



*II CAIM 2010  
Segundo Congreso Argentino  
de Ingeniería Mecánica  
San Juan - Noviembre 2010*

## **Análisis del efecto de la anisotropía planar en la curva límite de formabilidad de un acero de bajo carbono**

Mariano Inés<sup>\*1</sup>, Mariano Serenelli<sup>2</sup>, Dante Manzoco<sup>3</sup>, Elena Brandaleze<sup>4</sup>, Graciela Mansilla<sup>5</sup>, Pablo Turner<sup>6</sup>, Javier Signorelli<sup>7</sup>

<sup>\*1,3,4,5</sup> *Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional San Nicolás  
Colón 332 San Nicolás Argentina*

<sup>2,6,7</sup> *Instituto de Física de Rosario – Universidad Nacional de Rosario  
Bv. 27 de Febrero 210 bis Rosario Argentina  
e-mail: [mariano\\_ines@yahoo.com.ar](mailto:mariano_ines@yahoo.com.ar)*

### **RESUMEN**

Los aceros de bajo contenido en carbono tienen variadas aplicaciones en la industria, especialmente en la automotriz, donde se desean obtener distintos tipos de piezas por medio de procesos de estampado. Debido a ello se hace necesario estudiar la formabilidad de las chapas de acero. Una herramienta de gran utilidad es el Diagrama Límite de Conformado donde se representan esquemáticamente las deformaciones límite a las que puede someterse un material para diferentes estados de deformación sin presentar rotura. En este trabajo se estudia la formabilidad de una chapa de acero de bajo carbono galvanizada sometida a trayectorias de deformación tanto uniaxiales como biaxiales. Se muestra una escasa influencia de la anisotropía planar sobre la variabilidad de las deformaciones límite para este tipo de materiales, particularmente para el lado derecho del mencionado diagrama. Los resultados son analizados en términos de la textura cristalográfica del material. El estudio realizado es consistente con los resultados teóricos reportados utilizando modelos de simulación micromecánicos de plasticidad. La inclusión de la textura cristalográfica en el estudio del material sugiere que el control de la misma puede ser una herramienta útil para la mejora de la formabilidad.

**Palabras Claves:** Anisotropía planar, Curva Límite de Conformado, Formabilidad, Textura.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los aceros de bajo contenido en carbono son muy utilizados en la industria automotriz, por ejemplo en la producción de autopartes como las que se aplican en el armado del chasis de los automotores, que se obtienen por el proceso de estampado de la chapa de acero. Durante los procesos de conformado, muchas veces las deformaciones a las que se somete al material exceden un cierto valor crítico y en el mismo se producen estricciones y/o fisuras que imposibilitan el uso del material, traduciéndose en pérdidas para la empresa. Para poder determinar fehacientemente las deformaciones generadas en el proceso de embutido de las chapas se construye la Curva Límite de Conformado (CLC). En estos diagramas, se representa el estado de deformación máximo admisible para el material [1]. Se distinguen dos zonas que poseen un comportamiento bien opuesto: por encima de la CLC se presentan en el material áreas de estricciones y/o fisuras, en cambio, trabajando por debajo de la misma, la chapa se deforma sin generar ningún tipo de defectos, las deformaciones aquí son homogéneas. Además, existen diferentes estados de deformación en toda la extensión de dicha curva. En la rama izquierda prevalecen comportamientos de tracción-compresión y de estirado biaxial en la rama derecha.

Para un acero de calidad de embutido extra profundo electrocincado, Serenelli y col. [2] comenta que la textura medida presenta aproximadamente un tercio de sus granos con sus planos {111} paralelos a la superficie de la muestra, la mayoría de ellos orientados con su dirección  $\langle 110 \rangle$  paralela a la dirección de laminado. El valor de anisotropía plástica del material, calculado como la razón de las deformaciones sufridas por la probeta en el ancho y espesor es influenciado por su textura cristalográfica [3]. Debido a ello, varias propiedades mecánicas importantes industrialmente, como la capacidad/aptitud del material en operaciones de embutición profunda, son determinadas por la naturaleza e intensidad de los cambios que se producen en las mismas dependiendo fundamentalmente de las orientaciones cristalográficas. Las componentes que mayor importancia relativa tienen en procesos de embutido son: {111} $\langle 110 \rangle$ , {111} $\langle 112 \rangle$  y {554} $\langle 225 \rangle$  las cuales son generadas a partir de {332} $\langle 113 \rangle$  por la deformación en frío del material.

El criterio de selección de los puntos de interés para la construcción del Diagrama Límite de Conformado (DLC) se comenta en Ziegler [4], el cual establece colores en relación a la estricción (rojo=estricción localizada – adyacentes a la fisura, azul=estricción difusa – vecinos a los anteriores, verde=puntos sanos – sin estricción difusa) para la identificación de los círculos de interés. También, Hosford [5] menciona que se podrían tomar como lecturas seguras aquellas que se sitúan a 1,5 diámetros de círculo desde el centro de la estricción. La medición de las deformaciones se realiza en un proyector óptico de perfiles. El mismo es un instrumento que combina elementos ópticos y mecánicos de alta precisión, adecuado para realizar mediciones específicas sobre piezas pequeñas.

En base a la bibliografía analizada, se puede mencionar que los dos tipos de ensayos de estirado más utilizados para evaluar deformaciones en este tipo de materiales son: el acopado hidráulico y el ensayo tradicional que hace uso de un punzón semiesférico [6]. La elección de un buen agente lubricante influye de manera notable sobre la capacidad del material a deformarse. Tal como comenta Benedetti y col. en [7] para punzones semiesféricos esto permite embutir copas más profundas sin que el material se rompa, ya que, cuando disminuye la fricción entre punzón y chapa, se transmite menos carga al punzón.

En este trabajo, se presentan resultados obtenidos a partir de ensayos de punzón semiesférico, realizados sobre probetas cortadas con diferentes orientaciones respecto de la dirección de laminación, a los efectos de analizar la influencia de la textura sobre las propiedades de conformado.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Caracterización del material

El material utilizado para llevar a cabo la experiencia es una chapa de acero de bajo contenido en carbono (0,07%C) de uso automotriz, de 0,62 mm de espesor, que posee un recubrimiento de Zinc. La microestructura es de tipo ferrítica con presencia de carburos y escasa perlita globular, la cual muestra cierto bandeo paralelo a la dirección de laminación, Figura 1.



Figura 1: a) Microestructura en el plano paralelo de la chapa; b) en el plano normal de la chapa

La textura cristalográfica se determinó por difracción de rayos X, en un equipo Phillips X-Pert Pro-MPD. La Función de Distribución de Orientaciones (ODF) para el material en estudio se puede observar en la Figura 2-a. Los porcentajes de las componentes ideales:  $\{001\}\langle 110\rangle$  -  $\{112\}\langle 110\rangle$  (fibra  $\alpha$ ),  $\{111\}\langle 110\rangle$  -  $\{111\}\langle 112\rangle$  (fibra  $\gamma$ ) y  $\{554\}\langle 225\rangle$  que conforman la textura, se muestran en la Figura 2-b.

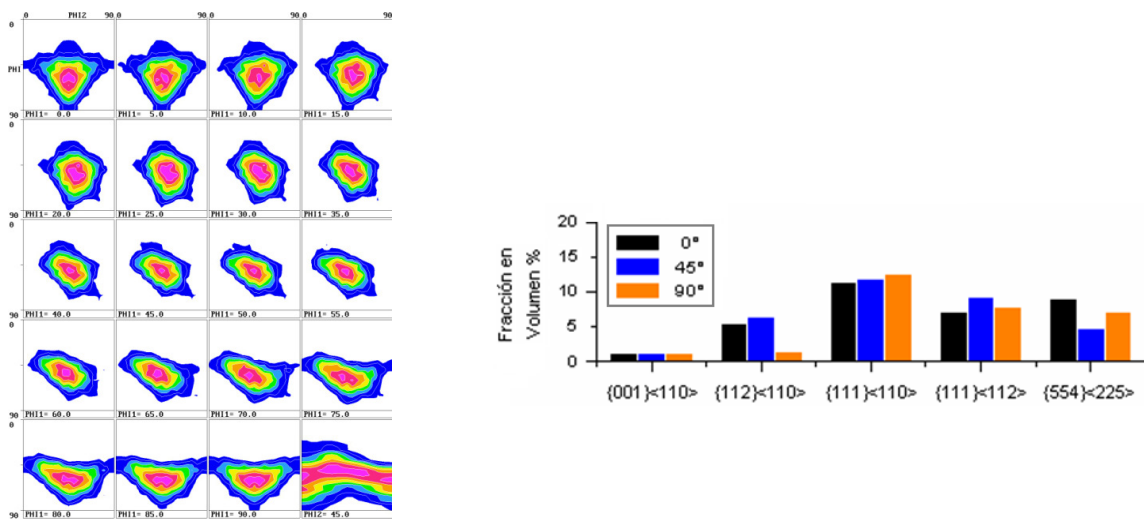


Figura 2. a) Función de Distribución de Orientaciones experimental; b) Fracción volumétrica de componentes ideales para cada una de las inclinaciones de la chapa

## 2.2 Ensayos

Se cortaron con rayo láser probetas tipo Reloj de Arena (HG) de diferentes anchos, según la dirección paralela, inclinada a 45° grados y perpendicular a la dirección de laminación. Se determinaron los coeficientes de anisotropía normal,  $R$ , anisotropía planar,  $\Delta R$ , para ello se ensayaron dos probetas por cada dirección al 15% de deformación ingenieril y se tomó una longitud de referencia de 20 mm y sobre la misma se efectuaron 3 mediciones equidistantes [6]. El coeficiente de endurecimiento por deformación,  $n$ , se calculó a partir de las curvas de tracción uniaxial convencional empleando probetas ASTM E8M.

Para los ensayos de estirado mecánico se trabajó en una máquina Universal Instron 3382, empleando un punzón semiesférico de 40 mm de diámetro y con una velocidad de avance de 2 mm/min. Se utilizaron dos tipos de lubricantes ( $\text{MoS}_2$  y un lubricante a base polímero) entre la chapa metálica y el punzón para lograr una distribución de la deformación más homogénea. Sólo para el caso de las probetas biaxiales se empleó un lubricante polimérico sólido.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se estudió la formabilidad de una chapa de acero de bajo carbono según las direcciones a 0°, 45° y 90° respecto de la dirección original de laminado. En la Tabla 1, se pueden observar las principales propiedades mecánicas extraídas por medio de ensayos de tracción.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del material

Orientación de la chapa con relación a la dirección de laminación	n	C(MPa)	R
Longitudinal 0°	0,198	225,8	1,63
Inclinada 45°	0,198	219,7	1,24
Transversal 90°	0,198	216,6	1,83
Valor medio: $(R_0 + 2R_{45} + R_{90})/4$	0,198	218,5	1,49
Anisotropía planar $\Delta R: (R_0 - 2R_{45} + R_{90})/2$			0,39

Siendo "C" la constante de la ecuación de Hollomon:  $\sigma = C \cdot \epsilon^n$ .

Los coeficientes de endurecimiento son los mismos para todas las orientaciones consideradas, sin embargo de los valores de anisotropía obtenidos, se puede inferir que las orientaciones longitudinal y transversal de la chapa serán las que posean mayor capacidad para ser deformadas por embutido profundo debido a que poseen elevados valores de R.

La metodología de selección de los puntos para la construcción de los DLC se basó en el criterio de Ziegler [4] teniendo en cuenta las deformaciones experimentadas por el material, aclarando que se marcó con rojo las elipses con estricción, llamando primeros vecinos (azules) a aquellas con estricción difusa, y verdes a aquellas que son segundos vecinos de la estricción (ver Figura 3d).

La medición de las deformaciones se realizó en un Proyector Óptico de Perfiles PRAZIS PO-360-VT, desplazando la mesa de coordenadas juntamente con la pieza a medir a lo largo de sus ejes. Sobre cada brazo móvil del equipo está montado un tornillo micrométrico que mediante fibras ópticas envían la información de las mediciones realizadas a un adquisidor de datos.

Las Figuras 3a, 3b y 3c representan las CLC obtenidas para cada una de las direcciones analizadas ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ ) respectivamente. Las mismas se trazaron considerando que no deben quedar por debajo de ellas puntos rojos (estricción).

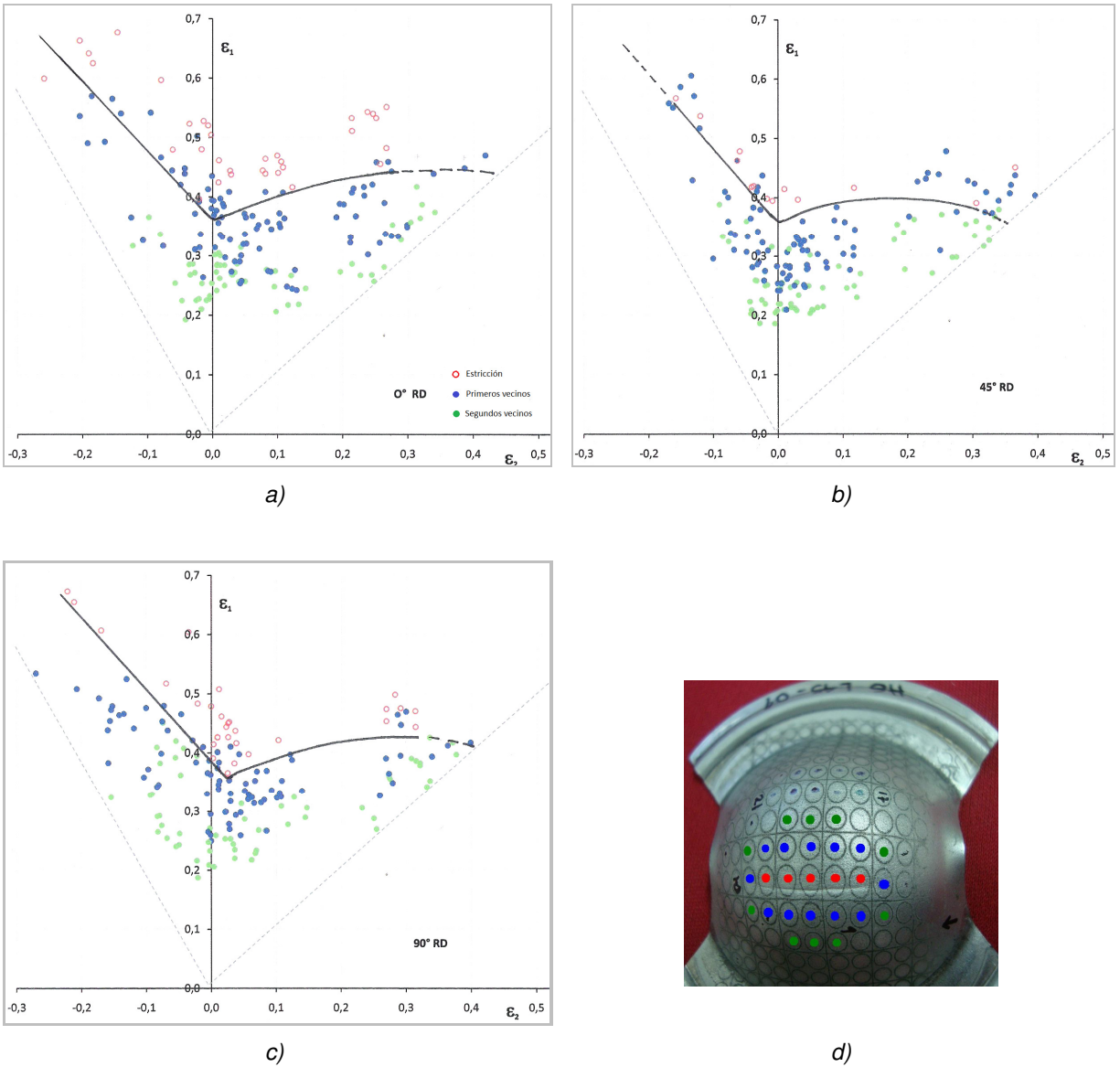


Figura 3a, 3b, 3c. Curvas Límite de Conformado a:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$  respectivamente; d) Metodología de selección de las elipses deformadas.

Siguiendo las consideraciones de [8], las deformaciones relativas a las estricciones son causales de mucha dispersión en cuanto a los valores de deformación se refiere, dependiendo aquellas de pequeñas variaciones en la geometría de la probeta, sus propiedades y de las condiciones de borde durante el ensayo, como lo es la fricción. Según se observa en la Figura 3a, ha quedado un punto considerado como rojo (con estricción) por debajo de la CLC trazada. Para dicho caso en particular la estricción es tangente a

la elipse; con esto se demuestra que el método DLC genera bastante dispersión en los datos, debido a la falta de un criterio único al momento de evaluar las deformaciones generadas por las estricciones.

A los efectos de comparar la influencia de la orientación del corte respecto de la dirección de laminación, se representaron la tres CLC en un mismo gráfico, Figura 4.

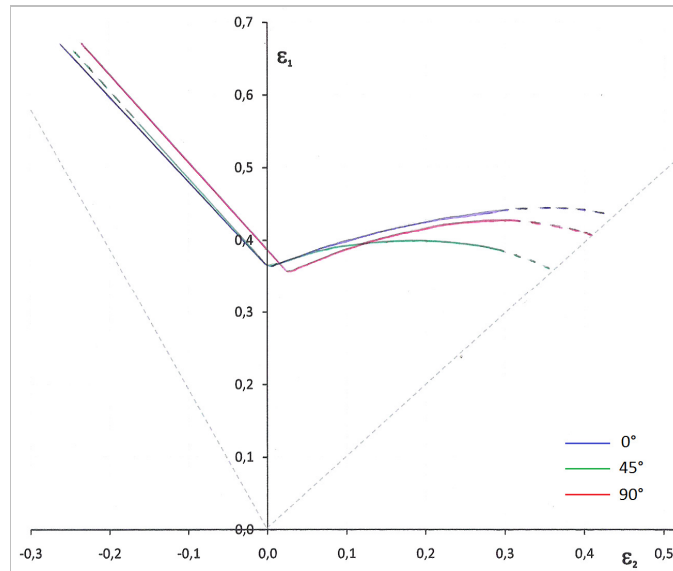


Figura 4. Curvas Límite de Conformado (0°, 45°, 90°)

De la comparación de las CLC no se aprecia una influencia significativa de la orientación de las probetas respecto de la dirección de laminación. El valor mínimo de deformación,  $CLC_0$ , se encuentra cercano a 0,36-0,37 de  $\epsilon_1$ . Se observa que en el caso de la CLC – 90°, el punto  $CLC_0$  está desplazado hacia la derecha del eje  $\epsilon_1$ . En este punto la deformación límite se alcanza para estados diferentes del correspondiente a deformación plana ( $\epsilon_2=0$ ). Las líneas de trazo discontinuo que se aprecian en la Figura 4, indican cuales serían los posibles comportamientos del material debido a que no se obtuvieron datos de estricción en dichos sectores. Los resultados indican que existe mayor formabilidad en la orientación longitudinal del material lo cual resulta consistente con su valor de anisotropía.

De acuerdo al trabajo realizado por Signorelli y col. [9], las orientaciones que se ubican en la fibra  $\gamma$  ( $\{111\}\langle 110\rangle$  y  $\{111\}\langle 112\rangle$ ) junto a las orientaciones de las componentes  $\epsilon$   $\{554\}\langle 225\rangle$  favorecen la formabilidad de la chapa, mientras que las orientaciones situadas en la fibra  $\alpha$  ( $\{001\}\langle 110\rangle$  -  $\{112\}\langle 110\rangle$ ) la deterioran. Analizando la fracción volumétrica de las componentes favorables de textura (inicial del material) se encuentra que para el caso analizado no se observan diferencias significativas en las mismas (25-28%), presentándose la siguiente distribución para las tres inclinaciones consideradas: (longitudinal:  $\gamma_1=11\%$ ,  $\gamma_2=7\%$ ,  $\epsilon=9\%$ ; inclinada:  $\gamma_1=11,2\%$ ,  $\gamma_2=9\%$ ,  $\epsilon=5\%$ ; transversal:  $\gamma_1=12,5\%$ ,  $\gamma_2=7,5\%$ ,  $\epsilon=7\%$ ). Analizando el sector positivo de  $\epsilon_2$ , las CLC correspondientes a la inclinación de 0° y 90° son ligeramente superiores en comparación con aquella inclinada a 45°. Dicho comportamiento podría explicarse atendiendo a la mayor fracción volumétrica de componentes  $\gamma$  y  $\epsilon$  que presentan las orientaciones en cuestión. Así mismo, esta

mayor concentración en las fibras  $\gamma$  y  $\epsilon$  es coincidente con los mayores valores de anisotropía obtenidos para dichas orientaciones. No obstante, debido a que estas diferencias son mínimas para las tres orientaciones de la chapa, sería interesante analizar la textura del material posterior a la deformación. El análisis de textura realizado ha podido justificar, en parte, el comportamiento del material frente a estados de deformación tanto uniaxiales como biaxiales. El estudio realizado también resulta coherente con los resultados teóricos reportados utilizando modelos de simulación micromecánicos de plasticidad [10].

### 3. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en este trabajo se puede inferir que:

1. Para las orientaciones paralela y perpendicular a la dirección de laminación no se observan diferencias en el comportamiento mecánico de formabilidad para valores de deformaciones  $\epsilon_2$  positivo. Lo mencionado es consistente con los altos valores de R y de fracción volumétrica de las fibras  $\gamma$  y  $\epsilon$  hallados.
2. En este material, se comprobó una escasa influencia de la anisotropía sobre la variabilidad de las deformaciones límite, particularmente contemplando el lado derecho del DLC. Sin embargo, la incidencia del valor de anisotropía se pone de manifiesto al considerar el lado izquierdo del mencionado diagrama.

### 4. REFERENCIAS

- [1] G. Bergé, M. Puccinelli, J. Insausti, D. Ziegler, A. Lucaioli y L. Iurman, *Congreso CONAMETSAM, Influencia de la anisotropía planar en la trayectoria de deformación de una chapa de acero electrocincada bajo tracción biaxial no equilibrada*, Santiago de Chile, 28-31 de Octubre 2008.
- [2] M. Serenelli, M.A. Bertinetti, J. Insausti, A. Lucaioli, D. Ziegler y J. Signorelli, *Congreso SAM/CONAMET, Modelización de las deformaciones límite de una chapa de acero electrocincada bajo tracción biaxial*, Buenos Aires, 19 al 23 de Octubre de 2009.
- [3] R. K. Ray, J. J. Jonas, M. P. Butrón-Guillén and J. Savoie, Transformation Textures in Steels, *Review-ISIJ International*, Vol. 34 – Número 12, pp. 927-942, 1994.
- [4] D. Ziegler, J. Pedraza, G. Bergé, J. Insausti, A. Lucaioli, P. Monesterolo y M. Puccinelli, *Congreso SAM/CONAMET, Relación entre parámetros mecánicos y curvas límite de conformado de chapas de acero de bajo carbono*, pp. 261-266, 2007.
- [5] William F. Hosford, Robert M. Caddell, *Metal Forming. Mechanics and Metallurgy*, Cambridge University Press, Third edition, 2007.
- [6] Gladys Charca, Michael Stout, Pablo Turner, Javier Signorelli, *2<sup>do</sup> Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales, Estudio experimental de la deformabilidad de un acero galvanizado de bajo carbono para embutido profundo*, Misiones, 16 – 17 Octubre de 2008.
- [7] Benedetti P., Insausti J., Traversa P., Iurman L., Lucaioli A., Mazini N., *Anales SAM, Comparación del adelgazamiento de pared en ensayos Swift con punzón plano y semiesférico*, pp. 70-74, 1999.
- [8] H. Aretz, An extension of Hill's localized necking model, *International Journal of Engineering Science*, No. 48, pp. 312–331, 2010.

- [9] J. W. Signorelli, P. Turner, M. A. Bertinetti, L. Iurman, J. Insausti, A. Lucaioli y C. García, *Proceedings Congreso SAM-CONAMET, Predicción de la curva límite de formabilidad en aceros utilizando plasticidad cristalina*, Santiago de Chile, 2006.
- [10] J. W. Signorelli, M. A. Bertinetti y P. A. Turner, Predictions of forming limit diagrams using a rate-dependent polycrystal self-consistent plasticity model, *International Journal of Plasticity*, 25:1–25, 2009.