

Correlación Digital de Imágenes y Emisión Acústica para el análisis del efecto Portevin-Le Chatelier en una aleación AA3003

Digital image correlation and acoustic emission used in the analysis of the Portevin-Le Chatelier effect in an AA3003-alloy

Aaron Israel Machuca Flores^a, Jorge Luis Flores Alarcón^b, Efraín Ramos^a, Armando Ortiz^a, Rafael Schouwenaars^{a,c,*}

^aUniversidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería Departamento de Diseño y Manufactura, Edificio O
Avenida Universidad 3000, Coyoacán, 04510, México.

^bUniversidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones en Materiales,
Avenida Universidad 3000, Coyoacán, 04510, México.

^cGhent University, Department of Electromechanical, Systems and Metals Engineering,
Technologiepark 903 Zwijnaarde, 9052, Ghent, Belgium.

*raf_schouwenaars@yahoo.com

Resumen

Una tendencia reciente en las pruebas mecánicas es equipar a los ensayos con la tecnología necesaria para la caracterización de materiales a diferentes escalas. La sinergia entre diferentes técnicas permite profundizar en el conocimiento sobre los fenómenos relacionados con plasticidad y proporciona información para desarrollar nuevos ensayos a nivel laboratorio y técnicas de monitoreo in situ a nivel industrial, mejorando la fiabilidad y precisión de las mediciones. Este artículo presentará una expansión de la capacidad del ensayo de tracción, que es una prueba convencional, mediante la combinación de las técnicas de Correlación Digital de Imágenes (CDI) y Emisión Acústica (EA). La capacidad de la combinación propuesta se ilustra en la caracterización del efecto Portevin-Le Chatelier (PLC), observado durante la deformación plástica de una aleación de aluminio AA3003. Se describe el conjunto experimental de las técnicas mencionadas y su combinación para describir la naturaleza del efecto PLC.

Abstract

A current trend in mechanical testing is to equip experiments with the necessary technology for material characterization at different scales. The synergy between various techniques allows for a deeper understanding of phenomena related to plasticity and provides essential information for designing new laboratory tests and in situ monitoring techniques at the industrial level, improving the reliability and accuracy of measurements. This article aims to enhance the capabilities of the tensile test, a conventional method, by combining Digital Image Correlation (DIC) and Acoustic Emission (AE) techniques. The potential of this combination is demonstrated through the characterization of the Portevin-Le Chatelier (PLC) effect, which occurs during the plastic deformation of an AA3003 aluminum alloy. The experimental setup for the techniques is described, as well as their combination to analyse the nature of the PLC effect.

Palabras clave:

Pruebas mecánicas, Plasticidad, Ensayo de Tracción, Correlación Digital de Imágenes, Emisión Acústica, Efecto PLC

Keywords:

Mechanical testing, Plasticity, Tensile Test, Digital Image Correlation, Acoustic Emission, PLC Effect

Introducción

En la actualidad, el ensayo de tracción sigue siendo la principal prueba mecánica para llevar a cabo la caracterización de un material metálico. Sin embargo, presenta algunas limitaciones, siendo una de las más importantes la caracterización de la deformación plástica de la probeta cuando se presenta deformación heterogénea. Esto se debe a que la formación del cuello limita la información obtenida para valores de deformación mayores a la deformación uniforme. Por ejemplo, en un ensayo de tracción realizado bajo la norma ASTM E8, la deformación uniforme de una probeta de aluminio AA3003 laminada en frío y recristalizada es de alrededor del 25 por ciento; mientras que, para un proceso de estampado profundo de lámina de aluminio para carrocerías de automóviles se alcanzan deformaciones de hasta el 50 por ciento [1]. Actualmente, para mejorar la caracteriza-

ción de un material se dispone un sistema experimental, en el cual se incorporan varias técnicas a los ensayos convencionales para obtener más información del comportamiento mecánico del mismo a diferentes escalas. Entre las más comunes llevadas a cabo a la par del ensayo de tracción están la termografía infrarroja (TIR), la correlación digital de imágenes (CDI) y la emisión acústica (EA) [2].

Las técnicas infrarrojas proporcionan información valiosa sobre la termodinámica del flujo plástico, flujo localizado y fractura. La CDI permite conocer los campos de deformación locales, siendo especialmente útil para el análisis de inestabilidades plásticas; por su parte, la EA ofrece valiosa información temporal de la dinámica de las dislocaciones y de la relajación de esfuerzos durante el ensayo de tracción [3].

La técnica CDI es una herramienta moderna para medir desplazamientos y deformaciones de manera local y sin contacto. Los avances actuales en la tecnología de cámaras digitales y procesamiento computacional de imágenes han permitido mediciones de las componentes del tensor de deformaciones a nivel de un subpíxel [4,5]. La técnica consiste en la captura de imágenes durante el ensayo, las cuales sirven de entrada para un software de procesamiento de imágenes encargado de comparar cada una de las imágenes y, mediante algoritmos de correlación, calcular los campos de desplazamiento y deformación [6,7]. La resolución temporal alcanzada en CDI es altamente variable y depende principalmente del equipo disponible. Es posible manejar resoluciones desde 1 fotograma por segundo (FPS, por sus siglas en inglés) para análisis de deformaciones lentas, hasta miles de FPS para análisis que requieren mayor detalle temporal como el estudio de fractura en materiales cerámicos [8].

La EA es una técnica basada en el fenómeno físico homónimo, la cual se encarga de transformar ondas elásticas, liberadas dentro del material, en una señal eléctrica decodificable. Las investigaciones sobre el flujo plástico mediante EA son extensas. Análisis como la tasa de conteo promedio o la amplitud acumulada proporcionan información sobre la dinámica de dislocaciones, etapas de endurecimiento por deformación y actividad de los sistemas de deslizamiento [9]. Las escalas temporales manejadas mediante esta técnica son muy finas, las frecuencias más comunes reportadas están en el rango ultrasónico de 20 kHz – 1.5 MHz [9], brindando acceso a los detalles finos de las propiedades dinámicas y estadísticas de los eventos plásticos elementales [3]. Algunos autores han aprovechado las bondades de la EA para el estudio del efecto PLC, los cuales han encontrado una relación clara entre la actividad de EA y las caídas del esfuerzo [9,10].

El efecto Portevin-Le Chatelier es una inestabilidad plástica, caracterizada por la presencia de una deformación intermitente en ciertos materiales sobre un rango de temperaturas y velocidades de deformación [11]. Este tipo de inestabilidad se presenta como oscilaciones repetitivas en la curva de tracción, conocido como flujo serrado (jerky flow, por su nombre en inglés) y, se asocia a bandas de deformación localizadas, pudiendo ser o no propagadas, las cuales han sido observadas en muchas soluciones sólidas, particularmente en aleaciones Al-Mg y Al-Mn [12].

Existen varios enfoques sobre el origen del efecto PLC; sin embargo, el origen más aceptado del efecto PLC es el envejecimiento dinámico por deformación (DSA, por sus siglas en inglés), considerando el fenómeno de naturaleza difusiva [9,11,13]. Este mecanismo se basa en la interacción entre dislocaciones en movimiento y átomos de soluto que difunden hacia ellas, formando concentraciones locales nubes de átomos, denominadas nubes de soluto, las cuales generan un anclaje temporal en las dislocaciones [14]. El envejecimiento quasi-estático se da durante este tiempo de espera.

Cuando el esfuerzo alcanzado es suficiente para romper el anclaje, las dislocaciones se liberan de manera brusca, causando una deformación repentina e irregular.

En general, existen tres tipos principales de inestabilidades PLC, los cuales, se clasifican en Tipo A, Tipo B y Tipo C, dependiendo de la forma de flujo que se presenta en la curva esfuerzo-deformación y la dinámica de las bandas de deformación. El tipo A está asociado con picos grandes periódicos, con bandas de deformación propagantes de un extremo al otro de la probeta. El tipo B se asocia con picos pequeños y frecuentes, relacionados con bandas de propagación que cambian de posición a lo largo de la dirección axial de la probeta. Por último, el tipo C está asociado a picos abruptos y aleatorios, relacionados con bandas de deformación no propagantes [9]. Se ha considerado la degradación de algunas propiedades como la tenacidad y la ductilidad debida al efecto PLC [11]. Esto toma especial importancia en procesos de conformado de lámina, donde se involucran múltiples pasos y procesos de deformación severa, susceptibles a la aparición de grietas debido al efecto. Una caracterización precisa del efecto PLC permitiría eliminar estos defectos para la fabricación.

El presente trabajo propone implementar un sistema experimental, en el cual se lleven a cabo el ensayo de tracción y las técnicas de CDI y EA simultáneamente. Para poner a prueba el esquema experimental, se estudia el efecto PLC en la aleación comercial de aluminio AA3003, misma que presenta el efecto PLC marcado para una velocidad de desplazamiento de 5 mm/min. Se busca encontrar una relación entre las mediciones de cada una de las técnicas, a diferentes escalas de longitud y tiempos.

Desarrollo experimental y material

Material

El material seleccionado fue la aleación de aluminio AA3003 comercial en forma de lámina, con un espesor de 2.66 mm (calibre 12). Dicho material fue seleccionado debido al fuerte efecto PLC que se presenta en la deformación. De acuerdo con el proveedor, la composición química de la lámina se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1 – Composición química de la aleación AA3003 utilizada, proporcionada por el proveedor (el contenido de aluminio corresponde al remanente).

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Otro
% peso	0.6	0.7	0.05-0.2	1-1.5	0.1	0.15

Se cortaron muestras rectangulares (15 × 30 cm) de la placa inicial, las cuales se sometieron a un proceso de laminado en múltiples pasos. Cada paso del laminado consistió en una reducción del 10% del espesor, alcanzando un espesor final de 0.9 mm, para una reducción total del 78%. Posteriormente, se maquinaron probetas de tracción estándar, respetando las medidas establecidas por la norma ASTM E8.

De acuerdo con las investigaciones y ensayos previos, se tomó la decisión de llevar a cabo el recocido a 600 °C durante 30 minutos, sabiendo que estas condiciones inducen un fuerte efecto PLC. Lo anterior se debe a la interacción entre el proceso de recrystalización y los precipitados metaestables de Al6Mn y Al12Mn [15]. La microestructura del material se muestra en la Figura 1, en la que se observa una estructura recrystalizada con crecimiento de grano fuerte.

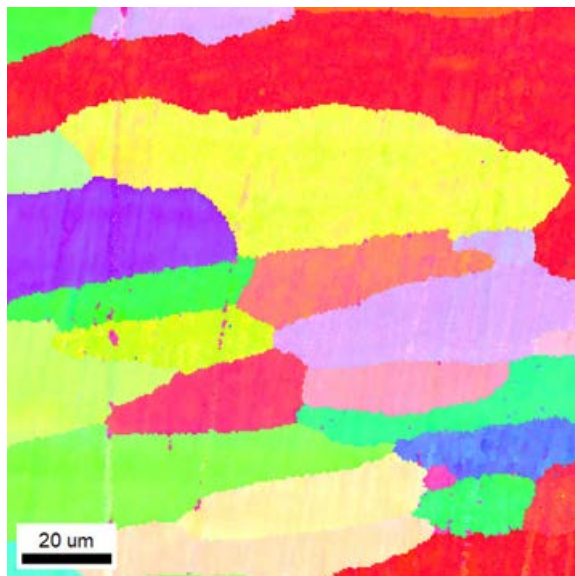


Figura 1. Microestructura del material ensayado, mostrando el plano formado por la dirección de laminado (horizontal) y la dirección normal.

Ensayo de Tracción

Se realizaron tres ensayos de tracción a una velocidad de desplazamiento de 5 mm/min. La máquina utilizada fue una máquina de ensayos universal SHIMADZU, con una celda de carga de 100 kN y una tasa de muestreo de 100 muestras/s. El dibujo de la muestra se presenta en la Figura 2, junto con una probeta antes y después del ensayo. Las dimensiones se dan en la Tabla 2.

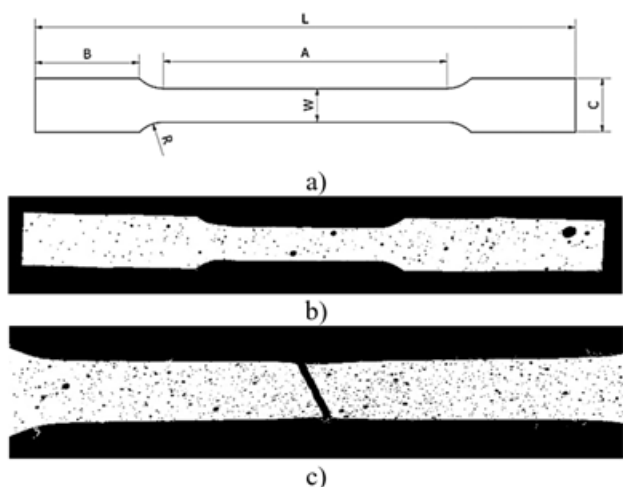


Figura 2. Probetas de tracción: a) diagrama esquemático, b) probeta con patrón de pintura antes del ensayo, y c) probeta fracturada tras la prueba.

Tabla 2. Dimensiones de una probeta de tracción plana de acuerdo con la norma ASTM E8.

	L	A	W	R	C
Dimensión (mm)	200	60	12.5	12.5	20

Correlación Digital de Imágenes

Dado que la técnica CDI se basa en el reconocimiento y comparación de patrones, es fundamental aplicar un patrón adecuado a la probeta a ensayar. El patrón debe ser aleatorio, independientemente de la escala de medición [6]. En el caso de las probetas de tracción estándar, donde el campo de visión es relativamente grande (superior a 2 cm), el patrón se aplicó manualmente utilizando pintura en aerosol blanca y negra (mate).

Para tener una iluminación adecuada, se utilizaron dos lámparas LED de 2500 lúmenes, las cuales emiten luz continua. Se grabó el ensayo de tracción con una cámara mirrorless Canon EOS R8, a una resolución 4K (3840 × 2160 píxeles) y una velocidad de captura de 30 fotogramas por segundo. Posterior a ello, mediante un editor de video externo, se transformó el vídeo a imágenes, de las cuales se extrajeron 3 fotogramas por segundo. Es decir, por cada 10 segundos de grabación se obtuvieron 30 imágenes. Con dichas imágenes filtradas se llevó a cabo el análisis CDI mediante Ncorr, un programa de MATLAB de uso libre [6].

Emisión Acústica

Un canal básico de EA se compone de: sensor(es), preamplificador(es), filtros e instrumento de adquisición de datos. Partiendo de lo anterior, los instrumentos utilizados en el presente trabajo fueron:

- Sensor piezoeléctrico de la marca Kistler, con un rango de frecuencia de 100 kHz – 900 kHz.
- Acoplador IEPE de la marca Kistler, con una ganancia seleccionable entre 1, 10, 100 y 1000. El acoplador cuenta con dos filtros, de alto y bajo paso de 50 kHz y 1000 kHz respectivamente.
- Osciloscopio USB digital, PicoScope 5444D, de cuatro canales de entrada, con una tasa de muestreo máxima de 50 GS/s y una resolución máxima de 16 bits.

Se utilizó gel de ultrasonido (marca Lubri-6) como agente de acoplamiento entre el sensor y la probeta de tracción. El sensor se fijó en la parte alta de la probeta, procurando tener libre la región de interés de esta para llevar a cabo el análisis CDI sin problema.

Los parámetros seleccionados para llevar a cabo las mediciones acústicas fueron:

- Tasa de muestreo: 4 MS/s.

- Resolución: 16 bits.
- Ganancia: 100.
- Amplitud del canal: 200 mV.
- Tiempo de medición por señal: 10 s.

Se procuró, en la medida de lo posible, iniciar la grabación del video y las mediciones acústicas a la par o un segundo antes del inicio del ensayo de tracción, para evitar la pérdida de datos en alguna de las mediciones. En el posprocesamiento es posible identificar el inicio y fin del ensayo de tracción. En la Figura 3 se muestra el sistema experimental implementado en el presente trabajo.

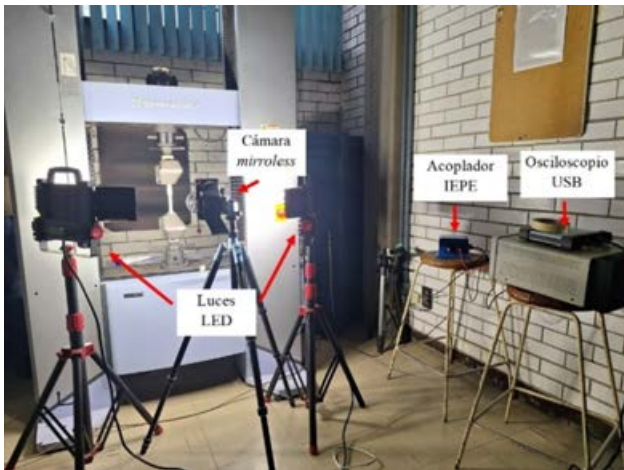


Figura 3. Sistema experimental. Se muestra la cadena de EA y la configuración de las luces y la cámara para el análisis de CDI.

Resultados

Análisis del efecto PLC

En la figura 4, se muestran las tres curvas de tracción $s-e$ y $\sigma-\epsilon$ de las probetas ensayadas. Se observa de manera clara que el efecto PLC está presente para este valor de velocidad de deformación. El efecto desaparece para un valor de $\epsilon = 0.17$, aproximadamente.

Se aplicó un filtro de eliminación de tendencias para eliminar el efecto de endurecimiento por trabajo en frío sobre las fluctuaciones ocasionadas por el efecto PLC. De la señal filtrada, se extrajeron los primeros 120 segundos y se graficó el espectro de potencias de dicha señal, que se muestra en la Figura 5. Este espectro contiene información relativa a la variación de la intensidad de la señal en el dominio de la frecuencia, lo que permite observar cuáles son los rangos de frecuencia predominantes de la señal de las tres curvas.

Una representación más detallada se muestra en la Figura 6, correspondiente a un espectrograma. Los espectros de potencia fueron calculados a partir de series de tiempo de 2048 puntos, extraídos en intervalos de 64 puntos y suavizados

mediante un filtro gaussiano con una desviación estándar de 0.16 s.

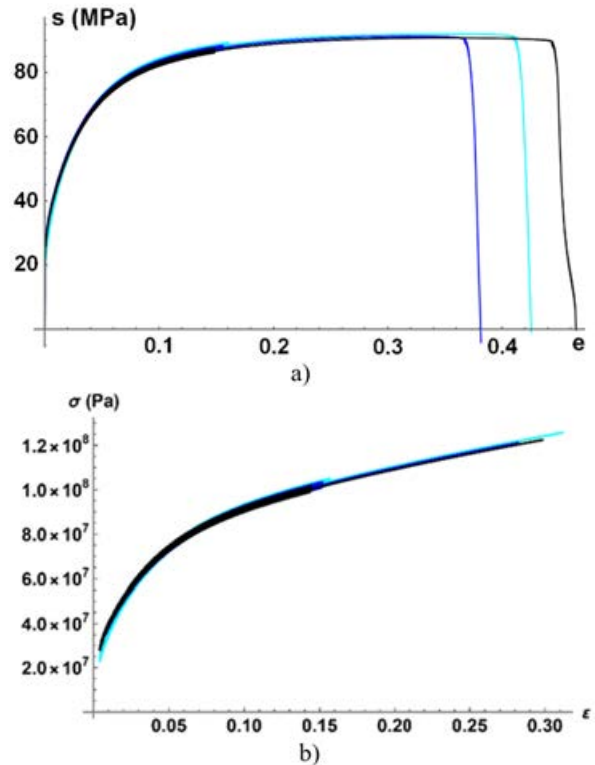


Figura 4. Curvas de tracción: a) $s-e$ y b) $\sigma-\epsilon$

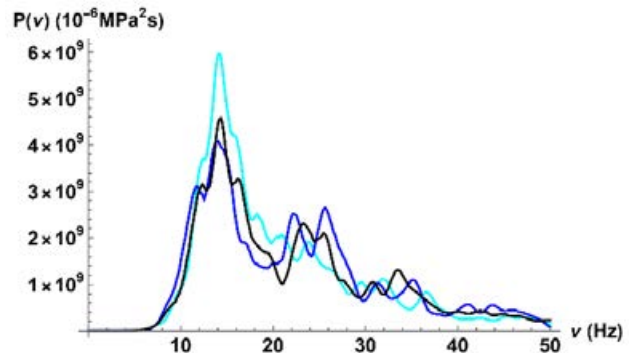


Figura 5. Espectro de potencias de la señal para los primeros 120 segundos del ensayo de tracción.

Con dicha metodología se obtuvo una gráfica de crestas (ridge plot), la cual resalta la evolución temporal y frecuencial de los máximos locales. Se observa que la intensidad de los picos principales varía de forma estocástica, con una tendencia descendente a medida que crece la deformación. A frecuencias bajas no se registra señal, debido a la eliminación de tendencias. En tiempos prolongados, el efecto PLC se extingue y tampoco se detecta alguna otra actividad significativa.

Un análisis complementario a la representación de la señal en el dominio de la frecuencia es el estudio de la densidad

de probabilidades en el espacio temporal $t-\Delta\sigma$. La Figura 7a muestra las amplitudes de los incrementos (signo positivo) y caídas (signo negativo) del esfuerzo, en forma de distribuciones empíricas de probabilidad (EDF) correspondientes a tres ensayos. Se observa que no hay distinción visual entre las distribuciones y la distribución normal teórica, y que las tres curvas experimentales están prácticamente superpuestas, indicando una alta consistencia entre ensayos y comportamiento gaussiano de los incrementos.

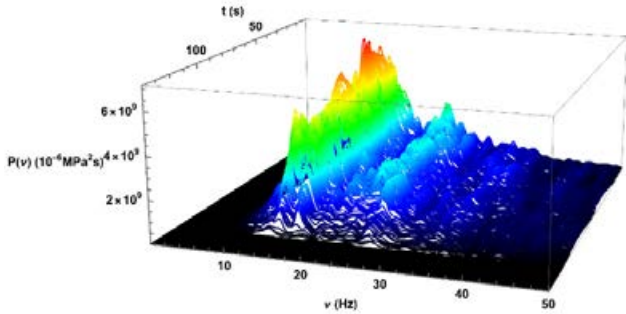


Figura 6. Gráfica de crestas de los espectros de potencia.

Un enfoque adicional consiste en analizar la evolución de la desviación estándar de la señal, calculada sobre ventanas móviles de 2048 puntos, avanzando punto por punto sobre la serie temporal, sin alcanzar el régimen donde desaparece el efecto PLC (Figura 7b). El resultado revela una señal altamente irregular, con características compatibles con un comportamiento multifractal. No obstante, el análisis detallado de este comportamiento excede el alcance de este trabajo y se sugiere como trabajo a futuro.

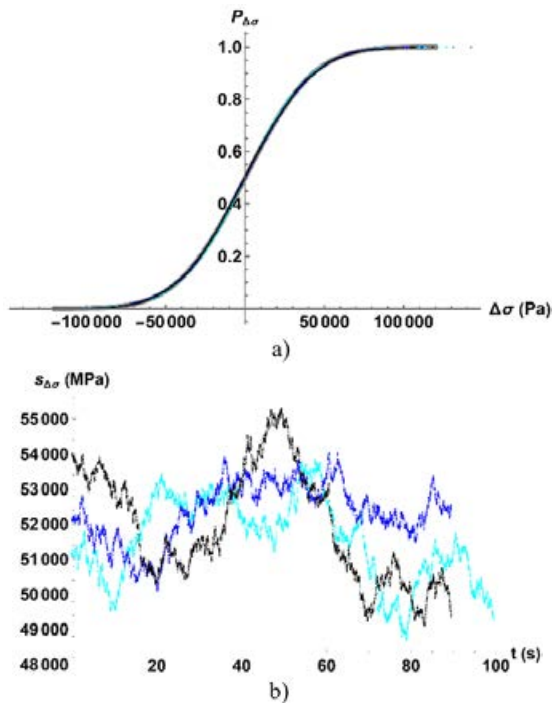


Figura 7. a) EDFs de los incrementos y caídas de la curva de tracción y curva gaussiana (Gris). Las tres curvas experimentales coinciden con la gaussiana ideal y, b) variación de la desviación estándar calculada sobre 2048 puntos a lo largo del ensayo.

Análisis CDI

Para mostrar los resultados del análisis CDI se utiliza el ensayo representado por la curva negra representada en la Figura 2. De dicha curva, se seleccionó una sección, justo en la que se extingue el efecto PLC (Figura 8). Dicha transición se da para un valor de $\epsilon = 0.144$; después la deformación vuelve a ser homogénea.

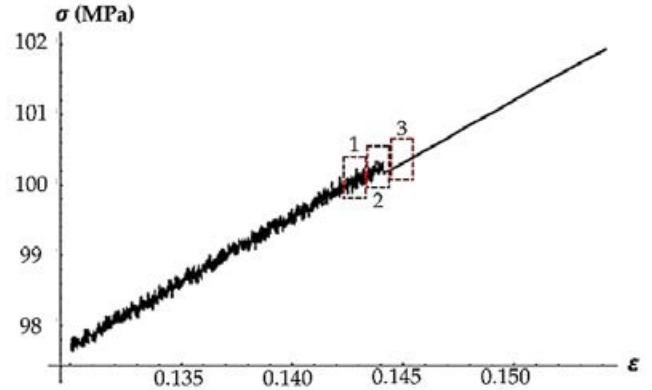


Figura 8. Acercamiento a la sección de la curva de tracción analizada.

Primero, se analiza el inicio de la deformación para evaluar las nucleaciones de las bandas de deformación a lo largo de la probeta. En la Figura 9 se muestran los mapas de deformación correspondientes a cuatro fotogramas durante el régimen del efecto PLC, en las cuales se muestran dos bandas de deformación (cerca de cada una de las mordazas de la máquina), y una zona de flujo localizado, en el centro de la probeta, formado desde el inicio de la deformación. Las bandas de deformación de los extremos de la probeta tienen su punto de nucleación en los extremos de esta y, se van propagando de manera discontinua a corta distancia.

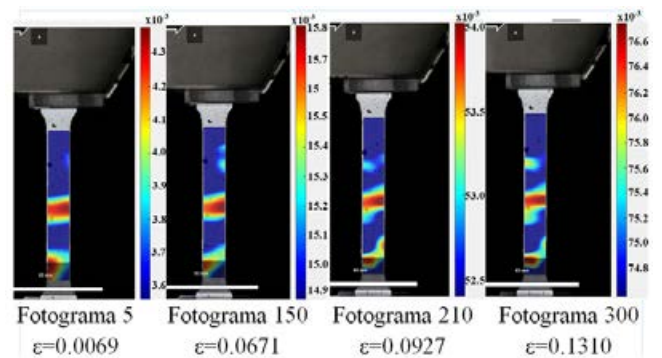


Figura 9. Mapas de deformación de la componente E_{yy} de la muestra ensayada durante el efecto PLC.

Basándonos en la definición de Lebyodkin [9], el tipo de PLC presente tiene las características de tipo A y B, principalmente por las nucleaciones en los extremos de la probeta típicas de ambos tipos. Si bien las nucleaciones en el extremo de la probeta son características del Tipo A, estas se extinguen y vuelven a nucleares en el extremo opuesto. Otro aspecto que comparten las bandas presentadas con las de Tipo B es la propagación de manera discontinua.

En la Figura 10 se muestran los mapas de deformación correspondientes a la sección 3 de la curva presentada en la Figura 8, régimen donde no está presente el efecto PLC. En esta, se muestra que las bandas de deformación no se propagaron completamente a lo largo del ancho de la probeta, por lo que puede considerarse como una propagación a corta distancia. Debido a esto se concluye que la probeta presenta un efecto PLC de tipo B; sin embargo, este no se descarta la presencia de dos tipos de fluctuaciones PLC en la curva de tracción. La identificación de la presencia de dos tipos de efectos presentes en la deformación excede los alcances del presente proyecto.

Por último, es tentador pensar que la banda central se trata de una banda de deformación; sin embargo, carece de las características típicas de las mismas. No se presenta nucleación, propagación ni desplazamiento alguno, únicamente un leve cambio de dirección. Este tipo de flujo localizado se observa en todos los ensayos de tracción y se predice en modelos de elemento finito [16], pero por muchas décadas ha sido despreciado en este ensayo tan importante.

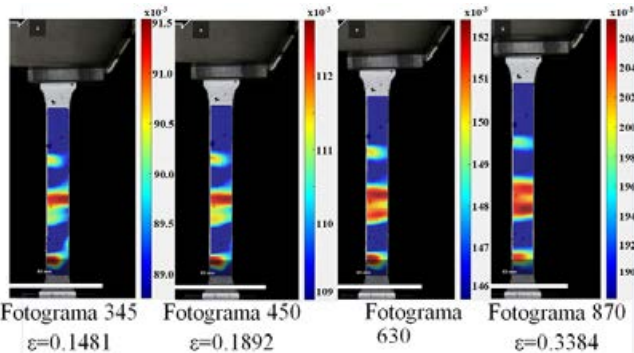


Figura 10. Mapas de deformación de la componente E_{yy} de la muestra ensayada posterior al efecto PLC.

Análisis EA

Para la presentación de los resultados y el análisis de señales se utiliza solo un experimento representativo, que tiene la particularidad que se detuvo, a nivel de deformación constante, de manera intermitente. Este ensayo se muestra en la Figura 11a, donde se muestra la caída del esfuerzo a deformación constante, así como el fenómeno relacionado con detalle. Es relevante señalar que, durante la relajación, también se manifiesta el efecto PLC, como se aprecia en la Figura 11b.

Con el fin de analizar la señal de EA, se seleccionó una medición de 10 segundos correspondiente a la etapa de deformación y a la relajación (Figura 11b). Las señales fueron filtradas mediante un filtro de alto y bajo paso para eliminar ruido eléctrico de baja frecuencia. En la Figura 12a se muestra el espectro de potencia de las series de tiempo filtradas, donde se destacan picos significativos en el rango de frecuencias de 500 a 1500 kHz para ambos estados. Para una identificación más clara, se utilizó un método de detección de picos, mostrado en la Figura 12b.

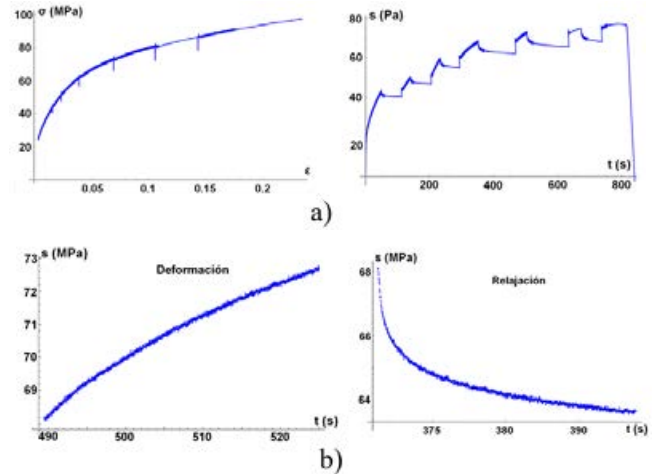


Figura 11. a) Curva σ - ϵ y s - t y, b) Detalle de la sección a analizar en deformación y relajación.

Los espectros correspondientes a ambas etapas son virtualmente indistinguibles, con excepción del desdoblamiento observable de los dos picos principales (540 y 635 kHz), así como pequeñas pero significativas variaciones, entre los picos menores.

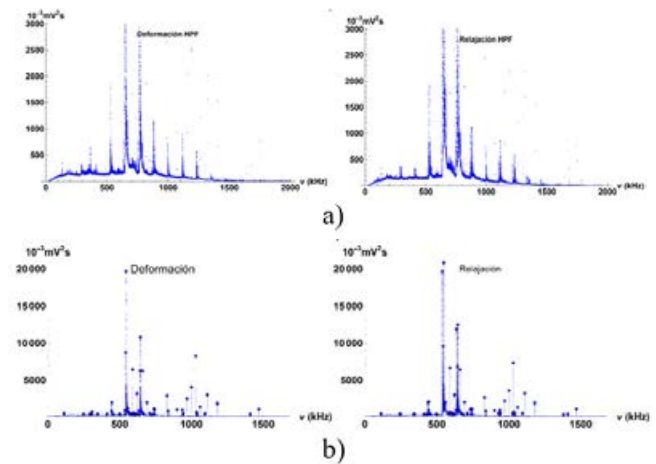


Figura 12. a) Espectro de potencia para la señal filtrada de la deformación y relajación y, b) Superposición de la posición y la altura de los picos del espectro de potencia.

Por otro lado, en la Figura 13 se muestra un espectrograma obtenido mediante la transformada de Fourier de corta duración (STFT, por sus siglas en inglés) aplicada sobre intervalos tiempo definidos por 210 (1024) puntos de muestreo. Esta herramienta permite visualizar la localización temporal de los eventos de la señal. En la banda superior de los espectrogramas se observa la componente del ruido de la señal, mientras que las señales pseudoperiódicas, observadas para mayores frecuencias, indican los picos en la figura anterior. El desdoblamiento de los picos en el espectro de relajación se observa con claridad. La característica más importante de los anteriores es la relativa homogeneidad del espectrograma, lo que indica una señal carente de comportamientos extremos y con un comportamiento altamente regular.

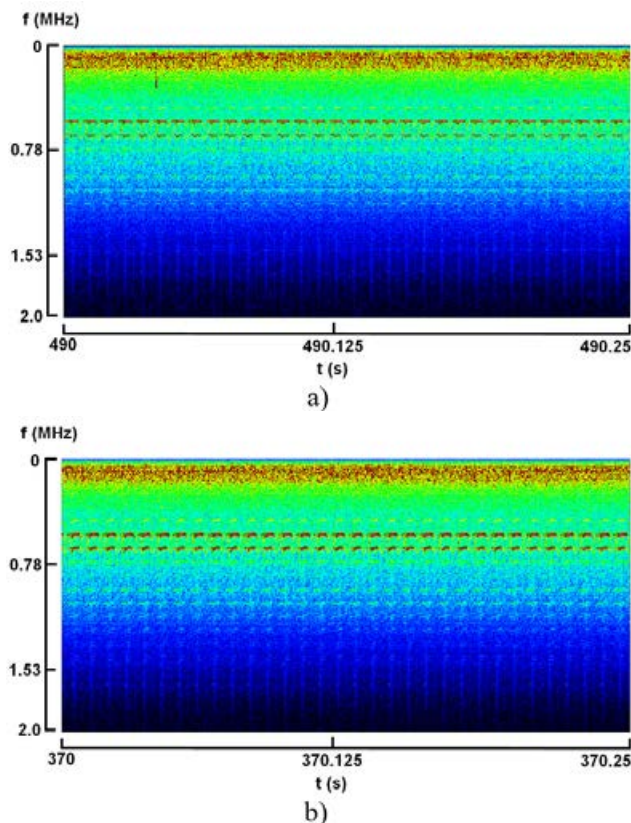


Figura 13. Espectrogramas para a) deformación y b) la relajación.

Por último, en la Figura 14 se muestra la gráfica de crestas de los espectrogramas. Esta representación amplifica los detalles en las frecuencias más prominentes de la señal. El análisis de crestas muestra dos aspectos importantes: primero, hay una variabilidad considerable de la altura de las crestas a lo largo del tiempo y, segundo, la falta de coincidencia temporal entre los máximos y mínimos en distintas bandas de frecuencia.

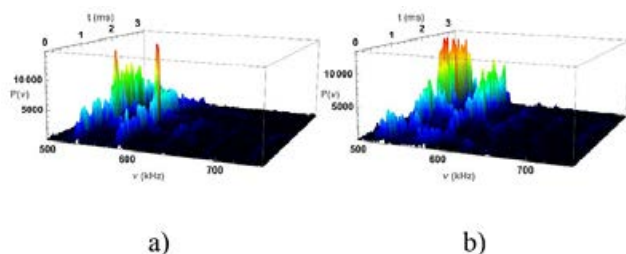


Figura 14. Gráfica de crestas para a) la deformación y b) la relajación.

Discusión y Conclusiones

El presente estudio demuestra la eficacia del sistema experimental planteado, basado en el ensayo de tracción y complementado con las técnicas de Correlación Digital de Imágenes y Emisión Acústica para la caracterización, a distintas escalas temporales, del efecto PLC presente en la aleación de aluminio AA3003. La implementación de estas técnicas ha permitido una observación detallada del fenómeno PLC a nivel espacial, temporal y frecuencial, proporcionando un

mejor entendimiento de la dinámica de la deformación plástica localizada.

La técnica EA aportó información sobre la dinámica de las dislocaciones, evidenciada por el análisis espectral y estadístico de las señales acústicas. Por su parte, el CDI permitió el análisis de las deformaciones locales a nivel de nucleación de bandas y propagación de bandas de deformación, resultando en la caracterización del tipo de PLC presente en la curva esfuerzo – deformación.

La versatilidad del esquema planteado permite la aplicabilidad a otro tipo de ensayos o estudiar otros fenómenos físicos relacionados con la mecánica de la plasticidad y la fractura a distintas escalas temporales. Además, es bastante compatible con otras técnicas de caracterización como las técnicas infrarrojas, las cuales abren nuevas líneas de investigación futura. Por su parte, la aleación AA3003 mostró ser un material idóneo para demostrar el potencial del sistema experimental, ya que la presencia del efecto PLC permitió estudiar el mismo fenómeno desde distintos enfoques y escalas de tiempo.

El problema principal es la correlación de cada una de las mediciones obtenidas: la CDI se analiza a frecuencias de 0.5Hz, PLC en el rango de 1-100 Hz y la AE entre 500 y 1000 kHz, la heterogeneidad en la primera medición siendo el resultado colectivo de lo observado en la última. La elaboración de un formalismo que conecta los tres niveles es un reto fundamental en la ciencia de los materiales.

Este trabajo sienta un precedente metodológico para la caracterización avanzada de materiales y se demuestra que la sinergia entre las distintas técnicas modernas y ensayos convencionales es viable y altamente productiva en términos de investigación. La investigación futura está centrada en la integración de técnicas infrarrojas, así como el desarrollo de modelos que integren las respuestas multiescala y multisensor, con el objetivo de la correlación de las mediciones de Emisión Acústica con las mediciones de Correlación Digital de Imágenes para la caracterización de materiales.

Agradecimientos

AIMF y JLFA agradecen al CONAHCyT para su beca de maestría y doctorado respectivamente. Este trabajo fue financiado a través del programa PAPIIT bajo en proyecto IN113123.

Referencias

- [1] M. A. Ramírez et al., "Experimental validation and effect of modelling assumptions in the hierarchical multi-scale simulation of the cup drawing of AA6016 sheets," *Model Simul Mat Sci Eng*, vol. 25, no. 1, p. 015002, Jan. 2017, doi: 10.1088/0965-0393/25/1/015002.

- [2] D. R. Pichardo, M. Á. Ramírez, L. A. I. Kestens, A. Van Bael, and R. Schouwenaars, “Comparison of Laser Coordinate Measurements and Hierarchical Multiscale Finite Element Models for the Cup Drawing of Three Commercial Aluminum Alloys,” 2024, pp. 337–346. doi: 10.1007/978-3-031-58006-2_26.
- [3] A. Sendrowicz, A. O. Myhre, S. W. Wierdak, and A. Vinogradov, “Challenges and Accomplishments in Mechanical Testing Instrumented by In Situ Techniques: Infrared Thermography, Digital Image Correlation, and Acoustic Emission,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 15, p. 6718, Jul. 2021, doi: 10.3390/app11156718.
- [4] H. Schreier, J.-J. Orteu, and M. A. Sutton, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. Boston, MA: Springer US, 2009. doi: 10.1007/978-0-387-78747-3.
- [5] H. Lu and P. D. Cary, “Deformation measurements by digital image correlation: Implementation of a second-order displacement gradient,” *Exp Mech*, vol. 40, no. 4, pp. 393–400, Dec. 2000, doi: 10.1007/BF02326485.
- [6] J. Blaber, B. Adair, and A. Antoniou, “Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software,” *Exp Mech*, vol. 55, no. 6, pp. 1105–1122, Jul. 2015, doi: 10.1007/s11340-015-0009-1.
- [7] W. H. Peters and W. F. Ranson, “Digital Imaging Techniques In Experimental Stress Analysis,” *Optical Engineering*, vol. 21, no. 3, Jun. 1982, doi: 10.1117/12.7972925.
- [8] W. Nawaz, S. Xu, Y. Li, B. Huang, X. Wu, and Z. Wu, “Nanotechnology and immunoengineering: How nanotechnology can boost CAR-T therapy,” *Acta Biomater*, vol. 109, pp. 21–36, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.actbio.2020.04.015.
- [9] M. A. Lebyodkin and T. A. Lebedkina, “The Portevin-Le Chatelier Effect and Beyond,” 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2104.07018>
- [10] F. Chmelík, A. Ziegenbein, H. Neuhäuser, and P. Lukáč, “Investigating the Portevin–Le Châtelier effect by the acoustic emission and laser extensometry techniques,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 324, no. 1–2, pp. 200–207, Feb. 2002, doi: 10.1016/S0921-5093(01)01312-0.
- [11] B. S. Rowlands, C. Rae, and E. Galindo-Nava, “The Portevin-Le Chatelier effect in nickel-base superalloys: Origins, consequences and comparison to strain ageing in other alloy systems,” *Prog Mater Sci*, vol. 132, p. 101038, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.pmatsci.2022.101038.
- [12] A. Portevin and F. Le Chatelier, “Sur un phénomène observé lors de l’essai de traction d’alliages en cours de transformation,” *Compt. Rend. Acad. Sci. Paris*, vol. 176, pp. 507–510, 1923.
- [13] S. C. Ren, T. F. Morgeneyer, M. Mazière, S. Forest, and G. Rousselier, “Effect of Lüders and Portevin–Le Chatelier localization bands on plasticity and fracture of notched steel specimens studied by DIC and FE simulations,” *Int J Plast*, vol. 136, p. 102880, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ijplas.2020.102880.
- [14] A. H. Cottrell and B. A. Bilby, “Dislocation Theory of Yielding and Strain Ageing of Iron,” *Proceedings of the Physical Society. Section A*, vol. 62, no. 1, pp. 49–62, Jan. 1949, doi: 10.1088/0370-1298/62/1/308.
- [15] F. J. Humphreys and M. Hatherly, *Recrystallization and related annealing phenomena*. Elsevier, 2004.
- [16] M. Á. Ramírez Toledo, “Validación de un código de elemento finito para plasticidad anisotrópica mediante ensayos en productos laminados,” Tesis Doctoral en Ciencia e Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 2016. Accessed: Jul. 09, 2025. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000753233>