

EVALUACIÓN DE LA FORMABILIDAD DE UN ACERO DE ULTRABAJO CARBONO (IF) LAMINADO EN FRÍO Y RECOCIDO

G. Charca Ramos⁽¹⁾, M. Stout⁽¹⁾, P. Turner^(1,2) y R. Bolmaro^(1,2)

(1) Instituto de Física Rosario, CONICET, ARGENTINA.

(2) Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, UNR, ARGENTINA.

E-mail (autor de contacto): charca@ifir-conicet.gov.ar

RESUMEN

Los materiales metálicos utilizados en la fabricación de piezas utilizadas por diversos sectores industriales, como el automovilístico, requieren soportar altas y complejas deformaciones sin fallar. El material utilizado debe poseer buenas propiedades de formabilidad. Mejorando la composición química del material y optimizando el proceso de fabricación de la chapa metálica se puede lograr excelentes propiedades de formabilidad. Durante la fabricación podemos evaluar la formabilidad del material conociendo las texturas cristalográficas y el porcentaje de recristalización. El desarrollo de la orientación cristalográfica preferencial de fibra {111}<uvw> durante el laminado en frío y el posterior recocido, garantiza que el material soportará altas deformaciones sin fallar. La formabilidad de un material puede ser evaluado a través de dos técnicas: Coeficiente de Lankford que refleja la capacidad de deformación del material durante el proceso de embutido y la Curva de Límite de Conformado (CLC) que da a conocer la capacidad de soportar las complejas deformaciones durante el estirado de chapas.

En esta investigación, un acero de ultrabajo contenido de carbono libre de elementos intersticiales (IF) laminado en caliente de 4.8 mm de espesor, fue laminado en frío con reducción del 90% en el espesor. El material deformado fue sometido a un tratamiento térmico, recocido continuo en laboratorio, a 850°C durante 6 minutos y con una velocidad de calentamiento de 220°C/min en atmósfera inerte de argón. Se evaluó la textura desarrollada, la microestructura y formación de precipitados, en cada etapa del proceso de fabricación mediante difracción de rayos X micrografías y técnicas de espectrometría de energía dispersiva (EDS) respectivamente. También se midió la dureza de la muestra en cada etapa del proceso. Se realizaron ensayos de tracción y de estirado-embutido a muestras de la chapa procesada. Se calcularon los valores de los coeficientes de Lankford y se elaboró el Diagrama de Límite de Conformado. La respuesta mecánica de este material es comparada con la de un acero de bajo carbono con calidad para embutido.

Tópico 2: Materiales metálicos

Palabras clave: (texturas cristalográficas, aceros IF, coeficiente de Lankford, Curva de Límite de Conformado).

1. INTRODUCCIÓN

Gran parte de las piezas conformadas en frío, utilizadas en diversos sectores industriales como el automovilístico, son fabricadas a partir de chapas metálicas. Éstas deben ser capaces de resistir altas deformaciones sin producir ninguna falla. Para obtener mejoras significativas en el conformado es necesario optimizar tanto el proceso de fabricación como los materiales. A nivel mundial cada día se producen aceros con mejores características de resistencia y conformabilidad. Los aceros de ultra-bajo carbono libre de elementos intersticiales (aceros IF) presentan una buena combinación de estas propiedades. Por esta razón se logra disminuir el peso de la chapa, reduciendo el costo de fabricación y proporcionando un ahorro de combustible en el caso de ser utilizado en la fabricación

de automóviles. Además las características de este material permiten el ahorro de energía durante su fabricación.

La formabilidad en frío de una chapa metálica puede ser resuelta en dos componentes separadas pero relacionadas: estirado y embutido, en ambos casos se busca conformar la pieza sin que presente estricción localizada. El estirado incluye deformaciones mayor y menor, ambas positivas, en el plano de la chapa. El embutido implica deformaciones mayor y menor, de las cuales una es positiva y la otra negativa. Sin embargo, muchas aplicaciones industriales involucran tanto el embutido como el estirado. La capacidad de embutido de una chapa de acero es bien caracterizada por el coeficiente de Lankford (R), siendo la relación de la deformación entre el ancho y el espesor de la muestra. A mayor valor de R el material soporta mayores deformaciones. La capacidad de estirado de una chapa es bien caracterizada con la Curva Límite de Conformado (CLC), concepto éste introducido por Keeler y Backofen [1]. En el espacio de deformaciones mayores la curva divide las deformaciones seguras de las inseguras (estricción o fractura) determinando las deformaciones máximas que puede soportar el material en los distintos modos de deformación sin fallar.

Los valores R están microestructuralmente relacionados con la orientación preferencial de los cristales (textura) en el material. Las orientaciones $\{111\}\langle uvw \rangle$ se desarrollan en aceros ferríticos durante el proceso de laminado en frío y recocido, presentando un R alto. En el laminado en frío el material desarrolla las orientaciones $\{hkl\}\langle 110 \rangle$ (fibra α) y $\{111\}\langle uvw \rangle$ (fibra γ) y durante el recocido de recristalización desarrolla altas intensidades de fibra γ y la fibra α prácticamente desaparece[2].

En este trabajo se presentan los resultados de la caracterización de las propiedades de formabilidad de un acero IF laminado en caliente. Éste fue procesado por laminación en frío y recocido en escala de laboratorio. Se midieron las texturas, durezas y formación de precipitados en las diferentes etapas del proceso de fabricación de la chapa.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El material utilizado en esta investigación es un acero IF, laminado en caliente, con 0.003% C, 0.005% Si, 0.001% Nb, 0.145% Mn, 0.018% Ni, 0.005% Sn, 0.001% V, 0.013% P, 0.009% Ni, 0.038% Al, 0.066% Ti, 0.016% Cr, 0.0001% B, 0.007% S y 0.0017% N. La composición fue proporcionada por el fabricante. En [3] se determinó los parámetros óptimos de fabricación de la chapa estudiada con buenas propiedades de formabilidad. Estos parámetros son 90% de reducción en la laminación en frío y un recocido con altas velocidades de calentamiento y enfriamiento a 850°C por 6 minutos.

La laminación se llevó a cabo en un laminador piloto de un rodillo de altura, con 85 mm de diámetro y 140 mm de longitud. Se redujo el 90% del espesor, en 20 pasos de 10% de reducción por paso. Se obtuvieron 3 chapas de 130x240x0.60 mm³. Estas chapas fueron recocidas en una cámara con flujo continuo de argón, para evitar que las muestras se oxiden. Esta cámara es introducida en un horno mufla ya estabilizado a la temperatura de tratamiento permitiendo así altas velocidades de calentamiento. Para el enfriamiento la muestra se enfrió dentro de la cámara y fuera del horno mufla, utilizándose un ventilador externo para obtener las altas velocidades de enfriamiento necesarias. La cámara cuenta con una termocupla dentro de la cámara que permitió controlar la temperatura real de la muestra.

Se midieron las texturas cristalográficas, durezas y los precipitados formados en muestras de cada etapa del proceso de fabricación: laminada en caliente (muestra inicial), laminada en frío y recocida. Para medir las texturas, las muestras fueron pulidas mecánicamente y electropulidas para eliminar cualquier perturbación. Se les midió la textura en el centro de su espesor, con un Difractómetro Philips X'Pert Pro MPD con tubo de Cu, lentes de RX, goniómetro de texturas, 40 KV y 30 mA de intensidad. Se construyeron las figuras de polo y, a partir de ellas, la Función de Distribución de Orientaciones (ODF) con popLA. La dureza Vickers se midió con un microdurómetro SHIMADZU

HMV-2. También se estudió la formación, tamaño, composición y dispersión de precipitados utilizando un microscopio electrónico de barrido (MEB) FEI modelo Quanta 200F de emisión de campo con análisis por energía dispersiva de Rayos X(EDS). Para esto las muestras fueron pulidas y atacadas con Nital 4%.

Para evaluar la formabilidad de la chapa, se realizaron dos ensayos: medición del coeficiente de Lankford y la determinación de la Curva de Límite de Conformado.

Para obtener valores R precisos, de acuerdo a la norma ASTM E517-00, debemos contar con dos extensómetros para el ancho y largo ó medir el ancho con instrumentos que implican alto error de medición para las dimensiones trabajadas. En este estudio se midieron los valores R , por el método de correlación de imágenes. Para esto se diseñó y construyó un dispositivo que va acoplado a la máquina de tracción, en el cuál va una cámara CCD que captura fotos, cada 10 segundos, de una zona de la muestra a lo largo de todo el ensayo. Se midieron los valores de R para muestras con tres orientaciones diferentes (figura 1a). La zona de trabajo tiene 50 mm de largo y un área transversal de 3.24 mm^2 . En las figuras 2(a-c), se muestra el dispositivo y la preparación de la muestra para este ensayo. Una de las ventajas de este ensayo es que permite conocer los valores de R para diferentes deformaciones.

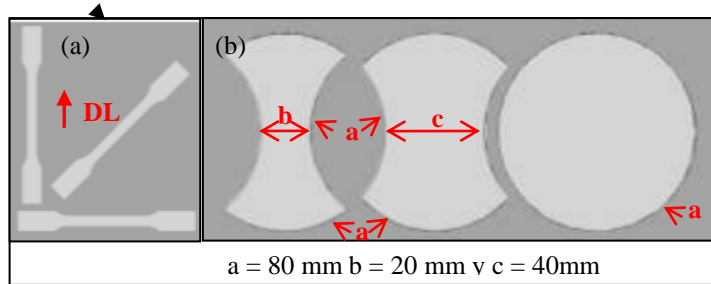


Figura 1. (a) Muestras utilizadas para medir R (b) muestras utilizadas para el ensayo de estirado.

En [4] se determinó la geometría y lubricación de las muestras que son necesarias para obtener los diferentes modos de deformación. En este estudio se trabajó con tres geometrías de muestra: circulares con 80 mm de diámetro y con bordes de reloj de arena de 40 y 20 mm de ancho (figura 1b). Se trabajó con dos tipos de lubricación entre la muestra y el punzón: una combinación de una lámina de teflón con una capa de MoS_2 y discos de elastómero de 4 mm de espesor y 40 mm de diámetro. Un lado de las muestras, opuesto al punzón, fue marcado con círculos de 2.7 mm de diámetro por medios electroquímicos. En las figuras 2 (d y e) se presenta un esquema del ensayo de estirado. Las deformaciones se obtuvieron midiendo los círculos antes y después del ensayo, utilizando fotografías de las muestras y autoCAD. Las deformaciones resultantes fueron graficadas en el espacio de deformaciones mayores obteniendo el Diagrama de Límite de Conformado (DLC), que muestra puntos llenos y puntos vacíos. Los puntos llenos representan deformaciones uniformes (deformaciones seguras) y los puntos vacíos representan deformaciones con estricción o falla (deformaciones inseguras). Se traza una línea entre los puntos con deformación segura e insegura, obteniéndose la Curva de Límite de Conformado (CLC).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 3, se muestran los cortes en $\phi_2=45^\circ$ de la ODF, para las diferentes muestras. La muestra inicial es poco texturada, con intensidad máxima de sólo 4.64, y las componentes de textura están dispersas. La muestra laminada tiene mayor intensidad, 19.69, y las componentes de textura se concentran a lo largo de una L , en $\phi_1=0^\circ$ desde $\phi=0^\circ$ hasta $\phi=55^\circ$, fibra α $\{hkl\} \langle 110 \rangle$, y en

$\phi=55^\circ$ a lo largo de todo ϕ_1 , fibra $\gamma\{111\}\langle uvw \rangle$. La muestra recocida presenta altas intensidades con un máximo de 19.25, concentrando las componentes de textura a lo largo de la fibra γ . En [5] se explica que los aceros ferríticos que tienen orientaciones de fibra γ presentan buen comportamiento durante el conformado.

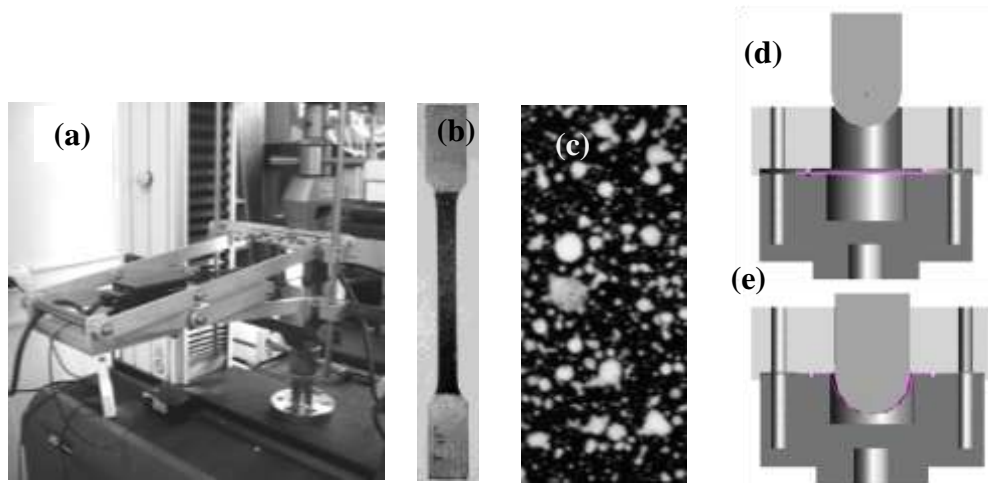


Figura 2. (a) Dispositivo acoplado a la máquina de tracción que permite que la cámara CCD siga una zona de la muestra durante el ensayo. (b) Muestra ensayada a tracción preparada para analizar las deformaciones por correlación de imágenes. (c) Detalle de la zona analizada. (d) Esquema del ensayo de estirado antes de la deformación y (e) después de la deformación.

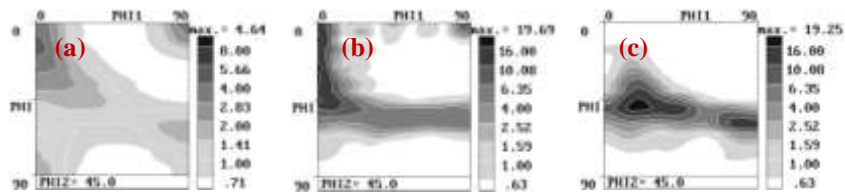


Figura 3. Cortes de las ODF's en $\phi_2=45^\circ$ para (a) muestra inicial (b) laminada y (c) recocida.

En la figura 4, se puede observar la evolución de texturas de las dos fibras de interés. La muestra inicial presenta bajas intensidades en ambas fibras. La muestra laminada desarrolla buenas intensidades: mayor en fibra α y algo de fibra γ . La muestra recocida es la que desarrolla mayor intensidad de fibra γ con un máximo de 10 en $\{111\}\langle 123 \rangle$. Si se observa 3c, la muestra recocida presenta intensidad de 19.25, sin embargo en 4b la intensidad máxima para la misma muestra presenta un máximo de 10. Esto se debe que la mayor intensidad no se encuentra en la fibra γ . La mayor intensidad corresponde a $\{667\}\langle 2-31 \rangle$, muy cercana a la fibra γ (5° de rotación).

En la figura 5, se presentan las micrografías obtenidas con el microscopio electrónico de barrido (MEB) de las muestras en el plano DL-DT (dirección de laminación- dirección transversal a la laminación). En (5a-1) la forma de los granos de la muestra inicial presenta granos de forma irregular, esto es una característica de las muestras que sufrieron recristalización dinámica.

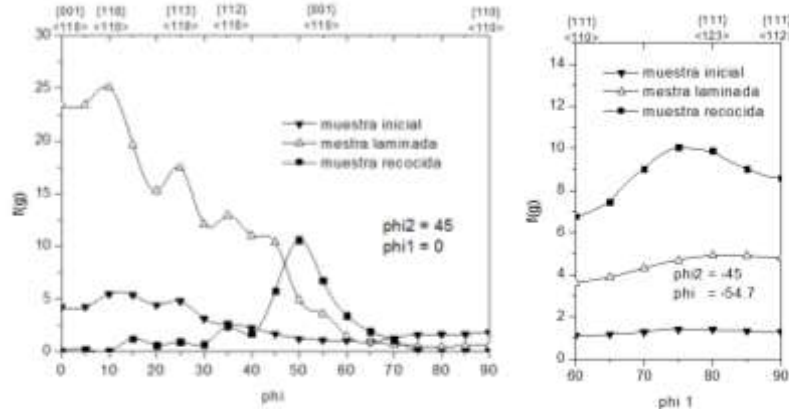


Figura 4. Evolución de las componentes de texturas en las diferentes etapas de fabricación (a) fibra α y (b) fibra γ .

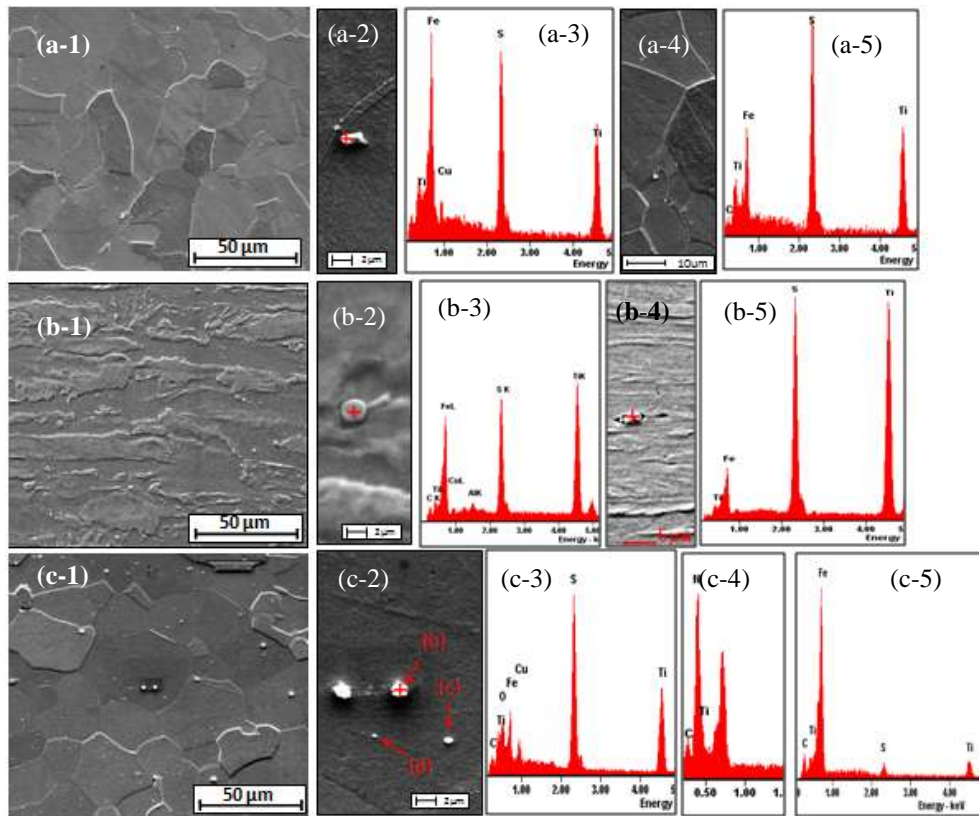


Figura 5. Formación y dispersión de precipitados de las muestras en las diferentes etapas. Micrografía MEB de la muestra (a-1) inicial, (a-2) laminada y (a-3) recocida. (a2 – a5), (b2-b5) y (c2-c5) picos de energía EDS identificando los precipitados en las diferentes muestras.

La muestra laminada (figura 5b-1) presenta granos alargados en la dirección de laminación debido a las tensiones que sufre el material durante la deformación. La muestra recocida presenta granos equiaxiales (figura 5c-1). Los tamaños de los granos no son uniformes, los granos más pequeños demuestran que algunos granos solamente nuclearon y no llegaron a la etapa de crecimiento de

grano. En la figura 5 también se identifican algunos precipitados mediante análisis EDS. En la muestra inicial y laminada se presentan los mismos compuestos: $Ti_4C_2S_2$, CuS, TiS principalmente. En la muestra recocida se incrementó la cantidad de precipitados que contienen CuS, y de esta forma mayor cantidad de Ti queda libre para formar los compuestos de TiN y TiC, obteniéndose la matriz ferrítica libre de elementos intersticiales. En [5] se describe cómo un acero ferrítico libre de elementos intersticiales tienen mejores propiedades de formabilidad. En este estudio se procuró reproducir el recocido continuo, porque permite un ahorro de energía durante la fabricación, un producto con propiedades uniformes y las altas velocidades de calentamiento permite la formación de precipitados con S-Cu.

En cuanto a la dureza del material, presentado en la tabla 2, ésta varía en las diferentes etapas. La muestra laminada presenta la mayor dureza porque se introdujo dislocaciones dentro de los granos. La muestra recocida presenta la menor dureza, debido a que en el proceso de recristalización se eliminaron gran parte de dislocaciones.

Tabla1. Dureza Vickers de las diferentes muestras.

Muestras	Dureza (HV)	Desviación estándar
Inicial	152	09.53
Laminada	251	27.08
Recocida	122	05.07

En la figura 6a se muestran los valores de Lankford obtenidos para las muestras cortadas en: DL, 45° con respecto a DL y 90° con respecto a DL, donde $R_{90} > R_{45} > R_0$. En la tabla 2, se presentan los valores de anisotropía plástica ($R_{promedio}$) y anisotropía planar (ΔR), calculados con las ecuaciones 1 y 2 respectivamente a partir de los tres valores de R .

$$R_{promedio} = \frac{(R_0 + 2R_{45} + R_{90})}{4} \quad (1)$$

$$\Delta R = \frac{(R_0 - 2R_{45} + R_{90})}{4} \quad (2)$$

Estos valores son óptimos. $R_{promedio}$ de 2.06 garantiza que este material tendrá buenas propiedades de formabilidad y un ΔR muy cercano a 0 (-0.19) indica que el no presentará el defecto de orejeado.

En la figura 6b se presenta el DLC y en ella se trazó la CLC. Los valores límite de deformación son: 60% para deformación de tracción, 40% para deformación plana y 40% para deformación biaxial balanceada. La CLC muestra una inflexión en el lado derecho con un máximo de 47% para el estado de deformación ϵ_2/ϵ_1 igual a 0.40. Las dos muestras utilizadas para obtener deformaciones en el lado derecho del diagrama son circulares pero se utilizó diferente lubricación entre el punzón y la muestra. Para el modo de deformación $\epsilon_2/\epsilon_1 = 0.40$ se utilizó una lámina de teflón y una capa de MoS_2 y para $\epsilon_2/\epsilon_1 = 1$ se utilizó un disco de poliuretano como lubricante. Para obtener la deformación plana se utilizó la muestra con geometría de reloj de arena con 40 mm de ancho y para la deformación de tracción se utilizó la misma geometría con 20 mm de ancho. En ambos casos se utilizó como lubricante teflón y MoS_2 .

Los valores de R y los valores de deformación máxima en la CLC son superiores a los de un acero de bajo carbono [4]. La forma de la CLC para este acero no es una V como para el acero de bajo carbono[4] sino que presenta una inflexión en el lado derecho del DLC.

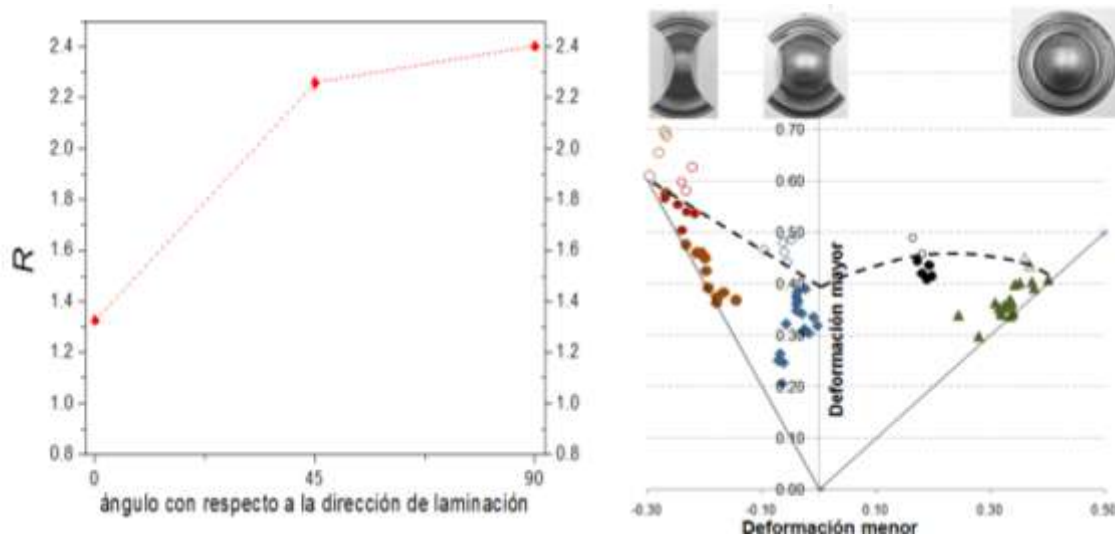


Figura 6. (a) Valores R para las muestras con diferente orientación con respecto a la dirección de laminación. (b) Diagrama de Límite de Conformado para el material estudiado.

Tabla2. Anisotropía planar y anisotropía plástica del material estudiado.

ΔR	-0.19
$R_{promedio}$	2.06

4. CONCLUSIONES

Se procesó una chapa que desarrolló altas intensidades de fibra $\gamma\{111\}\langle uvw \rangle$ y se evaluó sus propiedades de formabilidad. Los valores de R y de límites de deformación muestran las buenas propiedades de formabilidad del material procesado. Con estos resultados se determina que los parámetros de fabricación son los óptimos para el propósito buscado.

REFERENCIAS

1. S. P. Keeler y W. A. Backhofen, "Plastic instability and fracture in sheet stretched over rigid punches"; ASM Trans. Quart., Vol. 56 (1964), p. 25-48.
2. F. J. Humphreys y M. Hatherly, "Recrystallization and Related Annealing Phenomena", 1996, Pergamon.
3. G. Charca Ramos, M. Stout y R. Bolmaro, "Procesamiento termomecánico de una chapa de acero de ultrabajo carbono (IF) y evaluación de su conformabilidad", Anales Jóvenes Investigadores en Materiales SAM, 2010.
4. G. Charca Ramos, M. Stout, R.E. Bolmaro, J.W. Signorelli, M. Serenelli, M.A. Bertinetti, P. Turner, "Study of a drawing-quality sheet steel. II: Forming-limit curves by experiments and micromechanical simulations"; International Journal of Solids and Structures, Volume 47 (2010), p. 2294-2299.
5. R.K. Ray, J.J. Jonas and R.E. Hook, "Cold rolling and annealing textures in low carbon and extra low carbon steels", Int. Mat. Reviews, Vol. 39 (1994), p. 129-172.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por CONICET y Proyecto PICT 1128-ANPCyT y el ULCS fue provisto por Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), Brasil. G. Charca agradece la financiación de Fundación Josefina Prats, Rosario, Argentina.