

Sistema de medición de deformaciones en tiempo real basado en correlación digital de imágenes aplicado a pruebas de tensión

Real-time strain measurement system based on digital image correlation applied to tension tests

Ricardo Magaña-Rodríguez ^a, Miguel A. Gayosso-Melo ^a, Alonso Saldaña-Heredia ^b, Orlando Susarrey-Huerta ^c,
Juan B. Pascual-Francisco ^{a,*}

^aUniversidad Politécnica de Pachuca, Departamento de Mecatrónica, Carretera Pachuca-Cd. Sahagún Km. 20, 43830, Zempoala, Hidalgo, México.

^bUniversidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo, Ex Hacienda San Javier, Tolcayuca 1009, 43860, Tolcayuca, Hidalgo, México.

^cInstituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME, Unidad Zacatenco, IPN, Col. Lindavista, 07738, Ciudad de México, México.

Resumen

En este trabajo se presenta la aplicación de un sistema de medición de deformaciones en materiales mediante la técnica de correlación digital de imágenes. El sistema de medición de deformaciones propuesto se conforma por tres componentes: una cámara, un algoritmo de correlación y un patrón de moteado generado con pintura en aerosol. El algoritmo de correlación se realiza mediante un código programado en *Python*, el cual consiste en tres módulos: 1) de calibración, 2) de procesamiento y 3) de visualización. El método de reconocimiento y seguimiento de los puntos del patrón de moteado implementado se basa en el método de Lucas-Kanade. El campo de desplazamientos en x y en y se calculan mediante la resta de las posiciones de los puntos reconocidos en cada imagen, respecto a la imagen de referencia. El mapa de deformaciones unitarias se obtiene calculando los gradientes de desplazamiento en cada imagen consecutiva y se visualizan en tiempo real. Para probar el funcionamiento del código, éste se implementó en un arreglo experimental de una prueba de tensión uniaxial para un material elastomérico. Los resultados experimentales se comparan con los obtenidos utilizando un equipo de correlación digital de imágenes comercial, de la marca *Dantec Dynamics*.

Palabras Clave: Correlación digital de imágenes, Python, Tiempo real, Deformación unitaria, Prueba de tensión.

Abstract

This paper presents the application of a strain measurement system using the digital image correlation technique. This measurement system consists of three parts: a camera, a correlation algorithm and a speckle pattern generated by sprayed paint. The correlation algorithm is performed by a code programmed in *Python*, which consists of three modules: 1) calibration, 2) processing, and 3) visualization. The recognition and tracking method for the speckle pattern points is based on the Lucas-Kanade method. The displacement field in the x and y directions is calculated by subtracting the positions of the recognized points in each image from the reference image. The strain map is obtained by calculating the displacement gradients in each consecutive image, and they are visualized in real-time. To demonstrate the usefulness of the code, it was implemented in an experimental setup for a uniaxial tensile test on an elastomeric material. The experimental results are compared with those obtained using a commercial digital image correlation system from *DantecDynamics*.

Keywords: Digital Image Correlation, Python, Real-time, Strain, Tensile Test.

1. Introducción.

La técnica de correlación digital de imágenes (DIC por sus siglas en inglés) es una técnica de medición optoelectrónica de

campo completo y no invasivo que se desarrolló a inicios de los 80's, este se ha sofisticado y evolucionado en los últimos años (Peters and Ranson, 1982; Sutton et al., 1983). Se basa en la comparación y correlación de imágenes de diferentes estados

*Autor para correspondencia: jbpascualf@hotmail.com

Correo electrónico: ricardo_mag_rod@hotmail.com (Ricardo Magaña-Rodríguez), miguelgayosso29@gmail.com (Miguel Alejandro Gayosso-Melo), ahredia@upmh.edu.mx (Alonso Saldaña-Heredia), osusarrey@ipn.mx (Orlando Susarrey-Huerta) jbpascualf@hotmail.com (Juan Benito Pascual-Francisco).

Historial del manuscrito: recibido el 15/06/2024, última versión-revisada recibida el 15/10/2024, aceptado el 14/08/2024, publicado el 30/11/2024. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial4.13250>



de deformación de un objeto y provee el mapa de deformaciones de toda el área de interés. Primero, se reconoce un patrón de intensidad de un área pequeña tanto en la imagen no deformada como en la deformada. Cualquier punto en la imagen no deformada se define por el patrón de intensidad de la luz del área circundante (producido generalmente por un patrón de moteado creado con pintura en aerosol). De acuerdo con la intensidad de la luz del punto, se identifica el punto idéntico en la imagen deformada a través de algoritmos de seguimiento. Luego, se emplean métodos numéricos para calcular el desplazamiento y/o la deformación entre el conjunto de puntos, generando los mapas de desplazamiento o de deformación unitaria. Mediante la implementación de una sola cámara es posible medir deformaciones en el plano (2D), mientras que para medir deformaciones en objetos curvos (3D), es necesario usar al menos dos cámaras (Pan et al., 2009; Bay, 2008). Esta técnica se ha utilizado en diferentes aplicaciones ingenieriles y de investigación.

Se ha reportado que DIC se puede utilizar para la caracterización de propiedades mecánicas de materiales metálicos (Chu et al., 1985). Se ha propuesto la técnica DIC como una alternativa confiable para medir deformaciones en pruebas estandarizadas (Sutton et al., 1986). Recientemente, se ha demostrado la efectividad de DIC para la caracterización de propiedades viscoelásticas de materiales elastoméricos (Juárez Hernández et al., 2023; Pascual-Francisco et al., 2022). Gracias a sus ventajas de campo completo y sin contacto, DIC se ha diseminado en diferentes áreas de la ingeniería tales como la biomédica (Wu et al., 2016), aeroespacial (Chu and Poudel, 2014; Saldaña-Heredia Alonso et al., 2022), vibraciones mecánicas (Reu et al., 2017), ingeniería civil (Ramos et al., 2015) e inspecciones no destructivas en la industria (Malesa et al., 2016). Sin embargo, una de las grandes limitantes de DIC en la actualidad es que se trata de una técnica de postproceso; es decir, primero se realiza la adquisición de imágenes y posteriormente se realiza el procesamiento por separado, lo cual significa tiempo extra para la obtención de resultados. Dependiendo del tipo de análisis y de la cantidad de imágenes capturadas, el tiempo de procesamiento puede ir desde decenas de minutos hasta horas (Pan, 2018). Actualmente, la comunidad académica del área de la metrología óptica ha dedicado esfuerzos para superar esta limitante.

Se han propuesto algoritmos basados en computo paralelo y el uso de *GPU* para acelerar el procesamiento de las imágenes, logrando reducir sustancialmente el tiempo de obtención de resultados (Zhang et al., 2015; Yuan et al., 2017; Jiang et al., 2015). Por otra parte, también se han empezado a desarrollar metodologías para lograr la obtención de resultados en tiempo real (Wang et al., 2018; Blug et al., 2019; Couty et al., 2021).

En este trabajo se propone un sistema de medición basado en DIC para el monitoreo en tiempo real del mapa de deformaciones en una probeta para ensayo de tensión uniaxial. Se describen sus características, así como los algoritmos que lo integran. Para comprobar el funcionamiento del sistema propuesto, este se implementó para medir deformaciones en un ensayo de tensión uniaxial no estandarizado en un material elastoméri-

co. Los resultados obtenidos se compararon con aquellos que se obtuvieron utilizando un equipo comercial de DIC (de post-proceso).

2. Principios básicos de DIC

El método DIC, consiste en capturar imágenes consecutivas y compararlas con una imagen de referencia que habitualmente es la primera imagen capturada (correspondiente al estado sin deformar del objeto estudiado). Existen dos tipos de DIC. El primero se conoce como *2D-DIC*, el cual consta de realizar el análisis con una sola cámara; este está limitado para realizar mediciones en dos dimensiones y es utilizado principalmente para analizar superficies planas. El segundo tipo de DIC es conocido como *Stereo-DIC*; este consiste en hacer el análisis mediante al menos dos cámaras. El uso de dos o más cámaras permite al sistema identificar profundidades y poder analizar superficies no necesariamente planas.

Un sistema de medición basado en DIC consta de los siguientes componentes: 1) Cámara. Este componente recibe la información y la transfiere al sistema de procesamiento. La cámara puede ser de cualquier tipo, sin embargo, se pueden tener malos resultados si no se cuenta con buena resolución. 2) Sistema de procesamiento. Es el componente que recibe la información capturada y realiza la correlación digital de imágenes. 3) Sistema de iluminación. Es importante tener suficiente iluminación para lograr visualizar el patrón de moteado en la cámara. 4) Patrón de moteado. Esta es una de las características más importantes en el método DIC. El patrón de moteado debe ser aleatorio, homogéneo y con un buen contraste.

Para implementar la técnica DIC, primero se define una región de interés (ROI, por sus siglas en inglés) en la imagen del objeto a estudiar. Para identificar los puntos de la imagen inicial en la final, el ROI se divide en una serie de subconjuntos (*subset*). Para identificar los *subsets* en las imágenes secuenciales se hace una comparación de la escala de grises de dicho subconjunto, mediante algoritmos de correlación y seguimiento, como por ejemplo el de Lucas-Kanade (Sutton et al., 2009), o el *Fast Normalized Cross-Correlation* (Belloni et al., 2019). Para el siguiente análisis, supóngase el punto central $P(x, y)$ de un subconjunto, como se muestra en la Figura 1, la traslación que ocurre entre ese punto en la imagen de referencia y el mismo punto en la imagen deformada se puede determinar como:

$$x'_1 = x_1 + u + \frac{\delta u}{\delta x} \Delta x + \frac{\delta u}{\delta y} \Delta y, \quad (1)$$

$$y'_1 = y_1 + v + \frac{\delta v}{\delta y} \Delta y + \frac{\delta v}{\delta x} \Delta x, \quad (2)$$

donde x_1 y y_1 son las posiciones iniciales del punto u y v son los desplazamientos en las direcciones x y y , respectivamente. Los últimos dos términos de cada ecuación representan los componentes del cambio de forma del subconjunto. Para calcular los desplazamientos en x y y de los puntos centrales de cada subconjunto, se puede aplicar las siguientes ecuaciones:

$$u = x - x', \quad (3)$$

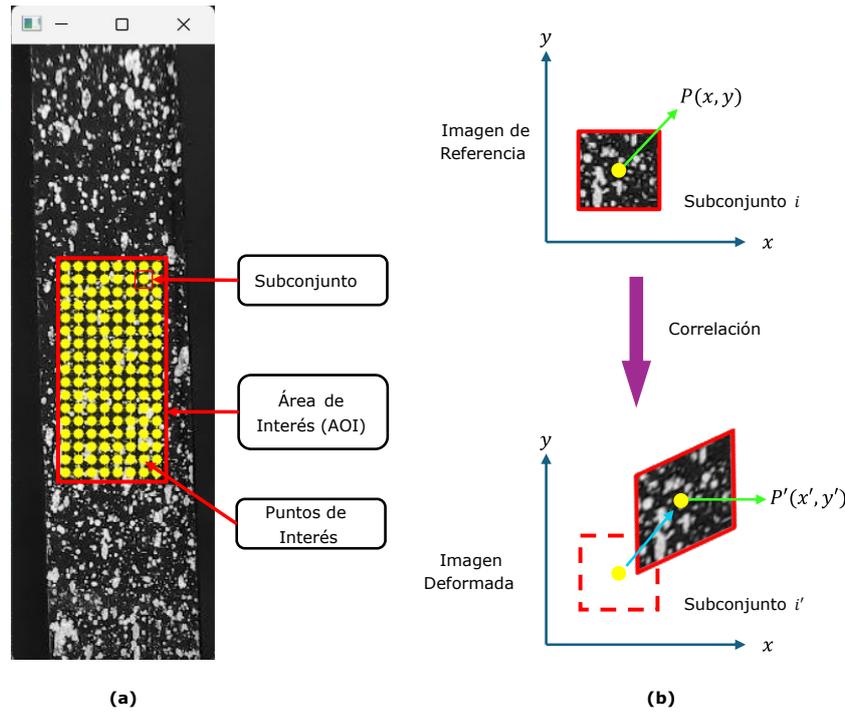


Figura 1: (a) área de interés del objeto estudiado, (b) representación esquemática de los subconjuntos de imagen de referencia y una imagen deformada del objeto.

$$v = y - y'. \quad (4)$$

Para obtener las deformaciones unitarias, se debe obtener el gradiente de los desplazamientos de cada punto (centro de subconjunto). Esto se logra aplicando las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\delta u}{\delta x} \right)^2 + \left(\frac{\delta v}{\delta x} \right)^2 \right), \quad (5)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\delta u}{\delta y} \right)^2 + \left(\frac{\delta v}{\delta y} \right)^2 \right), \quad (6)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta u}{\delta x} \cdot \frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x} \cdot \frac{\delta v}{\delta y} \right). \quad (7)$$

Aplicando este proceso para todos los puntos de la región de interés, finalmente se puede obtener el mapa o campo de deformaciones unitarias del objeto para cada imagen del estado deformado.

3. Sistema propuesto

En este trabajo se propone un sistema de medición de deformaciones en tiempo real utilizando 2D-DIC para una prueba de tensión uniaxial mediante código, el cual permite procesar y visualizar el mapa de deformaciones simultáneamente durante la prueba. El sistema de medición de deformaciones propuesto se conforma por tres componentes: una cámara, un algoritmo de correlación y un patrón de moteado generado con pintura en aerosol. Con base en investigaciones encontradas en la literatura, se observó que la mayoría de los programas de acceso libre desarrollados para DIC han utilizado el lenguaje de programación *Python* (Belloni et al., 2019; Olufsen et al., 2020;

Couty et al., 2021). Esto es porque el lenguaje *Python* permite el uso de librerías para procesamiento de imágenes, cálculo con matrices y visualización de imágenes, además de su compatibilidad con diferentes sistemas operativos. Por lo anterior, el código desarrollado para este sistema de medición se realizó en lenguaje *Python*. El algoritmo de este código está dividido en tres módulos, que se explican a continuación.

1. Calibración. Lo primero que se debe tomar en cuenta para la utilización del código es el ancho de la probeta a estudiar (en milímetros). Este dato se ingresa en la terminal del código al ejecutarlo. Utilizando la librería *OpenCV* de *Python* se visualiza la imagen proveída por la cámara en una ventana independiente para hacer los ajustes de enfoque, zoom y apertura, de tal manera que la probeta quede centrada y el patrón de moteado contraste con el resto de la imagen. Una vez que se tengan las características indicadas se captura la imagen de referencia para la correlación. Después, se muestra una ventana para seleccionar el área donde se encuentra la probeta, para minimizar el tiempo de análisis y excluir algún componente que pueda perjudicar el estudio como reflejos o lo que se encuentre en el fondo de la imagen. Una vez hecho el recorte, se visualiza la imagen de referencia en blanco y negro, donde se espera que solamente la probeta se muestre en color blanco, en caso de no ser así, se pide cambiar el umbral de conversión hasta que esto sea posible. Este proceso permite que el sistema identifique la probeta dentro de la imagen y se calcule la relación de píxeles a milímetros. Usualmente, en el proceso de calibración de sistemas DIC robustos (principalmente *Stereo-DIC*) se consideran los efectos de fenómenos ópticos como *ghosting*, distorsiones, entre otros. Sin embargo, ya que el sistema DIC propuesto se desarrolló para hacer mediciones en

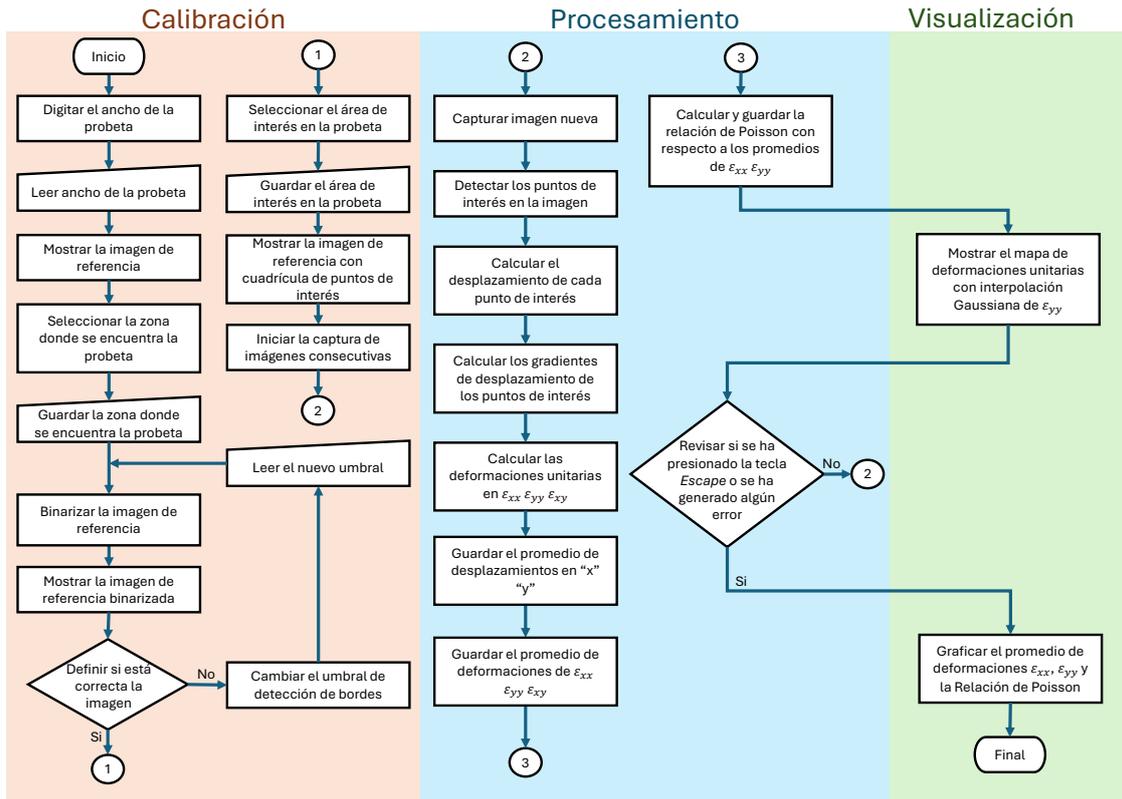


Figura 2: Diagrama de flujo del código desarrollado.

objetos planos, estos efectos ópticos fueron despreciados para simplificar el proceso de calibración. Además, se ha reportado que el algoritmo de Lucas-Kanade (el cual se utiliza en este trabajo para el seguimiento de puntos) es tolerante a las variaciones de luminosidad de la imagen capturada (Mathis A. et al., 2016), lo cual beneficia la precisión en la correlación de las imágenes

2. **Procesamiento.** Para esta etapa, se define la región de interés, sobre la cual se calculan las deformaciones unitarias en x (ecuación 5), en y (ecuación 6) y cortantes (ecuación 7). Esta región debe ser una zona que contenga el patrón de moteado y no salga del campo de visión de la cámara durante la prueba. En caso de perder el seguimiento de los puntos se detiene el análisis y se muestran los resultados. Mientras se calcula el mapa de deformaciones, este es mostrado gráficamente en tiempo real. De igual manera, en una ventana diferente, se muestra el seguimiento de los puntos de interés definidos por la región de interés. Cabe mencionar que el método para seguimiento de los puntos implementado en este trabajo es el de Lucas-Kanade. Este algoritmo está disponible en la librería *OpenCV* de *Python* por medio de la función *calcOpticalFlowPyrLK*, y se ha implementado por diferentes autores (Belloni et al., 2019; Hartmann et al., 2019; Pratim Das P. et al., 2021), por lo que dicha librería se incorporó al código del presente trabajo. Los parámetros utilizados para la obtención de resultados de este artículo fueron los siguientes:

- Tamaño de ventana de búsqueda 40 x 40 píxeles.
- Número máximo de nivel de pirámide 10.
- Criterio de terminación: máximo de iteraciones 10 y movimiento de ventana de búsqueda menor de 0.03.

3. **Visualización.** Al detener el estudio, utilizando la librería *Matplotlib* de *Python*, se muestran tres gráficas, correspondientes a los promedios de las deformaciones unitarias en ϵ_{xx} y ϵ_{yy} de cada muestreo y la gráfica de la relación de Poisson, que es el cociente de la deformación en x y la deformación en y . Así mismo, como parte del módulo de visualización, durante la prueba de tensión utilizando la librería *Matplotlib* de *Python* se muestra en tiempo real la evolución del mapa de deformaciones en una ventana independiente. En la Figura 2 se resume el diagrama de flujo del código.

4. Prueba experimental

Para el arreglo experimental se utilizaron los siguientes componentes: una máquina de tensión uniaxial para elastómeros programada para estirar la probeta una distancia de 10 mm a una velocidad de 0.5 mm/s, el sistema de medición DIC, iluminación externa y una probeta de EPDM, el cual es un material elastómero con muchas aplicaciones en la ingeniería. La máquina sostiene la probeta verticalmente mediante dos mordazas separadas a una distancia de 60 mm. La probeta de EPDM es de color negro y tiene 7.28 mm de ancho, 3 mm de espesor

y 80 mm de largo. Sobre la superficie de la probeta se crea un patrón de moteado con pintura en aerosol color blanco mate. Cabe señalar que la máquina de tensión uniaxial sólo es utilizada para estirar la probeta con la intención de deformarla, por lo tanto, no se trabajó como un ensayo de tensión uniaxial estandarizado. Para la iluminación de la probeta, se utilizó un foco Philips de 65 W de 620 lúmenes. Se utilizó una cámara USB de la marca ELP modelo ELP-USB8MP02G-SFV(5-50) de 8 MP, con una lente de 5-50 mm. La cámara se posicionó a una distancia de 10 cm (perpendicular a la superficie de la muestra) enfocando la zona central de la probeta como se muestra en la Figura 3. El código se ejecutó en una computadora HP Victus, con procesador Intel Core i5-11400H 2.70 GHz y 8 GB de memoria RAM.

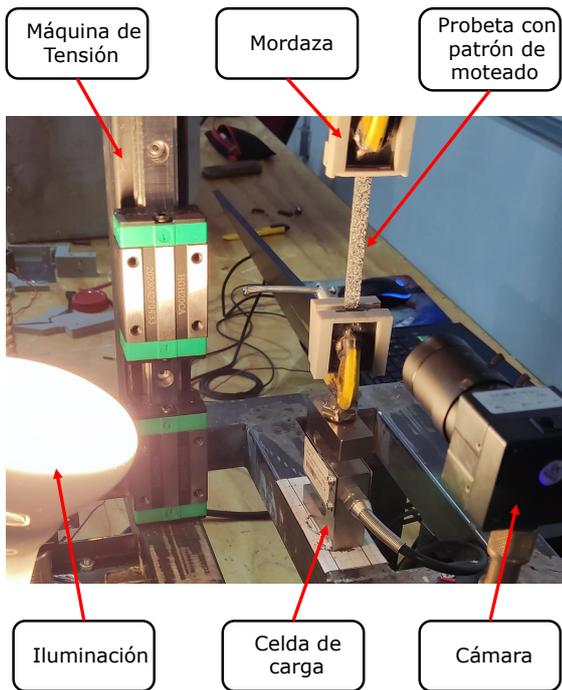


Figura 3: Arreglo experimental para el ensayo de tensión.

Se inicia la captura de video mediante el código antes de la activación de la máquina de tensión. Como es esperado, cuando no hay deformaciones en el material, el mapa de deformaciones que se visualiza está completamente en ceros, es decir, el mapa es casi azul en su totalidad. Al momento de activar la máquina de tensión, instantáneamente la visualización del mapa de deformaciones empieza a cambiar, y se observa que las deformaciones unitarias aumentan gradualmente. La prueba de tensión, bajo los parámetros establecidos en la programación de la máquina, tuvo una duración de 20 segundos, periodo en el cual el sistema de medición estuvo monitoreando las deformaciones. Después de los 20 segundos, la prueba se concluye y se detiene la ejecución del código manualmente. Las gráficas de deformaciones unitarias en x y en y se visualizan una vez que la ejecución se haya detenido. Asimismo, para el reporte de resultados, los valores promedio de las deformaciones para cada captura se exportan a un archivo “.txt”, el cual facilita la disposición de los datos para su análisis posterior. En la Figura 4 se muestran imágenes del sistema desarrollado durante el proceso de medición.

Con la finalidad de contar con un medio de comparación de los resultados obtenidos con el código desarrollado, se realizó el mismo experimento de tensión, utilizando un equipo comercial de correlación digital de imágenes de la marca *Dantec Dynamics* para la medición de las deformaciones. El modelo utilizado fue el *Q-450 systems*, el cual consta de dos cámaras *Phantom* modelo *speedsense 9070* con una lente Carl Zeiss Makro-planar 2/50 ZF. De igual manera, el equipo cuenta con el programa *Istra4D*, versión 4.3.0.45 para el análisis de las imágenes capturadas. Debido a que el estudio a realizar es 2D-DIC, se utilizó solamente una cámara y se posicionó a una distancia de 10 cm, enfocando la zona central de la probeta como se muestra en la Figura 5. La máquina de tensión se programó para ejecutar la prueba a una velocidad de desplazamiento de 0.5 mm/s. La adquisición de las imágenes se configuró a 15 capturas por segundo, y se inicia unos segundos antes de ejecutar la prueba de tensión. De igual manera, al finalizar el análisis con el programa *Istra4D*, se exportan y grafican los valores promedio de las deformaciones unitarias en x y en y para cada captura. Por lo tanto, la comparativa se realiza sobre las gráficas de deformaciones unitarias obtenidas mediante los dos sistemas de medición DIC.

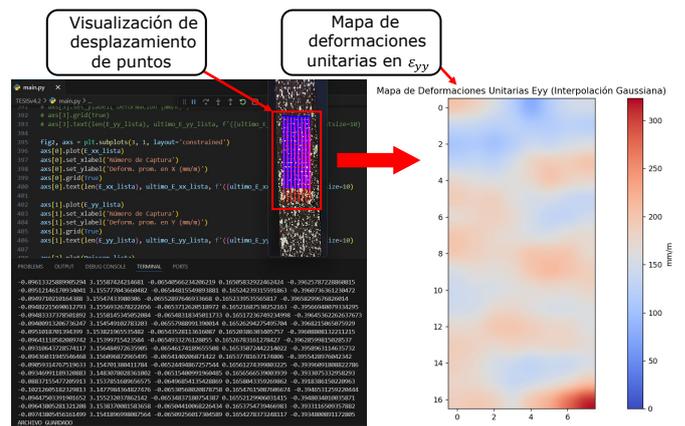


Figura 4: Interfaz y visualización del campo de deformaciones con el sistema desarrollado.

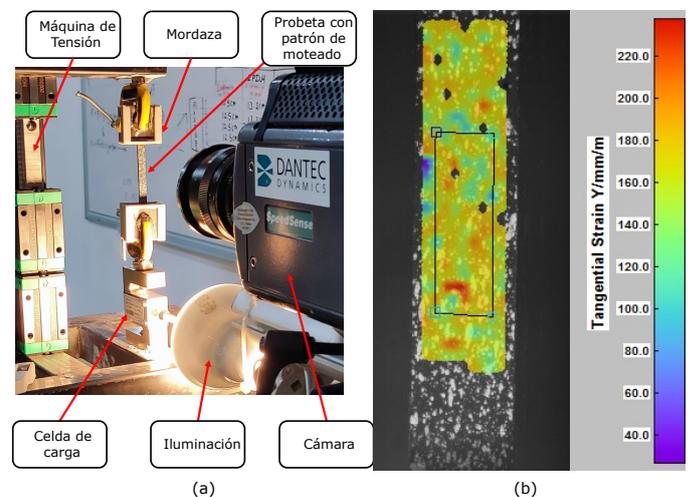


Figura 5: (a) Arreglo experimental con el equipo comercial de DIC (b) Mapa de deformaciones unitarias generado por el equipo comercial.

5. Resultados y análisis.

Para analizar los resultados obtenidos se tomó como referencia el porcentaje de ejecución de la prueba mecánica, debido a que la velocidad de captura de ambos sistemas es diferente y, por lo tanto, se tiene diferente número de muestreos durante el tiempo que duró el experimento (20 segundos). Con base en el número de datos generados con el código, se encontró que la velocidad de procesamiento en tiempo real fue de 4 capturas por segundo, en promedio. La velocidad de captura y procesamiento del código desarrollado puede variar debido a diversos factores como: capacidad de procesamiento de la computadora donde es ejecutado, la resolución de la cámara utilizada, el tamaño de la región de interés a analizar y/o la cantidad de puntos de interés generados.

Para identificar el momento inicial de la prueba mecánica dentro de los datos obtenidos en ambos casos, se tomó el número de captura donde se detectó que los datos de deformación unitaria en y empezaron a aumentar. Para identificar el momento final de la prueba se tomó la última captura donde la deformación unitaria dejó de aumentar considerablemente. Se realizaron tres pruebas de repetibilidad para cada sistema de medición DIC. En la Figura 6 se muestra una comparativa de los promedios de las deformaciones unitarias en x (ϵ_{xx}) obtenidos con los dos sistemas de medición DIC. Las barras de error representan las desviaciones estándar para cada muestreo.

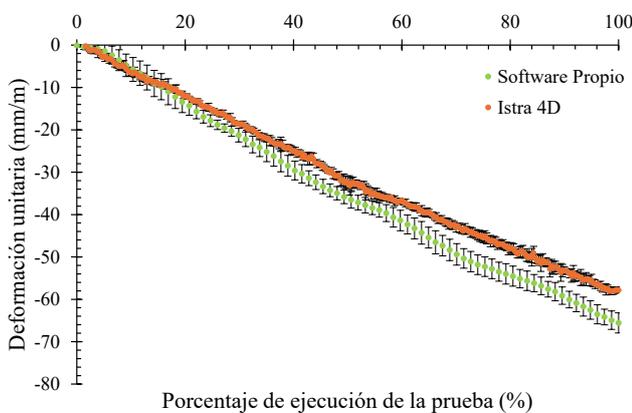


Figura 6: Comparación entre los resultados de las deformaciones unitarias en x medidas con el equipo comercial y el código desarrollado.

Debido a que la cantidad de fuerza aplicada durante esta prueba fue muy baja (hasta 25 N) y no se llevó el material hasta la fractura, se encontró que bajo este régimen de carga el material tuvo un comportamiento elástico lineal. En la Figura 6 se puede observar que inicialmente ambos sistemas de medición tienen poca discrepancia. Después del 60% de la prueba, empieza a haber una ligera separación entre las rectas. El promedio del error porcentual entre ambos sistemas DIC para las deformaciones en x fue de 15.5%. Esta aparente discrepancia se debe a que las deformaciones en x son muy pequeñas y, por lo tanto, una pequeña variación de resultados se refleja en un aumento aparente del error. También se debe a que, como se ha reportado en diferentes literaturas, la técnica DIC basada en

patrones de moteado creadas con pintura en aerosol tiende a ser menos precisa para deformaciones muy pequeñas (en el orden de micrómetros). Por otro lado, en la Figura 7, en donde se muestran los resultados de deformación unitaria en y (ϵ_{yy}) obtenidos con ambos sistemas DIC, el promedio del error porcentual fue de 3.8%. Esto también concuerda con que la técnica DIC basada en este tipo de patrones de moteado tiende a ser más precisa para deformaciones relativamente grandes (en orden de milímetros).

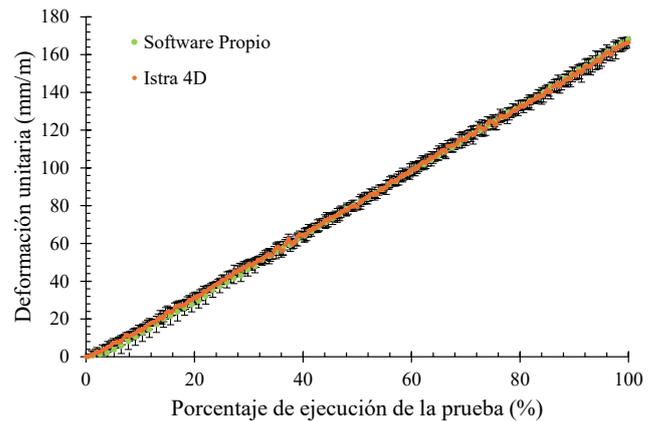


Figura 7: Comparación entre los resultados de las deformaciones unitarias en y medidas con el equipo comercial y el código desarrollado.

A partir de las deformaciones unitarias axiales (en la dirección y) y transversales (en la dirección x), se calcularon los valores de la relación de Poisson del material para ambos sistemas de medición. Los resultados de la relación de Poisson se muestran en la Figura 8. Se puede observar que, debido a la variación de las deformaciones unitarias en x durante la parte inicial de la prueba (las cuales son deformaciones muy pequeñas), se tienen desviaciones estándar muy altas en los dos sistemas de medición. Esto sucede debido a que por debajo del 20% de la prueba, las deformaciones unitarias axiales y transversales son muy pequeñas. Sin embargo, para ambos casos se empieza a estabilizar una vez que las deformaciones tienen una tendencia definida. El promedio de la relación de Poisson obtenido fue de 0.39 ± 0.1 y 0.35 ± 0.1 , para el sistema desarrollado y el equipo comercial, respectivamente, lo cual concuerda con el rango de valores para este material reportado en la literatura (Sotomayor-del-Moral et al., 2022).

Los resultados obtenidos con este sistema propuesto abren posibilidades para aplicaciones en el campo de la mecánica experimental y para pruebas no destructivas. El mapa de deformaciones que se obtienen en tiempo real puede ser de gran utilidad para la detección de grietas prematuras en elementos estructurales. Se sabe que una grieta genera grandes concentraciones de deformaciones y, por lo tanto, pueden ser detectadas y medidas mediante el sistema propuesto. También podría ser aplicable para la inspección de imperfecciones en elementos mecánicos, ya que estas también propician concentraciones de deformaciones. Estas aplicaciones podrían servir para el control de calidad y la evaluación de la integridad de elementos estructurales en el ámbito de la ingeniería civil, así como en la industria.

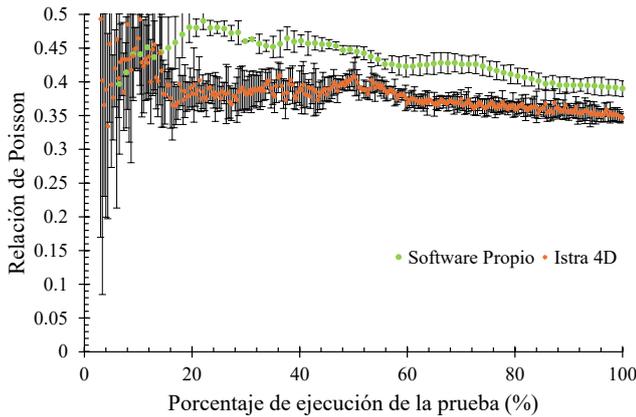


Figura 8: Resultados para la relación de Poisson calculado para los dos métodos de medición.

6. Conclusiones.

En este trabajo se presentaron los resultados preliminares de un sistema de medición de deformaciones con correlación digital de imágenes en tiempo real. El sistema propuesto consiste en un código programado en *Python* y se compone de tres módulos: calibración, procesamiento y visualización. Este código implementa el algoritmo de Lucas-Kanade para el seguimiento de los puntos de interés y permite la visualización del mapa de deformaciones unitarias en tiempo real. Las deformaciones unitarias se determinan obteniendo los gradientes de desplazamiento calculados a partir del seguimiento de puntos del algoritmo de Lucas-Kanade. El sistema se aplicó para medir deformaciones en una prueba de tensión uniaxial utilizando una probeta de un elastómero. Los resultados obtenidos con el sistema desarrollado se compararon con aquellos que se obtienen con un sistema de medición comercial DIC de postproceso. De acuerdo a la comparación de estos resultados preliminares, se obtuvo una diferencia porcentual de 15.5 % y 3.8 % para las deformaciones unitarias en x y en y , respectivamente. Con base en estos resultados, se puede esperar que este sistema de medición en tiempo real sea aplicable para evaluaciones no destructivas en la ingeniería civil e industrial, por ejemplo, para detección de grietas en elementos estructurales y/o elementos mecánicos. Por otra parte, si bien se logró hacer mediciones en tiempo real, la velocidad de adquisición y procesamiento fue de hasta 4 capturas por segundo, lo cual para eventos dinámicos es una velocidad muy baja. Por lo tanto, para un trabajo futuro, se investigarán métodos como el cómputo en paralelo y el uso de *GPU* para aumentar la velocidad de adquisición y procesamiento de las imágenes en tiempo real. De esta manera se ampliarían las posibilidades de este sistema para su utilización en una gran variedad de aplicaciones (incluidas las dinámicas).

7. Agradecimientos.

Los autores agradecen al CONAHCYT por las becas con número 1237238 y 1236948.

Referencias

- Bay B. K., (2008). Methods and applications of digital volume correlation. *J. Strain Anal. Eng. Des.*
- Belloni V., Ravanelli R., Nascetti A., Di Rita M., Mattei D., Crespi M., (2019). py2DIC: A New Free and Open Source Software for Displacement and Strain Measurements in the Field of Experimental Mechanics. *Sensors*.
- Blug A., Regina D. J., Eckmann S., Senn M., Bertz A., Carl D., and Eberl C., (2019). Real-Time GPU-Based Digital Image Correlation Sensor for Marker-Free Strain-Controlled Fatigue Testing. *Applied Sciences*.
- Chu T. C., Ranson W. F., and Sutton M. A., (1985). Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Exp. Mech.*
- Chu T. P. and Poudel A., (2014). Digital image correlation techniques for aerospace applications. In *ASNT annual conference 2014*.
- Couty V., Witz J.F., Lecomte-Grosbras P., Berthe J., Deletombe E., Brieu M., (2021). GPUCorrel: A GPU accelerated Digital Image Correlation software written in Python. *SoftwareX*.
- Hartmann C., Volk W., (2019). Digital image correlation and optical flow analysis based on the material texture with application on high-speed deformation measurement in shear cutting. *Conference: International Conference on Digital Image and Signal Processing (DISP 2019)*
- Jiang Z., Kemao Q., Miao H., Yang J., and Tang L., (2015). Path-independent digital image correlation with high accuracy, speed and robustness. *Optics and Lasers in Engineering*.
- Juárez Hernández J. A., Sotomayor-del-Moral J. A., Susarrey-Huerta O., Farfán-Cabrera L. I., and Pascual-Francisco J. B., (2023). A comparison of viscoelastic behavior of engineering elastomers under different stress and temperature. *Rev. Mex. Fis.*
- Malesa M., Malowany K., Pawlicki J., Kujawinska M., Skrzypczak P., Piekarczyk A., Lusa T., and Zagorski A., (2016). Non-destructive testing of industrial structures with the use of multi-camera Digital Image Correlation method. *Engineering Failure Analysis*.
- Mathis A., Nothwang W., Donovanik D., Conroy J., Shamwell J., Robinson R., (2016). Making Optic Flow Robust to Dynamic Lighting Conditions for Real-Time Operation. *US Army Research Laboratory*.
- Olufsen, S. N., Andersen, M. E., & Fagerholt, E. (2020). μ DIC: An open-source toolkit for digital image correlation. *SoftwareX*.
- Pan B., Qian K., Xie H., and Asundi A., (2009). Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Meas. Sci. Technol.*
- Pan B., (2018). Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals. *Measurement Science and Technology*.
- Pascual-Francisco J. B., Farfan-Cabrera L. I., Cuan-Urquiza E., Álvarez-Trejo A., and Roman-Flores A., (2022). Additive manufacturing and viscoelasticity evaluation of Bézier metamaterials fabricated via vat photopolymerization. *Additive Manufacturing*.
- Pascual-Francisco J. B., Farfan-Cabrera L. I., Cuan-Urquiza E., Álvarez-Trejo A., and Roman-Flores A., (2022). Characterization of Viscoelastic Poisson's Ratio of Engineering Elastomers via DIC-Based Creep Testing. *Polymers*.
- Peters W. H. and Ranson W. F., (1982). Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Optical Engineering*.
- Pratim Das P., Prabhu Elenchezian M. R., Vadlamudi V., Reifsnider K., Raihan R., (2021). RealPi2dDIC: A Low-cost and open-source approach to in situ 2D Digital Image Correlation (DIC) applications. *SoftwareX*.
- Ramos T., Furtado A., Eslami S., Alves S., Rodrigues H., Arêde A., Tavares P. J., and Moreira P.M.G.P., (2015). 2D and 3D Digital Image Correlation in Civil Engineering – Measurements in a Masonry Wall. *Procedia Engineering*.
- Reu P. L., Rohe D. P., and Jacobs L. D., (2017). Comparison of DIC and LDV for practical vibration and modal measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*.
- Saldaña-Heredía A., Martínez-Calzada V., Villar-Ramírez V., and Rodríguez-Torres A., (2022). Optical measurement of an impact reaction in a modeled wing. *Frontiers in Physics*.
- Sotomayor-del-Moral J.A., Pascual-Francisco J.B., Susarrey-Huerta O., Resendiz-Calderon C.D., Gallardo-Hernández E.A., and Farfan-Cabrera L.I., (2022). Characterization of Viscoelastic Poisson's Ratio of Engineering Elastomers via DIC-Based Creep Testing. *Polymers*.
- Sutton M. A., Mingqi C., Peters W. H., Chao Y. J., and McNeill S. R., (1986). Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis. *Image Vis. Comput.*
- Sutton M. A., Ranson W. F., and Peters W. H., (1983). Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image Vis. Comput.*
- Sutton M., Orteu J.J., Schreier H., (2009). *Image Correlation for Shape, Motion*

- and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications. Springer.
- Wang T., Kemaio Q., Soon-Seah H., and Lin F., (2018). A flexible heterogeneous real-time digital image correlation system. *Optics and Lasers in Engineering*.
- Wu R., Wu H., Arola D., and Zhang D., (2016). Real-time three-dimensional digital image correlation for biomedical applications. *J. Biomed. Opt.*
- Yuan Y., Zhan Q., Xiong C., and Huang J., (2017). Digital image correlation based on a fast convolution strategy. *Optics and Lasers in Engineering*.
- Zhang L., et al., (2015). High accuracy digital image correlation powered by GPU-based parallel computing. *Opt. Lasers Eng.*