

TEMA 12

FORJA

Introducción.

La forja es uno de los procedimientos más antiguos utilizados para la conformación de los metales, pues ya en Egipto, hacia el año 500 a. de C., se forjaba el cobre y sus aleaciones para la fabricación de armas y utensilios domésticos. En la actualidad se sigue empleando para la fabricación de infinidad de piezas de diversas formas y tamaños.

La forja es un procedimiento de conformación de los metales que se realiza someténdolos a esfuerzos violentos de compresión, repetidos o continuos, generalmente realizado en caliente o, en casos más excepcionales, en frío. A alta temperatura no sólo pueden darse grandes deformaciones a los metales con pequeños esfuerzos, sino que la magnitud de la deformación puede ser prácticamente ilimitada sin que se produzca acritud (aumento de la resistencia a la deformación).

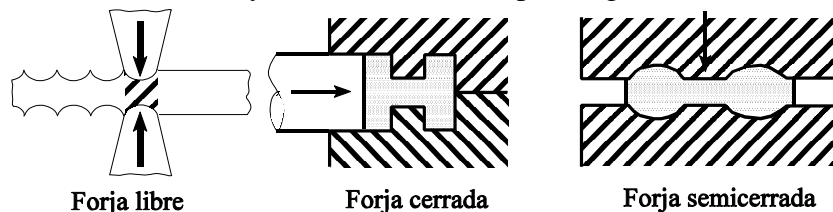
Con la forja se realizan dos clases de trabajo:

- *Piezas acabadas*, a las que por forja se les da su forma definitiva.
- *Piezas de desbaste*, a las que por forja se les da una forma aproximada a la definitiva, y se terminan por mecanizado.

Por ello podemos considerar las siguientes clasificaciones:

Según la geometría del proceso:

Forja libre: El material se deforma libremente entre las superficies activas de los dispositivos de forja. Las herramientas se desplazan unas contra otra y carecen total o parcialmente de medidas y forma. Se fabrican piezas grandes o en número reducido.



Forja con estampa: Se utilizan herramientas conformadoras que se desplazan una contra otra (estampas) y que circundan a la pieza totalmente o en una extensión importante. Es un procedimiento de fabricación en serie. Puede ser cerrada o semicerrada.

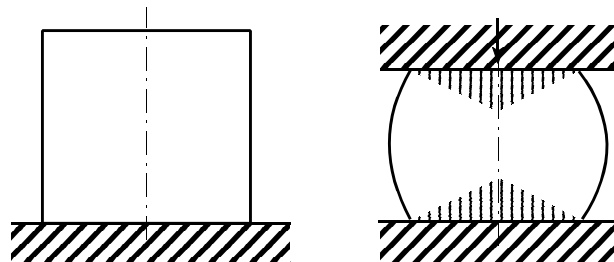
Según los equipos:

Martillo o martinetes de forja: Atacan la superficie del metal con golpes rápidos. La presión alcanza su intensidad máxima en el momento en que el martillo toca al metal y disminuye rápidamente cuando la energía del golpe se consume en la deformación del metal. En consecuencia se produce la deformación, en primer lugar, de las capas superficiales del metal.

Prensa de forja: Someten al metal a una fuerza de compresión de poca velocidad. La presión aumenta cuando el metal se está deformando y alcanza su valor máximo en el último instante antes de la descarga. Por tanto produce una zona deformada más profunda.

Tensiones en forja.

Para estudiar las tensiones que se originan en la forja se habrá de considerar la existencia de rozamiento, pues ello va a variar sustancialmente la forma de deformación de un cuerpo. Así, si se considera un cilindro sin deformar y se le somete a un proceso de compresión, las superficies límites superior e inferior tenderán a adherirse por rozamiento a las de la prensa, impidiéndose la libre deformación. Adquirirá, de esta forma, el aspecto abarrilado que se muestra en la figura, en la que se puede apreciar la formación de un cierto cono indeformado.

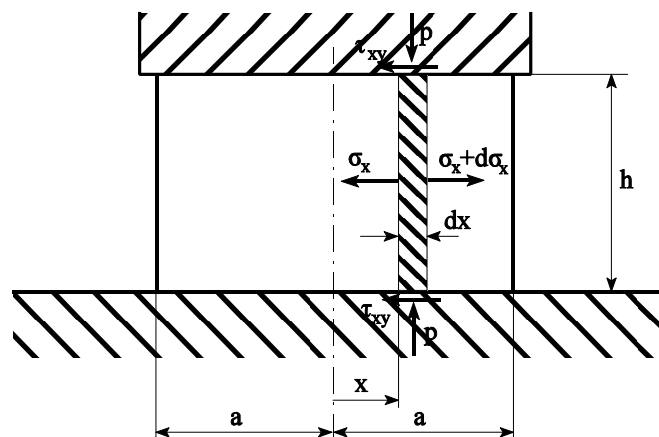


Si consideramos en una placa infinita o de ancho unidad (para reducir el estudio a un plano), de forma que no afecte a la deformación homogénea, y en él se reseña una sección dx :

De acuerdo al criterio de signos de que en el conformado plástico la compresión es positiva, si establecemos el equilibrio en ambos ejes:

$$\text{eje } y: \quad \sigma_y' \cdot h \cdot dx - p \cdot dx = 0$$

$$\text{eje } x: \quad (\sigma_x + d\sigma_x) \cdot h \cdot dx - \sigma_x \cdot h \cdot dx - 2\tau_{xy} \cdot dx \cdot h = 0$$



$$h d\sigma_x - 2\tau_{xy} dx = 0 \quad (1)$$

De acuerdo con el criterio de Von Mises para deformación plana, supuesto en direcciones principales, se tendrá:

$$\sigma_I \& \sigma_{III} = \sigma_x \& \sigma_y = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e = s$$

luego

$$\sigma_x = p = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e = s = \text{cte}$$

y se puede expresar la relación entre diferenciales

$$d\sigma_x = dp$$

como τ_{xy} es la debida al rozamiento (cortante):

$$\tau_{xy} = \mu p$$

y sustituyendo en (1) ambas relaciones, tras dividir entre h:

$$dp = \frac{2\mu p}{h} dx = 0$$

separando variables:

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

e integrando:

$$\ln p = \ln C + \frac{2\mu}{h} x$$

$$p = C e^{\frac{2\mu}{h} x}$$

imponiendo la condición de contorno:

$$\text{en } x = a \quad \sigma_x = 0 \quad Y$$

$$p = s = \sigma_x = s$$

$$s = C e^{\frac{2\mu}{h} a}$$

$$C = s e^{-\frac{2\mu}{h} a}$$

y sustituyéndola en la solución general:

$$p(x) = s e^{\frac{2\mu}{h}(a-x)}$$

y como $\sigma_x = s = p$ se tendrá igualmente:

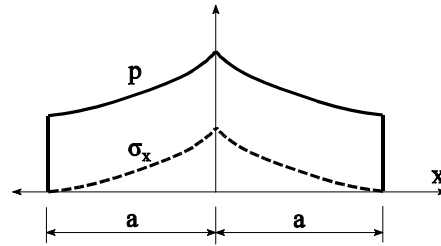
$$\sigma_x(x) = s \left(1 + e^{\frac{2\mu}{h}(a-x)} \right)$$

Si tomamos los primeros términos del desarrollo en serie de la función exponencial (pues μ es pequeño):

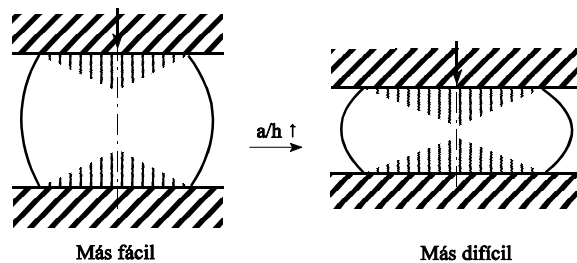
$$e^y \approx 1 + y + \frac{y^2}{2!} + \frac{y^3}{3!}$$

$$p(x) \approx s \left[1 + \frac{2\mu}{h}(a-x) \right]$$

$$\sigma_x(x) \approx s \left[\frac{2\mu}{h}(a-x) \right]$$



En donde se puede igualmente comprobar que si la relación a/h crece, aumentará la resistencia a la deformación pues la zona indeformable aumenta en términos relativos



La presión media se puede obtener de:

$$p_{\text{media}} = \frac{\int_0^a p dx}{a} \approx s \frac{\frac{2\mu a}{h} + 1}{\frac{2\mu a}{h}}$$

Y la fuerza de la prensa que es necesaria para dicha deformación será:

$$F = p_{\text{media}} 2a w$$

donde w es el ancho.

En realidad se tiene que dar un 20-25% de exceso de la fuerza para compensar aquellas fuerzas que no se tienen en cuenta al aplicar el método de deformación homogénea

Si se supone que hay adherencia perfecta, lo cual puede ser considerado como una cota superior, podría considerarse $\mu = 4$, y la solución obtenida se convertiría en:

$$p \approx s \left(1 + \frac{a-x}{h} \right) \quad \text{pues} \quad \tau_{xy} = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} = \frac{s}{2}$$

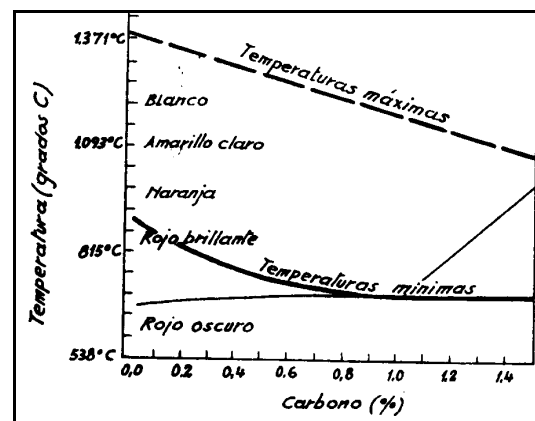
Calentamiento en la forja.

En muchos casos, la deformación se realiza a partir de materiales previamente calentados. Es importante que una pieza se caliente de manera uniforme por completo, la elevación de temperatura debe hacerse lo más suave posible para evitar una gran diferencia de temperatura entre la periferia y el núcleo, y por tanto una gran diferencia de dilatación de ambas zonas que se traduce en tensiones que pueden producir grietas. Esta velocidad de elevación de temperatura varía según los metales y aleaciones.

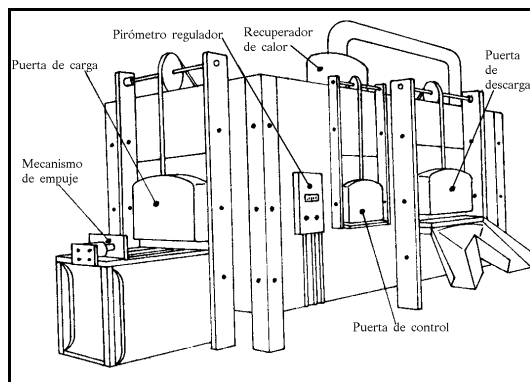
La temperatura a que deben calentarse los materiales para la forja, están comprendidas entre una temperatura mínima (superior a la de recristalización) y una máxima (por debajo del punto de fusión). En el siguiente cuadro aparecen los márgenes de la temperatura apropiada para el acero.

Los medios de calentamiento se basan en alguno de los siguientes principios:

- a) Situar el material en un ambiente caliente
- b) Generar dentro del propio material el calor necesario.



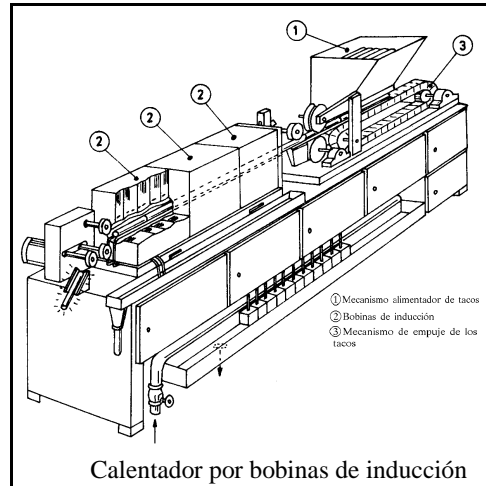
En el primer caso es necesario crear el *ambiente caliente*, lo que se consigue con el



Horno de empuje

empleo de los hornos apropiados. El calor necesario se genera en un quemador o por medio de resistencias eléctricas, y por transmisión convección o radiación, éste se propaga al material. En los hornos de combustión se produce calor quemando el combustible apropiado en una cámara. el material se deposita en la solera de la cámara. Los quemadores producen la dosificación de combustible y comburente y los equipos de regulación garantizan el mantenimiento de la temperatura deseada en le interior de la cámara. los combustibles usados pueden ser sólidos (carbón, madera), líquidos (fuel-oil, gasolina), gaseosos (butano, metano).

Si para el calentamiento se utiliza el segundo procedimiento se construyen dispositivos: de calentamiento de *inducción*, en aquellos materiales susceptibles de generar calor por el efecto producido por el campo magnético de una bobina arrollada a ellos; de *resistencia* al paso de una corriente eléctrica por su interior (por efecto Joule); de *radiación*, por ondas electromagnéticas que resultan absorbidas por los materiales al calentar.



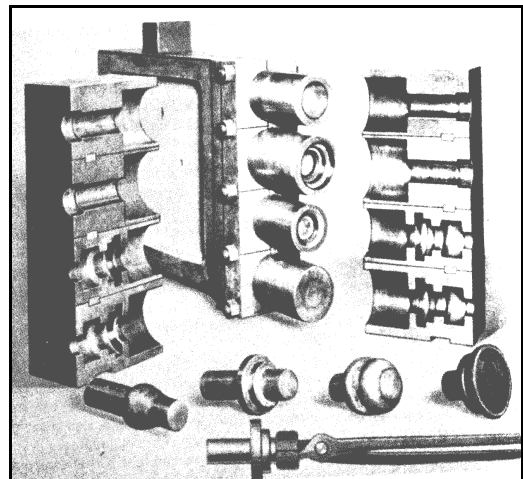
Forja por recalcado.

En este tipo de forja se aumenta el diámetro del extremo de la parte central de una barra comprimiendo ésta longitudinalmente. Puede realizarse en frío o en caliente, en máquinas de gran velocidad en la cuales las piezas se trasladan de puesto a puesto. Algunas de estas máquinas pueden forjar redondos de hasta 25 cm.

Para este tipo de forja se emplean comúnmente matrices partidas dotadas de varias posiciones o cavidades. Estas matrices se abren levemente para que la barra caliente penetre en su interior y quede en la posición correcta. Luego se aprietan una con otra y un punzón o émbolo se desplaza longitudinalmente comprimiendo la barra, recalcándola contra la cavidad de la matriz. Abriendo la matriz se pasa a otra posición o a la extracción.

Las máquinas de forjar por recalcado se utilizan para forjar cabezas de pernos, tornillos, etc., así como válvulas, acoplamientos y muchos otros componentes de pequeño tamaño.

Existen en el mercado maquinaria para la forja automática en caliente, que se alimenta por un extremo de redondos de unos 8 m. de longitud y, por el otro, entrega piezas de hasta 15 cm de diámetro y 5 Kg de peso, macizas o huecas, redondas o simétricas, a ritmos que llegan hasta las 180 unidades por minuto. El material se calienta en la propia máquina haciéndolo pasar por calentadores inductivos, a continuación sufre un descascarillado y posteriormente se conforma. El costo de estas máquinas se justifica con una elevada producción de un producto dado.

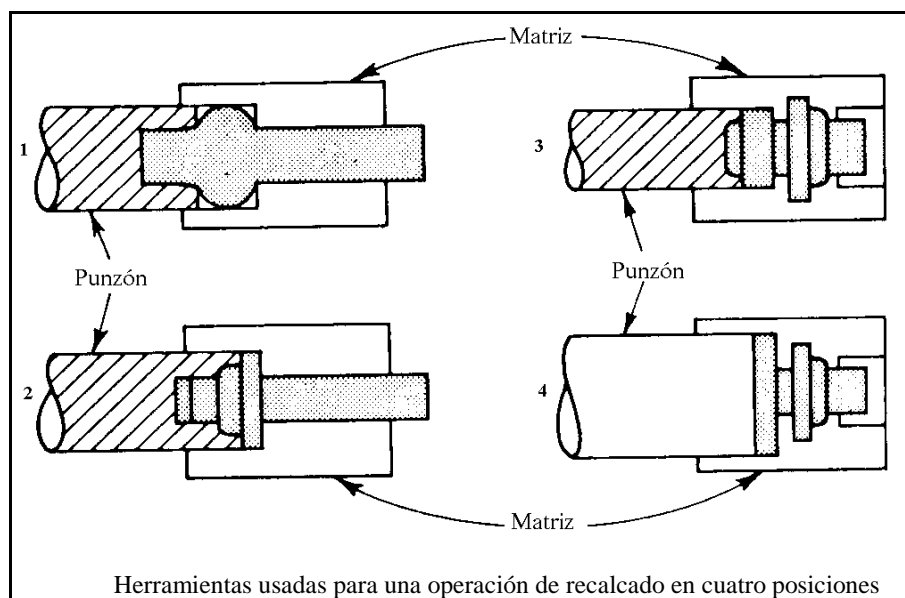


El encabezamiento en frío se utiliza para ensanchar el extremo de porciones de barra o alambre (cabezas de tornillos, remaches, clavos). Se corta un trozo de redondo y pasa al soporte-

expulsor. Tiene lugar el recalco en una o más carreras de las estampas (cuando son necesarios más de un golpe giran para posicionarse entre cada dos carreras). Una vez efectuado el encabezamiento, el tope expulsor avanza para extraer la pieza.

Existe otra variante en la que el redondo se alimenta de forma continua, para ser aprisionado y, luego encabezado. El metal vuelve a avanzar y, entonces es cortado a la longitud conveniente y se repite el ciclo. Este procedimiento se aplica a la fabricación de clavos.

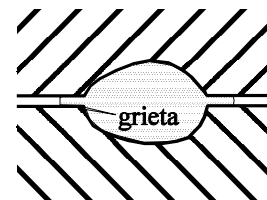
En la forja por recalco puede utilizarse cualquier tipo de prensa, pero actualmente las más en uso son las prensas horizontales y las eléctricas. Estas últimas van bien para trabajos de recalco previo cuando las formas a obtener no son complicadas.



Defectos en forja.

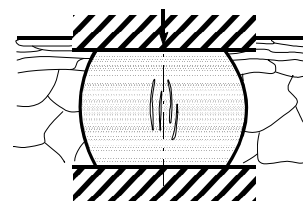
De entre los defectos que se pueden originar en una pieza al ser conformada a través de un proceso de forja, se pueden destacar como más significativos los siguientes, incluyendo en cada una las causas más habituales:

- Grietas y plegado: zonas excesivamente trabajadas, materiales frágiles en caliente, temperatura demasiado baja, zonas de difícil llenado.



- Exceso de tensiones residuales: se eliminan con un conveniente tratamiento térmico que las alivie.

- Falta de penetración: cuando la deformación se limita a las capas superficiales no destruyéndose la estructura dendrítica interna.



- Pandeo: las piezas esbeltas han de tener una relación diámetro/longitud superior a 3. Se puede evitar mediante la



colocación de guías, aunque es una solución poco empleada.

-Abarrilamiento: por rozamiento y que, interiormente debido al origen de fuerzas de tracción secundaria, pueden dar lugar a la formación de grietas.

-Estructura de fibra: las propiedades de ductilidad son inferiores en la dirección transversal. Se evita con reducciones inferiores al 50-70% de la sección transversal.