



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

Estudio de la variación de la formabilidad de chapas de acero basado en el diseño computacional de la textura cristalográfica

Mariano Serenelli, María Bertinetti, Javier Signorelli

Instituto de Física de Rosario – Universidad Nacional de Rosario
Boulevard 27 de Febrero 210 bis Rosario Argentina

Tel/Fax: +54-3414808545 - E-mail: serenelli@ifir-conicet.gov.ar

RESUMEN

La aptitud que presenta una chapa frente a operaciones de conformado (formabilidad) es el resultado de un complejo e interactivo sistema formado básicamente por equipo, operador, matrices, lubricante, diseño de la pieza y material. La acumulación de deformación plástica sin estricción o rotura es una de las características deseables en aceros destinados a procesos de estampado y/o embutido. La denominada formabilidad intrínseca, propia del material, está fuertemente ligada al desarrollo de una distribución preferencial de las orientaciones cristalinas como resultado de los sucesivos procesos termo-mecánicos involucrados en la fabricación de productos planos. En este contexto, y teniendo en cuenta la creciente exigencia en servicio demandada a las partes producidas, es necesario considerar a la textura como una de las variables determinantes. De esta manera, las siguientes preguntas describen el problema: ¿cuáles son los pequeños cambios a realizarse sobre una textura existente de modo de mejorar las propiedades del material para un determinado proceso de conformado? Y finalmente, ¿cómo debe llevarse adelante ese proceso de modo de obtener el cambio deseado en la textura? El objetivo de este trabajo es explorar las relaciones adecuadas de las fracciones de volumen de las componentes ideales de textura presentes en el material laminado, conducentes a una mejora en la formabilidad, en particular aquella relacionada a procesos de embutido profundo, teniendo en cuenta sus efectos individuales e interacciones. Se utiliza para ello un modelo computacional basado en la teoría de la plasticidad cristalina. Las simulaciones realizadas y los resultados obtenidos son examinados de acuerdo a una estrategia cualitativa y cuantitativa basada en el análisis factorial (AF). El trabajo realizado muestra la potencialidad del análisis computacional de la textura como herramienta de estudio en la mejora de la formabilidad.

Palabras Claves: Anisotropía, Textura, Plasticidad cristalina, Formabilidad, Análisis Factorial.

1. INTRODUCCIÓN

La anisotropía plástica en los metales presenta una fuerte dependencia en relación al desarrollo de textura en procesos tales como solidificación, deformación, recristalización o transformaciones de fase. Consecuentemente, la respuesta mecánica del material en sollicitaciones de manufactura industrial queda fuertemente condicionada por la textura cristalográfica y morfológica derivada de su historia termomecánica. El comportamiento anisotrópico de productos planos laminados en frío puede caracterizarse 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. En general, las propiedades de embutibilidad del material se describen por medio de los valores de R a $0^\circ(R_0)$, $45^\circ(R_{45})$ y $90^\circ(R_{90})$ de inclinación respecto de la dirección de laminado original de la chapa. Valores de anisotropía planar $\Delta R = (R_0 - 2.R_{45} + R_{90})/2$ lo más pequeños posibles y valores de anisotropía normal $R_m = (R_0 + 2.R_{45} + R_{90})/4$ elevados, constituyen en general buenos indicadores de formabilidad. R_m está principalmente asociado a la profundidad de conformado, mientras que ΔR es un buen indicador de la tendencia del material a la formación de orejado en procesos de embutido [1-2]. Esta información es 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. Haciendo uso de las posibilidades que brinda la modelización de procesos de deformación plástica en materiales cristalinos mediante la simulación numérica, varios trabajos [3-5] 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. Surgen así dos líneas metodológicas adoptadas como patrón de búsqueda:

- un enfoque teórico basado en la deformación plástica de texturas ideales “puras”, compuestas por una sola orientación específica, característica de los productos laminados.
- una aproximación realista mediante la utilización de texturas ideales “puras”, discretizadas numéricamente y modificadas a través de un proceso de dispersión para obtener texturas “reales”.

Tales trabajos científicos permitieron a los ingenieros de manufactura y diseño reorientar la optimización de procesos de fabricación de materias primas y productos, por medio de una mejora en la comprensión de los fenómenos físicos asociados a las características deseables en los materiales involucrados. De acuerdo al primer patrón de búsqueda citado, Ray et al. [6] han analizado la influencia -desde una óptica individual y cualitativa- de cada una de las componentes ideales típicas presentes en texturas de materiales laminados en los valores de R_m y ΔR por medio de simulaciones basadas en el modelo de plasticidad cristalina de Taylor-Bishop-Hill, advirtiendo que la presencia de componentes $\{111\}\langle 112 \rangle$ y $\{111\}\langle 110 \rangle$ optimizan los valores de R_m y ΔR , mientras que las $\{001\}\langle 110 \rangle$ y $\{112\}\langle 110 \rangle$ conducen a valores pobres de tales indicadores, con efectos negativos sobre la embutibilidad del material. De manera similar aunque siguiendo la segunda metodología, Bertinetti et al. [7] obtienen resultados cualitativamente similares haciendo uso de un modelo del tipo autoconsistente. En ambos casos no se contempla una evaluación de la influencia conjunta de las orientaciones presentes.

Mediante la utilización de herramientas del análisis factorial (AF), el presente trabajo se enfoca en el estudio de si tales efectos pueden ser cuantificados y su valoración extendida -dentro de un marco estadístico- a las nociones de interacción e influencia entre las componentes de textura presentes en el material.

Se considera que tal conocimiento constituiría un 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 SELFCON [8], el cual implementa un modelo policristalino visco-plástico 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 [9]. 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:

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

donde \mathbf{m}^s , τ_c^s , $\dot{\gamma}_0$ y n , son los parámetros de cada sistema de deslizamiento s : tensor de Schmid, tensión crítica, velocidad de corte de referencia e inversa a 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:

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

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

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

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:

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

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

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 descrita 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 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 componentes o fibras asocian una intensidad más o menos constante a un grupo de orientaciones relacionadas unas a otras por rotaciones alrededor de una dirección cristalográfica particular. Es característico de 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 laminadas 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] ($\phi = 55^\circ$) (Figura 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 $\varphi_2 = 45^\circ$. 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 Figura 1, derecha), por lo que al describirla, 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 (Figura 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° .

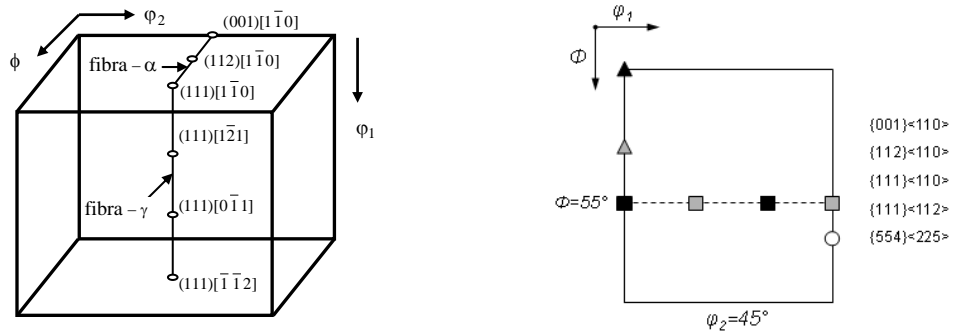


Figura 1: Vista tridimensional del espacio de Euler (convención Bunge), esquema de las fibras α y γ (izquierda); corte de la ODF en $\varphi_2 = 45^\circ$ detallando la ubicación de las componentes típicas de textura (derecha).

2.3. Diseño de texturas

Tanto la anisotropía planar como la normal dependen fundamentalmente de la textura presente en el material. 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 M. Detalles de la metodología y aplicación se encuentran en Serenelli et al. (2009) [10].

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 para el análisis factorial está dado por $N = A^x$, donde x es el número de variables estudiadas y A , el número de niveles por variable. El caso de dos niveles ($N = 2^x$), 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 [11] 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 σ 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:

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

Luego, cada estimación para los efectos tiene asociada la desviación típica, despreciándose aquellos efectos cuya estimación posea un valor absoluto $< 3\sigma$. 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 [11].

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1. Definición de niveles para el análisis factorial

Los diseños factoriales a dos niveles se caracterizan por la simpleza de aplicación y capacidad de proveer una idea preliminar de las tendencias generales del rol de cada variable en el efecto global observado.

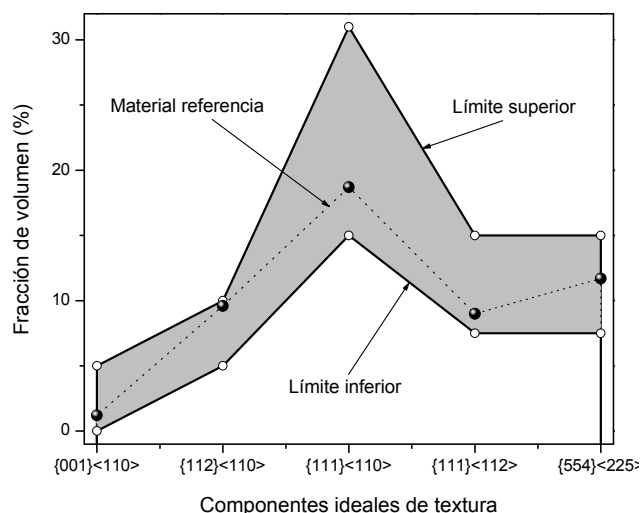


Figura 2: Ventana estándar y niveles de variación de fracciones de volumen de componentes ideales.

Es entonces necesario definir tales niveles de variación para la fracción de volumen de cada una de las componentes ideales presentes en la textura del material analizado para evaluar así su influencia en los indicadores de formabilidad seleccionados (R_m y ΔR).

Un examen exhaustivo de las texturas cristalográficas de los aceros destinados a aplicaciones de embutido (DQ-drawing quality, DDQ-deep drawing quality y EDDQ-extra deep drawing quality) de acuerdo a un criterio de componentes ideales, muestra fracciones de volumen variables pero contenidas entre valores bien definidos, lo cual se observa en la “ventana estándar” de la Figura 2, en la cual la zona sombreada representa el rango de variación usual de cada componente. Se consideró razonable asignar a cada nivel demandado por el AF, los valores de fracciones de volumen detallados a continuación: 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%), todos ellos coincidentes con los límites sugeridos por la ventana estándar.

3.2. Construcción de texturas

Definidos los valores 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 cinco componentes ideales de textura varía entre los dos niveles estipulados y las combinaciones posibles resultan en 32 (treinta y dos) materiales, cuya textura la completan orientaciones aleatorias (sin incluir a las ideales) denominadas “resto” ó “fondo” (Figura 3).

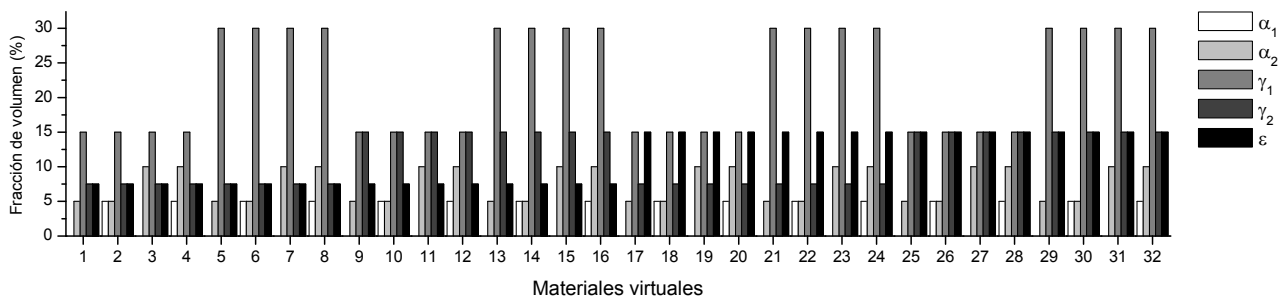


Figura 3: Distribución volumétrica de componentes ideales en cada uno de los 32 materiales virtuales.

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 (Figura 4).

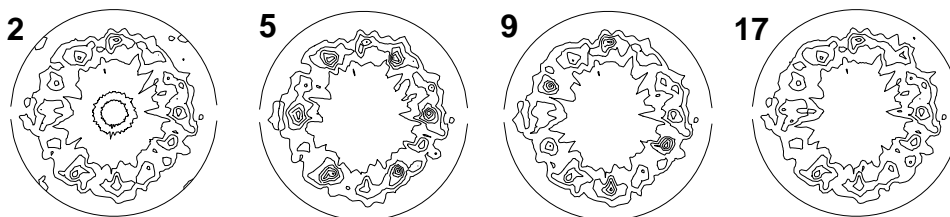


Figura 4: Figuras de polos (100) de los materiales 2, 5, 9 y 17.

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).

3.3. Calibración del modelo

El modelo 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 examen micrográfico para examinar la forma de grano promedio, estableciéndose de esta manera un modelo elipsoidal de grano 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 [10]. 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 ($H_0 = 2600$ MPa; $n = 0.212$; $m = 0.020$), 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 al 18% de deformación verdadera.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para analizar el efecto de la variación de la textura cristalográfica sobre los valores de anisotropía 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, procesándose estos últimos mediante la aplicación del método detallado en la sección 2.4. El desvío estándar de las estimaciones se determinó despreciando los efectos de tres factores y mayores obteniéndose valores de 0.020 y 0.009 para R_m y ΔR , respectivamente. Valores de estimaciones menores a 3 desvíos estándar se han considerado despreciables. La Tabla 1 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 σ , ó menor (la de tres factores es más pequeña aún y se utilizó como estimador del error cometido), considerando tales efectos como despreciables. La Figura 5 reseña los valores de los efectos individuales sobre los indicadores de formabilidad estudiados.

Según lo evidenciado por los valores calculados de 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 3σ), de aquí que el aumento de sus presencias hacen crecer el valor de R_m . 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.

Tabla 1. Efectos calculados para Rm y DR en base al diseño factorial 2⁵.

Efectos sobre Rm	Estimación ± Desvío STD	Efectos sobre ΔR	Estimación ± Desvío STD
Media	2,02 ± 0,02	Media	-0,182 ± 0,009
<i>Efectos principales</i>		<i>Efectos principales</i>	
$\gamma_1 \{111\}<110>$	0,15 ± 0,02	$\gamma_1 \{111\}<110>$	-0,104 ± 0,009
$\gamma_2 \{111\}<112>$	0,08 ± 0,02	$\gamma_2 \{111\}<112>$	-0,054 ± 0,009
$\alpha_1 \{001\}<110>$	-0,23 ± 0,02	$\alpha_1 \{001\}<110>$	-0,240 ± 0,009
$\alpha_2 \{110\}<112>$	-0,03 ± 0,02	$\alpha_2 \{110\}<112>$	-0,164 ± 0,009
$\varepsilon \{554\}<225>$	0,06 ± 0,02	$\varepsilon \{554\}<225>$	-0,053 ± 0,009
<i>Interacción de 2 factores</i>		<i>Interacción de 2 factores</i>	
$\gamma_1 \times \gamma_2$	0,01 ± 0,02	$\gamma_1 \times \gamma_2$	0,021 ± 0,009
$\gamma_1 \times \alpha_1$	-0,03 ± 0,02	$\gamma_1 \times \alpha_1$	-0,006 ± 0,009
$\gamma_1 \times \alpha_2$	0,02 ± 0,02	$\gamma_1 \times \alpha_2$	0,011 ± 0,009
$\gamma_1 \times \varepsilon$	0,01 ± 0,02	$\gamma_1 \times \varepsilon$	0,020 ± 0,009
$\gamma_2 \times \alpha_1$	-0,01 ± 0,02	$\gamma_2 \times \alpha_1$	0,005 ± 0,009
$\gamma_2 \times \alpha_2$	0,00 ± 0,02	$\gamma_2 \times \alpha_2$	0,000 ± 0,009
$\gamma_2 \times \varepsilon$	-0,00 ± 0,02	$\gamma_2 \times \varepsilon$	0,002 ± 0,009
$\alpha_1 \times \alpha_2$	0,01 ± 0,02	$\alpha_1 \times \alpha_2$	0,012 ± 0,009
$\alpha_1 \times \varepsilon$	-0,00 ± 0,02	$\alpha_1 \times \varepsilon$	0,010 ± 0,009
$\alpha_2 \times \varepsilon$	0,00 ± 0,02	$\alpha_2 \times \varepsilon$	0,000 ± 0,009

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 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 (ΔR < 0, orejas a 45° y 315°; ΔR > 0, orejas a 0° y 90°) [12].

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 ΔR_{PROM} = -0.182.

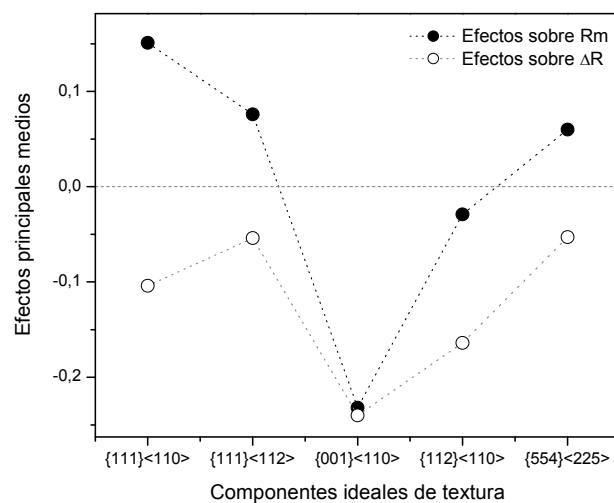


Figura 5: Efectos principales sobre Rm y ΔR de cada componente ideal de textura

Mientras el aumento de las componentes γ_2 y ϵ , provoca disminuciones menores en ΔR (-0.054 y -0.053), el incremento de las componentes α_1 y α_2 (en menor medida γ_1) tienen consecuencias notorias sobre ΔR (-0.240, -0.163 y -0.104). Sin embargo, 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". Un estudio más abarcativo es necesario para generar conclusiones más sólidas en esta problemática.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos son consistentes con las evidencias experimentales. De hecho, la tecnología de fabricación se ha orientado a desarrollo de procesos que permiten incrementar la intensidad de la fibra gamma en los aceros de bajo carbono para aplicaciones de embutido profundo y conformado en general. Hay además coherencia entre los resultados presentados y las simulaciones numéricas llevadas a cabo en las investigaciones científicas citadas como referencias bibliográficas.

La técnica utilizada (AF) fortalece el análisis de datos obtenidos teniendo en cuenta las interacciones entre variables siempre desde una óptica estadística, aspecto ausente en los análisis convencionales. En el trabajo de simulación, aunque la generación de datos no aparenta ser un problema como sí lo es en el campo experimental, la aplicación de esta herramienta estadística permite capitalizar en forma razonable los resultados obtenidos. El análisis factorial se presenta de esta manera como herramienta de interés debido a ser un proceso de relativamente bajo consumo de tiempo y que mejora notablemente la potencialidad en la interpretación de resultados.

6. REFERENCIAS

- [1] R.K. Ray, J.J. Jonas, M.P. Butron-Guillen, J. Savoie, Transformation textures in steel, *ISIJ Int.*, **Vol. 34** – No. 12, pp. 927-942, 1994.
- [2] S. Choi, J. Chung, Effect of C on the R-Value Anisotropy of Ti-Added IF Steels, *Sci. Forum*, **Vol. 408-412**, pp. 1073-1084, 2002.
- [3] K. Yoshida, T. Ishizaka, M. Kuroda, S. Ikawa, The effects of texture on formability of aluminum alloy sheets, *Acta Mater.*, **Vol. 55**, pp. 4499-4506, 2007.
- [4] L. Delannay, P. Van Houtte, A Van Bael, D. Vanderschueren, Application of a texture parameter model to study planar anisotropy of rolled steel sheets, *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, **Vol. 8**, pp. 413-422, 2000.
- [5] E. Nakamachi, C.L. Xie, M. Harimoto, Drawability assessment of BCC sheet steel by using elastic crystalline viscoplastic finite element analyses, *Int. J. Mat. Sc.*, **Vol. 43**, pp. 631-652, 2001.
- [6] R.K. Ray, J.J. Jonas, R.E. Hook, Cold rolling and annealing textures in low carbon and extra low carbon steels, *Int. Met. Rev.*, **Vol. 39(4)**, pp. 129-172, 1994.
- [7] M.A. Bertinetti, J.W. Signorelli, R.E. Bolmaro, Study on the Ferritic Steels Formability, *2nd IAS Conference on Uses of Steel*, San Nicolás, Argentina, pp. 337-346, 2004.
- [8] J.W. Signorelli, *SELFCON - Polycrystalline Selfconsistent Package* – Reference Manual, 2007.
- [9] R.A. Lebensohn, C.N. Tomé, A self-consistent approach for the simulation of plastic deformation and texture development of polycrystals: application to Zr alloys. *Acta Metall. Mater.*, **Vol. 41**, pp. 2611–2624, 1993.

- [10] M.J. Serenelli, M.A. Bertinetti, J.W. Signorelli, Effect of crystallographic texture on formability of BCC sheet metals, *Mecánica Computacional*, **Vol.** XXVIII, 1077-1088, 2009.
- [11] G. Box, W. Hunter, J. S. Hunter, *Estadística para investigadores*, Reverté S.A., Barcelona, 1989.
- [12] W. Hosford, R. Cadell, *Metforming*, Prentice Hall, New Jersey, 1993.

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.