

## Análisis de deformaciones unitarias en juntas soldadas utilizando correlación digital de imágenes

RESENDIZ-HERNÁNDEZ, José Emiliano\*† y PALACIOS-PINEDA, Luis Manuel

Recibido Enero 3, 2017; Aceptado Marzo 6, 2017

### Resumen

El fallo de estructuras soldadas conduce a pérdidas directas tales como el costo de los trabajos en reparación, en compensación de accidentes, y pérdidas indirectas tales como disminución en la producción. La comprensión de una posible falla y su propagación conducirá a una mejor apreciación de las juntas soldadas desde el punto de vista de la confiabilidad. En este trabajo, la técnica de correlación digital de imágenes (DIC) en 2D ha sido empleada para la medición de deformaciones unitarias en la superficie de una junta soldada, mediante el análisis de imágenes digitales del elemento sometido a un ensayo mecánico a tensión. El objetivo es conocer la distribución de deformación alrededor de la soldadura usando la técnica DIC. La información sobre campos de deformación se utiliza para detectar zonas locales con elevada deformación donde pueden iniciarse grietas. Con los resultados obtenidos será posible localizar la causa de falla para poder modificar las especificaciones en la fase de diseño o conducir a minimizar la falla de tales juntas.

### DIC, deformación unitaria, soldadura

### Abstract

Failure of welded structures lead to direct losses such as the cost of repair work, accident compensation, and indirect losses such as decrease in production. Understanding a failure occurrence and its propagation will lead to a better appreciation of welded joints from reliability point of view. In this work, the technique of digital image correlation (DIC) in 2D, has been used for the measurement of strain on the surface of a welded joint, through the analysis of digital images of the element subjected to a mechanical stress test. The objective is to know the distribution of deformation around the weld using the DIC technique. The information on strain fields is used to detect local areas of high strain where cracks can be initiated. With the results obtained it will be possible to locate the cause of failure to be able to modify the specifications in the design phase or to lead to minimize the failure of such joints.

### DIC, strain, welding

**Citación:** RESENDIZ-HERNÁNDEZ, José Emiliano y PALACIOS-PINEDA, Luis Manuel. Análisis de deformaciones unitarias en juntas soldadas utilizando correlación digital de imágenes. Revista de Ingeniería Mecánica 2017, 1-1: 10-19

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: emi\_jose.18@hotmail.com )

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

La soldadura es un proceso de fabricación vigente en la actualidad, debido a la gran variedad de aplicaciones que ofrece, tales como en estructuras, recipientes a presión, construcciones navales, maquinarias, etc.; por su versatilidad de proceso como pueden ser una llama de gas, un arco eléctrico, un láser, un rayo de electrones, procesos de fricción o ultrasonido, y en los diferentes ambientes como el sector industrial, al aire libre, debajo del agua y en el espacio; es por estas razones que se ha convertido en el proceso más utilizado en la industria en general.

Por lo descrito, la soldadura se convierte en un tema de suma importancia para investigaciones, las que enfocan la atención principalmente a las propiedades impredecibles de las soldaduras y la tendencia de una soldadura a agrietarse o deformarse, y estas se presentan, porque en todo proceso de soldadura, se crea una diferencia de temperaturas considerable, en la zona del cordón y el resto del material base.

La seguridad en el funcionamiento de las estructuras metálicas, componentes mecánicos, etc., es un factor imprescindible. Los estudios realizados tienen como objetivo encontrar las causas de las fallas en dichos elementos, estos daños se pueden basar en defectos existentes en la manufactura, por la aplicación de los procesos en si, como por ejemplo por la soldadura, y por errores humanos en la fabricación, selección y características de los materiales inadecuadas. Otra de las causas de las fallas son los defectos inducidos durante el servicio, esta última es la más difícil de prevenirla, porque se pueden presentar por comportamientos desconocidos.

Por la falta de estudios juntas soldadas y sus aplicaciones en la industria, surge las siguientes dudas ¿Cómo medir de manera experimental el campo de deformaciones unitarias en las probetas bajo una carga? ¿Cuál es el comportamiento de las deformaciones en las juntas sometidas a una carga?, por la necesidad de satisfacer esta incógnita se decide elaborar el presente trabajo, realizando un análisis de las deformaciones unitarias que se presentan con un estudio puntualizado, ya que existe un sin número de materiales y electrodos, formas de las juntas, y varios métodos de soldadura que hacen demasiado extenso este campo.

Entonces el problema radica en medir los campos de deformaciones y este problema se acentúa si se considera la falta de un procedimiento experimental para la determinación de las deformaciones.

Por otro lado, hoy en día se están desarrollando técnicas de medida sin contacto basadas en correlación digital de imágenes, debido a su implementación relativamente sencilla es empleada en el análisis de diversas investigaciones en el área de la mecánica experimental, en la industria aeronáutica, del automóvil, en el campo de la medicina (Sutton, 2008).

La correlación digital de imágenes, es una técnica experimental a utilizar, la cual permite a partir de imágenes obtenidas durante un ensayo, medir desplazamientos y deformaciones. La técnica consiste en obtener imágenes digitales durante el ensayo desde un estado inicial, el cual es considerado como referencia (imagen sin deformación), hasta un estado final (imagen con deformación) (Q.C.Zhang, Mayo 2016).

En los últimos años, aplicaciones basadas en DIC se han desarrollado para estudiar el comportamiento de materiales bajo determinadas condiciones; Sánchez-Arévalo y Pulos analizaron el comportamiento de materiales ante cargas a tracción utilizando únicamente la textura del material (F.M. Sánchez-Arévalo, 2008). Chrysochoos aplicaron a ensayos de fatiga las técnicas DIC y termografía, para analizar la energía local en la zona de interés (A. Chrysochoos, 2009); Tung, Shih y Kuo exploraron la deformación plástica en materiales anisótropos durante un ensayo de tensión (Shih-Heng Tung, 2009) lo cual indica el potencial de la capacidad de la técnica DIC.

También en trabajos realizados en la Mecánica de la Fractura muestran la importancia de utilizar la correlación de imágenes digitales en comparación de otras técnicas ópticas como son la fotoelasticidad o por contacto como las galgas extensiométricas. El trabajo de Rui Zhang utilizó los campos de desplazamiento en las proximidades de la punta de la grieta de la muestra fue sometida a la carga combinada de los modos I y II; él calculó los factores mediante la técnica de la correlación de imágenes digitales. Donde mencionó, la relevancia que el método de correlación de imágenes digitales es una herramienta práctica y eficaz para la medición de la deformación (Zhang, 2012). También Mohammadreza utilizó la fotoelasticidad y la correlación de imágenes digitales para determinar el factor de intensidad de esfuerzo; donde los valores de factores de intensidad de esfuerzos de las dos técnicas fueron semejantes; donde obtuvo una variación de un 3% entre las dos técnicas (Mohammadreza, 2014). Demostró que el método correlación de imágenes digitales requiere configuración sencilla y una mínima preparación de la muestra entregando resultados fiables.

Para el análisis de las deformaciones unitarias, por lo que su medición es de gran importancia, para esto se usan un software comercial GOM Correlate el cual usa la técnica de DIC, que serán pruebas confiables ya que sus resultados son más aproximados a la realidad. En el momento de realizar el proceso de soldadura no se da la importancia necesaria a estas tensiones, su determinación y medición no es una práctica común. Todos los métodos de medición se han usado únicamente de forma experimental en probetas y con el equipo de laboratorio, por eso se ve la imperiosa necesidad de establecer procedimientos útiles para la medición y que sean aplicables en la industria. En este trabajo se aplica la técnica DIC para la medida de deformaciones unitarias en un problema de la superficie de una junta soldada. El interés del estudio radica en no haber encontrado bibliografía por parte de los autores en relación a medidas experimentales de este problema con la técnica mencionada. Los resultados se compararán con los obtenidos mediante un estudio numérico.

Además se escoge el material A36 porque es el más usado en la industria y la realización de estructuras común en la industria ecuatoriana ya que es un acero que tiene baja concentración de carbono, suave, dúctil y de buena soldabilidad, y el electrodo E6013 ya que presenta muchas facilidades y variabilidades en el momento de soldar la junta soldada como en la figura 1 muestra la probeta a analizar.



**Figura 1** Junta soldada

## Metodología experimental

### Definición de la prueba de tensión con DIC

En la actualidad, son muchos los ensayos experimentales que se realizan, en los cuales es muy difícil la aplicación de técnicas tradicionales como son la extensómetros para la medición de deformaciones durante un estado determinado de carga. Ensayos donde el proceso de manufactura hacen que se pierdan gran información con la utilización de galgas, ensayos a nivel microscópico o ensayos a altas velocidades son ejemplos donde la aplicación de la técnica de correlación de imágenes adquiere gran potencial en el área de la Mecánica Experimental; debido a la particularidad de ser una técnica de no contacto para la medición de campo completo de desplazamientos y deformaciones.

A continuación se muestra la descripción del ensayo realizado en este trabajo.

Los resultados se compararán con los resultados obtenidos mediante un programa de Elementos Finitos, con el propósito de mostrar la precisión y utilidad de la técnica para el análisis de ensayos mecánicos y por lo tanto el uso que de Correlación Digital de Imágenes se puede hacer para diversos análisis.

Al aplicar una determinada carga a tensión sobre las probetas se producen un campo de deformaciones de gran interés porque permiten obtener resultados relacionados con la mecánica de la Experimental.

### Fundamentos de la técnica de Correlación de imágenes digitales

En el desarrollo de la técnica de correlación de imágenes principalmente hay tres pasos:

#### Paso 1. Preparación de las probetas

Para poder analizar mediante DIC las imágenes de un ensayo, estas deben tener una distribución aleatoria de intensidad en la escala de grises, las probetas para la investigación con la técnica DIC se prepararon pintando la superficie con una fina capa de pintura negra y luego rociando la pintura blanca; se creó un patrón de moteado aleatorio para facilitar el proceso de correlación de imagen para el cálculo del desplazamiento superficial y campos de deformación como se muestra en la figura 2. El tamaño que tengan los puntos blancos sobre la superficie puede influir en la precisión de los resultados obtenidos, teniendo que buscar cuál es la relación óptima dependiendo del ensayo a realizar (J.M.Dulieu-Barton, December 2013).

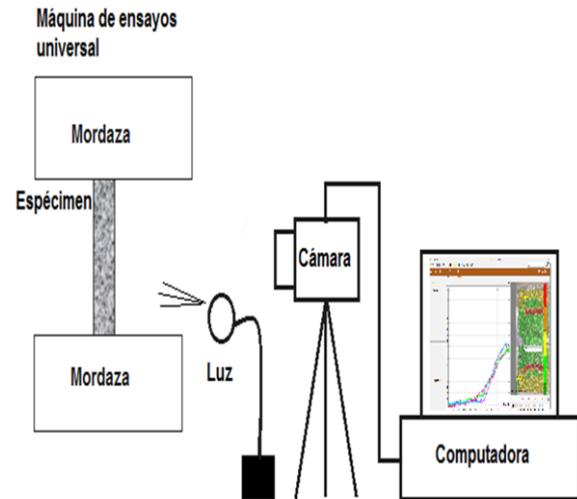


**Figura 2** Manchado aleatoria en la junta soldada

### Paso 2 Montaje experimental para la técnica DIC y aplicación de la carga en la prueba de tensión

La plataforma de pruebas diseñada para realizar el experimento, se ilustra en la figura 6. La plataforma consta de los siguientes componentes: máquina de ensayos universal Galdabini, una cámara FUJIFILM XP70 configurada en HD y 30 frames, un tripié, luz de alta intensidad y la probeta con el patrón manchado.

La probetas consta 4 soleras dos con una longitud es de 160 mm, la ancho 65 mm y el espesor de 5 mm y la junta de unión es de longitud de 45 mm, ancho de 35 mm y el espesor de 5 mm.



**Figura 3** Modelo experimental de correlación de imágenes digitales

Las probetas con el manchado fueron montadas en la máquina de ensayos universal. Con la probeta acoplada en el equipo, se ubicó las luces en la parte lateral de la máquina de tensión enfocando la pieza. El objetivo de usar las luces es para incrementar y mejorar el contraste de las imágenes. Por otra parte, se monta la cámara en el tripié, asegurándose fijación, que esté nivelada y se ubica el lente de la cámara a una distancia de 30 centímetros de la junta soldada.

Finalizado el montaje del experimento, se procede a configurar las opciones de la cámara, para obtener una imagen clara y con alto contraste. Después de completar la configuración de la cámara, se puede iniciar con el experimento. Durante el ensayo, el sistema de la cámara debe permanecer estático, evitando vibraciones (evitar el contacto con la cámara).

### Paso 3. Procesamiento de imágenes digitales

Una vez tomadas las imágenes durante la aplicación de la carga, se tiene una secuencia de imágenes desde el estado inicial o de referencia hasta el final o deformado, la técnica de correlación de imágenes calcula el movimiento en cada uno de los puntos de las imágenes comparando la imagen en estudio con la imagen de referencia.

Para el cálculo del movimiento, la imagen es dividida de forma uniforme en distintos conjuntos, generalmente cuadrados, llamados píxeles. Cada píxel será procesada para calcular el valor medio de la escala de grises existente en cada una de las imágenes como se muestra en la figura 3 se tomará como una matriz de referencia y se buscará la misma faceta en la imagen deformada como se muestra en la figura 4 que corresponderá a matriz deformada. Para el proceso de búsqueda en la imagen deformada se establece un área de análisis sobre la que se hará la correlación, esta área de búsqueda se especifica con el número de píxeles (Shih-Heng Tung, 2009).

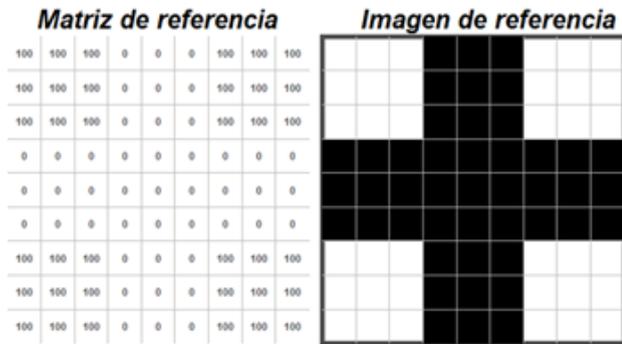


Figura 4 Matriz de referencia (Principio del DIC)

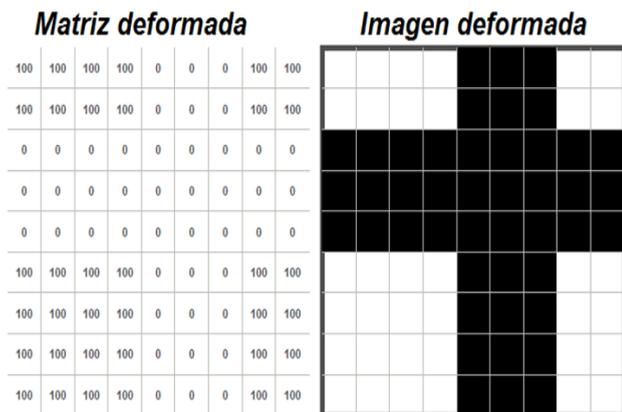


Figura 5 Matriz deformada (Principio del DIC)

Este proceso se realiza de acuerdo con una serie de subconjuntos en dos imágenes. El subconjunto es una región seleccionable que consta de varios píxeles.

El tamaño y la distancia entre estas regiones dependen de la magnitud de la deformación aplicada y del grado de exactitud de los resultados. La coordenada de una mancha en la primera imagen se sigue en la imagen deformada por programa de computadora, y por lo tanto sus desplazamientos en diferentes direcciones se calculan (S.R. Heinz, 2010). Para evaluar la exactitud del proceso de correlación, un coeficiente de correlación ha sido sugerido por los investigadores. El coeficiente de correlación se calcula contrastando el subconjunto en la referencia con el de la imagen deformada. Este coeficiente se utiliza como criterio de optimización para la correspondencia de patrones como se muestra en la figura 5.

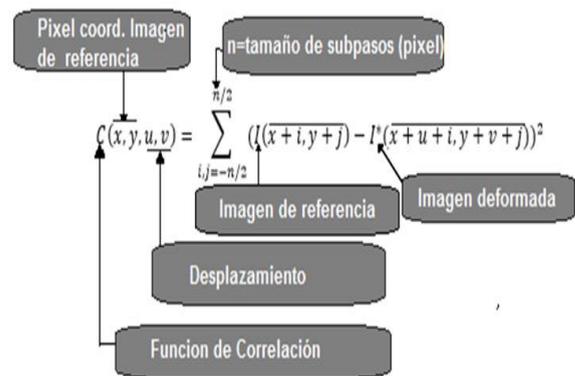


Figura 6 Algoritmo de correlación de imágenes digitales

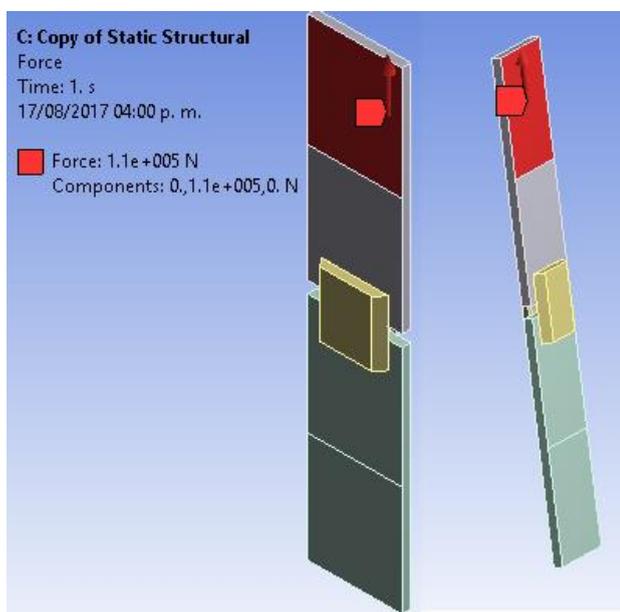
En esta ecuación, x e y son las coordenadas de píxel para cada punto en el subconjunto de referencia, y u y v son las componentes de desplazamiento para el mismo punto. La función de intensidad de la luz de las imágenes antes y después de la carga se muestra por I y I\*, respectivamente,  $n = 0.5 \times (m - 1)$ , donde m es el tamaño del subconjunto, que es siempre un número impar. El desplazamiento en la región seleccionada se puede calcular e investigar optimizando el coeficiente C (x, y, u, v) (S.R. Heinz, 2010).

Las imágenes adquiridas en el proceso experimental, serán analizadas en el programa GOM Correlate.

Una vez finalizado el post-procesamiento se obtendrán los valores de deformación unitaria de las muestras seleccionadas y empleadas para estos ensayos experimentales. Con ayuda de la máquina de tensión, se obtendrán los valores de deformación unitaria correspondiente a cada imagen de las muestras capturada por la cámara fotográfica; lo que permite relacionar las variables de la deformación, para así realizar las gráficas del comportamiento mecánico de los materiales empleados en este estudio, considerando los valores de deformación obtenidos a través de la técnica DIC.

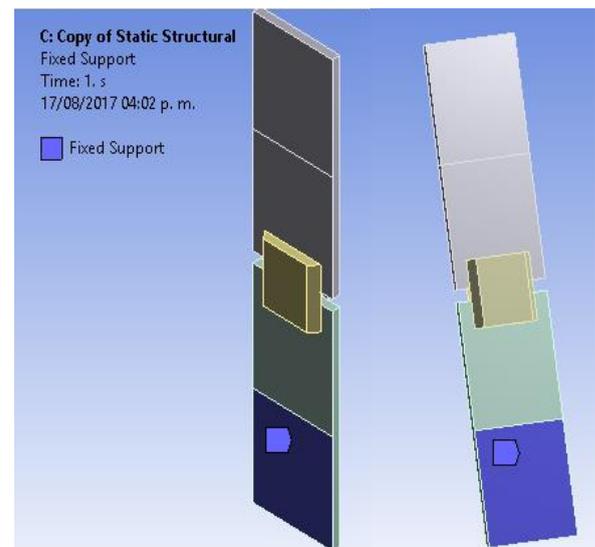
### Condiciones de frontera para la simulación en Elemento Finito

La carga a la cual está sometido el eje es una fuerza de  $P = 11000$  N, aplicada en las caras laterales de la junta soldada en la dirección Y como se muestra en la figura 7.



**Figura 7** Condiciones de frontera para la carga aplicada

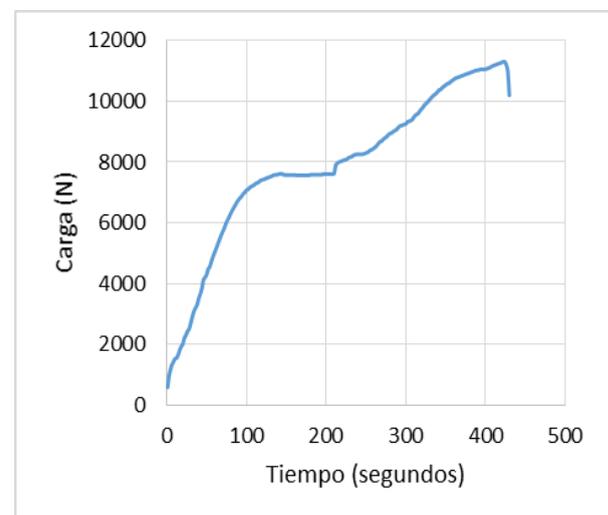
Para las condiciones de frontera se considera que la junta soldada se encontrara restringida en la parte inferior como se muestra en la figura 8 siendo sus desplazamientos a cero a en las tres direcciones X, Y Z.



**Figura 8** Condiciones de frontera restricción de movimiento

### Resultados

La aplicación de la carga en la maquina universal fue la siguiente grafico 1:



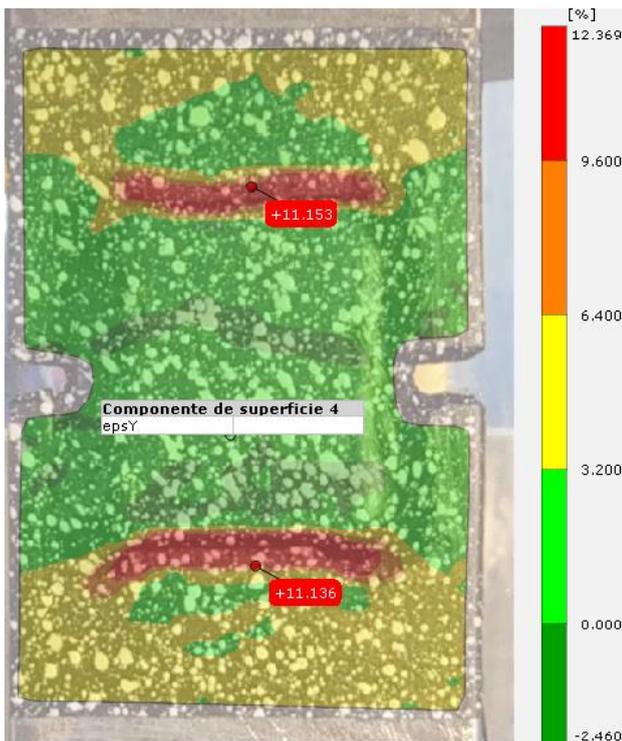
**Gráfico 1** Aplicación de la carga

Una vez realizado el ensayo, se procesaron las imágenes. Seguidamente se compararon las medidas obtenidas mediante DIC con los resultados obtenidos por el método de los elementos finitos. El software empleado fue ANSYS. En la definición de los parámetros de correlación de imágenes las facetas fueron de 1280X738 pixeles.

La adquisición gráfica de los datos provenientes de DIC muestra la evolución de la carga y del campo de deformaciones en un instante determinado a lo largo del área analizada. La escala de colores del reporte GOM Correlate proporciona la distribución de la deformación en la superficie de la muestra.

**Distribución de las deformaciones**

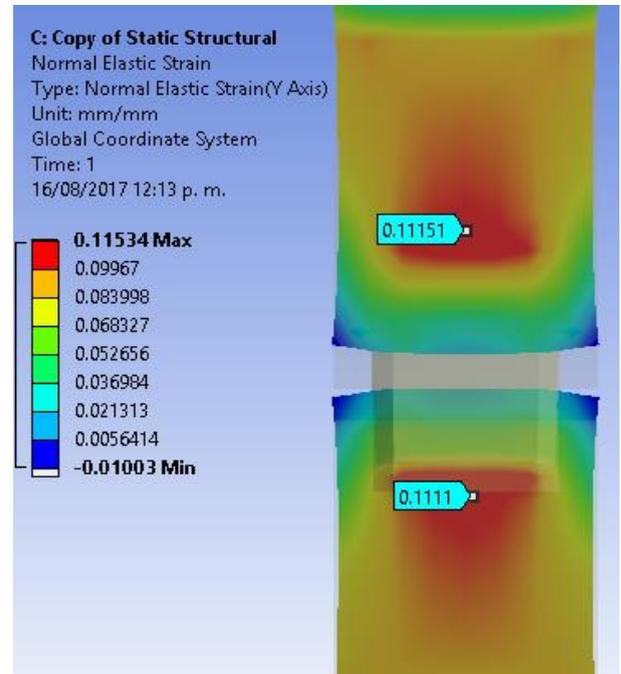
En la figura 9 se observa la deformación en dirección Y donde se aplica la carga utilizando la técnica DIC. Se presenta el mapa de deformaciones donde se muestra en el porcentaje. La probeta presenta grandes deformaciones, en las zonas de color rojo y por el método de los Elementos Finitos en la figura 10 se muestra en forma adimensional (mm/mm).



**Figura 9** Deformación en y experimental

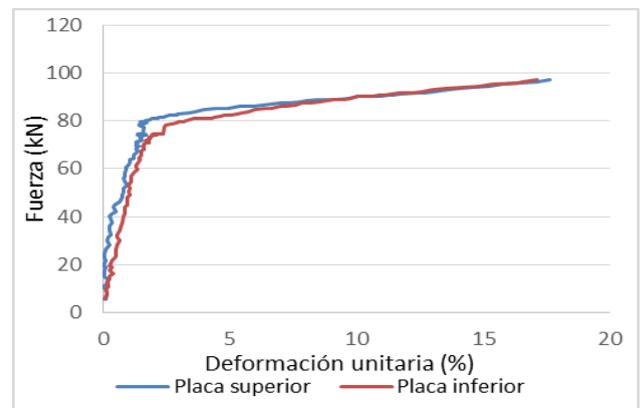
Las deformaciones unitarias en la parte inferior como en la parte superior son muy similares en ambas figuras, observándose el mismo valor de deformación unitaria. Los resultados obtenidos mediante Elemento Finito son muy similares.

Esto es debido a que mediante DIC también se procesa la superficie superpuesta para obtener valores en los contornos.



**Figura 10** Deformación unitaria en Elemento Finito

Los resultados experimentales obtenidos se mostraron en la siguiente grafica 2 el cual representa la carga aplicada con respecto a la deformación en la zona con mayor deformación unitaria poniéndose de manifiesto la posibilidad de utilizar la técnica DIC para análisis de problemas de juntas soldadas.



**Gráfico 2** Carga aplicada vs la deformación en la zona más deformada

En las figuras 11 y 12 se obtiene el valor máximo de 11% de deformación unitaria localizada en la parte superior e inferior de la solera de unión, siendo el resultado el mismo mediante las dos técnicas. La diferencia entre ambas técnicas es inferior al 2% pudiendo ser la consecuencia la definición de la región de interés en la técnica de DIC.

A partir de este punto, un incremento pronunciado en la deformación tiene lugar hasta la ruptura de la pieza. Una vez llevada a cabo la selección de los puntos de interés y correspondiente interpretación de datos como lo sería el comportamiento de la soldadura sobre el resto del material mostradas en la figura 9 y la figura 10 en Elemento Finito son semejantes.

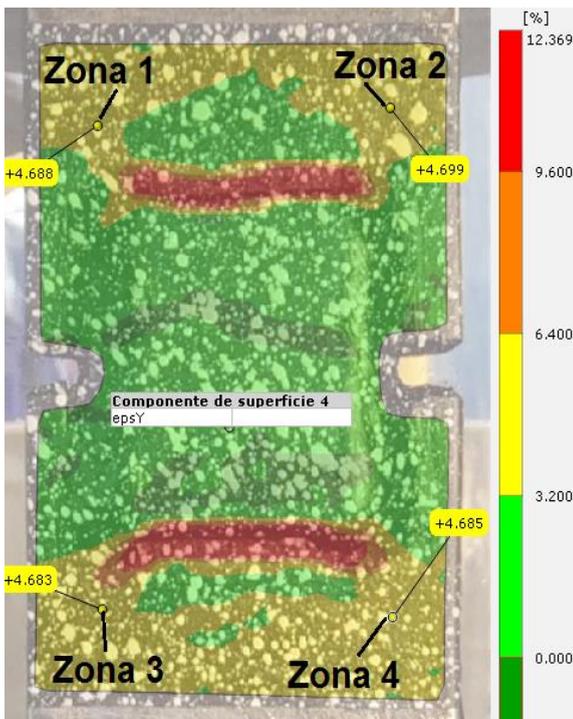


Figura 11 Deformación en zona de interés por DIC

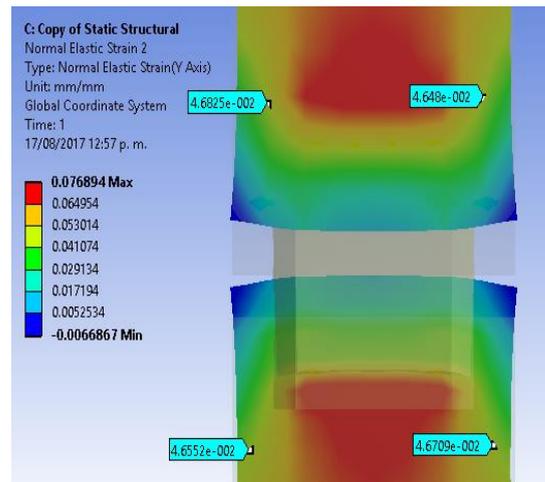


Figura 12 Deformación en la zona de interés por Elemento Finito

Alcanzando valores de deformación unitaria de entre un 8 y 10 % los cuales se muestran en la siguiente grafico 3.

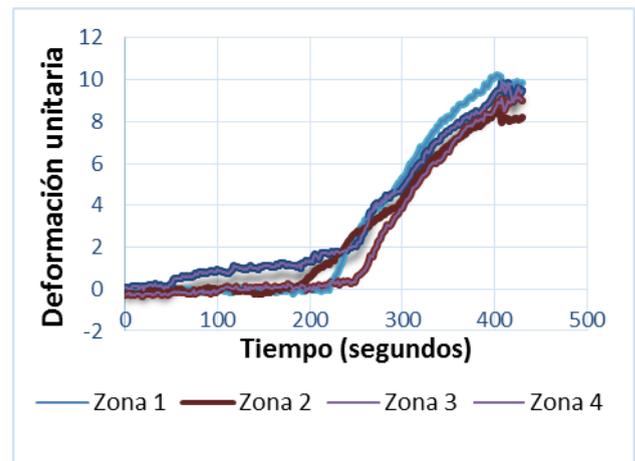


Gráfico 3 Deformación unitaria en las zonas de interés

Como segundo resultado del análisis de las deformaciones ocasionadas alrededor de la soldadura donde se presenta la curva correspondiente a la deformación en cuatro zonas diferentes como resultado de aplicar una fuerza en la dirección Y, la cual ofrece información referente a otro mecanismo de daño que se generan a raíz de la aplicación de la soldadura debido a un esfuerzo de tensión.

**Conclusiones**

Los presentes resultados muestran la efectividad de realizar la caracterización de juntas soldadas usando correlación de imagen digital (DIC):

La distribución local de deformación unitaria de pruebas de tensión de las juntas soldadas.

El comportamiento constitutivo de diferentes regiones de soldadura se evaluó a partir de los campos de deformación.

Los resultados obtenidos mediante DIC se han comparado con los obtenidos mediante la simulación del problema con un programa de Elementos Finitos, concluyendo que los resultados obtenidos mediante ambos procedimientos son similares.

**Referencias**

A. Chrysochoos, B. B. (2009). Local energy analysis of high-cycle fatigue using digital image correlation and infrared thermography. *Strain Analysis*, 411-421.

Chiaa Bisagni, C. W. (2008). Experimental investigation of the damage propagation in composite specimens under biaxial loading. *Composite Structures*, 293-310.

F.M. Sánchez- Arévalo, G. P. (2008). Use of digital image correlation to determine the mechanical behavior o materials. *Materials Characterization*, 1572-1579.

Ghafoori, E. (2011). Analytical calculation of stress intensity factor of cracked steel I-beams with experimental analysis and 3D digital image correlation measurements. *ELSERVIER Engineering Fracture Mechanics*, 3226-3242.

MahoorMehdikhani. (Abril 2016). Full-field strain measurements at the micro-scale in fiber-reinforced composites using digital image correlation. *Composite Structures*, 192-201.

Méité, M. (2013). Mixed mode fracture properties characterization for wood by Digital Images Correlation and Finite Element Method coupling. *Engineering Fracture Mechanics*, 86-100.

Mohammadreza , Y. (2014). Utilizing digital image correlation to determine stress intensity factors. *ELSERVIER Polymer Testing*, 28-35.

S.R. Heinz, J. W. (2010). Uniaxial compression analysis of glassy polymer networks using digital image correlation. *Polym. Test*, 29, 925-932.

Shih-Heng Tung, M. H.-C. (2009). Application of digital image correlation for anisotropic plastic deformation during tension testing. *Optic and Lasers in Engineering*, 636-641.

Sutton, M. A. (2008). The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, 747-757.

J.M.Dulieu-Barton, G. A. (December 2013). Speckle pattern quality assessment for digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, 1368-1378.

Q.C.Zhang, Y. A. (Mayo 2016). Characterization of the deformation behaviors associated with the serrated flow of a 5456 Al-based alloy using two orthogonal digital image correlation systems. *Materials Science and Engineering: A*, 155-164.

Zhang, R. (2012). Measurement of mixed-mode stress intensity factors using digital image correlation method. *Optics and Lasers in Engineering*, 1001-1007.