REVISTA DE METALURGIA, 43 (2) MARZO-ABRIL, 146-156, 2007 ISSN: 0034-8570

Determinación de los indicadores de deformación bajo tensiones multiaxiales de embutición. Aplicación al acero electrocincado DC-05 (UNE en ISO 10130)*

V. Miguel**, A. Calatayud** y C. Ferrer***

Resumen En este trabajo se establece una metodología para la investigación de la tendencia a la deformación de chapa de acero de alta embutibilidad bajo tensiones multiaxiales de embutición. El método consiste en ensayar chapa en una matriz con forma de cuña produciendo en el material un estado de deformación típico de embutición (*pure shear*). Se seleccionan tres direcciones de laminación (0°, 45° y 90°) y se establece la deformación en anchura como variable de ensayo. Se ha definido un coeficiente de deformación con el fin de evaluar las variaciones obtenidas en el espesor del material constatándose la no existencia de cambios significativos en éste. También, se obtiene la tensión necesaria para realizar distintas deformaciones estableciendo correlaciones de tipo potencial tensión-deformación. Se contrastan los indicadores obtenidos con el índice de anisotropía y el de endurecimiento del material bajo condiciones normalizadas. La información obtenida permite justificar el comportamiento observado en la embutición de copas de aceros relacionando las diferentes direcciones de laminación con las irregularidades observadas en el borde de las copas embutidas.

Palabras clave Embutición. Anisotropía. Deformación. Rozamiento. Electrocincado.

A methodology to obtain strain indicators under deep drawing multiaxial stresses. Application to DC-05 electrogalvanized steel (UNE in ISO 10130)

Abstract In this work a methodology to investigate deep drawing quality steel sheets deformation tendency under multiaxial deep drawing stresses has been proposed. The method consists in assaying a sheet in a wedge die in order to introduce a pure shear estate in the material. 0°, 45° and 90° rolling directions are selected in the assays, and transversal strain is the variable considered in them. A strain coefficient ‰ has been defined in order to evaluate thickness variations in the test. Almost no changes in thickness have been registered and this indicates that strain carried out in the test is similar to that taking place in deep drawing. The stress necessary for practice a certain plastic deformation is obtained too and a potential function between them is formulated. Indicators presented in this work are compared to anisotropy and strength coefficients obtained in normalized tensile tests. These results allow us to justify the steel behaviour in the cup deep drawing processes related to ear forming.

Keywords Deep-drawing. Anisotropy. Deformation. Friction. Electrogalvanized.

^{*} Trabajo recibido el día 9 de marzo de 2006 y aceptado en su forma final el día 10 de enero de 2007.

^{**} Instituto de desarrollo Regional, Universidad de Castilla-La Mancha, Avda. España, s/n (Campus Universitario, 02006 Albacete.

^{***} Dpto. de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera, s/n, 46022. Valencia.

DETERMINACIÓN DE LOS INDICADORES DE DEFORMACIÓN BAJO TENSIONES MULTIAXIALES DE EMBUTICIÓN... A methodology to obtain strain indicators under deep drawing multiaxial stresses...



Figura 1. Tensiones representativas de la deformación en la zona del flanco de un elemento embutido.

Figure 1. Stresses in the flange deformation of a deep-drawing element.

1. INTRODUCCIÓN

La relación de embutición se establece como la razón entre el diámetro inicial del disco de partida y el diámetro del producto embutido. La deformación que tiene lugar es realizada en la zona del flanco. Es necesaria una tensión de compresión, σ_{θ} (Fig. 1) para practicar una deformación circunferencial en la chapa^[1]. Para evitar el arrugado de ésta es necesaria una tensión, σ_{t} , en la dirección del espesor. La existencia de σ_{t} supone la aparición de una tensión de fricción en el sistema matriz-chapa-prensachapas. Finalmente, el punzón transmite a la chapa una tensión radial de tracción de valor σ_{r} . En consecuencia, el material en la zona del flanco está sometido a condiciones de tracción- compresión biaxial y a una tensión de fricción en contacto plano uniaxial.

Para establecer la embutibilidad de un material, frecuentemente se utilizan los coeficientes de anisotropía y de endurecimiento. El coeficiente de anisotropía se representa, normalmente, como R y se define como la razón entre la deformación en anchura y la deformación en espesor experimentada por el material bajo determinadas condiciones de tensión. R se obtiene a partir de ensayos de tracción en condiciones normalizadas^[2], te-



Figura 2. Fenómeno de earing en copas embutidas.

Figure 2. Earing phenomena in deep-drawed cups.

niendo en cuenta la dirección de laminación respecto al plano de la chapa. La teoría matemática de la plasticidad^[3] demuestra que la relación del índice de anisotropía con la orientación en el plano queda completamente descrita si se determinan los valores de R en la dirección de laminación, R₀, en la dirección transversal, R₉₀ y en la diagonal, R₄₅. Finalmente, se define como coeficiente de anisotropía normal un valor ponderado según la ecuación (1) ^[2 y 4].

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

La relación del coeficiente de anisotropía normal con la conformabilidad del material ha sido establecida^[4]. Un elevado valor de \overline{R} permite la embutición de partes profundas. En la embutición de formas poco profundas, como carrocerías de automóvil, un valor elevado de favorece que no se produzca ondulación y arrugado de la chapa. La correspondencia entre el coeficiente de anisotropía y la formación de irregularidades en el borde del producto embutido, ears, también ha sido establecida^[5]. La dirección del plano en la que el coeficiente de anisotropía es mínimo se corresponde con la existencia de un entrante o zona no prominente (Fig. 2). Generalmente, en aceros, las zonas prominentes se corresponden con las direcciones de 0° y 90° respecto a la de laminación; en aluminio y sus aleaciones suele ser la dirección de 45º la que representa di-



Figura 3. Definición del ensayo de estirado de chapa mediante matriz cónica y pisador.

Figure 3. Sheet metal drawing test with conical shape die and blankholder.

chas zonas. En cualquier caso, el fenómeno que establece las características de embutibilidad es la textura cristalina que se obtiene en la etapa final de la chapa^[6]. Una estructura cristalina preferencial de textura apropiada permite una deformación biaxial de la chapa sin afectar en forma importante el espesor.

Se han propuesto, también, funciones analíticas que relacionan la fuerza necesaria en el punzón en el proceso de la embutición con el coeficiente de anisotropía^[7], que no se justifican experimentalmente ya que la fuerza máxima de embutición es invariable en relación a \overline{R} . Ello hace considerar que el coeficiente de anisotropía de un material cambia durante el proceso de conformado del mismo^[8].

A pesar de que el índice de anisotropía normal es un indicador de la conformabilidad del material, se obtiene bajo condiciones de tensión uniaxial para una deformación longitudinal establecida (15-20 %), que difieren notablemente del estado tensional en la embutición.

En el presente trabajo se propone un método para la determinación de un coeficiente de deformación normal bajo tensiones multiaxiales de embutición con posibilidad de seleccionar la dirección en el plano de la chapa en relación con la de laminación del material. El método permite realizar diferentes grados de deformación con lo que se puede evaluar la relación del coeficiente con la deformación practicada en el material. También, se obtienen las tensiones necesarias



Figura 4. Deformación en un ensayo de estirado de chapa de una probeta de acero electrocincado DC-05.

Figure 4. Electrogalvanized DC-05 steel in a sheet drawing test.

para establecer una determinada deformación en el plano de la chapa, lo que permite analizar comparativamente la influencia de la dirección de laminación. Esta información complementa el análisis predictivo del material frente a los procesos de embutición de chapa. El procedimiento se aplica al acero electrocincado DC-05^[9], típico de operaciones de embutición para la obtención de grandes paneles en carrocerías de automóvil.

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Definición del método de ensayo

En el presente trabajo se define un ensayo cuyo objetivo es simular las condiciones de deformación que tienen lugar en un elemento del flanco durante la embutición de una copa cilíndrica. El ensayo consiste en el estirado de probetas empleando una matriz con forma de cuña, tal y como se muestra en la figura 3. De este modo, una probeta de chapa se introduce en la matriz, obligándola a salir por el extremo más estrecho, provocando con ello una deformación en el material. Para ello es necesario aplicar una fuerza de estirado, F_E . En la figura 4 se aprecia con detalle la deformación realizada en una probeta de acero electrocincado DC-05.

La elección del ángulo de la matriz, θ , se ha establecido con base en fundamentos geométricos relacionados con la embutición de copas de 40 mm de diámetro (Fig. 5). Así, considerando 10 mm para la anchura final, h₁, de la cuña, podemos establecer un ángulo, θ , de 29°, conforme a la ecuación (2). DETERMINACIÓN DE LOS INDICADORES DE DEFORMACIÓN BAJO TENSIONES MULTIAXIALES DE EMBUTICIÓN... A methodology to obtain strain indicators under deep drawing multiaxial stresses...



Figura 5. Dimensiones de las matrices de ensayo, obtenidas mediante semejanza geométrica con la embutición de copas de 40 mm de diámetro.

Figure 5. Die dimensions with 40mm diameter drawed cups geometric similarity hypothesis.

$$\frac{h1}{\pi d} = \frac{\theta}{2\pi}$$
(2)

Finalmente, la dimensión mecanizada para h_1 , en las matrices, fue de 11 mm con el ángulo indicado, lo que supone tan solo un pequeño incremento en el diámetro de copa tomado como hipótesis. Lógicamente, la deformación en el sentido de la anchura de la chapa, impuesta en el ensayo, conduce al arrugado superficial de aquélla por efecto de pandeo del material.

Para evitar el arrugado de las probetas en el desarrollo del ensayo, es necesario introducir un fuerza de cierre mediante un pisador de forma semejante a la matriz pero de dimensiones ligeramente inferiores para permitir su alojamiento en ésta. Para la aplicación de la fuerza de cierre se diseñó un dispositivo neumático que permite alojar la matriz y el pisa (Fig. 6). El dispositivo de cierre es alojado en las mordazas inferiores de una máquina de ensayos Zwick con un alcance de 10 kN. La probeta, sujeta entre la matriz y el pisa, se sujeta por su extremo a las mordazas superiores de la máquina de ensayos.

Se ha localizado la aplicación de la fuerza de cierre sobre el conjunto matriz-pisa mediante un elemento semicilíndrico, tal como puede observarse en la figura 7.

Para controlar la fuerza de cierre se estableció la relación existente entre ésta y la presión del circuito neumático. Para ello, se midió la fuerza aplicada en el cierre mediante una célula de carga con un fondo de escala de 5000 N. La señal transmitida por la célula fue convenientemente amplificada para obtener una resolución adecuada a la experimentación. Dicha resolución fue de 1N. La presión en el circuito neumático fue medial mediante el correspondiente transductor de presión, con una resolución de 2,5 mbar. Las señales de ambos sensores fueron procesadas mediante un PC mediante la adquisición de datos con una tarjeta de 12 bits.

La matriz y el pisa han sido mecanizados en acero UNE F-5212 templado y revenido con una dureza de



Figura 6. Dispositivo de ensayo para la aplicación de una fuerza de cierre del conjunto matriz-pisa. El dispositivo está acoplado a una máquina de ensayos Zwick de 10 kN.

Figure 6.Test device for apply a clamping force to die-blankholder system. The device is put in a Zwick tensile test machine of 10 kN.



Figura 7. Vista en detalle del dispositivo de cierre y del aplicador de presión.

Figure 7. Clamping device and force applicator detailed view.

58 HRc. El acabado superficial se ha fijado mediante lijado con papel de esmeril de granulometría 220 en el sentido del deslizamiento. Se ha constatado un valor de 0,12 µm para la rugosidad aritmética media, medida en sentido perpendicular al del lijado.



Figura 8. Representación de una probeta antes (a) y después del ensayo (b).

Figure 8. Specimen view before (a) and after test (b).

2.2. Diseño y preparación de probetas

Las probetas ensayadas se prepararon cortando, mediante cizalla, tiras de chapa de diferentes anchuras, todas ellas de 0,75 mm de espesor, t. Mediante una muela de esmeril se practican un estrangulamiento y una zona con forma cónica que permiten introducir y acoplar inicialmente la probeta en la matriz. Las tiras de chapa son cizalladas seleccionando la dirección de corte respecto de la de laminación a 0°, 45° y 90°. La anchura inicial de la tira de chapa, h₀, es variable en el rango de 13,5 a 16,5 mm. Para poder evaluar las deformaciones producidas en el material tras el ensayo se han grabado de forma mecánica circunferencias de diámetro conocido, l₀ (Fig. 8). El grabado se ha llevado a cabo mediante un punzón de forma tubular aplicado mediante una ligera presión sobre la chapa, debido a la baja dureza del recubrimiento. La dimensión de la circunferencia respecto de la superficie ensayada es muy pequeña, por lo que no es atribuible ninguna desviación del resultado del ensayo al marcado del material.

Las deformaciones longitudinal, ε_l , y transversal, ε_b , en el plano de la chapa, producidas tras el ensayo pueden valorarse conforme a las ecuaciones (3) y (4).

Tabla I. Coeficiente de anisotropía R y de endurecimienton del acero DC-05 (UNE EN 10130)

Table I. DC-05 (UNE EN 10130) steel anisotropy and Lankford coefficients

Dirección	0 °	45 °	90 °	
Alargamiento (%) R n	20 1,95 0,225	20 1,85 0,225	20 2,6 0,190	R 2,06

$$\varepsilon_{l} = \ln \left(\frac{l_{1}}{l_{0}} \right)$$
(3)

$$\varepsilon_{\rm b} = \ln \left(\frac{l_{\rm t}}{l_{\rm o}} \right) \tag{4}$$

La deformación en espesor, ε_t , se obtiene a partir de aquéllas, haciendo uso de la hipótesis de invariabilidad de volumen, conforme a la ecuación (5)

$$\varepsilon_{\mathsf{t}} = \varepsilon_{\mathsf{l}} - \varepsilon_{\mathsf{b}} \tag{5}$$

La deformación equivalente, obtenida a partir del criterio de Von Mises, se establece en la ecuación (6).

$$\varepsilon_{\text{equ}} = \sqrt{\frac{3}{2} \left(\varepsilon_{\parallel}^2 + \varepsilon_{b}^2 + \varepsilon_{t}^2 \right)}$$
(6)

2.3. Caracterización del material ensayado

El material ensayado corresponde al acero electrocincado DC-05 UNE EN 10130. Se han determinado los coeficientes de anisotropía normalizados para una deformación longitudinal próxima al 20 %, obteniéndose los valores que se indican en la tabla I.

También, se han medido los valores de límite elástico, resistencia a la tracción y alargamiento de rotura (Tabla II). El recubrimiento se ha caracterizado mediante microanálisis en un microscopio de barrido (SEM). Se ha determinado una composición típica de un recubrimiento de cinc puro comercial. El espesor del recubrimiento se ha medido con un microscopio dotado de un ocular con retícula micrométrica; el espesor medido varía entre 8 y 20 µm, obteniéndose un valor medio de 14 µm.

2.4. Parámetros del ensayo

La fuerza de cierre se estableció mediante pruebas preliminares que permitieron determinar la mínima presión aparente, P_A , que evitaba el arrugado de la chapa en los ensayos con mayores deformaciones. Según esto, se ha considerado 3,5 a 5,5 MPa como valores de referencia para la presión aparente. Ésta se ha calculado dividiendo la fuerza de cierre por el área de material situado entre la matriz y el pisa, conforme a la ecuación (7).

$$P_{A} = \frac{F_{N}}{\frac{(h_{0} - h_{1})}{4 \cdot tg\left(\frac{\theta}{2}\right)} + \frac{h_{1} \cdot (h_{0} - h_{1})}{2 \cdot tg\left(\frac{\theta}{2}\right)} + \frac{h_{0} \cdot (L_{m} - (h_{0} - h_{1}))}{2 \cdot tg\left(\frac{\theta}{2}\right)}}$$
(7)

Debido a la longitud de las probetas, el ensayo se realiza a presión constante ya que la superficie del material comprendida entre la matriz y el pisa no varía. Esto permite controlar la presión aparente durante todo el ensayo.

Debido a la existencia de la fuerza de cierre se establece una tensión de compresión en el sentido del espesor y una tensión de rozamiento en ambas superficies del material ensayado. El lubricante utilizado en la realización de los ensayos fue Ferrocotte 6130, de Quaker Chemical B.V. de 63 cSt a 20 °C. Este lubricante es el mismo *prelube oil* que suelen llevar las chapas como protección anticorrosiva.

Tabla II. Características mecánicas del acero DC-05 (UNE EN 10130)

Table II. DC-05 (UNE EN 10130) mechanical properties

Dirección de laminación	Límite elástico (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Alargamiento de rotura (%)
0	150	309	46
45	160	295	43
90	158	292	47



Figura 9. Registro fuerza de estirado –carrera de un ensayo en el que se ha efectuado una deformación ε_{b} de valor correspondiente a 0,35.

Figure 9. Test drawing force versus stroke for a ε_b strain of 0.35.

2.5. Determinación de la tensión asociada a la deformación

Los ensayos realizados arrojan registros como el que se indica en la figura 9. El análisis de los diferentes puntos singulares del gráfico permite establecer la fuerza, F_E , empleada para la deformación^[9]. Los puntos característicos del ensayo corresponden al inicio y al final de la deformación en la matriz (puntos 1 y 2, respectivamente).

La determinación de dichos puntos se ha basado en las longitudes de deformación en la matriz, que son, a su vez, función de la anchura inicial, h_0 , de las probetas de ensayo. Existe, también, un efecto de plastificación del material situado entre las mordazas de la máquina de ensayo y la matriz. Esta plastificación se debe a la tensión de tracción existente. Finalmente, debe considerarse un efecto de acoplamiento inicial de la probeta en la matriz. Teniendo en cuenta lo anterior, se han estimado los valores de carrera correspondientes a los puntos 1 y 2 de cada registro de ensayo. Posteriormente, el análisis cuidadoso del registro permite apreciar dichos puntos, ubicados de manera cercana a la estimada, por ser puntos de inflexión de la gráfica.

La fuerza, F_E , se ha determinado a partir del punto 2 del registro. Para la evaluación de la misma se han tenido en cuenta ensayos realizados con condiciones similares de velocidad (100 a 200 mm/min), de presión aparente (3,5-5,5 MPa) y de lubricación. Los indicadores del rozamiento de las caras superior e inferior de las probetas de ensayo con el pisa y la matriz se han determinado previamente mediante ensayos de rozamiento con matrices planas^[10 y 11]. En este sentido, las correlaciones del coeficiente de rozamiento con la presión y la velocidad se han determinado para las condiciones de lubricación existentes en el ensayo. Partiendo de estas relaciones, se ha calculado la fuerza de rozamiento existente en el ensayo como consecuencia del contacto de la chapa con la superficie de la matriz y del pisa.

Dicha fuerza de rozamiento puede ser restada a la de ensayo, obteniendo lo que denominamos fuerza de embutición, F^e, por analogía con el proceso de conformado de copas. Esta fuerza se normaliza dividiendo por la sección de salida del material, $h_1 \cdot t$, dando lugar a la tensión de embutición, σ^e (8).

$$\sigma^{e} = \frac{F^{e}}{h_{1} \cdot t}$$
(8)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ensavo diseñado establece condiciones de contorno no existentes en los procesos de estampado de chapa, al existir rozamiento lateral de la probeta de ensayo en las paredes de la matriz. No obstante, en los ensayos realizados se ha constatado que las deformaciones longitudinales y transversales son similares en términos de valor absoluto. Esto establece que los ensavos se han realizado con tendencia a ausencia de deformación en el sentido del espesor de la chapa (pure shear), condición característica del proceso de embutición. En definitiva, se puede afirmar que las condiciones a las que se ve sometido el material en la matriz son asimilables a las que tienen lugar en procesos de estampado, aún cuando la fuerza de estirado en el ensavo no se corresponda con la aplicada en el punzón en aquéllos.

Basado en las marcas efectuadas en el material, se ha definido, por analogía con el coeficiente de anisotropía normal, R, un coeficiente de deformación, δ , que establece la relación entre la deformación transversal, $\varepsilon_{\rm b}$, y la deformación en espesor , $\varepsilon_{\rm t}$, practicadas. Considerando la hipótesis de invariabilidad de volumen, finalmente, se puede expresar el coeficiente de deformación en función de las deformaciones longitudinales y transversales experimentadas por el material en el plano de la chapa, conforme a lo establecido en la ecuación (9).

$$\delta = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I_t}\right)}{\ln\left(\frac{I_t \cdot I_1}{I_0^2}\right)}$$
(9)

Aunque las deformaciones en el sentido del espesor de la chapa son muy pequeñas, resulta interesante evaluar las variaciones existentes en el mismo como un indicador de la relación tracción-compresión experimentada por el material para distintas deformaciones transversales y evaluar la influencia de la dirección de laminación. Dado que los cambios de espesor en el material son muy pequeños, el índice, ‰, adopta valores muy elevados, lo que aconseja considerar la función inversa en lo relativo al tratamiento de los resultados.

En la figura 10 se representan los valores obtenidos para $1/\delta$, para distintas deformaciones y para las direcciones de laminación consideradas (0°, 45° y 90°). Se han evaluado ensayos realizados a diferentes velocida-



Figura 10. Relación entre 1/ δ y la deformación equivalente practicada en el material ϵ_{equ} .

Figure 10. 1/ δ versus equivalent strain ε_{equi}

Tabla III. Valores del coeficiente 1/δ en función de ladirección de laminación

Table III. 1/δ coefficient values as a function of rolling direction

Dirección laminación	0 °	45°	90 °
Valor medio δ	11,2	45,4	41,7
Valor medio(1/ δ)	0,089	0,02	0,024
Desv.típica (1/ δ)	0,167	0,193	0,108
Nº ensayos	45	16	19

des y no sólo en el rango 100-200 mm/min, ya que no es previsible que la velocidad de ensayo afecte de forma importante a la deformación practicada en el material.

Existe una gran dispersión de los resultados obtenidos lo que indica que no existe correlación de los mismos con la deformación transversal, $\varepsilon_{\rm b}$, practicada en el material. Por ello, se expresa el valor medio obtenido junto con la desviación típica y el número de ensayos realizados (Tabla III). No obstante, se observa una tendencia a la disminución de $1/\delta$ con la deformación transversal aplicada, con cambio de signo. Esto, puede ser un indicador de que para pequeñas deformaciones transversales predomina, ligeramente, la deformación debida a la tensión longitudinal de tracción en relación a la transversal de

compresión y, como consecuencia de ello, existe cierto adelgazamiento del material. Conforme la deformación transversal practicada es mayor, parece constatarse la tendencia al engrosamiento del material por predominio de las tensiones de compresión frente a las de tracción; el signo negativo de $1/\delta$ justifica este último aspecto.

El análisis de los valores medios obtenidos en relación al coeficiente $1/\delta$ establece que el menor valor obtenido corresponde a la dirección de 45°. Esto, podría ser un indicador de una menor tendencia al adelgazamiento en las condiciones de ensayo establecidas en relación con las otras direcciones de laminación. Esta apreciación es coherente con lo observado en copas embutidas de aceros, en las que se suelen observar los valles típicos de la ondulación en el borde en la dirección de 45°. Efectivamente, una menor tendencia al adelgazamiento del material justifica una menor deformación radial de tracción para una misma deformación circunferencial.

Los valores obtenidos para δ no son directamente comparables al coeficiente de anisotropía obtenido en condiciones de tracción uniaxial. Ello, es debido al hecho de que en este último caso siempre se produce disminución del espesor en el material en tanto que en condiciones de multiaxialidad puede producirse engrosamiento y el coeficiente δ toma valor negativo. En la figura 11 se representa la tensión de embutición, σ^{e} , en función de la deformación equivalente de Von Mises. Se ha establecido una modelización



Figura 11. Correlación tensión de embutición-deformación equivalente para diferentes direcciones de laminación.

Figure 11. Drawing stress as a function of equivalent strain for different lamination directions.



Figura 12. Relación de deformaciones en el proceso de la embutición de copas.

Figure12 Deformation relationship in deep drawing cups.

potencial, $\sigma^e \cdot \epsilon_{equ}$, por analogía del modelo de Hollomon en tracción uniaxial. Las correlaciones establecidas son excelentes en relación a los valores obtenidos para los correspondientes índices, R_C^2 .

Se puede observar que la dirección de laminación influye poco sobre la tensión de embutición, para el rango de deformaciones experimentado. Un análisis adecuado de las gráficas puede hacerse para valores de deformación medios-altos ya que las deformaciones ensayadas no representan relaciones de embutición, $r_{\rm E}$, elevadas. La relación de deformaciones efectuadas, con su equivalencia en la embutición de copas (Fig. 12), puede establecerse conforme a la ecuación (10).

$$r_{\rm E} = \frac{r_0}{r} = \frac{h_0 / \theta}{h_1 / \theta} = \frac{h_0}{h_1} \approx \frac{l_0}{l_t} \tag{10}$$

Por tanto, se pueden considerar como significativos valores de deformación a partir de 0,20 para ε_{equ} . A partir de dicho valor, la posición relativa de las curvas es coherente con el coeficiente de endurecimiento obtenido en condiciones normalizadas de tracción uniaxial para las que n era coincidente en 0 y 45° y ligeramente menor para 90°.

Los valores de los exponentes de las modelizaciones establecidas son notablemente mayores que los obtenidos para deformaciones en tracción uniaxial, lo que es coherente con los mayores endurecimientos conseguidos en los procesos de deformación con compresión.

Por extrapolación de las curvas representadas en la figura 11 se puede predecir que para mayores deformaciones (típicas del proceso de embutición), el comportamiento para las distintas direcciones será más diferenciado, estableciendo que, para una tensión dada, la deformación correspondiente será mayor en la dirección de 90°.

Esto, junto con la mayor o menor tendencia al adelgazamiento del material, conforme a lo representado en la figura 10, permite justificar prominencias en las direcciones de 0 y 90° con mayor desarrollo para esta última dirección. Este resultado es coherente con los obtenidos por Zaky *et al*^[5] en ensayos de copas de aceros con bajo contenido en carbono, en los que la formación de las irregularidades indicadas *ears* marca diferenciaciones mayores, comparativamente, entre estas dos direcciones, conforme la razón de embutición aplicada es mayor.

CONCLUSIONES

Se ha establecido un procedimiento de ensayo que permite someter al material a tensiones multiaxiales con deformaciones típicas del proceso de embutición de chapa, sin variación en el espesor (*pure shear*). La definición del procedimiento se basa en el principio de semejanza geométrica con el proceso de embutición de copas.

Se ha definido un coeficiente de adelgazamiento del material, δ , para las condiciones indicadas de multiaxialidad que complementa la información dada por el coeficiente de anisotropía normal, obtenido bajo condiciones de tracción uniaxial. Para el acero DC-05 (UNE EN 10130) y para el rango de deformaciones practicadas no existe una influencia significativa de la dirección de laminación sobre el adelgazamiento del material bajo las tensiones multiaxiales establecidas. No obstante, se puede establecer una cierta tendencia al engrosamiento para las mayores deformaciones, siendo la dirección de 45° la que presenta mayor tendencia al comportamiento indicado.

El procedimiento de ensavo reflejado permite evaluar las tensiones necesarias para practicar una determinada deformación permitiendo establecer un análisis comparativo en relación a la influencia de la dirección de laminación. De este modo, se puede evaluar el comportamiento del material bajo condiciones similares a las establecidas en ensayos de tipo simulativo (embutición de copas), pero con posibilidad de seleccionar la dirección de laminación. En particular, los coeficientes de endurecimiento obtenidos para condiciones de tensión multiaxial, exponentes de las correlaciones potenciales σ^{e} - ϵ_{b} , se ajustan mejor a los estados de deformación representados reflejando los mayores endurecimientos que se obtienen generalmente en condiciones de deformación bajo compresión. El mayor valor de los coeficientes indicados establece una mayor sensibilidad de los mismos como indicadores de la influencia de la dirección de laminación, que en el caso del acero DC-05 es poco significativa.

Las funciones obtenidas para las tensiones de embutición, junto con el coeficiente de adelgazamiento permiten justificar el comportamiento de la chapa en relación a la formación de irregularidades en el borde de las copas embutidas. Los indicadores obtenidos reflejan mejor el estado de deformaciones en el procesado del material, en relación a los indicadores obtenidos bajo condiciones normalizadas de tracción uniaxial.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D.M. Woo, Int. J. Mech. Eng. Sci. 6 (1964) 116-131.
- [2] UNE EN 10152, 1995, p.18.
- [3] R.HILL, *The Mathematical Theory of Plasticity*, Ed. Clarendon Press, Oxford, Inglaterra, 1998, pp. 321-325.

- [4] Z. MARCINIAK, J.L. DUNCAN, S.J. HU, *Mechanics of Sheet Metal Forming*; Ed. Butterworth-Heinemann., 2nd ed, Inglaterra, 2002, p.11.
- [5] A.M. ZAKY, A.B. NASSR, M.G. EL-SEBAIE, J. Mater. Process. Technol., 76 (1998) 203-211.
- [6] K.SIPOS, J. MARTÍNEZ, N. BURGOS, H. PRESENTI, *Rev. Metal. Madrid* Vol. Extr. (2005) 58-63.
- [7] D.C. CHIANG, S. KOBAYASHI, *J. Eng.*. *Ind.*, *Trans. ASME* 11 (1966) 443-448.
- [8] N. KAWAI, N. HAYASHI, S. MATSUI, *Trans. ASME*, 110 (1998) 376-383.
- [9] UNE-EN 10130, 1999, p.4.
- [10] V. MIGUEL, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 2005.
- [11] V. MIGUEL, C. FERRER, A.CALATAYUD, A. MARTÍNEZ, J.COELLO, *III Cong. Ibérico de Tribología*, Guimaráes, Portugal, 2005, Sousa Miranda (Ed), 1-7.