

Desarrollo e implementación de sistema DIC para caracterización mecánica en láminas metálicas

M. P. Moreno Palacios¹, A. Cano Loredo¹, E. Ramírez Mares¹, M. I. Pech Mendoza¹, G. Capilla González¹, R. Pérez Santiago²

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca.

² Escuela de Ingeniería y Ciencias. Tecnológico de Monterrey, Campus Querétaro.

mp.morenopalacios@ugto.mx, a.canoloredo@ugto.mx, e.ramirezmares@ugto.mx, mi.pechmendoza@ugto.mx, g.capilla@ugto.mx, rogelio.perez@tec.mx

Resumen

En este trabajo se implementó la Correlación Digital de Imágenes DIC para caracterizar las deformaciones en probetas de aluminio 6061-T4 con radios de muesca R 25, R 5 y R 1 mm. Las muestras se prepararon aplicando un patrón de moteado con pintura negra, capturando imágenes a 1 fps y empleando facetas de 33×33 px con paso de 11 px. El análisis se realizó con ZEISS Quality Suite Correlative y los resultados de deformación longitudinal y transversal se compararon con mediciones de extensómetro. Se observó que la máxima deformación se localiza en la raíz de la muesca y crece con el radio. La técnica demostró alta reproducibilidad y solidez, y aportó datos clave para calibrar las curvas límite de formado (FLC) en futuras investigaciones.

Palabras clave: Correlación Digital de Imágenes, Aluminio, Trayectoria de Deformación.

Introducción

Correlación Digital de Imágenes conocida como DIC por sus siglas en inglés, es una técnica óptica de campo completo que permite la medición de desplazamientos y deformaciones. La técnica consiste en la toma de imágenes digitales durante el ensayo de una probeta desde su estado inicial (considerado como el de referencia) hasta su estado final (deformado). Previo a la realización de las pruebas, las probetas son tratadas para poder aplicar la técnica DIC, para ello se genera un moteado aleatorio de color negro a fin de generar el máximo contraste posible, como se muestra en la Figura 1. Las probetas se dividen en subconjuntos virtuales, denominados facetas, y mediante la aplicación de algoritmos de correlación, se busca una región de referencia en la imagen deformada, determinando el vector de desplazamientos en cada conjunto de facetas procesadas (López-Alba *et al.*, 2010).

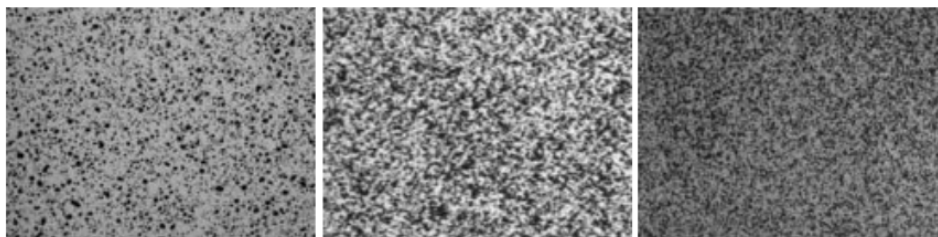


Figura 1. Ejemplos de patrones de moteado típicos. Adaptada de Image correlation for shape, motion and deformation measurements (Fig. 5.3, p. 83), por M. A. Sutton, J.-J. Orteu y H. W. Schreier, 2009, Springer.

Aunque las galgas extensiométricas permiten medir micro deformaciones con alta precisión, cuentan con las siguientes limitaciones: (i) rango limitado en la magnitud de las deformaciones, (ii) limitado número de ciclos de operación, (iii) sensibilidad a las variaciones de temperatura.

Para ilustrar la aplicación de la técnica DIC en la caracterización mecánica, Wang, Park, & Choi aplicaron la técnica a probetas de Al 6061-T6 con muescas, capturando imágenes a 1 cuadro por segundo (fps por sus siglas en inglés) y empleando facetas de 34×34 píxeles (px); integraron los mapas de deformación resultantes con simulaciones por Elementos Finitos para validar la distribución de triaxialidad de esfuerzos y predecir el inicio de la fractura justo antes del fallo. En dicho estudio, observaron que la deformación máxima se localiza en la raíz de la muesca cuando ésta es pequeña, mientras que en muestras con muesca grande o sin muesca la concentración de deformación ocurre en la zona de estricción previa a la fractura (Wang, Park, & Choi, 2020). Además, Savić, Hector Jr. y Fekete (2010) estudiaron la influencia de la anisotropía en los campos de deformación de aceros martensíticos; Tung, Shih y Kuo (2010) examinaron la propagación de fractura en probetas metálicas; y Li, Lau y Fok (2013) midieron la contracción de materiales compuestos para aplicaciones dentales mediante la técnica DIC.

Como se mencionó, la técnica DIC ha sido empleada en los últimos años para el análisis de diversos problemas en el campo de la mecánica experimental. En este sentido Pan et al., presentan varias ventajas respecto a otros métodos ópticos interferométricos para la medición de desplazamientos y deformaciones:

- *Montaje sencillo:* una cámara CCD y su soporte; en ocasiones no requiere patrón de moteado si la textura del material es adecuada.
- *Iluminación flexible:* puede usarse luz natural o fuentes externas para mejorar la calidad de las imágenes.
- *Alta precisión:* hasta 0.01 px en desplazamientos y 0.01 % en deformaciones.
- *Bajo costo computacional:* permite incluso análisis en tiempo real.

De la misma manera, la técnica presenta algunas desventajas como es la dependencia de la calidad de las imágenes tomadas en los ensayos, y las mediciones de deformaciones donde la superficie presente roturas, ya que conllevan pérdida de información.

Por consiguiente, en el presente trabajo, se realiza un estudio de la aplicación de la técnica DIC a diferentes probetas con diferentes tamaños de muesca sometidas a cargas de tensión uniaxial. Los campos de desplazamiento fueron registrados durante todas las pruebas y posteriormente procesados para determinar los campos de deformación en las direcciones principales. A fin de garantizar el correcto funcionamiento de la metodología desarrollada, se realizó un análisis comparativo de una prueba de tensión medida con un extensómetro y comparada con los resultados de la técnica DIC.

Correlación Digital de Imágenes

El funcionamiento básico del análisis DIC consiste en rastrear un patrón denominado patrón de moteado en una secuencia de imágenes. El proceso de un análisis DIC, tal como se muestra en la Figura 2, se divide en tres etapas: (i) generar un patrón en la probeta para el rastreo, (ii) capturar imágenes de la probeta durante la prueba, y (iii) analizar las imágenes para calcular los campos de desplazamiento de la superficie dentro de una región delimitada en la probeta.

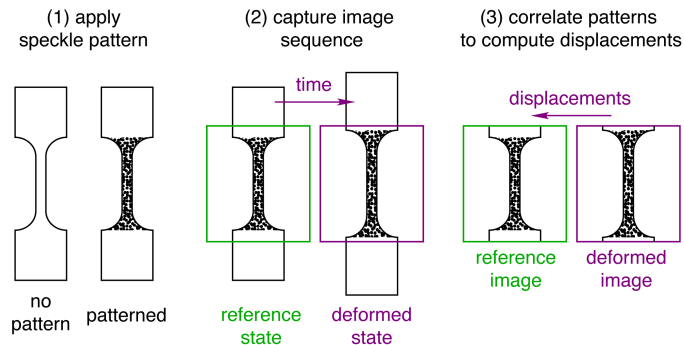


Figura 2. Proceso de un experimento DIC (LePage, 2010). Para el cálculo realizado mediante la técnica, en la Figura 3 se muestra una simplificación del análisis DIC. (a) La imagen de referencia tiene un patrón reconocible de puntos que se rastrearán. (b) Se selecciona una porción del patrón de moteado, llamada faceta (subconjunto) para el seguimiento. (c) El centro de la faceta, es decir, el punto rojo que no forma parte del patrón de moteado es el lugar en la imagen de referencia desde el cual se calculará el desplazamiento. (d) Después de que el material se deforma desde la posición inicial de la imagen de referencia, el subconjunto en la imagen deformada se combina con la faceta de la imagen de referencia. (e) Una vez que la faceta coincide, DIC calcula el desplazamiento relativo del centro del subconjunto entre las imágenes de referencia y deformada (LePage, 2010).

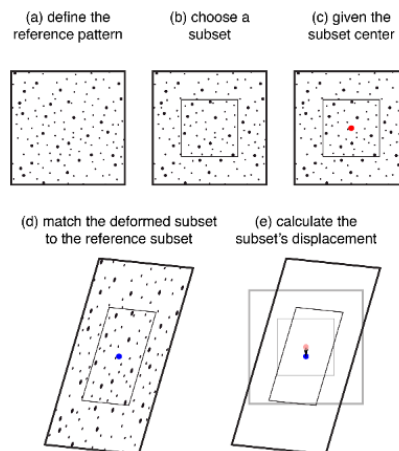


Figura 3. Simplificación del análisis DIC (LePage, 2010).

El desplazamiento se mide mediante el seguimiento de marcadores o patrones en la superficie del objeto. Al comparar las posiciones de estos marcadores en imágenes capturadas antes y después de la deformación, la técnica puede calcular los desplazamientos en varios puntos del objeto. Normalmente, el desplazamiento se representa como una cantidad vectorial, que transmite tanto la magnitud como la dirección del movimiento (Eikosim, 2023).

La deformación se refiere a la alteración del tamaño o la forma de un objeto que ocurre debido a fuerzas externas o cargas aplicadas. Este cambio de geometría durante la prueba permite la medición y el análisis de la deformación cuantificando sus componentes. La deformación, derivada de los datos de desplazamiento, es una medida del cambio relativo en la forma o el tamaño del objeto (Eikosim, 2023).

Dos variables importantes en un análisis DIC son el tamaño de la faceta y el tamaño del paso. El tamaño de la faceta se refiere al área que será tomada como referencia en la imagen (sin deformar). El tamaño del paso es la distancia entre los centros de las facetas. Tanto el tamaño de la faceta como el tamaño del paso se miden en unidades de píxeles. El factor más importante para determinar el tamaño del subconjunto es que cada uno debe contener al menos tres puntos. Los tamaños de paso más pequeños producen más puntos de datos de correlación y, por lo tanto, una resolución espacial más alta. En la Figura 4 se muestra un diagrama con rangos de diferentes tamaños de paso para el mismo campo de visión y tamaños de facetas.

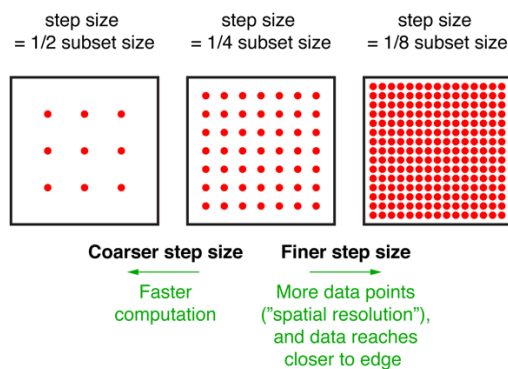


Figura 4. Rango de tamaños de paso para un análisis DIC (LePage, 2010).

Para igualar las imágenes de referencia y deformadas, el análisis DIC rastrea las características de la superficie de la muestra que, en conjunto, forman el patrón de moteado. De esta forma, la calidad del análisis depende en gran medida del patrón de moteado, como se muestra en la Figura 5.

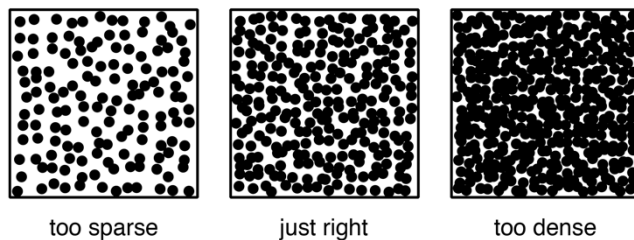


Figura 5. Patrón de moteado (LePage, 2010).

Sistema Experimental

- Material

En este estudio, se utilizó una placa de Aluminio Al6061-T4 para aplicaciones automotrices con un espesor de 1.2 mm. Las propiedades mecánicas del material se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades Aluminio 6061-T4.

Módulo de Elasticidad E [GPa]	Razón de Poisson ν	Esfuerzo a la tensión S_{ut} [GPa]
68.0	0.36	90

Se fabricaron probetas de 150 mm de largo y 35 mm de ancho, con muescas definidas por diferentes radios, tal como se muestra en la Figura 6.

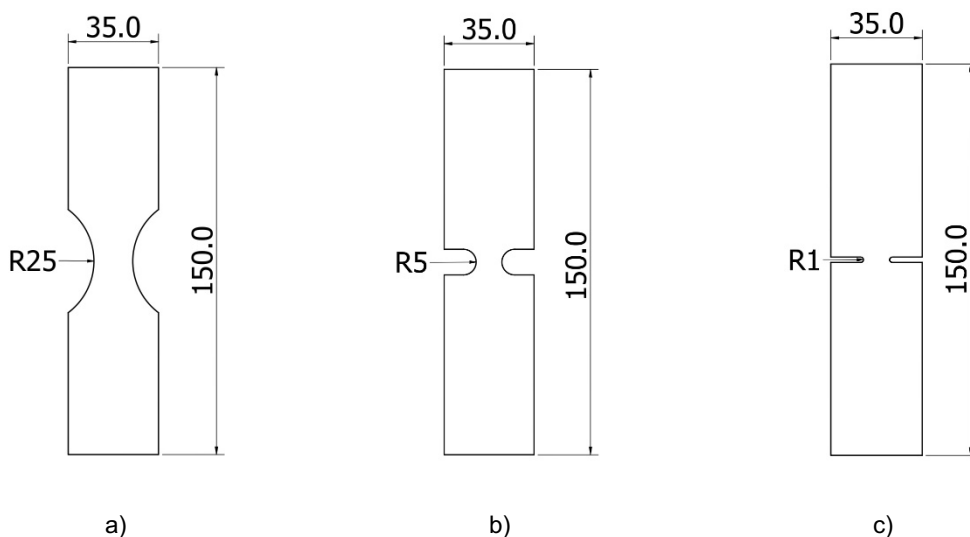


Figura 6. Geometría de los especímenes con muesca de a) Radio 25 mm; b) Radio 5 mm; c) Radio 1mm.

- Pruebas de tensión

Se realizaron pruebas de tensión para determinar las propiedades mecánicas de las probetas hasta alcanzar la fractura. Se realizaron 3 réplicas de cada configuración geométrica con el objetivo de garantizar la repetibilidad. El equipo utilizado para las pruebas fue una máquina de tensión Instron modelo 8872, capacidad de 2.5 toneladas.

- Medición de correlación de imágenes digitales (DIC)

Se utilizó la técnica DIC para medir las distribuciones de deformación de las probetas de tensión (sin muesca) y con muesca en todas sus configuraciones geométricas. Antes de la prueba, se utilizó pintura negra para generar el patrón de moteado aleatorio, tal como se muestra en la Figura 7.

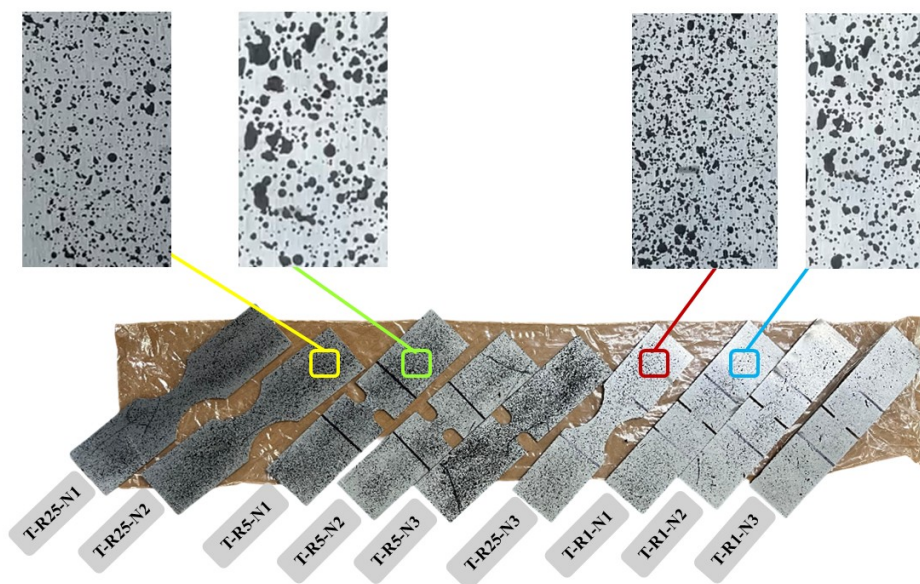


Figura 7. Moteado de cada una de las pruebas.

Durante la prueba de tensión, se grabaron videos utilizando un dispositivo de video con frecuencia de un cuadro por segundo. También, se empleó una fuente de luz externa de LED para mejorar el contraste en las imágenes teniendo un control de iluminación. Posteriormente, se realizó el análisis DIC utilizando el software ZEISS Quality Suite Correlative (ZEISS, 2025). Para este estudio, se definió una escala 2D con una longitud calibrada de 50 mm, como se muestra en la Figura 8.

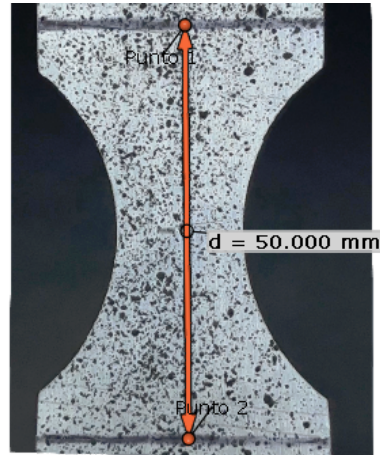


Figura 8. Definición de zona de medición para el análisis mediante DIC.

La región de interés en el cual se realizó el análisis de las deformaciones está definida por una faceta con tamaño de 33x33 píxeles, mientras que la distancia entre puntos se seleccionó de 11 píxeles, tal como se muestra en la Figura 9. Estos valores fueron utilizados para todas las pruebas realizadas.

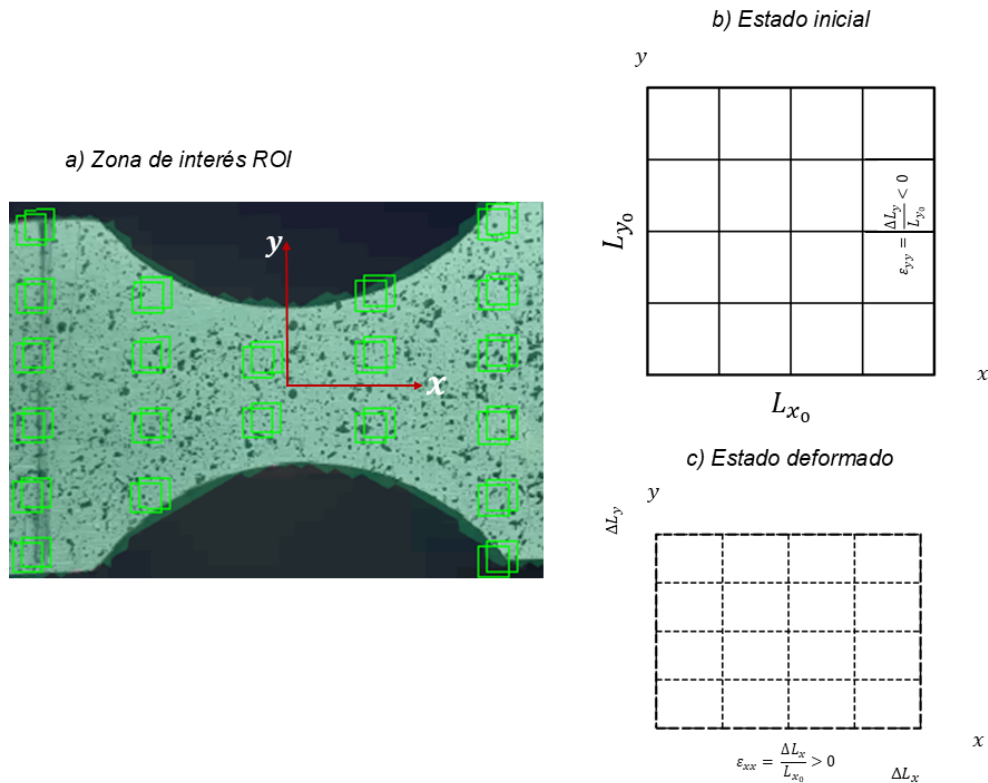


Figura 9. (a) Zona de interés (ROI) seleccionada para el análisis DIC. (b) Elemento material idealizado en estado inicial. (c) Estado deformado bajo tracción uniaxial, mostrando ϵ_{xx} y ϵ_{yy} .

Una vez realizado el procesamiento de las imágenes, se revisaron las deformaciones longitudinales ε_{xx} y transversales ε_{yy} en las zonas de interés de las probetas, tal como se muestra en la Figura 10.

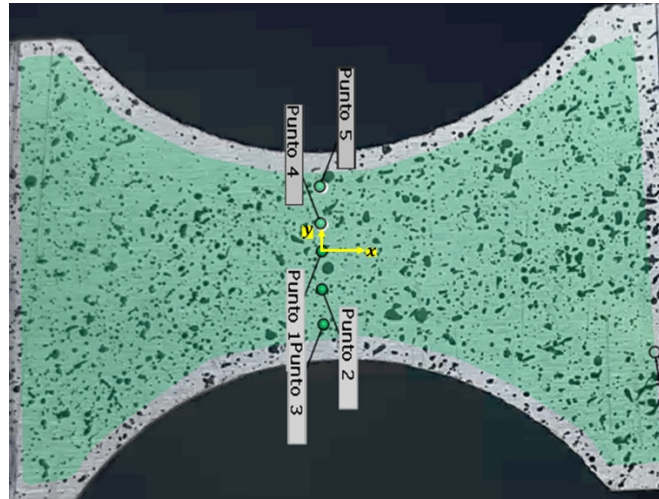
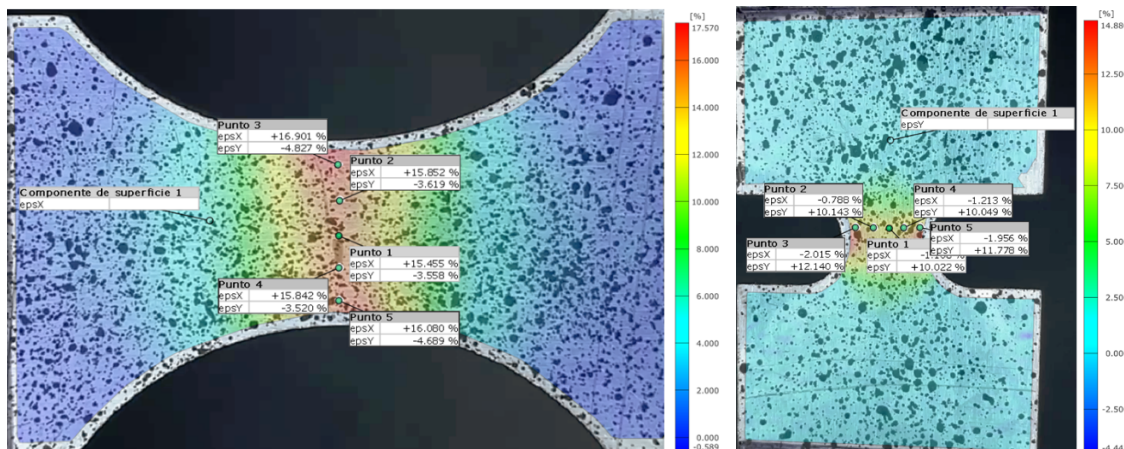


Figura 10. Inspección de puntos en el área de interés.

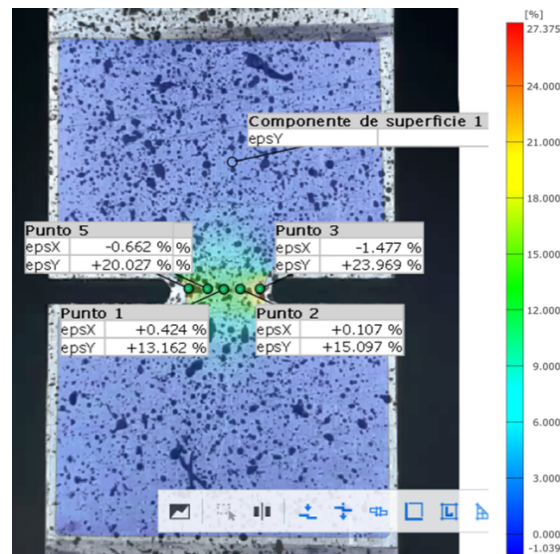
Resultados

Los resultados experimentales obtenidos para cada una de las configuraciones de las probetas se muestran en la Figura 11. Las imágenes mostradas corresponden a la componente de deformación longitudinal ε_{xx} en el último cuadro previo a la fractura, durante la prueba de tensión. Como se puede observar, la magnitud de deformación obtenida está directamente relacionada con la geometría de la probeta, siendo mayor en aquellas con radio de 25 mm. Este mismo efecto ocurre en las deformaciones en la dirección transversal ε_{yy} . Por lo que resulta evidente que el estado de deformación que puede ser obtenido depende totalmente de la geometría de la probeta.



a) Probeta R25

b) Probeta R5



c) Probeta R1

Figura 11. Contorno de deformación para cada una de las configuraciones de las probetas.

Las Figuras 12-14 muestran las gráficas de deformación longitudinal ϵ_{xx} vs deformación transversal ϵ_{yy} para cada una de las configuraciones experimentales. Dentro de las probetas, se consideraron 5 puntos de medición distribuidos equitativamente a través de la dicción transversal (ver Figura 10), a fin de evaluar el gradiente de deformación. Los resultados muestran para todos los casos, que los puntos cercanos a los bordes de las probetas (puntos 3 y 5) muestran mayores magnitudes de deformación. Esto es esperado debido a su posición más cercana al concentrador de esfuerzos. Sin embargo, los resultados muestran una tendencia clara en la trayectoria de las deformaciones.

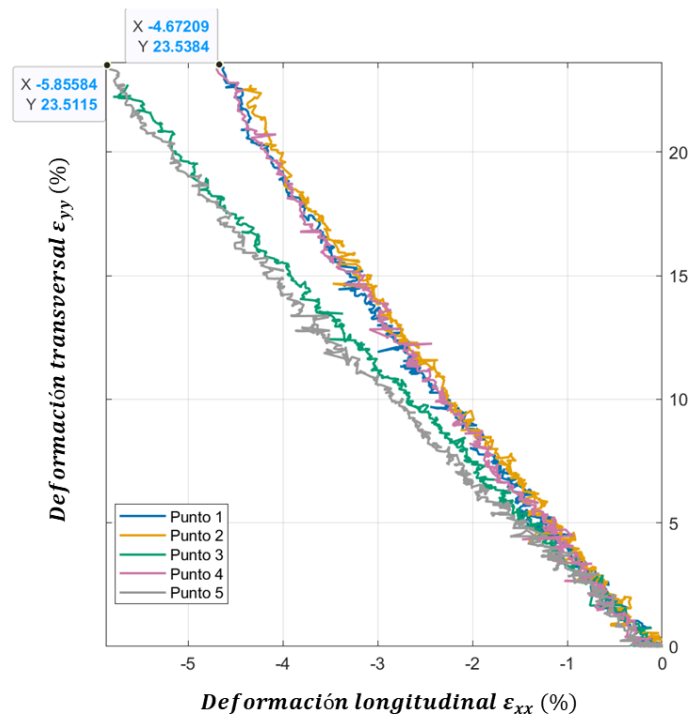


Figura 12. Distribución de deformaciones ϵ_{xx} y ϵ_{yy} en la probeta de radio de 25 mm.

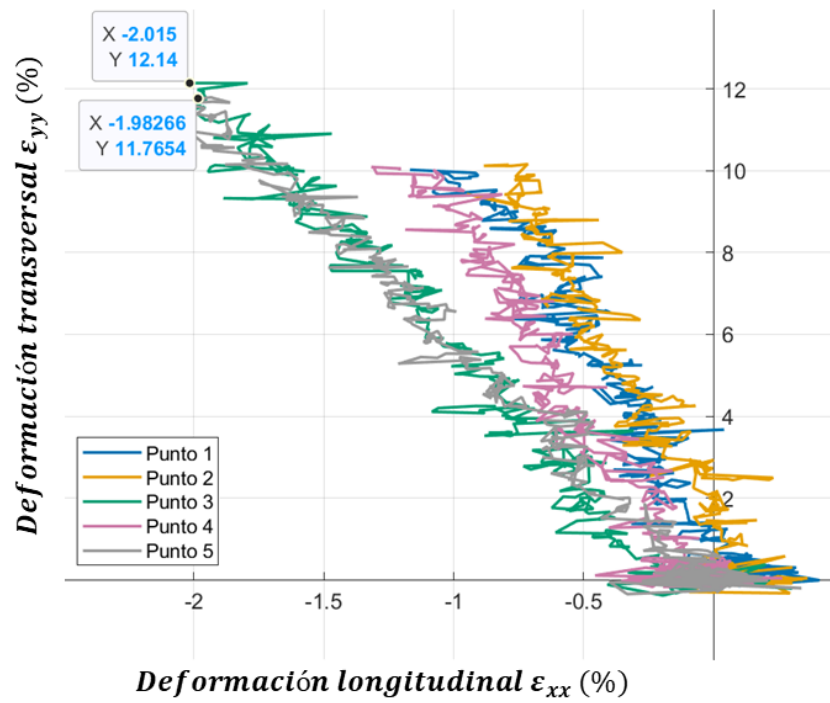


Figura 13. Distribución de deformaciones ε_{xx} y ε_{yy} en la probeta de radio de 5 mm.

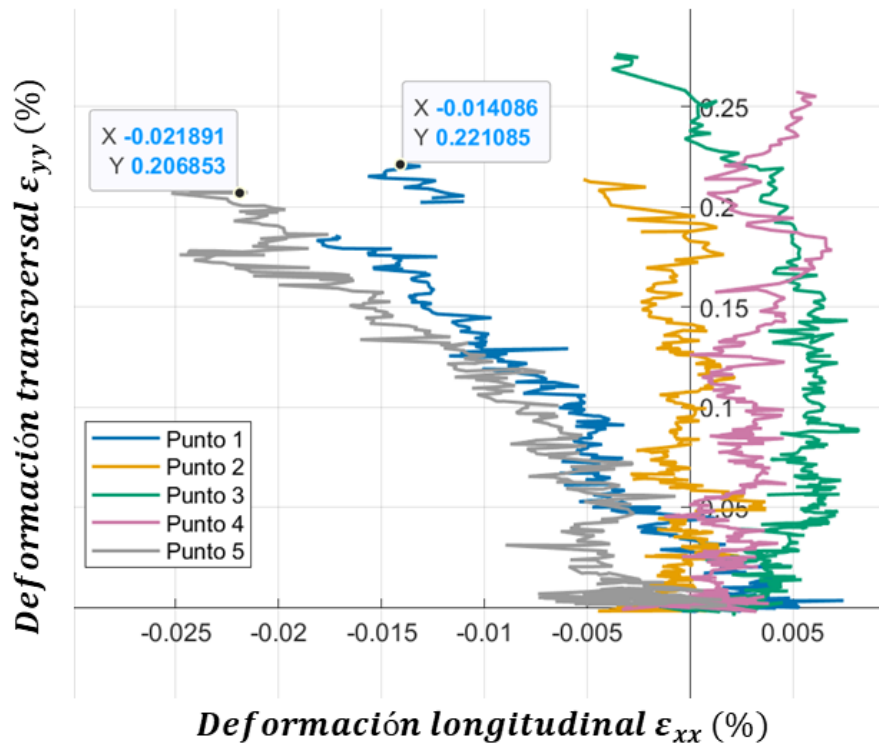


Figura 14. Distribución de deformaciones ε_{xx} y ε_{yy} en la probeta de radio de 1 mm.

En la Figura 15, se muestran las geometrías de las tres configuraciones de probetas con la fractura evidente.

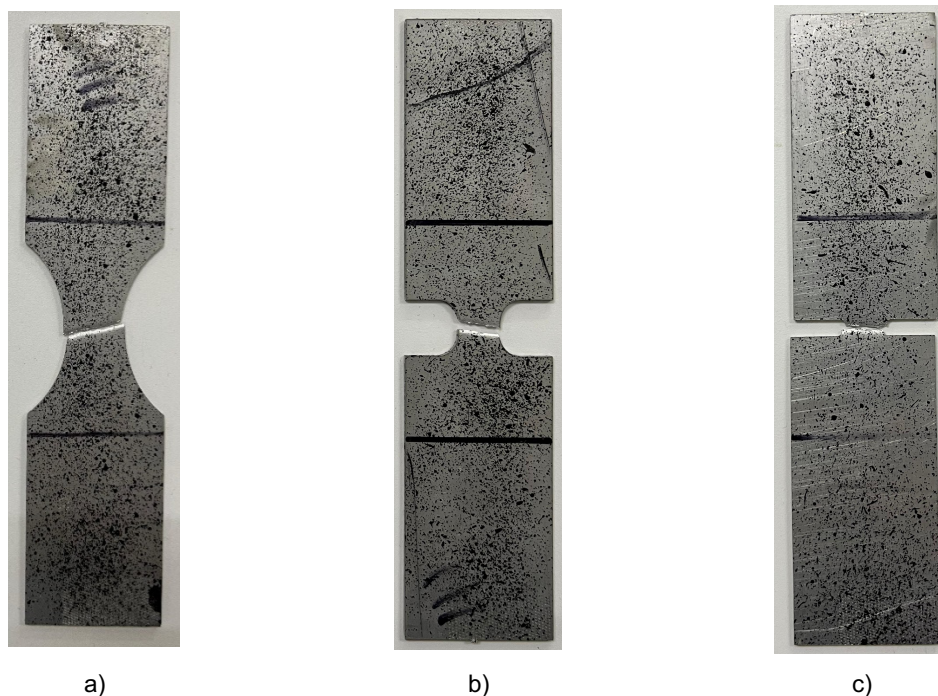


Figura 15. Probetas fracturadas a) Radio 25 mm; b) Radio 5 mm; c) Radio 1 mm.

Conclusiones

- Se desarrolló una metodología que permitió la implementación exitosa del sistema de correlación digital de imágenes, lo cual incluye, preparación de las probetas con distintas configuraciones geométricas, generación de patrón aleatorio, sistema experimental y post-procesamiento.
- Se demostró que los estados de deformaciones en probetas planas pueden ser modificados cambiando la geometría de las probetas. Esto permite reproducir distintos estados de deformaciones que aparecen en procesos de conformado de lámina.
- Valores de radios más pequeños muestran una mayor variabilidad en los resultados de las deformaciones; por lo que es necesario realizar un análisis de sensibilidad dentro de los trabajos futuros del proyecto.

Bibliografía/Referencias

- Castañeda, R., Díaz, A., & de la Garza, H. (s.f.). Software libre de correlación digital de imágenes en 2D para determinar el campo de desplazamientos y deformaciones en probetas planas [Conference full paper]. Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C.; Instituto Tecnológico de Chihuahua II.
- LePage, W. (2010). A practical guide to DIC. digitalimagecorrelation.org. <https://digitalimagecorrelation.org/>
- Long, N., & Clark, D. (s.f.). Correlación Digital de Imagen (Vision Research White Paper Series, págs. 1–5). Vision Research (AMETEK, Inc.).
- López-Alba, E., López-García, R., Dorado, R., & Díaz, F. (2010). Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto. En A. E. Mecánica (Ed.), (págs. 1-8).
- Sutton, M. A., Orteu, J.-J., & Schreier, H. W. (2009). Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications. Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78747-3>
- Sutton, M. A., Orteu, J.-J., & Schreier, H. W. (2009). Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications. Springer.
- Wang, L., Park, J.-H., & Choi, N.-S. (2020). Observation of notch effect in Al6061-T6 specimens under tensile loading using digital image correlation and finite element method. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(3), 1049-1058. Seoul, Korea: Springer-Verlag GmbH Germany (parte de Springer Nature).
- ZEISS. (2025). ZEISS Quality Suite Correlative [Software]. <https://www.zeiss.com/metrology/en/home.html>