

Análisis de la deformación de soldadura en probetas mediante la técnica correlación digital de imágenes

Diego Alejandro Leonel Valadez Valderrama, Ricardo Arroyo Quintana, Jorge Ramón Parra Michel

Universidad De La Salle Bajío, Escuela de Ingenierías, Av. Universidad 602, Col Lomas del Campestre C.P. 37150. León Gto., México.

Resumen

Se utiliza la técnica óptica de correlación digital de imágenes (DIC) para la medición de la deformación de soldaduras en probetas metálicas. Esta técnica utiliza una cámara digital y buena iluminación de la superficie donde se realizaran la medición. Se presentan los modelos matemáticos que describen la técnica y se analiza qué parámetros pueden ocasionar errores en las mediciones si no son tratados adecuadamente. Las probetas fueron sometidas a deformación y se obtuvieron varias mediciones. Las probetas tenían dimensiones de $100\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 19\text{ mm}$. Un primer grupo de probetas fueron cortadas a la mitad y posteriormente soldadas. Un segundo grupo de probetas solamente fueron barrenadas con 3 mm de diámetro en su centro. Se muestran los resultados de las mediciones de la deformación en campo completo obtenidos de los dos tipos de probetas.

Abstract

Optical technique digital image correlation (DIC) for measuring deformation of welds in metal specimens is used. This technique uses a digital camera and good lighting of the surface where the measurement is realized. Mathematical models describing and analysing the technical parameters which can cause measurement errors if not treated properly presented. The specimens were subjected to deformation and several measurements were obtained. The specimens had dimensions of $100\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 19\text{ mm}$. A first group of samples were cut in half and then welded. A second set of samples were only scuttled with 3 mm diameter at its center. The measurement results in complete deformation field obtained from the two types of specimens are shown.

Palabras clave: correlación digital, deformación, probetas metálicas.

1. INTRODUCCIÓN

Durante años se ha utilizado la soldadura para hacer la unión de dos metales y es importante analizar el esfuerzo al que se presenta en esta unión cuando se somete a un estado de tensión.

En la actualidad se utilizan algunas técnicas para medir la deformación de los materiales y estimar su estado de esfuerzos al que se somete. Los métodos más comunes son: La Fotoelasticidad, el método de elemento finito (MEF) [1] permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales que caracterizan el comportamiento físico del problema dividiéndolo en un número elevado de subdominios no-intersectantes entre sí denominados elementos finitos.

El siguiente trabajo es un estudio donde es aplicando la técnica de correlación digital de imágenes (DIC por sus siglas en inglés digital image correlation) para obtener los patrones de deformación en probetas. La técnica DIC es un método óptico que emplea el registro y seguimiento de varias imágenes para obtener la evolución de la deformación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 FUNCIONES DE DESPLAZAMIENTO

Como se observa en la Figura 1, Un punto $Q(x_i, y_j)$ cualesquiera en la vecindad del punto $P(x_0, y_0)$ en la imagen de referencia S_r se desplaza hasta el punto $Q'(x'_i, y'_j)$ en la imagen con la deformación aplicada S_d . De acuerdo a la función de forma o de mapeo del desplazamiento, las coordenadas del punto Q' se pueden calcular mediante las ecuaciones:

$$x'_i = x_i + \xi(x_i, y_j) \tag{1}$$

$$y'_i = y_i + \eta(x_i, y_j) \tag{2}$$

Donde $(i, j = -M:M)$ es el pixel del RIO de tamaño M para las funciones de desplazamiento ξ y η . Por otro lado, si existiera un desplazamiento de cuerpo rígido entre las imágenes de referencia y la deformada, es decir si existiera un desplazamiento constante sobre toda la imagen que no se deba a la deformación entonces los desplazamientos u y v en las direcciones en x y y respectivamente se pueden representar mediante el orden cero la función del desplazamiento mediante:

$$\xi(x_i, y_j) = u \tag{3}$$

$$\eta(x_i, y_j) = v \tag{4}$$

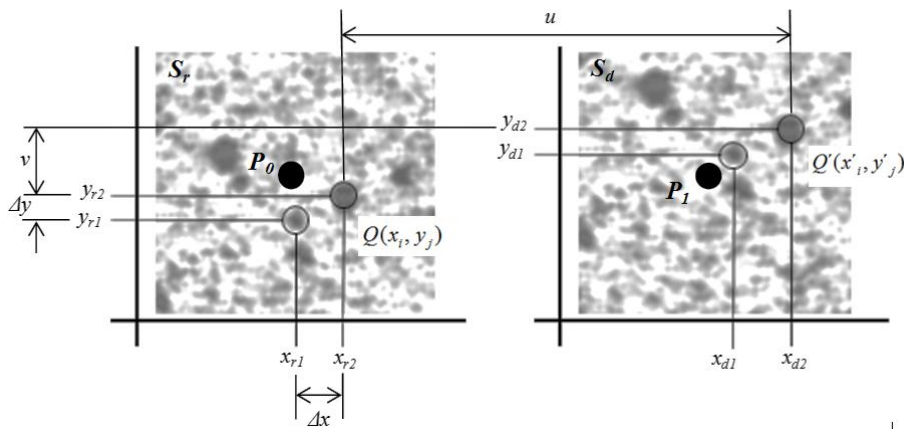


Figura 1. Correlación de dos imágenes. S_r y S_d son las ROI de la imagen de referencia y con una deformación de una superficie respectivamente.

Lamentablemente esta información resulta insuficiente para determinar las coordenadas de Q' . Normalmente es conveniente usar el segundo orden de la función de desplazamiento de la forma:

$$\xi(x_i, y_j) = u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Delta x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Delta y^2 + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \Delta x \Delta y \tag{5}$$

$$\eta(x_i, y_j) = v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \Delta x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \Delta y^2 + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \Delta x \Delta y \quad (6)$$

Donde $\Delta x = x_i - x_0$ y $\Delta y = y_j - y_0$ para cada RIO de la imagen. Para conocer las coordenadas de cada punto Q' , el proceso de debe realizar sobre toda la imagen.

2.2 CRITERIO DE CORRELACIÓN

Como se mencionó arriba, para evaluar la similitud entre la imagen de referencia y la imagen deformada en cada RIO, se debe definir de antemano un criterio de correlación. Se puede encontrar diferentes criterios de correlación en la literatura, pero aquí analizaremos solamente dos de los más importantes. Estos son los de correlación cruzada normalizada y de la diferencia de suma los cuadrados normalizados. Para cada RIO, se hace una evaluación de todos los píxeles que lo conforman. Cada RIO tiene una dimensión cuadrada de $(2M+1)$ si establecemos la función f_m para la RIO en la imagen de referencia y g_m para la RIO en la imagen deformada, las funciones f y g se definen como:

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_j) \quad (7)$$

$$g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M g(x'_i, y'_j) \quad (8)$$

Los criterios de correlación se pueden definir por:

Correlación cruzada:

$$C_{ZNCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ \frac{[f(x_i, y_j) - f_m] \times [g(x'_i, y'_j) - g_m]}{\Delta x \Delta y} \right\} \quad (9)$$

Correlación de la diferencia de suma los cuadrados:

$$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta g} \right]^2 \quad (10)$$

Donde los valores de la media \bar{f} , \bar{g} y de la desviación estándar Δf , Δg de los valores de las RIOs se pueden calcular respectivamente mediante:

$$\bar{f} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j)]^2} \quad (11)$$

$$\bar{g} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j)]^2} \quad (12)$$

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - f_m]^2} \quad (13)$$

$$\Delta g = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j) - g_m]^2} \quad (14)$$

Estos dos criterios son los más robustos en cuanto a su insensibilidad al ruido óptico y cambio en las condiciones de iluminación.

Minimizando los coeficientes de correlación para cada RIO, se obtiene la mejor estimación para las funciones de desplazamiento descritos en la ecuación 2. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la minimización no es lineal y es necesario implementar métodos iterativos como Newton-Raphson o Gauss-Seidel para realizar la interpolación y encontrar los mejores parámetros para la función de desplazamiento[2].

2.3 CORRELACIÓN DIGITAL DE IMAGEN (DIC)

Para poder analizar mediante DIC[3] las imágenes de un ensayo, estas deben tener una distribución aleatoria de intensidad en la escala de grises, para ello se aplica de forma aleatoria puntos negros sobre un fondo blanco en la probeta sobre la que se realiza el ensayo. El tamaño que tengan los puntos negros 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.

Una vez recogidas 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 facetas. Cada faceta será procesada para calcular el valor medio de la escala de grises existente en cada una de ellas y se buscará la misma faceta en la imagen 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 en el que se superponen los centros de las facetas.

La rutina de cómputo implementada para la técnica 2D DIC se realiza sobre un área denominada *región de interés observado* o por su acrónimo RIO (figura 2). El principio de DIC consiste básicamente en hacer un seguimiento de los desplazamientos de los patrones de motas que existe en cada RIO a través de la evolución de la deformación. Para cada RIO se calcula el desplazamiento de tal manera que tomando en cuenta todas las RIOs de la imagen final.

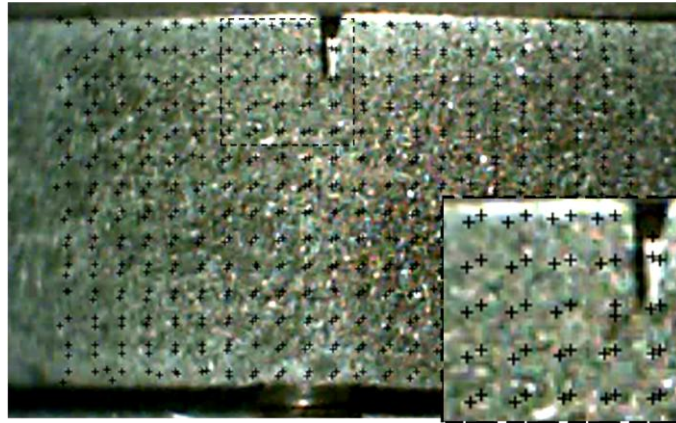


Figura 2. El seguimiento de los puntos para cada RIO nos permite conocer el patrón de deformación.

2.4 MEDICIÓN DE LOS CAMPOS DE DESPLAZAMIENTO

Una imagen digital puede ser vista como una matriz de datos discretos. Es decir, una imagen de 480x680 píxeles puede ser vista como una matriz de la misma dimensión cuyos elementos son los valores de las intensidades de gris de las motas observadas en la imagen. Las coordenadas de la intensidad de un píxel en particular dentro de una RIO en la imagen de referencia se pueden obtener fácilmente. Los criterios de correlación nos ayudan a identificar la nueva posición de ese píxel en las imágenes con una deformación aplicada cuando maximizamos los valores del criterio de correlación mostrados. Cuando las deformaciones son grandes, la correlación entre imagen se puede volver complicada. En esos casos conviene introducir una suposición inicial. Esto es marcando tres puntos por lo menos en la imagen de referencia y sus coincidentes en la imagen deformada. De esta manera se podrá establecer una deformación inicial en la dirección u y v como suposición inicial por comparación de las coordenadas de las marcas. La figura 3 muestra un ejemplo de lo anterior dentro de una RIO.

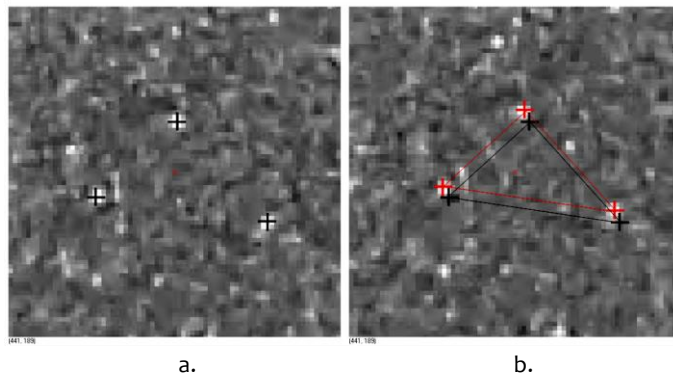


Figura 3. Tres marcas en una RIO a) en la imagen de referencia o inicial en color negro y b) muestralas mismas marcas en la imagen deformada en color rojo, en la misma imagen se muestra las marcas originales para hacer notar la cantidad de desplazamiento.

3. PROCEDIMIENTO PARA LA EL ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN MEDIANTE CORRELACIÓN DE IMÁGENES

Para la realización de esta investigación se utilizaron probetas de acero al carbón. Las probetas tenían dimensiones de 100 mm x 6 mm x 19 mm. Un juego de probetas fue cortada a la mitad y posteriormente soldadas. Un segundo juego de probetas solamente fueron barrenadas con 3 mm de diámetro en su centro. También se construyó una máquina que sostuviera las probetas de ambos lados y generara una fuerza de estiramiento en ambos lados por igual de la probeta (como se observa en la figura 4a). Ya sujeta la probeta en la máquina, se colocó una cámara encima de la probeta como se muestra en la figura 4b y se prosiguió a realizar las pruebas necesarias para la investigación.

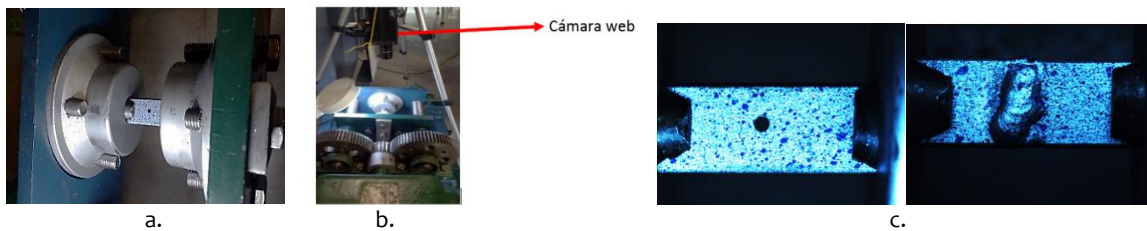


Figura 4. a) Probeta barrenada preparada con el moteado, b) Dispositivo que aplica tensión con la probeta montada y la cámara apuntada a la misma, c) Video obtenido mediante una cámara web que registra la deformación de una pieza de acero.

Una cámara de video se utilizó para la toma de imágenes, en este caso una simple cámara web fue enfocada a una lámina de acero para registrar la deformación mientras un tornillo aplicaba una fuerza directamente en la pieza. Posteriormente, un convertidor de video (figura 4c), extrae las imágenes (*frames*) de cada segundo del video. Las imágenes deben de tener un formato tipo de intercambio de archivo, es decir que a cada pixel de la imagen este asociado a un valor numérico de intensidad de luz.

La técnica de correlación de imágenes se basa en la correlación de puntos de interés entre imágenes. Los puntos de interés se observan como pequeñas motas oscuras y brillantes sobre la superficie de la pieza. Es necesario subdividir la imagen en pequeñas sub-áreas para que el programa analice cada región y determine la cantidad de desplazamiento de las motas entre imágenes. La figura 5 muestra la imagen que se utilizó en la prueba de calibración.

Posteriormente, una vez que se obtiene la resolución del sistema, es decir, el número de pixeles por cada milímetro, se abrirá una pantalla pidiendo una imagen para que en la región de análisis se pueda establecer el número de sub-áreas con el tamaño de la resolución que se calculó durante la calibración. Por ejemplo, si se contaron 25 pixeles por milímetro en la dirección horizontal y 23 pixeles en la dirección vertical, el tamaño de la sub-área de análisis será de 25x23 pixeles que representan un milímetro cuadrado. El área de interés puede tener una forma rectangular, circular o simplemente marcar sobre una línea recta.

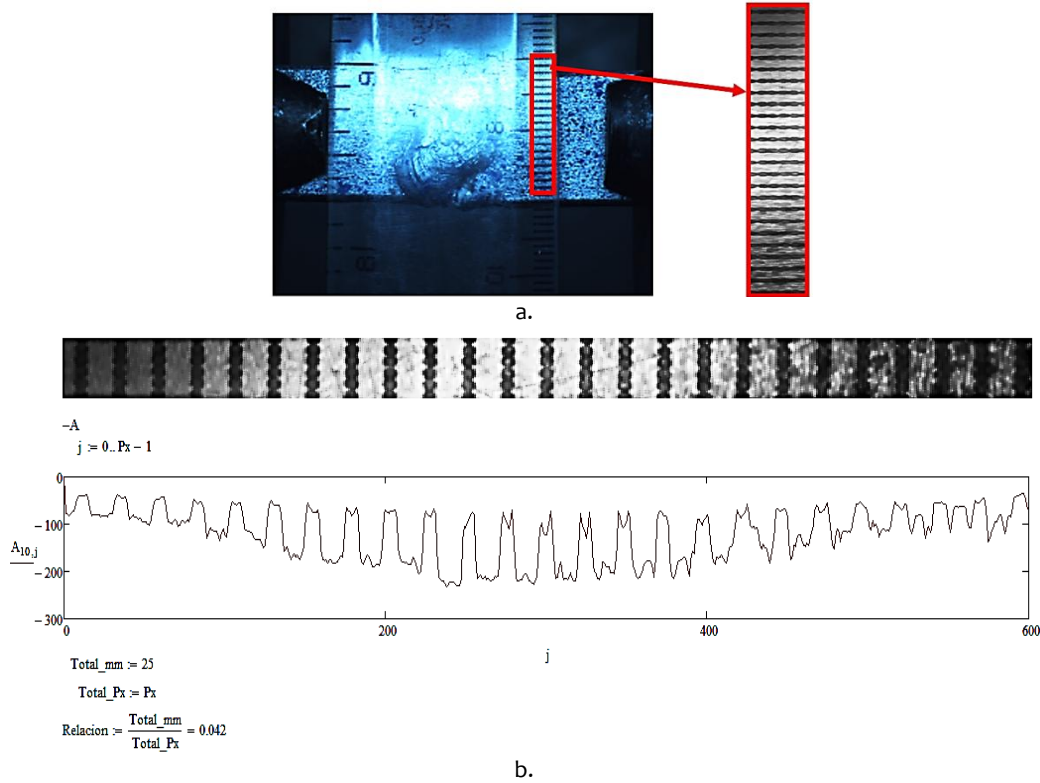


Figura 5. a) Calibración del sistema. Se utiliza una regla para la calibración. b) se analizó la porción de la imagen para establecer la relación mm/px que se calculó en 0.042 mm/px.

4. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA POR MEDIO DE DIC.

4.1 RESULTADO EN PROBETA SOLDADA



Figura 6. Imagen obtenida mediante una cámara web que registra la deformación de la probeta soldada.

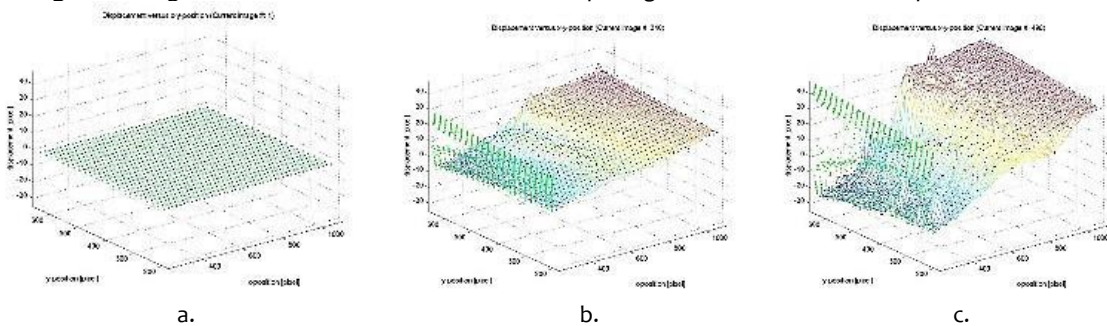


Figura 7 a) Probeta al inicio, b) Probeta a la mitad de la prueba y c) Probeta al final de la prueba de elasticidad para la deformación en x.

En la prueba realizada a la probeta que estaba soldada se obtuvieron diferentes gráficas. Como se muestra en la figura 7. a), la probeta al inicio de la prueba no muestra ningún desplazamiento (pixel) en ninguna posición. En la figura b) se muestra la probeta a la mitad de la prueba y ya se alcanza a apreciar un desplazamiento aproximado de -9 y 21 pixeles. Y en la figura c) que concierne al final de la prueba, se aprecia claramente un desplazamiento considerable de -28 y 41 pixeles antes de la ruptura de la probeta lo que representa una deformación de -1.76 mm y 1.722 mm.

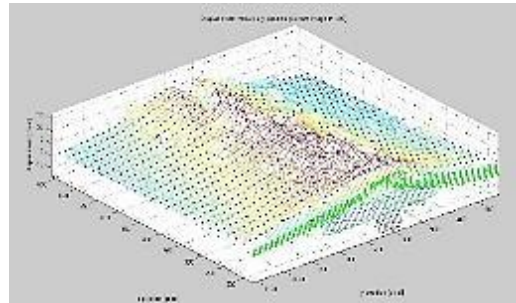


Figura 8. Deformación en Y de probeta soldada.

4.2 Resultado En Probeta Barrenada

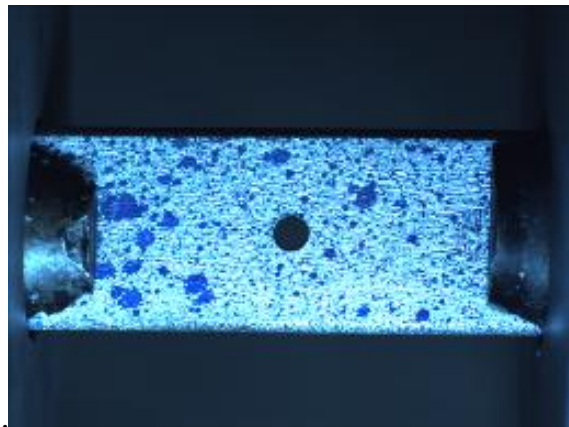


Figura 9. Imagen obtenida mediante una cámara web que registra la deformación de la probeta barrenada.

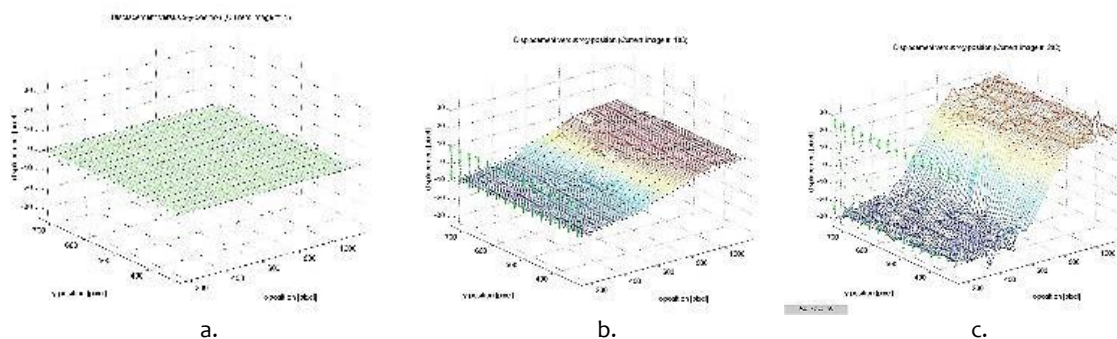


Figura 10. a) Probeta al inicio, b) Probeta a la mitad de la prueba y c) Probeta al final de la prueba de elasticidad para la deformación en x.

Durante la prueba realizada a la probeta con la perforación en el centro pudimos obtener diferentes gráficas. Como se muestra en la figura 10. a), la probeta al inicio de la prueba no muestra ningún desplazamiento (pixel) en ninguna posición. En la figura b) se muestra la probeta a la mitad de la prueba y ya se alcanza a apreciar un desplazamiento aproximado de 10 pixeles. Y en la figura c) que concierne al final de la prueba, se aprecia claramente un desplazamiento considerable de -30 y 30 pixeles antes de la ruptura de la probeta lo que representa una deformación de -1.26 mm y 1.26 mm

5. CONCLUSIONES

Se analizó el método de Correlación Digital de Imágenes aplicando tensión hasta llegar a la fractura de una probeta soldada por la mitad marcada con un moteado de un color obscuro para medir la deformación mediante la captura de imágenes con el uso de una cámara digital. Los resultados de la técnica DIC para la prueba de esfuerzo-deformación realizadas en las probetas demuestran una alta correspondencia en el comportamiento de la probeta durante la deformación encontrando un error tan pequeño que se determinó despreciable, por lo tanto se concluye que éste método óptico es confiable para realizar dicho estudio.

Se pudo determinar como la soldadura afecta a las distribuciones de esfuerzos y a los campos de deformación al área de una probeta que fue soldada.

Además se demostró que ésta técnica puede ser utilizada para analizar las deformaciones en elementos hechos de concreto y para el análisis de mecánica de suelos, así como en la prueba triaxial de suelos.

REFERENCIAS

- [1] José M. Franquet, Antonio Q. Gómez, "Nivelación de terrenos por regresión tridimensional. Una aplicación de los métodos estadísticos", Ed. Tortosa, España, (2010). http://www.mecinca.net/papers/Nivelacion_REGRESION.pdf
- [2] H. A. Bruck, S. R. McNeill, M. A. Sutton, W. H. Peters III, "Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction", (1989), Exp. Mech. vol.29 (3), pp.261. doi:10.1007/BF02321405
- [3] Jorge Parra, Análisis de la deformación mediante correlación digital de imágenes, Trabajo de investigación, Universidad De La Salle Bajío (2010)

Correo autor: jparra@delasalle.edu.mx