is difficult to obtain and to process). Another advantage is the higher contrast in IR image between defect and non-defect zone (this is an important advantage if the automation of the cracks identification is pretended).

The contour line post-processing allows the establishment of isotherms for each pixel in the IR images, making possible the 2D plotting of the cracking zone, facilitating the aforementioned characterization and allowing the analysis of symmetry and confluences of the contour lines (isotherms) in order to predict the possible direction of fracture or crack propagation. Apart from characterization, the orientation line of the crack can be used to assist in the prediction of failure if its position regarding the plaques in their entirety is considered.

The IR inspection system is easy to implement in industrial processes due to its versatility, its lightness and the possibility to integrate in robots. The contour line processing is an algorithm that could be easily automated. The patterns of different cracks can be automatically studied through the morphology and density of isotherms. Thus, the proposed technique is easy to automate and implement in any industrial process and, in this way, detect and characterize cracks instantly during the manufacturing processes, performing inspection during operation of the machines

Nonetheless, the main limitation of the technique (which allows an accurate measurement of the surface plane in the longitudinal direction as well as the detection of different superficial zones in the depth plane), is that the measurement in the transversal direction does not present enough accuracy compared with the longitudinal measures. Normally, for analyzing the propagation of crack, the longitudinal direction is more representative than transversal

direction but the mentioned difference of actuary between the two directions could be a problem when the inspector intends to measure the width or when the objective of application of technique is to establish the relationship between width and longitude of the crack. The solution of this accuracy problem for this technique will be always the objective of future research.

Acknowledgments

Authors would like to thank to the Consellería de Economía e Industria (Xunta de Galicia), the Agencia de Innovación y Financiación Empresarial de Castilla y León (ADE), the Ministerio de Economía y Competitividad and CDTI (Gobierno de España) for the financial support given through human resources grants (FPDI-2013-17516), and projects (IPT2012-1092-120000, ITC-20133033, ENE2013-48015-C3-1-R). All the programs are cofinanced by the Fondo Europeo para el Desarrollo Regional (FEDER)

Authors would also like to thank Prof. Antonio Collazo, from the University of Vigo, for his kind collaboration and contribution to the paper.

References

- [1] Welding and allied processes - Classification of geometric imperfections in metallic materials - Part 1: Fusion welding. European Committee for Standardization. EN-ISO 6520-1:2007 (2007).
- [2] Welding. Fusion-welded joints in Steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded). Quality levels for imperfections (ISO 5817:2003 corrected version.2005, including Technical Corrigendum). European Committee for Standardization. EN-ISO-5817: 2009 (2009).
- [3] Meola C, Squillace A, Memola F, Minutolo C, Erica R. Analysis of stainless steel welded joints: a comparison between destructive and non-destructive techniques. *Journal of Materials Processing Technology* 2004; 155:1893–99.
- [4] Barazzetti L, Scaioni M . Crack measurement: Development, testing and applications of an automatic image-based algorithm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 2009; 64: 285-96.
- [5] Griffith AA, 1920. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophy Transactions Royal Society* 1921; 221:163-98.
- [6] Easterling K, Introduction to the Physical Metallurgy of Welding. 2^o ed: Butterworth-Heinemann; 1992.
- [7] Meola C , Carlomagno GM, Squillace A, Vitiello A. Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography. *Engineering Failure Analysis* 2006;13: 380–8
- [8] Oswald-Tranta B, Maier A, Schledjewski R. Defect depth determination in a CFRP structure using TSR technique. *The 12 International Conference on Quantitative Infrared thermography*, Burdeos, 2014.
- [9] Vavilov V. Thermal NDT: historical milestones, state of-the-art and trends, *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 2014;11: 66-83.
- [10] Ana YK , Kimb JM , Sohn H. Laser lock-in thermography for detection of surface-breaking fatigue cracks on uncoated steel structures. *NDT & E International* 2014;65: 54–63
- [11] Broberg P. Surface crack detection in welds using thermography, *NDT&E International* 2013;57: 69-73.
- [12] Rodríguez-Martín M, Lagüela S, Gonzalez-Aguilera D and Arias, P. Cooling analysis of welded materials for crack detection using infrared thermography. *Infrared Physic and Technology* 2014; 67: 547–54.
- [13] Scruby CB, Drain LE. *Laser ultrasonic: techniques and applications*. London: Taylor and Francis; 1990.
- [14] Pan M, He Y, Tian G, Chen D, Chena D, Luo F. Defect characterization using pulsed eddy current thermography under transmission mode and NDT applications, *NDT & E International* 2012;52: 28-36.
- [15] Yang B, Huang Y, Cheng L. Defect detection and evaluation of ultrasonic infrared thermography for aerospace CFRP composites. *Infrared Physics & Technology* 2013; 60:166–173
- [16] Keo SA, Brachelet F, Breaban F, Defer D. Steel detection in reinforced concrete wall by microwave infrared thermography. *NDT&E International* 2014; 62:172–7
- [17] Xua C, Xie J, Chen G, Huang W. An infrared thermal image processing framework based on superpixel algorithm to detect cracks on metal surface. *Infrared Physics & Technology* 2014; 67:266–72
- [18] Armesto J. Automatic thermographic and RGB texture of as-built BIM for energy rehabilitation purposes, *Automation in Construction* 2013;31:230–40
- [19] González-Aguilera D, Lagüela S, Rodríguez-González P, Hernández-López D. Image-based thermographic modeling for assessing energy efficiency of buildings facades. *Energy and Buildings* 2013;65: 29–36
- [20] Lagüela S, Díaz-Vilariño L, Armesto J, Arias P. Non-destructive approach for the generation and thermal characterization of an as-built BIM, *Construction and Building Materials* 2014;51:55-61.
- [21] González-Jorge H, Lagüela S, Krelling P, Armesto J, Martínez J. Single image rectification of thermal images for geometric studies in façade inspections, *Infrared Physics & Technology* 2012;55: 421-26.
- [22] Luhmann T, Robson S, Kyle S, Harley I. *Close range photogrammetry: Principles, Methods and Applications*. Whittles Publishing. Caithness; 2014.

[23] Lagüela S, González-Jorge H, Armesto J, Herráez J. High performance grid for the metric calibration of thermographic cameras. *Measurement Science and Technology* 2012;23 doi:10.1088/0957-0233/23/1/015402

[24] Weertma J. Fracture Mechanics. A unified view for Griffith, Orowan Irwin cracks. *Acta Metallurgical* 1977; 26;1731-28.

Sección III: La técnica fotogramétrica aplicada a la caracterización y evaluación de materiales soldados.

Capítulo 5: Procedimiento macro-fotogramétrico para la inspección de calidad de soldaduras a través de la reconstrucción de modelos tridimensionales.

El presente capítulo contiene el artículo *Macro-photogrammetric Quality Inspection Procedure for Three-dimensional Reconstruction of Welds from Multiple Images*, publicado en mayo de 2015 en la revista internacional de impacto (JCR) *Optics and Laser Technology*.

La fotogrametría de objeto cercano (close-range photogrammetry) es una técnica que engloba una serie de métodos de medición e interpretación de imágenes fotográficas cuyo objetivo principal es la reconstrucción tridimensional de modelos en 3D [20]. En el proceso de reconstrucción de objetos intervienen todos los parámetros propios del proceso de generación de imagen digital (fuentes de luz, propiedades de la superficie de los objetos, tecnología de los sensores, tecnologías auxiliares de la cámara fotográfica, características de la lente etc.). En la técnica de la fotografía digital las propiedades radiométricas (intensidad, distribución del color, niveles de gris, etc.) son registradas para cada punto de la imagen, posibilitando la captura de la realidad visible en un documento 2D (imagen) compuesto por una matriz de tantos elementos como píxeles tenga el sensor y que permitirá aproximar la realidad según la óptica captada por la lente de la cámara. En la técnica fotogramétrica se pretende resolver el proceso inverso yendo un paso más allá: a partir de las imágenes 2D capturadas de un objeto o escena, conseguir su reconstrucción métrica tridimensional. De esta forma se podrá disponer de los valores geométricos para cada punto de la imagen (coordenadas), posibilitando su análisis dimensional y/o su reconstrucción tridimensional. De esta forma la adquisición de la imagen es un primer paso a partir del cual se resuelve el posicionamiento (espacial y angular) de las mismas (segundo paso), y finalmente la reconstrucción tridimensional del objeto y/o escena (tercer paso).

La aplicación de la técnica fotogramétrica de rango cercano tiene un carácter transversal, destacando su aplicación como técnica de medición y modelado en el ámbito de la ingeniería (ingeniería inversa, control de calidad, metrología, simulaciones espaciales, medida de deformaciones en estructuras y elementos mecánicos, etc.), arquitectónico (mediciones de fachada, documentación histórica de edificaciones, medida de deformaciones, etc.) , biomédico (medida de deformaciones óseas, cirugía plástica, ergonomía, análisis microscópico), forense (reconstrucción de accidentes, modelización de escenarios de crímenes, biometría, etc.). Sin embargo, no es el único sistema que posibilita la medición precisa de objetos. Según Luhmann [20], los diferentes métodos de medida podrían clasificarse en función del tamaño del objeto a

medir, manteniendo dicho tamaño una relación directa con la precisión que aporta el método concreto. Algunos de ellos -ordenados de menor a mayor tamaño de objeto - son los siguientes: interferometría, metrología industrial, fotogrametría industrial, teodolito, láser escáner, topografía taquimétrica, GPS, fotogrametría aérea y sensores satelitales.

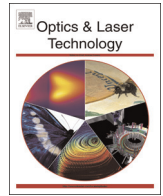
En el presente capítulo se pretende aplicar un procedimiento fotogramétrico de rango cercano a las uniones soldadas que permita la generación de nubes de puntos densas con precisión submilimétrica. Con este procedimiento se pretende sustituir la labor metrológica (basada en instrumentación metrológica tradicional como, por ejemplo, los micrómetros) que el inspector de soldadura tiene que realizar en el lugar de la instalación de la unión; ya que, actualmente, la normativa de calidad requiere en muchos casos el desplazamiento del inspector al lugar de la instalación a fin de realizar un pormenorizado estudio superficial de las soldaduras y analizar sus características geométricas para comprobar que estas se adaptan a la normativa de calidad.

Cualquier defecto susceptible de ser permitido tiene que ser medido y valorado conforme a las reglas establecidas en los estándares de calidad a fin de motivar tal decisión. Para ello, el inspector cuenta con herramientas metrológicas diseñadas para soldaduras. El uso de estas herramientas en ocasiones acumula demasiado error, bien por su naturaleza (ser una técnica manual), bien por el pulso o por movimientos involuntarios del inspector o bien por la dificultad de acceso a las soldaduras instaladas en determinados emplazamientos de difícil acceso o en determinadas posiciones. Por esta razón, se ha detectado la necesidad de establecer un procedimiento que permita recrear un modelo tridimensional desde imágenes fotográficas que fácilmente puedan ser tomadas en el lugar de la instalación por un operario formado en la técnica, el cual, una vez hechas las tomas, puede enviarlas al ingeniero que, desde su oficina y sin necesidad de desplazarse, recreará el modelo tridimensional sobre el que poder tomar las mismas medidas que en el lugar de la instalación.

En el artículo se detalla todo el procedimiento, desde la adquisición de datos hasta los diferentes algoritmos de reconstrucción y mallado de nubes de puntos utilizados. Para el procesado se utiliza la aplicación PW-Photogrammetry Workbench [21], desarrollada por el Grupo de Investigación Reconocido TIDOP y cuya propiedad intelectual está registrada por la Universidad de Salamanca.

Finalmente y tomando como base el modelo 3D de la soldadura, se aplica un análisis dimensional de la misma con un doble propósito: (i) controlar la sección de la soldadura para detectar defectos geométricos. Este procedimiento se aplica a un caso de soldadura real que posee diferentes imperfecciones geométricas que son analizadas según los criterios de calidad a fin de demostrar la aplicación real de la técnica. (ii) Caracterización geométrica tridimensional de una de las fisuras (toe crack) presente en las soldaduras analizadas en los capítulos anteriores. La novedad en este punto, con respecto de los capítulos anteriores, radica en la posibilidad de usar la técnica macrofotogramétrica para medir en el plano de profundidad, pudiéndose llegar a medir

profundidades de hasta centésima de milímetro. Con este procedimiento se puede hacer una caracterización global de la fisura en todas sus dimensiones abarcables desde la superficie, siendo ello de especial ayuda para el inspector por los motivos expuestos anteriormente.



Procedure for quality inspection of welds based on macro-photogrammetric three-dimensional reconstruction



M. Rodríguez-Martín^{a,*}, S. Lagüela^{a,b}, D. González-Aguilera^a, P. Rodríguez-Gonzálvez^a

^a Department of Cartographic and Land Engineering, University of Salamanca, Polytechnic School of Ávila, Hornos Caleros, 50, 05003 Ávila, Spain

^b Applied Geotechnologies Research Group, University of Vigo, Rúa Maxwell s/n, Campus Lagoas-Marcosende, 36310 Vigo, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 February 2015

Received in revised form

8 April 2015

Accepted 10 April 2015

Available online 14 May 2015

Keywords:

Weld

Nondestructive testing (NDT)

Photogrammetry

ABSTRACT

The results of visual inspection of welds depend on the visual ability of inspector. With the optical macro-photogrammetric low-cost procedure proposed in this paper only a digital single lens reflex camera with a macro-lens and a photogrammetric reconstruction software developed by the authors are needed for the generation of accurate and scaled 3D models of welds directly from images taken by a non-expert operator. This result eliminates the need of an in-situ assessment by the inspector, since it can be done directly using the 3D models generated, which the inspector can consult for the performance of all the measurements required by international standards.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Within the defectology of materials, the study of the cracking process presents enormous importance in order to ensure the safety of structures, vehicles and machines. The principal innovation in the analysis of crack deformations occurred during World War I [1], when the engineer Alan Arnold Griffith established a new discipline within the mechanical engineering called Fracture Mechanics [2]. The cracking process is dangerous because it may end with the failure of the structural element and thus, a full collapse of the structure with drastic consequences. Therefore, the assessment and characterization of the type of crack is important for the prediction of their propagation direction and the measurement of their rate.

The visual inspection (VT) of welds is an extremely important test, applied to the detection of superficial imperfections and flaws, which are the most frequent defects in welds [3]. VT is important for overviewing the state of the weld and making an early detection of possible defects and imperfections. A welding inspector is frequently an engineer with vast knowledge and experience in welding processes and material engineering who has passed different examinations in order to get a welding inspector certificate [4]. The inspector mandatorily has to visit the welding installations to test the welds and measure them, which entails an economic investment.

There are different advanced techniques to evaluate the quality of welds and/or detect and measure cracks and other flaws with more accuracy than with tools commonly used by inspectors (welding gauge kits for inspection) on VT, some of them are more traditional like ultrasounds [5], electrical resistance [6] and other more novel like scanning cameras [7], laser [8] and 2-D stereo imaging [9]. There are also image techniques that allow the study of propagation and behavior of cracks like the called Digital Image Correlation (DIC) [10]. Direct optical crack observation is usually the most frequent technique in a first inspection.

Currently, close range photogrammetry is applied to numerous fields of industry and engineering, the main fields being the automotive manufacturing (control of materials, adjustment of tooling, etc.), aeronautic industries (antenna measurements, alignment, adjustment of mounting rigs, etc.), wind energy systems (water dams, plants, etc.) [11] and naval engineering [12]. Recently it has also been used to study the strength of materials in the structural industry [13], deformations [14] and welds [15]. Furthermore, photogrammetry has been longtime used as an instrument to make microscopic measures [16]. Endoscopic photogrammetry with two identical and opposite cameras with the symmetry edge aligned has been used to characterize joints in pipes [17].

On the opposite, the photogrammetric technique has also been used supported on macro and microscopic lens to model and measure little objects. Gallo et al. [18] used a digital DSLR camera with a macro-lens to obtain highly accurate photogrammetric models of complex geometries from a large number of images (between 432 and 1296). Atsushi et al. [19] developed a system

* Corresponding author. Tel.: +34 920353500.

E-mail address: ingmanuel@usal.es (M. Rodríguez-Martín).

with a digital microscope lens for the reconstruction of a 3D micro model as a triangular mesh using several 2D images of the object taken from different points of view. With the macro-photogrammetric technique proposed in this paper, 3D modeling of welds is possible. Thus, the in-situ visit of the engineer is not necessary since the visual inspection can be performed by the inspector directly from the office, by analyzing a high-resolution and metric 3D model that is automatically generated from images acquired with a DSLR camera by any worker of the welding installation.

The measures for quality analysis on VT have been performed by using different tools (caliper, micrometer or welding gauge kits designed for this purpose) but their use always requires the

presence of the inspector (with the obvious drawback of the displacement of the engineer inspector to the installation site) and usually presents high error rates. The success of the measurements frequently depends on the skill of the inspector and the accessibility to the weld. Furthermore, obtaining measures of the depth of the crack is not always possible due to its frequent small dimension, the heterogeneity of the different areas into the crack and the error of the in-situ traditional measuring instrument. For this reason, in this paper, authors propose a new low-cost method where the only tool required is a commercial digital single lens reflex (DSLR) camera with a macro-lens and a self-proprietary software developed by the authors [20], which allows the reconstruction of a scaled 3D model. As a result, a detailed inspection of the weld, including the detection of its surface imperfections and flaws together with its discontinuities is allowed, enabling an easy and automatic documentation and digitization of the quality inspection project (Fig. 1) consisting on the models generated for the different welds present in the inspected site.

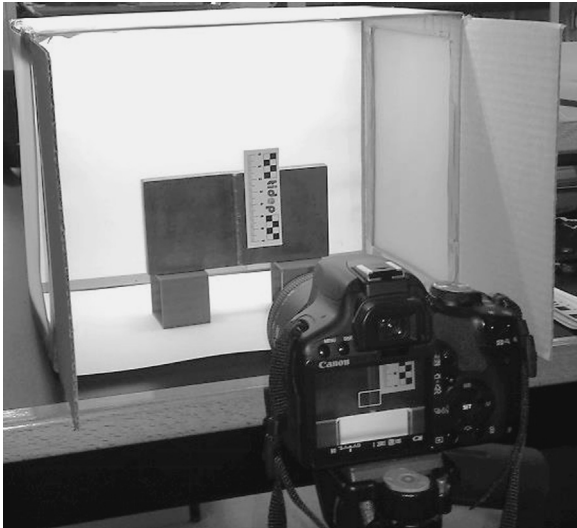


Fig. 1. Data acquisition procedure. Camera-specimen configuration.

2. Materials and methods

2.1. Materials

Specimens consist of welded planar steel plaques (Table 1). The welding procedure used is Tungsten Inert Gas welding (TIG). This kind of specimens has been chosen due to the high usability of both on the material and the welding procedure in the structural and mechanical fields. The specimens present a plane butt-welding, which has been chosen due to its higher and more complex surface and curvature than other welding dispositions like T-welding. In this way, if the technique is validated with a more complex 3D geometry consisting of a complete planar surface, the technique will also be validated for other welding dispositions with simpler geometry.

Table 1
Description of specimens used for the experiment.

Weld	Description	Image
1	Low carbon steel (thickness 7.5 mm) which shows butt-welding with edge preparation in V.	
2	Low carbon steel (thickness 10 mm) which shows butt-welding with edge preparation in V.	

A commercial DSLR camera Canon EOS 500D (Table 2) with a Sigma 50 mm macro-lens is used. A tripod is used for the stabilization of the camera given the high exposure times required (Fig. 1). In order to homogenize and optimize the illumination conditions, two halogen lamps (50 W each one) are used. A box with white and translucent walls is used for obtaining a diffuse light on the specimen: light falls smoothly on the specimen placed inside the box, in such a way that reflections and deep shadows are avoided. Since the objective is to provide scaled models, a rigid magnetized scaled sticker is placed close to the specimen (Fig. 1).

Finally, the photogrammetric process developed takes advantage of the software called Photogrammetry Workbench (PW) [20]. PW provides both non-expert and expert users an easy-to-use platform that incorporates the recent developments in photogrammetry and computer vision, for their use in complex scenarios and objects.

2.2. Methodology

The method developed for 3D reconstruction should be understood with regard to the accomplishment of two main steps: on one hand, the automatic determination of the spatial and angular position of each image, regardless the order in which the images were acquired and without requiring initial approximations; and on the other hand, the automatic computation of a dense 3D point cloud, so that each pixel of the image renders a specific point in the weld model.

From a general point of view, the originality of the approach proposed lies on the ability of combining photogrammetric and computer vision algorithms adapted to the reconstruction of welding models, opening the use of these techniques to non-experts in these disciplines and not needing the presence in-situ of the engineer (inspector). From a specific point of view, the method developed is based on a flexible and specific protocol that ensures completeness and quality of the final model. Additionally, various robust algorithms have been incorporated to the workflow for the extraction, correspondence and orientation of images with the aim at deriving a dense point cloud under complex geometric and lighting conditions. What is more, and in contrast with most photogrammetric software, camera calibration is not necessary since the developed tool incorporates a self-calibration process. However, if the user decides to make his own camera calibration, these parameters can also be added as fixed and known parameters in the camera orientation step.

The following diagram (Fig. 2) illustrates the different steps included in the development of the macro-image-based modeling method for the analysis of welds.

2.2.1. Data acquisition protocol

Image acquisition is the most important step for the success of the process proposed because it represents the input data for the generation of the 3D model. Prior image acquisition, the environment has to be exhaustively analyzed, paying especial attention

Table 2
Technical specifications of the photographic sensor with the macro-lens.

Canon EOS 500D	
Type	CMOS
Sensor size	22.3 × 14.9 mm ²
Pixel size	4.7 μm
Image size	4752 × 3168 pixels
Total pixels	15.1 MP
Focal length	50 mm
Closer focused distance	189 mm

to the lighting conditions since they determine the shooting strategy and the values of exposure, aperture and shutter speed of the camera. The aperture of the diaphragm is established between $f/8$ and $f/11$ (being 50 mm the focal distance of the macro-lens). The faces of the welds present different heights, which required the experimental adjustment of the diaphragm aperture in order to avoid defocused areas on the weld, which could affect the final model. Weld 1 presents greater height, so an $f/11$ aperture has been used while an aperture of $f/8$ has been used for Weld 2. For the crack model, an $f/9$ aperture has been used.

What is more, the shutter is established between 1/3 s to 3 s (the welds remains static at all times) in order to increase the exposure and achieve sufficient luminosity on the images. Lighting is optimized using the box with translucent walls described in Section 2.1. Good lighting conditions allow the establishment of the ISO sensitivity of the camera in the lowest value possible (ISO 100) in order to avoid unnecessary noise, which could be a problem in the processing phase.

Images must be taken following a semispherical trajectory centered in the object, keeping always a constant distance between the lens and the object (depth) (Fig. 3). Concerning the baseline (i.e. separation between the different camera stations), small baselines lead to a better integrity of the upper part of the 3D model due to the high similarity between images and an efficient search of correspondences. This part of the model presents especial interest since it hosts the main surface of the weld.

The quality of the model highly depends on the number of images. Five images (one master image and four slave images) could be enough to enclose the whole dimension and geometry of the object from a photogrammetric point of view. However, in our case more images (9–30) were taken in order to guarantee the quality of the models, increase the level of detail and to show the metrological potential of the macro-photogrammetric procedure. The general protocol for imagery acquisition should consider, at least, the following steps:

- The master image represents the origin of the coordinate system and should focus on the object of study. This image must be taken from the front and frame the main part of the object of study or, if possible, include the entire object.
- Two slave images are taken by moving the camera slightly in the horizontal direction (left and right).
- Two slave images are taken by moving the camera slightly in the vertical direction (up and down).
- The percentage of overlap (i.e. common area) between the slave and the master images must be high (80–90%). In addition, the slave images should be acquired by turning the camera towards

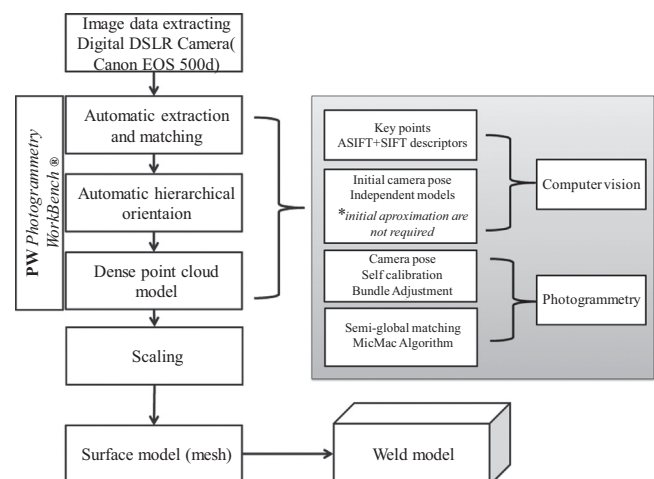


Fig. 2. Macro-photogrammetric procedure to generate the 3D model of welds.

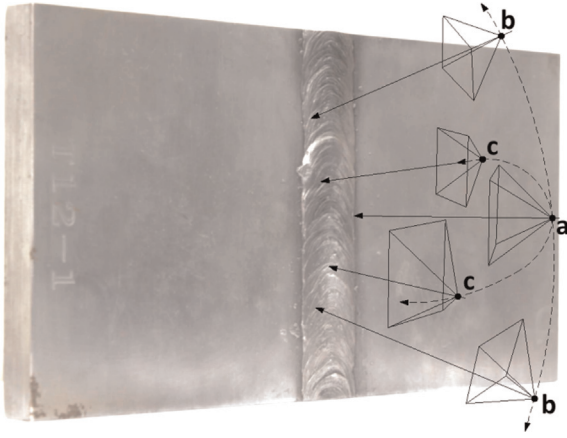


Fig. 3. Relative position between camera and weld during data acquisition phase. (a) Master image in central position, (b) vertical slave images and (c) horizontal slave images.

the center of the object providing some perspective, so that they assure the geometric reconstruction of any point on the object and thus the automatic reconstruction of the scene.

2.2.2. Correspondence between images

One of the most important steps in the implementation of this process is the extraction and correspondence of image features (i.e. keypoints), since they constitute the framework for the orientation process (i.e. the indirect resolution of the spatial position of the images), including the camera self-calibration (i.e. the estimation of the internal camera parameters and lens distortion). Given that the contextual conditions of the weld may have different depths (e.g. TT welds) and lighting conditions may not be homogeneous, classical algorithms based on intensity levels, such as Area Based Matching (ABM) [21] and Least Square Matching (LSM) [22], are useless.

In this regard, a variation of the SIFT algorithm (Scale Invariant Affine Transform), called ASIFT [23], has been introduced in order to take into account the perspective distortion effects appearing in the most extreme orientations of the camera (Fig. 3). As the most important improvement, ASIFT includes the consideration of two additional parameters that control the presence of images with different scales and rotations. In this manner, ASIFT can cope with images that have a high scale and rotation difference. The result is an invariant algorithm that considers the scale, rotation and movement displacement between images. The keypoints obtained by this detector, are matched based on the SIFT descriptor.

The adaptation of the ASIFT algorithm for its integration with robust strategies is implemented, avoiding wrong correspondences. These strategies are the Euclidean distance [22] and the Moisan–Stival ORSA (Optimized Random Sampling Algorithm) [24].

2.2.3. Hierarchical orientation of images

First, a pairwise orientation of images (i.e. independent models) is executed by relating the images to each other through the Longuet-Higgins algorithm [25]. Second, this initial and relative approach to the solution is used to perform a global orientation adjustment (i.e. bundle adjustment) between all images by means of the collinearity equations [26,27], which include the determination of the internal camera parameters ($f, x'_0, y'_0, \Delta x', \Delta y'$) or self-calibration, through the geometrical relation of the object coordinates (X, Y, Z) and the corresponding image coordinates (x', y') as functions of the interior ($x'_0, y'_0, \Delta x', \Delta y'$) and exterior camera parameters (X_{0c}, Y_{0c}, Z_{0c}), being r_{ij} the elements of the rotation

matrix and f the focal length of camera (Eq. (1)). Interior parameters are constituted by the correction terms (image distortions parameters) ($\Delta x', \Delta y'$) and the coordinates of the principal point (x'_0, y'_0).

$$\begin{aligned} x' &= x'_0 + f \frac{r_{11}(X - X_{0c}) + r_{21}(Y - Y_{0c}) + r_{31}(Z - Z_{0c})}{r_{13}(X - X_{0c}) + r_{23}(Y - Y_{0c}) + r_{33}(Z - Z_{0c})} + \Delta x' \\ y' &= y'_0 + f \frac{r_{12}(X - X_{0c}) + r_{22}(Y - Y_{0c}) + r_{32}(Z - Z_{0c})}{r_{13}(X - X_{0c}) + r_{23}(Y - Y_{0c}) + r_{33}(Z - Z_{0c})} + \Delta y' \end{aligned} \quad (1)$$

2.2.4. 3D dense point cloud generation

Starting from the robust orientation of images, a process for 3D dense point cloud reconstruction has been developed. It is based on the semi-global matching technique (SGM). In particular, the application of the projective equation [28] (Eq. (2)) makes possible the generation of a dense 3D model resulting from the determination of a 3D coordinate for each pixel [29]:

$$x_k = C(D(R_i(X_k - S_i))) \quad (2)$$

where X is the 3D point, x is the point corresponding to the image, R is the rotation matrix of the camera, S is the projection center of the camera, C is the function of internal camera calibration, D is the lens distortion function and the subscripts k and i are related to the point and image, respectively.

2.2.5. Scaling

The procedure used to scale the model scaling is as follows:

a. A magnetic rigid sticker is measured in laboratory with an electronic micrometer with centesimal of millimeters precision ($\epsilon = \pm 0.01 \text{ mm}$).

b. This rigid sticker is placed on the metal of the specimen within the field of view of the camera, where it remains fixed by the magnetic attraction phenomenon (scaling a non-magnetic material would be possible following the same procedure, but with the incorporation of adhesives to the rigid sticker). In this way, the sticker is captured in the images to serve as scale element and as topographic support in the calculation of the beam adjustment.

c. When the point cloud is generated, the image pixels that represent the sticker, and the measurements that were previously taken in the laboratory allow to solve the scale variation which is the point cloud, resulting in a model scaled model.

2.2.6. Surface generation

Although scaled dense point clouds provide important geometric information they do not constitute a surface model, being a disorganized set of coordinates (xyz) without topological information. A continuous surface model with a well-defined geometry is required for the measurement of distances and angles and the establishment of sections, thus allowing the subsequent manipulation with 3D design applications. A surface model is generated from each point cloud through a triangulation process. The approach followed for the triangulation in this work is the Poisson Surface Reconstruction [30] in which the octree level is established accordingly to the point cloud spatial resolution.

3. Experimental results

3.1. Global measurement of weld profiles: assessment of geometrical imperfections

Following the presented procedure, the focused distance is established in 380 mm (1:5 magnification). 28 Images are taken

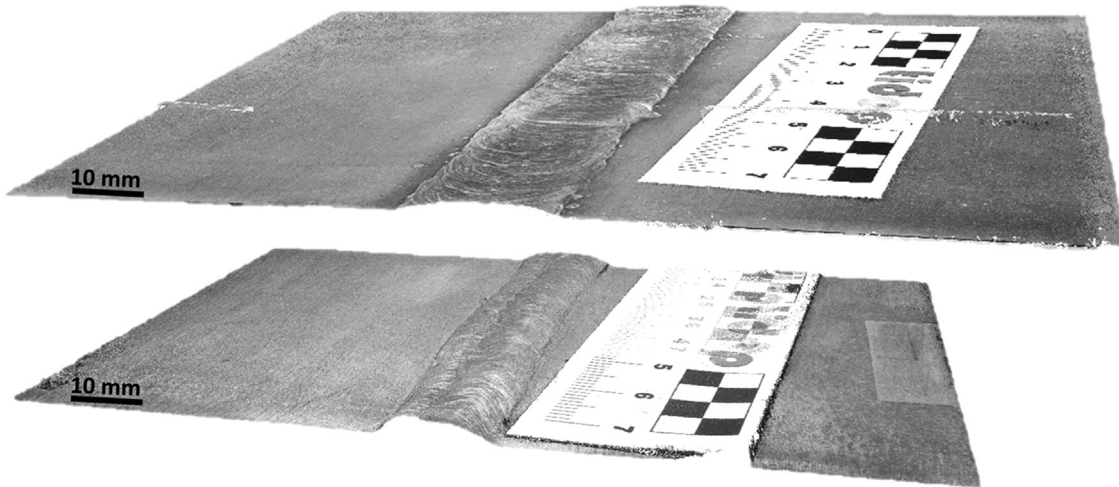


Fig. 4. (Top) 3D dense point cloud surface model for weld 2 (4,906,351 points). (Bottom) 3D dense point cloud surface model for weld 1 (5,690,129 points).

from weld 1, resulting in a model with 5,690,129 points ($677 \frac{\text{points}}{\text{mm}^2}$) (Fig. 4). Analogously, the 3D model of weld 2 is generated using 23 images; it includes 4,906,351 points ($350 \frac{\text{points}}{\text{mm}^2}$) (Fig. 4). The number of images is higher for weld 1 because a denser point cloud is needed in order to obtain a more detailed model suitable for the detection of a little crack while weld 2 is only tested in order to detect geometrical discontinuities, so, the level of detail required is lower. Both models provide enough information for the quality assessment of the weld, according to the quality parameters established in the norms [31,32].

A first analysis based on cross-sections is applied to the two welds in order to detect and locate surface imperfections. Cross-sections are successively and automatically plotted along the X axis direction of the welding (Fig. 5). The distance between sections could be freely chosen by the inspector according to the weld type, material, and defects or imperfections to be detected and measured. Experimental results have showed that an initial distance of 2.5 mm allows a good tradeoff between degree of detail on model and processing time.

The first evaluation consists of a dimensional analysis for each weld. In particular, once the sequence of cross-sections is obtained, different geometric features (with the support of auxiliary planes, segments, angles and curves) are measured and analyzed in order to assess the welds according to quality standards. Normally, a less thick face of the weld is a more conflictive zone because the section that absorbs strengths is smaller. In order to show the potential of the technique, the principal measurements and geometric relationships (Fig. 6) of the most conflictive sections of each weld are shown in Table 3 (these sections have been chosen following a first global assessment of the weld through the visual inspection of the 3D model).

The difference between flaw and imperfection is that the first is a deviation with respect to the correct geometry but which does not imply the automatic rejection of the weld, whereas the second is an unacceptable deviation due to the high danger generated by its presence [32]. So, the possible imperfections for each weld are analyzed according to quality standards (Table 4).

Four different geometrical imperfections typified in the standards [31] are evaluated using the 3D models of the welds and the resulting cross-sections: (1) excess of weld in the metal, (2) incorrect weld toe, (3) linear misalignment and (4) overlap. Quality standards establish three quality levels: B , C , and D level [31]. Evaluation regarding any of these levels depends on the thermal and mechanical stresses and the type and use of the

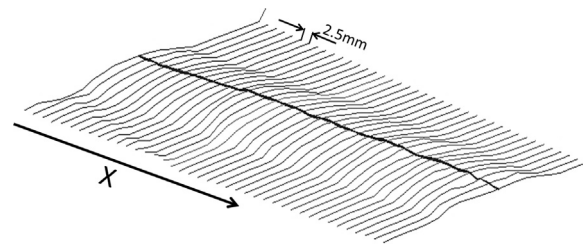


Fig. 5. Low spatial resolution cross-sections established each 2.5 mm along the X direction (axis of weld 2).

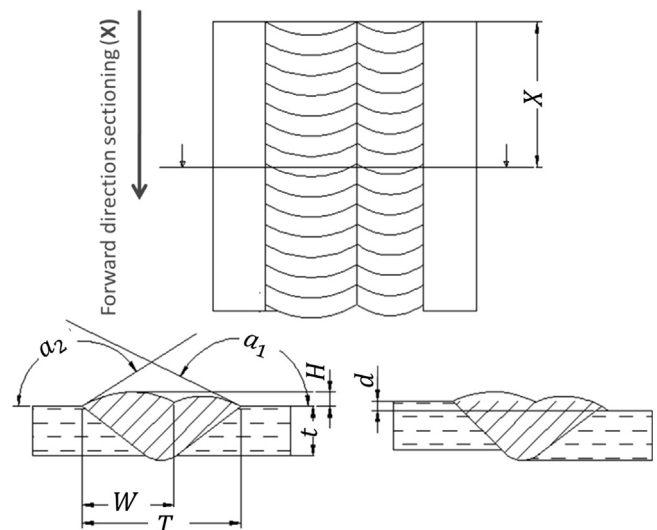


Fig. 6. (Top) Location (X) of the selected potentially conflictive section along the X axis direction. (Bottom) Main measurements and geometrical relationships to assess the welds according to quality standards [31]. T is the width of weld, B is the width of the first surface welding pass, H is the height of weld with respect to a surface plane, a_1 and a_2 are the angles between the plane of parent material surface and a plane tangential to the weld, respectively and d is the distance of misalignment.

materials. The quality level B is the most exigent, and both welds were evaluated with respect to this level.

Excess of metal in the weld (1) is the imperfection defined as an excess of unnecessary material that magnifies the welding face.

This is evaluated as the relationship between the throat height (H) and the weld width (B) for each section (Fig. 6).

Incorrect weld toe (2) is the imperfection detected when the angles between the surface plane of the parent material and its tangential planes (a_1, a_2) (Fig. 6) are small with respect to the angles established in the standards [31] at the toe of the weld. It is assessed through the accordance angle in the two limits of the welds; these angles are drawn tangentially to the face of the weld at its limit.

Linear misalignment (3) is an imperfection which occurs when the two surfaces of welded material are not in line. This defect is only severe at a certain extent, since a little level of misalignment is permitted by [31]. The misalignment is evaluated through two planes, each drawn in one plaque, and analyzing the distance between them (d) (Fig. 6).

The overlap imperfection (4) is defined as the protrusion of weld metal below the weld toe. The American Weld Society [4] recommends using a $10\times$ magnification to recognize overlaps with the visual inspection procedure. The present procedure

allows the inspection with a higher magnification. A sequence of cross-sections allows the detection of this flaw in weld 2 (Fig. 7c) which is located in $X=61$ mm (Table 4). Once detected, the height and longitude of the defect can be measured. The main dimensions of the overlap (4) can be obtained by using different planes to generate different sections (Fig. 7e). One of these planes has to be perpendicular to the surface and placed in the limit of the weld; this way, the volume of the excess of material can be analysed. The assessment of overlap (4) in accordance with the standard is not permitted to two highest quality levels. However, overlaps can be accepted according to the lowest quality level typified (D), provided it meets certain geometrical conditions [31]. For this reason, an evaluation of the relationship between its longitude (S) (Fig. 7e) and the width of the weld (T) is necessary: if $S \leq 0.2T$, the overlap is admitted: in this case, for weld 2, $0.2T$ is greater than 1.518 mm. The longitude of the overlap (S) is lower than 4 mm, therefore overlap in weld 2 could be accepted only with respect to level D quality [31].

Table 3
Measures and geometrical relationships for weld 1 and weld 2.

General features of the weld									
Weld	T (mm)	W (mm)	H (mm)	a_1 (deg)	a_2 (deg)	X (mm) Location	d (mm)	t (mm)	
1	15.92	9.97	1.99	134.0	155.6	28.23	0.70	7.5	
2	20.39	–	1.54	166.5	170.0	50.79	0.21	10	

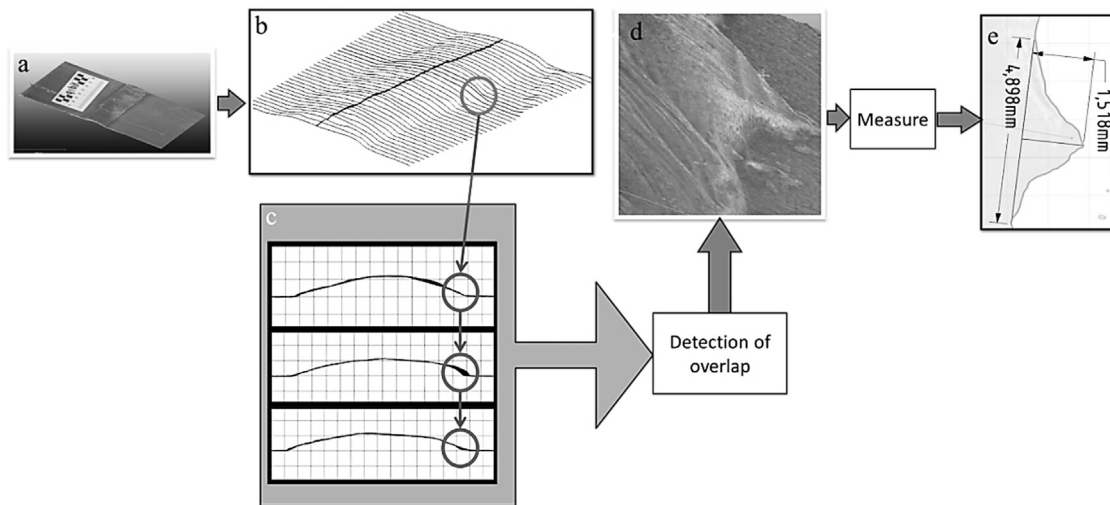


Fig. 7. Process to detect and measure the overlap in weld 2: (a) scaled 3D model (Object Sample Distance (OSD)) of 0.036 mm; (b) cross-sections along the X axis; (c) different cross-sections and shape variation in the overlap area ($X=61$ mm); (d) detail of the overlap imperfection in the 3D model; and (e) dimensional analysis of the overlap (4) through a cross-section.

Table 4
Quality criteria established in the higher quality level (B) [31] according to the standards and results coming from Table 3. X establishes the flaw location (Fig. 6).

Imperfection	Reference in [31]	Criteria (mm) for maximum quality level	Weld	X (mm)	Results	
Excess weld metal (1)	502	$H \leq 1 + 0.1B$	1	28.2	$1.987 < 2.590$	Pass
			2	50.8	$1.540 < 3.039$	Pass
Incorrect weld toe (2)	505	$a_1, a_2 \geq 150^\circ$	1	28.2	$134^\circ < 150^\circ$	Not pass
			2	50.8	$166^\circ > 150^\circ$	Pass
Linear misalignment (3)	507	$d \leq 0.1 t$ t is the thickness of plate	1	28.2	$0.70 < 0.75$	Pass
			2	50.8	$0.21 < 1.00$	Pass
Overlap (4)	506	Not permitted	1	61.0	–	n.a.
			2	–	–	Not pass

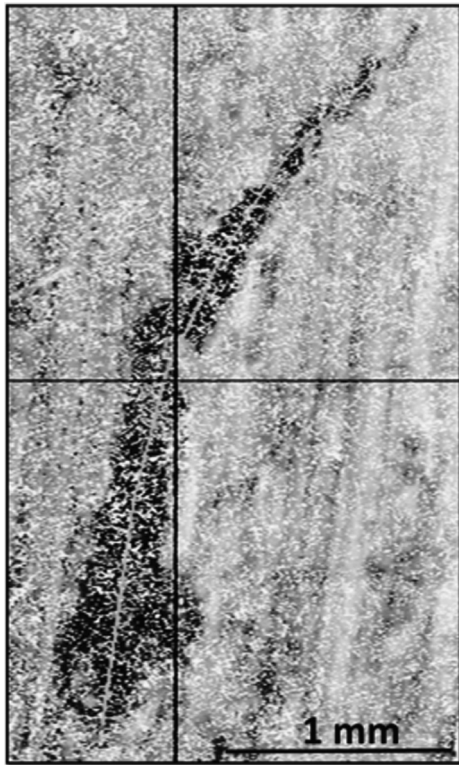


Fig. 8. Point cloud of the crack obtained from new images taken following the procedure established in Fig. 3 around the crack (OSD of images: 0.018 mm. Points in cloud point: 267,365).

3.2. Cracks detection and measurement

A crack can be defined as “a fracture type discontinuity characterized by a sharp top and a high ratio of length and width to opening displacement” [3]. Cracks [32] are considered the most important discontinuity in welds due to their tendency to propagate under stress conditions [3]. They are classified by their

location and their morphology. Cracking is commonly caused by several different phenomena, being the highly rigid joint among the most usual. Usually, if a crack is detected, the weld is not accepted [32] due to its high breaking probability. However, knowing the type of crack and its dimensions can be useful to predict the possible failure and provide information about the direction of propagation when there is no possibility of reconstructing the weld. Therefore, the analysis of cracks is useful for quality inspection, but also for failure prediction, especially in those materials subjected to fatigue.

When the 3D model of weld 1 is built (Fig. 4), a little notch (around 2 mm) is detected adjacent to the weld zone. The model generated for weld 1 allows the detection of cracks but does not allow the exhaustive study of the morphology of the crack and its measurement. A new implementation is proposed for the minute analysis of this defect, consisting on the acquisition of new images around the crack, following the same schema as in (Fig. 3) but focusing on the crack with a focused distance of 188 mm (1:1 magnification). The procedure is repeated with new images (focused around the crack) in order to obtain a new model with higher point density, which allows the fully 3D geometrical characterization of the crack.

A new point cloud (Fig. 8) with 267,365 points is generated and thus, a 3D crack-model is obtained (Fig. 9(b)). With this new study, different depths are detected within the crack (Fig. 9(c)).

What is more, two incisions are detected in the crack, which can be clearly seen in the images (Fig. 9). This is an intrinsic feature of the toe crack because this crack penetrates into the metal through different incisions in the surface which are normally placed at the limits of the welds, since they usually appear when there is a lack of continuity in the dimensions, where stresses are concentrated. In this paper we see that the differentiation of this type of crack from others is possible through the construction of the 3D model.

When the 3D model of the crack is obtained, measurements are analyzed: the maximum depth on the crack is 0.13 mm (deeper incision), the length is 2.81 mm (Fig. 9) and the maximum width is 0.49 mm.

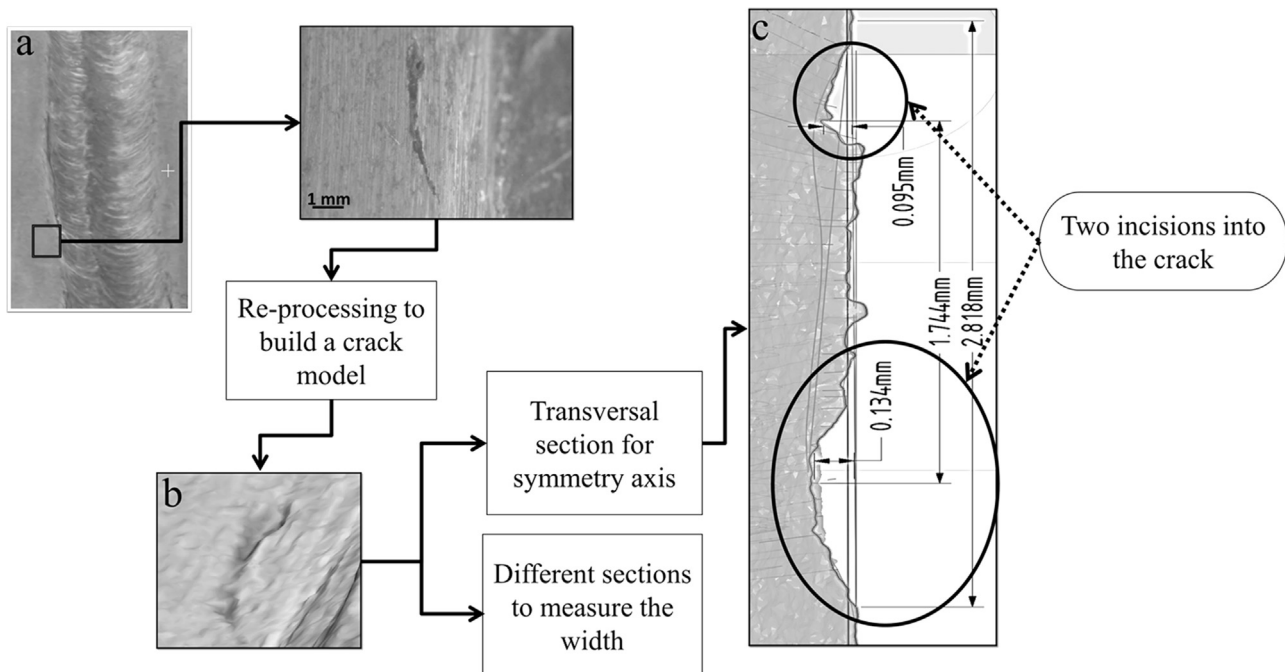


Fig. 9. Process used to detect and measure the crack: (a) global 3D model of the weld (OSD of 0.036 mm); (b) new 3D model focused on the crack (OSD of 0.018 mm); and (c) measurements of depth and length of the crack taken through a cross-section perpendicular to the surface plane.

3.3. Budget error

In order to estimate the total error (ϵ) associated to the dimensional analysis of welds using the macro-3D models generated, the error propagation must be analyzed by a quadratic error propagation. Two main sources of errors take part during the macro image-based modeling process proposed: first, the error coming from the photogrammetric adjustment and well-known as a posteriori error (ϵ_a); second, the error corresponding to the scaling of the 3D model which is manually defined by the user. In particular, the origin error has been established as $\sqrt{2}$ *pixel size (s) and also considering the error associated to the electronic micrometer (destination error) ($\epsilon_m = 0.01$ mm). In this way, the scaling error is calculated as follows: $\epsilon_s = \sqrt{\epsilon_m^2 + 2s^2}$. More details about this error budget are outlined in Table 5.

Analyzing Table 5, the total error is in the order of a tenth of millimeter. Obviously, the main source of error is the image-based modeling procedure, which entails several sequential and automatic steps. This photogrammetric a posteriori error reflects the deviation associated to a point (X,Y,Z) over the 3D weld model, which is about twice the theoretical pixel size, due to the different error sources present in the photogrammetric adjustment. For its part, the scaling error considers mainly the definition of the scale (i.e. distance) manually defined by the user over the image.

3.4. Workflow

The results allow the assessment of the technique, therefore a workflow for its application by welding inspectors is proposed (Fig. 10). The workflow begins with a data acquisition protocol

Table 5
Budget error associated to the dimensional analysis of welds.

	Photogrammetric adjustment error (ϵ_a) (mm)	Scaling error (ϵ_s) (mm)	Total error (ϵ) (mm)
Weld 1 (global model)	± 0.077	± 0.052	± 0.093
Weld 1 (detailed crack model)	± 0.036	± 0.027	± 0.045
Weld 2 (global model)	± 0.082	± 0.052	± 0.093

focused on images, followed by a processing step based on image-based modeling for model generation. The last steps are the inspection and data-basing of the model, thus making possible further analysis after time, if needed.

4. Conclusions

Through this paper, a new method for the assessment and support of weld inspections is proposed. It allows the fast and non-invasive inspection of welds, as well as the measurement of the geometrical features of the defects detected, including surface flaws and imperfections. The only equipment needed is a DSLR camera with a macro-lens and a photogrammetric post-processing platform previously developed by the authors. With this low-cost procedure, the implementation of a surface quality analysis without the presence of the inspector in the welding installation is possible, causing considerable savings in time and money and allowing a more accurate evaluation and measurement than the classical methods used in VT.

This method allows the assessment of the weld according with quality standards [31,32] from a small number of images, detecting different geometrical imperfections (excess weld metal, incorrect weld toe linear misalignment, overlap). What is more, it enables the accurate evaluation of the defects. This method also allows the detection, characterization and measurement of superficial cracks along the surface plane and along the depth plane.

The error generated during the procedure is of tenths of a millimeter for global models and of hundredths of a millimeter for the local models focused on cracks. This error is estimated based on the propagation error of the scaling process (manually defined by the user) and the photogrammetric adjustment error. Another important advantage of the procedure is the possibility of establishing a database with all the weld-models, enabling future reviews of assessment of the inspector. Likewise having the model registered in the database, the monitoring of the welds through time is possible in order to analyze the formation of new flaws, imperfections or deformations nonexistent in the first inspection.

Theoretically, the number of images necessary for the generation of a 3D model is lower than the number of images used.

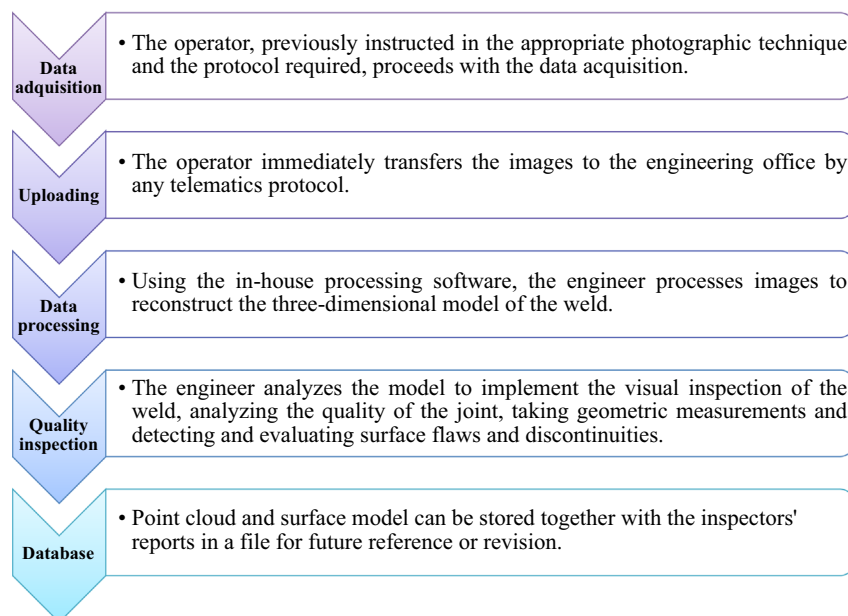


Fig. 10. Protocol for the inspection of welds based on the macro-photogrammetric procedure.

However, authors have used a higher number of images in order to obtain great quality models that allow the detection of small imperfections and the performance of accurate measures. In this way, the maximum metrological potential of the technique is shown. Future researches will address the optimization of the dataset for specific welding inspection and/or control applications in industry. The versatility of the technique and the ease of application enable the future research for the automation and integration in industrial welding processes for instant and automatic surface quality control with a multi-camera platform.

Acknowledgments

Authors would like to thank to the Agencia de Innovación y Financiación Empresarial de Castilla y León (ADE) and the Ministerio de Economía y Competitividad (Gobierno de España) for the financial support given through human resources grants (FPDI-2013-17516). Thanks also to Ministerio de Ciencia e Innovación (Gobierno de España) for project ENE2013-48015-C3-1-R and Consellería de Economía e Industria (Xunta de Galicia) for project R2014/032. All the programs are cofinanced by the Fondo Europeo para el Desarrollo Regional (FEDER) Authors would also like to thank Prof. Antonio Collazo, from the University of Vigo, for his kind collaboration and contribution to the paper.

References

- [1] Barazzetti L, Scaioni M. Crack measurement: development, testing and applications of an automatic image-based algorithm. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 2009;64:285–96.
- [2] Griffith AA. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philos Trans R Soc* 1920;22:163–98.
- [3] American Welding Society. *The Everyday Pocket Handbook for Visual Inspection and Discontinuities—Causes and Remedies*; 2000.
- [4] American Welding Society. *Examination Book of Specifications*; 2006.
- [5] Felice M, Velichko A, Wilcox PD. Accurate depth measurement of small surface-breaking cracks using an ultrasonic array post-processing technique. *NDT&E Int* 2014;68:105–12.
- [6] Marsh KJ, Smith RA, Ritchie RO. Fatigue crack measurement: techniques and applications. *Wertley (UK)* 1991:69–93.
- [7] Henkel S, Holländer D, Wünsche M, Theilig H, Hübner P, Biermann H, et al. Crack observation methods, their application and simulation of curved fatigue crack growth. *Eng Fract Mech* 2010;77:2077–90.
- [8] Zhang L, Ke W, Ye Q. A novel laser vision sensor for weld line detection on wall-climbing robot. *Opt Laser Technol* 2014;60:69–79.
- [9] Dinham M, Fang G. Autonomous weld seam identification and localization using eye-in-hand stereo vision for robotic arc welding. *Robot Comput-Integr Manuf* 2013;29:288–301.
- [10] Fagerholt E, Østby E, Børvik T, Hopperstad OS. Investigation of fracture in small-scale SENT tests of a welded X80 pipeline steel using digital image correlation with node splitting. *Eng Fract Mech* 2012;96:276–93.
- [11] Luhmann T. Close Range Photogrammetry for industrial applications. *ISPRS J Photogram Rem Sens* 2010;65:558–69.
- [12] Herbert J. Application of a photogrammetry-based system to measure and re-engineer ship hulls and ship parts: an industrial practices-based report. *Comput-Aided Des* 2010;42:731–43.
- [13] Shmueli J, Eder MA, Tesauro A. A versatile stereo photogrammetry based technique for measuring fracture mode displacements in structures. *Precis Eng* 2015;39:38–46.
- [14] Hua H, Jin Liang, Xiao Z, Tang Z, Asundi A, Wang Y. A four-camera video grammetric system for 3-D motion measurement of deformable object. *Opt Lasers Eng* 2012;50:800–11.
- [15] Chen BQ, Garbatov Y, Soares C. Measurement of weld-induced deformations in three-dimensional structures based on photogrammetry technique. *J Ship Prod Des* 2011;27:51–62.
- [16] Layton E, Cox PH. The application of the photogrammetry quantitative microscopy. *Photogrammetry* 1982;37:207–18.
- [17] Armando G, Albertazzi JR, Hofmann A, Fantin A, Santo J. Photogrammetric endoscope for measurement of inner cylindrical surfaces using fringe projection. *Appl Opt* 2008;47:3868–76.
- [18] Gallo A, Muzzupappa M, Bruno F. 3D reconstruction of small sized objects from a sequence of multi-focused images. *J Cult Herit* 2014;15:173–82.
- [19] Atsushi H, Sueyasu H, Funayama Y, Maekawa T. System for reconstruction of three-dimensional micro objects from multiple photographic images. *Comput-Aided Des* 2011;43:1045–55.
- [20] Gonzalez-Aguilera D, Guerrero D, Hernandez-Lopez, Rodriguez-Gonzalvez P, Pierrrot M, Fernandez-Hernandez J. Silver CATCON award, technical commission WG VI/2. In: *Proceeding of the XXII ISPRS congress*. Melbourne; 2012.
- [21] Joglekar J, Gedam S. Area based image matching methods—a survey. *Int J Emerg Technol Adv Eng* 2010;2(5):2250–9.
- [22] Gruen A. Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique. *S Afr J Photogramm Remote Sens Cartogr* 1985;14(3):175–87.
- [23] Morel JM, Yu G. ASIFT: a new framework for fully affine invariant image comparison. *SIAM J Imaging Sci* 2009;2(2):438–69.
- [24] Moisan L, Stival B. A probabilistic criterion to detect rigid point matches between two images and estimate the fundamental matrix. *Int J Comput Vis* 2004;57(3):201–18.
- [25] Longuet-Higgins HC. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. In: *Fischler MA, Firschein O, editors. Readings in Computer Vision: Issues, Problems, Principles, and Paradigms*; 1987.
- [26] Luhmann T, Robson S, Kyle S, Harley I. *Close Range Photogrammetry: Principles, Methods and Applications*. Scotland (UK): Whittles Publishing; 2006.
- [27] Kraus K. *Photogrammetry. Fundamentals and Standard Processes*. Bonn: Dümmler; 1993.
- [28] Hartley R, Zisserman A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Canberra, Australia: Cambridge University Press; 2003.
- [29] Pierrot-Deseilligny M, Paparoditis N. A multiresolution and optimization-based image matching approach: an application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo imagery in IAPRS, vol. XXXVI-1/W41; 2006.
- [30] Kazhdan M, Bolitho M, Hoppe H. Poisson surface reconstruction. In: *Symposium on Geometry Processing*; 2006. pp. 61–71.
- [31] Welding. Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded). Quality levels for imperfection. *European Committee for Standardization. ISO-5817*: 2009; 2009.
- [32] Welding and allied processes - Classification of geometric imperfections in metallic materials - Part 1: Fusion welding *ISO 6520-1*:2007.

Sección IV: Combinación de la técnica termográfica y la técnica fotogramétrica para el diseño de modelos predictivos de profundidad en grietas de soldaduras.

Capítulo 6: Modelo de predicción de profundidad para fisuras en acero utilizando termografía infrarroja.

El presente capítulo contiene el artículo *Prediction of Depth Model for Cracks Using Infrared Thermography*, aceptado para publicación en la revista internacional de impacto (JCR) *Infrared Physics and Technology*.

El proceso de fisuración en soldaduras es peligroso porque puede derivar en un fallo de elementos estructurales y, consecuentemente, en un colapso de las estructuras con drásticas consecuencias. Como se ha indicado antes, la medición del “crack” es importante de cara a la toma de decisiones por criterios de seguridad, más aun para pequeñas fisuras pues estas son las más susceptibles de discusión acerca de la aceptación o rechazo de la soldadura [22].

A tal efecto numerosos métodos complejos para la predicción de profundidad de defectos internos han sido desarrollados y están detallados en la introducción del artículo contenido en este capítulo. Los resultados muestran que los métodos expuestos son útiles para medir la profundidad de los defectos. No obstante, cabe destacar que todos estos métodos han sido desarrollados para la estimación de la profundidad de defectos internos mediante el estudio de la reacción del material a un estímulo térmico, en la mayoría de los casos complejos y difíciles de integrar dentro de un protocolo de ensayo sencillo. No se ha realizado hasta el momento ningún trabajo que relacione la profundidad de una fisura superficial con los datos térmicos obtenidos en un ensayo termográfico. Y ese es precisamente el objetivo de este capítulo: se pretende dotar al inspector que utiliza termografía con una herramienta complementaria rápida y fácil de aplicar que le permita, además de detectar defectos internos aplicando los procedimientos desarrollados hasta el momento por la Comunidad Científica, la caracterización completa de las fisuras superficiales. De esta manera, el inspector podrá valorar defectos internos y contará también con una técnica de caracterización completa de grietas superficiales con termografía.

Si en el capítulo 4 se demostraron las potencialidades de la técnica para la toma de medidas superficiales, en este capítulo 6 se plantea un modelo de predicción de profundidad que permita la toma de medidas en el plano perpendicular a la superficie mediante una simple imagen térmica.

Para el desarrollo del modelo predictivo se ha utilizado la técnica fotogramétrica introducida en el capítulo 5, concretamente el modelo tridimensional de la fisura y la

técnica de termografía activa introducida en el capítulo 4. A partir de ese modelo se han extraído los valores de profundidad para cada punto y esos valores se han correlacionado (a través de un procedimiento de seccionamiento) con los valores de temperatura para cada punto de la fisura en la imagen térmica. Los datos de precisión establecidos en la sección 4 del artículo muestran la bondad del ajuste y demuestran la existencia de una relación consistente entre la temperatura de la fisura después de un calentamiento frontal (por reflexión con arreglo a la clasificación establecida en el capítulo 2) y la profundidad de cada zona. Tal relación abre la puerta al diseño de modelos predictivos de profundidad para fisuras desde imágenes térmicas.

Prediction of depth model for cracks in steel using infrared thermography

M. Rodríguez-Martín^{*1a}, S. Lagüela^{a,b}, D. González-Aguilera^a, J. Martínez^b

^a Department of Cartographic and Land Engineering, University of Salamanca, Polytechnic School of Avila. Hornos Caleros, 50, 05003, Avila (Spain)

^b Applied Geotechnologies Research Group, University of Vigo, Rúa Maxwell s/n, Campus Lagoas-Marcosende, 36310 Vigo (Spain)

ARTICLE INFO

ARTICLE HISTORY

Accepted: 17 June 2015

Keywords:

Crack, weld, Infrared Thermography (IRT), image rectification, Non-destructive testing (NDT).

ABSTRACT

Nowadays thermography is used as Non-Destructive Testing (NDT) for the detection and characterization of several types of flaws and imperfections. Testing cracks in steel and, particularly in welds presents enormous importance due to the danger of the cracking process. For this reason, the measurements of cracks are important for the prediction and valuation of the type of failure and its consequences. Open to surface cracks can be measured in the surface plane and in the depth plane (plane perpendicular to surface), being the surface plane the one that describes the surface of the welding. Since thermographic imaging directly gives information on the surface plane, the objective of this paper is to optimize the use of infrared thermography for inspection by proposing a method to predict the depth of surface cracks generated by the welding process. The study is implemented based on the analysis of the relationship between infrared (IR) data acquired with an infrared camera and geometric data into the crack extracted by applying a novel 3D macro-photogrammetric procedure. The 3D geometrical model is segmented in different sections and the depth profiles are correlated with the different temperature values along the corresponding sections. With the proposed technique, obtaining a correlation between depth data and thermal surface data is possible. It will allow the design of a depth prediction model which enables the inspection of depth of cracks using the thermographic technique.

1. INTRODUCTION

Welds are the origin of structural feebleness in the majority of cases and should be systematically checked in order to ensure the structural integrity of the components [1]. To detect internal and surface defects and imperfections, non-destructive testing (NDT) are usually used, amongst the most common: visual inspection, magnetic particles, ultrasounds, radiography, penetrant liquids and eddy currents [2].

Within the defectology of the welded materials, the study of the cracking process presents great importance to ensure the safety of structures, vehicles and machines. The cracking process is dangerous because it may result in the failure of the structural element and thus, in a full collapse of the structure with drastic consequences. Therefore, the assessment and characterization of the type of crack is important towards the prediction of the direction of propagation and the type of failure.

Nowadays, active thermography is being consolidated as an effective and efficient NDT technique. Its main advantages regarding other techniques are its fast and simple applicability to structures under poor environment

conditions [3]. In active thermography tests, the target material is subjected to a thermal excitation and in the last years this technique has been established like a NDT for the detection of internal defects [4]. Continue or pulsed excitation sources are tasked to induce an artificial excitation of the electrons of the atoms of the material in order to show surface or subsurface defects, imperfections or discontinuities. There are different testing methodologies for active thermography depending on the following aspects: type of heating, arrangement of the sample and the heating source, as well as the size and shape of the area which is thermally excited [5]

The sources can be either optical [3,6] or non-optical [7, 8]. When the excitation source is pulsed, results can be analyzed either in the frequency domain (Pulse-Phase Thermography, PPT) or in the time domain (Thermographic Signal Reconstruction, TSR) [4]. When the excitation source is continuous, results can be analyzed by contrast (relative difference between a pixel of the image and its closest pixels) [9] or by time domain (cooling or heating rate) [10].

The study of the depth of the defects has been an important research topic in the last 20 years [11]. This study can be

implemented with active thermography. [12] presented a method for extracting the depth value using lock-in thermography in a poly methyl methacrylate (PMMA) specimen. [13] proposed a neural algorithm, which uses active thermography for the estimation of defect depth (between 1 and 2.6 mm) in a PMMA specimen (low emissivity). With this method, the error introduced by the emissivity value is subject of discussion. In [14] a methodology for the estimation of the size of defects in a 10 mm thick metallic specimen, with circular cutouts of varying depth and diameter (depth between 1 and 9 mm) is presented. The methodology is implemented using lock-in thermography (sinusoidal thermal excitation signal) and thus a contrast phase is analyzed with respect to frequency for each depth and diameter. The relationship between diameter and depth of the defect is decisive for the success of the methodology. In [15] a pulsed thermographic method for the detection of the depth of defects in the aluminum specimen is proposed, denominated as Absolute Peak Slope Time (APST). The method does not require the knowledge of the temperature reference, but uses a variable defined as Absolute Peak Slope Time, which keeps a lineal relationship with the square of the depth. In [11] a comparison between the main existing procedures with pulsed thermography to study the depth of non-air defects is established: particularly Peak Contrast Time (PCT) [16], Peak Slope Time (PST) [17], Peak generated by Second Derivative of the surface temperature in Logarithmic scale (LPSD) [18] and APST [15]. Results show that all these methods are useful to measure the depth of defects but the PCT method shows an increased sensitivity to defect size. In [19] relationship between the thermal signature perceived by the infrared camera and a dimensionless coefficient for different defects in different materials used in masonry elements and in glass fiber reinforced polymer (GFRP) is established. The relationship is implemented by analyzing the contrast caused during the thermal excitation between the background and the defect.

On the other hand, modern photogrammetry is an important optical technique that allows the generation of dense point cloud and the accurate study of complex 3D geometries using digital images. When photogrammetry is applied with a macro lens, small surfaces can be modelled with high accuracy [20]. If the macro-photogrammetric procedure is applied on the crack, the extraction of a dense point cloud with reduced error is possible, including depth data of the crack. Given its high accuracy and precision, the macro-photogrammetric technique can be used as reference or “ground truth”.

Little open to surface cracks are sometimes difficult to detect and measure. The traditional gadgets used to measure cracks do not allow the accurate measurement of the depth of little cracks. In this paper, authors propose a correlation between infrared data and the depth value of cracks in

welding, in order to establish a methodology to predict the depth of the defects using only an IR camera and a portable heating source.

This paper is organized as follows: Section 2 presents the equipment used and the testing methodology; Section 3 analyses the results obtained, and the information gathered from the combined thermographic and geometric knowledge of the defects detected with thermography. Last, Section 4 explains the conclusions drawn from the presented study.

2. MATERIALS AND METHODOLOGY

The materials needed and the methods followed to implement the procedure are described in this section.

2.1. Materials

A welded plaque of low carbon steel (120 mm x 70 mm) with a thickness of 7.5 mm was chosen as subject of the inspection. The plaque has been welded with Tungsten Inert Gas welding (TIG), presenting butt-welding with edge preparation in V. The weld (Fig. 1) has a little open to surface crack in the adjacent zone of the face of weld, oriented parallel to the longitudinal axis of the weld, and consequently denominated as toe crack according to the international quality standard [21]. Cracks open to surface in steel frequently present abrupt and heterogeneous regions. The causing mechanism is known as cold cracking due to the stresses provoked by the increase in hardness in the zone, mainly due to the transformation of austenite to martensite during the cooling phase after the welding

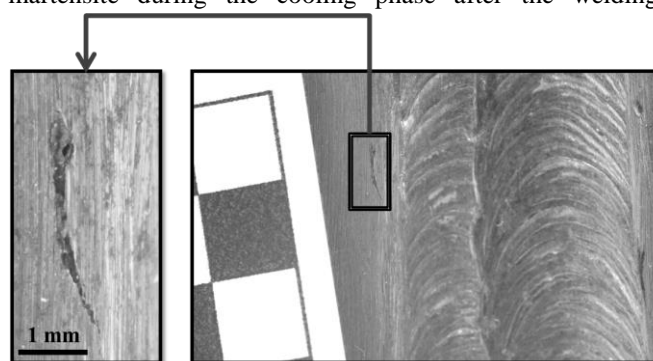


Fig. 1. Low carbon steel weld used. The scale of the crack can be deduced knowing that the black square at the left of the image has a side of 0.5 cm (right). The plate presents a toe crack close to the limit of the weld, which detail is shown in the macro-image (left).

In order to implement a macro-photogrammetric data acquisition protocol, a commercial digital single lens reflex (DSLR) camera Canon EOS 500D with a Sigma 50 mm macro lens is used. This macro lens is chosen due to its short focal length, which is favorable to achieve a good depth of

field in the scene. Commercial macro lenses frequently have longer focal distances; this could not be adequate for the present experiment given that the small depth of the cracks could provoke the existence of unfocused regions in the scene. A tripod is used to stabilize the camera during the acquisition due to the high exposure times required. In order to homogenize and optimize the illumination conditions, two halogen lamps (50 W each one) are used.

Since the objective of the procedure is the generation of scaled 3D models, a rigid magnetized scaled sticker is placed close to the specimen (Fig. 1, right), ensuring its appearance in the image.

In order to do a thermal analysis, an IR-Camera is used. The IR camera used for this work is a NEC TH9260 with 640 x 480 Uncooled Focal Plane Array Detector (UFPA), a resolution of 0.06 °C and a measurement range from -40 °C to 500 °C. The camera is geometrically calibrated prior data acquisition using a calibration grid based on the emissivity difference between the background and the targets, presented in [22]. The calibration parameters of the IR camera in the focus position used for data acquisition during the thermographic essays are shown in Table 1.

Table 1. Parameters for the geometric calibration of the IR camera NEC TH9260.

Focal length (mm)	14.35
Format size (mm)	5.98x4.50
Principal point (X_{pp}) (mm)	2.98
Principal point (Y_{pp}) (mm)	2.28
Lens distortion	
$K1$	-1.32×10^{-2}
$K2$	1.08×10^{-3}
$P1$	-3.43×10^{-4}
$P2$	1.44×10^{-3}

2.2. Methodology

In order to study the relationship between depth and temperature in the crack, two techniques are used. On the one hand, an IR thermographic process is implemented in order to know the temperature value in each point of the crack. A 3D macro-photogrammetric procedure is developed in order to obtain the depth value into the crack and thereby allow the computation of the correlation between temperature and macro-photogrammetric data.

2.2.1. Thermographic procedure

Front heating is applied to the plaques; that is, heat is applied to the front of each plaque (face of the weld) at a distance of 10 mm of the specimen. Front heating (configuration in reflection) is chosen given that the objective is the penetration of heat into the crack in order to stimulate the different zones. The material is thermally excited from the face of the weld until the minimum temperature required for the clear viewing of the defect is reached: 42.5 °C. This temperature value has been previously established through the repetition of the test for different durations of the heating period (established in 300 s), until the procedure is optimized and the defects are detected with the minimum temperature. The experiment was performed in a laboratory under controlled conditions, and windows and doors were conveniently closed in order to ensure the absence of external thermal flows. All unwanted heat sources were disabled in order to avoid reflections. The temperature of the laboratory was 21 °C and relative humidity 60 %. These parameters are introduced in the experimentation as ambient conditions, so that the camera calculates the atmospheric attenuation and compensates the thermographic measurement.

The thermal excitation of the material is performed with a Joule effect heater with 2500 W of active power. The superficial temperature is controlled with a contact thermometer TESTO720 with a Pt -100 resistance temperature sensor (resolution 0.1 °C and accuracy 0.2 °C). The thermometer is held in its position on the surface of the plaques with black tape, in order to ensure total contact with the plaque and avoid the interference of the ambient conditions in the measurement. When the desired temperature is obtained, the heater is switched off and the infrared (IR) camera is switch on in order to take a single infrared image. In this methodology only a single image is used in order to design a more simple procedure without using image sequences.

The configuration is such that the focal axis of the camera is perpendicular to the welded plaques, and is focused on their geometric center (reflection mode).

During data acquisition, a PC is used to control the IR camera and the ambient parameters are introduced (distance camera-plaque, ambient temperature and relative humidity) for the correction of the environment effect.

When thermal data are acquired, the next step is to rectify the infrared image to establish a scale. The first step of the rectification process consists on the extraction of the temperature matrix of each thermographic image: each position in the matrix contains the temperature value of the corresponding part of the object contained in the image pixel. Values are corrected on an emissivity basis. The emissivity value is calculated using Stefan-Boltzman's law,

since the relation between the temperature value captured by the IR Camera and the temperature measured with the surface thermometer allows the calculation of the emissivity value of the material by the comparison of Stefan-Boltzmann law for the black body and for gray body [23]. The correction is applied to the matrix for obtaining the real temperature values.

Once the temperature values are corrected, the infrared image matrix is subjected to a rectification algorithm. The core algorithm of image rectification is the plane projective transformation, ruled by equations 1 and 2:

$$X = \Delta x + \frac{a_0 + a_1 x' + a_2 y'}{c_1 x' + c_2 y' + 1} \quad (1)$$

$$Y = \Delta y + \frac{b_0 + b_1 x' + b_2 y'}{c_1 x' + c_2 y' + 1} \quad (2)$$

Where X, Y are the rectified (real) coordinates of the element, x' and y' are the pixel coordinates in the image, and $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_1, c_2$ are the mathematical coefficients of the projective matrix that encloses rotation, scale, translation and perspective. Therefore, the knowledge of the coordinates of 4 points in the object is the only requirement for the determination of the projective matrix, as well as the calibration parameters of the camera. In this case, the coordinate of pixels used to scale the model through the rectification process are selected in one of the plates (up in Fig 2.); the dimension between them has been measured with an electronic caliper. The following figure (Fig. 2) shows an example of result of the rectification of a thermographic image (the first image of the cooling period).

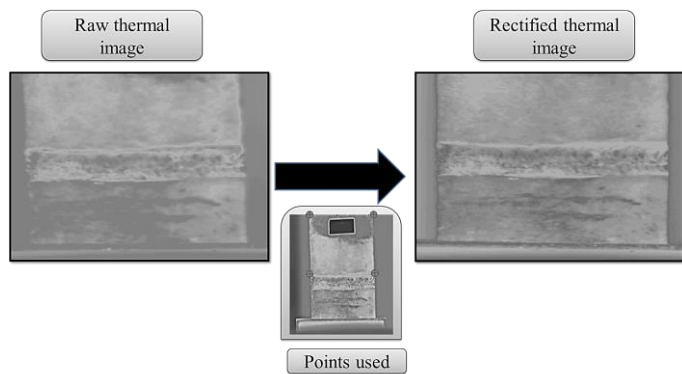


Fig. 2. Image rectification: original image (Left) and rectified image (Right).

2.2.2. 3D Macro-photogrammetric procedure

The metrological macro-photogrammetry methodology developed and thoroughly explained by the authors in [24] is applied to obtain the depth value of each zone of the crack through the 3D reconstruction of the dense point cloud of the crack (Fig. 3). The procedure is based on the acquisition of photographic images of the crack using a DSLR camera

with a 50 mm macro lens. The versatility of the procedure allows the application of a self-calibration process. 9 images are acquired following a semispherical trajectory centered on the object, keeping always a constant distance between the lens and the object (Fig. 4). This acquisition data protocol has been chosen in order to obtain better results in the reconstruction process, in particular, a more real geometry with a better completeness and accuracy is obtained in comparison with other cameras' configuration, like classic stereoscopy.

The processing involves two main steps. First, the automatic determination of the spatial and angular position of each image using a feature-based extraction and matching approach and in parallel, the camera self-calibration using a combination of photogrammetry and computer vision algorithms. Second, the automatic computation of a dense 3D point cloud (submillimetric spatial resolution) based on a semi-global matching (SGM) technique [25], so that each pixel of the image renders a specific point of the model of the weld. The macro image-based modeling process proposed presents two error sources: the first of them is the error coming from the photogrammetric adjustment (a posteriori error). The second of them is the error corresponding to the scaling of the 3D model which is manually introduced by the user through the measurement of the scale with a micrometer (scale error)".

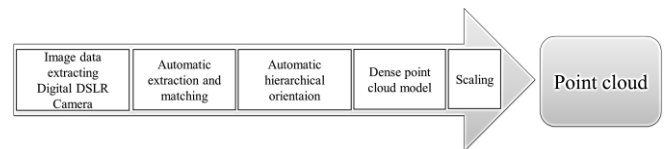


Fig. 3. Macro-photogrammetric procedure to generate the 3D dense point cloud of the weld. The procedure starts with the acquisition of images with a DSLR camera; data processing is applied to the generation of the point cloud. Finally, scaling is applied.

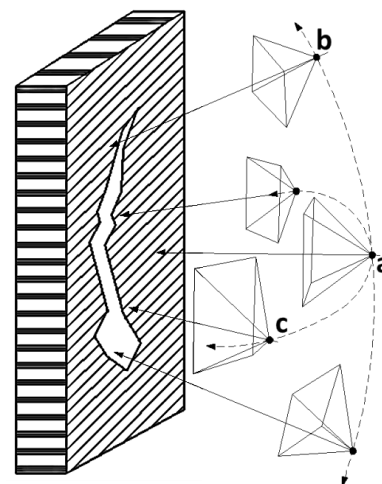


Fig. 4. Relative positions between the camera and the crack during data acquisition. (a) Main position to take a master image and establish the origin of the coordinate system. (b) Slave images taken by moving the camera in the vertical direction. (c) Slave images taken by moving the camera slightly in the horizontal direction.

2.3. Methodology of correlation of thermal and macro-photogrammetric data

A comparison is established between temperature values and depth of the crack by analyzing two different sections of the crack: Transversal 1 and Transversal 2, shown in Fig. 5. The longitudinal section is used to validate the prediction model. This choice is made due to the higher temperature contrast appearing in the transversal direction in comparison to the longitudinal direction. Consequently, a greater interval of temperature and depth values is used for the computation of the relationship between temperature and depth of the crack. The procedure followed for the computation of the correlation is summarized in Fig.6.

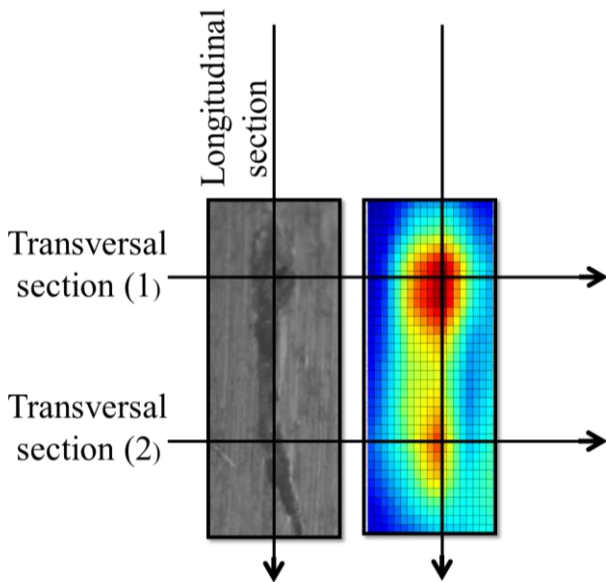


Fig. 5. Three different sections are considered for the thermal and the macro-photogrammetric analysis. Transversal sections are traced along the horizontal direction in the two wider zones of the crack. These sections are plotted on the photogrammetric model of the crack and in the thermographic image of the crack. The longitudinal section is considered along the vertical direction of the crack in order to establish a longitudinal profile, which is used to validate the model obtained with the other two sections.

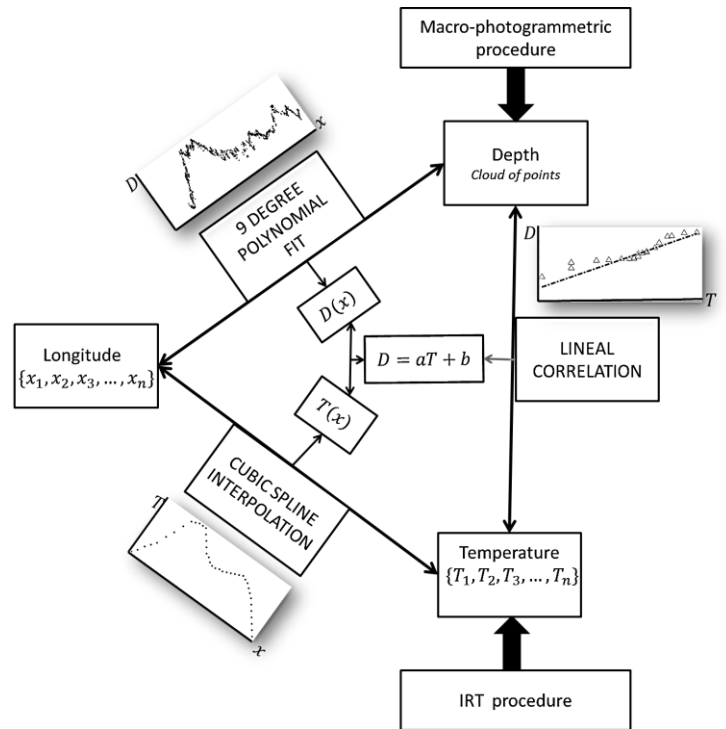


Fig. 6. Procedure to obtain the relationship between depth and temperature. First, a temperature function and a depth function are obtained. Then, a lineal correlation between homogeneous values of x for $T(x)$ and $D(x)$ is done through the study of correspondences of the function for each value of x . In this way, a lineal correlation between temperature and depth is established (gain (a) and offset (b)).

Temperature values are extracted from the thermal matrix for each section. With this procedure, a collection of discrete thermal values for each section is obtained. When the thermographic procedure is implemented, a temperature map of the crack is generated, so that the temperature through the x values is considered to obtain the temperature function ($T(x)$). In this case, a spline cubic interpolation is applied for each pair of values $\{x_1, T(x_1)\}, \{x_2, T(x_2)\}, \dots, \{x_n, T(x_n)\}$ (Fig. 6). This interpolation method is chosen due to its similarity with the theoretical thermal distribution in a homogenous material (the transition between the different elements of the cubic spline is smooth and the interpolation does not generate peaks or sharp transition zones), and the cubic spline model imposes conditions on the derivative, so, the transitions between the different segmented curves of the model are smoother, obtaining in this way a continuous function of greater realism and good adaptation to thermal behavior.

The point cloud is sectioned through three different planes: one in longitudinal direction and two in transversal direction (Transversal 1 and Transversal) (Fig. 5). The point cloud is not meshed in order to preserve the accuracy of the model, allowing the computation of the most accurate interpolation model for each case. For this reason, theoretically the sectioning of the point cloud by a single plane could be difficult because the points are sparsely located and the coordinate of each point does not exactly coincide with the

plane. To solve this, instead of a single plane, a gap (two parallel plane separated by 0.1 mm) has been used to increase the density of points for each section. Thus, a 2-D point cloud section is generated for each defined direction (Fig. 5). In this way, knowing the depth through the length (x values through each section) is possible to estimate the function $D(x)$ (Fig. 6) which defines the changes in depth with length. To get a function $D(x)$, a polynomial fit model is used due to its low fitting error for this data. The degree of the polynomial is experimentally established as the minimum necessary (computational efficiency criterion) to achieve an acceptable fit (R square over 75%).

When the thermal and depth functions ($D(x)$, $T(x)$) are calculated, the two functions are adjusted in order to study the lineal correlation between the depth and temperature values for each same x value of each section. With this operation, a group of pairs of points $\{D(x_1), T(x_1)\}, \{D(x_2), T(x_2)\}, \dots, \{D(x_n), T(x_n)\}$ are correlated (Fig. 6).

3. RESULTS

Results section starts with the thermal and photogrammetric results obtained following the methodology exposed in Sections 2.2.1 and 2.2.2., thus a correlation between the two types of data is implemented according to the statistical analysis raised in Section 2.3. Finally, a validation procedure is applied in order to study the effectiveness of the model and calculate the error.

3.1. Thermal results

When the thermographic procedure is applied, the temperature submatrix of the crack is extracted; the representation of the thermal profile is shown in Fig. 8. The horizontal plane represents the length and width of the crack and the vertical axis represents the temperature for each pixel. Toe cracks [21] are propagated in the direction normal to surface, and commonly present certain particularities. One is the presence of one or more deep peaks, which is due to the typology of propagation of the crack. This flaw penetrates into the material, so each temperature peak corresponds to an incision into it.

In order to analyze the transversal sections (Fig. 5), the temperature values for each direction (transversal 1 and transversal 2) are extracted from the matrix (Fig. 7). Thereby, the temperature function for each section can be calculated. Thus, the values of temperature are interpolated

with a cubic spline with respect to the length values for Transversal 1 and Transversal 2 sections. In this way, a temperature function ($T(x)$) is calculated (Fig. 10).

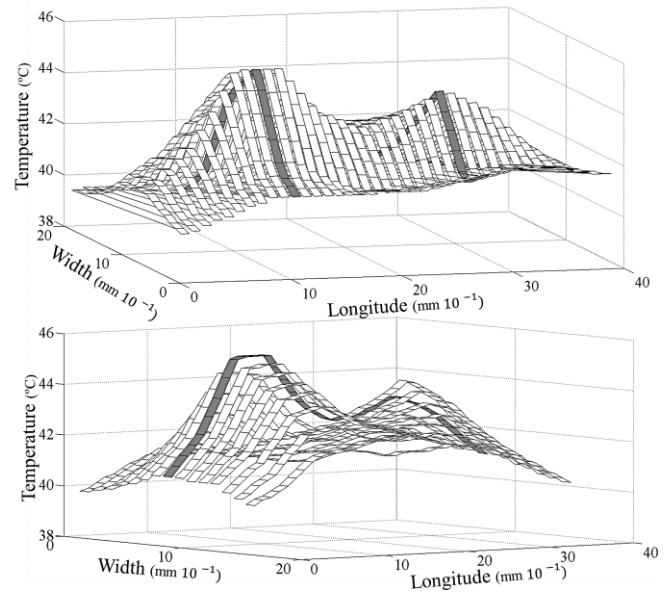


Fig. 7. Map of the 3D sections of the crack. (Top) Transversal sections highlighted in grey. (Bottom) Longitudinal section highlighted in grey. Temperature is indicated in the vertical axis, length and width in the horizontal plane.

3.2. Macro-photogrammetric results

When the macro-photogrammetric procedure [24] is implemented, a dense point cloud is obtained for the cracking zone (Fig. 8) with an error of 0.038 mm. This model presents different depths within the crack. The sectioning of the model is performed following the methodology established in section 2.2.2 obtaining, in this way, three 2D point clouds sections, one for each direction. Thus, each 2D point cloud section is fitted with a polynomial adjustment (the degree of polynomial fit is established in the lowest possible to provide an acceptable error: 5-degree for transversal 1 section, 8-degree for transversal 2 section and 9-degree for the longitudinal section) (Fig. 9). Thereby a depth function $D(x)$ is calculated.

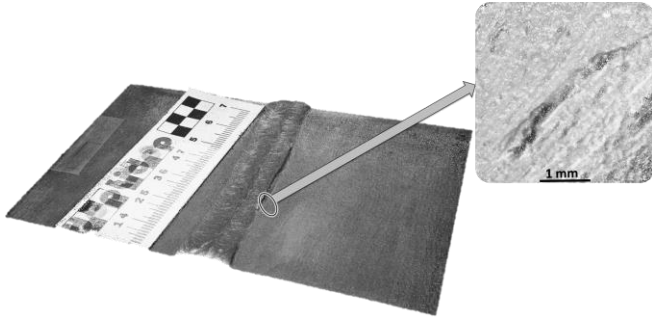


Fig. 8. 3D view of the dense point cloud of the crack with RGB color (267,635 points).

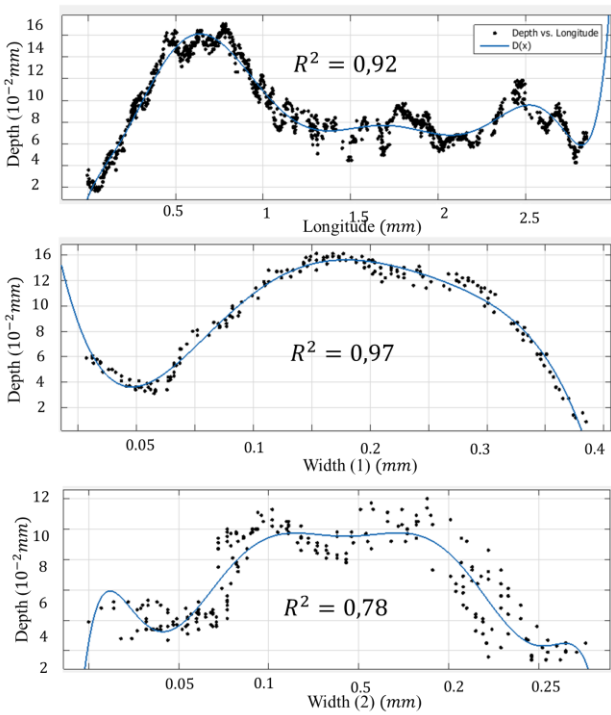


Fig. 9. Polynomial fit of 2D point cloud sections (after sectioning the 3D point cloud by the three different directions established in Fig. 5) and R^2 error fitting for each one of them. Up: Longitudinal section. Centre: Transversal 1 section. Down: Transversal 2 section.

3.3. Relationship between thermal and macro-photogrammetric results: correlation

When the two functions ($T(x)$, $D(x)$) have been obtained (Fig. 10) for each section of the crack, Transversal 1 and Transversal 2 (Fig. 5), different pairs of values, $\{D(x_1), T(x_1)\}, \{D(x_2), T(x_2)\}, \dots, \{D(x_n), T(x_n)\}$ are extracted with a step (Δx) of 0.04 mm for transversal section 1 and 0.03 mm for transversal section 2 (the first section is larger than the second). These pairs of points are correlated with a linear regression in order to see the level of

correlation and thus the direct relationship between depth and temperature (Fig. 11).

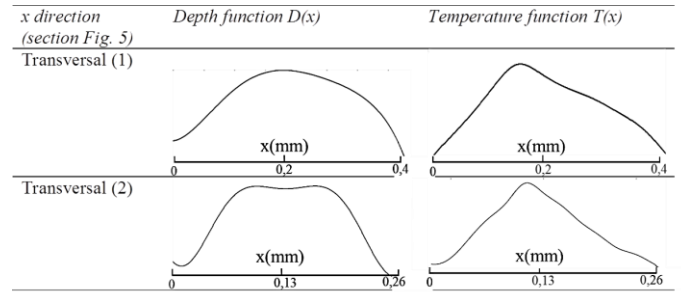


Fig. 10. Depth function and temperature function for each transversal section established in Fig. 5.

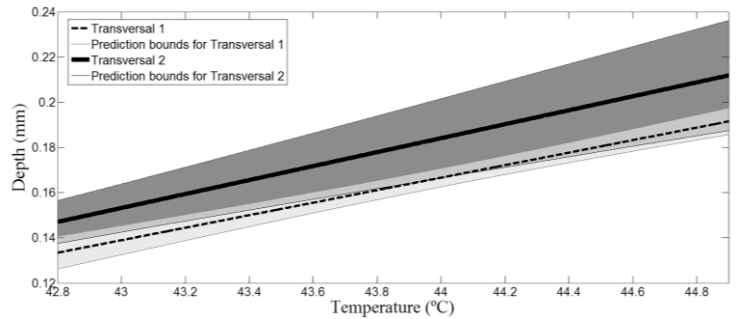


Fig. 11. Correlation between depth of the crack and temperature captured by the IR Camera for each section. Parallel lines show the prediction bounds for 95% of the dataset for each correlation. The band for transversal 2 section stays into the band for transversal 1 section.

Table 2. Statistical parameters of the correlation between depth (mm) and temperature ($^{\circ}\text{C}$) following a linear regression ($Depth = aT + b$) for predictions in the operating temperature interval: $T \in [42.5, 45]^{\circ}\text{C}$.

$D = aT + b$			
Section	a	b	R^2
Transversal 1	0.0277	-1.051	0.956
Transversal 2	0.0305	-1.168	0.887
	0.0291	-1.110	

The correlations for the working range are shown in Fig 11. The 95% prediction bands covers with a probability, 95% in this case, the values of one or more future observations. They are plotted in order to analyze the coherence of the dispersion data between the two correlations. The values within the prediction bands maintain correspondence, this means that the values for both correlations maintain statistical consistency and ensure the consistency of the correlation. The relation between temperature and depth are similar for each transversal section of the crack, while

tendency (Fig. 10) and fitting error (R^2) are also similar (Table 2). The average correlation obtained from Transversal 1 and Transversal 2 sections is given by the expression: $D = 0.0291 T - 1.1010$

4. QUALITY ANALYSIS

The quality analysis is implemented from discrete values because the nature of the designed prediction model is the automatic conversion of discrete temperature values (obtained with IR inspection) to discrete depth values. The correlation obtained in the previous section is applied to a dataset of five points ($\Delta x = 0.6 \text{ mm}$) (five discrete points are considered sufficient to characterize the depth of the crack, given its type and length) in order to compare the discrete results of depth in the prediction model (D_p) with the discrete results of depth in the macro photogrammetric model (considered as real depth, D_R). This way, the statistical model is validated (Fig. 12).

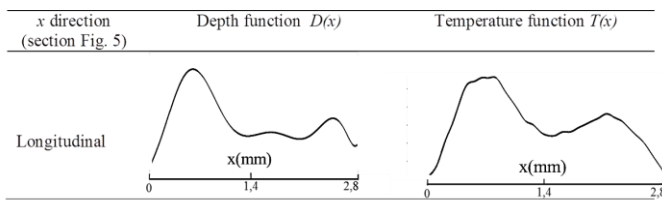


Fig. 12: Depth function and temperature function along the x direction of the longitudinal section (Fig. 5).

The average error between the prediction depth and the real depth (measured with the macro-photogrammetric procedure) for a dataset of five points is 9.31%. For the studied range, the standard deviation of hundredths of mm (0.033 mm) can be considered acceptable having dimensions for depth of tenths of mm.

5. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

A safe and simple front thermal stimulation (standard heater by Joule effect) is used to excite the atoms of the steel. 300 s heating was necessary to get a temperature range between 42.5°C and 45 °C. When the plaque is studied by the infrared camera, the induced thermal contrast allows the differentiation on the infrared image of the different zones into the crack. One image is instantly and easily acquired, which is a great advantage for the user due to time saving. To study the correlation between the mentioned thermal data and the real geometry of the crack, the following combination between thermographic and photogrammetric techniques is implemented: on the one hand, the applied macro-photogrammetric procedure allows the generation of a 3D model of the crack in order to extract the depth data

through the different sections. On the other hand, the application of a photogrammetric rectification algorithm to the infrared images allows the scaling of the images in order to provide the correspondence between thermal data and macro-photogrammetric depth data in the same dimension (x) for each section.

The different thermal transitions shown in the infrared image between the zones of the crack when the material is thermally stimulated are frequently correspondent to different depths in the cracks. This differential response can be used for the geometrical characterization of the crack; this hypothesis has been demonstrated in the present paper because, for a heating temperature range between 42.5°C and 45°C, the thermal profile (Fig. 10) maintains a linear relation (Table 2) with respect to the real depth geometry of the crack established through the macro-photogrammetric method. The mathematical relationships has been calculated using two transversal sections and validated using the application of a prediction model for the longitudinal section. The validation of the model shows consistent results (0.033 mm for standard deviation and coherence between the correlation for the two transversal sections).

Cracks open to surface in steel frequently present heterogenic internal regions, which cause a great emissivity and temperature contrast, allowing their recognition on the infrared images when a homogeneous external heating is applied. For this reason, the internal geometry of the crack zone presents enormous importance, being dependent on the type of steel (steel of different ductility produce different types of fracture mechanism) and on the fracture mechanism (different stresses produce different deformations on steel and, with this, different geometry of cracks).

For the present crack, the causing mechanism is known as cold cracking due to the stresses generated by the increase in hardness in the zone, mainly due to the transformation of austenite to martensite during cooling phase, immediately after the welding. However, the surface roughness and the existence of abrupt geometrical areas into the crack in a same type of steel depend also on the stresses that cause the initiation and propagation of the crack because the fracture mechanism when different type of stresses are applied is different. Although this type of cracking mechanism studied is very common in welding, the surface properties into the crack could present differences with respect to other fracture mechanisms. For this reason, the extension of the technique to different types of cracks will be studied in future works.

With respect to the application of the thermographic technique to predict measures in the depth plane for other flaws [26] that present a more homogeneous surface (like undercuts, surface pores, sagging, incomplete filled groove and deterioration by corrosion), the present procedure could

be technically possible. However, the accuracy of the prediction model will be possibly lower because the abrupt geometrical discontinuities on the defect zone facilitate the analysis of the different zones on the infrared images: If the surface of the flaw is homogenous, the transition between defect zone and adjacent zone could not be sufficiently clear to establish an acceptable prediction model.

The possibility of analyzing the depth from a single image is also interesting for the future automation of the process. Technique could be applied to automatic thermographic inspection. In this way, the possibility to automatically convert the temperature values in depth values using the prediction model is an easy and attractive application, even to the control of tasks in automated welding processes and other manufacturing process.

In conclusion, the depth of the crack and the interior temperature values captured with an IR camera may be related by a prediction model, validated for a toe crack in a weld of low-carbon steel. Future works will study the relationship between thermal data and depth into the crack with different types of materials and different typologies of cracks. The automation on the application of model will be studied in future works. The possibility to design procedures to predict the depth of open to surface cracks based on images sequences will also be studied.

Acknowledgments

Authors would like to thank the Agencia de Innovación y Financiación Empresarial de Castilla y León (ADE), the Ministerio de Economía y Competitividad and CDTI (Gobierno de España) for the financial support given through human resources grants (FPDI-2013-17516), and projects (ENE2013-48015-C3-1-R). All the programs are cofinanced by the Fondo Europeo para el Desarrollo Regional (FEDER). Authors would also like to thank Prof. Antonio Collazo, from the University of Vigo, for his kind collaboration and contribution to the paper.

References

[1] T. Saravanan, B.B. Lahiri, K. Arunmuthu, S. Bagavathiappan, A.S.Sekhar, V.P.M. Pillai, J.Philip, B.P.C. Rao and T. Jayakumar. Non-Destructive Evaluation of Friction Stir Welded Joints by X-ray Radiography and Infrared Thermography. *Procedia Engineering* 86 (2014) 469 – 475

[2] M. Trim. An Overview of Nondestructive Evaluation Methods. *Practical Failure Analysis*. 3(3) (2003) 17-31

[3] A. Yun-Kyu , K. J. Min , S. Hoon. Laser lock-in thermography for detection of surface-breaking fatigue cracks on uncoated steel structures. *NDT&E International*. 65 (2014) 54–63

[4] B. Oswald-Tranta, A. Maier, R. Schledjewski. Defect depth determination in a CFRP structure using TSR technique. *The 12 International Conference on Quantitative Infrared thermography*, Burdeos, 2014.

[5] V. Vavilov. Thermal NDT: historical milestones, state of-the-art and trends, *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 11 (2014) 66-83.

[6] P. Broberg. Surface crack detection in welds using thermography, *NDT&E International*, 57 (2013) 69–73.

[7] M. Pan , Y. He , G. Tian , D. Chen, D. Chena, F. Luoa. Defect characterization using pulsed eddy current thermography under transmission mode and NDT applications. *NDT & E International* 52 (2012) 28-36.

[8] B. Yang , Y. Huang, L. Cheng. Defect detection and evaluation of ultrasonic infrared thermography for aerospace CFRP composites. *Infrared Physics & Technology*. 60 (2013) 166–173.

[9] C. Xua, J. Xie, G. Chen, W. Huang. An infrared thermal image processing framework based on superpixel algorithm to detect cracks on metal surface. *Infrared Physics & Technology*. 67 (2014) 266–72.

[10] M. Rodríguez-Martín, S. Lagüela, D. Gonzalez-Aguilera, P. Arias. Cooling analysis of welded materials for crack detection using infrared thermography. *Infrared Physic and Technology* 67 (2014) 547–54.

[11] Zhi Zeng, Chunguang Li , Ning Tao , Lichun Feng , Cunlin Zhang . Depth prediction of non-air interface defect using pulsed thermography. *NDT&E International* 48 (2012) 39–45

[12] A. Gleiter, C. Spiessberger, G. Busse. Phase angle Thermography for depth resolved defect characterization. *9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*. July 2-5, 2008, Krakow – Poland

[13] S. Dudzik. Analysis of the accuracy of a neural algorithm for defect depth estimation using PCA processing from active thermography data. *Infrared Physics & Technology* 56 (2013) 1–7

[14] C. Wallbrink, S. A. Wade, R. Jones. The effect of size on the quantitative estimation of defect depth in steel structures using lock-in thermography. *Journal of Applied Physics* 101 (2007) <http://dx.doi.org/10.1063/1.2732443>

[15] Zhi Zeng , Jing Zhou, Ning Tao, Lichun Feng, Cunlin Zhang. Absolute peak slope time based thickness measurement using pulsed thermography . *Infrared Physics & Technology*. 55 (2012) 200–204.

[16] L.D. Favro, X. Han, Y. Wang, P.K. Kuo, R.L. Thomas, Pulse-echo thermal wave imaging, in: D.O. Thompson, D.E.

Chimenti (Eds.), Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 14 (1995) 425– 429

[17] H.I. Ringermacher, R.J. Archacki Jr., W.A. Veronesi, Nondestructive Testing: Transient Depth Thermography, US Patent No. 5711603, 1998.

[18] S.M. Shepard, J.R. Lhota, B.A. Rubadeux, D. Wang, T. Ahmed. Reconstruction and enhancement of active thermographic image sequences . Optical Engineering 42. (2003) 1337-1342.

[19] C. Meola C. A new approach for estimation of defects detection with infrared thermography. Materials Letters. 61 (2007) 747–750.

[20] A. Gallo, M. Muzzupappa, F. Bruno. 3D reconstruction of small sized objects from a sequence of multi-focused images. Journal of Cultural Heritage. 15 (2014) 173–82.

[21] Welding and allied processes - Classification of geometric imperfections in metallic materials - Part 1: Fusion welding. European Committee for Standardization. UNE-EN-ISO 6520-1:2007 (2007).

[22] S. Lagüela, H. González-Jorge, J. Armesto, J. Herráez. High performance grid for the metric calibration of thermographic cameras. Measurement Science and Technology 23 (2012) doi:10.1088/0957-0233/23/1/015402.

[23] M. Rodríguez-Martín, S. Lagüela, D. Gonzalez-Aguilera, Diez-Vilariño, L. Termografía activa. Parte 1. Enfoque Teórico de la captación infrarroja, procesamiento de datos y clasificación. DYNA-BILBAO. IN PRESS

[24] M. Rodríguez-Martín, S. Lagüela, D. Gonzalez-Aguilera, P, Rodríguez-Gonzálvez. Procedure for quality inspection of welds based on macro-photogrammetric 3D reconstruction. Optics and Laser Technology. 73 (2015) 54-62.

[25] Morel JM, Yu G. ASIFT: A new framework for fully affine invariant image comparison. SIAM Journal on Imaging Sciences 2(2) (2009) 438-69.

[26] Welding. Fusion-welded joints in Steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded). Quality levels for imperfections (ISO 5817:2003 corrected version.2005, including Technical Corrigendum). European Committee for Standardization. UNE-EN-ISO-5817: 2009 (2009).

Conclusiones:

El procedimiento de captación de radiación infrarroja posibilita la toma de medidas de temperaturas absolutas cuando se utiliza en la modalidad de termografía cuantitativa. Para ello, la emisividad del material deberá ser conocida, pudiéndose utilizar la técnica en ensayo de materiales para extraer una matriz de temperaturas donde cada elemento de la matriz tiene asociado un valor de temperatura. Si a ello se le suma el aporte externo de energía al material se estará ante la denominada termografía activa, la cual permite, mediante el procesamiento de las matrices de temperaturas, diferentes análisis térmicos tanto instantáneos como de manera prolongada durante el tiempo de calentamiento y/o enfriamiento. En este último caso, las tasas de variación de temperatura o la respuesta del material a una determinada señal térmica posibilitarán la detección de defectos internos dentro del mismo.

La técnica de la termografía activa tiene una aplicación transversal en ingeniería e industria: desde la ingeniería naval a la ingeniería aeronáutica pasando por la ingeniería industrial, la ingeniería civil y la ingeniería aplicada a la documentación del patrimonio histórico-artístico. Como consecuencia de ello son muchos sectores que se benefician de su uso, el cual casi siempre queda ligado a la evaluación y ensayo de materiales. Sin embargo, el estado actual de la técnica no permite aún la sustitución de los métodos clásicos, los cuales, aun teniendo multitud de inconvenientes, han demostrado su eficacia para el análisis y la evaluación de materiales durante muchos años. Aunque a largo plazo sí puede ser posible una consolidación de la técnica de termografía activa como ensayo no destructivo en sustitución de algunas de las técnicas tradicionales, lo cierto es que a corto plazo es previsible una evolución de la técnica más orientada a complementación y creación de sinergias con otras técnicas de ensayo no destructivo.

Cuando se aplica una configuración externa de pulso largo a soldaduras de acero, la modalidad de trabajo en transmisión aporta, como se ha demostrado en el capítulo 3, una mayor homogeneidad en los resultados que cuando se aplica la configuración en reflexión debido a que en la primera predomina el fenómeno de la transferencia de calor por conducción, mientras que en la segunda predomina el fenómeno de transmisión por radiación. Por esta razón, en la configuración por reflexión el efecto de los reflejos de radiación infrarroja procedentes del entorno es mayor que cuando se utiliza una configuración por transmisión.

Cuando un calentamiento en modalidad de reflexión es aplicado, los resultados de los análisis termográficos son más sensibles a defectos y anomalías superficiales, existiendo, por regla general, un mejor contraste en la visualización de defectos, pero con el inconveniente añadido de que situaciones de cambios bruscos de emisividad que no suponen la existencia en sí de un defecto como tal (zonas activadas, lubricantes, suciedad, etc.) pueden ser consideradas como un falso positivo.

Las fisuras en las soldaduras de acero pueden ser detectadas usando un protocolo de ensayo basado en la monitorización del enfriamiento del material después de aplicar un calentamiento de pulso largo, a fin de analizar las diferencias en términos de velocidad de enfriamiento entre la zona afectada por la fisura y la zona exterior. Cuando se estudian las velocidades de enfriamiento y las diferencias entre la referida a la zona del defecto y la correspondiente a la zona sana adyacente, el *toe crack* (defecto que se genera en el interior del material y que aflora hacia su superficie), muestra un mayor contraste en la velocidad de enfriamiento con respecto a la zona contigua cuando se utiliza la modalidad de trabajo en conducción. Sin embargo, el *crack longitudinal*, al ser más superficial y no tener incidencia interna, muestra mayor contraste en la velocidad de enfriamiento cuando se utiliza la configuración en transmisión. Esta diferencia permite el establecimiento de un método de análisis diferencial de fisuras en función de la aplicación de diferentes modalidades de trabajo –transmisión o reflexión-. Sin embargo, la necesidad de estimular energéticamente al material en dos configuraciones diferentes hace que la aplicación del procedimiento de ensayo pueda ser difícil para aquellas soldaduras de complicado acceso en su parte posterior o anterior.

Aunque a simple vista puedan parecer semejantes, la morfología de los dos tipos de fisuras analizados es diferente: mientras que la fisura tipo *toe crack* presenta normalmente incisiones que penetran hacia dentro del material, la fisura longitudinal consiste en un agrietamiento en el plano superficial. El procesamiento de la imagen térmica con líneas de contorno (isotermas) posibilita la diferenciación y caracterización de ambos tipos de fisuras. De este modo ha sido posible una distinción entre el *toe crack* y el *crack longitudinal* en base a las formas mostradas por las isotermas. En el *toe crack* se muestran las dos incisiones y además la densidad de líneas es mayor que en el *crack longitudinal*, la cual muestra una forma más homogénea y con menor saturación de isotermas.

La aplicación de una métrica 2D a la imagen térmica de una fisura posibilita el escalado de la imagen y la extracción de medidas desde la misma. Si se aplica un procesado de líneas de contorno de baja densidad de líneas sobre la imagen escalada se puede mejorar la visualización de la fisura y establecer unos límites coherentes que permitan la toma de medidas, ya que el tamaño de pixel en la imagen térmica suele ser grande y, en ocasiones, no es fácil saber en qué pixel comienza y termina la fisura. El procesado por líneas de contorno también permite el esbozo de un eje de orientación de la fisura en base a su simetría que podría aportar información extra sobre la dirección de propagación de la fisura. Se llega a la conclusión de que la termografía como herramienta metrológica para fisuras no aporta buenos resultados en medidas de anchura de las mismas -dirección de menor dimensión-, posiblemente por la alta relación longitud-anchura de las fisuras y las diferencias de rugosidad. Sin embargo el método aporta resultados de precisión aceptables en medidas de longitud de fisuras.

La fotogrametría de objeto cercano puede aplicarse para el modelado de soldaduras si se utiliza un objetivo macro y un determinado protocolo de adquisición de datos. A partir de un conjunto de imágenes se puede obtener un modelo tridimensional de cada

soldadura que permite el análisis metrológico establecido en la normativa de calidad con una precisión por debajo de la décima de milímetro. Con un modelo macrofotogramétrico del cordón se puede implementar un análisis automático de la calidad del cordón en base a diferentes seccionamientos del mismo a lo largo de su eje longitudinal. Con tal procedimiento es posible la detección y valoración de cualquier defecto superficial de naturaleza geométrica de los establecidos en la normativa de calidad como, por ejemplo, el exceso de material, ángulo de ajuste incorrecto, desalineamiento, traslape de material, etc.

La macro-fotogrametría también puede usarse para el modelado de fisuras en soldaduras permitiendo no solo la toma de medidas superficiales sino también el análisis de profundidad de las mismas. Además, con la toma de medidas sobre el modelo macrofotogramétrico se reduce el error debido a que se eliminan factores externos como el pulso del inspector, los temblores ocasionados por el trabajo en malas posiciones, etc.

La correlación de los datos geométricos procedentes de la implementación de un proceso fotogramétrico con los datos térmicos procedentes de una inspección con termografía activa, permite la obtención de un modelo predictivo de profundidad en grietas producidas durante el proceso de soldeo en el acero. Aunque el modelo ha sido aplicado únicamente a un tipo de fisura y a un tipo concreto de acero (de bajo carbono), los resultados del experimento muestran que la correlación entre los datos de temperatura extraídos con termografía y los datos geométricos extraídos con macrofotogrametría son consistentes y, por tanto, queda abierta la puerta al establecimiento de modelos predictivos que permitan la estimación de profundidad de fisuras superficiales a partir de una imagen térmica.

Por último, resaltar que los buenos resultados aportados por el procedimiento macrofotogramétrico aplicado a la inspección de soldaduras han posibilitado el diseño y desarrollo de un sistema (en trámite de patente, ver Anexo II) para la inspección de soldaduras en gaseoductos (tuberías de diámetro igual o superior a 16 „,“ que presentan altos requerimientos en la calidad de las soldaduras), cuyo primer inventor es el autor de la presente Tesis Doctoral.

Líneas de trabajo futuras

La presente investigación, dada la multidisciplinariedad de las técnicas de inspección de soldadura utilizadas, deja abierta la puerta a nuevas investigaciones con diferentes objetivos: por un lado, se podría plantear la optimización de los procedimientos de ensayo ya establecidos a fin de dotarlos de una mayor robustez mediante el desarrollo de nueva algoritmia de procesado y la introducción de sistemas de automatización en la detección de defectos basado en algoritmos de Computer Vision sobre imagen térmica o sobre los propios modelos macro-fotogramétricos tridimensionales.

Asimismo, se piensa en el desarrollo de algoritmos de procesado de imagen termográfica que, aunando la información contenida en el patrón térmico de las grietas con sus parámetros físicos de velocidades de enfriamiento y calentamiento, permitan la clasificación del tipo de defecto presente, de manera automatizada, o , si es el caso, mediante técnicas de clasificación supervisada. Por otro lado, se plantea ahondar en el desarrollo de un sistema de inspección robusto que permita su aplicación in situ para contextos determinados; es decir, la extensión de los ensayos realizados hasta ahora en laboratorios, a la inspección “en campo”. A tal efecto se podría plantear la extensión de la técnica a nuevos contextos de inspección dentro del ámbito de la inspección y ensayo de uniones soldadas, como, por ejemplo, la inspección de soldaduras de elementos de barcos en astilleros, de aeronaves o de estructuras en altura a través del montaje de los sensores térmicos y termográficos en Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS).

El diseño de nuevos sistemas portátiles de inspección basados en la hibridación de sensores fotográficos y térmicos queda abierta pues ambos tipos de sensores, dada su portabilidad y la posibilidad de funcionar con baterías, pueden integrar sistemas de inspección similares a los planteados en la invención presentada (Anexo II) pero dirigidos a nuevos contextos o aplicaciones concretas de soldadura dentro de la industria aeronáutica, automovilística, ferroviaria, naval y estructural. Los avances en la industria termográfica, en la dirección del desarrollo de sensores de menor tamaño y coste con igual resolución, facilitarían el desarrollo de esta línea de investigación.

También se pronostica una continuidad de la técnica enfocada a procesos automatizados de soldadura como son los utilizados en industria automovilística, la potencialidad de la técnica en el estudio de calidad de cordones de soldadura y la versatilidad de los sensores fotográficos y termográficos permitiría el diseño de dispositivos que, instalados en autómatas, permitieran una inspección on-line del proceso de soldeo en grandes factorías industriales.

En cuanto a la investigación de los modelos de predicción de profundidad para fisuras superficiales en acero, se seguirá trabajando en extender los modelos a más tipos de fisuras y también a la obtención de nuevos modelos para la predicción de profundidad en fisuras de otros materiales como el aluminio.

Referencias bibliográficas:

- [1] Diccionario de la lengua Española. Vigésimotercera edición. Real Academia de la Lengua Española 2014.
- [2] Zabara O. Soldadura y Técnicas Afines Tomo II: Metalurgia y Defectos en Uniones Soldadas. Editorial Bellisco. Madrid 1989. ISBN 84-85-198-X
- [3] Welding. Fusion-welded joints in Steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded). Quality levels for imperfection. European Committee for Standardization. ISO-5817: 2009 (2009).
- [4] Welding and allied processes - Classification of geometric imperfections in metallic materials - Part 2: Fusion welding. European Committee for Standardization. EN-ISO 6520-1:2009.
- [5] Welding and allied processes - Classification of geometric imperfections in metallic materials - Part 1: Pressure welding. European Committee for Standardization. EN-ISO 6520-1:2013.
- [6] Non-destructive testing - Qualification and certification of NDT personnel. European Committee for Standardization. UNE-EN ISO 9712:2012.
- [7] Non-destructive testing. Visual Testing. General Principles. Asociación Española de Normalización y Certificación. UNE-EN 13018:2001.
- [8] Non-destructive testing of welds - Penetrant testing of welds - Acceptance levels. European Committee for Standardization. UNE-EN-ISO 23277:2006.
- [9] Non-destructive testing of welds - Magnetic particle testing of welds - Acceptance levels. . European Committee for Standardization. UNE-EN-ISO 23278:2006.
- [10] Non-destructive testing - Ultrasonic testing - Characterization and sizing of discontinuities. European Committee for Standardization. UNE-EN-ISO 16827:2012.
- [11] Non-destructive testing of welds -- Radiographic testing of fusion-welded joints. European Committee for Standardization. UNE-EN-ISO 17636:2003.
- [12] INFRATEC Wärmebildkameras für die Thermografie. <http://www.infratec.eu/thermography/application-area/observation-and-investigation/surveillance.html>. Consultada el 1 de Mayo de 2015.
- [13] Ring, E. Progress in the measurement of human body temperature. R. Nat. Hosp. for Rheumatic Diseases, Bath, UK. Engineering in Medicine and Biology Magazine 1998; 17(4). p.19-24

- [14] Angeliki K, Paris AF, Petros C, Soteris AK. Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy* 2014. 134. p. 531–549.
- [15] Huda A, Taiba S, Ghazali K, Jadin M. A new thermographic NDT for condition monitoring of electrical components using ANN with confidence level analysis. *Transactions* 2014. 53 (3). p. 717–724.
- [16] Ryberg A, Ericsson M, Chrstiansson AK, Eriksson K, Nilsson J, Larsson M. Stereo vision for path correction in off-line programmed robot welding. In: *Proceedings of the 2010 IEEE international conference on industrial technology*; 2010. p. 1700–5.
- [17] Vavilov VP, Douglas D. Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing. *NDT&E International* 2015. 73. p.28–52
- [18] Newton I. *Opticks, the Fourth Edition corrected*. London, 1730.
- [19] *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*. The British Standards Institution. BS 7910:2013.
- [20] Luhmann T, Robson S, Kyle S, Harley I. *Close range photogrammetry: Principles, methods and applications*. Whittles Pub. Scotland (UK). 2006. ISBN 0-470-10633-6.
- [21] Gonzalez-Aguilera D, Guerrero D, Hernandez-Lopez , Rodriguez-Gonzalvez P, Pierrot M, Fernandez-Hernandez J. 2012. Silver CATCON Award. Technical Commission WG VI/2. In: *XXII ISPRS Congress*. Melbourne
- [22] Felice MV, Alexander V, Wilcox D. Accurate depth measurement of small surface-breaking cracks using an ultrasonic array post-processing technique. *NDT&E International* 2014. 68 p.105–112

Anexo I: Datos estadísticos de las revistas

Las revistas de impacto en las cuales han sido aceptados a publicación y/o publicados los diferentes artículos originales que componen la presente Tesis Doctoral están indexadas en el Journal Citation Reports®, adjuntándose a continuación la información detallada referente a los parámetros estadísticos y bibliométricos para cada una de ellas.

ISI Web of KnowledgeSM

Journal Citation Reports[®]



2013 JCR Science Edition

Journal: Dyna

Mark	Journal Title	ISSN	Total Cites	Impact Factor	5-Year Impact Factor	Immediacy Index	Citable Items	Cited Half-life	Citing Half-life
	DYNA-BILBAO	0012-7361	54	0.200	0.143	0.039	51		8.0
Cited Journal		Citing Journal		Source Data	Journal Self Cites				



Journal Information

Full Journal Title: Dyna
ISO Abbrev. Title: Dyna
JCR Abbrev. Title: DYNA-BILBAO
ISSN: 0012-7361
Issues/Year: 9
Language: SPANISH
Journal Country/Territory: SPAIN
Publisher: FEDERACION ASOCIACIONES INGENIEROS INDUSTRIALES ESPANA
Publisher Address: ALAMEDA DE MAZARREDO, BILBAO 69-48009, SPAIN
Subject Categories: ENGINEERING, MULTIDISCIPLINARY

Eigenfactor[®] Metrics
Eigenfactor[®] Score
 0.00015
Article Influence[®] Score
 0.028



Journal Rank in Categories: JOURNAL RANKING

Journal Impact Factor

Cites in 2013 to items published in:	2012 = 12	Number of items published in:	2012 = 61
	2011 = 12		2011 = 59
	Sum: 24		Sum: 120
Calculation:	$\frac{\text{Cites to recent items}}{\text{Number of recent items}} = \frac{24}{120} = 0.200$		

5-Year Journal Impact Factor

Cites in {2013} to items published in:	2012 = 12	Number of items published in:	2012 = 61
	2011 = 12		2011 = 59
	2010 = 10		2010 = 55
	2009 = 9		2009 = 62
	2008 = 2		2008 = 77
			102

Sum: 45

Sum: 314

Calculation: $\frac{\text{Cites to recent items}}{\text{Number of recent items}} = \frac{45}{314} = 0.143$

Journal Self Cites ▲

The tables show the contribution of the journal's self cites to its impact factor. This information is also represented in the [cited journal graph](#).

Total Cites	54	Self Cites	23 (42% of 54)
Cites to Years Used in Impact Factor Calculation	24	Self Cites to Years Used in Impact Factor Calculation	11 (45% of 24)
Impact Factor	0.200	Impact Factor without Self Cites	0.108

Journal Immediacy Index ▲

Cites in 2013 to items published in 2013 = 2
 Number of items published in 2013 = 51
 Calculation: $\frac{\text{Cites to current items}}{\text{Number of current items}} = \frac{2}{51} = 0.039$

Journal Cited Half-Life ▲

The cited half-life for the journal is the median age of its items cited in the current JCR year. Half of the citations to the journal are to items published within the cited half-life.

Cited Half-Life:

Breakdown of the citations *to the journal* by the cumulative percent of 2013 cites to items published in the following years:

Cited Year	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003-all
# Cites from 2013	2	12	12	10	9	2	5	1	0	0	1
Cumulative %											

Cited Half-Life Calculations:

The cited half-life calculation finds the number of publication years from the current JCR year that account for 50% of citations received by the journal. Read help for more information on the calculation.

Cited Journal Graph ▲

[Click here for Cited Journal data table](#)

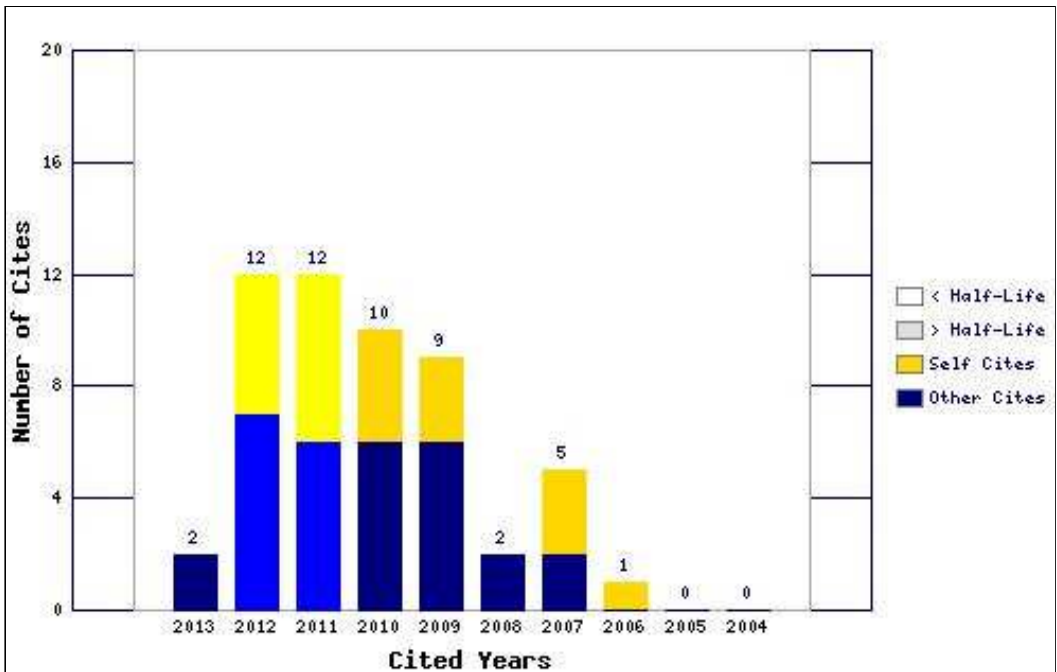
This graph shows the distribution by cited year of citations to items published in the journal DYNA-BILBAO.

Citations to the journal (per cited year)

- The white/grey division indicates the cited half-life (if < 10.0). Half of the journal's cited items were published more recently than the cited half-life.

- The top (gold) portion of each column indicates Journal Self Citations: citations to items in the journal from items in the same journal.

- The bottom (blue) portion of each column indicates Non-Self Citations: citations to the



journal from items in other journals.
 - The two lighter columns indicate citations used to calculate the Impact Factor (always the 2nd and 3rd columns).

Journal Citing Half-Life

The citing half-life for the journal is the median age of the items the journal cited in the current JCR year. Half of the citations in the journal are to items published within the citing half-life.

Citing Half-Life: 8.0 years

Breakdown of the citations *from the journal* by the cumulative percent of 2013 cites to items published in the following years:

Cited Year	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003-all
# Cites from 2013	16	78	111	105	103	81	68	75	55	48	527
Cumulative %	1.26	7.42	16.18	24.47	32.60	38.99	44.36	50.28	54.62	58.41	100

Citing Half-Life Calculations:

The citing half-life calculation finds the number of publication years from the current JCR year that account for 50% of citations in the journal. Read help for more information on the calculation.

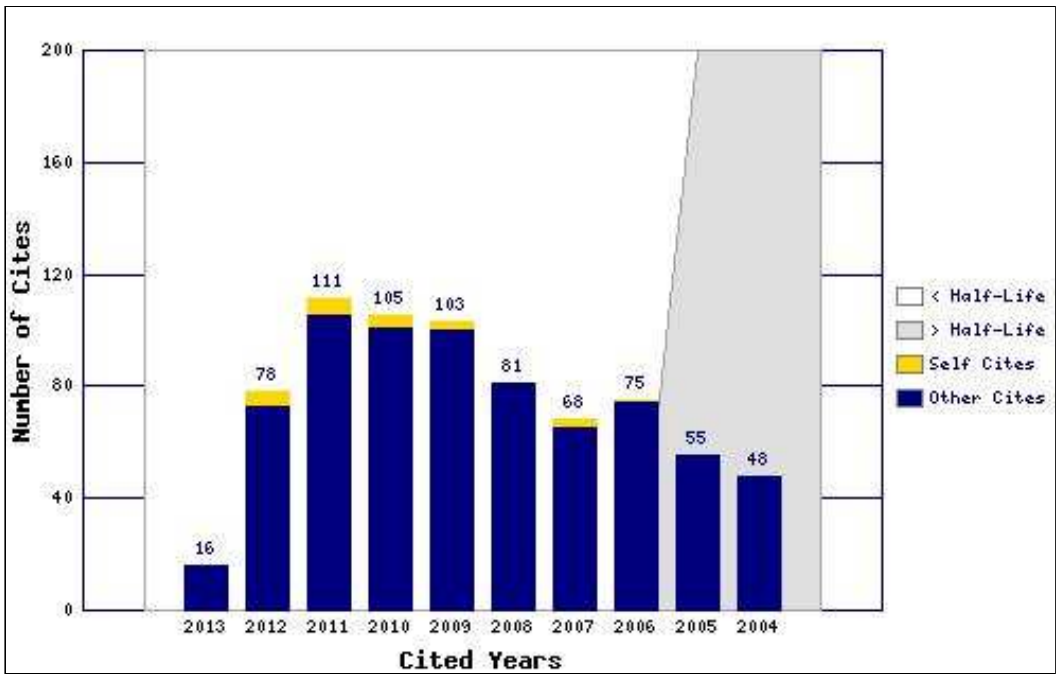
Citing Journal Graph

[Click here for Citing Journal data table](#)

This graph shows the distribution by cited year of citations from current-year items in the journal DYNA-BILBAO.

Citations from the journal (per cited year)

- The white/grey division indicates the citing half-life (if < 10.0). Half of the citations from the journal's current items are to items published more recently than the citing half-life.
 - The top (gold) portion of each column indicates Journal Self-Citations: citations from items in the journal to items in the same journal.
 - The bottom (blue) portion of each column indicates Non-Self



Citations: citations from the journal to items in other journals.

Journal Source Data ▲

	Citable items			Other items
	Articles	Reviews	Combined	
Number in JCR year 2013 (A)	51	0	51	51
Number of references (B)	1021	0	1021	246.00
Ratio (B/A)	20.0	0.0	20.0	4.8

[Acceptable Use Policy](#)
Copyright © 2015 [Thomson Reuters](#).



Rank in Category: Dyna

Journal Ranking *i*

For 2013, the journal **Dyna** has an Impact Factor of **0.200**.

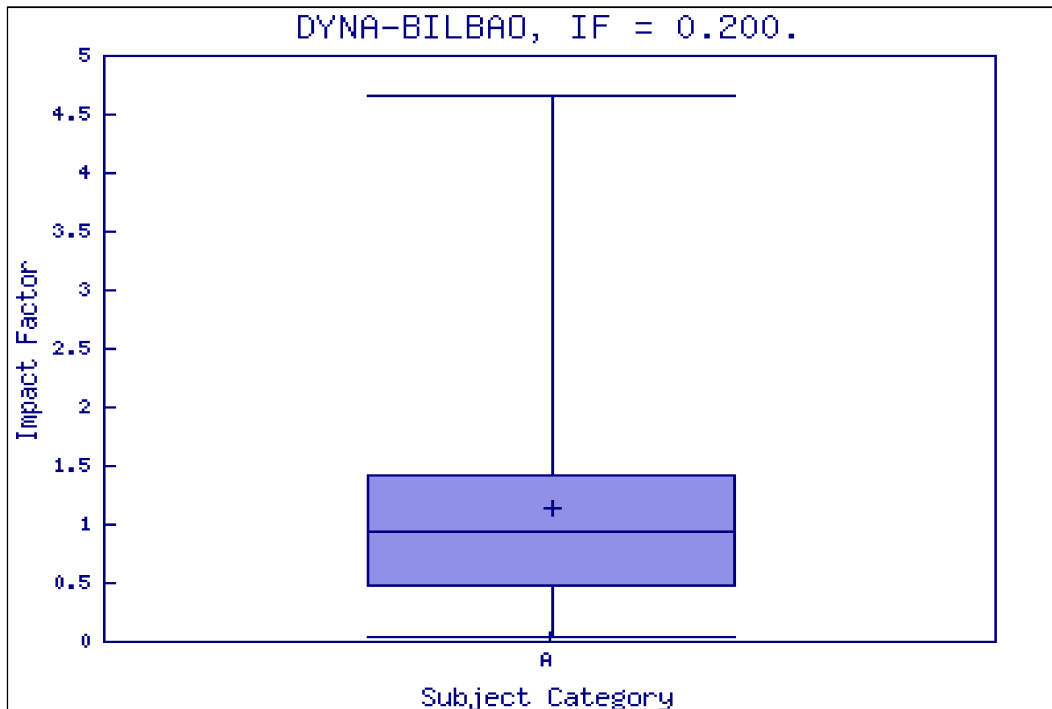
This table shows the ranking of this journal in its subject categories based on Impact Factor.

Category Name	Total Journals in Category	Journal Rank in Category	Quartile in Category
ENGINEERING, MULTIDISCIPLINARY	87	82	Q4

Category Box Plot *i*

For 2013, the journal **Dyna** has an Impact Factor of **0.200**.

This is a box plot of the subject category or categories to which the journal has been assigned. It provides information about the distribution of journals based on Impact Factor values. It shows median, 25th and 75th percentiles, and the extreme values of the distribution.



Key
A - ENGINEERING, MULTIDISCIPLINARY

[Acceptable Use Policy](#)
Copyright © 2015 [Thomson Reuters](#).

2011 = 149	2011 = 79
2010 = 114	2010 = 72
2009 = 112	2009 = 80
2008 = 98	2008 = 82
Sum: 562	Sum: 397

Calculation: $\frac{\text{Cites to recent items}}{\text{Number of recent items}} = \frac{562}{397} = \mathbf{1.416}$

Journal Self Cites ▲

The tables show the contribution of the journal's self cites to its impact factor. This information is also represented in the [cited journal graph](#).

Total Cites	1760	Self Cites	258 (14% of 1760)
Cites to Years Used in Impact Factor Calculation	238	Self Cites to Years Used in Impact Factor Calculation	74 (31% of 238)
Impact Factor	1.460	Impact Factor without Self Cites	1.006

Journal Immediacy Index ▲

Cites in 2013 to items published in 2013 = 35
 Number of items published in 2013 = 167
 Calculation: $\frac{\text{Cites to current items}}{\text{Number of current items}} = \frac{35}{167} = \mathbf{0.210}$

Journal Cited Half-Life ▲

The cited half-life for the journal is the median age of its items cited in the current JCR year. Half of the citations to the journal are to items published within the cited half-life.

Cited Half-Life: 8.7 years

Breakdown of the citations *to the journal* by the cumulative percent of 2013 cites to items published in the following years:

Cited Year	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003-all
# Cites from 2013	35	89	149	114	112	98	146	98	56	120	743
Cumulative %	1.99	7.05	15.51	21.99	28.35	33.92	42.22	47.78	50.97	57.78	100

Cited Half-Life Calculations:

The cited half-life calculation finds the number of publication years from the current JCR year that account for 50% of citations received by the journal. Read help for more information on the calculation.

Cited Journal Graph ▲

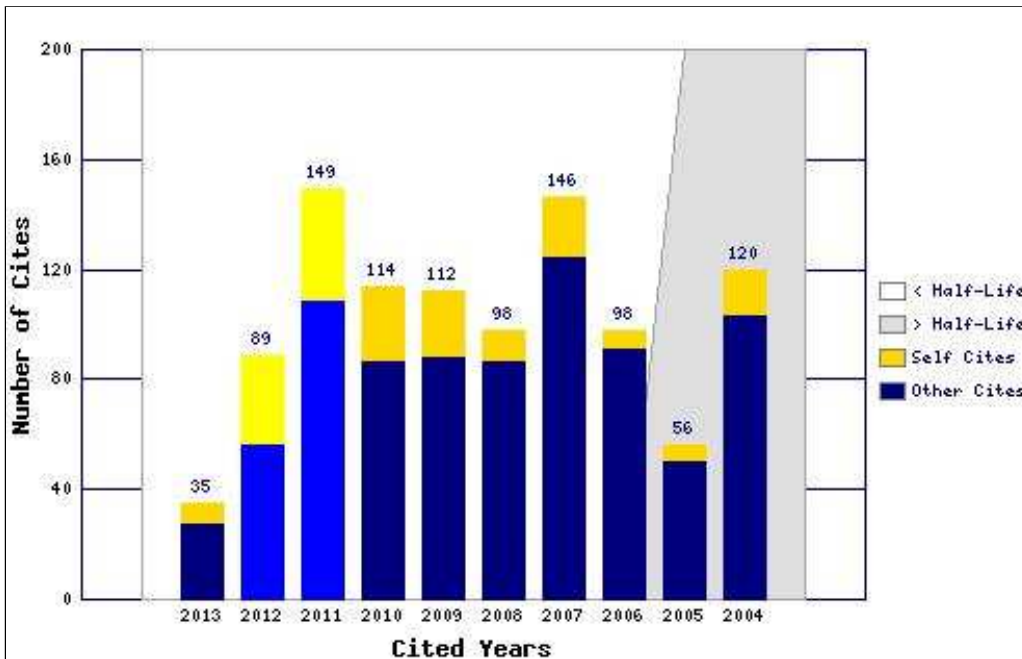
[Click here for Cited Journal data table](#)

This graph shows the distribution by cited year of citations to items published in the journal INFRARED PHYS TECHN.

Citations to the journal (per cited year)

- The white/grey division indicates the cited half-life (if < 10.0). Half of the journal's cited items were published more recently than the cited half-life.

- The top (gold) portion of each column indicates Journal Self Citations: citations to items in the journal from items in the same journal.



- The bottom (blue) portion of each column indicates Non-Self Citations: citations to the journal from items in other journals.

- The two lighter columns indicate citations used to calculate the Impact Factor (always the 2nd and 3rd columns).

Journal Citing Half-Life ▲

The citing half-life for the journal is the median age of the items the journal cited in the current JCR year. Half of the citations in the journal are to items published within the citing half-life.

Citing Half-Life: 7.6 years

Breakdown of the citations *from the journal* by the cumulative percent of 2013 cites to items published in the following years:

Cited Year	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003-all
# Cites from 2013	51	268	367	391	339	274	283	235	216	191	1633
Cumulative %	1.20	7.51	16.15	25.35	33.33	39.78	46.45	51.98	57.06	61.56	100

Citing Half-Life Calculations:

The citing half-life calculation finds the number of publication years from the current JCR year that account for 50% of citations in the journal. Read help for more information on the calculation.

Citing Journal Graph ▲

[Click here for Citing Journal data table](#)

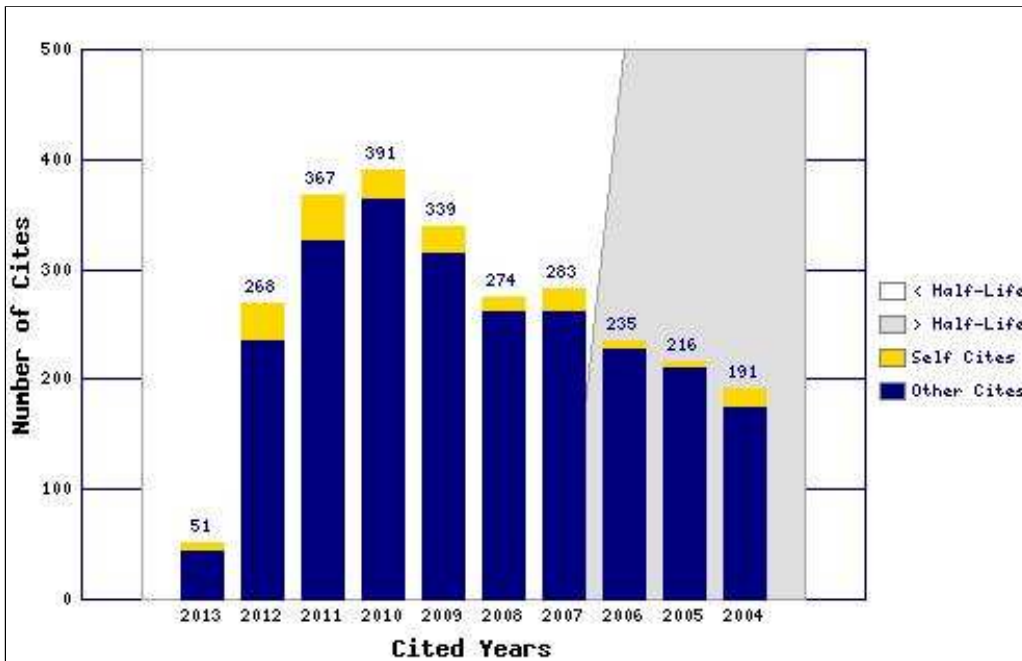
This graph shows the distribution by cited year of citations from current-year items in the journal INFRARED PHYS TECHN.

Citations from the journal (per cited year)

- The white/grey division indicates the citing half-life (if < 10.0). Half of the citations from the journal's current items are to items published more recently than the citing half-life.

- The top (gold) portion of each column indicates Journal Self-Citations: citations from items in the journal to items in the same journal.

- The bottom (blue) portion of each column indicates Non-Self Citations: citations from the journal to items in other journals.



Journal Source Data ▲

	Citable items			Other items
	Articles	Reviews	Combined	
Number in JCR year 2013 (A)	162	5	167	2
Number of references (B)	3778	469	4247	1.00
Ratio (B/A)	23.3	93.8	25.4	0.5

[Acceptable Use Policy](#)
 Copyright © 2015 [Thomson Reuters](#).



Rank in Category: **INFRARED PHYSICS & TECHNOLOGY**

Journal Ranking ⓘ

For **2013**, the journal **INFRARED PHYSICS & TECHNOLOGY** has an Impact Factor of **1.460**.

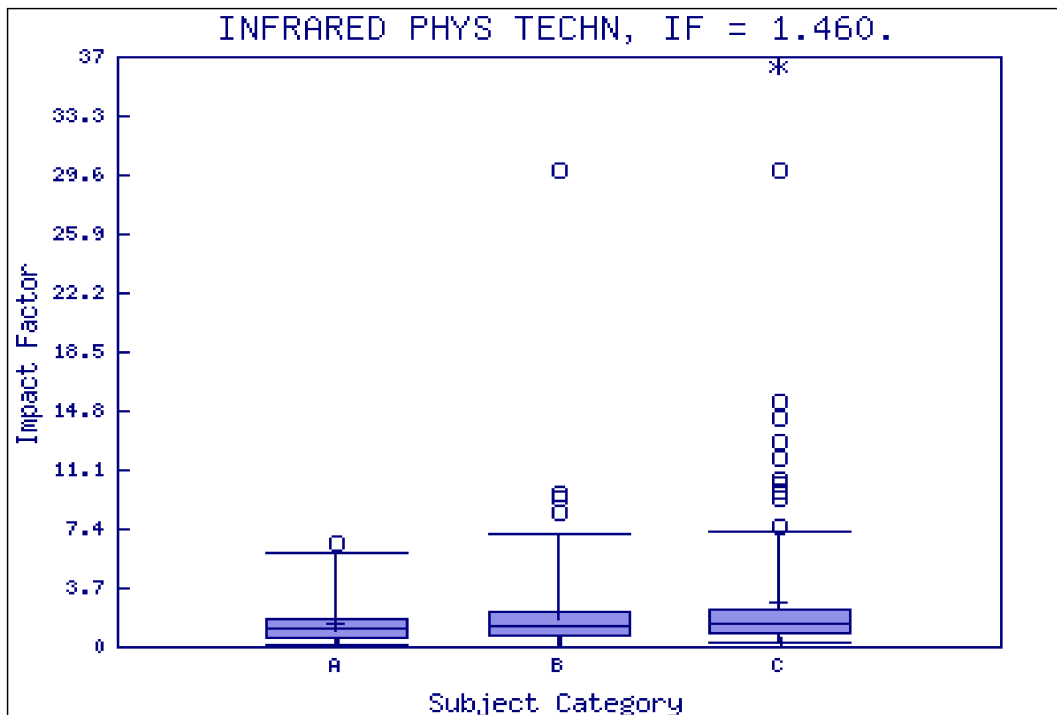
This table shows the ranking of this journal in its subject categories based on Impact Factor.

Category Name	Total Journals in Category	Journal Rank in Category	Quartile in Category
INSTRUMENTS & INSTRUMENTATION	57	24	Q2
OPTICS	83	37	Q2
PHYSICS, APPLIED	136	69	Q3

Category Box Plot ⓘ

For **2013**, the journal **INFRARED PHYSICS & TECHNOLOGY** has an Impact Factor of **1.460**.

This is a box plot of the subject category or categories to which the journal has been assigned. It provides information about the distribution of journals based on Impact Factor values. It shows median, 25th and 75th percentiles, and the extreme values of the distribution.



Key
 A - INSTRUMENTS & INSTRUMENTATION
 B - OPTICS
 C - PHYSICS, APPLIED

[Acceptable Use Policy](#)
 Copyright © 2015 [Thomson Reuters](#).

2010 = 269	2010 = 101
2009 = 265	2009 = 97
2008 = 220	2008 = 93
Sum: 1257	Sum: 567

Calculation: $\frac{\text{Cites to recent items}}{\text{Number of recent items}} = \frac{1257}{567} = 2.217$

Journal Self Cites

The tables show the contribution of the journal's self cites to its impact factor. This information is also represented in the [cited journal graph](#).

Total Cites	2130
Cites to Years Used in Impact Factor Calculation	503
Impact Factor	1.822

Self Cites	675 (31% of 2130)
Self Cites to Years Used in Impact Factor Calculation	190 (37% of 503)
Impact Factor without Self Cites	1.134

Journal Immediacy Index

Cites in 2013 to items published in 2013 = 69
 Number of items published in 2013 = 191
 Calculation: $\frac{\text{Cites to current items}}{\text{Number of current items}} = \frac{69}{191} = 0.361$

Journal Cited Half-Life

The cited half-life for the journal is the median age of its items cited in the current JCR year. Half of the citations to the journal are to items published within the cited half-life.

Cited Half-Life: 4.8 years

Breakdown of the citations *to the journal* by the cumulative percent of 2013 cites to items published in the following years:

Cited Year	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003-all
# Cites from 2013	69	212	291	269	265	220	158	124	130	100	292
Cumulative %	3.24	13.19	26.85	39.48	51.92	62.25	69.67	75.49	81.60	86.29	100

Cited Half-Life Calculations:

The cited half-life calculation finds the number of publication years from the current JCR year that account for 50% of citations received by the journal. Read help for more information on the calculation.

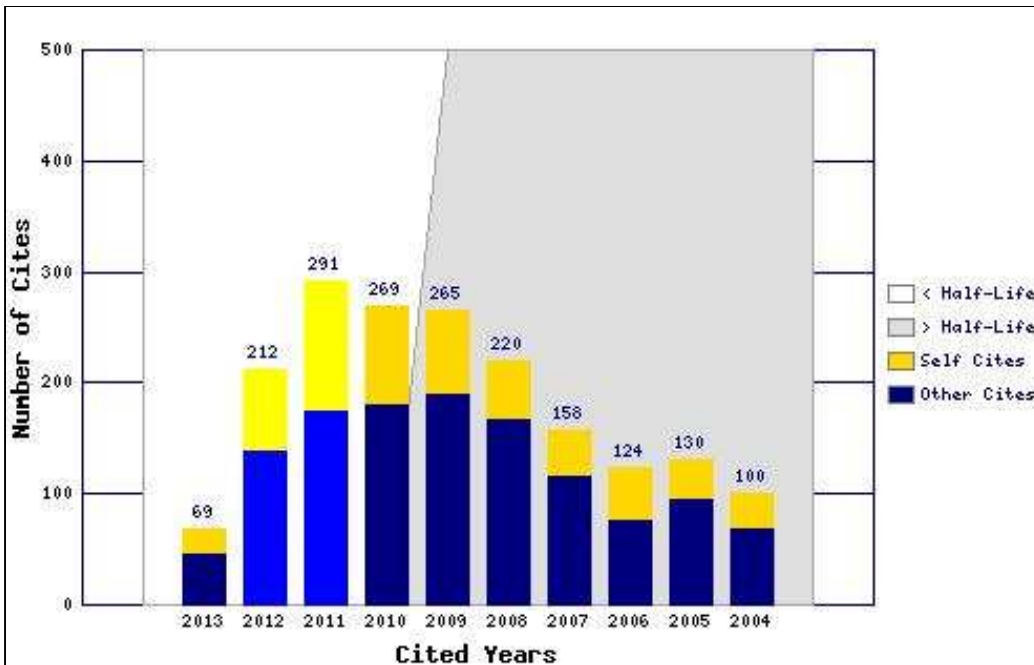
Cited Journal Graph

[Click here for Cited Journal data table](#)

This graph shows the distribution by cited year of citations to items published in the journal AUTOMAT CONSTR.

Citations to the journal (per cited year)

- The white/grey division indicates the cited half-life (if < 10.0). Half of the journal's cited items were published more recently than the cited half-life.
- The top (gold) portion of each column indicates Journal Self Citations: citations to items in the journal from items in the same journal.
- The bottom (blue) portion



of each column indicates Non-Self Citations: citations to the journal from items in other journals.

- The two lighter columns indicate citations used to calculate the Impact Factor (always the 2nd and 3rd columns).

Journal Citing Half-Life ▲

The citing half-life for the journal is the median age of the items the journal cited in the current JCR year. Half of the citations in the journal are to items published within the citing half-life.

Citing Half-Life: 7.7 years

Breakdown of the citations *from the journal* by the cumulative percent of 2013 cites to items published in the following years:

Cited Year	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003-all
# Cites from 2013	63	337	704	553	628	481	412	440	379	320	2656
Cumulative %	0.90	5.74	15.83	23.76	32.77	39.67	45.58	51.89	57.32	61.91	100

Citing Half-Life Calculations:

The citing half-life calculation finds the number of publication years from the current JCR year that account for 50% of citations in the journal. Read help for more information on the calculation.

Citing Journal Graph ▲

[Click here for Citing Journal data table](#)

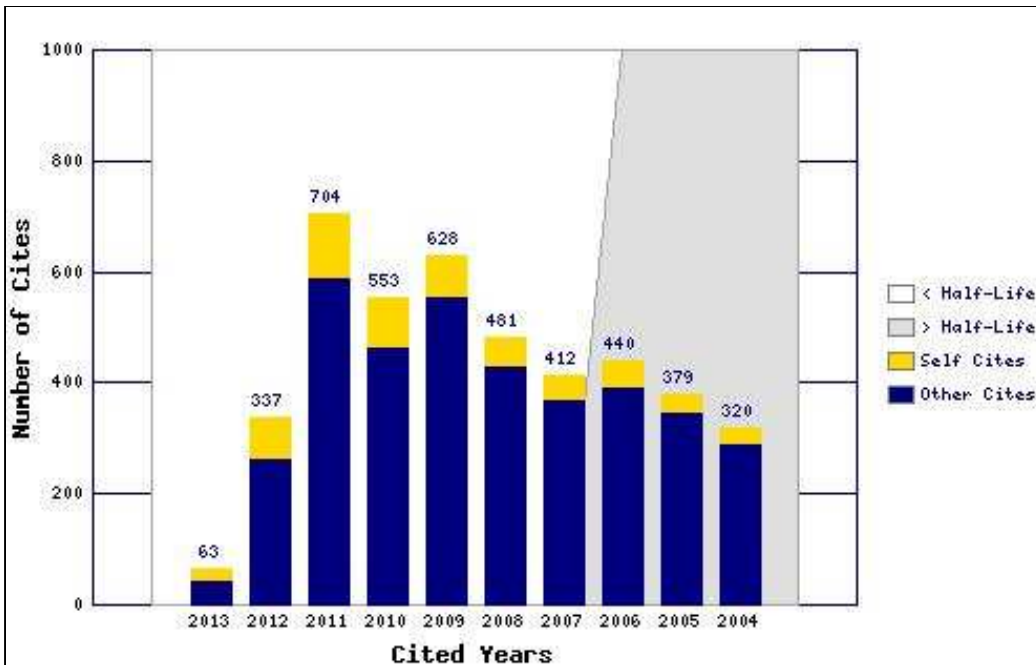
This graph shows the distribution by cited year of citations from current-year items in the journal AUTOMAT CONSTR.

Citations from the journal (per cited year)

- The white/grey division indicates the citing half-life (if < 10.0). Half of the citations from the journal's current items are to items published more recently than the citing half-life.

- The top (gold) portion of each column indicates Journal Self-Citations: citations from items in the journal to items in the same journal.

- The bottom (blue) portion of each column indicates Non-Self Citations: citations from the journal to items in other journals.



Journal Source Data ▲

	Citable items			Other items
	Articles	Reviews	Combined	
Number in JCR year 2013 (A)	187	4	191	5
Number of references (B)	6706	229	6935	38.00
Ratio (B/A)	35.9	57.2	36.3	7.6

[Acceptable Use Policy](#)
Copyright © 2015 [Thomson Reuters](#).



Rank in Category: **AUTOMATION IN CONSTRUCTION**

Journal Ranking

For **2013**, the journal **AUTOMATION IN CONSTRUCTION** has an Impact Factor of **1.822**.

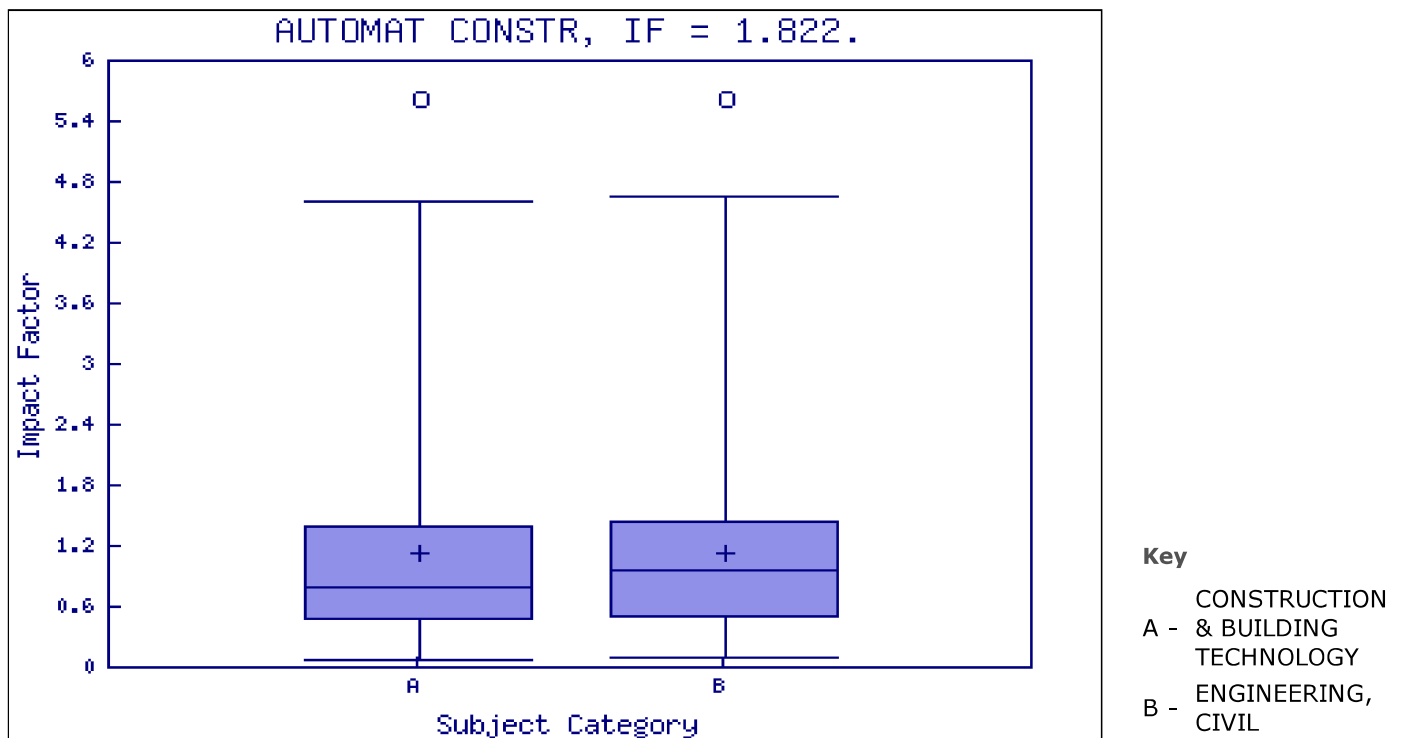
This table shows the ranking of this journal in its subject categories based on Impact Factor.

Category Name	Total Journals in Category	Journal Rank in Category	Quartile in Category
CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY	58	9	Q1
ENGINEERING, CIVIL	124	19	Q1

Category Box Plot

For **2013**, the journal **AUTOMATION IN CONSTRUCTION** has an Impact Factor of **1.822**.

This is a box plot of the subject category or categories to which the journal has been assigned. It provides information about the distribution of journals based on Impact Factor values. It shows median, 25th and 75th percentiles, and the extreme values of the distribution.



[Acceptable Use Policy](#)
 Copyright © 2015 [Thomson Reuters](#).

Journal: OPTICS AND LASER TECHNOLOGY

Mark	Journal Title	ISSN	Total Cites	Impact Factor	5-Year Impact Factor	Immediacy Index	Citable Items	Cited Half-life	Citing Half-life
	OPT LASER TECHNOL	0030-3992	3145	1.649	1.653	0.627	466	3.6	7.7
		Cited Journal	Citing Journal	Source Data	Journal Self Cites				

CITED JOURNAL DATA CITING JOURNAL DATA IMPACT FACTOR TREND RELATED JOURNALS

Journal Information

Full Journal Title: OPTICS AND LASER TECHNOLOGY

ISO Abbrev. Title: Opt. Laser Technol.

JCR Abbrev. Title: OPT LASER TECHNOL

ISSN: 0030-3992

Issues/Year: 8

Language: ENGLISH

Journal Country/Territory: ENGLAND

Publisher: ELSEVIER SCI LTD

Publisher Address: THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, OXON, ENGLAND

Subject Categories: OPTICS

VIEW JOURNAL SUMMARY LIST

VIEW CATEGORY DATA

PHYSICS, APPLIED

VIEW JOURNAL SUMMARY LIST

VIEW CATEGORY DATA

Journal Rank in Categories: JOURNAL RANKING

Eigenfactor[®] Metrics
Eigenfactor[®] Score
 0.00730
Article Influence[®] Score
 0.378

Journal Impact Factor

Cites in 2013 to items published in: 2012 = 608 Number of items published in: 2012 = 393
 2011 = 426 2011 = 234
 Sum: 1034 Sum: 627

Calculation: $\frac{\text{Cites to recent items}}{\text{Number of recent items}} = \frac{1034}{627} = 1.649$

5-Year Journal Impact Factor

Cites in {2013} to items published in: 2012 = 608 Number of items published in: 2012 = 393

2011 = 426	2011 = 234
2010 = 384	2010 = 213
2009 = 249	2009 = 160
2008 = 251	2008 = 160
Sum: 1918	Sum: 1160

Calculation: $\frac{\text{Cites to recent items}}{\text{Number of recent items}} = \frac{1918}{1160} = 1.653$

Journal Self Cites ▲

The tables show the contribution of the journal's self cites to its impact factor. This information is also represented in the [cited journal graph](#).

Total Cites	3145
Cites to Years Used in Impact Factor Calculation	1034
Impact Factor	1.649

Self Cites	476 (15% of 3145)
Self Cites to Years Used in Impact Factor Calculation	196 (18% of 1034)
Impact Factor without Self Cites	1.337

Journal Immediacy Index ▲

Cites in 2013 to items published in 2013 = 292
 Number of items published in 2013 = 466
 Calculation: $\frac{\text{Cites to current items}}{\text{Number of current items}} = \frac{292}{466} = 0.627$

Journal Cited Half-Life ▲

The cited half-life for the journal is the median age of its items cited in the current JCR year. Half of the citations to the journal are to items published within the cited half-life.

Cited Half-Life: 3.6 years

Breakdown of the citations *to the journal* by the cumulative percent of 2013 cites to items published in the following years:

Cited Year	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003-all
# Cites from 2013	292	608	426	384	249	251	222	76	90	80	467
Cumulative %	9.28	28.62	42.16	54.37	62.29	70.27	77.33	79.75	82.61	85.15	100

Cited Half-Life Calculations:

The cited half-life calculation finds the number of publication years from the current JCR year that account for 50% of citations received by the journal. Read help for more information on the calculation.

Cited Journal Graph ▲

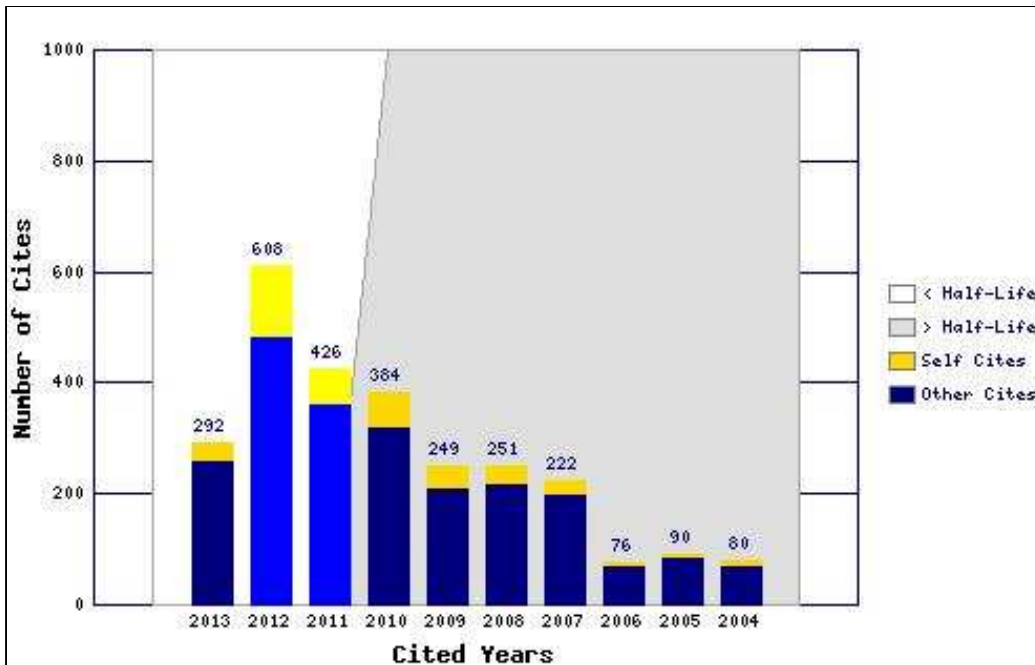
[Click here for Cited Journal data table](#)

This graph shows the distribution by cited year of citations to items published in the journal OPT LASER TECHNOL.

Citations to the journal (per cited year)

- The white/grey division indicates the cited half-life (if < 10.0). Half of the journal's cited items were published more recently than the cited half-life.

- The top (gold) portion of each column indicates Journal Self Citations: citations to items in the journal from items in the same journal.



- The bottom (blue) portion of each column indicates Non-Self Citations: citations to the journal from items in other journals.

- The two lighter columns indicate citations used to calculate the Impact Factor (always the 2nd and 3rd columns).

Journal Citing Half-Life ▲

The citing half-life for the journal is the median age of the items the journal cited in the current JCR year. Half of the citations in the journal are to items published within the citing half-life.

Citing Half-Life: 7.7 years

Breakdown of the citations *from the journal* by the cumulative percent of 2013 cites to items published in the following years:

Cited Year	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003-all
# Cites from 2013	79	710	1094	998	966	814	800	705	610	479	4595
Cumulative %	0.67	6.66	15.89	24.31	32.46	39.33	46.08	52.03	57.18	61.22	100

Citing Half-Life Calculations:

The citing half-life calculation finds the number of publication years from the current JCR year that account for 50% of citations in the journal. Read help for more information on the calculation.

Citing Journal Graph ▲

[Click here for Citing Journal data table](#)

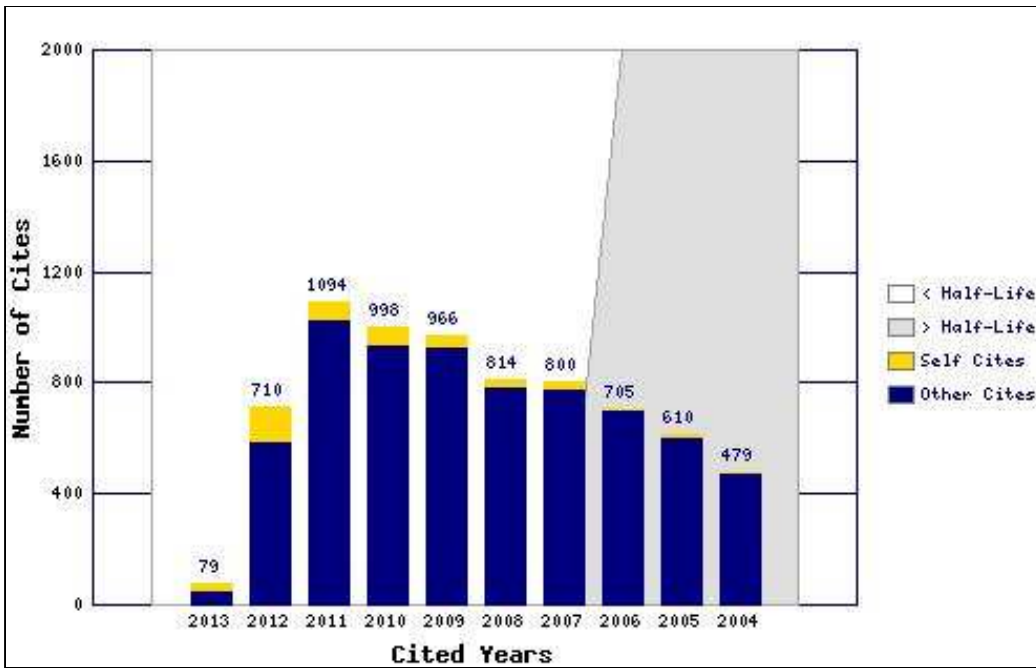
This graph shows the distribution by cited year of citations from current-year items in the journal OPT LASER TECHNOL.

Citations from the journal (per cited year)

- The white/grey division indicates the citing half-life (if < 10.0). Half of the citations from the journal's current items are to items published more recently than the citing half-life.

- The top (gold) portion of each column indicates Journal Self-Citations: citations from items in the journal to items in the same journal.

- The bottom (blue) portion of each column indicates Non-Self Citations: citations from the journal to items in other journals.



Journal Source Data ▲

	Citable items			Other items
	Articles	Reviews	Combined	
Number in JCR year 2013 (A)	456	10	466	12
Number of references (B)	11193	575	11768	82.00
Ratio (B/A)	24.5	57.5	25.3	6.8

[Acceptable Use Policy](#)
 Copyright © 2015 [Thomson Reuters](#).



Rank in Category: **OPTICS AND LASER TECHNOLOGY**

Journal Ranking ⓘ

For **2013**, the journal **OPTICS AND LASER TECHNOLOGY** has an Impact Factor of **1.649**.

This table shows the ranking of this journal in its subject categories based on Impact Factor.

Category Name	Total Journals in Category	Journal Rank in Category	Quartile in Category
OPTICS	83	29	Q2
PHYSICS, APPLIED	136	58	Q2

Category Box Plot ⓘ

For **2013**, the journal **OPTICS AND LASER TECHNOLOGY** has an Impact Factor of **1.649**.

This is a box plot of the subject category or categories to which the journal has been assigned. It provides information about the distribution of journals based on Impact Factor values. It shows median, 25th and 75th percentiles, and the extreme values of the distribution.

