



PROCEDIMIENTO DE EMBUTICIÓN

Ing. Eulogio Santos De La Cruz

RESUMEN

El proceso de embutición forma parte de los métodos de producción metal mecánicos, por tal motivo este artículo muestra en forma detallada las variables que se deben tomar en cuenta para su correcta aplicación.

ABSTRACT

The process of molding forms part of the mechanical production methods, for that reason this article shows in detail the variables that should be considered its for the correct application.

1. El proceso de embutición.

La embutición es una operación de conformación plástica, mediante la cual se transforma una chapa metálica en un cuerpo hueco. Ejemplos típicos de piezas embutidas son la fabricación de lavaderos, cubetas, envases para conservas, vainas de cartuchera, etc.; que han sido producidos mediante procedimientos de embutición profunda.

En el proceso de embutición, la chapa experimenta una transformación, por ejemplo, en una pieza cilíndrica, el diámetro D del desarrollo (disco inicial) se reduce al diámetro d del cilindro de altura h , cuyo esquema se muestra en la figura 1, donde sería suficiente plegar las partes a , b , c , ..., considerando que los pequeños triángulos a' , b' , c' , ..., son superfluos.

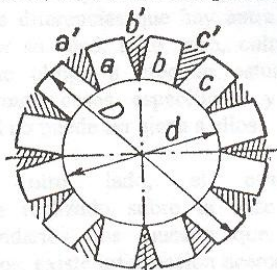


Fig. 1
Esquema de la transformación de un disco en una pieza embutida.

Sin embargo estas zonas triangulares se comprimen y ocasionan la formación de pliegues. Estos pliegues se evitan utilizando un útil llamado pisador o prensachapas; la formación de pliegues da lugar a que el espesor de la chapa sufra deformaciones, generalmente alargamientos, tanto tangenciales como radiales, conservando su espesor original sólo en el fondo.

En la figura 2 se muestra la herramienta necesaria para efectuar la embutición; está formada por:

- El punzón, éste comunica a la chapa la fuerza necesaria para deformar.
- La matriz, que juntamente con el punzón confiere la forma final deseada.
- El pisador, (prensachapas) ejerce la presión sobre la chapa contra la matriz, evitando la formación de pliegues y controla la fluencia entre la matriz y el punzón.

1.1 Juego entre el punzón y la matriz.

Es importante tener en cuenta que al diseñar una matriz se preste especial atención a este detalle, debido de la influencia conferida al producto el juego existente entre el punzón y la matriz; es obvio que un juego significativo entre estos elementos favorece el esfuerzo del punzón, aun así, existen los siguientes inconvenientes:

- a. El aumento significativo del juego ocasiona la deformación del perfil de la pared de la pieza.

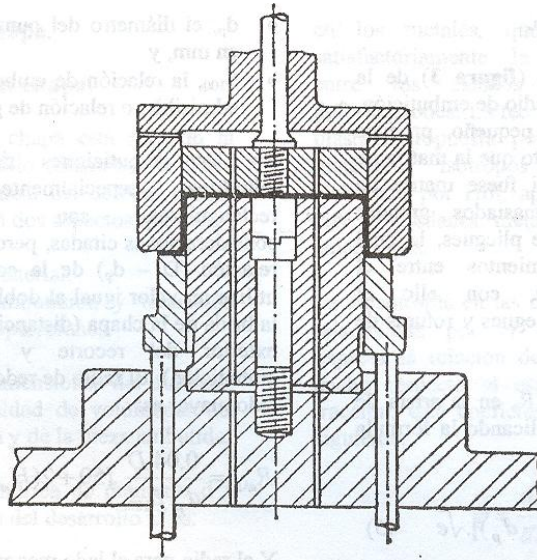


Fig. 2 Matriz de embutición

- b. El juego demasiado grande, puede producir desviación del punzón, originando la formación de ondulaciones en el borde de la pieza.
- c. El juego grande es también causante de la formación de pliegues en la pared de la pieza embutida.

Por otro lado, un juego pequeño -menor al espesor de la chapa- puede originar el aplastamiento o adelgazamiento indeseable de la pared de la pieza.

Estos detalles hacen que el juego entre el punzón y la matriz debe estar correctamente determinado; la experiencia ha demostrado que un juego igual a 1.4 veces el espesor de la chapa es ideal, siendo esta regla muy limitada para ciertos casos.

Para lograr una operación correcta de embutición se han desarrollado fórmulas empíricas siguientes:

Para chapa de acero.

$$\psi = e + 0,07a\sqrt{10e} \quad (1)$$

Para chapa de aluminio blanda

$$\psi = e + 0,02a\sqrt{10e} \quad (2)$$

Para chapas de materiales no féreos

$$\psi = e + 0,04a\sqrt{10e} \quad (3)$$

Para chapas de aleaciones resistentes a altas temperaturas

$$\psi = e + 0,20a\sqrt{10e} \quad (4)$$

Para embuticiones cilíndricas se cumple para

$$a = \beta_{100} dp/D.$$

En donde:

- d_p es el diámetro del punzón;
- D , el diámetro del recorte, y
- β_{100} , la relación de gradación que depende del número de embuticiones (pasos) y las propiedades del material.

En piezas de sección no cilíndrica, en lugar de la relación d_p/D se utiliza la raíz cuadrada de la correspondiente relación de superficies, o sea:

$$\sqrt{\frac{S_2}{S_1}}$$



1.2 Radio de embutición.

El radio de redondeado (figura 3) de la matriz se conoce como radio de embutición, si este es demasiado pequeño produce roturas en el fondo, puesto que la matriz de embutir trabaja como si fuese matriz de corte. Los radios demasiados grandes facilitan la formación de pliegues, lo cual puede originar atascamientos entre el punzón y la matriz, con ello el aplanamiento de tales pliegues y roturas de las paredes laterales.

El radio de redondeado R_e en la arista de embutición se calcula aplicando la fórmula siguiente:

$$R_e = \frac{0.04 \cdot D}{d_p \cdot \beta_{100}} \cdot [50 + (D - d_p)] \cdot \sqrt{e} \quad (5)$$

En donde:

- e es el espesor de la chapa;
- D , el diámetro de recorte;

- d_p , el diámetro del punzón de embutir en mm, y
- β_{100} , la relación de embutición máxima admisible, o relación de gradación.

En las embuticiones de piezas no cilíndricas, especialmente de piezas rectangulares, son válidas las consideraciones citadas, pero en lugar de la relación $(D - d_p)$ de la ecuación (5), se utiliza un valor igual al doble del ancho de la brida de la chapa (distancia entre la línea exterior del recorte y la arista de embutición). El radio de redondeado para el lado mayor es:

$$R_{em} = \frac{0.04 \cdot D}{d_p \cdot \beta_{100}} \cdot [50 + 2(H_a - r_a)] \cdot \sqrt{e} \quad (6)$$

Y el radio para el lado menor:

$$R_{em} = \frac{0.04 \cdot D}{d_p \cdot \beta_{100}} \cdot [50 + 2(H_b - r_b)] \cdot \sqrt{e} \quad (7)$$

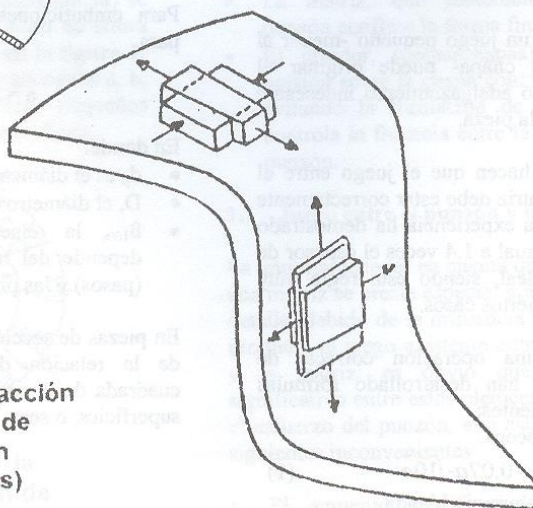
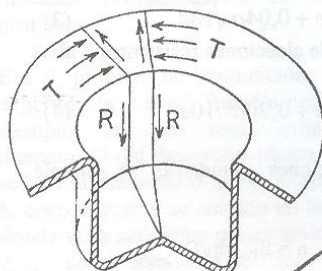


Fig. 3 y 4
Fuerzas de tracción
(radiales) y de
compresión
(tangenciales)



2. Acerca de la chapa.

2.1 Diámetro de la chapa.

El diámetro de la chapa está referido al diámetro de desarrollo (diámetro de disco inicial), la importancia del cálculo exacto está relacionado con dos aspectos que son:

- Economía del material;
- Facilidad de embutición y reducción del número de operaciones.

El cálculo de las dimensiones del diámetro se basa en la igualdad de volúmenes del material de la chapa y de la pieza embutida.

Para una pieza cilíndrica de diámetro d y altura h , el diámetro del desarrollo D es:

$$D = \sqrt{\alpha \cdot \sqrt{d^2 + 4d \cdot h}} \quad (8)$$

donde α representa la relación entre el espesor medio de la pieza embutida respecto al espesor de la chapa como sigue:

$$\alpha = \frac{e_m}{e} \quad (9)$$

2.2 Comportamiento de la chapa.

Durante la embutición la chapa está sometida a diferentes estados de tensión que provoca su deformación, resultando difícil el análisis teórico del comportamiento de las deformaciones, y difícil formular una ley del comportamiento

en los metales, que permita describir satisfactoriamente la relación existente entre los estados de tensiones y deformaciones. La teoría de la deformación plástica propuesta por von-Mises, para materiales isotrópicos y posteriormente elaborado por Hill, aplicable a materiales con propiedades metálicas eventualmente anisótropas.

La anisotropía en las chapas metálicas está relacionada por el coeficiente φ , que expresa la relación de la deformación de ancho respecto al espesor en estado de tracción, este coeficiente tiene la relación siguiente:

$$\varphi = \frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_z} \quad (10)$$

El coeficiente φ varía con la posición del eje de tracción; este eje puede relacionarse con los ejes de la chapa teniendo como referencia la dirección de laminación transversal y normal al plano de la chapa, que cumple la relación siguiente:

$$\sigma_{fx} = \sigma_{fy} \quad (11)$$

$$\sigma_{fx} = \sigma_{fx} \sqrt{\frac{1+\varphi}{2}}$$

$$f = (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_x)^2 = 2\sigma_{fx}^2 \quad (12)$$

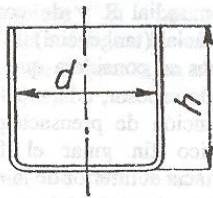


Fig. 5
Pieza embutida cilíndrica



σ_x , σ_y , σ_z representan los esfuerzos principales en las direcciones x, y, z; las direcciones x, y están contenidas en el plano de la chapa y z es perpendicular al plano de laminación.

σ_{fx} , σ_{fy} , σ_{fz} definen los valores del límite de fluencia de la chapa según las tres direcciones principales (x, y, z) medidos en el ensayo de tracción.

La ecuación (11) da cuenta de la isotropía mecánica en el plano de laminación de la chapa.

Para el metal que tiene comportamiento según el criterio de Levy-von Mises debe cumplir la siguiente condición:

$$d\epsilon_{ij} = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\lambda \quad (13)$$

σ_{ij} , ϵ_{ij} son la componente genérica de los tensores de tensiones y deformación respectivamente.

f, es el potencial plástico o criterio de fluencia, definido en la fórmula (12).

$d\lambda$, es una constante, relacionada con la capacidad de endurecimiento por acritud del metal, esto es, para un incremento de tensiones equivalentes, un material con un valor $d\lambda$ elevado, se deforma más que otro material con un $d\lambda$ más bajo.

La fórmula (13) significa que las deformaciones $d\epsilon_{ij}$ asociadas al tensor de tensiones σ_{ij} , son proporcionales a las componentes del vector gradiente del campo escalar:

$$f, \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$$

Siendo el vector deformación $d\epsilon_{ij}$ perpendicular a la superficie de fluencia f en el punto correspondiente al estado de tensiones, definido por el vector σ_{ij} . Según la ley de comportamiento del metal dado en la fórmula (11) más el criterio de fluencia dado en la fórmula (13), se obtiene las siguientes relaciones entre las componentes

de los tensores de esfuerzos y deformaciones.

$$\frac{d\epsilon_x}{(\phi+1)\sigma_x - \phi\sigma_y - \sigma_z} = \frac{d\epsilon_y}{(\phi+1)\sigma_y - \phi\sigma_x - \sigma_z} = \frac{d\epsilon_z}{2\sigma_z - \sigma_x - \sigma_y} \quad (14)$$

$$y \quad d\epsilon_x + d\epsilon_y + d\epsilon_z = 0 \quad (15)$$

La fórmula (15) tiene en cuenta la invariabilidad del volumen del material durante la deformación plástica.

Para una chapa metálica sometida a un estado plano de tensiones con $\sigma_z=0$, las fórmulas (13) y (14) tienen las formas siguientes:

- Según criterio de fluencia:

$$\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_x^2 \sigma_y^2 \left(\frac{2\phi}{\phi+1} \right) = \sigma_{fx}^2 \quad (16)$$

- Según la ley del comportamiento:

$$\frac{d\epsilon_x}{(\phi+1)\sigma_x - \phi\sigma_y} = \frac{d\epsilon_y}{(\phi+1)\sigma_y - \phi\sigma_x} = \frac{d\epsilon_z}{-\sigma_x - \sigma_y} \quad (17)$$

En el caso de embutición profunda de una copa cilíndrica de fondo plano, según la teoría de Hill-von Mises se observan dos zonas, según se muestran en las figuras 3 y 4 que son:

- La zona del ala, sometida a un estado de tensión radial R y de compresión circunferencial (tangencial) T. En estas condiciones se considera que la chapa no varía de espesor, $d\epsilon_z=0$, debido a que la función de prensachapas tiene como único fin guiar el flujo del material hacia el interior de la matriz.
- La zona de la pared, la pared está en estado de deformación plana, $d\epsilon_y=0$, la chapa no se deforma circunferencialmente al encontrarse obligada a fluir entre la matriz y el punzón (el diámetro de la copa permanece constante).



Según las condiciones indicadas, la aptitud a la embutición de un material depende de dos factores:

- La capacidad del material para fluir fácilmente en la zona del ala.
- La resistencia al adelgazamiento en la zona de la pared de la copa.

Por las consideraciones señaladas, valores elevados del coeficiente ϕ favorecerán las operaciones de embutición profunda, por que la deformación circunferencial se incrementa en la zona del ala; con la disminución del adelgazamiento ϵ_z de la chapa en la zona de la pared de la copa.

Los valores elevados del índice ϕ favorecen la deformación en la zona del ala (disminuyendo la magnitud de las tensiones necesarias para provocar fluencia en dicha zona) y dificulta la deformación plástica en la zona de la pared, incrementado el estado de tensiones necesario para la fluencia, que ocasiona la disminución de espesor de la pared de la copa.

Un criterio práctico para determinar la aptitud de embutición del material, es el cociente límite de embutición, que está definido por el cociente del radio máximo r_{\max} de una chapa embutible con el radio r del punzón:

$$\text{Cociente límite de embutición} = \frac{r_{\max}}{r} \quad (18)$$

3. Velocidad de embutición.

Cuando empieza la operación de embutición, está referida a la velocidad que tiene la colisa de la prensa en el momento de entrar el punzón en contacto con el material.

La velocidad de embutición en una operación, se calcula el número máximo admisible de vueltas por minuto del eje de manivela o bien el número máximo de carreras η_{\max} .

$$\eta_{\max} = \frac{20000 \cdot \beta_{\max}}{h \cdot \beta' \cdot \sqrt{\sigma}} \quad (19)$$

Donde:

- h representa la carrera en mm;
- σ , la resistencia del material en MPa;
- β_{\max} la relación D/d máxima posible obtenida del ensayo realizado embutiendo una cápsula; y
- β' , la relación D/d real.

Según el ángulo α de la manivela desde el punto muerto inferior o hacia el punto muerto superior, se obtiene la velocidad v de la prensa, partiendo del radio r de la manivela correspondiente a la mitad de una carrera, de la forma siguiente:

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta \cdot \sin \alpha}{60} = 0,105 \cdot r \cdot \eta \cdot \sin \alpha \quad (20)$$

4. Esfuerzo de embutición.

4.1 Presión del pisón.

Cuando la presión del prensachapas es elevada, la chapa queda frenada y se rompe por la arista de embutición. Pero si ejerce poca presión, se forman pliegues en la zona de la brida de chapa entre el borde exterior del recorte y la arista de embutición.

La formación de pliegues por debajo de la arista de embutición, raramente se debe a que el prensachapas ejerza poca presión, sino que, en la mayoría de las veces, se debe a que el radio del punzón, o bien, el redondeado de la arista de embutición, son demasiado grandes, puede ser que la chapa es muy irregular en lo que respecta a su espesor o a su resistencia.

La presión p_n del prensachapas se obtiene aplicando la siguiente expresión.

$$P = c \left[(\beta - 10)^2 + 0,5 \frac{d}{100e} \right] \cdot \sigma \quad (21)$$

- β es la relación de diámetros D/d antes de iniciar la deformación;
- d , el diámetro del punzón;



- σ , la resistencia del material MPa.; y
- El coeficiente c tiene un valor comprendido entre 0,2 y 0,3; en este cálculo puede dársele un valor aproximado de 0,25.

La fuerza del pisón, P_n , se calcula también utilizando la presión específica, del diámetro D del desarrollo, del diámetro de la matriz d_m y del radio de la arista de embutición r como sigue:

$$P = p \frac{\pi}{4} [D^2 - (d_m + 2r)^2] \quad (22)$$

y mediante la siguiente relación

$$p = P_n \frac{D^2 - (d_m + 2r)^2}{D^2 - (d_m + 2r)^2} \quad (23)$$

La presión del pisón sujetador de la chapa se da generalmente en calidad de presión inicial.

4.2 Fuerza ejercida por el punzón.

La fuerza ejercida por el punzón en una embutición cilíndrica depende de los siguientes factores:

- De la resistencia media a los cambios de forma,
- Del diámetro de embutición, del diámetro del recorte y del espesor del material.

En cambio la presión del prensachapas, la velocidad de la operación de embutición, el redondeado de la arista de embutición, el juego entre el punzón y la matriz, aun el tipo de lubricante tienen una influencia insignificante sobre la magnitud de la fuerza que ha de ejercer el punzón.

La fuerza P_z , ejercida por el punzón para piezas cilíndricas sencillas, puede calcularse así:

$$P_z = \frac{d \pi e \kappa}{n_{for}} \left[\ln \frac{D}{d} - c \right] \quad (24)$$

Donde:

- d es el diámetro del punzón de embutición;
- D , el diámetro del recorte;
- e , el espesor de la chapa, en mm;
- κ la resistencia media al cambio de forma, en MPa.; y
- Para el coeficiente de cambio de forma, n_{for} los valores están entre 0,5 y 0,65

Por resultar difícil estimar el valor c , la ecuación (24) se representa en la siguiente forma:

$$P_z = 5 d e \kappa \ln \beta \quad (25)$$

donde $\beta = \frac{d}{D} \quad (26)$

Cuando se trata de embuticiones cilíndricas que requieren pasos sucesivos, para el cálculo de la fuerza de embutición sirve la misma fórmula (25); solamente se dispone, en lugar de $\beta = D/d_1$, un valor $\beta = d_1/d_2$ o bien, $\beta = d_2/d_3$, etcétera; de tal manera que la fórmula para la embutición en fases sucesivas queda como sigue.

$$P_z = 0,5 P_{z1} + 5 d_2 e \kappa \ln \frac{d_1}{d_2} \quad (27)$$

Bibliografía.

- Introducción a la mecánica de sólidos, Irving Shames.
- Mecánica del medio continuo, George Mase.
- Elementos de teoría de plasticidad, principios fundamentales, Alfredo Saenz y A. O. Lucaioli.