

Análisis experimental-numérico de la plantilla para el conformado plástico mediante embutido de una abrazadera metálica

Alfonso Campos-Vázquez
Alejandro Escamilla-Navarro
Antonio González-López

Instituto Politécnico Nacional,
Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingenierías
y Tecnologías Avanzadas (UPIITA).
Av. IPN núm. 2580, Colonia Barrio la Laguna Ticomán,
Delegación Gustavo A. Madero, CP 07340, México DF.
MÉXICO.

Teléfono 57296000 ext. 56882

correo electrónico (email): ing_campos@hotmail.com
aescamin@hotmail.com
aglopez@hotmail.com

Recibido 09-05-2012, aceptado 29-01-2013.

Resumen

Los procesos de conformado de metales, como los que se llevan a cabo con láminas metálicas, son de amplio uso en la fabricación de gran cantidad de partes automotrices, de electrodomésticos y muchas otras ramas industriales. En el presente trabajo se estudia el análisis plástico del embutido de una abrazadera para tubo, utilizado en bicicleta para variar la altura del asiento del conductor; en el que se determinan las propiedades de endurecimiento y módulo anisótropo del material, para ser utilizadas en un paquete de elementos finitos y obtener la formabilidad de la lámina para el embutido, con lo cual se puede determinar la forma de la plantilla de lámina necesaria para obtener la pieza con una forma predeterminada, en especial el valor del ángulo con que se debe cortar la plantilla antes de ser embutida. Finalmente se comparan los resultados numéricos con la plantilla que se produce mediante troquelado que fue diseñada con procedimientos de prueba y error.

Palabras clave: embutido, módulo anisótropo, endurecimiento plástico.

Abstract (Experimental-Numerical Analysis of the Blank Development for Plastic Forming by Drawing of a Metallic Clamp)

The metal forming processes, such as those performed with a sheet metal, are widely used in the manufacture of large numbers of automotive parts, furniture and many other industries. In this paper, the drawing of pipe clamp was analyzed. It is used to vary the height of the driver's seat in a bicycle. The anisotropic properties and hardening modulus of the material were determined. These parameters were used in a finite element code. In this way, the deformed geometry was determined. The results were used in the establishment of the required metal sheet for the manufacture of the support mentioned above. In the last stage, the numerical results were compared with the geometry of the manufactured support, which was obtained by means of a trial and error procedure.

Key words: drawing, anisotropic module, strain hardening.

1. Introducción

Se establece como definición, de procesamiento de materiales, la conversión de materias primas en productos terminados, con formas y propiedades útiles para funciones determinadas. Los metales primero son separados de minerales, dándoles formas de placas, barras, perfiles o láminas; luego son tratados mediante procesos de forja, fundición, rolado, troquelado, etc.; siendo este último el que se trata, específicamente el proceso de embutido. El troquelado es un proceso en el que se conforma chapa, normalmente metálicas, por lo que también se conoce como conformado de chapa.

La evolución de este proceso desde su concepción, diseño de partes, diseño de herramientas, han sido desarrollados lentamente y requieren de mucho cuidado. Esto ha sido con base en la experiencia, en ensayos de prueba y error, e inclusive en cierta habilidad artesanal [1]. Varios autores [2, 3, 4] coinciden en definir el embutido, como un proceso de conformación plástica, en el que un material, originalmente plano (lámina) se transforma en un cuerpo hueco por medio

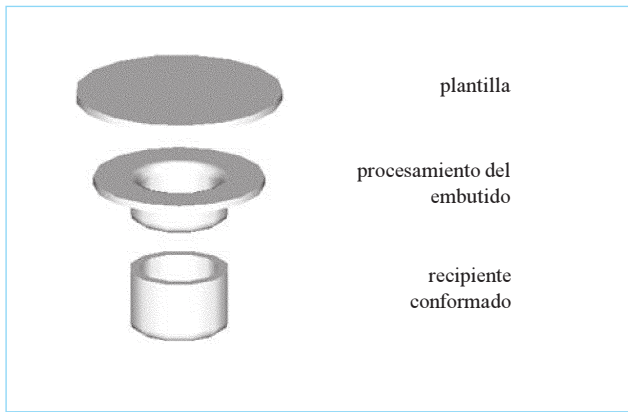


Fig. 1. Proceso de conformado de una copa mediante embutido.

de deformaciones plásticas controladas, mediante herramientas específicamente diseñadas y manufacturadas para este fin. El caso típico de embutido es el de una copa cilíndrica, tal como se muestra en la figura 1.

La pieza anterior se obtiene aplicando la fuerza de un punzón sobre una chapa (mediante una prensa), obligándola a fluir plásticamente, dentro de la cavidad de una matriz, para adquirir la forma de un recipiente hueco; esto es, el material al sobrepasar su límite elástico, alcanza la deformación plástica, obteniendo así la forma de una copa; la parte de la plantilla que no está en contacto con el punzón requiere ser sostenida con un elemento denominado planchador ya que si éste no se coloca la plantilla se arrugaría por el efecto del empuje del punzón sobre la matriz. El proceso para obtener un recipiente cilíndrico mediante embutido, es el siguiente [5]:

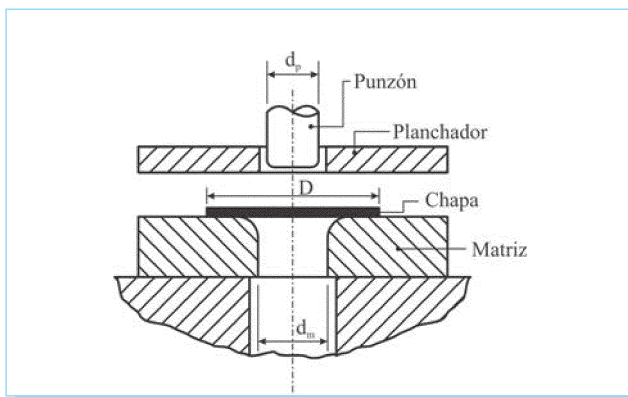


Fig. 2. Primera fase del conformado de una copa cilíndrica, colocado de la chapa.

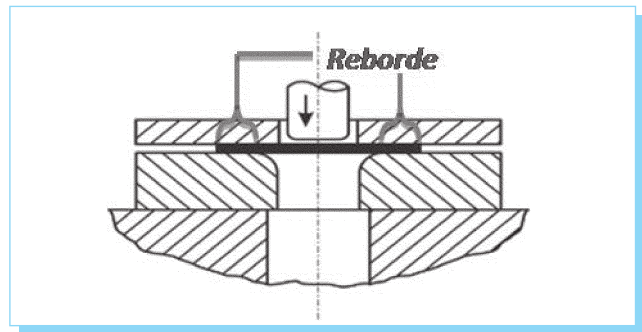


Fig. 3. Segunda fase del conformado de una copa cilíndrica, contacto planchador con chapa.

- 1) Se coloca una chapa circular, de diámetro D (plantilla) sobre la matriz para embutido (véase figura 2).
- 2) Desciende el planchador y punzón de embutido. El planchador sostiene la chapa antes del contacto entre chapa y punzón, ejerciendo presión sobre el contorno exterior, que llamaremos reborde (véase figura 3).
- 3) El punzón de diámetro d_p hace contacto con la chapa embutiéndola a través del agujero en la matriz, con lo que la chapa fluye plásticamente. El diámetro D , disminuye al diámetro D' , como se muestra en la figura 4. El reborde va disminuyendo de diámetro a medida que el punzón continúa introduciéndose en la matriz, desapareciendo finalmente cuando se ha embutido toda la pieza, o bien si se desea que quede algún reborde, se limita la profundidad de embutido.
- 4) Una vez obtenido la forma hueca deseada, el punzón y planchador se retiran ascendéndolos (véase figura 5).

El cuerpo obtenido, de altura h , está formado por el fondo y una camisa cilíndrica designada como pared lateral.

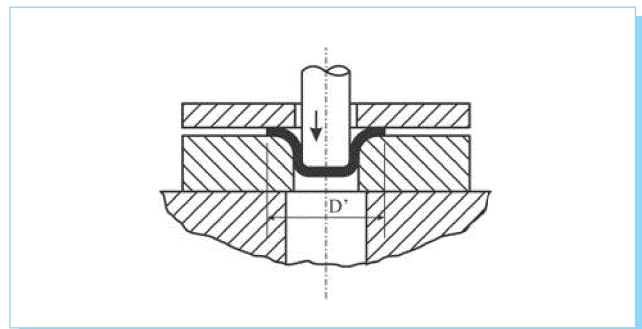


Fig. 4. Tercera fase del conformado de una copa cilíndrica, inserción del punzón.

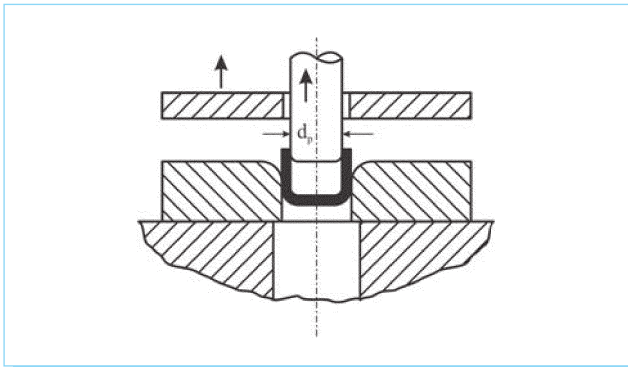


Fig. 5. Cuarta fase del conformado de una copa cilíndrica, retiro del punzón.

Se conoce como razón de embutido, a la relación entre el diámetro del desarrollo, respecto al diámetro del punzón [5]:

$$\beta = \frac{D}{d_p} \quad (1)$$

En la figura 7, se muestran los estados de esfuerzos que se presentan durante el embutido de una copa, se muestra un sector de la copa; en el reborde se tiene un estado de esfuerzo biaxial, en el sentido radial tensiona el material para introducirlo a la matriz, pero debe ser acortado mediante una compresión en la otra dirección principal. Entonces, en el proceso de embutido tienen lugar en la chapa metálica dos acciones: 1) En la pared, partícula *A*, estiramiento axial simple, el esfuerzo principal máximo es tensión, y 2) en el reborde, partícula *B*, en la dirección radial el esfuerzo principal es de tensión y en la dirección transversal de compresión (véase figura 7) [6].

Durante el proceso de embutido, la acción de la herramienta sobre la chapa se divide en las siguientes zonas de deformación (véase figura 8) [7].

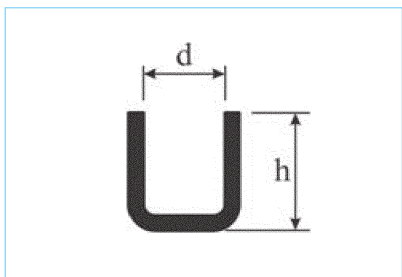


Fig. 6. Representación de una copa cilíndrica, obtenida por embutido.

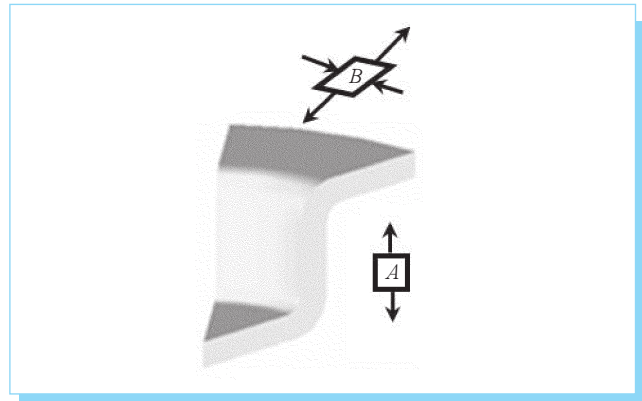


Fig. 7. Estados de esfuerzo desarrollados durante el embutido de una chapa.

La zona anular exterior *A* consiste del material en contacto con la matriz y planchador. La zona anular interior *B*, inicialmente no está en contacto ni con el punzón, ni con la matriz, y la zona circular *C* que estará en contacto con la parte inferior del punzón.

Durante el embutido, se presentan las siguientes deformaciones [7]:

1. Embutido radial puro entre matriz y planchador.
2. Doblado y deslizamiento sobre el perfil de la matriz.
3. Estiramiento entre matriz y punzón.
4. Doblado y deslizamiento sobre el radio del punzón.
5. Estirado y deslizamiento sobre el cuerpo del punzón.

En cada zona, de acuerdo con la figura 8, en las que se divide la chapa, se presentan tres de los procesos anteriores: En la zona *A* se presentan los procesos 1, 2 y 3. En la zona *B* se presentan los procesos 2, 3 y 4. En la zona *C* se presentan los procesos 3, 4 y 5.

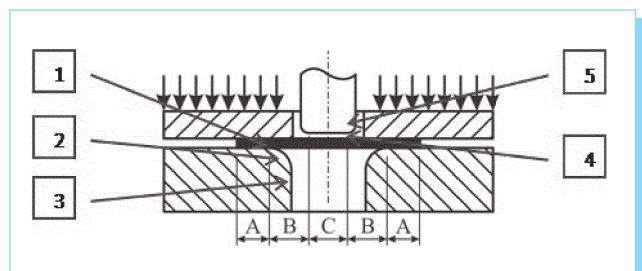


Fig. 8. Zonas de deformación durante el embutido de una chapa.

Dado que las deformaciones por embutido se presentan en varias direcciones, la anisotropía del material influye en el proceso. Esta propiedad es medida mediante el módulo de anisotropía de la deformación unitaria plástica r , definido como la relación de los incrementos de deformaciones unitarias entre el ancho y espesor, de una probeta sometida a tensión. La anisotropía de una chapa se mide considerando tres direcciones diferentes de la misma. Para la dirección de rolado de la chapa, el módulo r se define como [8]:

$$r_x = r_{0^\circ} = \frac{\epsilon_{ancho}^{0^\circ}}{\epsilon_{espesor}^{0^\circ}} \quad (2)$$

Análogamente, para un plano cortado en la dirección y , o 90° de la dirección de rolado, es:

$$r_y = r_{90^\circ} = \frac{\epsilon_{ancho}^{90^\circ}}{\epsilon_{espesor}^{90^\circ}} \quad (3)$$

Para una descripción más precisa de lo que sucede físicamente, se calcula el valor r tomando en cuenta las deformaciones unitarias reales de acuerdo con la siguiente relación [8]:

$$r = \frac{\ln(w_0/w_f)}{\ln(l_f w_f / l_0 w_0)} \quad (4)$$

Donde

- w_0 es el ancho inicial de la probeta
- w_f es el ancho deformado en la probeta
- l_0 es la longitud inicial de la probeta
- l_f longitud deformada en la probeta

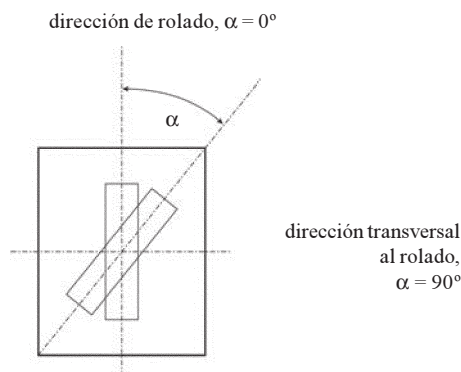


Fig. 9. Dirección de probetas para la determinación del módulo r .

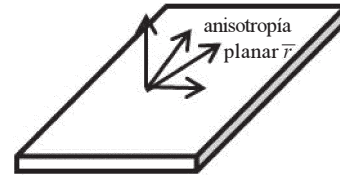


Fig. 10. Direcciones utilizadas para definir anisotropía planar y norma [6].

De acuerdo con Hosford *et al.* [9], la anisotropía del material afecta el proceso de embutido de dos maneras, una tiene que ver con la resistencia a la cedencia del material en la dirección del espesor; y la otra con la uniformidad de alargamientos en la dirección radial. Las cuales son medidas con dos cantidades denominadas anisotropía normal (r) y anisotropía planar (Δr) definidas de la siguiente forma:

$$\bar{r} = \frac{r_{0^\circ} + r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad \text{anisotropía normal} \quad (5)$$

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ} - 2r_{45^\circ}}{4} \quad \text{anisotropía planar} \quad (6)$$

Para un material totalmente isótropo $r = 1$ y $\Delta r = 0$.

Para Marciniak *et al.* [10], el estudio de un proceso de embutido, debe considerar la distribución de la deformación unitaria; concretamente la deformación unitaria efectiva $\bar{\epsilon}$. La relación entre esfuerzo y deformación unitaria empírica más común, es la mostrada en la figura 11, conocida como la ley de potencia de Hollomon-Ludwik [9]:

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (7)$$

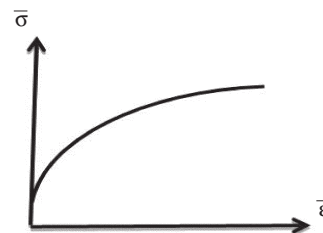


Fig. 11. Gráfica de la relación de potencia.

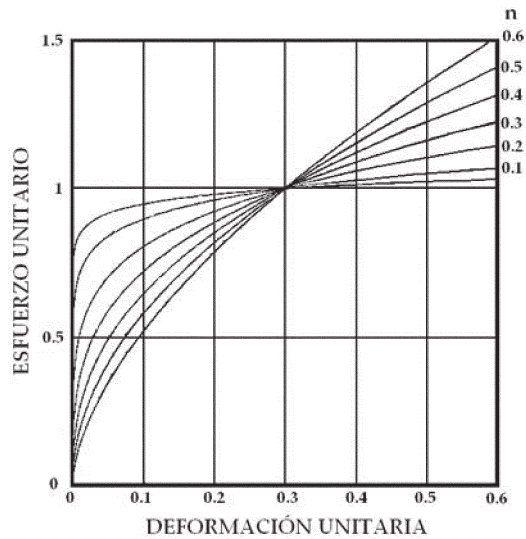


Fig. 12. Curvas esfuerzo deformación unitarios para $\sigma = Ke^n$, para varios valores de n [9].

Dicha relación, es la que se utiliza en el paquete de cómputo de elementos finitos, del cual reportaremos resultados en este trabajo; la gráfica para diferentes valores de n se muestra en figura 12.

2. Planteamiento

Las abrazaderas para tubo como las utilizadas en bicicletas, son elementos normalmente metálicos en forma de cilindro hueco que abrazan una manguera a un tubo o a dos tubos apretándolos entre sí. Para realizar el ensamble se cierra la abrazadera reduciendo su radio mediante un tornillo (véase figura 13). La sección donde se introduce el tornillo debe



Fig. 13. Abrazadera para tubo.



Fig. 14. Embutidos deficientes en abrazaderas, debidos a exceso y deficiencia de materia.

soportar el apriete, lo que requiere un espesor de lámina mínimo aumentado la resistencia mediante un estampado.

En la figura 14 se muestran dos abrazaderas, en las cuales no se logra una línea recta en el filete del embutido, en un caso hay deficiencia de material y en el otro exceso. Esto da una sensación de mala calidad.

Para lograr un perfil recto después del embutido, como el mostrado en la figura 13, se requiere una plantilla que aporte el material correcto durante el embutido. En la figura 15a se presenta la plantilla de lo que será una abrazadera y en la figura 15b se muestra la pieza con el embutido. Nótese que la parte superior del embutido no muestra deficiencia ni exceso de material como se ve en la figura 14.

El exceso o deficiencia de material después del embutido, se obtiene variando el ángulo β de la plantilla mostrada en la figura 16.

La determinación del ángulo beta, en talleres de fabricación de troqueles se hace a base de prueba y error. Para diferentes ángulos β se embute el extremo, hasta lograr la geometría deseada. Desde luego, esto requiere cortar varias plantillas

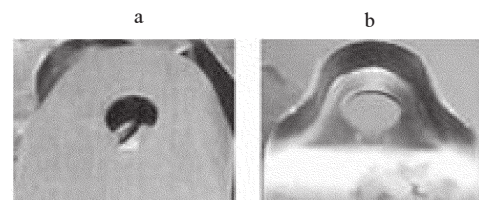


Fig. 15. a) Plantilla (lámina sin embutir), b) pieza embutida.

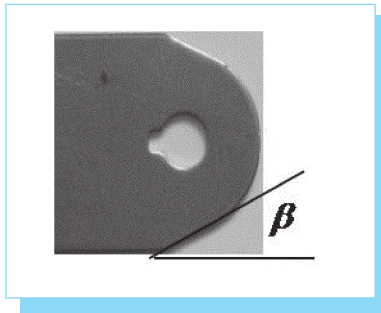


Fig. 16. Ángulo de plantilla para un embutido recto.

con diferentes ángulos, embutir y analizar resultados, hasta lograr la geometría del embutido deseado. Esto implica un costo de manufactura, pero sobre todo un tiempo que retrasa la fabricación de las herramientas.

Otra forma de estimar el ángulo es utilizando paquetes de computo que a partir de la forma que se desea obtener definan, cuál sería la plantilla de la abrazadera. Cabe mencionar que el costo del paquete de cómputo puede ser muy alto, aún más que el de los troqueles, pero reducen considerablemente el tiempo de diseño de herramientas.

El paquete de cómputo utilizado requiere para el procesamiento de la pieza, los parámetros hasta ahora definidos, además del módulo de elasticidad, la relación de Poisson y el esfuerzo de cedencia. La determinación de estos valores y la presentación de resultados del análisis numérico comparado con la determinación experimental de la fuerza necesaria para el embutido de la pieza, son el motivo de este trabajo.

3. Desarrollo

Determinación de propiedades mecánicas

Se seguirá la norma ASTM E 517-00 *standard test method for plastic strain ratio r for sheet metal* [11].

Alcance. Este método cubre la medición del módulo de deformación unitaria plástico r , mediante un ensayo de tensión especial, en chapas metálicas usadas en embutido.

Significado y uso. El módulo de deformación unitario plástico r , es un parámetro que indica la habilidad de una chapa metálica, para resistir adelgazamiento o engrosamiento de su espesor, cuando se somete a fuerzas, ya sea de tensión o compresión en el plano de la chapa. Es una medida de anisotropía plástica y está relacionado con la preferencia de las orientaciones cristalográficas, dentro de un metal policristalino. Dicha resistencia al adelgazamiento o engrosamiento, contribuye al

conformado de piezas, tales como copas, mediante el proceso de embutido. El valor r , por tanto, es considerado como una medida de la capacidad de embutido de la chapa.

Para muchos materiales, este módulo permanece esencialmente constante dentro de un rango de deformaciones unitarias elásticas. Para materiales que tengan diferentes valores de r , en diferentes niveles de deformaciones unitarias, se utiliza un exponente que indique el porcentaje de deformación unitaria, dentro de la cual el módulo r , es medido. Por ejemplo, si se utiliza una deformación plástica de un 20%, entonces se reporta r^{20} . Así, para una probeta cortada en la dirección de rolado deberá indicarse como r_0^{20} .

Probeta

- La longitud y ancho de la probeta no son críticos.
- El espesor debe ser constante, con tolerancia de ± 0.013 mm.
- Se utilizará, de acuerdo con la norma, una probeta tipo B cuyas medidas se muestran en la figura 17.

Procedimiento

- Determinar el ancho original de la probeta con tolerancia de 0.013 mm.
- Determinar la longitud calibrada de la probeta con tolerancias de 0.025 mm.
- Se aplica la carga gradual de tensión, a la probeta midiendo el cambio en la longitud y ancho calibrados. Para probetas de acero de bajo carbón, la medición se realiza en deformaciones unitarias del 20%, respecto a la ruptura.

Las probetas a ensayar son en las direcciones 0° , 45° , 90° respecto a la orientación del rolado de la lámina, mostradas en la figura 17 y sus resultados se reportan en la tabla 1.

En la tabla 1 se indican los valores inicial y final medidos de los dos parámetros indicados en la figura 17, que corresponde a, G (longitud calibrada) y w (ancho de la probeta); para las direcciones de 0° , 45° y 90° .

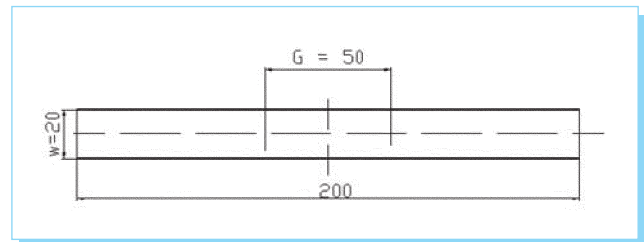


Fig. 17. Probeta de chapa calibre 16, de acuerdo con norma ASTM E 517-00 (acotaciones en milímetros).

Tabla 1. Medidas de la probetas deformadas plásticamente.

Dirección de corte de la probeta	G_0 (mm)	G_f (mm)	w_0 (mm)	w_f (mm)
r_0	49.948	55.928	19.978	18.624
r_{045}	49.922	56.073	19.976	18.758
r_{90}	49.982	56.438	19.980	18.508

Con los resultados de la medición de las deformaciones plásticas de la longitud calibrada y ancho de las probetas, para las direcciones de 0° , 45° , y 90° respecto a la dirección de rolado, reportados en la tabla anterior, se determina el módulo anisótropo r en cada dirección y el módulo anisótropo medio, de acuerdo con las ecuaciones 4, 5 y 6:

$$r_0^{20} = \frac{\ln \left[\frac{19.978}{18.624} \right]}{\ln \left[\frac{55.928 \times 18.624}{49.948 \times 19.978} \right]} = 1.636$$

$$r_{45}^{20} = \frac{\ln \left[\frac{19.976}{18.758} \right]}{\ln \left[\frac{56.073 \times 18.758}{49.922 \times 19.976} \right]} = 1.1807$$

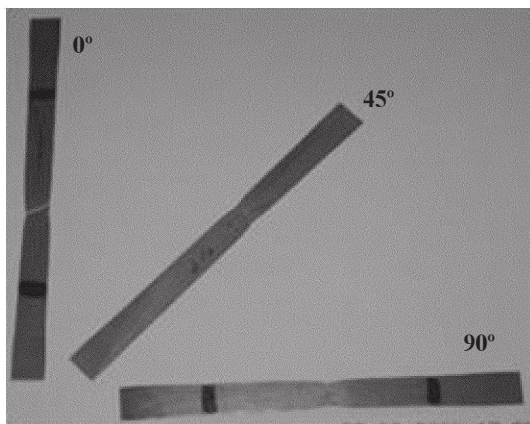


Fig. 18. Probetas ensayadas hasta la ruptura, en las direcciones de rolado (0°), a 45° y a 90° .

$$r_{90}^{20} = \frac{\ln \left[\frac{19.980}{18.508} \right]}{\ln \left[\frac{56.438 \times 18.508}{49.982 \times 19.980} \right]} = 1.702$$

Valor de la anisotropía normal:

$$\bar{r}^{20} = \frac{1.636 + 2(1.1807) + 1.702}{4} = 1.425$$

Valor de la anisotropía planar:

$$\Delta r^{20} = \frac{1.636 - 2(1.1807) + 1.702}{4} = 0.9766$$

Determinación del exponente de endurecimiento por deformación n .

Se siguió la norma ASTM E 646-91 *Tensile Strain-Hardening Exponents (n-values) of Metallic Sheet Materials* [13]. Esta norma se describe brevemente a continuación:

Alcance. Esta prueba cubre la determinación del exponente de endurecimiento por deformación con el ensayo de tensión de chapas metálicas, para materiales que siguen el comportamiento descrito por la ecuación denominada ley de potencia de Hollomon (ecuación 7) utilizable para chapas de espesores que varían de 0.13 mm a 6.4 mm.

Significado y uso. Este método es útil para estimar la deformación unitaria durante el endurecimiento por deformación en el ensayo uniaxial de tensión. Prácticamente provee un parámetro empírico, para evaluar la resistencia a la formabilidad relativa, para sistemas metálicos similares. El exponente de endurecimiento por deformación es también una medida del incremento de resistencia de un material debido a la deformación plástica; el cual puede determinarse sobre toda la curva esfuerzo deformación unitarios de ingeniería, o cualquier porción específica de la curva.

La máquina universal de ensayos, a través del paquete de cómputo Trapezium proporciona los datos de carga deformación, los cuales se grafican mediante el paquete Excel (véase figura 19).

Se calculan los valores de los esfuerzos y deformaciones unitarios reales:

$$\sigma_R = S(1 + \epsilon) \quad (8)$$

$$\sigma_R = \ln(1 + \epsilon) \quad (9)$$

Donde S , es el esfuerzo de ingeniería y ϵ es la deformación unitaria de ingeniería.

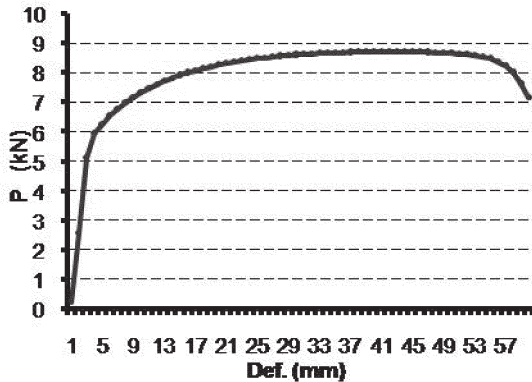


Fig. 19. Gráfica carga-deformación típica de las probetas de la figura 17.

La ecuación para el cálculo del exponente n , por regresión lineal es la siguiente:

$$\frac{\log \varepsilon \log \sigma}{D} = \frac{(-5.946)(12.617)}{5} = -15.004$$

$$\frac{\log \varepsilon \log \sigma}{N} - \sum \log \varepsilon \log \sigma = -14.967 - (-15.004) = .037$$

$$\frac{\sum \log \varepsilon^2}{D} = \frac{-5.946^2}{5} = 7.071$$

$$7.238 - 7.071 = 0.167$$

$$n = \frac{0.037}{0.167} = 0.22$$

$$K = \frac{12.717}{5} + 0.22 \frac{5.946}{5} = 609.6 \text{ Mpa}$$

En este ensayo, el sistema de adquisición de datos de la máquina proporciona las propiedades mecánicas que se resumen en la tabla 4.

Determinación experimental de la fuerza de embutido

No hay ecuaciones para la determinación de la fuerza de embutido de nuestro caso de estudio, por lo que se recurre a la utilización de una máquina de ensayos universal marca Shimadzu de 10 kN de capacidad de carga. Cabe mencionar

Tabla 2. Valores de σ para el cálculo del exponente n , de acuerdo con norma ASTM E 646-91.

N	σ MPa	σ_p real	$\log \sigma_R^2$	$(\log \sigma_p)^2$	δ (mm)
1	286.8	286.8	2.458	6.042	3.311
2	316.1	316.1	2.500	6.250	5.311
3	339.4	339.4	2.531	6.406	7.311
4	358.5	358.5	2.554	6.523	9.311
5	374.7	374.7	2.574	6.625	11.311
			$\Sigma=12.617$	$\Sigma=31.846$	

Tabla 3. Valores de ε para el cálculo del exponente n , de acuerdo con norma ASTM E 646-91.

N	ε_p real	$\log \varepsilon_R$	$(\log \varepsilon_p)^2$	$(\log \sigma_p) \times (\log \varepsilon_p)$
1	0.0326	2.458	2.211	-3.655
2	0.0517	2.500	1.656	-3.218
3	0.0706	2.531	1.325	-2.913
4	0.0890	2.554	1.105	-2.684
5	0.1071	2.574	0.941	-2.497
		$\Sigma=-5.946$	$\Sigma=7.238$	$\Sigma=-14.967$

Tabla 4. Resumen de propiedades mecánicas de la chapa.

E	210 GPa	K	609.6 GPa
μ	0.3	r_{0°	1.6360
Y	184.3 MPa	r_{45°	1.1817
n	0.22	r_{90°	1.7020

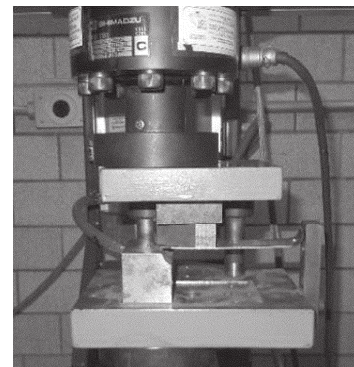


Fig. 20. Ensayo mecánico para determinación de fuerza de embutido.

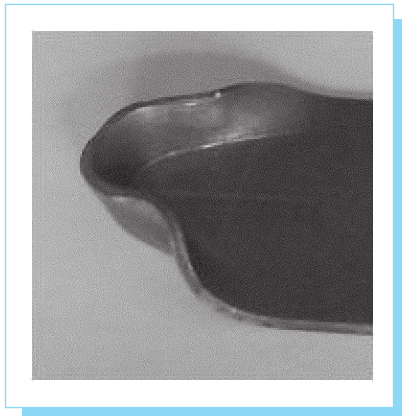


Fig. 21. Probeta embutida.

que fue necesario fabricar un marco de carga para el ensayo mencionado.

La carga máxima reportada por el paquete de control de la máquina de ensayos fue de 5.462 kN (véase figura 22).

4. Reporte del análisis numérico

Para el análisis numérico se utiliza el paquete de computo AltairHyperform, que es un programa para análisis por el método del elemento finito para simular el conformado de chapas metálicas. Este paquete combina una solución extremadamente rápida y soluciones de conformado incrementales para manipulaciones geometrías. Provee a los ingenieros en cualquier fase del diseño del producto, rapidez de información valiosa y confiable, reduciendo tiempos de diseño.

Para la fase del preproceso, se introducen como datos las propiedades mecánicas, como el módulo de elasticidad, mó-

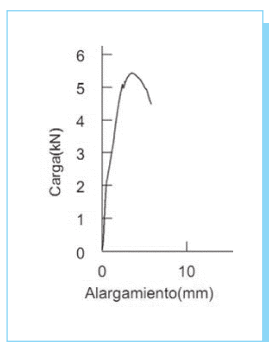


Fig. 22. Gráfica carga-alargamiento del ensayo de embutido.

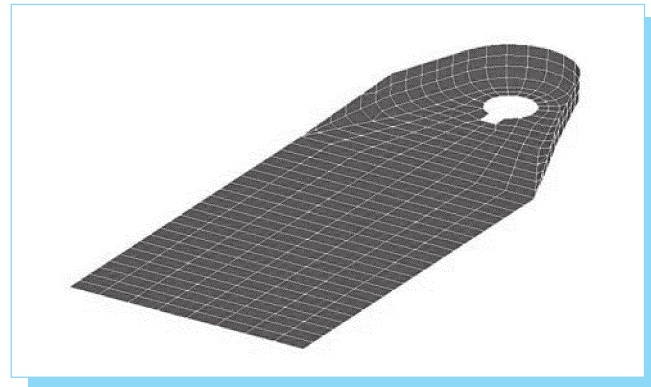


Fig. 23. Deformación por embutido deseada.

dulo de Poisson, exponente de endurecimiento n , el coeficiente K , los módulos anisótropos r a 0° , 45° y 90° , determinadas experimentalmente en los párrafos anteriores.

Se modela la sección de pieza que se desea obtener (que es el extremo a embutirse figura 15b).

El paquete procesa la información y el primer resultado que proporciona es la factibilidad del embutido. Generalmente durante el embutido se presentan dos posibles fallas: la falla por fractura (desgarramiento de la lámina); o bien debido a los esfuerzos de compresión (arrugamiento), pérdida de estabilidad. La figura 24 indica una zona de tipo marginal por arrugamiento y una muy pequeña línea de posibles arrugas. De acuerdo al análisis numérico la posibilidad de falla es mínima.

Finalmente de la simulación, se mide el ángulo β de la pieza, modelada en su forma plana.

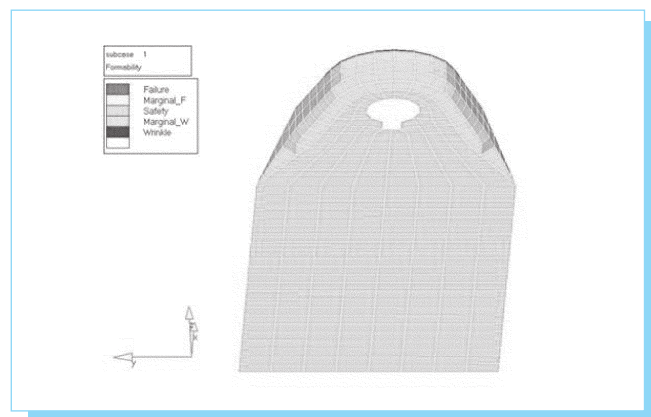


Fig. 24. Deformación de tipo marginal.

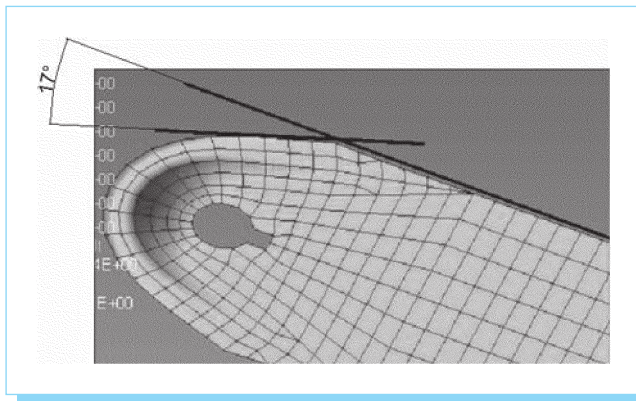


Fig. 25. Medición del ángulo de la plantilla en la simulación numérica.

En la tabla 5, se comparan los resultados obtenidos por prueba y error (experimentalmente) con el obtenido de la simulación (análisis numérico) figura 25.

5. Conclusiones

El proceso de embutido es un medio útil para fabricación de productos a partir de láminas; si la forma a embutir presenta asimetrías es necesario determinar la plantilla adecuada para obtener partes funcionales y estéticas. Determinación que no siempre es fácil y económica.

Los métodos computacionales son una opción para reducir considerablemente el tiempo de obtención de dimensiones de plantillas de formas asimétricas por embutido. Para el caso de estudio, el valor de la carga de embutido, numérico contra experimental presenta una variación menor al 5%.

El ángulo en el extremo de la plantilla, determinado por prueba y error, con respecto al proporcionado por la simulación numérica, tiene una variación marginal del 2.85%, lo cual es aceptable.

Tabla 5. Comparación del ángulo de la plantilla.

	experimental	numérico
ángulo	17.5°	17°

Es claro que este tipo de procesos de manufactura satisface las necesidades de las piezas requeridas. Sin embargo, se inducen esfuerzos residuales. Esto no tan solo ocurre en este proceso de manufactura sin arranque de viruta. En [14] se ilustra el caso del granallado.

Referencias

- [1] S. P. Keeler, "Sheet Metal Stamping Technology- Need for Fundamental Understanding", en D. P. Koistinen and N. M. Wang, *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Plenum Press, N. Y. 1977.
- [2] D. A. Smith, *Die Design Handbook*, 3ª ed., Society of Manufacturing Engineers, USA, 1990.
- [3] I. Suchy, *Handbook of Die Design*, 2ª ed., McGraw-Hill Professional, USA, 2005.
- [4] B. Vukota, *Metal Shaping Processes*, Industrial Press Inc. N. Y., 2010.
- [5] Oeheler y Kaiser, *Herramienta de troquelar estampar y embutir*, España: Gustavo Gili, 1977.
- [6] W. Johnson, y P. Mellor, *Engineering Plasticity*, Great Britain: Van Nostrand Reinhold Co., 1973.
- [7] E. M. Mielnik, *Metalworking Science and Engineering*, USA: McGraw Hill, 1991.
- [8] W. F. Hosford, y R. MCaddell, *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*, 4ª ed., USA: Cambridge University Press, 2011.
- [9] W. F. Hosford, *Mechanical Behavior of Materials*, 2ª ed., USA: Cambridge University Press, 2010.
- [10] Z. Marciniak, J. Duncan, y J. Hu, *Mechanics of sheet metals*, 2ª ed., UK: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [11] Norma ASTM E 517-00 *Standard Test Method For Plastic Strain Ratio r For Sheet Metal*.
- [12] A. Campos, "Análisis del conformado plástico del embutido de una abrazadera par tubo por medio del método de elemento finito", Tesis de Maestría, Ingeniería Mecánica, Instituto Politécnico Nacional SEPI-ESIME-Zacatenco, México DF, México, 2006.
- [13] Norma ASTM E 646-91 *Tensile Strain-Hardening Exponents (n-values) of Metallic Sheet Materials*.
- [14] G. Urriolagoitia-Sosa, G. Urriolagoitia-Calderón, L. H. Hernández-Gómez, B. Romero Ángeles, C. Torres Torres, y R. Rodríguez Martínez, "Evaluación numérica del proceso de granallado y determinación del campo de esfuerzos residuales por medio del método de respuesta de grieta", *Métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, vol. 26, núm 3, 203-208, 2010.