



ESTUDIO MICROMECAÍNICO DE LA FORMABILIDAD DE CHAPAS DE ACERO. EL ANÁLISIS FACTORIAL COMO HERRAMIENTA DE POST-PROCESO

MARIANO SERENELLI¹, MARÍA BERTINETTI², JAVIER SIGNORELLI¹

¹Instituto de Física Rosario
IFIR (CONICET – UNR)

Bv. 27 de Febrero 210 bis, (2000) Rosario, Argentina

²Facultad de Ciencias Exactas, Ing. y Agrimensura
FCEIA (UNR)

Av. Pellegrini 250, (2000) Rosario, Argentina

(Recibido 28 de agosto de 2011, para publicación 14 de noviembre de 2011)

Resumen – La tecnología de fabricación de aceros de bajo carbono para aplicaciones de embutido profundo se ha orientado al desarrollo de procesos que permitieron incrementar la intensidad de la textura en aquellas orientaciones cristalográficas localizadas en la denominada fibra gamma $\{111\}\langle hkl\rangle$. Esta tendencia tuvo su origen en trabajos de investigación basados en simulaciones numéricas de plasticidad cristalina, los cuales posibilitaron evaluar la influencia individual de cada componente típica de textura en los indicadores de embutibilidad R_m (anisotropía normal) y ΔR (anisotropía planar). En el presente trabajo se realizaron simulaciones de ensayos de tracción uniaxial en 32 materiales virtuales con texturas diferentes, a los fines de evaluar la influencia de la distribución orientaciones cristalográficas sobre los valores de R_m y ΔR , pero no en forma individual sino desde una óptica de conjunto. Se utilizó para ello un modelo de plasticidad cristalina del tipo autoconsistente, seguido de un post-proceso basado en el análisis factorial. Este último permitió cuantificar la magnitud de los efectos acoplados producidos por la presencia de las componentes de textura consideradas. Se verificó que, en consonancia con los resultados investigaciones previas, la intensificación de la fibra gamma y en particular orientaciones en torno a la componente $\{111\}\langle 110\rangle$, es crucial en la mejora de la calidad de un acero para embutido profundo, mientras que las componentes localizadas en la fibra alfa $\{uvw\}\langle 110\rangle$ juegan el rol opuesto. Tanto para R_m como para ΔR se observa que la interacción de dos factores y mayores son del orden del desvío típico. Esta cuantificación permite validar las consideraciones realizadas sobre la capacidad de conformado del material en relación a despreciar tales efectos.

Palabras clave – Anisotropía, textura, plasticidad cristalina, formabilidad, análisis factorial.

1. INTRODUCCIÓN

La anisotropía plástica en los materiales metálicos presenta una fuerte dependencia en relación al desarrollo de textura en procesos tales como solidificación, deformación, recristalización y transformaciones de fase. Consecuentemente, la respuesta mecánica del material en sollicitaciones de manufactura industrial está condicionada por la textura cristalográfica y morfológica derivada de su historia termo-mecánica. Tal comportamiento anisotrópico de productos planos laminados en frío es comúnmente caracterizado por medio del coeficiente de Lankford o coeficiente de anisotropía R , el cual representa la capacidad del material para acomodar la deformación plástica en el plano de la chapa al ser sollicitado en tracción uniaxial. Los productos metálicos planos presentan además una respuesta diferencial en función de la inclinación de la dirección de la sollicitación respecto de la dirección de laminado. Una caracterización más completa de la respuesta del material es llevada a cabo entonces mediante la evaluación del coeficiente de Lankford según tres direcciones características: $0^\circ(R_0)$, $45^\circ(R_{45})$ y $90^\circ(R_{90})$ de inclinación respecto de la dirección de laminado de la chapa. En las operaciones de embutido profundo en particular, la aptitud para el conformado de un material dado se describe por medio de dos índices: $R_m = (R_0 + 2.R_{45} + R_{90})/4$, principalmente asociado a la profundidad de conformado y $\Delta R =$

$(R_0 - 2.R_{45} + R_{90})/2$, indicador de la tendencia del material a la formación de orejeado [1-2]. Valores de R_m (anisotropía normal) elevados y ΔR (anisotropía planar) cercanos a cero, constituyen en general buenos indicadores de embutibilidad. Esta información resulta clave para el desarrollo de la ingeniería de diseño de geometrías admisibles en un material dado y/o la adecuación del material óptimo para la pieza destinada al conformado.

La investigación referente a la relación entre la textura y la performance del material frente a operaciones de conformado se ha orientado en dirección a dos interrogantes fundamentales: ¿cuáles son los pequeños cambios a realizar sobre una textura existente de modo de mejorar las propiedades del material? y ¿cómo debe ajustarse el proceso de manufactura de modo de obtener el cambio deseado en la textura?

Haciendo uso de las posibilidades que brinda la modelización de procesos de deformación plástica en materiales cristalinos mediante la simulación numérica, varios trabajos [3-9] se han centrado en el estudio de los efectos producidos por la variación de la textura cristalográfica en las propiedades de conformado de materiales de uso industrial. El desarrollo y expansión de esa línea de trabajos científicos permitió a los ingenieros de manufactura y diseño reorientar la optimización de procesos de fabricación de materias primas y productos hacia la interpretación y manipulación de la textura cristalográfica. Ray *et al.* [3] analizaron en forma individual el efecto sobre R_m y ΔR de cada una de las componentes de textura típicas de aceros laminados a partir de simulaciones basadas en el modelo de plasticidad cristalina de Taylor, Bishop y Hill. Ellos mostraron que las componentes de textura $\{111\}\langle 112 \rangle$ y $\{111\}\langle 110 \rangle$ mejoran la embutibilidad del material, mientras que las orientaciones típicas $\{001\}\langle 110 \rangle$ y $\{112\}\langle 110 \rangle$ la deterioran. Bertinetti *et al.* [8] utilizaron un modelo policristalino del tipo autoconsistente en un estudio similar. Aunque este modelo considera de forma indirecta la interacción entre granos, los valores resultantes de los indicadores R_m y ΔR no se vieron particularmente afectados. Choi *et al.* [9] compara las predicciones de ambos modelos en un acero de ultra-bajo carbono, reportando pequeñas diferencias. En todos los casos citados, el estudio se circunscribe a un cálculo de los indicadores R_m y ΔR de materiales virtuales monocristalinos cuya textura está compuesta en un 100% de una de las componentes típicas de laminado.

Por otra parte, Delannay *et al.* [4] desarrollaron un modelo de caracterización de texturas que utiliza 25 parámetros asociados a la función de distribución de orientaciones cristalográficas para predecir la respuesta de los materiales respecto a los parámetros de embutibilidad. Ante la evidencia de interconexión entre las variables involucradas en su modelo, sugieren el uso del análisis factorial fraccional (AFF) como herramienta apropiada para estudiar efectos conjuntos no despreciables en problemas de varias variables. Hasta la fecha y según el conocimiento de los autores, no se ha realizado una evaluación de la influencia conjunta de las orientaciones presentes en la deformación plástica de metales.

El objetivo de este trabajo es explorar los efectos producidos por la textura cristalográfica en los indicadores de embutibilidad R_m y ΔR para establecer relaciones adecuadas entre las fracciones de volumen de las componentes ideales de textura presentes en el material laminado en relación a la mejora de la formabilidad asociada a procesos de embutido profundo. Se utiliza para ello un modelo computacional basado en la teoría de la plasticidad cristalina del tipo autoconsistente. Las simulaciones realizadas y los resultados obtenidos son examinados de acuerdo a una estrategia cualitativa y cuantitativa basada en el análisis factorial (AF). Se pretende extender -dentro de un marco estadístico- las nociones de interacción e influencia entre las componentes de textura presentes en el material, como aporte para el diseño de nuevos y mejores materiales, procesos y productos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Modelo constitutivo

En este trabajo, el cálculo de los valores de R como caracterizador de la anisotropía se llevó a cabo utilizando el código de cálculo SELFCOON [10], el cual implementa un modelo policristalino viscoplastico autoconsistente de propósito general, incluyendo desarrollo de textura, superficie de fluencia, anisotropía plástica, tensiones internas y residuales, curva límite de conformado, etc. La formulación

original del modelo así como los detalles de su implementación se encuentra en el trabajo de Lebensohn y Tomé [11]. Se presenta a continuación una síntesis de las hipótesis sobre las que se basa tal formulación. El agregado policristalino se representa como un conjunto de orientaciones g_i con pesos w_i . La ecuación constitutiva a nivel del cristal simple está dada por una ley visco-plástica potencial de la forma:

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^g = \dot{\gamma}_0 \sum_{s=1}^n \frac{\mathbf{m}^s \otimes \mathbf{m}^s}{\tau_c^s} \left| \frac{\mathbf{m}^s : \boldsymbol{\sigma}'^g}{\tau_c^s} \right|^{\frac{1}{m}-1} : \boldsymbol{\sigma}'^g \quad (1)$$

donde \mathbf{m}^s , τ_c^s , $\dot{\gamma}_0$ y m , son los parámetros de cada sistema de deslizamiento s : tensor de Schmid, tensión crítica, velocidad de corte de referencia y la sensibilidad a la velocidad de deformación, respectivamente. La respuesta de cada grano, diferente a la impuesta al policristal, se vincula con ésta a través del criterio de localización relacionando la respuesta local con la del medio efectivo equivalente. La ecuación de interacción puede expresarse en términos de una relación entre los desvíos en deformación y los desvíos en tensión de la forma siguiente:

$$(\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^g - \dot{\mathbf{E}}) = -\tilde{\mathbf{M}} : (\boldsymbol{\sigma}'^g - \boldsymbol{\Sigma}') \quad (2)$$

donde g identifica a cada grano y $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^g$ y $\boldsymbol{\sigma}'^g$ son la velocidad de deformación y tensión del grano, mientras que $\dot{\mathbf{E}}$ y $\boldsymbol{\Sigma}'$ corresponden a las mismas variables para el agregado policristalino. El tensor de localización $\tilde{\mathbf{M}}$ es una función del módulo visco-plástico del policristal \mathbf{M}^{tg} , del tensor de Eshelby \mathbf{S}^{esh} y de la forma y orientación de cada grano:

$$\tilde{\mathbf{M}} = (\mathbf{I} - \mathbf{S}^{esh})^{-1} : \mathbf{S}^{esh} : \mathbf{M}^{tg} \quad (3)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones (1), (2) y (3) para todas las orientaciones g , e imponiendo que el comportamiento global se obtiene como promedio ponderado de las respuestas locales, se determinan las respuestas locales y global del agregado policristalino. La evolución de la tensión crítica en cada paso de deformación se tiene en cuenta por medio de un modelo de endurecimiento mecánico para cada sistema de deslizamiento a nivel microscópico dado por una ley potencial, la cual se expresa en la forma siguiente:

$$\dot{\tau}_c = \sum_s H^s |\dot{\gamma}^s| \quad (4)$$

$$H^s = H_0 \left(\frac{H_0 \Gamma}{\tau_c^s n} + 1 \right)^{n-1} \quad \Gamma = \sum_s \int_0^t |\dot{\gamma}^s| dt \quad (5a \text{ y } 5b)$$

donde H_0 , Γ , y n son la tasa inicial de endurecimiento, la deformación acumulada en el grano y el exponente de endurecimiento por deformación microscópico, respectivamente.

2.2. Texturas de laminado en aceros de bajo carbono

Las orientaciones cristalográficas de los granos en chapas metálicas laminadas son generalmente representadas por los índices de Miller $\{hkl\}\langle uvw \rangle$, siendo $\{hkl\}$ el plano cristalográfico paralelo al plano de la chapa mientras que $\langle uvw \rangle$ indica la dirección paralela a la dirección de laminado. Convencionalmente las texturas cristalográficas se describen mediante las figuras de polos, sin embargo la información completa puede obtenerse a través de la función de distribución de orientaciones (ODF), la cual especifica la frecuencia o probabilidad de que una determinada orientación se encuentre en un dado punto del espacio tridimensional de orientaciones de Euler. Cada orientación está descripta por una terna de ángulos φ_1 , ϕ , φ_2 (ángulos de Euler en convención de Bunge). Debido a la alta simetría que presentan los cristales cúbicos de cuerpo centrado (BCC) y a la simetría ortotrópica del proceso de laminado, es posible restringir el análisis al espacio reducido de Euler. Las direcciones principales del laminado son

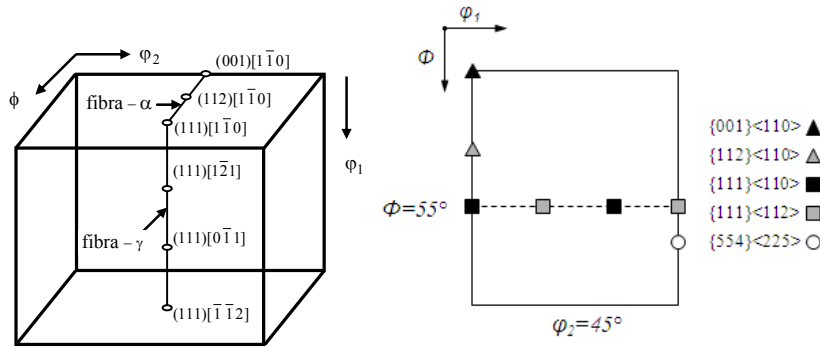


Fig. 1. Vista tridimensional del espacio de Euler (convención Bunge), esquema de las fibras α y γ ; (izquierda); corte de la ODF en $\phi_2=45^\circ$ detallando la ubicación de las componentes típicas de textura (derecha).

referidas como RD (dirección de laminado), TD (dirección transversal) y ND (dirección normal a la chapa). Asimismo, es usual que la información contenida en una ODF tridimensional sea expresada en función de componentes típicas o fibras en el caso de chapas de aceros. Estas fibras asocian una intensidad cuasi constante a un grupo de orientaciones relacionadas unas a otras por rotaciones alrededor de una dirección cristalográfica particular. Es característico en los metales BCC describir la textura desarrollada en base a la presencia o ausencia de una determinada componente de textura durante el proceso de laminado, por lo cual resulta útil describir la densidad de orientaciones mediante los “diagramas de fibras”. Típicamente, las componentes de textura de laminado más relevantes en chapas de acero se agrupan según la siguiente convención:

- fibra- α : conjunto de orientaciones con la dirección $\langle 110 \rangle \parallel$ RD, se extiende desde la orientación $(001) [110]$ ($\phi = 0^\circ$) hasta $(111) [110]$ ($\phi = 55^\circ$) (Fig. 1, izquierda).
- fibra- γ : conjunto de orientaciones con la dirección $\langle 111 \rangle \parallel$ ND; los planos $\{111\}$ yacen aleatoriamente sobre el plano de laminado. Se extiende desde $(111)[110]$ hasta $(111)[112]$. La fibra- α y la fibra- γ se interceptan en la componente $(111)[110]$, siendo ambas visibles en la sección del espacio de Euler $\phi_2 = 45^\circ$. Una particularidad de la fibra- γ es que está compuesta de tres segmentos simétricamente equivalentes $\{111\}\langle 110 \rangle$ $\{111\}\langle 112 \rangle$, $\{111\}\langle 112 \rangle$ $\{111\}\langle 110 \rangle$ y nuevamente $\{111\}\langle 110 \rangle$ $\{111\}\langle 112 \rangle$ (línea horizontal Fig. 1, derecha); para su descripción es suficiente considerar sólo uno de tales segmentos.
- componente ε : orientación $\{554\}\langle 225 \rangle$; aparece fuera de las fibras mencionadas pero muestra una intensidad no despreciable en las texturas de los aceros estudiados (Fig. 1, derecha).

Cabe aclarar que en texturas de aceros, las máximas intensidades a lo largo de la fibra no se encuentran en la posición exacta de la fibra ideal, sino que suelen ser frecuentes desvíos de hasta 15° .

2.3. Diseño de texturas

El presente estudio se realizó en base a la construcción de texturas virtuales generadas mediante una distribución gaussiana en torno a las orientaciones típicas de laminado. La construcción fue llevada a cabo mediante la perturbación de una orientación ideal original por medio de la rotación de un ángulo θ respecto de un eje U:V:W aleatorio, definido en un sistema solidario a la orientación. Para ello se utilizó una matriz de rotación $M_{3 \times 3}$. Las columnas de M indican los cosenos directores de la desorientación aplicada respecto de la orientación original. Equivalentemente, esta nueva orientación puede definirse empleando la noción de ángulo-eje, donde θ y U:V:W se expresan en función de los a_{ij} en la forma siguiente:

$$\cos \theta = (a_{11} + a_{22} + a_{33} - 1)/2 \quad (8)$$

$$U:V:W = a_{32}-a_{23}: a_{13}-a_{31}: a_{21}-a_{12} \quad (9)$$

El siguiente procedimiento fue aplicado a cada una de las orientaciones ideales que describen la textura del material: *i*) el valor de θ se toma de acuerdo a una distribución gaussiana con valor medio cero y una desviación estándar de $\Delta\theta$; *ii*) los valores U:V:W son aleatorios; *iii*) la orientación original es rotada a través de la matriz M . Detalles de la metodología y aplicación pueden consultarse en Serenelli *et al.* (2009) [12].

2.4. Análisis factorial

En el marco del estudio estadístico de datos y su aprovechamiento en el análisis de respuestas de modelos de desarrollo de texturas, Delannay *et al.* [4], mencionan la potencialidad del análisis factorial (AF), en particular el de tipo fraccional (AFF), como herramienta apropiada para estudiar aquellos fenómenos en los cuales intervienen varias variables y cuyos efectos conjuntos no pueden ser despreciados. Originado en la búsqueda de optimización del diseño de experimentos, el AF se basa en la observación eficaz de los efectos producidos sobre un sistema-proceso descrito por un número finito de variables, de las cuales las consideradas de mayor relevancia, varían entre niveles específicos. Esta técnica permite discriminar aquellas variables o conjunto de variables cuyo cambio influye dramáticamente en los efectos observados, evitando conclusiones erróneas dadas por el enmascaramiento de las interacciones existentes. Se plantea el problema de especificar claramente las variables determinantes y los extremos del intervalo de variación de las mismas en el proceso estudiado.

El número de experimentos elementales necesarios (P) para el análisis factorial está dado por $P = A^x$, donde x es el número de variables estudiadas y A , el número de niveles por variable. El caso de dos niveles ($P = 2^x$) es de notable utilidad ya que funciona como primera aproximación al conocimiento de la naturaleza participativa individual, colectiva e interactiva de cada variable del proceso, sin la necesidad de un examen de extrema profundidad. En este trabajo se utilizó el algoritmo de Yates [13] para el cálculo de los efectos individuales y conjuntos, el cual opera sobre los resultados de las observaciones ordenadas según la metodología estándar. En el caso particular de las simulaciones numéricas realizadas, no hay réplicas posibles con resultados diferentes, por lo tanto se estimó la desviación típica s de acuerdo con la ecuación (10), donde E representa aquellas estimaciones de efectos provenientes de interacciones mayores a dos factores y N la cantidad de efectos considerados o grados de libertad:

$$s = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^N E_i^2 \right] / N} \quad (10)$$

Luego, cada estimación para los efectos tiene asociada la desviación típica, despreciándose aquellos efectos cuya estimación posea un valor absoluto $< 3s$. Una extensión del análisis factorial es su versión “fraccional” para aquellos casos en donde las variables comprometidas sean numerosas. Esta variación de la técnica original propone que algunos de los “experimentos elementales” pueden ser excluidos sin pérdidas relevantes en la calidad de los resultados obtenidos y sus derivaciones [13].

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1. Definición de niveles para el análisis factorial y generación de texturas

Los diseños factoriales a dos niveles se caracterizan por la simplicidad de aplicación y capacidad de proveer una idea preliminar de las tendencias generales del rol de cada variable en el efecto global observado. En este caso, las variables escogidas son las fracciones de volumen de 5 componentes ideales de textura: α_1 {001}<110>, α_2 {112}<110>, γ_1 {111}<110>, γ_2 {111}<112> y ε {554}<225>. Es entonces necesario definir los niveles de variación de cada una de estas variables para evaluar así la influencia de las mismas en los indicadores de embutibilidad R_m y ΔR . Las texturas cristalográficas de los aceros destinados a aplicaciones de embutido (DQ-drawing quality, DDQ-deep drawing quality y EDDQ-extra deep drawing quality) y de acuerdo a un criterio de componentes ideales, muestran fracciones de volumen variables pero contenidas entre valores bien definidos. La zona sombreada o “ventana estándar” de la Fig. 2, representa el rango de variación porcentual de cada componente típica. Este diagrama fue

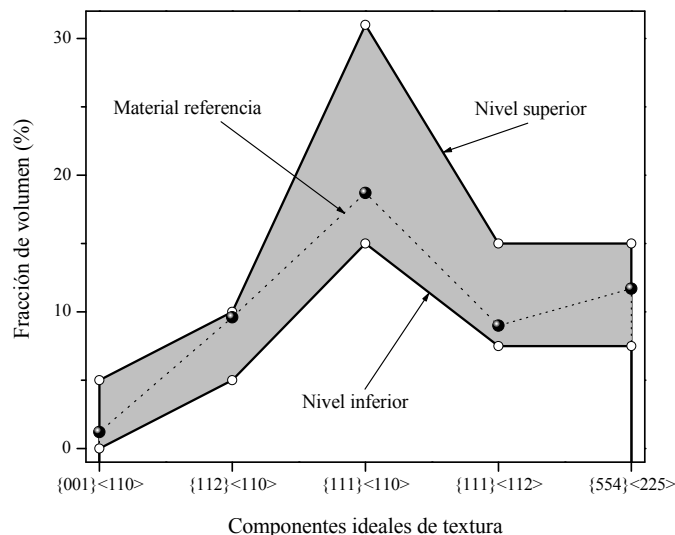


Fig. 2. Ventana estándar y niveles de variación de fracciones de volumen de componentes ideales de textura.

construido en base a datos extraídos de trabajos de investigación específicos [3-5,14-15]. Los niveles asignados y requeridos en el análisis factorial se corresponden con los límites definidos en la ventana estándar: Alfa: α_1 (0.0-5.0%) y α_2 (5.0-10.0%); Gamma: γ_1 (15.0-30.0%) y γ_2 (7.5-15.0%) y Épsilon: ϵ (7.5-15.0%).

Definidos los niveles de las fracciones de volumen a analizar, la aplicación del procedimiento descrito en la sección 2.3 permitió generar los materiales virtuales utilizados en las simulaciones numéricas. La fracción de volumen de cada una de las 5 componentes ideales de textura varía entre los dos niveles estipulados y las combinaciones posibles resultan en 32 materiales, cuya textura la completan orientaciones aleatorias (sin incluir a las ideales) denominadas “resto” ó “fondo”.

3.2. Calibración del modelo

El modelo policristalino utilizado tiene en cuenta las variables textura cristalográfica y morfológica, parámetros de endurecimiento por deformación, sensibilidad a la velocidad de deformación, estructura cristalina y modos de deslizamiento activos en la deformación plástica. En tal sentido, se fijaron como parámetros iniciales los correspondientes a una chapa de acero tipo DQ de 0.62 mm de espesor con un contenido de carbono de 0.04%, tamaño de grano #9 (ASTM E112), laminada en frío y con recocido posterior, utilizada como material de referencia. Se realizó además un análisis micrográfico para examinar la forma de los granos. Se determinó una forma promedio de los granos del tipo elipsoidal con una relación dimensional de los ejes principales de 1.0:1.0:0.4 (eje mayor: eje medio: eje menor).

La función de distribución de orientaciones -reconstruida a partir de las figuras de polos experimentales (200), (110) y (112), obtenidas mediante la técnica de difracción de rayos X- fue discretizada utilizando un conjunto de 1000 orientaciones de igual peso [16]. Asumiendo que la deformación plástica se acomoda por deslizamiento según tres modos potencialmente activos formados por los planos $\{110\}$, $\{112\}$ y $\{123\}$, todos con la direcciones de deslizamiento $\langle 111 \rangle$, característica de los materiales BCC, el total de sistemas potencialmente activos es de 48 (12: $\{110\}\langle 111 \rangle$, 12: $\{112\}\langle 111 \rangle$ y 24: $\{123\}\langle 111 \rangle$). Tanto los valores de tensión crítica resuelta para el deslizamiento cristalográfico (CRSS) para cada uno de los modos mencionados ($\tau_0 = 60$ MPa) como los parámetros de endurecimiento mecánico ($H_0 = 2900$ MPa; $n = 0.210$; $m = 0.020$), fueron calibrados de forma de reproducir en forma numérica la curva de carga del material de referencia solicitado en tracción uniaxial en la dirección de laminado. Se comprobó además que con la utilización de este juego de parámetros, las curvas de tracción predichas por el modelo para cada uno de los 32 materiales examinados no difieren sensiblemente respecto de la curva correspondiente al material de referencia.

Tabla 1. Distribución de orientaciones, R_0 , R_m y ΔR de los materiales estudiados.

Material	α_1 (%)	α_2 (%)	γ_1 (%)	γ_2 (%)	ε (%)	R_{0°	R_{45°	R_{90°	R_m	ΔR
1	0.0	5.0	15.0	7.5	7.5	1.99	1.93	2.19	2.01	0.16
2	5.0	5.0	15.0	7.5	7.5	1.65	1.82	1.77	1.77	-0.11
3	0.0	10.0	15.0	7.5	7.5	1.82	1.96	2.06	1.95	-0.02
4	5.0	10.0	15.0	7.5	7.5	1.55	1.88	1.71	1.76	-0.25
5	0.0	5.0	30.0	7.5	7.5	2.03	2.17	2.31	2.17	0.00
6	5.0	5.0	30.0	7.5	7.5	1.70	2.04	1.89	1.92	-0.25
7	0.0	10.0	30.0	7.5	7.5	1.88	2.20	2.21	2.12	-0.16
8	5.0	10.0	30.0	7.5	7.5	1.59	2.08	1.77	1.88	-0.40
9	0.0	5.0	15.0	15.0	7.5	2.05	2.02	2.17	2.07	0.09
10	5.0	5.0	15.0	15.0	7.5	1.74	1.96	1.82	1.87	-0.18
11	0.0	10.0	15.0	15.0	7.5	1.94	2.11	2.09	2.06	-0.10
12	5.0	10.0	15.0	15.0	7.5	1.62	2.01	1.72	1.84	-0.34
13	0.0	5.0	30.0	15.0	7.5	2.12	2.24	2.32	2.23	-0.02
14	5.0	5.0	30.0	15.0	7.5	1.79	2.11	1.87	1.97	-0.28
15	0.0	10.0	30.0	15.0	7.5	1.99	2.29	2.18	2.19	-0.21
16	5.0	10.0	30.0	15.0	7.5	1.68	2.18	1.81	1.96	-0.44
17	0.0	5.0	15.0	7.5	15.0	2.01	2.01	2.18	2.05	0.09
18	5.0	5.0	15.0	7.5	15.0	1.72	1.95	1.82	1.86	-0.18
19	0.0	10.0	15.0	7.5	15.0	1.90	2.10	2.10	2.05	-0.10
20	5.0	10.0	15.0	7.5	15.0	1.60	1.99	1.73	1.83	-0.33
21	0.0	5.0	30.0	7.5	15.0	2.08	2.22	2.32	2.21	-0.02
22	5.0	5.0	30.0	7.5	15.0	1.76	2.09	1.88	1.96	-0.27
23	0.0	10.0	30.0	7.5	15.0	1.94	2.27	2.18	2.17	-0.21
24	5.0	10.0	30.0	7.5	15.0	1.64	2.16	1.81	1.94	-0.44
25	0.0	5.0	15.0	15.0	15.0	2.15	2.16	2.20	2.17	0.01
26	5.0	5.0	15.0	15.0	15.0	1.78	2.02	1.83	1.91	-0.22
27	0.0	10.0	15.0	15.0	15.0	1.98	2.19	2.10	2.12	-0.15
28	5.0	10.0	15.0	15.0	15.0	1.65	2.06	1.73	1.88	-0.37
29	0.0	5.0	30.0	15.0	15.0	2.18	2.33	2.28	2.28	-0.10
30	5.0	5.0	30.0	15.0	15.0	1.83	2.20	1.92	2.04	-0.33
31	0.0	10.0	30.0	15.0	15.0	2.03	2.39	2.22	2.26	-0.27
32	5.0	10.0	30.0	15.0	15.0	1.71	2.25	1.86	2.02	-0.47

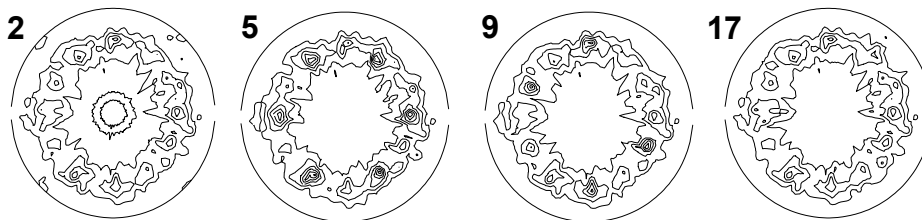


Fig. 3. Figuras de polos (100) de los materiales 2, 5, 9 y 17.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para analizar el efecto de la variación de la textura cristalográfica sobre la anisotropía mecánica del material, se efectuaron las simulaciones -para cada uno de los materiales virtuales- de los ensayos de tracción uniaxial hasta una deformación verdadera del 18% en las tres direcciones requeridas (0° , 45° y 90°) respecto de la dirección de laminado. Con los resultados obtenidos se calcularon los valores de R_m y ΔR para cada material. La tabla 1 muestra en detalle la distribución de orientaciones, valores predichos de R_0 y valores calculados de R_m y ΔR de cada uno de los materiales estudiados.

Tabla 2. Efectos calculados para R_m y ΔR en base al diseño factorial 2^5 .

Efectos sobre R_m	Estimación $\pm s_{R_m}$	Efectos sobre ΔR	Estimación $\pm s_{\Delta R}$
Media	2.02 \pm 0.02	Media	-0.182 \pm 0.009
Efectos principales		Efectos principales	
α_1 {001}<110>	-0.23 \pm 0.02	α_1 {001}<110>	-0.240 \pm 0.009
α_2 {110}<112>	-0.03 \pm 0.02	α_2 {110}<112>	-0.164 \pm 0.009
γ_1 {111}<110>	0.15 \pm 0.02	γ_1 {111}<110>	-0.104 \pm 0.009
γ_2 {111}<112>	0.08 \pm 0.02	γ_2 {111}<112>	-0.054 \pm 0.009
ε {554}<225>	0.06 \pm 0.02	ε {554}<225>	-0.053 \pm 0.009
Interacción de 2 factores		Interacción de 2 factores	
$\gamma_1 \times \gamma_2$	0.01 \pm 0.02	$\gamma_1 \times \gamma_2$	0.021 \pm 0.009
$\gamma_1 \times \alpha_1$	-0.03 \pm 0.02	$\gamma_1 \times \alpha_1$	-0.006 \pm 0.009
$\gamma_1 \times \alpha_2$	0.02 \pm 0.02	$\gamma_1 \times \alpha_2$	0.011 \pm 0.009
$\gamma_1 \times \varepsilon$	0.01 \pm 0.02	$\gamma_1 \times \varepsilon$	0.020 \pm 0.009
$\gamma_2 \times \alpha_1$	-0.01 \pm 0.02	$\gamma_2 \times \alpha_1$	0.005 \pm 0.009
$\gamma_2 \times \alpha_2$	0.00 \pm 0.02	$\gamma_2 \times \alpha_2$	0.000 \pm 0.009
$\gamma_2 \times \varepsilon$	-0.00 \pm 0.02	$\gamma_2 \times \varepsilon$	0.002 \pm 0.009
$\alpha_1 \times \alpha_2$	0.01 \pm 0.02	$\alpha_1 \times \alpha_2$	0.012 \pm 0.009
$\alpha_1 \times \varepsilon$	-0.00 \pm 0.02	$\alpha_1 \times \varepsilon$	0.010 \pm 0.009
$\alpha_2 \times \varepsilon$	0.00 \pm 0.02	$\alpha_2 \times \varepsilon$	0.000 \pm 0.009

Para apreciar las diferencias de textura existentes entre los materiales generados, se muestran como ejemplo las figuras de polos (100) correspondientes a los materiales 2, 5, 9 y 17, tomados del conjunto de 32 (tabla 1, Fig. 3). Cada uno de los cuatro materiales citados adopta el valor máximo para una componente ideal particular, mientras que el resto de las componentes asume el valor mínimo. Como detalle informativo se expresa el número de material y entre paréntesis la componente que presenta el valor máximo: Material 2 (α_1), Material 5 (γ_1), Material 9 (γ_2) y Material 17 (ε).

Mediante la aplicación del método detallado en la sección 2.4, se procesaron los valores calculados de R_m y ΔR para efectuar así el cálculo de los efectos individuales y de dos factores. El desvío estándar de las estimaciones se determinó despreciando los efectos de tres, cuatro y cinco factores, obteniéndose valores de $s_{R_m}=0.020$ y $s_{\Delta R}=0.009$ para R_m y ΔR , respectivamente. Valores de estimaciones menores a 3 desvíos estándar se han considerado despreciables. La tabla 2 muestra las estimaciones estadísticas obtenidas para los efectos principales y las interacciones de dos factores. Tanto para R_m como para ΔR se observa que la interacción de dos factores es del orden del desvío típico s , ó menor (la de tres factores es más pequeña aún y se utilizó como estimador del error cometido), considerando tales efectos como despreciables.

Los trabajos de investigación que calculan los indicadores R_m y ΔR a partir de materiales virtuales monocristalinos o con texturas débilmente dispersas en torno a una orientación ideal, sugieren que la respuesta del material observada en los tales indicadores, es el resultado de una combinación lineal de los efectos de cada una de las componentes actuando en forma separada, ponderada en la fracción de volumen que cada una de éstas ocupa en el material analizado. En estos casos se asume que la incidencia relativa observada en el estado calculado no se verá afectada por la presencia de otras componentes de textura.

La consideración de una participación conjunta de orientaciones en los cálculos de los efectos, permite distinguir la influencia en las predicciones de los diferentes niveles de las variables. De acuerdo a los valores calculados para los efectos sobre R_m , el aumento en la fracción de volumen presente en la textura del material para las componentes γ_1 , γ_2 y ε , favorece la profundidad del embutido: +0.15, +0.08 y +0.06, respectivamente (todos valores positivos y mayores a $3s$). El caso es inverso para la componente α_1 (-0.23) ya que su efecto promedio es negativo, lo que se traduce en una disminución notable de los valores de R_m al aumentar su presencia. La componente α_2 no muestra incidencia en este aspecto. Los resultados obtenidos sobre la anisotropía planar ΔR deben ser analizados con mayor cuidado y las conclusiones derivadas enunciadas con cautela. Las operaciones de embutido hacen deseables aquellos aceros con

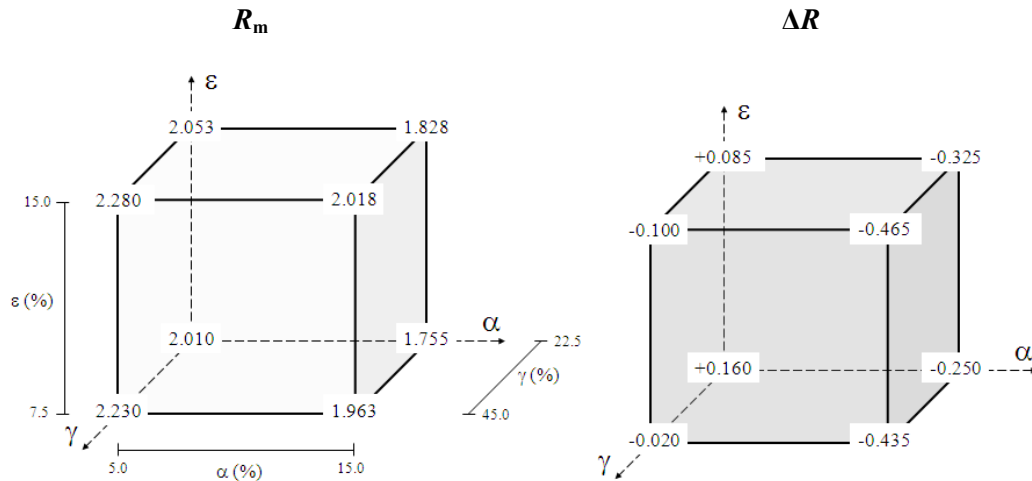


Fig. 4. Valores de los indicadores R_m y ΔR para las combinaciones de orientaciones examinadas.

valores absolutos de ΔR lo más cercanos a cero posibles, para evitar la aparición del efecto de “orejeado”. El signo de ΔR está relacionado directamente a la posición angular del orejeado ($\Delta R < 0$, orejas a 45° y 315° ; $\Delta R > 0$, orejas a 0° y 90°) [17]. El AF realizado indica que el efecto individual del aumento de la presencia de cada una de las componentes ideales en la textura entre los niveles analizados provoca una disminución del valor de ΔR . El promedio de la anisotropía planar obtenido en base a los 32 materiales virtuales es $\Delta R_{\text{PROM}} = -0.182$. Mientras el aumento de la fracción de volumen de las componentes γ_2 y ε , provoca en promedio sólo pequeñas variaciones en ΔR (-0.054 y -0.053), el incremento de componentes como α_1 y α_2 (en menor medida γ_1) tiene consecuencias notorias sobre ΔR (-0.240, -0.163 y -0.104). Sin embargo, según se observa en la tabla 1, algunos de los materiales evaluados exhiben valores de $\Delta R \geq 0$, situación que evidenciaría alguna participación no cuantificada en este trabajo de aquellas orientaciones aleatorias denominadas “fondo”.

La Fig. 4 muestra los valores de R_m y ΔR obtenidos para las diferentes proporciones de orientaciones presentes. Dada la afinidad de las respuestas en los efectos analizados, las dos componentes principales de la fibra gamma (γ_1 y γ_2) y de la fibra alfa (α_1 y α_2) se muestran agrupadas, mientras que la orientación épsilon se presenta en forma separada. Resulta claro que la participación de orientaciones del tipo gamma produce valores favorables de los indicadores de embutibilidad. En total acuerdo con lo mencionado por Ray *et al.* [3], se observa un efecto compensatorio en ΔR ante la participación conjunta en nivel alto de las componentes gamma, combinación que reduce notablemente la probabilidad de orejeado. La presencia de la componente épsilon mejora el valor de R_m aunque tiende a deteriorar la resistencia al orejeado.

Finalmente, y a partir de los valores calculados para R_m y ΔR en la tabla 1, se advierte que en particular los materiales 5, 13, 21 y 25 combinan buenas propiedades de embutibilidad debido a sus altos valores de R_m y valores de ΔR próximos a cero. Tales ejemplos pueden interpretarse como relaciones óptimas de orientaciones cristalográficas.

5. CONCLUSIONES

La tecnología de fabricación de aceros de bajo carbono para aplicaciones de embutido profundo se ha orientado fuertemente al desarrollo de procesos que permiten incrementar la intensidad de la textura en las orientaciones que componen la fibra gamma. Aunque tales transformaciones en la manufactura tuvieron el éxito esperado, los trabajos que la promovieron no contemplaron la interacción de efectos acoplados de las diferentes orientaciones que conforman la textura.

Para identificar los efectos producidos en los parámetros de embutibilidad R_m y ΔR por la presencia conjunta de diferentes componentes ideales de textura se utilizó en este trabajo un modelo de plasticidad cristalina del tipo autoconsistente, seguido de un post-proceso basado en el análisis factorial. Se

realizaron simulaciones en 32 materiales virtuales cuyas texturas varían en un rango establecido de acuerdo a datos observados en aceros de uso industrial estándar. En total acuerdo con los trabajos científicos citados, se observa que una alta intensidad de la fibra gamma es crucial en la mejora de calidad de los aceros para embutido, mientras que la fibra alfa juega el rol opuesto. Tanto para R_m como para ΔR se observa que la interacción de dos factores y mayores son del orden del desvío típico. Esta cuantificación permite validar las consideraciones realizadas sobre la capacidad de conformado del material en relación a desprestigiar tales efectos. La presencia conjunta en niveles altos de las componentes gamma produce un efecto compensatorio en ΔR que impacta favorablemente en la disminución del orejeado. Se observa además una notable incidencia de la textura en la variabilidad direccional de R . En este sentido, el análisis factorial posibilitaría una exploración refinada acerca de la influencia de tal direccionalidad en el comportamiento del material frente a procesos que induzcan estados de deformación diferentes a los del embutido profundo.

La implementación del análisis factorial como herramienta de post-proceso, permite cuantificar los efectos de las interacciones entre las variables examinadas, mejorando así la calidad de la interpretación de los resultados obtenidos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la ANPCyT, Agencia Nacional de Promoción Científica y Técnica PICT-1861 por la financiación de este proyecto y al profesor Raúl Katz por su generoso aporte a la concreción de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Ray, R.K., Jonas J.J., Butron-Guillen, M.P., Savoie, J., "Transformation textures in steel", *ISIJ International*, **34**(12), 927-942 (1994)
- [2] Engler, O., Kalz, S., "Simulation of earing profiles from texture data by means of a visco-plastic self-consistent polycrystal plasticity approach", *Materials Science and Engineering A*, **373**, 350-362 (2004)
- [3] Ray, R.K., Jonas J.J., Hook, R.E., "Cold rolling and annealing textures in low carbon and extra low carbon steels", *International Metal Reviews*, **39**(4), 129-172 (1994)
- [4] Delannay, L., Van Houtte, P., Van Bael, A., Vanderschueren, D., "Application of a texture parameter model to study planar anisotropy of rolled steel sheets", *Modelling and Simulation in Material Science and Engineering*, **8**, 413-422 (2000)
- [5] Nakamachi, E., Xie, C.L., Harimoto, M., "Drawability assessment of BCC sheet steel by using elastic crystalline viscoplastic finite element analyses", *International Journal of Material Science*, **43**, 631-652 (2001)
- [6] Choi, S., Chung, J., "Effect of C on the R-Value Anisotropy of Ti-Added IF Steels", *Science Forum*, **408-412**, 1073-1084 (2002)
- [7] Yoshida, K., Ishizaka, T., Kuroda, M., Ikawa, S., "The effects of texture on formability of aluminium alloy sheets", *Acta Materialia*, **55**, 4499-4506 (2007)
- [8] Bertinetti, M.A., Signorelli, J.W., Bolmaro, R.E., "Study on the Ferritic Steels Formability", Proceedings, 2nd IAS Conference on uses of steel, San Nicolás, Argentina, 337-346 (2004)
- [9] Choi, S-H., "Macroscopic texture and anisotropy in Ti-added IF steels", *Material Science Forum*, **408-412**, 1085-1090 (2000)
- [10] Signorelli, J.W., "SELFCON - Polycrystalline Selfconsistent Package", Reference Manual (2007)
- [11] Lebensohn, R.A., Tomé, C.N., "A self-consistent approach for the simulation of plastic deformation and texture development of polycrystals: application to Zr alloys", *Acta Metallurgica et Materialia*, **41**, 2611-2624 (1993)
- [12] Serenelli, M.J., Bertinetti, M.A., Signorelli, J.W., "Effect of crystallographic texture on formability of BCC sheet metals", *Mecánica Computacional*, **XXVIII**, 1077-1088 (2009)
- [13] Box, G., Hunter, W., Hunter, J. S., *Estadística para investigadores*, Reverté S.A., Barcelona (1989)

- [14] Asensio, J., Romano, G., Martínez, V.J., Verdeja, J.I., Pero-Sanz, J.A., “Ferritic steels. Optimization of hot-rolled textures through cold rolling and annealing”, *Materials Characterization*, **47**, 119-127 (2001)
- [15] Murakami, H., Senuma, T., “Prediction and control of earing by analysis of texture”, *ISIJ International*, **38** (6), 653-660 (1998)
- [16] Van Houtte, P., “Manual of the MTM-FHM software”, K.U. Leuven, Department MTM (1995)
- [17] Hosford, W., Cadell, R., *Metallforming-Mechanics and Metallurgy*, 3rd Edition, Prentice Hall, New Jersey (2007)

A MICROMECHANICAL STUDY ON DRAWABILITY OF LOW CARBON STEEL SHEETS. FACTORIAL ANALYSIS: A USEFUL POST-PROCESS TOOL

Abstract – The processing technology of low carbon steels for deep drawing applications has been focused on developing processes that resulted in increased intensity in the crystallographic orientations of texture close to the gamma fiber $\{111\}\langle hkl \rangle$. This trend had its origins in research based on numerical simulations of crystal plasticity. Such works assessed the individual influence of each texture component on the typical indicators of drawability: R_m (normal anisotropy) and ΔR (planar anisotropy). In order to evaluate the influence of crystallographic orientation distribution on R_m and ΔR , simulations for uniaxial tensile tests in 32 different virtual materials were performed by means of a self-consistent crystal plasticity model followed by a post-process based on factorial analysis. The latter was used to estimate the magnitude of the coupled effects caused by the presence of the considered texture components. In agreement with previous research, it was verified that a high intensity on the gamma fiber -in particular around the $\{111\}\langle 110 \rangle$ texture component- is crucial for improving the quality of a deep drawing steel. Otherwise, the orientations located in the alpha fiber $\{uvw\}\langle 110 \rangle$ play the opposite role. For both, R_m and ΔR , the computed two factor-interactions were almost equal than the assumed standard deviation. This quantification allows validating those considerations made on the drawability of the material where such effects were neglected. Furthermore, some combinations of ideal components of texture that provide the best results were identified.

Keywords – Anisotropy, Texture, Polycrystalline Plasticity, Drawability, Factorial Analysis.