

CAPÍTULO 4

FORJA

4.1 GENERALIDADES

La forja es la forma más antigua de trabajar los metales, sus antecedentes se encuentran en la labor de los herreros y en las fraguas de los tiempos bíblicos y mitológicos (figura 4.1). En sus orígenes representó la deformación del material (hierro) por efecto de martilleo al colocarlo sobre el yunque (figura 4.2).



FIGURA 4.1 Vulcano forjando las armas de Aquiles [Giulio Romano 1499-1546, colección Value Art]

La Revolución Industrial significó la sustitución de la fuerza del herrero por la de las máquinas. En la actualidad existe una gran variedad de equipos para forja, los cuales permiten la obtención de piezas de tamaños que van desde un remache hasta el rotor de una turbina.



FIGURA 4.2 Forja de herrero

El proceso de forja se define como una operación de conformado mecánico por la cual se obtienen piezas de sección transversal irregular al comprimir un bloque metálico, denominado tocho, entre dos útiles de trabajo llamados estampas, aprovechando la plasticidad del material. En virtud de los elevados niveles de deformación inherentes al proceso, éste se realiza normalmente en caliente.

Este proceso permite fabricar piezas de materiales ferrosos y no ferrosos en dimensiones, geometrías y pesos muy variados (figura 4.3) que sería imposible obtener mediante otras operaciones.

Una de sus principales ventajas es que la pieza de trabajo sale de este proceso con dimensiones y geometría cercanas a las finales, implicando mayor facilidad y rapidez para su maquinado.



FIGURA 4.3 Diversas piezas forjadas

4.2 CLASIFICACIÓN DE LA FORJA

El proceso de forja se clasifica de muy diversas formas, dependiendo del estado del material que se va a forjar y de la forma del proceso, esto es:

TABLA 4.1 Clasificación de la forja

FORJA	Por las condiciones del proceso	Frío Caliente
	Por las características de las herramientas	Matriz abierta Matriz cerrada Forja con rodillos

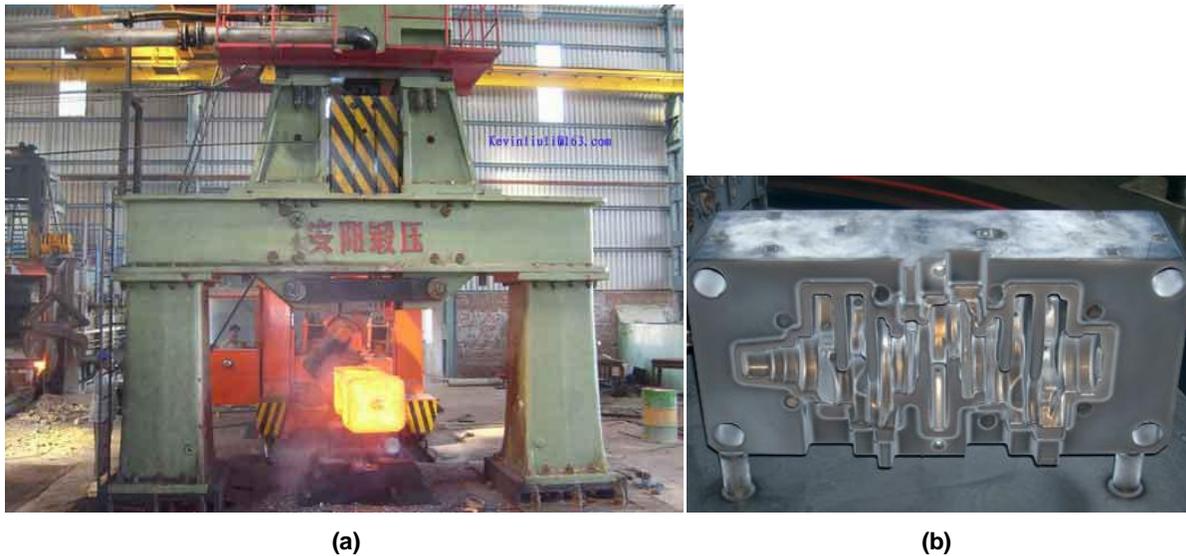


FIGURA 4.4 (a) Forja libre o abierta, (b) Dado para forja en estampa

FORJA EN FRÍO. Fundamentalmente se efectúan operaciones de acabado o aquellas que se caracterizan por pequeños porcentajes de deformación.

FORJA EN CALIENTE. El 90% de piezas forjadas son hechas con este método. Con el calentamiento correcto de la pieza se mejora la capacidad de ésta para cambiar de forma y dimensiones, sin que se presenten fallas o agrietamiento.

Este método se clasifica según la complejidad del diseño de la matriz, la cual está constituida por un par de bloques con dimensiones e impresiones determinadas que sirven para dar forma al metal mediante un mecanismo que acciona las herramientas formadoras, haciendo contacto con las piezas de trabajo, comprimiéndolas ya sea por presión (prensa), o por impacto (martillo).

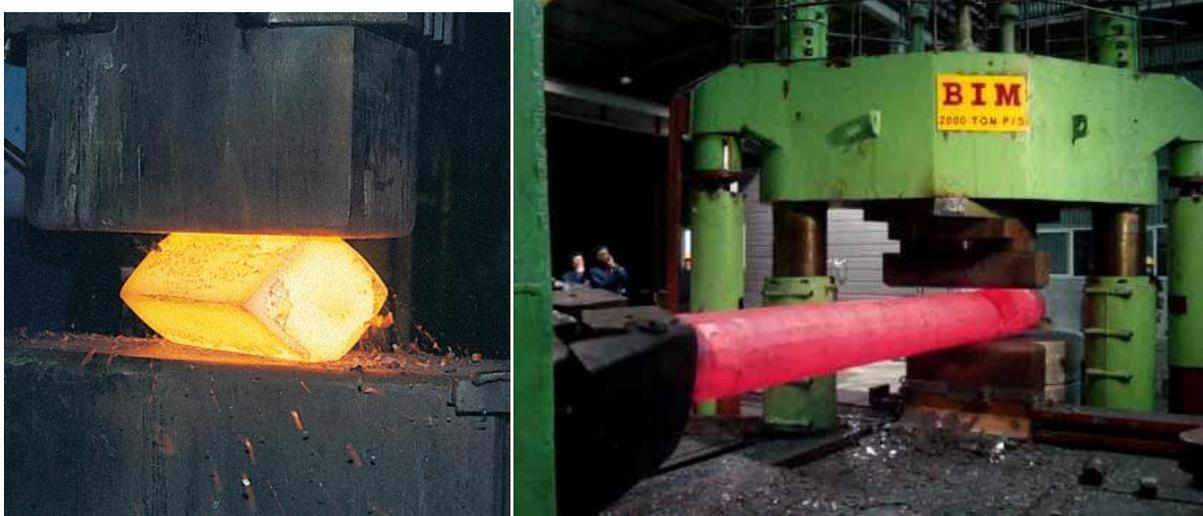


FIGURA 4.5 Ejemplos del herramental utilizado para forja libre

FORJA DE MATRIZ ABIERTA O LIBRE. Este tipo de proceso (figura 4.5) se emplea para producir formas simples en poco tiempo y con bajo costo, esto es debido a que carecen de detalles y dimensiones exactas. Las formas producidas con matriz abierta usualmente requieren de maquinaria adicional para poder terminar la geometría de la pieza.

FORJA ESTAMPA. En este proceso (figura 4.3, 4.4b, 4.6) se utiliza una matriz, dado o estampa con una o varias cavidades de la geometría de la pieza. El impacto de la maza o la presión del émbolo sobre la pieza de trabajo, la obliga a llenar todo el hueco de las matrices coincidentes. La estampa puede constar de varias etapas (figura 4.6) que favorezcan la deformación del material y garanticen precisión y duración del herramental. El número de etapas estará definido por la complejidad de la pieza a producir.



FIGURA 4.6 Dados para Forja, dado progresivo para la fabricación de bielas

FORJA CON RODILLOS. Este proceso (figura 4.7) se emplea para reducir la sección transversal de barras, razón por la cual se aplica en operaciones de preforma para la posterior forja en estampa. Por la forma en que se realiza y debido a su limitada aplicación, en muchas ocasiones no se le menciona al definir los procesos de forja; normalmente involucra grandes deformaciones, por lo que se efectúa en caliente.



FIGURA 4.7 Forja con rodillos

4.3 OPERACIONES DE FORJA

En la fabricación de una pieza forjada, lo normal suele ser la utilización de varias fases hasta llegar a la forma final. La denominación de cada una de estas fases se realiza en función de la operación que tienen encomendada (dobladora, iniciadoras, preparadoras., acabadoras. cortadoras).

Operaciones efectuadas durante el proceso

Recalcado. Representa el incremento en el diámetro del material cuando éste se comprime, lo cual involucra entonces una reducción en su altura o espesor. La existencia de fricción entre las herramientas y el metal no puede evitarse, esto da lugar a que el flujo de material sea menor en dichas intercaras que en el centro, por lo que la forma final es un cilindro abarillado, con mayor diámetro hacia la mitad de su altura (figura 4.8).

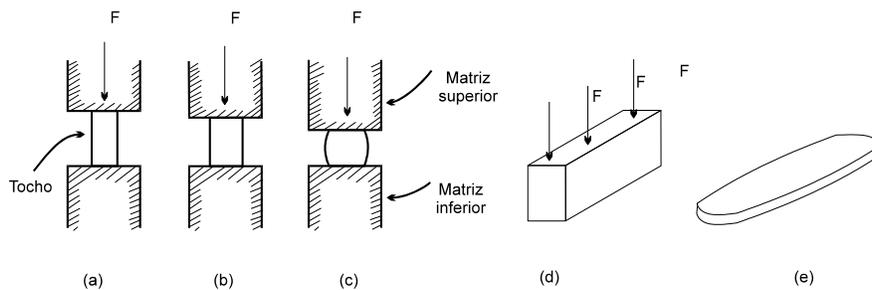


FIGURA 4.8 Recalcado de un tocho durante una operación de forja libre

Rebordeado. Se hace con estampas para dar forma a los extremos de las barras y acumular metal (figura 4.9).

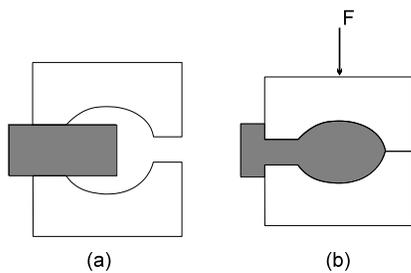


FIGURA 4.9 Rebordeado

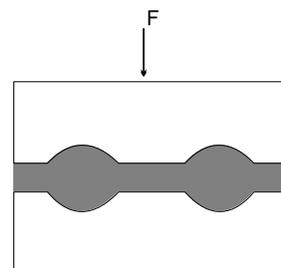


FIGURA 4.10 Estrangulación o degüello

Estrangulación o degüello. En la estrangulación se reduce el espesor de una región del metal donde este fluye desde el centro de la matriz (figura 4.10).

Consideraciones para el diseño de la estampa

Diseñar correctamente el proceso de fabricación y definir las fases y las máquinas que deben emplearse (figuras 4.6, 4.11, 4.12 y 4.13), es fundamental para producir piezas mediante procedimientos racionales y económicos que permitan, además la máxima utilización del material empleado.

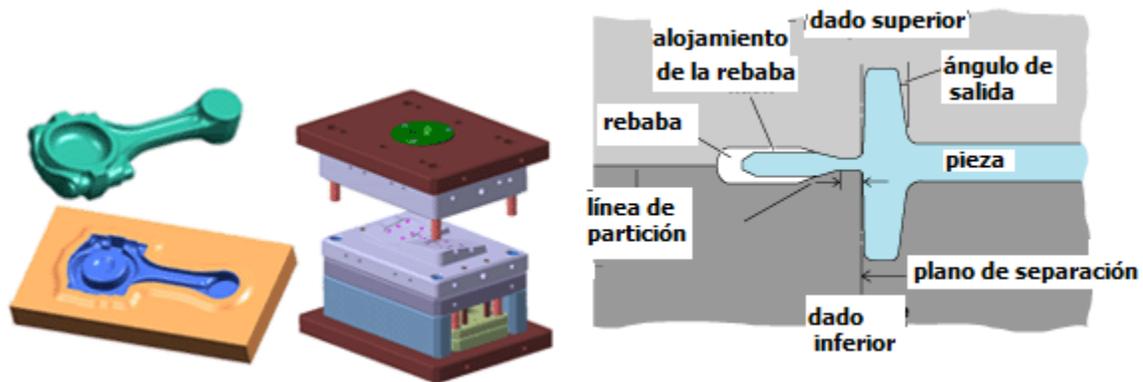


FIGURA 4.11 (a) Geometría de la estampa acabadora, (b) Diseño del cordón y alojamiento de la rebaba

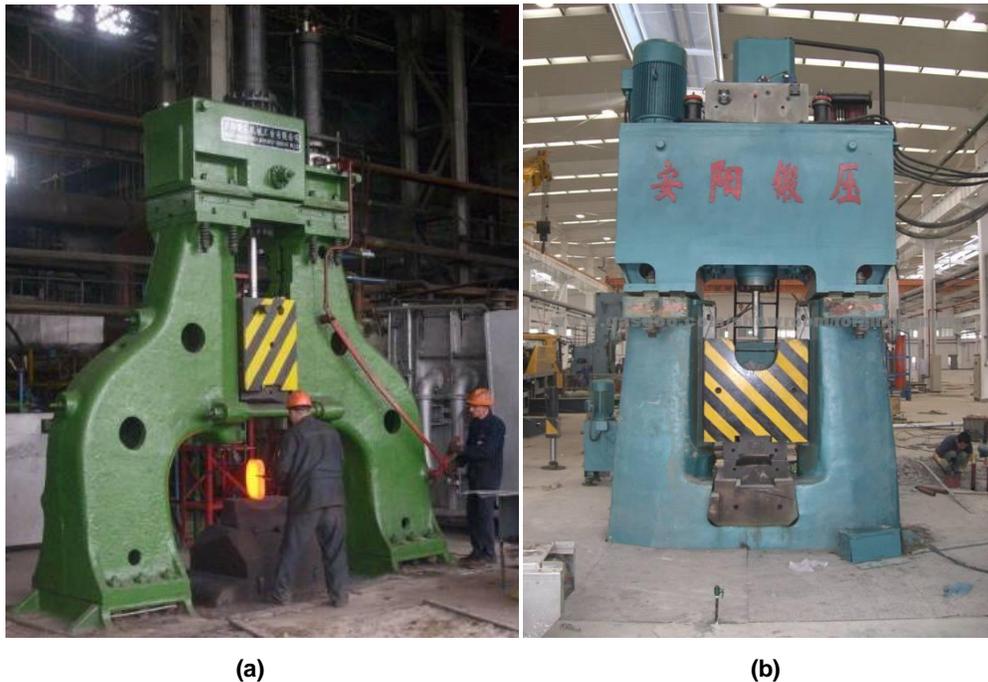


FIGURA 4.12 Martillos para forja: (a) Para forja libre, (b) Para forja en estampa



FIGURA 4.13 Prensas para forja: (a) Mecánica, (b) Hidráulica

El costo de la mano de obra, el tamaño del lote, además de, por supuesto, las facilidades de que se disponga, determinarán la forma en cómo se efectúa el proceso; esto es, si se utilizan varias máquinas que trabajen secuencialmente o una sola que cuente de una matriz múltiple.

El primer caso se empleará cuando se trate de series muy grandes, mientras que el segundo se utilizará cuando la producción no justifique la inversión en varias prensas. Cuando las series son muy limitadas (menores a 500 piezas), no es conveniente fabricar matrices múltiples, con lo que se sacrifica entonces precisión al emplear una sola etapa para la fabricación

Si tuvieran que fabricarse unas pocas piezas de un determinado tipo, sería suficiente una matriz de un acero de poca calidad e incluso no se requeriría mucha precisión en el maquinado del dado, ya que el mecanizado posterior de las piezas forjadas compensará las deficiencias de éstas y se habrá ahorrado mucho dinero en la fabricación de la matriz. Incluso el proceso de fabricación depende del número de piezas; para grandes series es importante diseñar el número suficiente de fases que permita una buena utilización del material y gran duración de las matrices.

4.4 MATERIALES USUALMENTE FORJADOS

En general podrán ser forjados todos aquellos materiales y aleaciones que presenten una buena plasticidad a la temperatura de trabajo, por lo que los cúbicos de cara centrada y algunos cúbicos de cuerpo centrado y hexagonales compactos podrán forjarse; los más comunes son los aceros al carbono y de baja aleación. Materiales con alguna aplicación industrial son, por ejemplo:

- Aceros inoxidables
- Aceros refractarios
- Aluminio y aleaciones de aluminio
- Cobre y sus aleaciones
- Magnesio y sus aleaciones
- Titanio y sus aleaciones
- Níquel y sus aleaciones
- Berilio
- Algunas aleaciones de materiales refractarios, tales como el tungsteno, niobio y molibdeno

La forjabilidad en los aceros estará determinada por su contenido de carbono y de otros aleantes. Se pueden clasificar como:

Aceros de forja normal

$$C < 0.65\% \text{ y } Mn + Ni + Cr + Mo + V + W < 5\%$$

Aceros de forja difícil

$$C > 0.65\% \text{ o } Mn + Ni + Cr + Mo + V + W > 5\%$$

De los aceros inoxidables los de más difícil forja son los austeníticos, por su gran tenacidad. Se debe tener precauciones durante el enfriamiento de los inoxidables martensíticos para evitar un temple involuntario, que se puede traducir en limitada maquinabilidad, así como en agrietamiento del material. En general, los inoxidables ferríticos son más forjables.

Los aceros refractarios y de alta aleación presentan inconvenientes durante el proceso, ya que generalmente su plasticidad es reducida por la presencia de algunos microconstituyentes frágiles, como carburos y nitruros.

En general, existe una gran cantidad de aleaciones de aluminio forjables, aunque se debe tener cuidado ya que las condiciones de proceso de éstas varían notablemente en función de sus aleantes.

Tanto el cobre como varias de sus aleaciones pueden ser conformados por forja. La aleación de cobre de más fácil forja es el latón 60/40, la mayor dificultad corresponde al cuproaluminio 90/10. Estas piezas tienen aplicaciones muy variadas dependiendo de la aleación de que se trate, ya que pueden ser utilizados en contactos y conexiones eléctricas, ornamentación, herramientas, pernos, engranes, soportes, etc.

Por sus características mecánicas se recomienda que el magnesio y sus aleaciones se forjen en prensas hidráulicas o en prensas mecánicas lentas. En general, estas piezas son demandadas por la industria aeronáutica y automotriz en condiciones de servicio, hasta de 200 °C.

El titanio y sus aleaciones se pueden forjar con geometrías similares a las obtenidas para los aceros al carbono, aunque se requieren mayores presiones. Se deberán tener cuidados especiales durante las operaciones de precalentamiento así como será necesario el empleo de atmósferas inertes o al vacío. Las piezas de titanio y sus aleaciones son demandadas por la industria química y aeroespacial, por ejemplo, refuerzos y elementos estructurales en aviones, álabes y otros componentes de turbinas.

Existe una gran diversidad de aleaciones de níquel que pueden ser forjadas, como el monel, inconel, hastelloy, etc.; en general, se requieren temperaturas similares que para los aceros al carbono, y se demandan mayores presiones. Por sus características, estos materiales son solicitados principalmente por la industria química.

4.5 CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS PARA FORJA

Estas máquinas se clasifican por la forma de hacer contacto con el material de trabajo; esto es, por impacto y a presión.

Máquinas para forja por impacto

Los martillos cuentan con una maza que se desliza en una corredera, la cual, cuando el movimiento es vertical, tiene una carrera descendente, y ejerce una fuerza de golpeo contra un componente estacionario o yunque que se encuentra cerca de la base del martillo. La mitad superior de la matriz se coloca en la mesa móvil o corredera que tiene el peso que se va a proyectar, la mitad inferior se encuentra colocada sobre el yunque de la máquina.

TABLA 4.2 Máquinas para forja por impacto

Considerando accionamiento	Simple efecto	Martillo de caída libre	de tablón de cadena de cuerda de tambor
		Martillos de caída libre elevados por aire	
	Doble Efecto	Martillos de potencia Martillos de contragolpe Martillos de pequeña capacidad accionados por ballesta o por mecanismos de tipo excéntrico	
Considerando su aplicación	Martillo para forja libre Martillo para forja con matriz		
Considerando el tipo de estructura o bastidor	Bastidor abierto o simple bastidor Bastidor cerrado o doble bastidor		

Máquinas para forja por aplicación de presión

Por su accionamiento se clasifican en la siguiente tabla:

TABLA 4.3 Clasificación de las máquinas para forja por aplicación de presión

Prensas	Mecánicas	Husillo-tuerca De cuña De rodillera De biela-cigüeñal
	Hidráulicas	Aplicación más lenta de la presión, mayor eficiencia, mayor costo inicial

En general, las prensas se caracterizan porque la deformación del material es homogénea, así como por una mayor precisión y calidad de las piezas producidas. Aun cuando la velocidad de aplicación de la carga es menor, su productividad es mayor, ya que sólo se requiere una carrera de la corredera para obtener la impresión que se desea. La principal desventaja al compararlas con los martillos es su elevado costo inicial.

Las prensas para forja incorporan una corredera que se mueve en dirección vertical para ejercer la presión sobre la pieza de trabajo, en contraste con los característicos golpes de los martillos. En general, todas las prensas pueden producir todos los tipos de forja producidos por los martillos.

Prensa hidráulica. La corredera de una prensa hidráulica es manejada por pistones. Seguido a una aproximación rápida, la corredera se mueve con una velocidad baja realizando la compresión de la pieza de trabajo, que se retiene en la matriz inferior. La velocidad de compresión puede ser exactamente controlada así, permitiendo también el control de la velocidad del flujo del metal. Esta característica es particularmente ventajosa ya que produce forjas con tolerancias cerradas.

Los principales componentes de una prensa hidráulica se muestran en la figura 4.14.

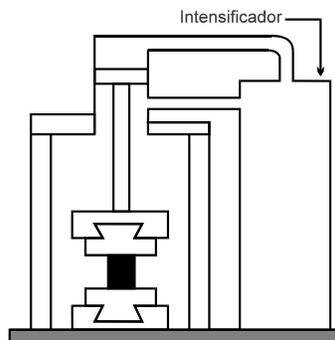


FIGURA 4.14 Accionamiento esquemático de una prensa hidráulica

Las capacidades de las prensas hidráulicas están entre 300 y 50,000 toneladas.

Principales ventajas de la prensa hidráulica:

- La presión puede ser modificada en cualquier punto de la carrera, de acuerdo con las necesidades del proceso.
- El porcentaje de deformación puede ser controlado al igual que la variación uniforme durante la carrera, si se requiere.

Desventajas de las prensas hidráulicas:

- El costo inicial de la prensa hidráulica es más alto que el de la prensa mecánica de equivalente capacidad.
- La acción de la prensa hidráulica comparada con la mecánica es más lenta.
- La menor velocidad de accionamiento de la prensa hidráulica trae como consecuencia la disminución de la vida de la matriz debido al calentamiento de ésta.

SELECCIÓN DE MARTILLOS Y PRENSAS PARA FORJA. La selección de los equipos para forja depende idealmente de la geometría, tamaño de la pieza y número de éstas, así como de la carga demandada para su producción.

Es difícil relacionar la energía de los martillos de caída libre para los pesos y dimensiones de las piezas que puedan producirse, debido a las limitaciones impuestas por el material y la forma específica de la forja. En general, un martillo de 454 kg (1,000 lb) puede producir piezas de acero al carbono y aleaciones que pesen arriba de 1.36 kg (3 lbs); uno de tabla de 1,361 kg (3000 lb) con una potencia de golpeo alrededor de 1,935 kg-m (14,000 ft-lb) se puede emplear en la fabricación de piezas que pesen arriba de 11.4 kg (25 lb). Por su parte, un martillo de 2,537 kg (5,000 lb) puede fabricar forjas convencionales que pesen arriba de 454 kg (1000 lb).

Como se comentó anteriormente, las prensas se emplearán en el caso de piezas de configuración más compleja, cuando se requiere mayor precisión y para lotes mayores a las 10,000 unidades.

Para la selección de las prensas será necesario calcular primero la presión y la carga de forja demandada por la pieza, además, es necesario diseñar las etapas intermedias para revisar la posibilidad de que la estampa se adapte a las dimensiones de la prensa. Una vez cubiertos ambos requisitos se tendrá la seguridad de que la pieza se puede producir con el equipo propuesto.

4.6 ANÁLISIS DE LAS PRESIONES Y DEFORMACIONES QUE SE PRESENTAN DURANTE EL PROCESO DE LA FORJA

ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN EN UN PROCESO DE FORJA ABIERTA. Los procesos de forja abierta se pueden considerar como los equivalentes modernos del proceso de forja de herrero, en donde la fuerza humana ha sido reemplazada por martillos o prensas de vapor.

Este tipo de procesos son empleados en la producción de grandes piezas con geometrías simples.

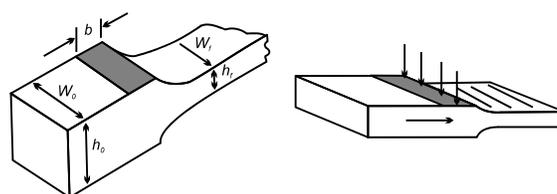


FIGURA 4.15 Operación de ensanchado (el área sombreada representa el lugar donde golpea el dado)

El análisis más sencillo para este proceso es aquel que considera la deformación de una placa entre estampas planas (figura 4.15). Aun cuando este tipo de operaciones son muy sencillas se deberá tener cuidado para evitar problemas tales como el pandeo del material. De los estudios de Wistreich y Shutt (1959), se desprende que el cociente del espesor inicial al espesor final será menor a 1.3.

La reducción del espesor implica un alargamiento del material o un aumento en el ancho. Estos alargamientos y ensanchamientos no pueden ser determinados analíticamente, sino que deben ser obtenidos experimentalmente para cada material.

La relación de mordedura es el parámetro que usan los operadores de las máquinas para conocer las dimensiones de dichos alargamientos y extensiones.

$$\text{Relación de mordedura} = \frac{b}{W_0}$$

donde:

W_0 = ancho inicial de la pieza

b = longitud que va a ser deformada

tanto el alargamiento como la extensión pueden ser definidos de la siguiente manera:

$$\text{Coeficiente de ensanchamiento } S = \frac{\text{aumento del ancho}}{\text{disminución del espesor}}$$

Del trabajo experimental de Olliver y Ortiz (1990), se demuestra que:

$$S = 0.183 + 0.325 m - 0.041 m^2$$

Para $0.5 < m < 2$

$$S = \frac{m}{1 + 1.065 m}$$

Para $m > 2$ y $m < 0.5$

donde:

L_0 = Longitud inicial

L_1 = Longitud final

W_0 = Ancho inicial

W_1 = Ancho final

De lo anterior, se observa que si $S = 1$ sólo existirá ensanchamiento, y si $S = 0$ sólo habrá alargamiento.

Análisis teórico de las presiones y de la carga para la forja libre considerando deformación plana

La carga de forja se puede obtener según la ecuación:

$$P_f = \bar{p}lb$$

donde:

P_f = Carga

\bar{p} = Presión promedio

l = Longitud de la pieza

b = Ancho de la pieza

En este análisis, el problema lo representa la determinación de la presión promedio, para ello será necesario hacer un análisis de los esfuerzos presentes durante el proceso de deformación. Para la determinación de la presión de forja de la figura 4.16 se tiene que:

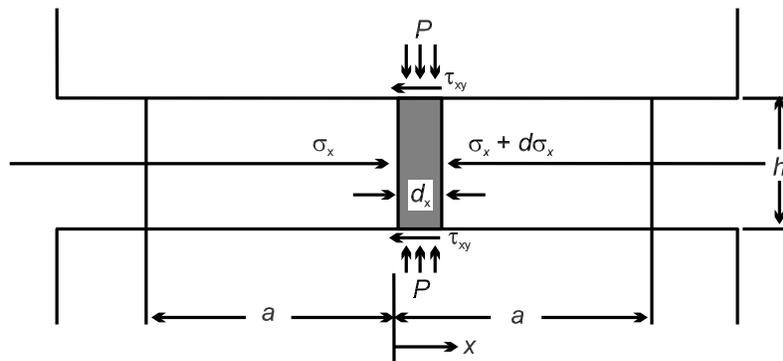


FIGURA 4.16 Esfuerzos presentados durante la forja de una placa o cilindro considerando deformación plana

$$\sum f_x = 0$$

$$\sigma_x h - \sigma_x + d\sigma_x h - 2\tau_{xy} dx$$

donde τ_{xy} = Fuerza de fricción

Por definición:

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \sigma_y \mu = \mu p \\ -d\sigma_x h - 2p\mu dx &= 0 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2p\mu}{h} = 0$$

Con base en el criterio de fluencia de Tresca

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 = \sigma'_0$$

$$\sigma'_0 = \sigma_1 - \sigma_3$$

si

$$\sigma_1 = p$$

$$\sigma_3 = \sigma_x$$

$$\Rightarrow p - \sigma_x = \sigma'_0$$

$$\therefore \sigma_x = p - \sigma'_0$$

Derivando con respecto a la posición:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = -\frac{d\sigma'_0}{dx} + \frac{dp}{dx}$$

Pero el esfuerzo de cedencia no es función de la posición por lo que:

$$\frac{d\sigma'_0}{dx} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{dp}{dx}$$

$$\therefore \frac{dp}{dx} = \frac{-2\mu p}{h}$$

$$\frac{dp}{p} = -\frac{2\mu dx}{h}$$

Integrando

$$\int \frac{dp}{p} = -\frac{2\mu}{h} \int dx \quad \Rightarrow \quad \ln p + C = -2\frac{\mu}{h}x$$

Evaluando la constante de integración C para $x = a$:

$$p \text{ a } = \sigma_0$$

$$\sigma_0 = C \exp\left[-\frac{2\mu a}{h}\right]$$

$$C = \sigma_0 \exp\left[\frac{2\mu a}{h}\right]$$

Sustituyendo

$$p(x) = \sigma_0 \exp\left[\frac{2\mu a}{h}\right] \exp\left[-\frac{2\mu x}{h}\right]$$

Es por consecuencia que la presión de forja en función de la posición se expresa como

$$p(x) = \sigma_0 \exp\left[\frac{2\mu}{h}(a-x)\right]$$

Por otra parte

$$P = \bar{p}bl$$

$$\bar{p} = \int_0^a \frac{p}{a} dx$$

$$\bar{p} = \frac{1}{a} \int_0^a \sigma_0 \exp\left[\frac{2\mu}{h}(a-x)\right] dx$$

$$\bar{p} = \frac{\sigma_0}{a} \left[-\frac{h\mu}{2} \right] \exp\left[\frac{2\mu}{h}(a-x)\right]_0^a$$

$$\bar{p} = \frac{\sigma_0 h}{2a\mu} + \left[-\frac{\sigma_0 h}{2a\mu} \exp\frac{2a\mu}{h} \right]$$

Expresión que determina la presión promedio de deformación:

$$\bar{p} = \frac{\sigma_0}{(2a\mu/h)} \left[\exp\left(\frac{2\mu a}{h}\right) - 1 \right]$$

Haciendo un cambio de variable y definiendo $Q = \frac{2\mu a}{h}$ la ecuación anterior queda:

$$\bar{p} = \frac{\sigma_0}{Q} \left[e^Q - 1 \right]$$

Otros métodos de cálculo

La carga para forja ya sea en matriz abierta como en cerrada, se puede calcular de la siguiente manera:

$$P = \bar{\sigma}_0 AC$$

donde:

σ_0 = Esfuerzo de cedencia promedio durante la deformación

A = Área proyectada por la pieza perpendicular al desplazamiento de la estampa

C = Es un valor que dependerá de las características del proceso. Para la forja abierta de formas sencillas se han propuesto diversos métodos para calcularlo entre otros se

puede mencionar la ecuación definida por Hill; con base en un análisis de campo de líneas de deslizamiento para varias condiciones del proceso y considerando deformación no homogénea.

$$C = 0.8 + 0.2 b/h$$

h = Espesor

b = Ancho de la herramienta

Otros autores proponen con base en la experiencia los siguientes valores para C (tabla 4.3).

TABLA 4.3 Factor de complejidad de la forja

Tipo de Forja	C
Forja libre o abierta (estampas planas)	1.2 a 2.5
Forja en estampa de formas simples	3.0 a 8.0
Forja en estampa de geometrías complejas	8.0 a 1

En la forja con matriz cerrada se pueden forjar piezas que van desde muy simples hasta piezas con geometría muy complicada. La figura 4.17 muestra cómo va aumentando el grado de complejidad de las piezas de acuerdo con su geometría.

Diseño y cálculo de una estampa para forja

DISEÑO. Las características de las estampas de forja son muy variables y se puede considerar que no existe una solución única para cada caso. Para definir la precisión de la forja, el material de la estampa y la forma cómo se llevará a cabo el proceso, es necesario considerar:

1. Número de piezas que van a producirse, geometría y peso de dichas piezas
2. Material de las piezas
3. Equipo disponible
4. Número y configuración de los pasos de preformado (Para esto será necesario definir el número de piezas, las características del material de partida, el equipo y las tolerancias de la forja).
5. Dimensiones de la rebaba en preformas y pasos acabadores
6. Carga y energía para cada operación de forja
7. Tolerancias requeridas así como en acabado

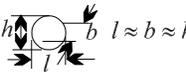
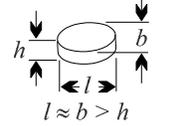
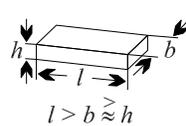
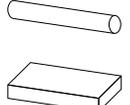
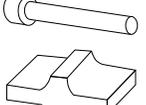
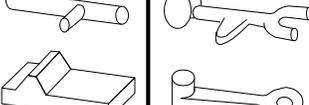
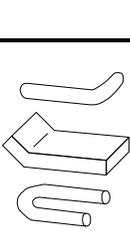
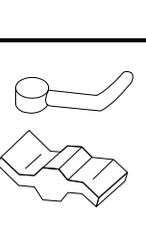
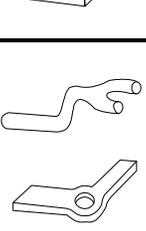
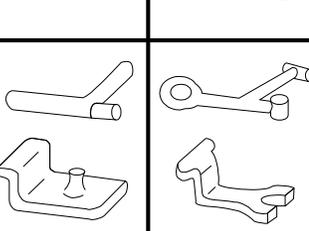
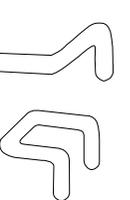
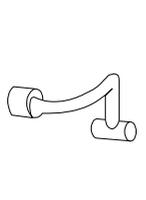
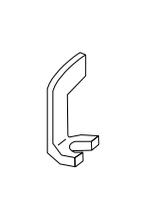
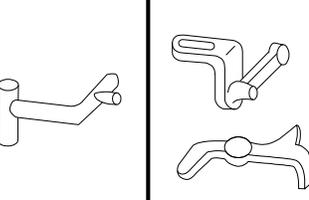
<p>Geometría tipo 1: Esferas, cubos y cilindros</p> 	Subgrupo	Sin proyecciones	Con proyecciones unilaterales	Con proyección periférica	Con proyección unilateral y periférica
<p>Geometría tipo 2: Discos, pueden presentar pequeñas proyecciones y regiones recalçadas</p> 	Forma	Sin proyección	Con proyección (tetón)	Con proyección y cavidad	Con proyección central y periférica
<p>Geometría tipo 3: Formas alargadas, partes cuyo eje longitudinal es dominante</p>  <p>1. Partes cortas $l < 3b$</p> <p>2. Partes de media longitud $l = 3...8b$</p> <p>3. Partes alargadas $l = 8...16b$</p> <p>4. Partes muy alargadas $l > 16b$</p>	Forma	Sin proyección	Con proyecciones paralelas al eje principal	Con elementos en forma de horquilla	Con dos o más proyecciones
	Eje principal recto				
	Eje principal curvado				
	Eje principal curvado en varias direcciones				

FIGURA 4.17 Clasificación de piezas forjadas con base en su geometría (Dieter G.,1983)

CÁLCULO TEÓRICO DE LA CARGA. Los parámetros que se deben considerar para el proceso de diseño y cálculo de la carga son los siguientes:

a) Dimensionar la pieza

- Ángulo de salida. De 1 a 7°, esto dependerá de la precisión de la forja, si la superficie es interior o exterior, y de su longitud.
- Sobre-espesor para maquinado. Este se determina en función de la calidad de la operación de forja así como de los acabados requeridos por la pieza, (tabla 4.4).

TABLA 4.4 Sobre-espesores para maquinado

Espesor, anchura o diámetro de la pieza (mm)	Sobre-espesor en cada cara (mm)
30	1
31 a 60	1.5
61 a 120	2
121 a 250	2.5
251 a 500	3 a 6
500	5 a 8

- Tolerancias o sobre-espesores por contracción. Es función del material que se va a forjar y de la temperatura de fin de forja.

Se calcula como:

$$\Delta l_c = \alpha l_0 (T_{ff} - T_\alpha)$$

donde:

α = Coeficiente de dilatación, tabla 4.5

Δl_c = Sobre espesor requerido en la pieza

T_{ff} = Temperatura de fin de forja

T_α = Temperatura ambiente o de servicio

TABLA 4.5 Coeficientes de dilatación térmica

Material	Coeficiente de dilatación lineal (α) (°C ⁻¹)
Acero	11.0x10 ⁻⁶
Aluminio	23.8x10 ⁻⁶
Bronce	17.5x10 ⁻⁶
Cobre	16.5x10 ⁻⁶
Latón	18.5x10 ⁻⁶

- b) Elegir la línea de partición, el tipo y posición del cordón de rebaba
- c) Definir las líneas de flujo del material con la finalidad de reconocer o determinar las regiones de llenado difícil.
- d) Corregir los elementos característicos por enfriamiento o anisotermia (radios críticos) tabla 4.6.

TABLA 4.6 Corrección de radios críticos [del Rio, 1980]

Radio real (mm)	Radio a emplear para el cálculo de: (mm)		
	Martillo	Prensa mecánica	Prensa hidráulica
5	5	5	
4.5	4.5	4.45	4.45
4	4	3.95	3.95
3.5	3.5	3.45	3.4
3	3	2.95	2.5
2.5	2.5	2.4	2.35
2	2	1.9	1.85
1.75	1.7	1.65	1.60
1.50	1.45	1.35	1.30
1.25	1.15	1.10	1.05
1	0.9	0.75	0.80

- e) Calcular la presión p necesaria para el adecuado llenado de las regiones características, las cuales presentan un radio r y un ancho L o diámetro D .

En lo anterior se utilizan gráficas como las mostradas en la figura 4.12, para esto se empleará el valor de K , tomando aquella curva que corresponde a la temperatura de forja en cuestión [Rio J. del, 1980].

$$K = \frac{2r_1^*}{D} \text{ o } K = \frac{2r_1^*}{L}$$

donde:

D = Diámetro de la pieza

L = Ancho de la pieza

r_1^* = Radio del elemento característico corregido por enfriamiento

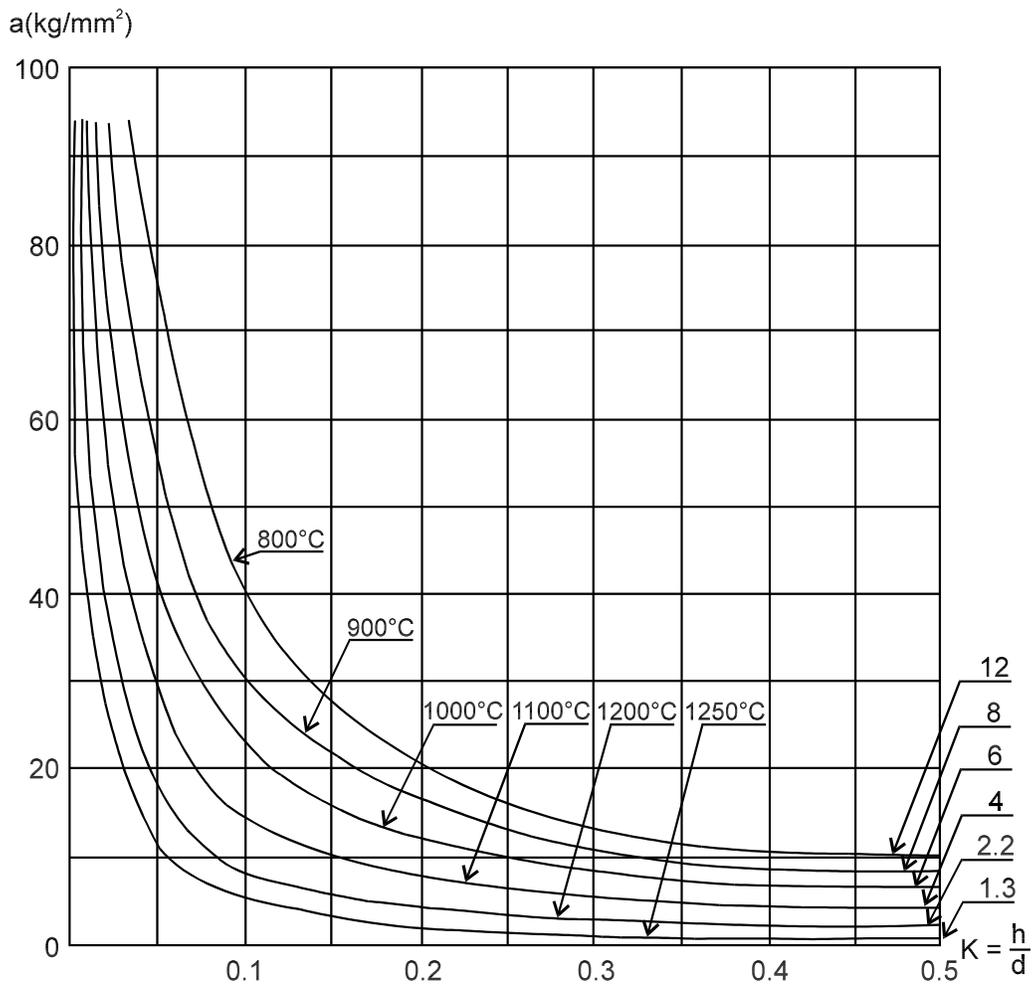


FIGURA 4.18 Umbral de plasticidad al aplastamiento de acero (Rio J. del, 1980)

La presión también se puede calcular a través de la ecuación que fue desarrollada en el análisis de deformación plana, como:

$$p_1 = \frac{\sigma_0}{Q} [e^Q - 1]$$

$$Q = \frac{\mu D}{2r_1} \quad \circ \quad Q = \frac{\mu L}{2r_1}$$

- f) Calcular la presión necesaria para el correcto llenado de las cavidades o nervios de la pieza p_2 . Esta cavidad presenta un radio en el fondo r_2 , la sección en el fondo es A_f , la sección de la entrada es A_e , el coeficiente de fricción del material con las paredes laterales de la estampa es μ . La presión p_2 se calcula gráficamente empleando curvas como las de la figura 4.19, donde:

l = es el ancho en el fondo de la cavidad

l_m = es el ancho promedio de la cavidad

p_{am} = umbral de plasticidad al aplastamiento

p_{rm} = umbral de plasticidad a la retención

h = altura del nervio o tetón

Δp = exceso de presión requerida cuando la cavidad es asimétrica

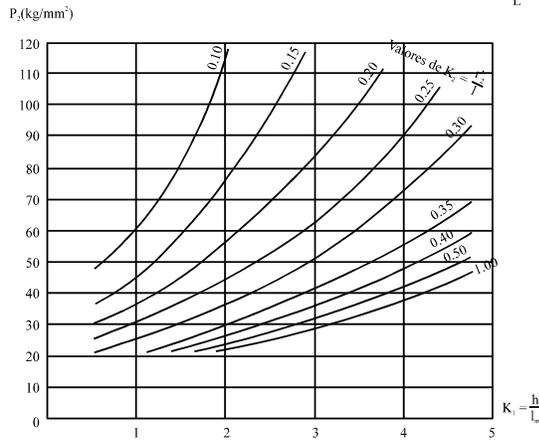
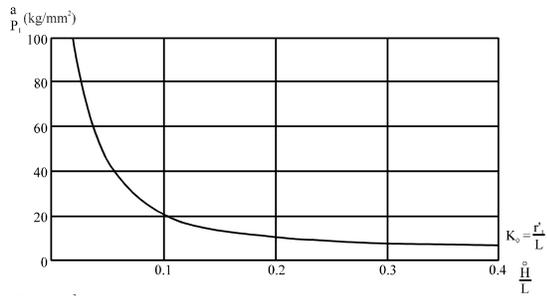
$$p_{am} + p_{rm} + p_{\alpha} = 21 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{para los aceros a } 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$p_{am} + p_{rm} + p_{\alpha} = 16.5 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{para cobre a } 875 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

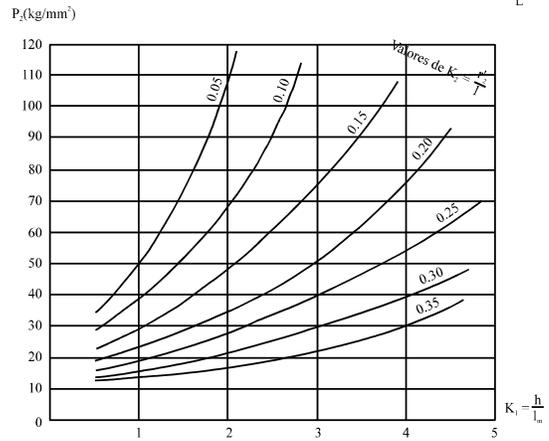
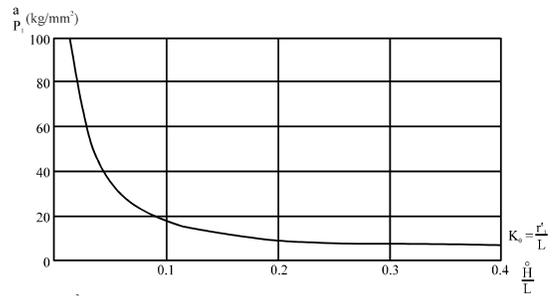
$$p_{am} + p_{rm} + p_{\alpha} = 9.7 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{para aluminio a } 525 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$p_{am} + p_{rm} + p_{\alpha} = 10 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{para latón a } 675 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

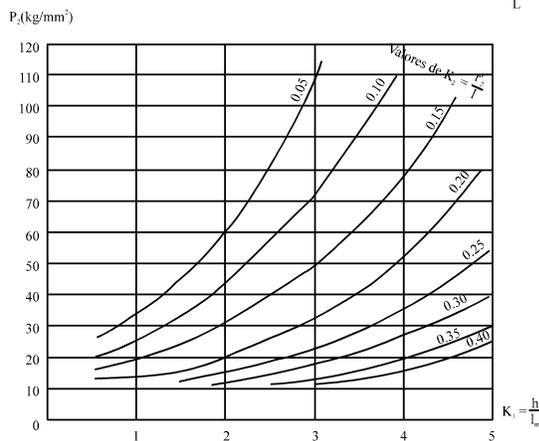
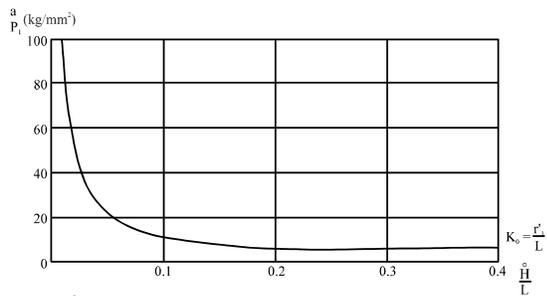
$$p_2 = p_m - p_{\alpha} \left[1 + \ln \frac{A_e}{A_f} \right] \exp a\mu K_1 + p_{am} + p_{rm} + p_{\alpha} + \Delta p$$



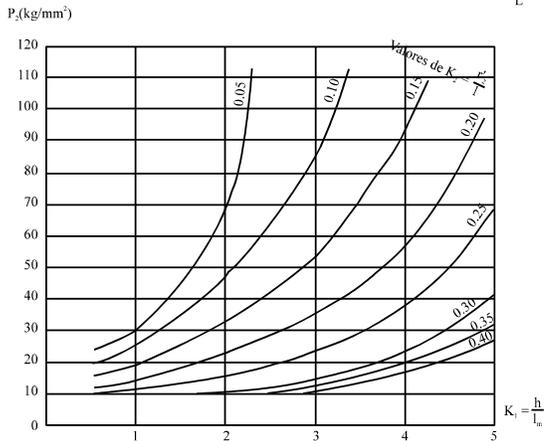
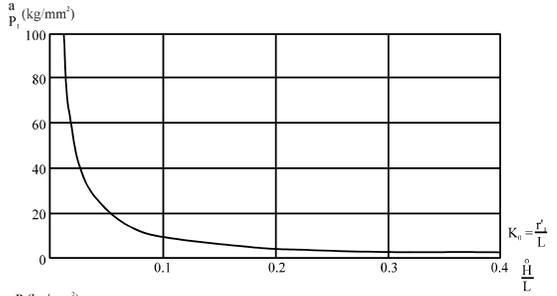
a) Aceros a 1000 °C



b) Cobre a 875 °C



c) Aluminio a 525 °C



d) Latón a 675 °C

FIGURA 4.19 Cálculo gráfico de las presiones p_1 , p_2 (Rio, J. del, 1980)

La primera parte de la ecuación está en el término p_2' y representa la carga necesaria para extruir el material en el nervio o cavidad. Las presiones se obtienen de la figura 4.13, considerando los siguientes factores:

$$p_m \text{ con } K_m = \frac{2r_2^*}{l} \quad \text{o} \quad \frac{2r_2^*}{d}$$

$$p_\alpha \text{ con } K_\alpha = \frac{h}{l} \quad \text{o} \quad \frac{h}{d}$$

$$K = \frac{h}{l} \quad \text{o} \quad K = \frac{h}{d}$$

donde

\bar{l} = Ancho promedio de la cavidad

\bar{d} = Diámetro promedio de la cavidad

$$p_{am} \text{ con } K_{am} = \frac{\bar{l}}{h} \quad \text{o} \quad \frac{\bar{d}}{h}$$

$$p_{arm} \text{ con } K_{rm} = \frac{h}{\bar{l}} \quad \text{o} \quad \frac{h}{\bar{d}}$$

Δp toma en cuenta la posición de la cavidad con respecto al eje de aplicación de carga, en la tabla 4.7 se muestra este valor para diversos materiales.

TABLA 4.7 Exceso de presión debido a la posición de la cavidad [Rio J. del, 1980]

	Valores de A_p en kg/mm^2					
	Acero a 1000°C	Cobre a 875°C	Aluminio a 525°C	Latón a 675°C	Cuproaluminio a 800°C	Aleación ligera A U 4 G a 450°C
Cavidad bien centrada	0	0	0	0	0	0
Cavidad a mitad de distancia al extremo	4	3,2	1,8	1,9	2,4	6
Cavidad en el extremo	8	6,4	3,6	3,8	4,8	12

Todas las presiones indicadas anteriormente con excepción de Δp también pueden ser obtenidas mediante el empleo de la ecuación deducida para deformación plana, utilizando las constantes que correspondan a cada condición, de manera similar a lo expuesto para la determinación de la presión para la cavidad principal.

g) Esta etapa consiste en determinar las dimensiones de la zona de rebaba (cordón y alojamiento), de tal forma que pueda cumplir con sus objetivos, esto es, actuar como dique y alojamiento de material excedente, consiguiendo la obtención de piezas sanas sin necesidad de sobrecargar el equipo, y con el mínimo desgaste de la estampa. El ancho del cordón se determina a partir de las dimensiones de la pieza (tabla 4.8).

TABLA 4.8 Dimensiones recomendadas para el alojamiento de rebaba en función del ancho del cordón (Rio J. del, 1980)

Valores de alojamiento	Ancho del cordón de la matriz λ (mm)
40	4
50	4.5
60	5
70	5.5
80	6
90	6.5
100	7
120	7.5
140	8
160	8.5
180	9
200	9.5
220	10
240	11
260	12
280	13
300	14
350	15
400	17
450	18

El aspecto de un cordón de tipo plano se muestra en la figura 4.20

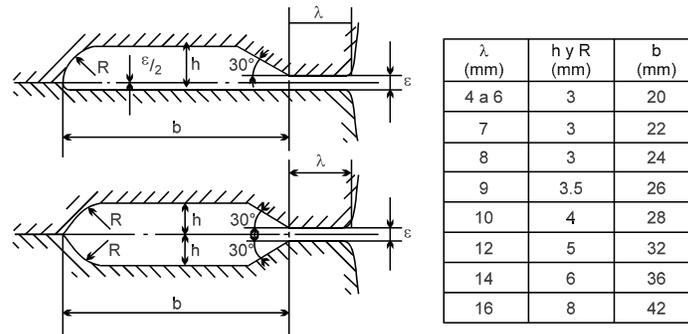


FIGURA 4.20 Aspecto y dimensiones típicas de un cordón de rebaba plano (Rio J. del, 1980)

donde:

- λ = Ancho del cordón de rebaba
- ε = Espesor del cordón de rebaba
- e = Espesor del alojamiento
- b = Ancho del alojamiento
- R = Radio de fondo del alojamiento

Cuando el material que se va a forjar es de acero y las matrices son del mismo material utilizado como lubricante grafito disuelto en agua:

$$T < 900 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \mu = 0.15$$

$$T = 1000 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \mu = 0.16$$

$$T = 1100 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \mu = 0.17$$

Sin lubricación:

TABLA 4.9 Condiciones sin lubricación para algunos materiales

Acero $T \text{ } ^\circ\text{C}$	μ	Cobre $T \text{ } ^\circ\text{C}$	μ	Aluminio $T \text{ } ^\circ\text{C}$	μ	Latón $T \text{ } ^\circ\text{C}$	μ
900	0.23	850	0.16	450	0.15	650	0.18
1000	0.20	900	0.15	500	0.14	700	0.17
1100	0.19	950	0.14	550	0.13	750	0.16

Valores de la anchura del cordón de la matriz en función del diámetro o espesor de la pieza:

TABLA 4.10 Dimensiones del cordón en función del ancho

λ	R	b
4 a 6	3	20
7	3	22
8	3	24
9	3.5	25
10	4	28
12	5	32
14	6	36
16	8	44

Una vez propuesto el ancho del cordón es necesario proceder al cálculo del espesor, esto se efectúa mediante la ecuación:

$$\frac{\lambda}{\varepsilon} = \sqrt{\frac{(P_f - P_a - P_b)}{4\mu'Q'}}$$

donde:

$$\varepsilon = 1 \text{ a } 6 \text{ mm}$$

$$8 < \frac{2\lambda}{\varepsilon}$$

El valor obtenido deberá cumplir con las condiciones que se indican, en caso de no ser así, será necesario proponer un nuevo valor a λ y repetir el cálculo; si después de dos iteraciones no se obtienen resultados convenientes, se recomienda proponer otro tipo de cordón de rebaba, como por ejemplo con freno (figura 4.15)

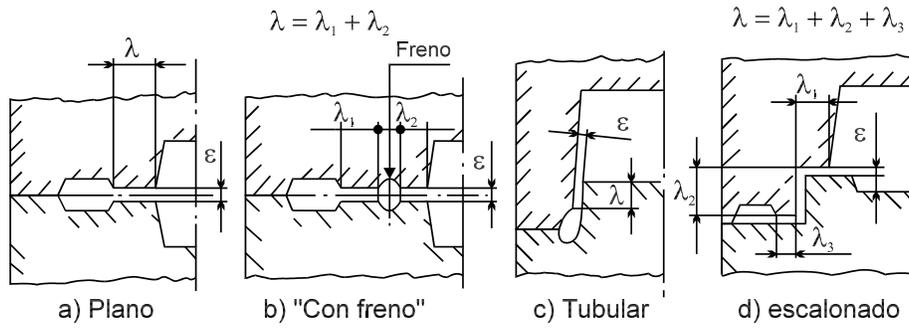


FIGURA 4.21 Distintas formas del cordón de rebaba (Rio J. del, 1980)

$$Q = f(T, \text{material})$$

$T \text{ } ^\circ C$	Q
870	3.24
950	2.57
1000	2.27
1050	1.86
1100	1.52
1150	1.25

p_f = presión de forja p_1 o p_2

p_a = representa la pérdida de carga al transmitir la presión de forja a la rebaba, y se obtiene con:

$$K = \frac{2H'}{L} \quad \text{o} \quad K_\alpha = \frac{2H'}{D}$$

H' = distancia del plano de rebaba al plano superior

$$p_b = \sigma_0 \frac{2\lambda}{D}$$

σ_0 = esfuerzo de cedencia del material alojado en el cordón de rebaba.

h) Determinación de la carga requerida para la forja. El último paso en el proceso de diseño lo representa la determinación de la carga para el proceso, esto se hace con la finalidad de seleccionar un equipo con la capacidad requerida, la carga aplicada es entonces:

$$P = p_f A_p + p_r A_r$$

Donde

P = Carga de forja (ton)

A_p = Sección transversal de la pieza

p_f = Presión necesaria para el correcto llenado de la cavidad

A_r = Sección transversal de la rebaba, se calcula como:

A_r = perímetro \times ancho del cordón

p_r = Presión ejercida sobre el cordón de la rebaba, ésta se calcula con la constante:

$$K_r = \frac{\varepsilon}{2\lambda} \quad \text{o} \quad p_r = \frac{\sigma_0}{Q_r} [e^{Q_r} - 1]$$

$$Q_r = \frac{2\mu\lambda}{\varepsilon}$$