

# Ensayo de deformación cortante en muestras con geometría compleja

## Shear testing of complex geometry specimens

Jorge Luis Flores Alarcón<sup>a</sup>, Miguel Ángel Ramírez<sup>b</sup>, Rafael Schouwenaars<sup>c,d</sup>, Leopoldo Ruiz-Huerta<sup>a</sup>, Ignacio Alejandro Figueroa<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, Ciudad de México 04510, Mexico.

<sup>b</sup> Centro Tecnológico Aragón, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Rancho Seco s/n, Col. Impulsora, Cd. Nezahualcóyotl, 57130, Estado de México, México.

<sup>c</sup> Departamento de Materiales y Manufactura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad 3000, Coyoacán, 04510, Ciudad de México,

<sup>d</sup> Ghent University, Materials Science and Technology, Department of Electromechanical, Systems and Metals Engineering, Technologiepark 46, 9052, Ghent, Belgium.

<sup>e</sup> Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, Mexico City, 04510,

\*jordo\_flores@hotmail.com

### Resumen

Se realiza el estudio de un ensayo de cortante puro mediante una probeta de geometría innovadora en lámina AA6016, alternativa comercial al acero en la industria automotriz. El análisis de deformación plástica anisotrópica se realiza mediante dos técnicas: la simulación calcula la evolución de textura tomando en cuenta la interacción del material en la deformación de los granos, para su actualización en la deformación de la lámina, mientras que la experimentación se interpreta mediante la técnica de correlación digital de imágenes, que efectúa un seguimiento al experimento mediante imágenes, y que obtiene el campo de desplazamientos y deformaciones en el ensayo. Los resultados explican que el modelo reproduce el ensayo de una manera ideal, lo que provoca diferencias respecto al ensayo, debido a que el estado de cortante puro se logra sólo en los desplazamientos iniciales. Los resultados de la textura medida confirman componentes cortantes en la región cortante.

### Abstract

This work studies a pure shear test using an innovative probe geometry in AA6016 sheet, which is a commercial alternative to steel in the automotive industry. The analysis of anisotropic plastic deformation is performed by two contrasting techniques: the simulation uses a software that follows the texture evolution during the simulation, and takes into account the material interaction during the deformation of neighboring grains, to update the deformation texture, while the experiments are analyzed by digital image correlation, which uses a series of video stills of the sample during deformation and calculates the displacement fields and deformations. The results show that the simulation reproduces the test considering ideal conditions of pure shear, which contrasts with the experiment, where pure shear only occurs for the initial displacements. Texture measurements obtained confirm shear components in the shear region.

### Palabras clave:

Cortante puro, correlación digital de imágenes, Anisotropía, textura, AA6016

### Keywords:

Pure shear, Digital Image Correlation, Anisotropy, Texture, AA6016T4

### Introducción

La industria automotriz ha adquirido cada vez más importancia en México. Se producen 4.2 millones de vehículos por año y se prevén inversiones masivas en el ámbito de vehículos eléctricos. En 2023, se recibieron 106 billones de dólares en inversión extranjera para el sector automotriz [1].

Los procesos productivos en las plantas automotrices en México inician con el estampado, donde se fabrican piezas que conforman el chasis y la carrocería. Después, se realiza el ensamble, seguido del área de pintura y finalmente el montaje, donde el monocasco se une con las demás partes que componen un automóvil.

El estampado es un proceso clave en la industria automotriz. En él, se deforma una lámina que descansa sobre una matriz mediante la presión de un dado, con el objetivo de generar una forma específica en la lámina. Si la profundidad del estampado excede el diámetro del mismo, se le conoce como estampado profundo.

La elaboración de productos por conformado de lámina ha permitido la automatización de la producción de diversos artículos. El proceso de estampado se utiliza en diversos artículos fuera de la industria automotriz, como en la fabricación de latas, envases, muebles metálicos, utensilios de cocina y partes de aviones. Considerando la amplia producción de vehículos automotrices, el proceso de estampado de láminas para carrocerías requiere de altos niveles de producción, por lo que es deseable una mejora continua de calidad en los productos terminados, así como reducción en los tiempos de producción [2].

El modelado mediante el método de elementos finitos (FEM) es una herramienta numérica capaz de analizar procesos como el estampado para predecir el comportamiento del material, reduciendo drásticamente el ensayo y error del diseño de piezas estampadas. Un proceso muy común en el estampado de láminas consiste en simular el diseño inicial del herramental, retroalimentar con información experimen-

tal y mejorar el diseño con dicha información. Este ciclo se repite varias veces hasta que el producto funcione adecuadamente en las líneas de producción. Un buen modelo es aquel que permite reducir estas iteraciones.

Es usual que los materiales utilizados en la industria hayan sido sujetos previamente a un proceso de conformado mecánico, lo que provoca que adquieran una orientación cristalina preferencial, y que sean distintas las propiedades mecánicas del material dependiendo de la dirección en que sea examinado. A esto se le llama anisotropía.

En cambio, un modelo isotópico no considera orientación preferencial alguna, y las propiedades en cualquier dirección son las mismas. La mayoría de los trabajos relativos al modelado de los procesos de conformado se basan en plasticidad isotrópica, lo que produce errores en productos laminados donde la anisotropía es clave para determinar la geometría final de la pieza y su factibilidad. El criterio de fluencia de von Mises es un ejemplo de función que predice el comienzo de la deformación plástica de forma isotrópica.

El primer acercamiento para analizar el efecto de la anisotropía plástica se atribuye a Hill [3]. Más adelante, se realizó un software que permite la combinación de texturas cristalográficas, plasticidad cristalina y lugar geométrico de la fluencia en el software comercial de elementos finitos Abaqus. El software Hierarchical Multi-Scale (HMS) [4] es un modelo computacional desarrollado en KU Leuven, para simular deformación de aleaciones metálicas policristalinas. Permite predecir la evolución de la textura y de la anisotropía plástica asociada con la textura.

La mayoría de los estudios experimentales en estampado profundo se han realizado para el ensayo de Fukui [5,6]. Este consiste en un punzón que presiona la lámina y cuya forma de copa queda en la lámina, un pisador que evita que los extremos se levanten al presiona la lámina, y un dado que sirve como base a la lámina. Este modelo es útil para medir el grado de anisotropía del material mediante el parámetro de Lankford [5,7] y, visualmente, mediante la formación de orejas en la pieza estampada.

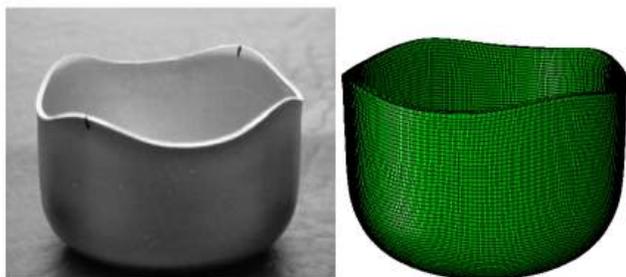


Figura 1 – Copas en experimentación y simulación.

Ramírez et al. [8] modelaron copas de ensayo de Fukui en la aleación AA6016 mediante HMS con distintos grosores de lámina. Pichardo et al. [9] expandieron el trabajo utilizando

tres distintas láminas de aleaciones de aluminio (AA1100, AA3103 y AA5005) con distintas texturas entre sí.

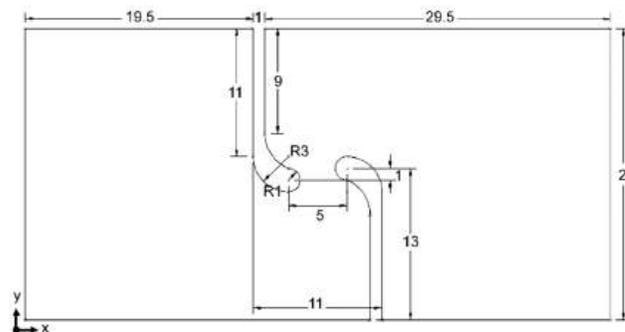


Figura 2 – Probeta para ensayo de cortante puro con sus respectivas dimensiones en milímetros.

Para estudiar directamente la deformación cortante que ocurre en el ensayo de Fukui, se utiliza una probeta para ensayo de cortante puro propuesta por Peirs y Verleysen [10], que se muestra en la figura 2.

El presente estudio se centra en el ensayo de cortante puro. Se combinan modelos de plasticidad cristalina con simulaciones por elementos finitos que caracterizan la respuesta de una probeta sometida a ensayo cortante. Esta predicción se compara con los resultados experimentales de deformación cortante.

El campo de deformaciones en la región de estudio de los ensayos experimentales se analiza mediante la técnica de correlación digital de imágenes (DIC) [11]. Esta técnica realiza un análisis cuadro por cuadro, calculando desplazamientos y deformaciones de la región de estudio.

Los resultados se complementan con la medición de la textura en probetas con deformación parcial para observar el cambio de textura provocado por la deformación cortante.

## Metodología

Se analizan probetas de aleación AA6016, utilizando dos distintos espesores comúnmente utilizados en la industria automotriz (1.1 mm y 2 mm). Las láminas de aluminio contienen magnesio y silicio como principales agregados. El material fue sometido a laminado y después a un tratamiento térmico de solución y temple con un envejecido natural. Los detalles de estos tratamientos son secreto industrial. Se realizaron tres variaciones de cada espesor, modificando el ángulo de laminado a 0, 45 y 90 grados respecto a RD (rolling direction, dirección de laminado).

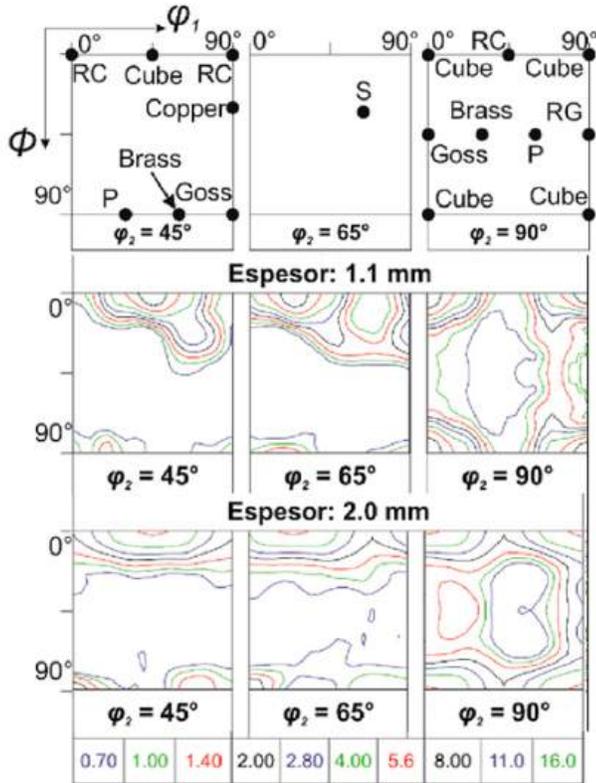
### Modelo de elemento finito

Las propiedades mecánicas generales del material AA 6016 se muestran en la Tabla 1:

**Tabla 1** – Propiedades del material AA6016

Aleación AA 6016	
Densidad, g/mm <sup>3</sup>	2700
Módulo de Young, GPa	70
Coefficiente de Poisson	0.33

El modelo multiescala utiliza información de la textura cristalina del material. En la figura 3 se observan las secciones más representativas de la ODF en aleaciones de aluminio.

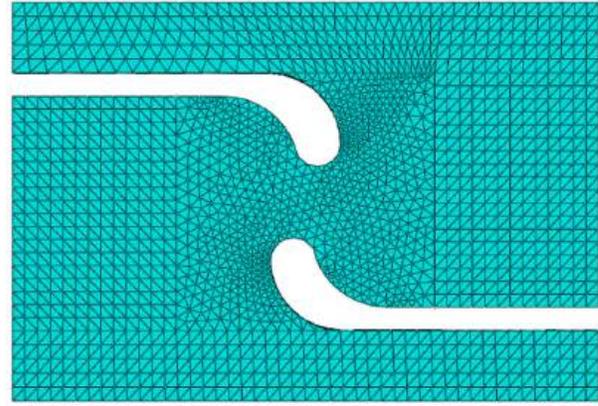


**Figura 3** – Secciones ODF de la textura de la aleación 6016 en espesores de 1.1 y 2 mm. Se muestran las secciones de 0 a 90° y  $\phi_2$  en 45°, 65° y 90° [11].

El modelo de elementos finitos se realizó en Abaqus. Se eliminaron zonas que en el ensayo están dentro de la mordaza de la máquina, al no existir deformación en esa región. Las condiciones del ensayo se agregan mediante condiciones de frontera: se fija el lado inferior de la probeta, donde se encontraría la mordaza fija y se aplica velocidad constante del otro lado de la probeta, donde se encontraría la mordaza móvil. Se utilizaron elementos tetragonales para el mallado del modelo. La malla se hizo más fina en el centro de la probeta.

### Procedimiento experimental

Las probetas se fabricaron mediante CNC. Las ranuras laterales son de 1 mm de ancho. Se trabajó con una velocidad de corte lenta y petróleo como lubricante.



**Figura 4** – Mallado aplicado a la probeta.

El ensayo se realizó en una máquina universal Shimadzu. Se colocó la probeta entre la mordaza inferior y superior y se aplicó fuerza constante, como en ensayo de tracción. Las probetas se prepararon para DIC, aplicando una capa de pintura blanca y, sobre de ella, un patrón moteado con pintura negra.



**Figura 5**– Probeta maquinada mediante CNC.

La medición de textura se realizó en los laboratorios del Departamento de Materiales de la Universidad de Gante. La medición se realizó con un microscopio SEM Quanta-450F mediante EBSD en muestras con un desplazamiento de 1.25 mm, antes de que existiera fractura en el material. Para cada medición de textura se eligieron tres zonas: una rectangular que abarca la zona cortante de extremo a extremo de los filetes de la probeta (zona 1), y dos zonas rectangulares (zonas 2 y 3), más delgadas y perpendiculares a esta, que empieza interpolada a la zona 1, y se alejan de la zona del cortante, para observar el cambio de textura. Esto se observa en la figura 6

### Resultados

Los resultados se enfocan en la evaluación de la geometría para ensayo de cortante puro y en realizar la comparación de los datos obtenidos mediante HMS y los resultados experimentales. En la figura 7 se observa el componente de deformación cortante a) obtenido por DIC y b) en la simulación con HMS para una probeta de 1.1 mm de espesor en dirección 0 RD. En ambas figuras se observa la deformación cortante marcada en el centro de las probetas, que disminuye

al de la zona cortante. En el caso del ensayo, la zona cortante va de filete a filete, mientras que, en el caso de la simulación, el esfuerzo cortante se reduce al acercarse a los filetes.

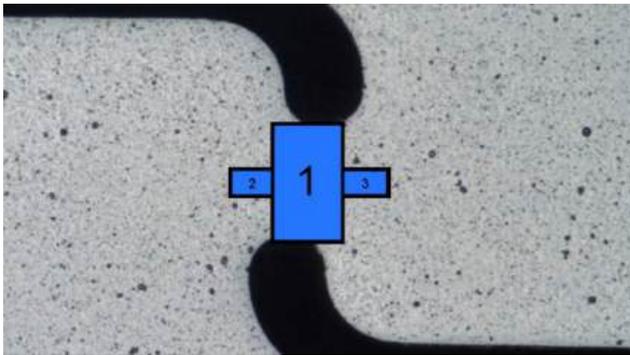


Figura 6– Zona de las probetas donde la textura fue medida.

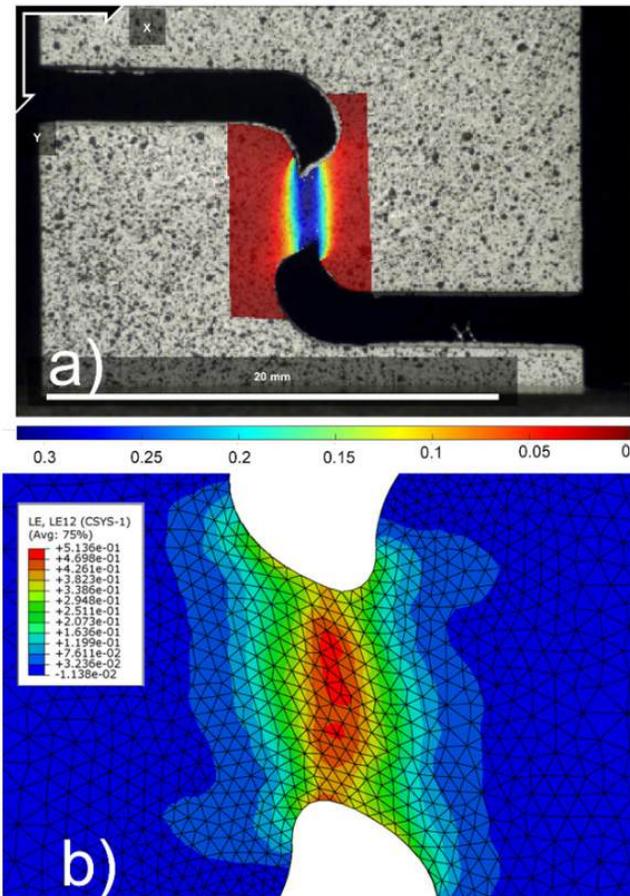


Figura 7– Componente de deformación cortante a 1.25 mm de desplazamiento para probeta de 1.1 mm de espesor en 0 RD en a) DIC y b) simulación con ley de endurecimiento de Voce.

**Comparación de deformación cortante máxima vs esfuerzo cortante máximo en simulación HMS y experimentación**

En la figura 8, se observa la comparación de las curvas de deformación cortante máxima en el centro de la probeta vs el esfuerzo cortante máximo. Las curvas de 1.1 mm predijeron mejor el comportamiento del material que las curvas de 2

mm. En ambos espesores, la predicción es mejor en 45 RD. En bajas deformaciones la predicción es acertada, pero al rebasar 0.15, la predicción deja de ser precisa, llegando hasta el 20% de error.

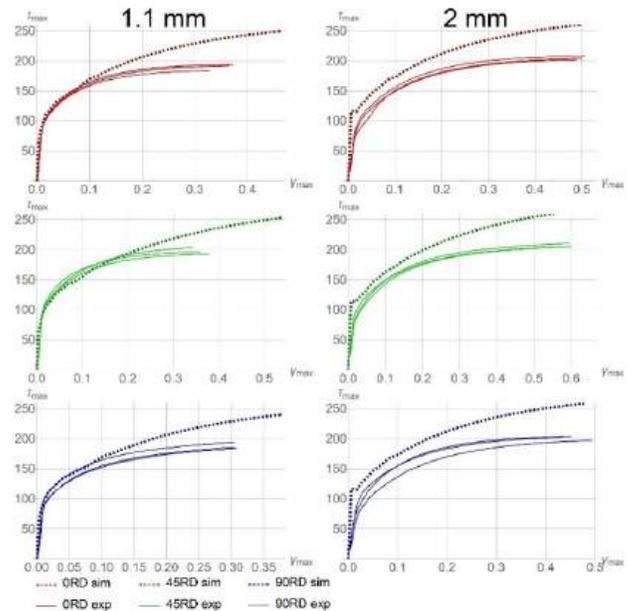


Figura 8– Curvas de deformación cortante máxima vs esfuerzo cortante máximo en los distintos ensayos (líneas sólidas) con sus respectivas simulaciones (líneas punteadas).

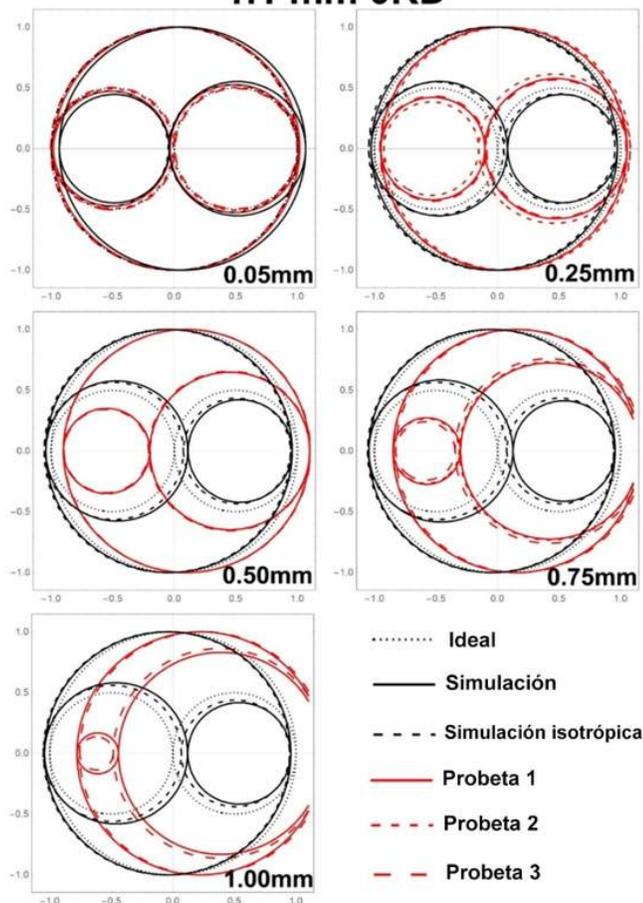
**Círculos de Mohr**

Se obtuvieron círculos de Mohr normalizados de probetas experimentales, de simulación isotrópica y de simulación con HMS, para comparar la evolución de las deformaciones principales y observar el estado cortante puro en el centro de la probeta.

Los círculos de Mohr obtenidos (figura 9), muestran que los círculos para la simulación isotrópica y anisotrópica con evolución de textura son prácticamente idénticos, ambos se mantienen muy cerca del estado de cortante puro. Lo anterior no sucede en los círculos experimentales, donde, a partir de 0.5 mm de desplazamiento, la variación de tamaño entre los círculos es notoria, que genera un estado de esfuerzos combinados, e incluso existe desplazamiento lateral, lo que denota esfuerzo hidrostático. Los resultados de las probetas de 2 mm de espesor se alejan menos del estado ideal de cortante puro porque este espesor muestra menor anisotropía.

Al observar las progresiones en DIC de los ensayos, se puede apreciar una pequeña rotación en la mordaza superior. En probetas de tracción esto genera que el recorrido de la probeta se realice en línea recta, pero en probetas de ensayo cortante, esto provoca un pequeño par que se magnifica a medida que avanza el ensayo, por lo que aún ángulos pequeños se magnifican al final del ensayo.

## 1.1 mm 0RD

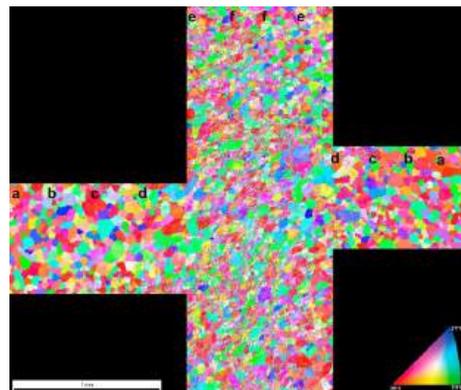


**Figura 9**– Círculos de Mohr normalizados de las tres probetas ensayadas (líneas rojas), de simulación isotrópica (líneas negras con guiones) y anisotrópica mediante HMS (línea negra sólida) en varios desplazamientos para probeta de 1.1 mm 0RD

Por otro lado, la simulación fue diseñada para que replicara el ensayo de manera ideal, omitiendo cualquier rotación de la probeta, por lo que se aseguró que el desplazamiento siempre fuera recto y que el material en el interior de la mordaza no pudiera deformarse. Esta rigidez provocó que la simulación se mantuviera en un estado ideal durante todo el desplazamiento y que distara cada vez más el estado en simulación del de experimentación en el centro de la probeta, algo que parece haber influido más de lo esperado.

### Medición de textura

Se obtuvieron mediciones de textura para probetas con un desplazamiento de 1.25 mm. A continuación, se describe de manera cualitativa el cambio de textura que existe en el material. En la figura 10 se muestra el mapa de figura de polo inversa (IPFM) correspondiente a la probeta 2 mm 0 RD, que es representativa de las demás, dado que cualitativamente son muy parecidas entre sí.



**Figura 10**– IPFM de probeta 2 mm 0 RD parcialmente ensayada. Las letras muestran las secciones en que fue dividida la medición para obtener las distintas figuras de polo y ODFs.

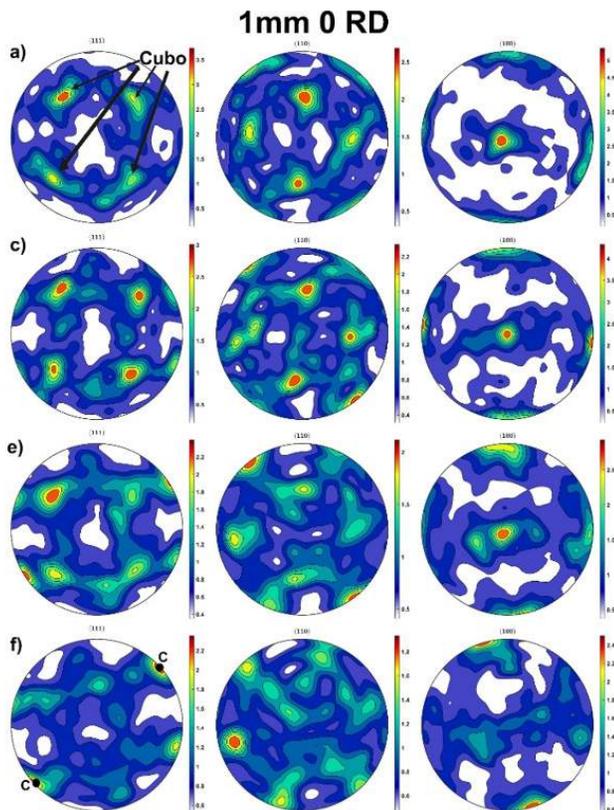
La diferencia entre la textura en la zona cortante y fuera de ella es notable. En la parte alejada de la zona cortante, el tamaño de grano al igual que su forma es uniforme, mientras que en la zona cortante los granos se fragmentan por la alta deformación cortante que ocurre en esa zona y provoca un cambio de orientación en ellos. En las zonas alejadas de la zona cortante, se muestra un color predominantemente rojo, indicador de la textura cúbica, que es una característica de las aleaciones de aluminio recrystalizadas.

En la figura 11, se muestran las figuras de polo obtenidas para la probeta 1 mm 0 RD. Las figuras de polo se obtuvieron de las zonas más alejadas de las zonas cortante, mientras que las figuras de polo f fueron medidas directamente en la zona cortante. Las figuras fueron medidas en distancia proporcional, abarcando la totalidad hasta llegar a la zona cortante como se muestra en la figura 10. En la figura 11 se muestran sólo las figuras de polo para a, c, e y f por cuestión de espacio.

La textura cubo se muestra en las figuras de polo en regiones alejadas a la zona cortante. Esta textura es característica en materiales laminados y recrystalizados, como en el caso del material estudiado. En la zona cortante sigue existiendo la textura cubo, pero su proporción es mucho menor. Desde la figura de polo c, se empieza a desarrollar una textura nueva que representa el cortante. Esta textura es diferente entre probetas y muestra su máximo valor en la zona cortante. En algunas probetas predomina la componente cortante C, mientras que, en otras, la componente cortante  $\bar{A}^*$ .

### Discusión y Conclusiones

Se realizaron ensayos para evaluar el estado cercano a cortante puro sobre una aleación AA6016 en direcciones 0, 45 y 90 RD, y fueron comparados con simulaciones de elementos finitos, en conjunto con un código de plasticidad multiescala (HMS) para validar la precisión del método.



**Figura 11**– Figuras de polo correspondientes a la probeta 1 mm 0 RD a 1.25 mm de desplazamiento. Las figuras a) fueron medidas lejos de la zona cortante, mientras que las figuras f) se midieron directamente en la zona cortante.

En ambas situaciones, se aprecia con claridad la zona cortante. En el caso de la simulación, la deformación no se observa homogénea al acercarse a los filetes. La deformación cortante máxima obtenida en ambas fuentes de datos indica un estado cercano a cortante puro. La diferencia de textura dentro y fuera de la zona cortante refuerza que existe una fuerte deformación cortante en el ensayo.

En el ensayo, existen componentes de deformación normales que crecen a medida que avanza el ensayo, y son grandes al final del ensayo, por lo que se pierde el estado de cortante puro. Esto se observa claramente en las curvas de deformación cortante máxima vs esfuerzo cortante máximo. Dichos componentes normales no aparecen en la simulación, por lo que muestra un comportamiento más cercano al ideal, que se observa en los círculos de Mohr mostrados.

Se puede concluir que la geometría evaluada cumple su objetivo en la primera parte del ensayo, hasta un 0.15 de deformación cortante, permite la realización del ensayo de deformación cortante de una forma sencilla y elimina problemas con fricción y contacto en ensayo de deformación cortante simple encontrados en trabajos anteriores [11].

Respecto a la precisión del método HMS, caracteriza adecuadamente el estado de cortante puro en la primera parte

del ensayo, pero mantiene un estado ideal al avanzar, lo que difiere de la parte experimental.

## Agradecimientos

JLFA agradece la beca posdoctoral otorgada dentro del proyecto PAPIIT IV100125. MAR agradece al programa de estancias posdoctorales nacionales de la SECIHTI para su beca posdoctoral. RS, LRH e IAF agradecen el apoyo financiero otorgado a través del proyecto PAPIIT IV100125.

## Referencias

- [1] Comisión Nacional de Inversiones Extranjeras. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/915793/Informe\\_Congreso\\_2023-4T.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/915793/Informe_Congreso_2023-4T.pdf)
- [2] Liu Y. et al., FE simulation for concurrent design and manufacture of automotive sheet-metal parts. *Journal of Materials Processing Technology* 150 (2004) 145-150.
- [3] Hill, R., A theory of yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proc. Roy. Soc. London* (1948).
- [4] Gawad, J., et. al., Hierarchical multi-scale modeling of texture induced plastic anisotropy in sheet forming. *Computational Materials Science* 66 (2013) 65-83.
- [5] ISO 11531, 2015. Metallic materials – Sheet and strip – Earing Test. International Organization for Standardization.
- [6] Schouwenars, R., Van Houtte, P., Van Bael, A., Winters, J. and Mols, K., Analysis and prediction of the earing behaviour of low carbon steel sheet. *Texture, Stress, and Microstructure*, 26(1) (1996) pp.553-570.
- [7] Schouwenars, R., Van Houtte, P., Aernoudt, E., Standaert, C. and Dilewijns, J., Prediction of the plastic anisotropy of low carbon steel sheet by means of Taylor-modelling. *ISIJ international*, 34(4) (1994) pp.366-372.
- [8] Ramírez MA, Schouwenars R, Eyckens P, Gawad J, Kestens L, Van Bael A, Van Houtte P., Experimental validation and effect of modelling assumptions in the hierarchical multi-scale simulation of the cup drawing of AA6016 sheets. *Modell Simul Mater Sci Eng* 25(1):015002 (2016).
- [9] Pichardo, D. R., Ramírez, M. Á., Kestens, L. A., Van Bael, A., Schouwenars, R., Comparison of Laser Coordinate Measurements and Hierarchical Multiscale Finite Element Models for the Cup Drawing of Three Commercial Aluminum Alloys. In *International Conference On Numerical Methods In Industrial Forming Processes* (pp. 337-346). Cham: Springer International Publishing (2023).

- [10] Peirs J., Verleysen P., Novel technique for static and dynamic shear testing of Ti6Al4V sheet, Gent University, Bélgica (2012).
- [11] Ramirez, M., Validación de un código de elemento finito para plasticidad anisotrópica mediante ensayos en productos metálicos laminados. Posgrado en Ciencia e Ingeniería en Materiales, UNAM, 127 pp. (2016).