

### 3.3.3. EMBUTIDO

El embutido es una operación de formado de láminas metálicas que se usa para hacer piezas de forma de copa y otras formas huecas más complejas. Se realiza colocando una lámina de metal sobre la cavidad de un dado y empujando el metal hacia la cavidad de éste con un punzón, como se muestra en la figura 3.70. La forma debe aplanarse contra el dado por un sujetador de formas. Las piezas comunes que se hacen por embutido son latas de bebidas, casquillos de municiones, lavabos, utensilios de cocina y partes para carrocería de automóviles.

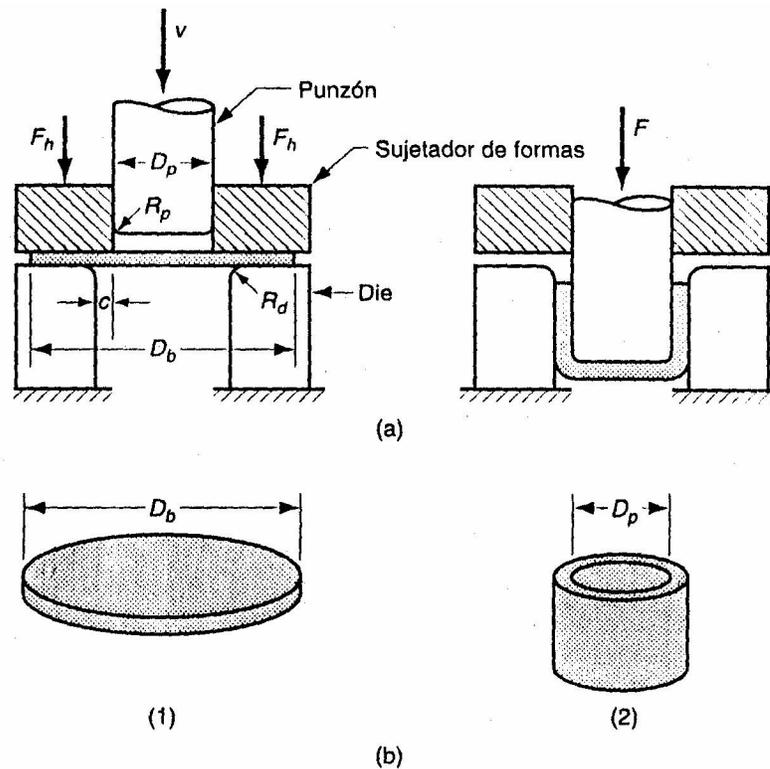


FIGURA 3.70 (a) Embutido de una parte en forma de copa: (1) inicio de la operación antes de que el punzón toque el trabajo y (2) cerca del fin de la carrera; y (b) piezas de trabajo correspondientes: (1) forma inicial y (2) parte embutida. Los símbolos indican:  $c$  = claro,  $D_b$  = diámetro de la forma inicial  $D_p$  = diámetro del punzón,  $R_d$  = radio de la esquina del dado,  $R_p$  = radio de la esquina del punzón,  $F$  = fuerza de embutido,  $F_h$  = fuerza de sujeción.

#### 3.3.3.1. Mecánica de embutido

El embutido de partes en forma de copa es la operación básica del embutido. Con las dimensiones y los parámetros que se muestran en la figura 3.70 examinaremos la operación y la mecánica del embutido. Se embute un disco de diámetro  $D_b$  dentro de un dado por medio de un punzón de diámetro  $D_p$ . El punzón y el dado deben tener un radio en las esquinas determinado por  $R_p$  y  $R_d$ . Si el punzón y el dado tienen esquinas agudas ( $R_p$  y  $R_d = 0$ ), se realizará una operación de perforado de un agujero en

lugar de una operación de embutido. Los lados del punzón y del dado están separados por un claro  $c$ . Este claro es aproximadamente 10% mayor que el espesor del material en embutido:

$$c = 1.1t \quad (3.50)$$

El punzón aplica una fuerza  $F$  hacia abajo para realizar la deformación del metal y el sujetador de partes o de formas aplica una fuerza de sujeción  $F_h$  hacia abajo, como se muestra en la figura 3.70.

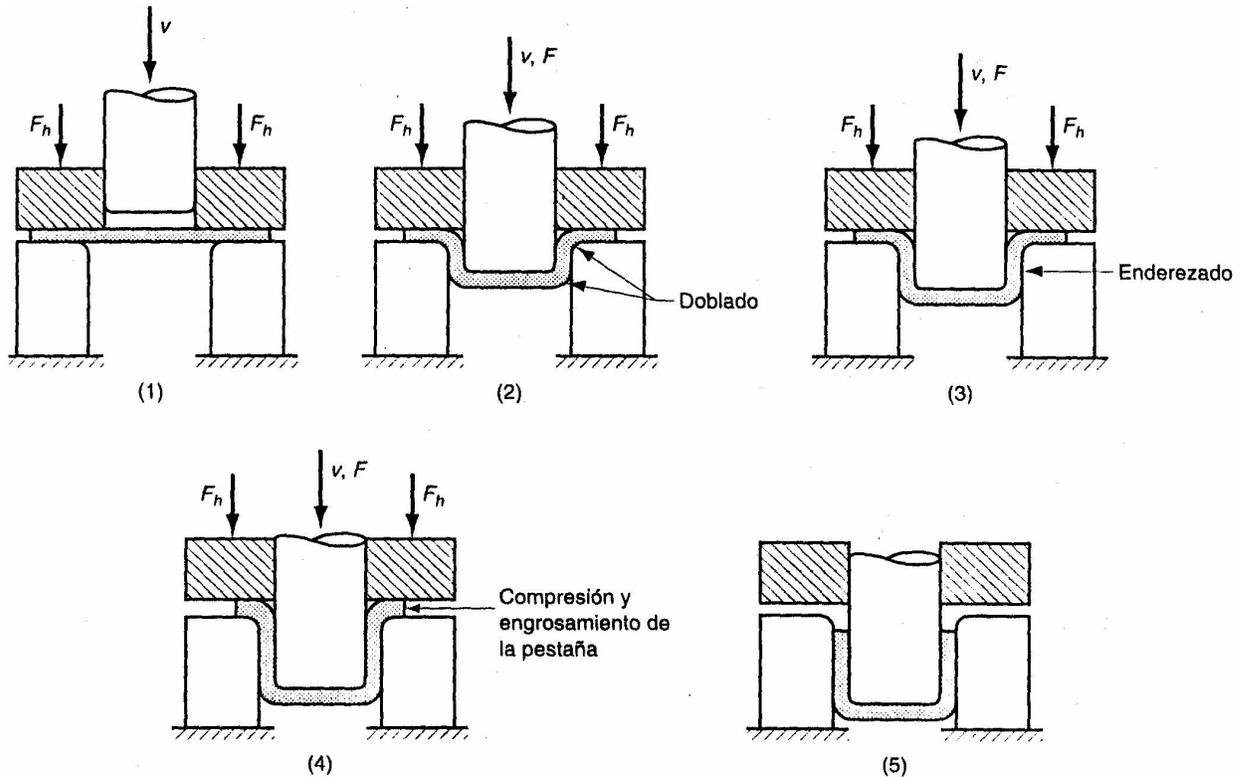


FIGURA 3.71 Etapas en la deformación del material de trabajo en el embutido profundo: (1) el punzón entra en contacto con el trabajo, (2) doblado, (3) enderezado, (4) fricción y compresión, y (5) forma final de la copa, mostrando los efectos del adelgazamiento en las paredes de la copa. Los símbolos indican:  $v$  movimiento del punzón,  $F$  = fuerza del punzón,  $F_h$  = fuerza del sujetador de formas.

Conforme el punzón se desliza hacia abajo, hasta su posición final, la pieza de trabajo experimenta una serie compleja de esfuerzos y deformaciones al tomar gradualmente la forma definida por el punzón y la cavidad del dado. Las etapas en el proceso de deformación se ilustran en la figura 3.71. Cuando el punzón empieza a empujar al material de trabajo, somete al metal a una operación de *doblado*. La lámina es doblada simplemente sobre la esquina del punzón y la esquina del dado, como se muestra en la figura 3.71(2). El perímetro exterior del disco se mueve hacia el centro en esta primera etapa pero sólo ligeramente.

A medida que el punzón avanza, ocurre una acción de *enderezado* del metal que fue previamente doblado sobre el radio del dado, etapa (3) de la figura. El metal en el fondo de la copa, así como a lo

largo del radio del punzón, se ha movido hacia abajo junto con el punzón, pero el metal que se había doblado sobre el radio del dado se endereza para que pueda jalarse dentro del claro y formar la pared del cilindro. En este punto se necesita más metal para reemplazar al que ahora forma la pared del cilindro. Este nuevo metal viene del borde exterior de la forma original. El metal en la porción exterior de la forma se jala o *embute* hacia la apertura del dado para sustituir al metal previamente doblado y enderezado que ahora forma la pared del cilindro. De este tipo de flujo de metal a través de un espacio restringido es de donde toma su nombre el proceso de embutido.

Durante esta etapa del proceso, la fricción y la compresión en la brida juegan papeles importantes. Para que el material de la brida se mueva hacia la apertura del dado, se debe superar la fricción entre la lámina de metal y las superficies del sujetador y del dado, Inicialmente se involucra la fricción estática hasta que el metal empieza a moverse, debido al flujo de metal, es entonces que la fricción cinética gobierna el proceso. La magnitud de la fuerza de sujeción aplicada por el sujetador, así como las condiciones de fricción de las dos interfases son factores que determinan el éxito de la operación de embutido. Generalmente se usan lubricantes o compuestos para reducir las fuerzas de fricción durante el embutido. Además de la fricción, ocurre también el arrugado de la brida remanente, debido a que el metal de la brida se estira hacia el centro, el perímetro exterior se hace menor, como el volumen del metal permanece constante, el metal de la brida se comprime y se hace más grueso al reducirse el perímetro. Esto ocasiona frecuentemente el arrugado de la brida remanente, especialmente cuando la lámina es delgada o cuando la fuerza del sujetador es demasiado baja. Esta condición no puede corregirse una vez que ha ocurrido. Los efectos de la fricción y de la compresión se ilustran en la figura 3.71(4).

La fuerza de sujeción aplicada sobre la forma se ve ahora como un factor crítico en el embutido profundo. Si ésta es muy pequeña ocurre el arrugamiento; si es muy grande, evita que el metal fluya adecuadamente hacia la cavidad del dado, ocasionando estiramiento y posible desgarramiento de la lámina de metal. La determinación de la fuerza adecuada de sujeción implica un delicado balance entre estos factores opuestos.

El movimiento progresivo del punzón hacia abajo ocasiona la continuidad del flujo de metal, causado por el estirado y la compresión que se han descrito previamente. Ocurre además, cierto adelgazamiento de las paredes del cilindro como en la figura 3.71(5). A la fuerza que aplica el punzón se opone la del metal, en forma de deformación y fricción durante la operación. Una parte de la deformación involucra estiramiento y adelgazamiento del metal al ser jalado sobre el borde de la abertura del dado. En una operación exitosa de embutido puede ocurrir hasta un 25% de adelgazamiento, la mayor parte cerca de la base de la copa.

### 3.3.3.2. Análisis de ingeniería del embutido

Es importante valorar las limitaciones sobre la magnitud que puede alcanzar el embutido. Frecuentemente algunas medidas simples que pueden calcularse fácilmente para una determinada operación, sirven como guía. Además la fuerza de embutido y la fuerza de sujeción son variables importantes del proceso. Finalmente, debe determinarse el tamaño de la forma inicial.

**Medidas del embutido** Una medida de la severidad de una operación de embutido profundo es la *relación de embutido DR*. Ésta se define más fácilmente para una forma cilíndrica como la relación entre el diámetro del disco inicial  $D_b$  y diámetro del punzón  $D_p$ . En forma de ecuación,

$$DR = \frac{D_b}{D_p} \quad (3.51)$$

La relación de embutido proporciona un indicativo, aunque crudo, de la severidad de una determinada operación de embutido. A mayor relación, mayor severidad de la operación. Un límite superior aproximado de la relación de embutido es un valor de 2.0. El valor limitante real para una operación depende del radio de las equinas en el punzón y el dado ( $R_p$  y  $R_d$ ), de las condiciones de fricción, de la profundidad de embutido y de las características de la lámina de metal (por ejemplo, ductilidad y grado de direccionalidad de las propiedades de resistencia en el metal).

Otra forma de caracterizar una operación dada de embutido es por la *reducción r*, donde:

$$r = \frac{D_b - D_p}{D_b} \quad (3.52)$$

El valor de  $r$  está vinculado muy estrechamente con la relación de embutido. Consistente con el límite previo de  $DR$ , el valor de la reducción  $r$  debe ser menor que 0.50.

Una tercera medida en el embutido profundo es la *relación de espesor al diámetro  $t/D_b$* , (espesor de la forma inicial  $t$  dividido por el diámetro de la forma  $D_b$ ) cuyo valor en porcentaje es recomendable que sea mayor que 1%. Conforme decrece  $t/D_b$ , aumenta la tendencia al arrugado.

En los casos en que el diseño de la parte embutida exceda los límites de la relación de embutido, la reducción  $r$  y la relación  $t/D_b$ , la forma debe ser embutida en dos o más pasos, algunas veces con recocido entre los pasos.

### EJEMPLO 22.7 Embutido acopado

Se usa una operación de embutido para formar un vaso cilíndrico con un diámetro interior = 75 mm y una altura = 50 mm. El diámetro de la forma inicial = 140 mm y el espesor del material 3 mm. Con base en estos datos ¿es posible la operación?

**Solución:** Para valorar la factibilidad determinamos la relación de embutido, la reducción y la relación espesor-diámetro.

$$DR = \frac{D_b}{D_p} = \frac{140}{75} = 1.866$$

$$r = \frac{D_b - D_p}{D_b} = \frac{140 - 80}{140} = 0.4286 \approx 42.86\%$$

$$\frac{t}{D_b} = \frac{3}{140} = 0.021 \approx 2.1\%$$

De acuerdo con estas medidas la operación de embutido es factible. La relación de embutido es menor que 2.0, la reducción es menor del 50%, y la relación espesor-diámetro ( $t/D_b$ ) es mayor al 1%. Éstos son los lineamientos generales que se usan frecuentemente para indicar la factibilidad técnica.

**Fuerzas** La fuerza de embutido requerida para realizar una operación dada se puede estimar aproximadamente mediante la fórmula:

$$F = \pi D_p t (TS) \left( \frac{D_b}{D_p} - 0.7 \right) \quad (3.53)$$

Donde

$F$  = fuerza de embutido, (N);

$t$  = espesor original de la forma, (mm);

$TS$  = resistencia a la tensión (MPa),

$D_b$  y  $D_p$  son los diámetros del disco inicial y del punzón, respectivamente, en (mm). La constante 0.7 es un factor de corrección para la fricción. La ecuación 3.53 estima la fuerza máxima en la operación. La fuerza de embutido varía a través del movimiento hacia abajo del punzón, alcanzando usualmente su valor máximo a una tercera parte de la longitud de la carrera.

La fuerza de sujeción es un factor importante en la operación de embutido. Como una primera aproximación, la presión de sujeción se puede fijar en un valor = 0.015 de la resistencia a la fluencia de la lámina de metal [6]. Este valor se multiplica por la porción del área de la forma inicial que será sostenida por el sujetador. En forma de ecuación,

$$F_h = 0.015Y\pi \left[ D_b^2 - (D_p + 2.2t + 2R_d)^2 \right] \quad (3.54)$$

Donde

$F_h$  = fuerza de sujeción en embutido, (N);

$Y$  = esfuerzo de fluencia de la lámina de metal, (MPa);

$t$  = espesor inicial del material, (mm);

$R_d$  = radio de la esquina del dado, (mm);

Los otros términos se definieron anteriormente. La fuerza de sujeción es usualmente una tercera parte aproximadamente de la fuerza o embutido [6].

### EJEMPLO 3.8 Fuerzas en el embutido

Para la operación de embutido del ejemplo 3.7, determine a) fuerza de embutido y b) fuerza de sujeción, dado, el esfuerzo a la tensión de la lámina de metal = 485 MPa y la resistencia a la fluencia = 275 MPa. El radio de la esquina del dado = 6 mm.

**Solución:** (a) La fuerza máxima de embutido está determinada por la ecuación 3.53:

$$F = \pi D_p t (TS) \left( \frac{D_b}{D_p} - 0.7 \right) = \pi \cdot 80 \cdot 3 \cdot 485 \cdot \left( \frac{140}{80} - 0.7 \right) = 383965.45N$$

(b) la fuerza de sujeción se estima por la ecuación 3.54:

$$F_h = 0.015Y\pi[D_b^2 - (D_p + 2.2t + 2R_d)^2] = 0.015 \cdot 275 \cdot \pi \cdot [140^2 - (80 + 2.2 \cdot 3 + 2 \cdot 6)^2] = 128010.2N$$

**Determinación del tamaño de la forma** Para lograr una dimensión satisfactoria de una parte embutida cilíndrica, se necesita el diámetro correcto de la forma inicial. Ésta debe ser lo suficientemente grande para suministrar el metal necesario que complete la parte. Si hay demasiado material, habrá desperdicio innecesario. Para formas no cilíndricas, existe el mismo problema de estimar el tamaño de la forma inicial, sólo que ésta no será redonda.

A continuación se describe un método razonable para estimar el diámetro del disco inicial en una operación de embutido profundo en la que se produce una parte redonda (por ejemplo, vasos cilíndricos y formas más complejas grandes con simetría axial). Como el volumen del producto final es el mismo que el de la pieza metálica inicial, el diámetro del disco inicial puede calcularse si establecemos que el volumen inicial del disco es igual al volumen final del producto, y resolvemos para el diámetro  $D_b$ . Para facilitar los cálculos, generalmente se asume que el adelgazamiento de las paredes es nulo.

### 3.3.3.3. Otras operaciones de embutido

Nuestro análisis ha sido enfocado hacia una operación convencional de embutido acopado que produce una forma cilíndrica simple en un solo paso y usa un sujetador para facilitar el proceso. Consideremos algunas variantes de esta operación básica.

**Reembutido** Si el cambio de forma que requiere el diseño de la parte es demasiado severo (la relación de embutido es demasiado alta), el formado completo de la parte puede requerir más de un paso de embutido. Al segundo paso de embutido y a cualquier otro posterior, si se necesita, se le llama *reembutido*. En la figura 3.72 se ilustra una operación de reembutido.

Cuando el diseño de la parte requiere una relación de embutido demasiado grande que impide formar la parte en un solo paso, se puede ejecutar la siguiente sugerencia general para la reducción, que se puede hacer en cada operación de embutido [4]: para el primer embutido, la reducción máxima de la forma inicial debe ser de 40 a 45%; para el segundo embutido (primer reembutido), la reducción máxima debe ser 30%; para el tercer embutido (segundo reembutido), la reducción máxima debe ser 16%.

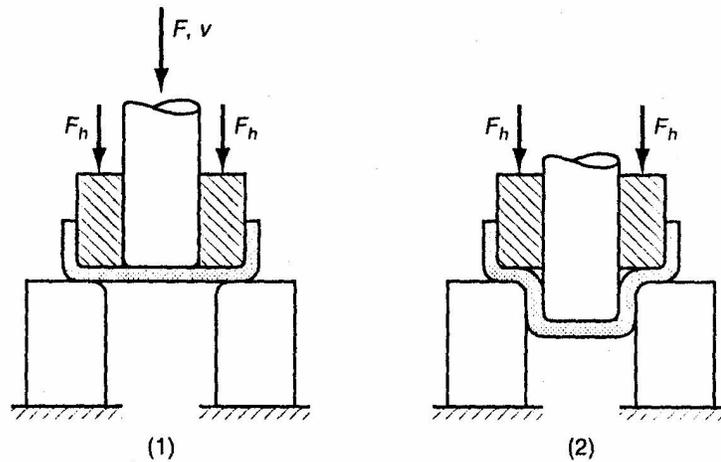


FIGURA 3.72 Reembutido de una copa: (1) inicio del reembutido y (2) final de la carrera. Los símbolos indican:  $v$  = velocidad del punzón,  $F$  = fuerza aplicada por el punzón,  $F_h$  = fuerza del sujetador de formas.

Una operación relacionada es el *embutido inverso*, en el cual se coloca una parte embutida hacia abajo en el dado y una segunda operación de embutido produce una configuración como la que se muestra en la figura 3.73. En esta operación la reducción es más fácil para el metal. La razón es que en el embutido inverso la lámina de metal se dobla en la misma dirección en las esquinas exteriores e interiores del dado, mientras que en el reembutido el metal se dobla en direcciones opuestas en las dos esquinas. Debido a esta diferencia, el metal experimenta menos endurecimiento por deformación en el embutido inverso y, por tanto, la fuerza del embutido es menor.

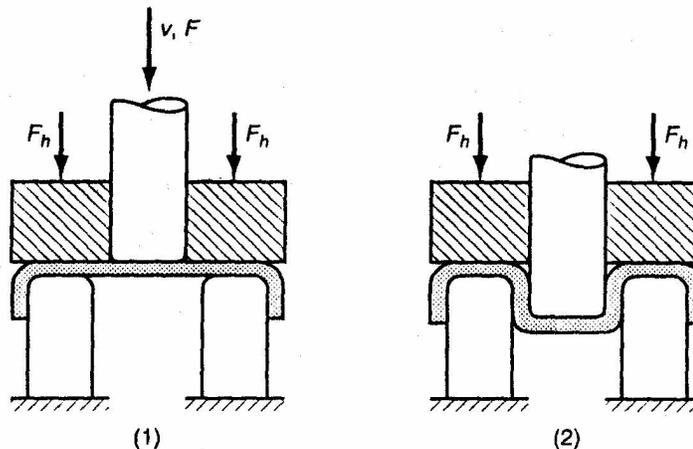


FIGURA 3.73 Embutido inverso: (1) inicio y (2) terminación. Símbolos  $v$  = velocidad del punzón,  $F$  = fuerza aplicada por el punzón,  $F_h$  = fuerza del sujetador de formas.

**Embutido de formas no cilíndricas** Muchos productos requieren el embutido de formas no cilíndricas. La variedad de formas embutidas incluyen formas cuadradas, cajas rectangulares (lavados),

copas escalonadas, conos, copas con bases esféricas más que planas y formas curvas irregulares (carrocerías de automóviles). Cada una de estas formas representa un problema técnico único en embutido. Para el lector que se interese, *Eary* suministra una revisión detallada del embutido para esta clase de formas [1].

**Embutido sin sujetador** La función principal del sujetador consiste en prevenir el arrugado de la brida mientras se embute la parte. La tendencia al arrugamiento se reduce al aumentar la relación entre el espesor y el diámetro de la forma inicial. Si la relación  $t/D_b$ , es lo suficientemente grande, se puede alcanzar el embutido sin necesidad de un sujetador, como se muestra en la figura 3.74. Puede estimarse la condición limitante para el embutido sin sujetador mediante la siguiente expresión [4]:

$$D_b - D_p < 5t \quad (3.55)$$

El dado de embutido debe tener forma de embudo o cono para permitir que el material a embutir se ajuste a la cavidad del dado. La ventaja del embutido sin un sujetador, cuando éste es posible, es un costo más bajo de las herramientas y el uso de una prensa más simple porque se evita la necesidad de un control separado de los movimientos del sujetador y del punzón.

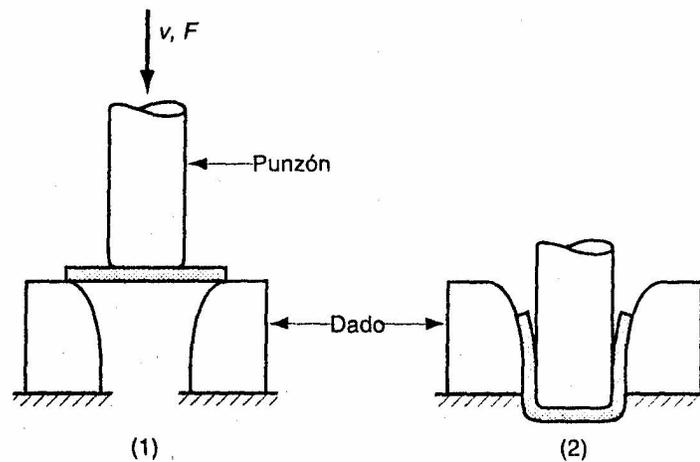


FIGURA 3.74 Embutidos sin sujetador: (1) inicio del proceso y (2) fin de la carrera. Los símbolos  $v$  y  $F$  indican movimiento y fuerza aplicada, respectivamente

#### 3.3.3.4. Defectos en el embutido

El embutido es una operación más compleja que el corte o el doblado de lámina, por tanto hay más cosas que pueden fallar. Pueden presentarse numerosos defectos en un producto embutido, anteriormente nos referimos a algunos de ellos. La siguiente es una lista de los defectos que se muestran en la figura 3.75:

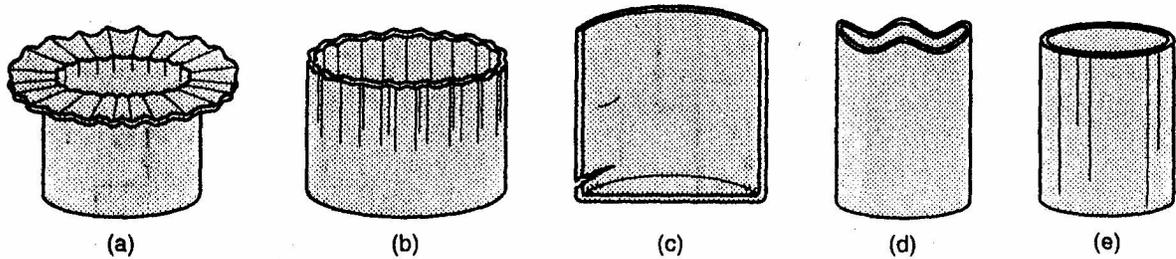


FIGURA 3.75 Defectos comunes en las partes embutidas (a) el arrugado puede ocurrir en la pestaña o (b) en la pared, (c) desgarres, (d) orejeado y (e) rayas superficiales.

- a) *Arrugamiento en la brida o pestaña.* El arrugamiento en una parte embutida consiste en una serie de pliegues que se forman radialmente en la brida no embutida de la parte de trabajo, debido al arrugamiento por compresión.
- b) *Arrugamiento en la pared.* Si la brida arrugada se embute en el cilindro, estos pliegues aparecen en la pared vertical del cilindro.
- c) *Desgarrado* Este defecto consiste en una grieta que se abre en la pared vertical, usualmente cerca de la base de la copa embutida, debido a altos esfuerzos a la tensión que causan adelgazamiento y rotura del metal en esta región. Este tipo de falla puede también ocurrir cuando el metal se estira sobre una esquina afilada del punzón.
- d) *Orejeado* Ésta es la formación de irregularidades (llamadas *orejas*) en el borde superior de la pieza embutida, causada por anisotropía en la lámina de metal. Si el material es perfectamente isotrópico no se forman las orejas.
- e) *Rayado superficial.* Pueden ocurrir rayaduras en la superficie de la pieza embutida si el punzón y el dado no son lisos o si la lubricación es insuficiente.