



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE TECNOLOGIA DE LA INDUSTRIA  
INGENIERIA MECÁNICA**

**TÍTULO**

Reactivación y modificación de una fragua para implementar los laboratorios en la asignatura de conformado de metales

**AUTOR**

Br. Branlid Josué Mejía.

**TUTOR**

Ing. Msc. Jorge Alberto Rodríguez García

**Managua, 17 de Febrero de 2014**

## **DEDICATORIA**

A Dios primeramente, a nuestros padres, a nuestro profesor que nos apoyo en todo momento incondicionalmente a lo largo de nuestra trayectoria académica.

A todas las personas que nos hay apoyado de alguna forma, para hacer posible este trabajo; al Ing. Pablo Mota Coca que nos apoyó incondicionalmente y al Ing. Francisco García.

Por siempre agradecidos

Br. Branlid Josué Mejía.

## RESUMEN DEL TEMA

El presente trabajo monográfico representa el trabajo de culminación de estudios para optar al título de ingeniero mecánico.

En este se muestra la modificación, puesta en marcha, y la guía de trabajo para la realización de los laboratorios de conformado de metales; en donde se da la selección adecuada del tipo de combustible a usar, el tiempo de trabajo,; el tipo de metal a usar que debe de ser varilla de construcción de  $\frac{3}{4}$  de 12 pulgadas de largo, los cálculos para la masa del metal y el combustible, recomendaciones para determinar cómo realizar el trabajo, bajo qué criterios se realizara las pruebas dependiendo del tiempo y la temperatura de recristalización del metal.

En esta monografía también se presentan los criterios de seguridad y la forma de trabajo de la persona que estará a cargo del laboratorio así como las medidas que tiene que tomar el y sus estudiantes a la hora de realizar las prácticas. Adicionalmente se presenta una justificación de cada uno de los elementos instalados, turboventilador, tuberías, etc.

## ÍNDICE

<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II.OBJETIVOS</b> .....	4
<b>II.I. OBJETIVO GENERAL</b> .....	4
<b>II.II. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	4
<b>III. JUSTIFICACIÓN</b> .....	5
<b>IV.MARCO TEÓRICO</b> .....	6
IV.I. Forjado de Herrero.....	6
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCION A LA PRÁCTICA DEL FORJADO</b> .....	13
1.1. Importancia de la Forjada para la Industria de Fabricación de Máquinas Herramienta .....	13
1.2. Clasificación de las operaciones de Forja .....	14
1.3. Márgenes y Tolerancias para el Maquinado de las piezas Forjadas .....	14
1.4. Dibujos de Forja .....	18
1.5. Especificaciones técnicas y elección del material para las piezas a Forjar .....	27
<b>CAPÍTULO 2. INFORMACIÓN GENERAL SOBRE EL ACERO</b> .....	48
2.1. Información general sobre el acero .....	48
2.2. Información general sobre las propiedades del acero .....	48
2.3. Clasificación de los Aceros .....	53
2.4. Grados de los Aceros.....	56
2.5. Estructura del Acero.....	59
2.6. Importancia del calentamiento del acero en la práctica de Forja .....	66
2.7. Cambios en las propiedades de los metales al calentarse.....	66
2.8. Oxidación y Descarburación del acero.....	68
2.9. Sobrecalentamiento y quemadura del acero.....	73
2.10. Introducción: La temperatura para la forja.....	75
2.11. Como determinar la duración del Calentamiento del Acero. ....	80
<b>CAPITULO 3. EL COMBUSTIBLE Y SU COMPOSICIÓN</b> .....	83
3.1. Introducción.....	83

3.2. Tipos de combustible y sus características .....	83
3.3. Selección del combustible para los hornos de Forjar .....	88
3.4. Proceso de la combustión .....	90
<b>CAPITULO 4. DISPOSITIVOS DE CALENTAMIENTO .....</b>	<b>94</b>
4.1. Introducción.....	94
4.2. Normas fundamentales para trabajar la Fragua .....	98
<b>CAPÍTULO 5. OPERACIONES PRINCIPALES DE LA FORJA MANUAL.....</b>	<b>101</b>
5.1. Información general sobre las herramientas del Forjador .....	101
5.2. Instrumentos de medición .....	107
5.3. Información general sobre la Forja Manual .....	110
5.3.1. Estirado y Ensanchado .....	112
5.3.2. Corte o Tajado .....	124
5.3.3. Recalcado .....	129
5.3.4. Doblado.....	134
5.3.5. Perforado y punzonado de agujeros .....	144
5.3.6. Soldadura por Forjado .....	150
5.4. Normas de seguridad .....	162
<b>CAPÍTULO 6. INFLUENCIA DE LA DEFORMACION EN LAS PIEZAS FORJADAS.....</b>	<b>165</b>
6.1. Deformación Plástica .....	165
6.2. Efecto del martillado en la estructura y propiedades de los metales.....	169
<b>CAPÍTULO 7. REDISEÑO DE LA FRAGUA.....</b>	<b>174</b>
7.1. Turboventilador .....	175
7.2 Motor eléctrico.....	175
7.3. Ventilador .....	177
7.4. Tubería y accesorios .....	179
7.5. Sistema de combustible .....	180
7.6. Sistema eléctrico.....	182
7.7. Panel eléctrico.....	183
7.8. Botonera.....	183
7.9. Sistema de evacuación de los gases .....	184

<b>CAPÍTULO 8. DISEÑO FACTORIAL</b> .....	185
8.1. ANOVA Multifactorial- Temperaturas .....	185
8.2. ANOVA Simple- Temperaturas por MEZCLA.....	189
8.3. Pruebas de Múltiple Rangos para TEMPERATURAS por MEZCLA .....	192
8.4. Prueba de Kruskal-Wallis para TEMPERATURAS por MEZCLA.....	193
8.5. Resumen.....	195
<b>CAPÍTULO 9. RESULTADO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL</b> .....	196
9.1. Introducción y Desarrollo.....	196
<b>CAPÍTULO 10. TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS METALES</b> .....	201
10.1. Nociones Generales.....	201
10.2. Clases de Tratamiento Térmico .....	202
10.2.1. Recocido.....	202
10.2.2. Normalizado .....	204
10.2.3. Temple .....	204
10.2.4. Revenido.....	206
10.3. Ejecución del Tratamiento Térmico .....	207
10.4. Factores de Importancia en un Tratamiento Térmico .....	208
10.5. Conclusiones del tratamiento térmico para el trabajo en forjas. ....	209
<b>CAPÍTULO 11. GUIA PRÁCTICA PARA CONFORMADO DE METALES, FORJA LIBRE</b> .....	210
11.1 Forja Libre.....	211
11.2. Dirección de golpes.....	212
11.3 Ejemplo. FORJADO DE CINCEL .....	213
11.3.1. Introducción .....	213
11.3.2. Conclusiones .....	215
11.3.3. Guía de la práctica de laboratorio .....	216
11.3.4. Medidas de seguridad.....	216
11.3.5. Modelo de informe de la práctica de laboratorio práctica de forjado .....	217
<b>CAPÍTULO 12. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO DEL TALLER Y MEDIDAS DE SEGURIDAD</b> .....	218
12.1. Utilización racional del equipo de Forja.....	218

12.2. Taller del Forjador .....	222
12.3. Las calificaciones del Obrero .....	226
12.4. Ingeniería de seguridad en el territorio de una empresa .....	226
12.5. Primeros auxilios en caso de accidentes. Servicios médicos y sanitarios .....	229
<b>CONCLUSIONES</b> .....	232
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	233
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	234

## I. INTRODUCCIÓN

Uno de los primeros procesos tecnológicos que se realizó fue el conformado de metales, a través de la forja libre, con la cual se comienza a fabricar herramientas de trabajo de guerra; siendo necesario como equipo de fusión para tratar los metales.

En general se aplica el esfuerzo de compresión para deformar plásticamente el metal. Sin embargo, algunos procesos de conformado estiran el metal, mientras que otros lo doblan y otros más lo cortan.

Para conformar exitosamente un metal, éste debe poseer ciertas propiedades, las propiedades convenientes para el conformado son generalmente una *baja resistencia a la fluencia y alta ductilidad*. Estas propiedades son afectadas por la temperatura. La ductilidad se incrementa y la resistencia a la fluencia se reduce cuando se aumenta la temperatura de trabajo.

La temperatura de recristalización define el proceso de conformación, cuando el metal es calentado a una temperatura inferior a la de recristalización estaremos en presencia de un proceso de conformación en frío; y cuando es calentado por encima el proceso se define como conformación en caliente. Otros factores como la velocidad de formación y la fricción afectan el desempeño del conformado de metales.

Una consideración de importancia es la capacidad de trabajar y de modelar los materiales, o sea la cantidad máxima de deformación que puede resistir un material sin fallar en un proceso específico de conformado. El término de **capacidad de trabajado** por lo general se aplica en procesos de deformación volumétrica (como forja, laminado y extrusión) en los cuales las fuerzas aplicadas a la pieza de trabajo son de naturaleza predominantemente compresiva. En contraste, el término **capacidad de conformado** usualmente se lo utiliza para procesos de conformado de lámina (como doblado, estampado, modelado por estiramiento, etc.), donde las fuerzas aplicadas son principalmente de tensión.



### **Principio del Conformado de Metales**

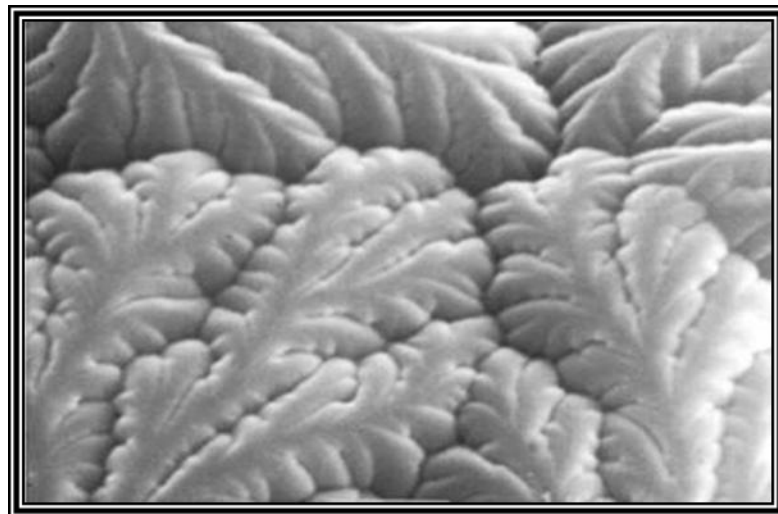
Durante el conformado del metal se producen cambios en su volumen y en el tamaño y forma de los granos, la estructura de grano “grueso” y deformada del lingote o del metal de la colada se transforma en una estructura de granos equiaxiales y pequeños, mejorándose las propiedades mecánicas.

Luego de la colada, la superficie del lingote en contacto con el molde, se enfría más rápido, dando lugar a granos gruesos.

Estas dendritas, mientras crecen en el medio líquido, tienen forma de árbol (de ahí su nombre).

Esta estructura, aparte de sus pobres propiedades mecánicas, nos da también heterogeneidad en la composición química para el caso de las aleaciones (acero).

Solucionamos esto cambiando la estructura de los granos con el proceso de recristalización, en el cual en determinado rango de temperatura se forman nuevos granos equiaxiales, libres de deformación, que reemplazan los granos antiguos. (Ver Figura).



**Formación de dendritas**

Esta temperatura de recristalización se define también como la necesaria para producir la recristalización completa en aproximadamente 1 hora.

Se disminuyen así la densidad de dislocaciones, y eleva la ductilidad. Con esto se ve que en general laminamos por encima de la temperatura de recristalización, convirtiendo la estructura "fundida" (frágil), en estructura laminada (tenaz).

## **II.OBJETIVOS**

### **II.I. OBJETIVO GENERAL**

Rediseño y puesta en marcha de una fragua para implementar los laboratorios de la asignatura de conformado de metales.

### **II.II. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ❖ Rediseño de la fragua existente en el laboratorio de fundición.
- ❖ Puesta en marcha de la fragua existente en el laboratorio de fundición.
- ❖ Implementar guías de los laboratorios de la asignatura de conformado de metales.
- ❖ Valorar de los combustibles sólidos cual es el más eficiente en las condiciones de nuestro laboratorio.

### III. JUSTIFICACIÓN

En el laboratorio de fundición de la Facultad de la Industria este dispositivo “fragua” fue adquirida en los años 1976 por una donación de los Ingleses, fue destinada para impartir laboratorios de conformado de metales, originalmente fue diseñada para trabajar con gas butano pero con el pasar de los años y sin respectivo mantenimiento perdió su propósito , nuestra meta es reactivarla y modificarla para trabajar con combustible sólido el cual es mucho más barato, e idóneo para estos tipos de trabajos. Esto permitirá establecer las prácticas de forja libre en la asignatura de conformación.

Su rediseño permitirá que sea un fuego controlado, al introducir un metal al fuego puede ser llevado a un estado maleable o realizar otros trabajos metalúrgicos y modificar algunas propiedades tales como: dureza, plasticidad, tenacidad etc.

## IV.MARCO TEÓRICO

### IV.I. Forjado de Herrero

Este es indudablemente el más antiguo tipo de forjado, pero en la actualidad es relativamente poco común. La fuerza de impacto para la deformación es aplicada manualmente por el herrero por medio de un martillo. La pieza de metal es calentada en una fragua y cuando se encuentra a la temperatura adecuada es colocada en un yunque. El yunque es una masa pesada de acero con la parte superior plana, una parte en forma de cuerno la cual está curvada para producir diferentes curvaturas, y un agujero cuadrado en la parte superior para acomodar varios accesorios del yunque.



**Ilustración 1. Forjador**

Las fraguas son los dispositivos más elementales que hoy en día existen para calentar el metal y generalmente se utilizan en herrerías pequeñas para realizar trabajos de reparaciones y también en talleres de forja para efectuar el calentamiento local de las piezas brutas largas antes de doblar y recalcar las mismas.

Las fraguas, según su destino y sus particularidades constructivas, se dividen en portátiles y estacionarias, de un fogón y de fogones múltiples, abiertas y cerradas.

Las fraguas funcionan con combustible sólido, líquido y gaseoso. En calidad de combustible sólido se utiliza con mayor frecuencia el coque y el carbón de leña que contienen una pequeña cantidad de azufre.

Durante el calentamiento el azufre pasa al metal y reduce bruscamente la calidad del mismo. Además, en el proceso de combustión estos carburantes forman una cantidad mínima de escorias, como Combustible es mejor usar el carbón de piedra de las clases (OC, K y T)<sup>1</sup> Norma ASTM D388-98.

La mayoría de las operaciones de forja se realizan en caliente (por arriba de la temperatura de recristalización), dada la demanda de deformación que el proceso requiere, la necesidad de reducir la resistencia e incrementar la ductilidad del metal de trabajo. Sin embargo, el forjado en frío (por debajo de la temperatura de recristalización) también es muy común para ciertos productos, la ventaja del forjado en frío es la mayor resistencia que adquiere el material, que resulta del endurecimiento por deformación.

En el forjado se aplica la presión por impacto o en forma gradual. La diferencia depende más del tipo de equipo que de las diferencias en la tecnología de los procesos. Una máquina de forjado que aplica cargas de impacto se llama martinete de forja, mientras que la que aplica presión gradual se llama prensa de forjado.

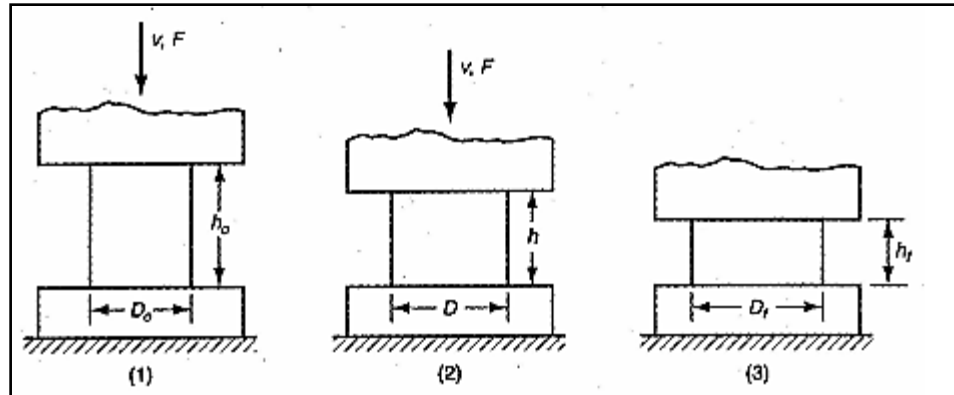
Los dados pueden restringir el flujo del metal de tres maneras:

a) Forjado en dado abierto:

Consiste en comprimir una parte de sección cilíndrica entre dos dados planos. También se denomina recalado. Puede realizarse con dados convexos, cóncavos o por secciones.

---

<sup>1</sup> <http://eprints.uanl.mx/1460/1/1020146963.PDF>



**Ilustración 2. Forjado mediante Dados planos**

Se practicaba cuando menos desde 4000 a.C., y quizá desde 8000 a.C. se usó primero para joyería, monedas y diversos implementos, martillando el material con herramientas de piedra.

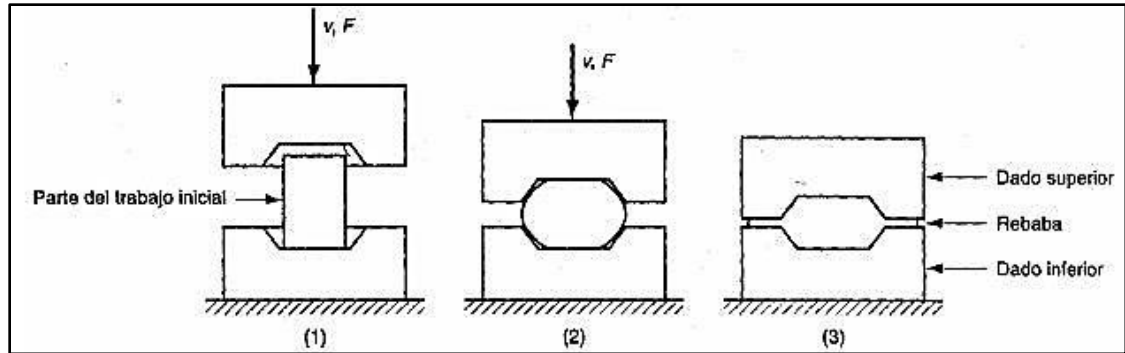
La fuerza  $F$  aplicada se denomina fuerza de forjado. Esta fuerza  $F$  en una operación de forjado con dado abierto sobre una pieza sólida cilíndrica, se puede calcular con la fórmula:

$$F = Y_f \pi r^2 \left( 1 + \frac{2\mu r}{3h} \right)$$

Donde  $Y_f$  es el esfuerzo de fluencia del material,  $\mu$  es el coeficiente de fricción y  $r$  y  $h$  son el radio y la altura de la pieza, respectivamente.

b) Forjado en dado impresor:

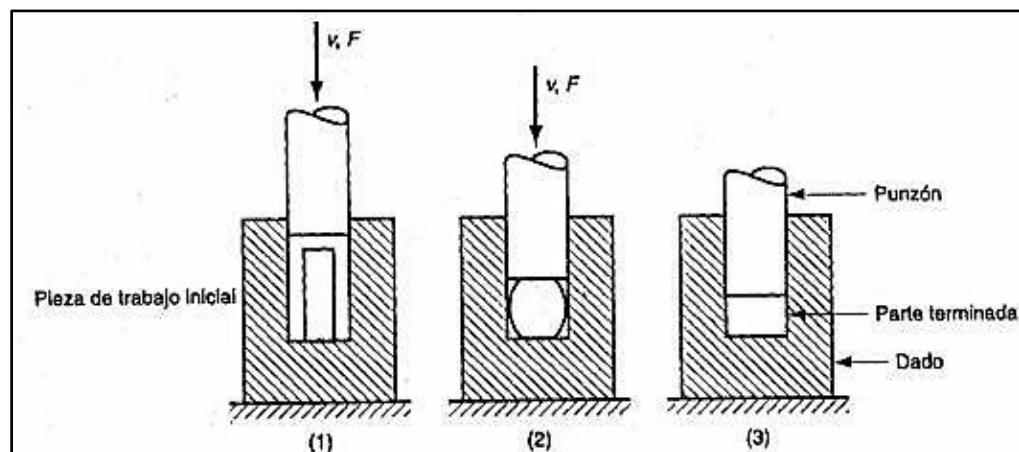
Se realiza con dados que tienen la forma inversa a la pieza. Al cerrarse el metal fluye más allá de la cavidad del dado y forma una rebaba en la pequeña abertura entre las placas. Aunque la rebaba se recorta posteriormente, tiene la función de mantener la pieza en la cavidad.



**Ilustración 3. Forjado con Dado impresor**

c) Forjado sin rebaba:

La pieza de trabajo original queda contenida completamente dentro de la cavidad del dado durante la compresión.



**Ilustración 4. Forjado sin rebaba**

El acuñado es una aplicación especial del forjado sin rebaba mediante el cual se imprimen los finos detalles del dado en la superficie superior o en el fondo de la pieza de trabajo.

Involucra la aplicación de esfuerzos de compresión que exceden el esfuerzo de fluencia del metal. El esfuerzo puede ser aplicado rápida o lentamente. El proceso puede realizarse en frío o en caliente, la selección de temperatura es decidida por factores como la facilidad y costo que involucre la deformación, la producción de piezas con ciertas características mecánicas o de acabado superficial. Más del 90% de los procesos de forjado son en caliente.



Antiguamente en la fragua, usaban el efectivo y barato sistema de fuelle. Un aparato que constaba de 2 tablas con forma de lágrima unidas por un cuero flexible.

Pocos artesanos usan la fragua en estos tiempos. Existen el gas, y aparatos que funcionan con petróleo, etc. más rápido y eficiente, pero....no es tan así.

La fragua mantiene el calor durante el tiempo necesario, levanta temperatura rápido y en especial con el mínimo costo de dinero. El gas, en especial el natural tiene más calorías que el carbón.

La fragua tiene normalmente un espacio (cuadrado o redondo) tipo bandeja de entre 7 y 10 cm de altura con un agujero en el medio del piso donde se coloca el carbón (de hulla o industrial, carbón de piedra). Este agujero suele tener una malla para que las piedras más chicas del carbón no caigan al recipiente que está inmediato donde además se juntan los desechos.

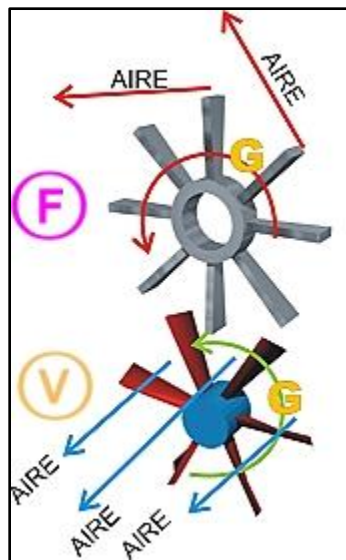
Esta bandeja y su agujero en el medio tienen un tubo de chapa por debajo del piso por donde viaja el aire forzado hacia el carbón que es la única salida. Un sistema de paletas envía aire hacia un punto por debajo de lugar donde se encuentra el carbón.

#### Hay dos maneras de avivar el carbón:

- a. Sistema antiguo como el hombre mismo, es el sistema de fuelle (el fuelle también se usaba para dar aire en las estufas antiguamente) para enviar aire al carbón y avivar el fuego es un sistema más rústico aunque también es efectivo.
- b. Las paletas que envían mucho más caudal de aire en menos tiempo. Sistema de aspas que envían aire al carbón. Las aspas unidas al eje de arriba "F" son las aspas encerradas dentro de una caja redonda con diámetro casi exacto al diámetro total de las aspas (incluyendo el eje). Como las aspas son rectas el aire quiere salir hacia donde se empuja, o

sea de frente (vea las flechas rojas). En el caso de las aspas convencionales "V" (tipo hélice de avión). El aire es dirigido hacia atrás o adelante aunque este modelo ocupa demasiado lugar.

"G" es el giro de las aspas. La fragua mecánica con tracción tiene unas aspas que giran mediante una manivela que el usuario opera de forma manual a veces tiene un sistema de engranes que aceleran / multiplica los giros / el movimiento se realiza en un espacio cerrado (redondo/circular) que dirige el aire hacia un tubo que sólo permite la salida del aire debajo del carbón.



**Ilustración 5. Aspas de Fragua Mecánica**

La fragua usa carbón de hulla, también puede emplear “coque” o carbón industrial después de encender, dura mucho tiempo encendido y levantan altas temperaturas focalizadas en un área. El no tener que usar energía eléctrica le hace versátil para usar en lugares alejados del suministro de energía.

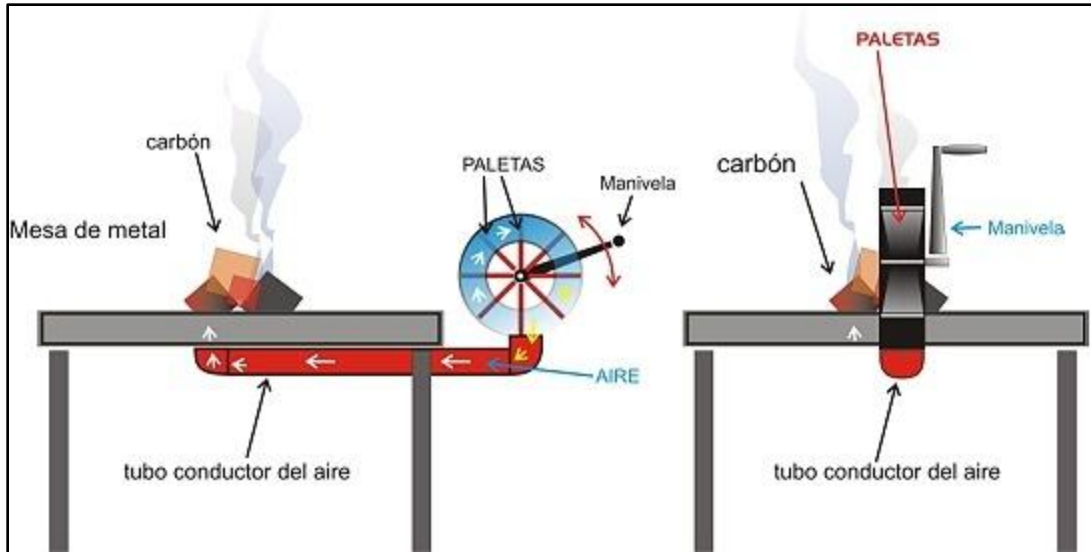


Ilustración 6. Fragua Mecánica

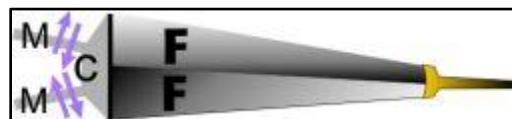


Ilustración7. Fuelle

El fuelle; se dice del artefacto de enviar aire hacia donde se quiere prender o encender fuego con carbón o leña. "M" es el mango donde el usuario presiona de arriba hacia abajo para producir aire hacia el lugar deseado. "C" es el cuero o tela, donde una válvula permite la entrada de aire hacia "F" (cuero plegado muy blando / sobado) que lo expulsa hacia la boquilla (en amarillo). El movimiento del usuario de las manijas "M" produce un caudal de aire dirigido.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCION A LA PRÁCTICA DEL FORJADO

### 1.1. Importancia de la Forjada para la Industria de Fabricación de Máquinas Herramienta

De acuerdo con los procesos de construcción y reconstrucción de los elementos fundamentales componentes de una máquina cualquiera, a la forja desempeña un papel importante, pues la misma mejora la calidad del acero y a la vez lo hace más resistente. La forja se realiza antes de que las piezas adquieran su forma propia, sus dimensiones exactas y su acabado superficial. A los elementos forjados, hayan sido o no trabajados a máquina, se les llama piezas forjadas. Se ha podido comprobar, mediante cálculos, que Rusia, por ejemplo, del 15 al 20% de los metales que se producen están sujetos al proceso de forja y que cerca de una tercera parte de los metales procesados allí, han sido sometidos a la forja y al estampado.

La forja mecánica se emplea ampliamente en la fabricación de tractores, automóviles, maquinaria agrícola, construcción naval, construcción de locomotoras y otras industrias. Como ejemplo fundamental podemos citar la fabricación de coches de ferrocarril, donde el 70% de las piezas que constituyen la estructura del carro son forjadas. No solo se fabrican máquinas por el proceso de forja, sino también muchas herramientas. Además, el tiempo requerido para la fabricación de elementos de máquinas o piezas se reduce por la forja, economizándose también acero, lo que disminuye el costo de las mismas.

**Ejemplo:** Cuando se fabrica a máquina un cigüeñal de 17 kg de una barra de acero cilíndrica, se pierde en virutas hasta 32 kg, sin embargo, cuando se elabora un cigüeñal de igual peso por el proceso de forja, se pierde solamente 14 kg de acero en virutas, lo que representa el 56,6% menos.

La importancia de la forja explica el hecho de que casi todos los talleres de maquinarias cuentan con una sección de forja y estampado.

## **1.2. Clasificación de las operaciones de Forja**

La forja es el proceso mediante el cual se conforma el metal bajo la acción de altas temperaturas y es ejecutado a golpes de martillo o mediante la presión de una prensa.

De acuerdo con los métodos que se emplean para la elaboración los procesos se clasifican en: forja a martinete y forja a troquel (estampado o semiestampado). En el forjado a martinete, al golpear el metal que se procesa entre los dados, este cambia la forma del mismo. Hecho esto se controla los cambios de dimensiones y de forma al elemento forjado. En el estampado, el flujo del metal se limita a la figura de la estampa o troquel, en la cual el metal adquiere su forma y dimensiones predeterminadas

## **1.3. Márgenes y Tolerancias para el Maquinado de las piezas Forjadas**

Las piezas producidas en un taller de forja se clasifican en piezas en bruto y terminadas. Las piezas en bruto son objeto de maquinado; las piezas terminadas, no son objetos de ningún maquinado adicional.

Antes que una forjadura en bruto pueda ser producida se debe hacer un dibujo del material basado en las dimensiones de la pieza terminada o de la pieza en bruto maquinada. Las dimensiones nominales de la pieza forjada se obtienen agregando el margen o sobreespesor para el maquinado a cada dimensión de la parte terminada.

Los márgenes son cantidades de material estipuladas por encima y por debajo de las dimensiones nominales de la parte terminada. La cantidad del margen debe ser tal que asegure las dimensiones específicas de la pieza y del acabado de su superficie.

No importa lo cuidadoso que sea el forjador al hacer su trabajo, siempre las dimensiones de la pieza forjada serán mayores o menores que sus dimensiones nominales. Por esta razón, para limitar la variación de las dimensiones nominales de la pieza, los dibujos para forjar siempre especifican las variaciones

permisibles, o tolerancias; limitan de esta forma la inexactitud del forjador. Consecuentemente, la tolerancia para cualquier dimensión de una pieza forjada es la diferencia entre dimensión nominal de una pieza por la cual una dimensión dada puede ser aumentada, se llama tolerancia superior, la tolerancia superior es la diferencia entre la dimensión máxima permisible de una pieza y su dimensión nominal. La variación permisible de la dimensión de una pieza, por la cual una dimensión dada puede ser reducida su dimensión nominal, se llama la tolerancia inferior. En otras palabras, la tolerancia inferior, es la diferencia entre la dimensión nominal y la dimensión mínima inferior de la pieza.

El margen para el maquinado puede ser mínimo, nominal o máximo, dependiendo de las tolerancias.

La **Figura 1.1** ilustra el esquema de la localización de los márgenes y tolerancias para las dimensiones externas de una pieza según se especifica en la norma Rusa GOST 7062-54.

Dónde:

$A$  = la dimensión nominal de la pieza

$\delta$  = el margen nominal para la dimensión  $A$

$B$  = la dimensión mínima permisible de la pieza igual a  $B - A + \delta$

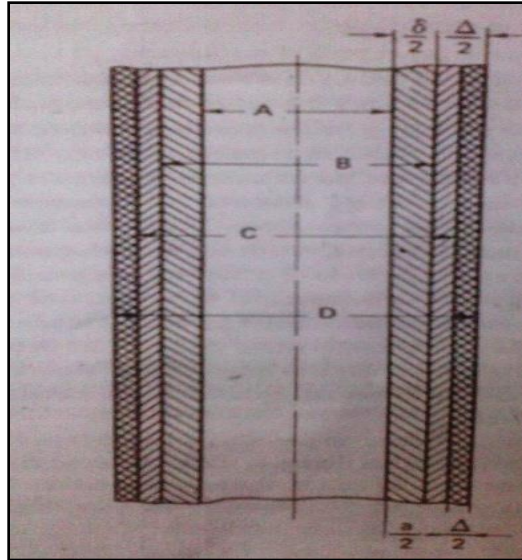
$a$  = el margen nominal para la pieza igual a  $\delta + \Delta / 2$

$C$  = la dimensión nominal (calculada) de la pieza igual a  $A+a$

$\Delta$  = la tolerancia

$\Delta/2$  = las variaciones desde la dimensión nominal de la pieza

$D$  = la dimensión máxima permisible de la pieza forjada igual a:  $B + \Delta/2 = A + \delta + \Delta$



**Fig. 1.1 Ubicación de los sobre espesores y tolerancias de las dimensiones externas de la pieza forjada**

Ejemplo: la dimensión nominal A (diámetro) de un eje es 200 mm; el margen  $a=15\text{mm}$  y la tolerancia  $\Delta = \pm 5 \text{ mm}$ .

Determine los diámetros máximo y mínimo permisible del eje.

*Solución:*

La dimensión nominal (calculada) (C) de la pieza forjada será  $200+15=215\text{mm}$

La dimensión máxima, D, de la pieza forjada será:

$$B + \Delta/2 = (200+15) + 5 = 220\text{mm}$$

La dimensión mínima, B, de la pieza forjada será:

$$A + \delta, \text{ donde } \delta = a - \Delta / 2$$

ó

$$B = 200 + (15 - 5) = 210 \text{ mm}$$

Consecuentemente, la pieza se considera que esta aceptable si se hace con un diámetro máximo de 220 mm y un diámetro mínimo de 210 mm.

Solamente se especifican las tolerancias del forjado para las piezas terminadas; no se especifica los márgenes para el maquinado, ya que las piezas terminadas no serán objeto de maquinado. Cada forjador debe hacer lo posible por producir las piezas forjadas con las tolerancias y márgenes mínimos superiores. Mientras más pequeña sea la tolerancia superior y más pequeño el margen, menos tiempo se necesitara `para su maquinado. Consecuentemente el trabajo será más económico.

Recuerde siempre que las variaciones superiores de las dimensiones de la pieza son los límites máximos para aumentar sus dimensiones. Las variaciones máximas superiores no deben ser jamás-aumentadas; por el contrario, durante el procedimiento del forjado, estas siempre deben ser reducidas tanto como sea posible.

Cuando se está realizando el dibujo de una pieza, a menudo estamos obligados a simplificar su perfil, dejando metal extra en forma de margen adicional en ciertos lugares. Estos márgenes adicionales para la pieza son simplemente márgenes aumentados, los cuales simplifican el perfil de una pieza debido a la imposibilidad o al alto costo de forjarla conformándose exactamente al perfil del trabajo terminado. Estos márgenes adicionales aumentan el consumo de metal y el tiempo necesario para maquinar la pieza.

En Rusia, se permiten márgenes de tolerancia y de ajuste adicional para la manufactura de las piezas forjadas de acero al carbono y aleaciones de acero, se especifican de acuerdo con la norma GOST 7829-56 para las piezas forjadas a martinete y a GOST 7062-54 para las piezas forjadas en prensa.



Todas las piezas forjadas se subdividen en dos grupos, dependiendo de su perfil, forma, sección transversal y peso. La norma GOST 7829-56 y 7062-54 contiene las tablas de los márgenes y tolerancias ( $\Delta$ ) para cada grupo de las piezas.

El apéndice 2 da el margen de las tolerancias especificadas en GOST 7829-55 para acero al carbono y de aleación de las piezas forjadas a martinete.

#### **1.4. Dibujos de Forja**

El dibujo de cualquier pieza forjada esta siempre basado en el dibujo del diseño del trabajo terminado, y las dimensiones especificadas para el maquinado de la superficie aumentada por la cantidad de margen especificado para el maquinado de la superficie de la pieza; en adición, esto especifica también las tolerancias de forja. En algunos casos, por ejemplo, para realizar un trabajo complicado, el perfil de la pieza se simplifica con la ayuda de los márgenes adicionales.

Comenzamos la confección del dibujo de una pieza dibujando el contorno terminado de la misma con líneas suaves; indicamos al mismo tiempo las dimensiones básicas de terminación. Hecho esto, determinamos las cantidades de los márgenes adicionales, y en conformidad a las tablas de GOST 7829-55 o GOST 7062-54 especificamos los márgenes para el maquinado y tolerancias para las dimensiones nominales se escriben sobre las líneas dimensionales junto con las tolerancias de la piezas, mientras que las dimensiones de la pieza maquinada se escriben entre corchetes de la líneas de la dimensión. Si la pieza se va a producir en una prensa, sus dimensiones nominales se redondean al 5 o al 0 más cercanos.

Esto significa, que todas las dimensiones de las piezas que terminan en 3, 4, 6,7 se redondean al 5 más próximo, mientras que las dimensiones de una pieza de 282 y 287 mm serán redondeadas a 280 y 295 mm, respectivamente.

Cuando las piezas van a forjarse como una muestra de ensayo, es decir, con un margen adicional, las dimensiones se incluyen en el dibujo de la pieza.

Algunos tipos de piezas incluyen los elementos siguientes: collar, una porción de la pieza, que tiene una sección transversal mayor que el resto de la misma, y la longitud de la cual es igual o menor que  $0,3D$ , donde  $D$  es igual al diámetro o la longitud del lado mayor del collar; escalón, el cual es la porción de una pieza, con una sección transversal más pequeña que la de la sección adyacente de la misma; hombro, una porción de la pieza, que tiene una sección transversal mayor que la de su sección adyacente; cuello, la sección de una pieza que tiene diámetro o lado más pequeño que el diámetro o lado de las secciones adyacentes a este.

Hemos aprendido que los márgenes para maquinado se especifican por las dimensiones nominales. Estos márgenes se calculan para el maquinado de la pieza desde los dos lados opuestos y deben ser suficientes para asegurar la producción de un buen trabajo después que la pieza ha sido maquinada. La cantidad del margen y la tolerancia adicional, dependerá del tipo de pieza y de la proporción de sus dimensiones.

Por esta razón, todas las piezas forjadas, según su perfil y sección transversal se clasifican en 14 tipos, de acuerdo con las normas Rusas, con el propósito de especificar los márgenes y tolerancias. La **Figura 1.2** da un tipo de piezas de acuerdo con la norma de la GOST 7829-55.

Tipo 1, incluye las piezas rectas de sección transversal, redonda y rectangular

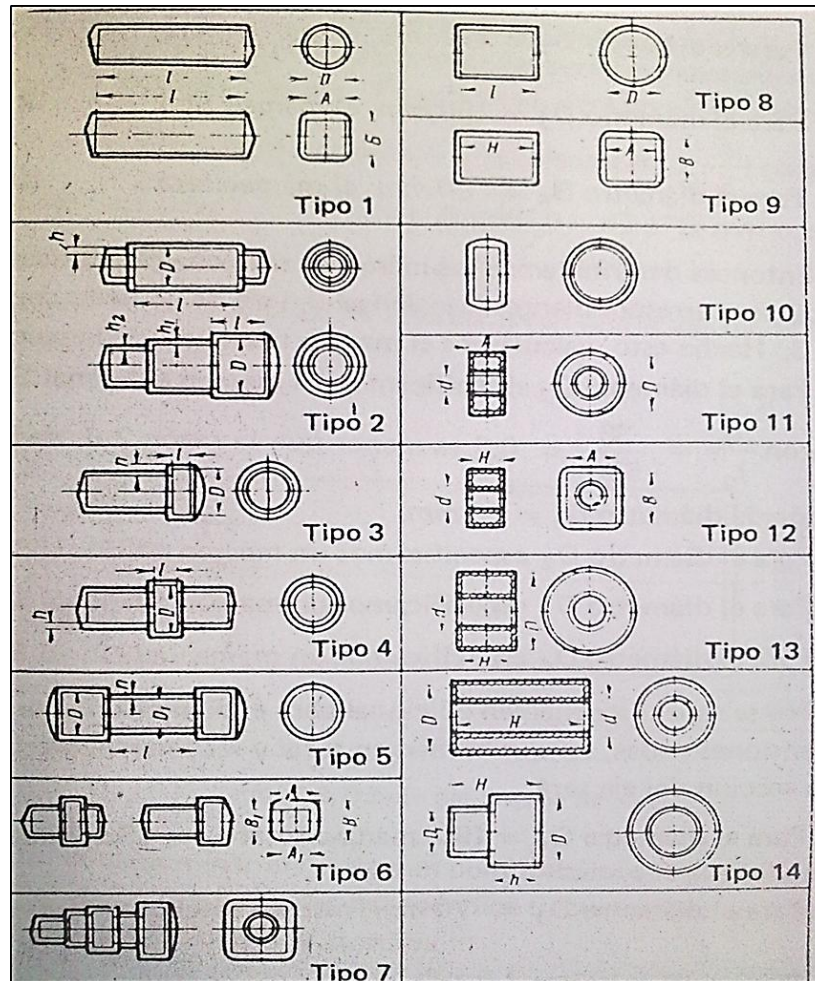
Tipo 2, incluye las piezas escalonadas de una sección transversal redonda.

Tipo 3, incluye a las piezas con reborde de sección transversal redonda.

Tipo 4, incluye piezas con collares de sección transversal redonda.

Tipo 5, incluye piezas con cuello de sección transversal redonda.

Tipo 6, incluye piezas escalonadas de sección transversal rectangular, similar a la pieza del tipo 2.



**Fig. 1.2 Tipos de piezas forjadas de acuerdo con las normas de la GOST 7829-55**

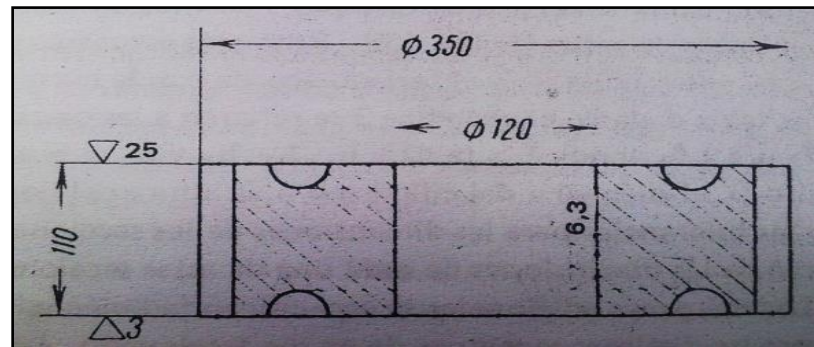
Tipo 7, incluye las piezas escalonadas de sección transversal rectangular y redonda con escalones de forma y contornos distintos.

Tipo 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14, incluyen cilindros, barras, cubos, planchas, discos, discos con agujeros, planchas con agujeros, bujes, casquillos huecos, sólidos y escalonados.

Vamos a considerar varios ejemplos de la confección de los dibujos para la forja y del cálculo de sus márgenes y tolerancias.

Ejemplo: 1. Se necesita hacer un dibujo para forjar un engranaje en bruto (**Figura 1.3**). La pieza es del tipo 11: disco con agujero (**vea Figura 1.2**).

Ante todo, hacemos un dibujo a escala de líneas suaves de los contornos del engranaje en bruto (**Figura 1.4**). Entonces, hallamos los márgenes y tolerancia para este tipo de norma Rusa 7829-55. Los datos de esta tabla se refieren a las piezas que tienen forma en la cual  $H \leq D$ ,  $d \leq 5 D$ .

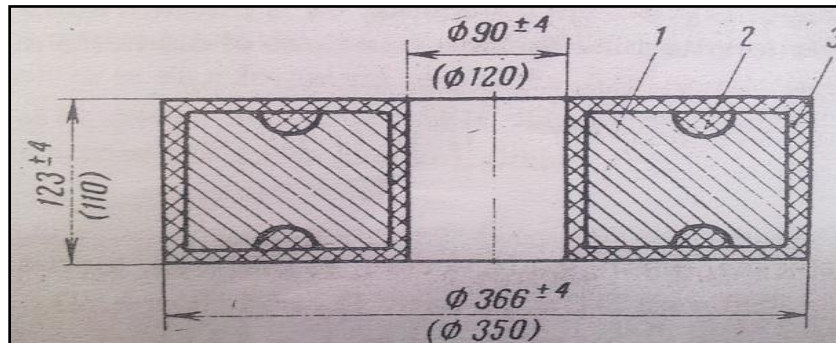


**Fig. 1.3 Dibujo de un disco de engranaje**

Como se puede ver por esta tabla, los márgenes a, b, y c, como también en la variación de la dimensión nominal, dependerán del diámetro exterior D y de la altura H del engranaje. En nuestro caso, para un engranaje de 350 mm de diámetro exterior D y una altura H de 110 mm, los márgenes y la tolerancia para el diámetro D serán  $a = 16 + 4$ ; los márgenes y la tolerancia para un diámetro interno d serán  $c = 22 \pm 4$  mm y los márgenes y la tolerancia para su altura h serán  $b = 13 \pm 4$  mm. Consecuentemente, las dimensiones de la pieza serán: diámetro exterior  $D_1 = D + a = 350 \pm 16 = 366$  mm; la altura de la pieza  $H = H + b = 110 + 13 = 123$  mm; y el diámetro interior  $d_1 = d - c = 120 - 22 = 98$  mm.

Sin embargo, las dimensiones de forja para el agujero dependerán del diámetro nominal del punzón. En este caso  $d_1$  será 100 mm.

A la terminación de los cálculos antes mencionados el contorno de la pieza se dibuja en líneas gruesas alrededor del contorno del trabajo terminado; las dimensiones de la pieza forjada y las tolerancias se escriben entonces en el dibujo, con la debida consideración de los márgenes adicionales (**Figura 1.4**).



**Fig. 1.4 Dibujo del forjado de un disco de engranaje: 1) contorno de un engranaje después del maquinado; 2) sobreespesor de la forjadura; 3) contorno de la forjadura del disco de engranaje.**

Ejemplo 2. Se necesita hacer el dibujo para forjar el eje mostrado en la figura 1.5. La pieza es del tipo 2, esto es, una pieza escalonada con sección transversal redonda.

*Solución:* Como en el primer ejemplo, hacemos un dibujo a escala del eje terminado en líneas delgadas (**Figura 1.5**). Entonces escogemos los márgenes de maquinado y las tolerancias para el forjado acorde con la norma GOST 7829-55. Los datos de la tabla dada en el apéndice 3 se refieren a las piezas con la forma mostrada en la **Figura 1.5**, donde  $l > 0,3D$  y  $h_1, h_2, h_3$  y  $h_4 = 5$  (siendo  $l$  la longitud del cilindro  $D$ , el diámetro del cilindro y  $h$ , la altura del hombro). Los márgenes básicos y las tolerancias para las dimensiones de cada una de estas secciones y de la longitud total del eje. Los márgenes adicionales se especifican también además de los márgenes básicos para las distintas secciones de un eje escalonado. La magnitud de estos márgenes adicionales  $S_1, S_2, S_3$  Y  $S_4$ , para el diámetro de cada escalón, dependen de la diferencia entre el diámetro mayor  $D_0$  del eje y los diámetros  $D_1, D_2, D_3$  Y  $D_4$ .

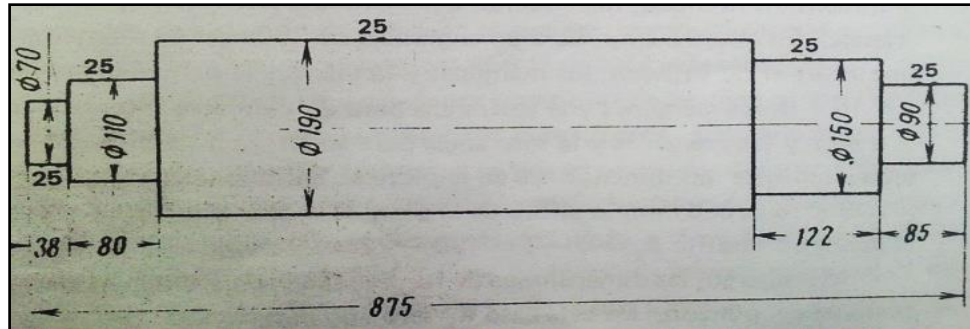


Fig. 1.5 Dibujo de un eje.

Estos márgenes adicionales se calculan por los diámetros D1, D2, D3, D4 o por el diámetro mayor D0 del eje y depende de la porción entre la longitud del escalón en cuestión y la longitud del escalón que tiene el diámetro mayor.

$$\frac{L_1 L_2 L_3 L_4}{L_0}$$

En nuestro caso, la longitud del eje l, es 875 mm, los diámetros de cada sección son D0 = 190 mm; D1 = 70 mm; D2 = 110 mm; D3 = 150 mm; D4 = 90 mm; la longitud de los escalones es: L1 = 38 mm; L2 = 80 mm; L3 = 122 mm; L4 = 85 mm; respectivamente y la longitud L0 = 550 mm. De las tablas en el apéndice 3 tomamos los márgenes básicos y las tolerancias para los diámetros de cada escalón como sigue:

Para el diámetro D0 = 190 mm, el margen será  $13 \pm 4$

Para el diámetro D1 = 70 mm, el margen básico será  $9 \cdot 2^{-3}$

Para el diámetro D2 = 110 mm, el margen será  $10 \pm 3$

Para el diámetro D3 = 150 mm, el margen será  $12 \cdot 3^{-4}$

Para el diámetro D4 = 90 mm, el margen sea  $10 \pm 3$

Entonces determinamos los márgenes adicionales y los especificamos para las elecciones correspondientes (escalones) del eje de acuerdo con las tablas en el apéndice 3. Hecho esto, calculamos el margen total para cada sección del eje.

Para el diámetro D1 especificamos un margen adicional  $S1 = 6\text{mm}$ ; puesto que la razón  $I1 / I0 = 38/550 = 0,6$  es menor que la razón 2,6 dada en la tabla para una sección de diámetro  $D1 = 70\text{ mm}$ .

Para el diámetro D2 especificamos un margen adicional  $S2 = 4\text{mm}$ .

Para el diámetro D3 especificamos un margen adicional  $S3 = 3\text{mm}$ .

Para el diámetro D4 especificamos un margen adicional  $S4 = 6\text{ mm}$ .

No se especifica margen adicional para el diámetro D0 de una sección de las dimensiones dadas, así que el margen total y las tolerancias para los diámetros de cada sección del eje serán:

Para el diámetro  $D0 = 190$ , margen total  $a0 = 13 \pm 4\text{mm}$ .

Para el diámetro  $D1 = 70\text{ mm}$ , margen total  $(a1 + S1) = 9+6 = 15 \cdot 2 - 3\text{ mm}$ .

Para el diámetro  $D2 = 110\text{ mm}$ , margen total  $(a2 + S2) = 10 + 4 = 14 \pm 3\text{ mm}$ .

Para el diámetro  $D3 = 150\text{ mm}$ , margen total  $(a3 + S3) = 12 + 3 = 15 \cdot 3 - 4\text{ mm}$ .

Para el diámetro  $D4 = 90\text{ mm}$ , margen total  $(a4 + S4) = 10 + 6 = 16 \pm 3\text{ mm}$ .

Cuando se especifican márgenes adicionales la tolerancia ( $\Delta$ ) no se aumenta y se elige para que corresponda a la tolerancia para los márgenes básicos. Consecuentemente, los diámetros para forjar el eje y sus tolerancias, será como sigue:

$$D0 = 190 + 13 \pm 4 = 203 \pm 4\text{ mm}$$

$$D1 = 70 + 15 = 85 \pm 2 -3\text{ mm}$$

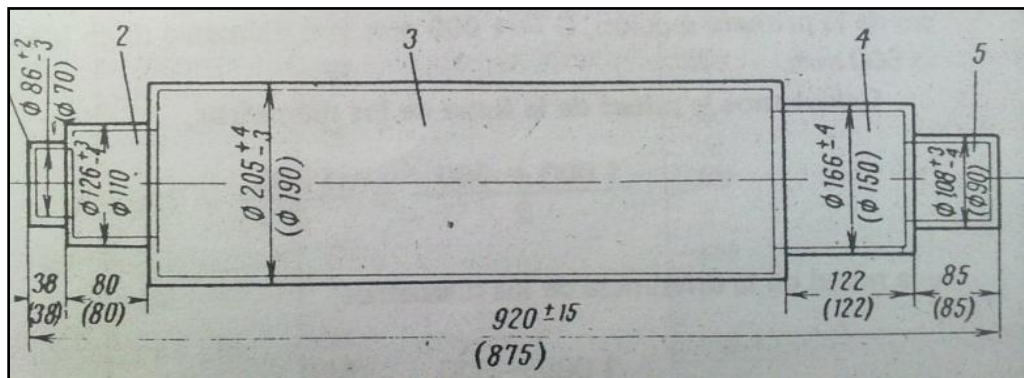
$$D2 = 110 + 14 \pm 3 = 124 \pm 3\text{ mm}$$

$$D3 = 150 + 15 = 165 \pm 3 - 4\text{ mm}$$

$$D4 = 90 + 16 = 106 \pm 3\text{ mm}$$

Los márgenes y las tolerancias para las secciones L1, L2, L3 Y L4, serán calculados de la base inicial y serán iguales a aquellas para las dimensiones de la sección mayor D0 y la longitud L del eje. En este caso, para un eje de diámetro D0= 190 mm y L = 875 mm, el margen (b) y la tolerancia ( $\pm \Delta / 2$ ) para la longitud de sus diferentes secciones será:  $b = 42 \pm 15$  mm o, por lado  $b / 2 = 22,5 \pm 7,5$  mm.

Un esquema que especifica las tolerancias de ajuste del eje, se muestra en la **Figura 1.6**



**Fig. 1.6 Dibujo del forjado de un eje.**

Después de determinar los márgenes comprobamos la posibilidad de forjar las secciones del eje contra las tablas del apéndice 5; comprobamos también los márgenes escogidos y los márgenes adicionales.

De acuerdo con las tablas del apéndice 5 (sección a), la longitud de la sección forjada de la punta, adyacente a la sección que tiene un diámetro  $D_2=124$ mm debe ser más larga que la longitud máxima de 45mm, (**Figura 1.6**). Realmente, sin embargo, la longitud (1) de esta sección es 38mm, esto es, menor que el máximo. Por tanto, esta sección no se forja separadamente, pero se le da un margen a su diámetro igual a su sección adyacente,  $D'_2 = 126$  mm (**Figura 1.7**). La sección intermedia 2 se forja al mismo diámetro que la sección 1. La suma de la longitud de las secciones 1 y 2 ( $l'_1 + l'_2$ ) = 118 mm, es mayor que el máximo permisible cuando el diámetro que la sección 1. La suma  $D'_0$  de la sección



adyacente sea 205 mm. Por estas consideraciones, la sección antes mencionada debe ser forjada sin ningún margen adicional para la longitud (Vea sección b<sub>1</sub>, apéndice 5).

Se forjara la sección intermedia 4. Su longitud l'<sub>3</sub> (122 mm) es mayor que el máximo (60 mm) cuando el diámetro D'<sub>0</sub> de la sección adyacente (3) es 205 mm. La longitud l<sub>4</sub> de la sección del segundo extremo 5, es 85 mm, el cual es mayor que la longitud máxima (55) para una sección adyacente con un diámetro D'<sub>3</sub> = 166 mm, pero de acuerdo con las tablas del apéndice 5 (sección b), la longitud de esta sección es menor que el máximo (90 mm) y, por tanto, tendrá que ser forjado con un margen adicional a una longitud igual a la longitud máxima, esto es, a la longitud de 90 mm.

Después de comprobar la posibilidad de forjar cada sección, determinamos el contorno final y las dimensiones de la pieza, lo dibujamos con líneas gruesas y escribimos las dimensiones de la pieza forjada. Hecho esto, el dibujo de la pieza se considera que esta completo. La **Figura 1.7** muestra el dibujo de la pieza con las dimensiones finales y los márgenes adicionales.

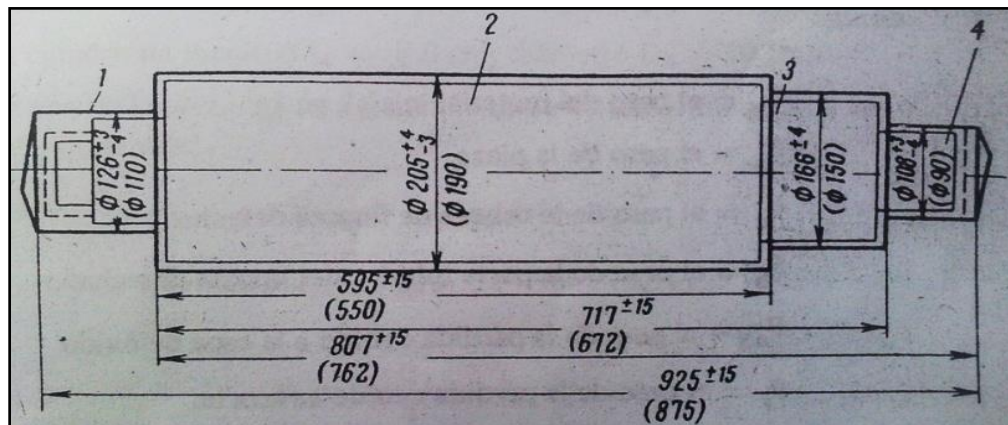


Fig.1.7 El dibujo de la forjadura.

### 1.5. Especificaciones técnicas y elección del material para las piezas a Forjar

Cada pieza elaborada en un taller de forja debe reunir requisitos definidos o especificaciones técnicas como se llaman estas. Por regla general, estas especificaciones se indican en las cartas tecnológicas (procedimientos) si, como una excepción a esta regla, una pieza se va a forjar sin una carta de procedimiento las especificaciones necesarias se toman del dibujo de la pieza:

Las especificaciones técnicas deben indicar:

1. La cantidad y la composición química del acero con el cual se va a hacer la pieza.
2. El método de forjar y las condiciones (cuando se forjan piezas de responsabilidad).
3. Los ensayos mecánicos necesarios y el número de probetas de ensayo, sus dimensiones, y lugares donde estas se deben tomar.
4. Requerimientos mínimos de los ensayos mecánicos.
5. Requerimientos según el acabado superficial de la pieza; especificando. La profundidad máxima de los defectos en la superficie, rajaduras, ampollas, costuras, capilares, sobremontas, etc.
6. Requisitos para hacer la pieza.

Basándonos en el dibujo de la pieza podemos calcular el peso del metal necesitado para su producción. El peso del metal necesitado para hacer una pieza dada de un lingote será:

$$P_{in} = P_p + P_C + P_b + P_{ox} + P_r$$

Dónde:

$P_{in}$  = el peso del material inicial, en kg

$P_p$  = el peso de la pieza

$P_C$  = el peso de la cabeza de lingote desechado

$P_b$  = el peso de la parte inferior del lingote desechado

$P_{ox}$  = el peso de la pérdida debido a la capa de óxido

$P_r$  = el peso de la pérdida debido a recorte.

El peso del metal requerido para hacer una pieza de un material laminado

Será:

$$P_{in} = P_p + P_r + P_{ox} \text{ kg}$$

Calculo del volumen y peso de una pieza ( $P_p$ )

El volumen y el peso de una pieza se calculan del dibujo de la misma.

Los volúmenes del metal de las piezas forjadas a martinete, de tamaño pequeño y mediano se calculan usualmente en centímetros cúbicos, mientras que los volúmenes de las piezas forjadas en prensas pesadas, se calculan correspondientemente en gramos y kilogramos.

El peso de una pieza es igual al producto de su volumen multiplicado por el peso específico del metal del cual se hace la pieza. Para calcular el volumen de las piezas hechas de secciones irregulares o que tengan configuraciones complicadas, los dividimos en secciones separadas de una forma geométrica simple bien definida, como: cilindros, esferas, conos, etc.

Cuando se calcula el volumen y el peso de las piezas pesadas, y principalmente, de ejes escalonados, es absolutamente necesario incluir en nuestros cálculos la cantidad de metal necesitado para asegurar la transición de un diámetro a otro. La figura 1.8 muestra un nomograma para calcular el peso del metal requerido, para asegurar la transición de un diámetro a otro en secciones cilíndricas. El peso del metal, así calculado se agrega al peso de la pieza.

Este nomograma se emplea de la manera siguiente:

1. Calcule primero la mitad de la suma de los diámetros adyacentes  $\frac{D+d}{2}$

Y marque el valor resultado sobre la escala de la derecha

2. Calcule entonces, la mitad de la diferencia de los mismos diámetros adyacentes

$$\frac{D-d}{2}$$

Y marque el valor resultante a la derecha de la escala izquierda.

3. Una los puntos así marcados, en las escalas derecha e izquierda, con una línea recta interceptando la escala intermedia en un punto G; este punto G indicara el peso del metal, en kilogramos, requerido para la transición al forjar un diámetro D a un diámetro menor d.

Imaginémonos que tenemos que calcular el peso del metal requerido para la transición de una sección a otra en una pieza de sección más pequeña, si el diámetro de la primera sección,  $D = 1000$  mm y el diámetro d, de la sección adyacente, es 500 mm.

Calculemos la mitad de la suma de los diámetros,

$$\frac{1000 + 500}{2} = \frac{1500}{2} = 750 \text{ mm}$$

Y la mitad de la diferencia de los diámetros,

$$\frac{1000 - 500}{2} = \frac{500}{2} = 250 \text{ mm}$$

Marcamos 750 sobre la escala  $\frac{D+d}{2}$  y 250 sobre la escala  $\frac{D-d}{2}$

2      2

Y unimos los puntos así marcados con una línea recta, la cual intercepta a la escala intermedia en un punto correspondiente a 100. Consecuentemente, el peso del metal requerido para la transición de la sección  $D = 1000$  y a la sección  $d = 500$  será 100 kg.

Ejemplo 1. Calcule el peso de material para forjar el engranaje en bruto mostrado en la figura 1.4.

El volumen de la pieza será:

$$V_p = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} H \text{ cm}^3$$

Dónde:

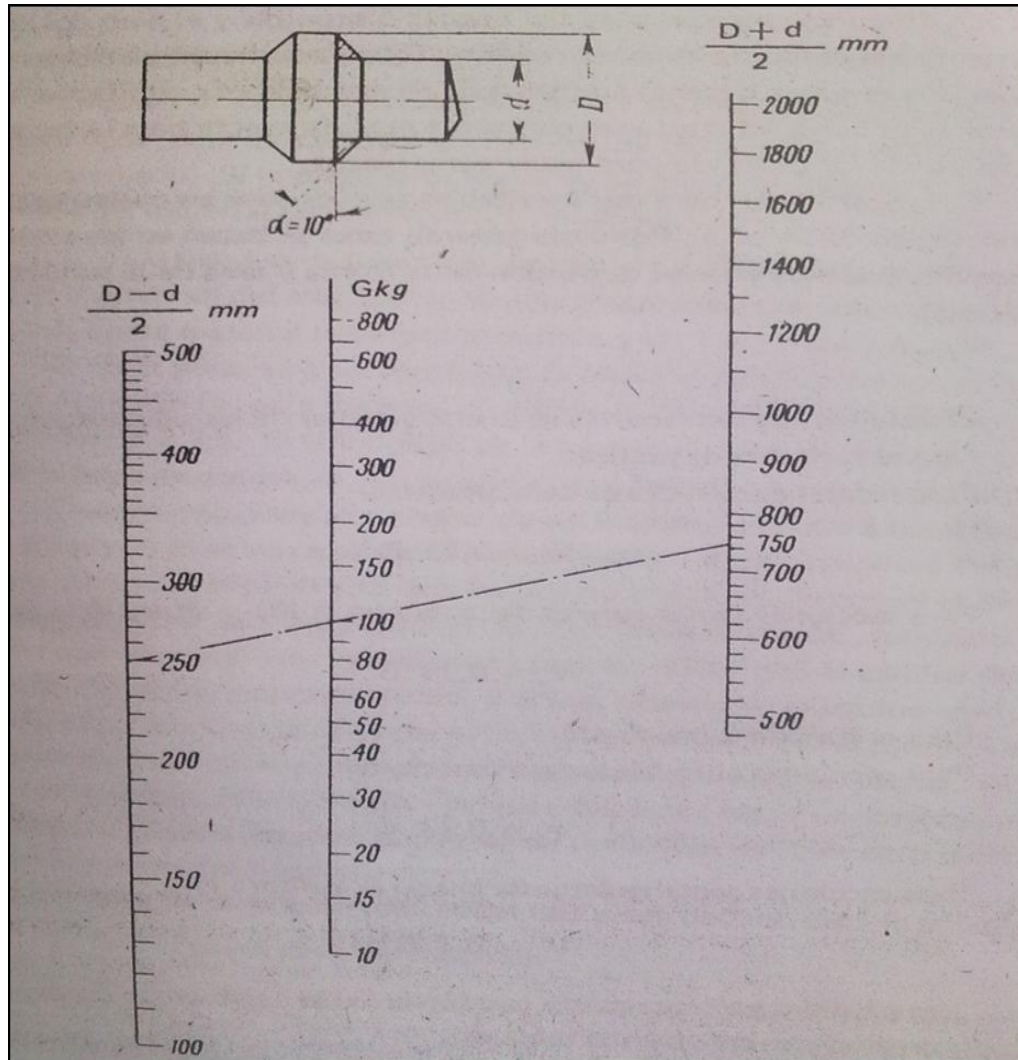
$D$  = diámetro del disco = 36.6 cm

$H$  = altura del disco de engranaje en bruto = 12,3 cm

$d$  = diámetro del agujero en el engranaje en bruto = 10 cm.

Sustituyendo los símbolos por números, el volumen de la pieza ( $V_p$ ) será:

$$V_p = \frac{3,14}{4} \cdot 36,6^2 - \frac{3,14}{4} \cdot 10^2 \cdot 12,3 = 11\,968,0 \text{ cm}^3$$



**Fig. 1.8 Nomograma para determinar el peso del metal para transición de una sección a otra de diámetro menor**

El peso de la pieza será:

$$P_p = V_p * g \text{ kg}$$

Dónde:

$g$  = el peso específico del metal (acero) =  $7,85 \text{ g/cm}^2$ .

Sustituyendo:

$$P_p = \underline{11\,968,0 * 7,85} = 93,9 \approx 94 \text{ kg}$$

1000

Ejemplo 2. Calcular el peso de material para forjar el eje mostrado en la **Figura 1.7**.

Dividiremos el total de la pieza en cuatro secciones:

- 1) Un cilindro de longitud  $l_1 = 11,8 \text{ cm}$ , diámetro  $D_1 = 12,6 \text{ cm}$ .
- 2) Un cilindro de longitud  $l_2 = 59,5 \text{ cm}$ , diámetro  $D_2 = 20,5 \text{ cm}$ .
- 3) Un cilindro de longitud  $l_3 = 12,2 \text{ cm}$ , diámetro  $D_3 = 16,6 \text{ cm}$ .
- 4) Un cilindro de longitud  $l_4 = 9,0 \text{ cm}$ , diámetro  $D_4 = 10,8 \text{ cm}$ .

El volumen de la pieza  $V_p$  será igual a la suma de los volúmenes de sus cuatro secciones componentes:

$$V_p = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \text{ cm}^3$$

El volumen de la primera sección será:

$$V_1 = \frac{\pi D_1^2 * l_1}{4}$$

$$= \frac{3,14 * 12,6^2 * 11,8}{4} = 1470,59 \text{ cm}^3$$

4

El volumen de la segunda será:

$$V_2 = \frac{\pi D_2^2 * l_2}{4}$$

$$= \frac{3,14 * 20,5^2 * 59,5}{4} = 19 628,82 \text{ cm}^3$$

El volumen de la tercera sección será:

$$V_3 = \frac{\pi D_3^2 * l_3}{4}$$

$$= \frac{3,14 * 16,6^2 * 12,2}{4} = 2 639,03 \text{ cm}^3$$

El volumen de la cuarta sección será:

$$V_4 = \frac{\pi D_4^2 * l_4}{4}$$

4

$$= \frac{3,14 * 10,8^2 * 9}{4} = 824,06 \text{ cm}^3$$

El volumen de la pieza  $V_p$ , en total será:

$$V_p = 1\,470,59 + 19\,628,82 + 2\,639,03 + 824,06 \text{ cm}^3 = 24\,562,50 \text{ cm}^3$$

El peso de la pieza  $P_p$  será:

$$P_p = V_p * PE = \frac{24\,577 * 7,85}{1000} = 193 \text{ kg}$$

En este caso el volumen del metal necesitado para la transición de un diámetro a otro no se toma en consideración, ya que la diferencia en los diámetros es insignificante y el volumen del metal necesitado para las transiciones es también insignificante.

### **Elección del material inicial**

Después de calcular el peso inicial del metal ( $P_{in}$ ) necesitado para hacer una pieza dada, debemos decidir la cuestión del perfil y dimensiones del lingote o material laminado. Si la pieza se va hacer de un material laminado, el perfil y las dimensiones del material laminado deben reunir los siguientes requisitos:

1. Si la pieza se va hacer por estirado (sin recalado) la dimensiones de la sección transversal del material laminado debe asegurar una reducción mínima del 1,1 - 1,3 para material laminado ordinario y de 1,3 - 1,5 para lingote.
2. Si la pieza va a ser recalada, la relación máxima de la longitud del material a su diámetro o su grueso, es casi seguro que el trabajo se pandee durante el recalado.

Cuando una pieza se va hacer de un lingote, la primera cuestión a decidir es cuantas piezas se van a producir de un lingote. Esto dependerá del peso y



destino de la pieza. Si la pieza está destinada para una parte responsable de una máquina, esta será hecha, por regla general, de lingotes individuales, tomando en consideraciones que mientras más liviano sea el lingote, mejor será la calidad del metal. Para partes de menos responsabilidad, y si está disponible el equipo apropiado, es necesario elegir los lingotes de peso suficiente para hacer varias piezas, en este caso se puede ahorrar metal y reducir el tiempo para producir las piezas. Además, cuando se hacen piezas de lingotes por estirado debemos elegir un lingote cuya sección transversal pueda asegurar un factor de reducción de 3; de otro modo, la pieza requerirá un recalcado en el extremo.

El peso de un lingote para hacer una pieza dada se calcula como sigue:

1. Se calcula el peso del material.
2. Se calcula el peso de cada uno de los siguientes elementos: pérdida de metal debido a la capa de óxido, recortes, pepitas, desechos de la parte superior e inferior del lingote, etcétera.
3. Del peso total del lingote, el cual se toma como el 100 por ciento, restamos entonces, en porcentaje, el peso total de la pérdida y desperdicios de metal; la pérdida debida a la capa de óxido; y los desechos de la parte superior e inferior del lingote. El porcentaje resultante expresa el peso del metal requerido para hacer la pieza forjada, incluyendo los recortes.

El peso teórico de un lingote puede ser calculado por la siguiente fórmula:

$$P_{\text{lingote}} = \left( P_p + \rho_{\text{Pérdidas}} \right) \cdot 100 \text{ kg}$$

$\eta$

Dónde:

$P_{\text{lingote}}$  = peso teórico del lingote, en *kg*

$P_p$  = peso de la pieza, en *kg*

$P_{\text{perdidas}}$  = peso de las pérdidas (capa de óxido + desechos superior e inferior del lingote)

$$P_{\text{perdidas}} = P_{\text{oxido}} + P_{\text{desecho superior}} + P_{\text{inferior}}$$

$$P_{\text{perdidas}} = \% = \text{porcentaje permisible de utilizar el metal del lingote} \\ = 100 - = P_{\text{oxido}} + P_{\text{desecho superior}} + P_{\text{desecho inferior}} \text{ por ciento}$$

Ejemplo: Se desea fabricar un eje liso con las siguientes dimensiones:

Diámetro  $D = 800\text{mm}$ ; longitud  $1,5 \text{ m}$ .

La pieza necesitara dos calentamientos. Escoja un lingote parra la pieza anterior.

Solución: El volumen de la pieza, en decímetros cúbicos:

$$V_p = \frac{\pi D^2}{4} * l = \frac{3,14 * (8,0)^2}{4} * 50 = 2,612 \text{ dm}^3$$

El peso de la pieza  $P_p$  será  $V_p * g$ , donde  $g$  - peso específico del metal =  $7,85 \text{ kg}$  por decímetro cubico =  $2\,612 * 7,85 = 20,500 \text{ kg}$ .

La pérdida de metal debida a la capa de óxido  $P_{\text{ox}}$ , incurrida en dos caldeos será:  $2 + 1,75 = 3,75$  por ciento.

Los pesos de los desechos superior e inferior del lingote se suponen que sean  $P_{\text{desecho superior}} = 20\%$  y  $P_{\text{desecho inferior}} = 5\%$ .

La perdida de metal en forma de recortes  $P_{\text{perdida}}$ , es el  $5\%$  del peso total de las piezas.

$$P_r = 20\,500 * 0,05 = 1,025 \text{ kg}$$

Por tanto, el peso total del desperdicio: desecho superior del lingote + desecho inferior del lingote + perdida debida a la capa de óxido será:

$$20 + 5 + 3,75 = 28,75\%$$

El peso del metal, en por ciento, para la pieza más los recortes será:

$$\eta = 100 - 28,75\%$$

El peso teórico del lingote será:

$$P_{\text{lingote}} = \frac{(P_p + P_r)}{\eta} 100 =$$

$$= \frac{20\,500 + 1\,025}{71,25} * 100 \approx 30\,209 \text{ kg}$$

71,25

Como esta tabla no especifica lingotes del peso requerido, elegimos un lingote que se aproxime a este; el peso de este lingote será 32,368 kg.

Vamos a discutir varios ejemplos de cómo elegir los lingotes.

Ejemplo 1. Elija un lingote para forjar un engranaje en bruto mostrado en la **Figura 1.4.**

Solución: El peso del material inicial para forjar el engranaje en bruto será:

$$P_{\text{lingote}} = P_p + P_{\text{ox}} + P_r \text{ kg}$$

Previamente, calculamos que el peso del engranaje en bruto  $P_p$  fue de 94 kg y su volumen  $V_p$  fue de 11 968 cm<sup>3</sup>. Esto se considera una pieza ligera y, por tanto, la barra de acero laminado será recalcada. La única pérdida de metal en que se incurrirá será la pepita se presume que sea el mismo que el del agujero; su altura será un tercio de la altura de la pieza.

El diámetro de la pepita,  $d$  es de 100 mm.

La altura de la pepita,  $h_r = l/3H = \frac{123}{3} = 41$  mm.

3

El volumen de la pepita será, por tanto:

$$V_t = V_{\text{desperdicio}} = \frac{\pi d^2}{4} * h =$$

$$= \frac{3,14 * (10)^2 * 4,1}{4} = 322 \text{ cm}^3$$

4

Al forjar, se hará en un solo calentamiento y, por tanto, las pérdidas debido a la capa de óxido,  $V_{\text{oxido}}$ , serán cerca del 2 por ciento del volumen del material. El peso del material inicial se toma como el 100 por ciento. El volumen de metal perdido en forma de capa de óxido será:

$$V_{\text{ox}} = \frac{V_p + V_t}{100 - 2} * V_{\text{ox}}$$

$$= \frac{(11\,968 + 322) * 2}{100 - 2} = 251 \text{ cm}^3$$

100 - 2

El volumen del material inicial será:

$$V_{\text{in}} = V_p + V_{\text{ox}} + V_t$$

$$= 11\,968 + 251 + 322 = 12,541 \text{ cm}^3$$

Las dimensiones del material para forjar el engranaje en bruto serán calculadas basándose en las siguientes consideraciones (el material será recalado):

1. Facilidad para recalcar: Mientras más corto sea el material más fácil será recalcarlo. La carrera y la capacidad del martinete, en el cual la pieza se va a forjar debe ser tomada en consideración; mientras más corta sea la pieza del material, mayor longitud tendrá la carrera del martinete y más fácil las operaciones de recalado.
2. Las posibilidades de que se disponen para cortar o cizallar la barra de material en volumen o peso aproximándose tanto como sea posible a lo necesario para hacer la pieza en cuestión. En este caso, lo contrario se aplica también: mientras más largo sea el material, más grande será la relación de su longitud a su diámetro o lado del cuadrado, más próximo estará el volumen del material que tendremos que cortar o cizallar al requerido para hacer la pieza dada.
3. La disponibilidad de material del tamaño elegido en las Normas Estatales para formas laminadas.

4. La longitud del material no debe exceder de 2 a 2,5 diámetros o lados de su cuadrado, por cuanto, la pieza va a ser recalada.

Tomando en cuenta todas las consideraciones antes mencionadas, escogeremos para nuestro ejemplo: una barra cuadrada de 200 \* 200 mm o una barra redonda de 200 mm de diámetro. La longitud del material será:

$$l = \frac{V_{in}}{A_m}$$

Dónde:

$l$  = longitud del material

$V_{in}$  = volumen del material inicial

$A_m$  = área de la sección transversal del material.

Por sustitución obtenemos:

$$l = \frac{12\,541}{20 \times 20} = \frac{12\,541}{400} = 31 \text{ cm} = 310 \text{ mm}$$

20 \* 20 = 400

Vamos a comprobar si la longitud del material escogido reúne los requerimientos de la cuarta condición:

$$\frac{l}{d_{200}} = 2,5 \text{ a } 2,0 = \frac{310}{200} = 1,55$$

$d_{200}$

Así, un material de 200 mm de diámetro a 200 \* 200 mm de sección transversal y 310 mm de longitud será apropiado para el forjado de la pieza.

Ejemplo 2. Escoja el material para forjar el eje escalonado mostrado en la figura 1,7.

Solución: El volumen ( $V_{in}$ ) del material inicial será:

$$V_{in} = V_p + V_{ox} + V_r \text{ cm}^3$$

El volumen y el peso de esta pieza ha sido ya calculado anteriormente, será 24 577 cm<sup>3</sup> y 193 kg, respectivamente.

Durante el forjado del eje se producirán desperdicios de metal cuando se recorte en los extremos de la pieza. Por lo tanto, antes de calcular el peso del metal desperdiciado, debemos decidir cuál procedimiento empleamos al forjar el eje. Si lo forjamos de un material cortado de una barra de longitud para un solo eje, el desperdicio será recortado de ambos extremos del material. De otra manera, si forjamos el eje de un barra larga y cortamos entonces el eje forjado de esta barra, el desperdicio será recortado solo de un extremo de la barra. Vamos a suponer que en este caso forjamos el eje de un material cortado a medida para un solo eje.

El volumen del metal perdido en el recorte de ambos extremos del eje, puede ser calculado por la formula (para el forjado a martinete):

$$V_r = 0,23 d^3 \text{ cm}^3$$

Dónde:

d= es el diámetro del recorte.

Para esta pieza, el volumen de metal perdido en forma de recortes de cada extremo del eje será:

Del extremo izquierdo:

$$V'_r = 0,23 d^3 = 0,23 * 12,6^3 = 460 \text{ cm}^3$$

Desde el lado derecho:

$$V''_r = 0,23 d^3 = 0,23 * 10,8^3 = 290 \text{ cm}^3$$

La pérdida total de metal en forma de recortes será, por tanto, igual a:

$$460 + 290 = 750 \text{ cm}^3$$

De acuerdo con los datos prácticos, el eje será forjado en un solo calentamiento. La pérdida de metal debida a la capa de óxido será calculada como si fuera el 2 por ciento del volumen o peso del material propiamente dicho. El volumen del material se considerara como su fuera el 100 por ciento.

El volumen de la perdida de metal en la forma de óxido será, por tanto:

$$V_{\text{ox}} = \frac{(V_p + V_t)}{100 - 2} V_{\text{ox}} = \frac{(24\ 577 + 750) * 2}{100 - 2} = 517 \text{ cm}^3$$

El volumen del material inicial será. Por tanto:

$$V_{\text{in}} = V_p + V_t \\ = 24\ 577 + 517 + 750 = 25\ 844 \text{ cm}^3$$

El peso del material será, correspondiente, igual a:

$$P_{\text{in}} = \frac{25\ 844 * 7,85}{1,000} = 203 \text{ kg}$$

Cuando se calculan las dimensiones del material, para hacer la pieza antes mencionada, debemos tener presente el material del cual se va a hacer la pieza (lingote o material laminado), así como también el método de forjar el eje. La pieza es comparativamente liviana y, por tanto, será más económico hacerla de un material laminado. Si el material va a ser estirado (reducido) la reducción debe ser de 1,3 a 1,5 para asegurar una pieza de alta calidad.

En este caso vamos a suponer que el factor de reducción es de 1,4. El diámetro mayor de eje D es de 205 mm (vea figura 1,7). Correspondientemente, el área de la sección transversal mayor del eje será:

$$A_{\text{eje}} = \pi D^2 = 3,14 * 20,5^2 = 330 \text{ cm}^2$$

4 4

Para la reducción 1,4 el área de la sección transversal del material debe ser:

$$A_m = A_{\text{eje}} * 1,4 = 330 * 1,4 = 462 \text{ cm}^2$$

Esta área de la sección transversal corresponde a la de una barra cuadrada de 215 \* 215 mm. El GOST 4692 no especifica lingotes de este tamaño, así que tenemos que escoger un lingote de la sección transversal más cercana a 220 \* 220 mm.

La longitud del material que se necesita será:

$$l_m = \frac{V_{in}}{A_m} = \frac{25\ 844}{484} = 53,6 \text{ cm} = 536 \text{ mm}$$

$A_m$  484

Por tanto, necesitaremos para forjar el eje de un lingote de  $l = 535 \text{ mm}$  y una sección transversal de 220 \* 220 mm.

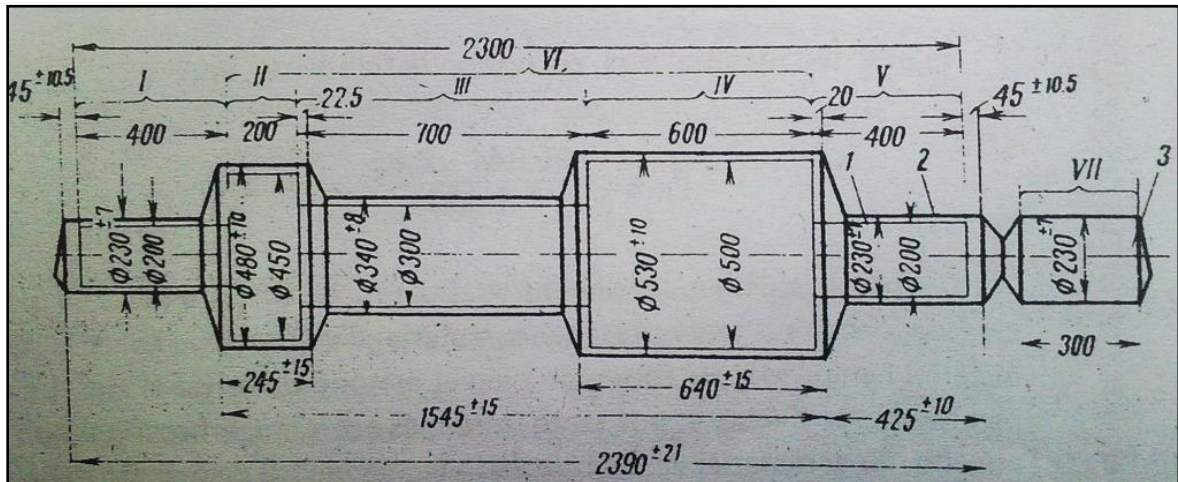
Ejemplo 3. Se necesita hacer el dibujo del eje escalonado mostrado en la **Figura 1.9.**

Solución: Haga primero un dibujo a escala del contorno del extremo del eje (en líneas suaves) y acote las dimensiones básicas.

Esto es un tipo 2 (**vea Figura 1.2**) esto es una sección redonda, escalonada y de dimensiones grandes, esta tendrá que ser hecha en un prensa para forjar, los márgenes para el maquinado y las tolerancias para forjar serán escogidos de las tablas del apéndice 3 (GOST 7062-54) para las dimensiones de cada sección del eje, dependiendo de su dimensión y de la longitud total del eje. Además, tenemos que tener presente que para ejes con cuellos, los márgenes para los



diámetros de los cuellos y pasos  $D_1$ ,  $D_2$  y  $D_3$  deben ser aumentados si se comparan con los márgenes



**Fig. 1.9 Dibujo de forjadura de un eje escalonado: 1) contorno del eje después del maquinado; 2) forjadura de un eje; 3) espécimen de pruebas**

Para las piezas de transversal redonda y lisa, en una cantidad  $x$  igual a 0,07 del escalón  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  esto es por  $0,07 h_1$  para el diámetro  $D_1$ . Del  $0,07 h_2$  para el diámetro  $D_2$  y del  $0,07 h_3$  para el diámetro  $D_3$ .

Cuando se aumenta el margen por  $X$ , las tolerancias ( $\pm \Delta / 2$ ) dadas en las tablas no se alteran.

Los márgenes por lado para la longitud de la pieza son igual a  $0,75 a$ , para la longitud de cada hombro y  $1,5 a$  para la longitud de cada extremo de la pieza, donde ( $a$ ), es el margen para cada diámetro correspondiente,

No se especifican márgenes o tolerancias para los cuellos.

Vamos a calcular el margen para el diámetro de cada sección de la pieza.

Para un eje con una longitud  $l = 2\ 300$  mm y un diámetro  $l$  en la sección  $D_1 = 200$  mm, la tolerancia ( $a$ ) para el diámetro será 20 mm (vea el apéndice 3) como ya sabemos, el margen para el diámetro 1 será aumentado por:

$$X_1 = 0,07 h_1 = \frac{0,07 (D_2 - D_1)}{2} = 0,07 \frac{(450 - 200)}{2} = 8,75 \text{ mm}$$

2

El margen total para el diámetro de la primera sección será  $(20 + 8,75) = 28,75$  mm y el diámetro final  $D_1$ , después de redondearlo al 0 más cercano será:

$$200 + 28,75 = 228,75 = 230 \text{ mm}$$

El margen para el diámetro del collar (sección II) para una longitud de 2 300 y diámetro  $D_2 = 450$ , será 28 mm (vea apéndice 2).

El margen se incrementara por:

$$X_{II} = 0,07 h_2 = 0,07 \frac{(D_4 - D_2)}{2} = 0,07 \frac{(500 - 450)}{2} = 1,75 \text{ mm}$$

El margen total sobre el diámetro de la sección II será:

$28 + 1,75$ : así que, el diámetro final  $D_2$  será:

$$450 + 29,75 = 479,75 \approx 480 \text{ mm}$$

El margen para el diámetro de la sección del cuello (sección III) para una longitud  $l = 2300$  mm teniendo un diámetro  $D_3 = 300$  mm será 24 mm. El margen aumentado será:

$$X_{III} = 0,07 h_3 = 0,07 \frac{(D_4 - D_3)}{2} * 0,07 = 0,07 \frac{(500 - 300)}{2} = 7 \text{ mm}$$

El margen total para el diámetro de la sección III del cuello será  $24 + 7 = 31$  mm y para el diámetro final  $D_3$  de esta sección el cuello será:

$$300 + 31 = 331 \approx 330 \text{ mm}$$

El margen en el diámetro del collar (sección IV) sobre una longitud  $l = 2300$  mm y diámetro  $D_4 = 500$  mm será 28 mm. El diámetro  $D_4$  de la sección IV será:

$$500 + 28 = 528 \approx 530 \text{ mm}$$

El margen para el extremo de la sección escalonada (sección V) será aceptado como si fuera 20 mm. El margen aumentado  $X_V$  será:

$$0,07 h_5 = 0,07 \frac{(D_4 - D_5)}{2} = \frac{(500 - 200)}{2} = 10,5 \text{ mm}$$

El margen para el diámetro de la sección escalonada V será:

$$20 + 10,5 = 30,5 \text{ mm}$$

El diámetro  $D_5$  de la sección V será, por tanto:

$$200 + 30,5 \approx 230 \text{ mm}$$

Vamos a calcular ahora los márgenes y las longitudes de cada sección y la longitud total de la pieza para forjar. La longitud de la sección I se incluye en la longitud total de la pieza. El margen por lado para la longitud de la sección II,  $l_2 = 200$  será 0,75 de margen (a) en el diámetro  $D_2 = 450$  como sigue:

$$2 (0,75 a) = 2 (0,75 * 29,75) = 4,62 \approx 45 \text{ mm}$$

La longitud total  $l_2$  de la sección II será:

$$200 + 45 = 245 \text{ mm}$$

La longitud mínima de un hombro de diámetro  $D_4 = 450 \text{ mm}$  y el diámetro de un escalón  $D_1 = 200$  debe ser  $110 \text{ mm}$ . De acuerdo con los cálculos, sin embargo, su longitud es de  $245 \text{ mm}$ , lo cual es mayor que la longitud mínima de forja.

No se especifica margen para la longitud de la sección III. El margen por lado para la longitud de la sección IV,  $l_4 = 600 \text{ mm}$  será  $0,75$  del margen (a) en el diámetro  $D_4 = 550 \text{ mm}$  como sigue:

$$2 (0,75 a) = 2 (0,75 * 28) = 42 \text{ mm}$$

La longitud de la sección  $l_4$ , IV será

$$600 + 42 = 642 \approx 640 \text{ mm}$$

La longitud de la sección V, incluyendo el margen, será:

$$\begin{aligned} 400 + (1,5 * 30,5) - (0,75 * 28) \\ = 424,75 \approx 425 \text{ mm} \end{aligned}$$

La longitud total de la pieza será, por tanto:

$$\begin{aligned} 2 * 300 + (1,5 * 28,75) + 1,5 * 30,5 = \\ = 2 * 388,8 \approx 2 * 390 \text{ mm} \end{aligned}$$

La longitud  $l_6$  de la sección VI junto con los collares e incluyendo los márgenes serán:

$$\begin{aligned} (200 + 700 + 600) + (0,75 * 29,75) + \\ + (0,75 * 28) = 1,544.6 \approx 1,545 \end{aligned}$$

Las variaciones permisibles (tolerancias) sobre los diámetros dependerán de los márgenes y las tolerancias no estarán afectadas por el aumento en los diámetros por X.

La tolerancia en la dimensión  $D_1$  será  $\pm 7$  y de donde  $D_1$  será  $230 \pm 7$  mm. Exactamente de la misma manera  $D_2$  será  $480 \pm 10$ ,  $D_3$  será  $330 \pm 8$ ,  $D_4$  será  $530 \pm 10$  y  $D_5$  será  $230 \pm 7$  mm.

Las variaciones para la longitud del forjado de los cuellos serán como sigue:

Las variaciones (tolerancias) para la longitud de la sección II  $(0,75 * 20) 2=30$  mm.

Donde 20 - es el margen para el diámetro de la sección II, la tolerancia para el cual es  $\pm 15$  mm.

El margen en la longitud de la sección IV:

$$2 (0,75 * 20) = 30 \text{ mm}$$

Consecuentemente, la tolerancia será  $\pm 15$  mm.

$$(0,75 * 20) + (0,75 * 20) = 30$$

Entonces la tolerancia será  $\pm 15$  mm.

La tolerancia para la longitud de la sección V será:  $15 * 1,4 = 21$  mm, la tolerancia será  $\pm 10$  mm.

La tolerancia para la longitud total de la forja será:

$$\begin{aligned} \pm \frac{\Delta}{2} &= \frac{(15 * 1,4) + (15 * 1,4)}{2} = \\ &= \frac{42}{2} = \pm 21 \text{ mm} \end{aligned}$$

2

La longitud nominal de la pieza y sus secciones incluyendo las tolerancias, serán:

$$l_2 = 245 \pm 15 \text{ mm}$$

$$l_4 = 640 \pm 15 \text{ mm}$$

$$l_6 = 1\,545 \pm 10 \text{ mm}$$

$$l_{\text{total}} = 2\,390 \pm 21 \text{ mm}$$

Después de determinar los márgenes y las tolerancias, trazamos el dibujo de la pieza en líneas gruesas alrededor del contorno del diseño en líneas suaves del eje y acotamos las dimensiones de forja y los márgenes de la pieza.

## **CAPÍTULO 2. INFORMACIÓN GENERAL SOBRE EL ACERO**

### **2.1. Información general sobre el acero**

El acero es el principal material con el que los forjadores tienen que ver en el proceso de su trabajo. El acero, metal que es muy maleable, es una aleación de hierro y carbono conjuntamente con algunos otros elementos, aunque el contenido de carbono no exceda del 1.7%.

Las propiedades del acero y sus condiciones para forjarlos varían, lo que depende de los diferentes elementos que entran en su aleación. Por ejemplo, el grado de acero empleado para las piezas a forjar determina:

1. El tiempo y la temperatura requeridos para su precalentamiento.
2. Las condiciones del calentamiento.
3. Numero de cargas dentro y fuera del horno durante las operaciones de forja.
4. La capacidad del equipo de forjar.
5. Los métodos para forjar.
6. Condiciones para la preparación de las piezas.
7. Condiciones para el tratamiento térmico.

El acero posee propiedades perfectamente definidas, que se clasifican en físicas, mecánicas, tecnológicas.

### **2.2. Información general sobre las propiedades del acero**

Las principales propiedades físicas del acero comprenden: peso específico, capacidad térmica, temperatura de fusión, y conductividad térmica.

De las propiedades físicas del acero, su capacidad y conductibilidad térmica son las más importantes para las operaciones de forja.

1. *Capacidad térmica*, es la cantidad de calor (Kcal) requerida para elevar la temperatura de 1 kg de metal a 1 grado centígrado. La capacidad térmica del acero varía con el contenido de la aleación.

2. *Peso específico*, es el peso de la unidad de volumen de una sustancia (en este caso el peso de un metro cúbico de un centímetro cúbico de acero). El peso específico del acero varia con su composición, pero solamente en un ligero grado.

En la práctica de la forma se pueda tomar el de 7.85 como peso específico práctico para fines de cálculo (el peso de un metro cúbico de acero equivale a 7.85 toneladas).

3. *Conductividad térmica*, es la propiedad que tiene una sustancia de transferir calor de una parte más caliente a otra de más baja temperatura. Por ejemplo, si un hilo metálico se calienta por un extremo el calor transmitirá al otro extremo del alambre, que estaba frío, lo que es un resultado de su conductibilidad térmica. Otro ejemplo se puede observar en la transmisión de calor de la superficie al centro de un lingote y que ha sido calentado dentro del horno.

*Las propiedades mecánicas del acero más importantes son:*

1. Resistencia a la tracción (fuerza tensil), es la propiedad de resistir grandes fuerzas externas sin ruptura. Mientras más resistente es el acero mayores cargas pueda resistir.
2. *Dureza*, es la propiedad que tiene el acero de oponer resistencia a la penetración de cuerpos extraños; la dureza del acero se determina por máquinas especiales (los informadores Brinnell, Rockwell y otros), presionando una bola de acero endurecido o un cono de diamante contra el metal que se va probar; a mayor penetración de la bola por el cono dentro del metal que se prueba, a mayor impresión dejada en su superficie más suave es el acero.
3. *Plasticidad*, es la propiedad del acero para cambiar su forma bajo la influencia de fuerzas externas y de conservarlas al cesar la acción de esas fuerzas.



4. *Ductilidad, cualidad del acero para cambiar su forma sin que se destruya aunque esté sometido a impactos violentos.*
5. *Maleabilidad, cualidad del acero para ser trabajado a presión, (forjado, laminado, estirado, etc.).*
6. *Elasticidad, cualidad del acero para cambiar su forma sin ser destruido, bajo la influencia de fuerzas externas y de recobrar su forma original al cesar la acción de esas fuerzas.*

*Las principales propiedades tecnológicas del acero comprenden:*

1. Soldabilidad, el acero se suaviza cuando se calienta y a una temperatura de 1300 a 1400 °C se torna pastoso. Si dos pedazos de acero se calientan hasta que estén pastoso y se presionan junto con un martinete o una prensa, se unirán para formar una sola pieza, o sea, se habrán soldado.
2. Templabilidad, cuando el acero se calienta a una temperatura de 700 a 900° (depende de su composición) y se enfría bruscamente en agua o aceite, se tornará más duro y más frágil. Este proceso, que va acompañado de un cambio en su estructura, se llama temple.

A mayor contenido de carbono en el acero, mejor será la Templabilidad del mismo. El acero que contenga hasta 0.15% de carbono no se templara; pero al contrario, el acero con contenido de carbono de 0.5% tendrá un alto grado de Templabilidad.

Los diferentes elementos que entran en la composición del acero influyen en su propiedad del siguiente modo (tabla 2):

**Carbono (C).** La dureza, la fuerza tensil y la templabilidad del acero aumentan con su contenido de carbono, en tanto que su maleabilidad y su conductibilidad térmica disminuyen. A mayor contenido de carbono en el acero menor cantidad de calor requiere. El acero que contenga hasta el 1.4% de carbono posee unas propiedades para la forja y el laminado.

**Silicio** (Si). El silicio aumenta la fuerza tensil y la elasticidad del acero; pero disminuye su ductilidad y su soldabilidad. El acero estructura contiene generalmente entre 0.2% a 0.45 de silicio. El silicio no influye apreciablemente en la maleabilidad del acero.

Tabla 2		
Elemento	Símbolo químico internacional	Símbolo empleado en Rusia para el índice general de grado del acero
Carbono	C	—
Manganeso	Mn	Г
Silicio	Si	c
Fósforo	P	—
Azufre	S	—
Cromo	Cr	x
Níquel	Ni	H
Molibdeno	Mo	M
Tungsteno	W	B
Vanadio	V	φ
Aluminio	Al	+ 0
Cobre	Cu	
Titanio	Ti	T

**Tabla 2.1. Símbolos químicos**

**Manganeso** (Mn). El acero al carbono ordinario contiene de 0,2 a 1% de manganeso y los aceros especiales hasta el 14%. El manganeso aumenta la resistencia a los impactos y la fuerza tensil del acero, y disminuye el efecto negativo del azufre.

La conductividad térmica y la soldabilidad del acero decrecen cuando se aumenta el contenido de manganeso. El manganeso tiende a aumentar la susceptibilidad del acero al sobrecalentamiento y facilita el agrietamiento; a mayor contenido de manganeso en el acero, menor debe ser el calentamiento de este. Para evitar el sobrecalentamiento del acero al manganeso es necesario controlar cuidadosamente la temperatura a que se le somete y las reacciones

del mismo. Si los lingotes y barras de acero al manganeso se han calentado debidamente se pueden forjar sin dificultades.

**Níquel** (Ni). El níquel aumenta la fuerza tensil y la ductilidad del acero y no influye en su maleabilidad, sin embargo, al calentar aceros al níquel las capas de óxido se adhieren firmemente a su superficie y de aquí que puedan ser forjadas conjuntamente con el acero, lo que disminuye sus propiedades mecánicas.

**Cromo** (Cr). El cromo aumenta la dureza y la fuerza tensil y la elasticidad del acero y al mismo tiempo disminuye su ductilidad y su conductibilidad térmica. La estructura de un acero al cromo se rompe con dificultad durante el forjado y las piezas de acero al cromo llevan más trabajo cuando se emplean altas temperaturas si se quiere obtener una estructura de grano fino. Los aceros al cromo se forjan satisfactoriamente a temperaturas entre 1 150 y 850 ° C; pero a temperaturas inferiores a 850 ° C su dureza superficial aumenta bruscamente con el peligro de que se formen grietas.

**Molibdeno** (Mo). Generalmente se le añade al acero conjuntamente con níquel y cromo. En general el contenido de molibdeno para los varios grados de acero no excede de 0, 45 % y muy rara vez llega al 1%. Cuando se emplea conjuntamente con el cromo y el níquel, el molibdeno aumenta la fuerza tensil y la ductilidad del acero; pero disminuye su conductibilidad térmica. A mayor contenido de molibdeno menor calentamiento deberá recibir el acero, ya que la presencia del mismo aumenta la susceptibilidad del acero al sobrecalentamiento. Para forjar acero al molibdeno se requieren martinets o prensas más pesadas que los que se emplean para forjar acero al carbono. Las piezas forjadas de acero al molibdeno deben ser enfriadas lentas y estrictamente de acuerdo con las especificaciones de los procesos tecnológicos, ya que por tener una marcada tendencia a endurecerse al contacto con el aire, pueden agrietarse.

**Vanadio** (Va). En aceros especiales el contenido de vanadio generalmente no pasa de 0,3% y raramente excede al 1%. El vanadio aumenta la fuerza tensil y la ductilidad del acero, al mismo tiempo que facilita la formación de lingotes de

estructura de grano fino. Además, mejora su forjabilidad e impide el sobrecalentamiento.

**Tungsteno (W).** El tungsteno aumenta la dureza y la fuerza tensil del acero, aunque si se forja a bajas temperaturas tiene tendencias a agrietarse. Estos aceros requieren un régimen de calentamiento más lento y temperaturas más altas de forjado que los aceros al carbono.

**Azufre (S).** La presencia del azufre, aunque constituye un ingrediente perjudicial del acero, es inevitable, pues es retenido por el acero durante su fusión, y su contenido debe ser tan bajo como sea posible. Para manufacturar elementos especialmente importantes, su contenido en el acero no deberá exceder del 0,03% y en aceros corrientes no deberá exceder de 0,045 a 0,055%. Un contenido mayor de azufre se calienta al rojo, se torna quebradizo y durante el forjado se agrieta y se rompe. A temperaturas ordinarias el azufre disminuye la fuerza tensil del acero.

**Fósforo (P).** A diferencia del azufre, le produce al acero fragilidad en frío, o sea, hace que el mismo se torne quebradizo a temperaturas normales. El contenido máximo de fósforo en el acero no deberá exceder de 0,03 a 0,04% para elementos importantes de máquinas. A mayor contenido de carbono mayor será la cantidad de fósforo que admite el acero. La fragilidad en frío del acero se presenta generalmente cuando se endereza o cuando se dobla el material en la temperatura ambiental fría.

### **2.3. Clasificación de los Aceros**

Los aceros se clasifican atendiendo a su proceso de elaboración, a su análisis químico y a su aplicación.

Atendiendo al proceso de manufactura empleado para producirlo, se clasifican en: Bessemer, Thomas, Martin básico, Martin ácido, acero eléctrico y acero al crisol-

*Acero Bessemer.* Se obtiene inyectando aire comprimido al hierro cochino derretido, vertido en convertidores con revestimiento interior de sílice (ácido).

El recalentamiento del metal se obtiene a causa de la reacción de oxidación de hierro y los agregados de silicio y manganeso.

El acero Bessemer a causa de la imposibilidad de liberarlo de los óxidos, impurezas (azufre y fósforo) y burbujas superficiales, no puede emplearse para piezas forjadas de responsabilidad.

*Acero Thomas.* Al igual que el Bessemer, este acero se obtiene en convertidores con la diferencia de que en el proceso Thomas los convertidores se revisten con ladrillos de dolomita (básico). Este revestimiento permite convertir en acero al hierro cochino de alto contenido de fósforo.

La calidad y designación del acero Thomas son las mismas que las del Bessemer. El acero Thomas contiene más óxidos de hierro que el Bessemer.

*Martin básico.* Se funde en hornos regeneradores Martín de llama con ladrillos de magnesita (básico). La carga para estos hornos son: barras de hierro colado, chatarra de hierro fundido y acero, con un agregado de piedra caliza para la obtención de la escoria, ligando el azufre y el fósforo contenido en la carga metálica.

En los hornos Martín se puede fundir acero con un contenido no mayor de 0,04% de azufre y fósforo. Este acero se emplea para piezas forjadas de responsabilidad.

*Acero Martín ácido.* Se funde en los mismos hornos, pero con la diferencia de que su revestimiento está hecho con ladrillos de sílice (ácido).

La carga se utiliza es la misma, hierro colado y chatarra de hierro fundido y acero.

Por último, dicha carga no debe tener un contenido de azufre y fósforo que excede a un 0,03%, pues en este proceso el fósforo es retenido completamente por el acero.

En la actualidad se ha comenzado a utilizar cargas líquidas obtenidas en los hornos Martín básico.

El acero Martín ácido se diferencia del básico por estar mejor desoxidado y tener menos burbujas superficiales, este acero se utiliza para piezas forjadas especiales de responsabilidad.

*Acero eléctrico.* Este acero se produce en hornos por arco eléctrico o por inducción; en este proceso los crisoles pueden ser ácidos o básicos. El acero así producido posee magníficas cualidades y se emplea en la manufactura de muchos elementos importantes de máquinas.

*Acero al crisol.* Este acero se produce en crisoles refractarios, el acero empleado para la carga debe ser de alta calidad. Este acero raramente se usa, debido a su alto costo, y en su lugar generalmente se utiliza el producido en hornos eléctricos.

De acuerdo con la composición química, los aceros se clasifican en: aceros al carbono y aceros aleados.

*El acero al carbono.* Contiene hierro y carbono con una pequeña cantidad de otros elementos: hasta 1% de manganeso, hasta 0,05% de silicio y un máximo de 0,05% de azufre y de fósforo. El elemento fundamental que determina las propiedades mecánicas del acero es el carbono. El contenido de carbono dependerá de la aplicación que se le vaya a dar al acero y su proporción varía desde 0,02 a 0,03% en el hierro, 1,2 a 2,4% en acero de herramienta de alta resistencia.

*Acero aleado.* Son aceros que contienen elementos especiales tales como níquel, cromo, molibdeno, tungsteno, vanadio, cobalto, manganeso y otros. El elemento añadido determina el nombre del acero. Por ejemplo, si se trata de

romo, níquel o ambos, el acero se llamará acero níquel, acero al cromo o acero al cromo níquel.

Atendiendo a su aplicación, los aceros se clasifican en aceros de construcción o estructural de herramientas y aceros especiales. Los aceros de construcción a su vez se subclasifican en aceros estructurales al carbono y aceros estructurales aleados.

*Los aceros de construcción al carbono.* Se emplean para manufacturar elementos menos importantes de máquinas; pero los aleados de construcción se emplean para la producción de elementos importantes.

*Aceros de herramientas.* Se emplean para fabricación de diversas herramientas cortantes, de medición, troqueles y otras herramientas e instrumentos. Se dividen en dos grupos: aceros al carbono de herramientas y aceros aleados de herramientas.

*Aceros especiales.* Comprenden los de alta resistencia térmica, refractarios inoxidables, resistentes al ácido y otros.

#### **2.4. Grados de los Aceros**

Hay muchos grados de aceros empleados en la actualidad. En Rusia las composiciones químicas de los principales grados del acero han sido normalizadas por una norma oficial denominada GOST en abreviatura, palabra que responde a las iniciales de las palabras que en ruso se leen GosudarstvennyyObstchesoyuzny (norma para todos los estados de Rusia).

Los aceros al carbono de construcción se clasifican en aceros al carbono de construcción de calidad corriente y aceros al carbono de construcción de calidad elevada; este último tiene un contenido de fósforo y de azufre inferior al primero.

La composición química del acero al carbono de construcción de calidad corriente está especificada en la norma GOST-380-57; pero las composiciones químicas del acero al carbono de construcción de calidad elevada con contenido

normal y aumentado de manganeso, están especificadas en el GOST-1050-57. Las normas de Rusia especifican 8 grados de aceros al carbono de construcción de calidad corrientes; cada grado tiene su propio símbolo: C<sub>t</sub>.0; C<sub>t</sub>.1; C<sub>t</sub>.2; C<sub>t</sub>.3; C<sub>t</sub>.4; C<sub>t</sub>.5; C<sub>t</sub>.6; C<sub>t</sub>.7.

Estas cifras son convencionales y no están en relación directa con el contenido de carbono, sin embargo, a mayor número mayor contenido de carbono en el acero y, por tanto, más dureza en el mismo.

La graduación de los aceros de construcción de calidad elevada de contenido normal de manganeso se representa por dos cifras solamente: grados 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80 y 85. Estas cifras representan el contenido de carbono en centésimas de por ciento, ejemplo, el contenido de carbono del acero de grado 40 será de 0,40% o si se trata de las tolerancias será de 0,35 a 0,40%. El símbolo del grado de los aceros de construcción de un contenido de manganeso aumentado tendrá la letra  $\Gamma$  acompañada a veces de una cifra. Las cifras que siguen a la letra señalan el contenido de manganeso del acero en por ciento. Por tanto, el acero de grado 60 $\Gamma$ 2 tiene 0,6% de carbono y aproximadamente 2% de manganeso.

$\Gamma$  = Manganeso

La composición química del acero al carbono de instrumentos está especificada por la norma GOST 1435-54. Esta norma señala para los 8 grados de acero de calidad Y7; Y8; Y8T; Y9; Y10T; Y12 e Y13 y para los 8 grados de aceros al carbono de alta calidad de herramientas: Y7A; Y8A; Y9A Y10A; Y10T; Y12A; e Y13A. La letra Y indica acero al carbono y la cifras señalan las décimas de 1% de carbono que hay en el acero. Así, el acero de grado Y8 tiene un contenido de carbono de 0,8% o si se desea indicar la tolerancia de 0,75 a 0,80%.

El acero de grado Y10 tiene un contenido de aproximadamente 1,0% de Carbono, etc.



La letra A señala aceros de alta calidad que se distinguen de los aceros de calidad por su bajo contenido de azufre y fósforo. La letra Г para ciertos grados de acero indica un contenido aumentado de manganeso.

La composición química de los aceros aleados de construcción está especificada en la norma GOST 4543-57 de Rusia.

Atendiendo a su composición química y a sus propiedades mecánicas, los aceros de construcción y de aleaciones se clasifican en: de calidad y de alta calidad.

*Los aceros de alta calidad*, que se diferencian de los de calidad por su bajo contenido de azufre y fósforo, se indican con el prefijo A. el indicador de cualquier grado de acero aleado de construcción consta de dos cifras, que indican las centésimas de % de carbono contenido en el acero, seguido por las letras que indican él o los elementos de la aleación. Así, 15X, es el índice de un grado de acero con aleación de cromo que tiene un contenido de carbono de 0,15%; 40XH indica un grado de acero níquel cromo que tiene un contenido de carbono de 0,40%. Si el contenido del elemento empleado en una aleación, en un determinado grado de acero, es sobre 1%, por su porcentaje aproximado se representa en el índice por una cifra seguida de las correspondientes letras. Así, 20XH3A señala un acero al cromo níquel de grado de alta calidad que contiene 0,20% de carbono, cerca de 1% de cromo y cerca del 3% de níquel.

La composición química de los aceros aleados para herramientas está especificada en la norma oficial de la GOST 5950-51. Los grados de los aceros aleados para herramientas se indican por cifras que señalan las decimas de % de carbono, seguidas por letras que señalan los elementos que entran en la aleación del acero. El significado de las letras ha sido ya anteriormente descrito. Si el contenido de carbono es igual o mayor de 1% no se emplea cifras antes de las letras para indicarlo.

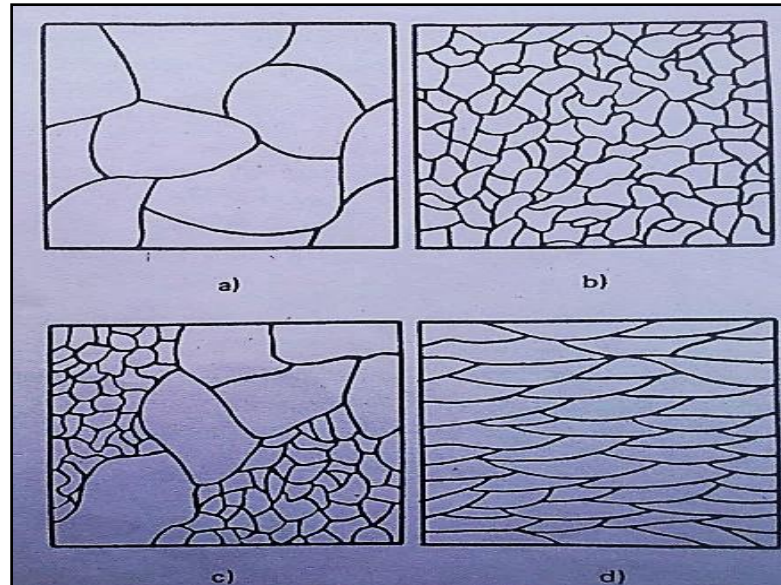
Las cifras que se colocan después de las letras señalan el contenido aproximado del elemento que se emplea en la aleación en por ciento. La ausencia de cifras en los índices de estos grados de aceros no significa que el contenido de elemento correspondiente de la aleación equivalente 1%. Así, X12 es el índice de un grado de acero al cromo que contiene 12% de cromo y más de 1% (en realidad, de 1,45 a 2,3%) de carbono; 3XB8 es el índice del grado de un acero de herramientas al cromo tungsteno que contiene 0,3% de carbono, hasta 1% de cromo y 8% de tungsteno.

## 2.5. Estructura del Acero

Todos los metales, incluyendo el acero, consisten de partículas extraordinariamente pequeñas llamadas granos, las que se pueden observar en la superficie de fractura de los mismos, aunque se pueden observar mejor cortando una micro sección de un metal puliéndola y corroyéndola. El microscopio nos ayuda a ver claramente que los metales realmente están constituidos por granos y la forma en que estos están colocados recibe el nombre de estructura granular del metal en cuestión.

Los granos pueden diferir entre sí en tamaño y forma. En un parte del metal unos granos pueden ser grandes, en otra pequeños y en otra ser mixtos, mientras que en un cuarto espécimen pueden estar orientados en una dirección determinadas, etc., **Figura 2.1.**

La medida y forma de los granos de cualquier metal no son constantes, sino que varían, lo que depende de los tratamientos térmicos y mecánicos a que el metal haya sido sometido. En los metales fundidos los granos son generalmente grandes, pero son mucho más finos en los metales forjados. En el proceso de laminado o forjado los granos se orientan en un dirección paralela al proceso en cuestión y al mismo tiempo se comprimen en una dirección transversal al laminado o forjado.



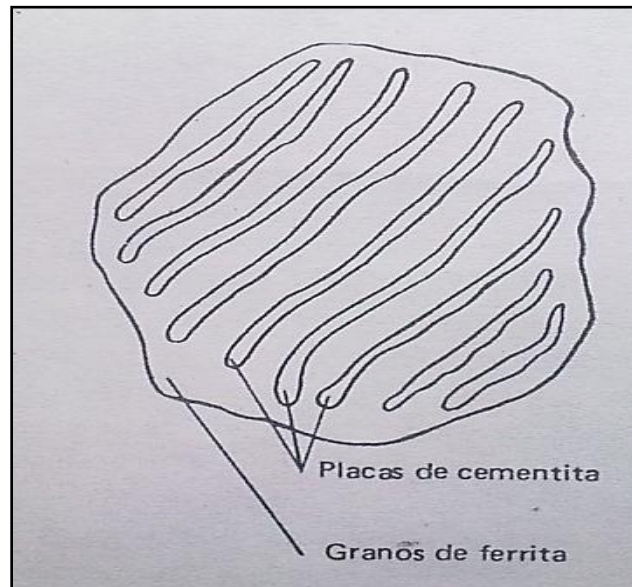
**Fig. 2.1 Tipos de granos en la estructura del metal. a) granos gruesos**

A temperaturas que no exceden de  $720^{\circ}\text{C}$  el acero al carbono consta de granos llamados ferritas y granos de cementita, es decir, de carbono y de hierro que es una combinación química de hierro y carbono que responde a la fórmula  $\text{Fe}_3\text{C}$ ; pero en adición a estos simples granos de ferrita y cementita, la estructura del acero contiene también granos más complejos que consisten en granos de ferrita que envuelven a partículas minúsculas de cementita que aparecen en forma de placas largas y estrechas. A estos granos combinados se les llama perlitas. La **Figura 2.2** muestra una representación esquemática de la perlita.

De esta descripción de la perlita se desprende que los granos no son en forma algunos homogéneos, sino que constituyen una mezcla mecánica de ferrita y cementita. Una característica específica de esta mezcla mecánica es que la proporción de ferrita y cementita es absolutamente constante en la perlita. Cada perlita contiene 86,5% de ferrita y 13,5% de cementita. Si calculamos esta proporción a base del contenido de carbono y sabiendo que el contenido de carbono en la cementita es de 6,7%, podemos deducir que la perlita contiene 0,9% de carbono (de acuerdo con las últimas determinaciones contiene 0,83%).

Por tanto, a temperaturas que no exceden de  $720^{\circ}\text{C}$ , puede haber solamente tres tipos de granos en los aceros al carbono recocidos: ferrita, cementita y perlita.

Un determinado acero puede contener simultáneamente las siguientes combinaciones de granos: 1) granos de ferrita y perlita; 2) granos de perlita solamente;



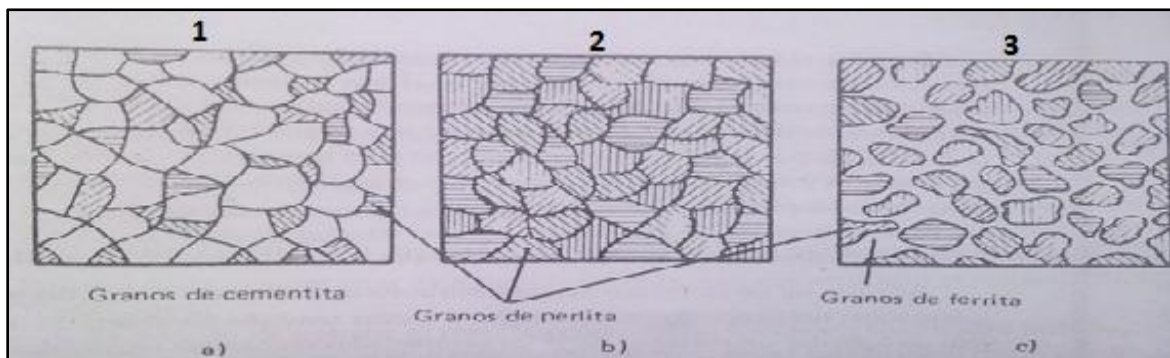
**Fig. 2.2 Esquema de la estructura del grano de perlita**

3) granos de perlita y cementita. La presencia de cualquier combinación dada de granos en un acero depende del contenido de carbono. La estructura de todos los aceros al carbono contiene menos del 0,9% de carbono, o sea, los aceros de grado  $C_t.0$ ,  $C_t.1$ ,  $C_t.2$ ,  $C_t.3$ ,  $C_t.4$ ,  $C_t.5$ ,  $C_t.6$ ,  $C_t.7$ ,  $0.8$ ,  $10$ ,  $15$ ,  $20$ ,  $30$ ,  $35$ ,  $40,45$ ,  $50$ ,  $55$ ,  $60$ ,  $Y7$ ,  $Y7A$ ,  $Y8$ ,  $Y8A$ ,  $Y8T$  e  $Y8TA$ , en condiciones de reconocimiento y a temperatura normal contiene ferrita y perlita (**Figura 2.3**). Por tanto, a mayor contenido de carbono en el acero mayor cantidad de perlita habrá en el mismo y menor cantidad de granos de ferrita (**Figura 2.3**). Los aceros de este grupo se conocen con el nombre de aceros tipo hipoeutectoide. A temperaturas normales y recocidas el acero grado  $Y9$ , que tiene un contenido de

carbono de 0,9%, posee una estructura que consta de granos de perlita solamente (**Figura 2, 3, b**).

La estructura de los aceros que contiene más el 0,9% de carbono, por ejemplo, los granos Y10, Y10A, Y10T, Y12A, Y13 e Y13A, consta de granos de perlita y cementita (**Figura 2,3, c**). En esos aceros no hay granos de ferrita; tales aceros se conocen con el nombre de aceros hipereutectoides.

Al calentar acero al carbono de cualquier grado no se producirán cambios en su estructura a temperaturas inferiores a  $720^{\circ}\text{C}$ . No obstante a  $720^{\circ}\text{C}$  ocurrirá el primer cambio profundo en la estructura del acero: los granos de perlita se han transformado en granos de austenita. Esta transformación consiste en que los granos laminados de cementita, que constituían una estructura recubierta dentro de los granos de perlita, se disuelven en el hierro y se distribuyen uniformemente en el mismo. La austenita, que se cristaliza fuera de los granos de cementita ya no se presenta en granos muy complicados de hierro, pero que rodean los granos laminados de cementita, sino en granos homogéneos de una solución sólida de hierro y carbono.



**Fig. 2.3 Micro estructura de tres diferentes aceros al carbono; a) acero de grado Ct.5 b) acero de grado Y9; c) acero de grado Y12.**

La transformación de la perlita en austenita se produce en los aceros de todos los grados cuando la temperatura del metal alcanza los  $720^{\circ}\text{C}$ . esta temperatura que es extraordinariamente importante en la teoría y la práctica del tratamiento

térmico del acero, recibe el nombre de temperatura crítica inferior del acero y se representa por el símbolo  $A_{cl}$ .

¿Qué estructura tendrán los aceros al carbono a temperaturas ligeramente superiores al punto crítico inferior, digamos a  $730^{\circ}\text{C}$ ? Está claro conforme se ha dicho, que a  $730^{\circ}\text{C}$ , la estructura de los aceros del primer grupo, o sea, los aceros de grado  $C_t 0$ ,  $C_t 1$ , etc., y los incluidos hasta los grados Y8 e Y8A estarán constituidos por granos de ferrita y granos de austenita. La estructura de los aceros de grado Y9 y grado Y9A, a  $730^{\circ}\text{C}$  constarán únicamente de granos de austenita. Finalmente, a  $730^{\circ}\text{C}$  los aceros del tercer grupo, los de grado Y10 y subsiguientes, incluyendo los grados Y13 e Y13A, tendrán una estructura de austenita y cementita.

Cuando los aceros al carbono se calientan a temperaturas superiores a  $720^{\circ}\text{C}$ , los granos de austenita crecen y los de ferrita disminuyen su tamaño, pues los granos de austenita disuelven los de ferrita y los absorben gradualmente. Finalmente, a cierta temperatura los granos de ferrita desaparecerán completamente y el metal tendrá una estructura que constará de austenita exclusivamente (**Figura 2.4 a y b**).

La temperatura en la cual termina el proceso de disolución de la ferrita por la austenita recibe el nombre de temperatura crítica superior y se representa por el símbolo  $A_{C3}$ .

A diferencia de la temperatura crítica inferior, que es la misma para todos los aceros al carbono, la temperatura crítica superior varía para los aceros de diferentes granos. Estos cambios de estructura que tienen lugar en los aceros al carbono cuando se calientan, se pueden representar gráficamente en el diagrama conocido con el nombre de Diagrama de equilibrio del hierro-carbono (**Figura 2.5**).

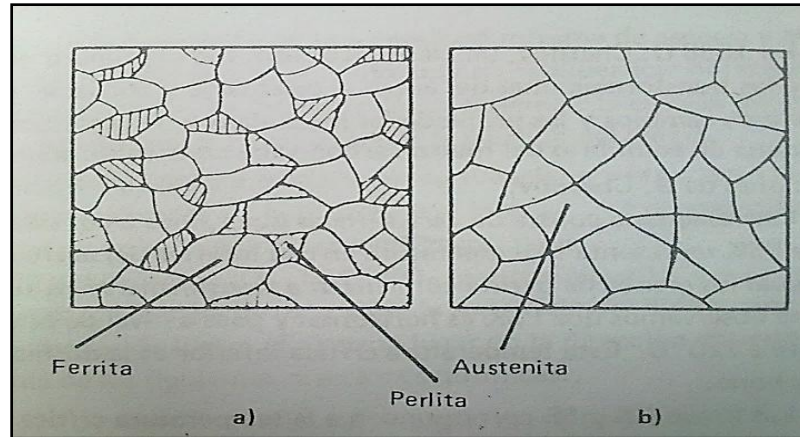


Fig. 2.4 Microestructura del acero de grado Ct.5.

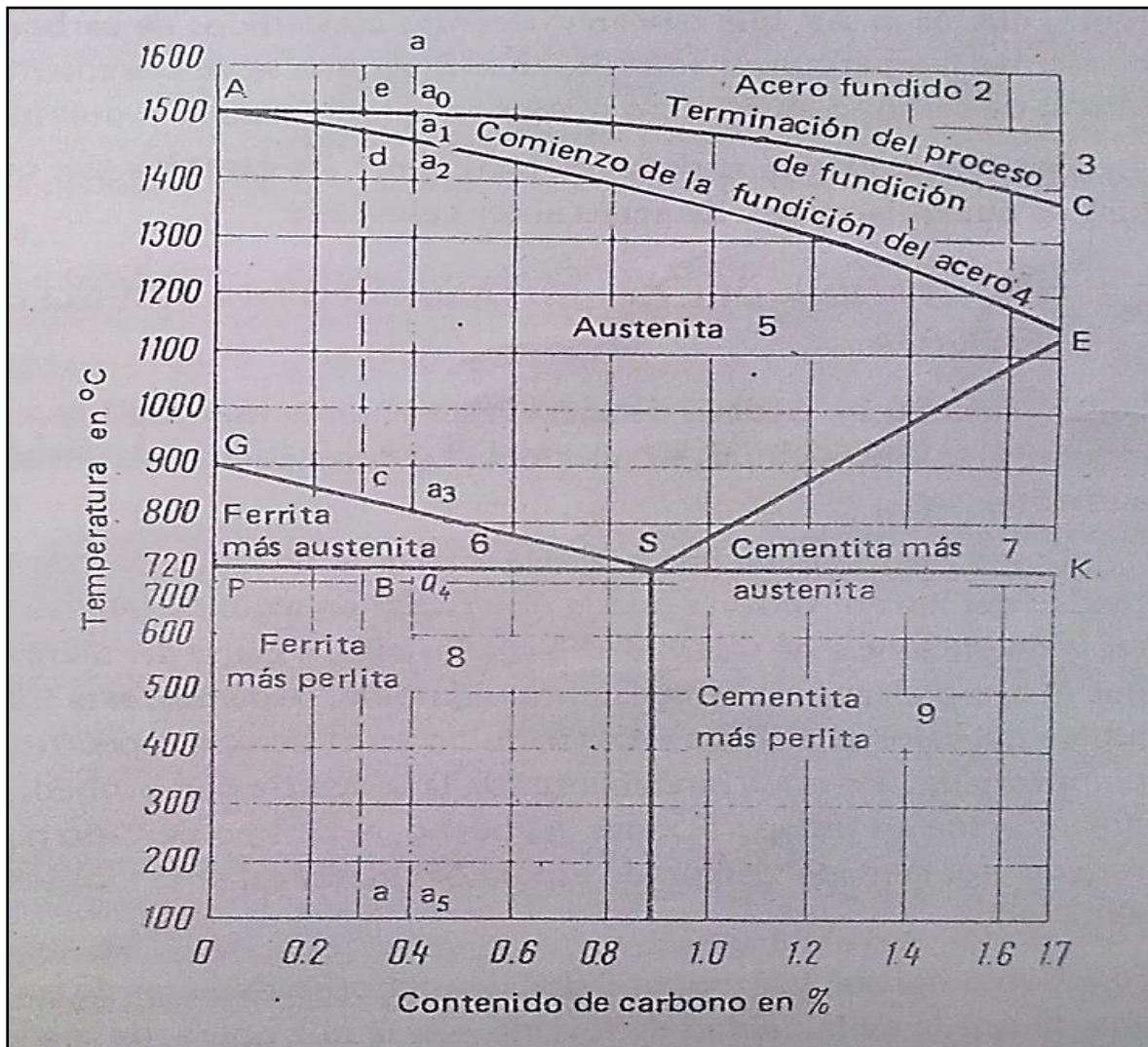


Fig. 2.5 Diagrama de equilibrio del hierro carbono

En 1868 D. Chernov, un científico ruso, fue el primero que llamó la atención sobre las transformaciones del acero al calentarse y enfriarse, y sobre la relación entre esos cambios y las propiedades mecánicas y de la estructura del metal. El diagrama de equilibrio del hierro-carbono fue construido sobre la base de las investigaciones de D. Chernov.

Este diagrama consta de varias líneas que vamos a considerar separadamente. La línea PSK representa la temperatura crítica inferior del acero, o sea, la temperatura a la cual los granos de perlita comienzan a transformarse en austenita. En este diagrama observamos que PSK es horizontal y pasa a nivel de la temperatura correspondiente  $720^{\circ}\text{C}$ . Esta temperatura crítica inferior es la misma para todos los aceros al carbono.

Las líneas GS y SE corresponden a la temperatura crítica del acero, o sea, las temperaturas sobre las cuales la estructura de cualquier acero al carbono constará única y exclusivamente de granos de austenita. Los diversos puntos sobre las líneas GS y SE corresponden a diferentes grados de acero al carbono.

AE es la línea de las temperaturas a las cuales los aceros comienzan a fundirse y AC, constituida por granos de ferrita y granos de perlita, es la línea de las temperaturas en la cuales se completa el proceso de fusión. Como los puntos en ambas líneas están localizados a diferentes temperaturas, ello indica que los aceros de diferentes grados, o sea, que tengan diferentes contenidos de carbono, se fundirán a diferentes temperaturas, además, en el diagrama se ve claramente que a mayor contenido de carbono en el acero menor es la temperatura requerida para fundirlo.

Por este diagrama se deducen fácilmente los cambios que ocurren en la estructura de cualquier grado de acero al ser calentado.



## **2.6. Importancia del calentamiento del acero en la práctica de Forja**

Al calentar un pedazo de acero, este se pone más suave y su fuerza tensil se reduce, al mismo tiempo, su plasticidad y consecuentemente, su forjabilidad se aumenta.

Como resultado de una práctica impropia de calentar y de insuficiente productividad del horno, todavía puede observarse en algunos talleres una pérdida considerable de eficiencia de las unidades del forjado, a causa del tiempo perdido en esperar que el acero alcance la temperatura requerida. Además, este llamado tiempo de espera del calor es algunas veces incluido en el tiempo específico para producir la pieza forjada. Pero los innovadores de la industria han probado que mejorando la organización en las operaciones del horno, el tiempo perdido por las unidades del forjado el llamado tiempo de espera del metal caliente puede ser completamente eliminado.

Como norma, la productividad de un horno debe ser de un 15 a 20 por ciento mayor que la de la unidad de forjado con la que opera, de manera que sea capaz de acelerar la última.

Calentar el metal es una de las principales operaciones en la práctica del forjado y es considerada como de importancia igual que la forja misma. Calentar y forjar propiamente crean condiciones para aligerar el trabajo del hierro y de los operadores del forjado a martinete y para asegurar alta eficiencia de las instalaciones de forja. Al mismo tiempo, crea posibilidades para economizar fuerza (vapor, aire comprimido y electricidad) y combustible, asegurando alta calidad y reduciendo el costo de las piezas forjadas.

## **2.7. Cambios en las propiedades de los metales al calentarse**

Además de las transformaciones estructurales que ocurren en los metales al ser calentados, sus propiedades mecánicas y físicas también cambian. El principal objeto de calentar un metal es darle las propiedades mecánicas requeridas.

La plasticidad del acero no aumenta uniformemente al ser calentado. La plasticidad del acero de bajo carbono, mediano carbono y de aleación baja y media, baja al ser calentados de 200 a 400 °C, y la de aleaciones altas al ser calentadas de 700 a 850 °C, pero si se calienta sobre 600 a 750 °C, la plasticidad del acero, dependiendo de su grado, aumenta gradualmente. Por eso, a temperaturas sobre los 600 a 850 °C (dependiendo del grado del acero) la plasticidad del acero se vuelve tan alta que no ocurren tensiones internas ni rajaduras.

La propiedad física más importante del acero para el proceso de calentar es su conductividad térmica. La conductividad térmica de una sustancia es su propiedad para conducir el calor de una parte con alta temperatura a una parte con baja temperatura. Mientras más alta es la conductividad térmica de una sustancia mayor será la cantidad de calor que penetrará desde su superficie a su núcleo en una unidad de tiempo (hora) y, por tanto, menor tiempo se requerirá para calentarla. El valor de la conductividad térmica es expresado por medio de coeficientes de conductividad térmica.

El coeficiente de conductividad térmica de cualquier sustancia es esa cantidad de calor, en calorías, que puede ser transmitida por hora a través de una unidad de espesor (1 metro), a través de una unidad de área (1 metro cuadrado) por unidad de diferencia de temperatura (1°C). Se expresa como caloría por metro por hora y se indica por la letra griega  $\lambda$  (lambda). Así, si nosotros decimos que el coeficiente de conductividad térmica del acero es  $36 \text{ cal/m/h}^\circ\text{C}$ , esto significa que 36 calorías serán transferidas por hora a través de una placa de acero de 1 metro de espesor y 1 metro cuadrado de área por cada 1 grado centígrado de diferencia de temperatura entre sus lados.

El coeficiente de conductividad térmica es determinado, para cada sustancia, por experimentación y varía grandemente según los diferentes materiales y grados de acero. Así, la conductividad térmica del hierro puro es  $60 \text{ cal/m/h}^\circ\text{C}$ , mientras que la del acero grado 30,  $\lambda = 38, 2 \text{ cal/m/h}^\circ\text{C}$ . El coeficiente de conductividad térmica del acero depende de su composición química, temperatura y del

tratamiento al cual se ha sometido, mientras menores elementos de aleación haya en el acero mayor será su conductividad térmica, la conductividad térmica baja con el aumento del contenido de carbono. Además, la conductividad térmica de aleaciones de acero es menor que la de aceros al carbono.

La conductividad térmica del acero también cambia con su temperatura. Los experimentos han demostrado que con un aumento en la temperatura de 800 a 850<sup>0</sup>C, el coeficiente de conductividad térmica de acero al carbono ordinario baja. Sobre 850<sup>0</sup>C, el coeficiente de conductividad térmica de acero al carbono ordinario aumenta ligeramente. La conductividad térmica de aleaciones y acero especial cambia durante su calentamiento dependiendo de los elementos de aleación y de su contenido en el acero. Las investigaciones han establecido que la conductividad térmica de aleaciones altas de acero al cromo-níquel aumenta con el aumento en la temperatura.

El método de trabajar el metal también influye en la conductividad térmica, forjar, prensar y en general, todas las formas de trabajar mecánicamente el acero aumentan su conductividad térmica. La conductividad térmica del acero fundido es menor que la del acero forjado o laminado.

## **2.8. Oxidación y Descarburación del acero**

Al ser calentado el acero en un horno, su superficie, como la de cualquier otro metal se cubre de una capa de óxido a la que se le llama costra. A medida que el acero se pone más caliente, el grueso de la capa de óxido aumenta hasta que esta comienza a desprenderse para unirse con el material del horno (si este último está revestido con ladrillo de arcilla refractario); esto conduce a la formación del llamado depósito de escorias. Parte de la costra de óxido queda adherida a la superficie del acero. Durante el proceso de forja, la oxidación del acero continúa siempre que el acero caliente al rojo esté sometido a la acción del aire circulante.

Así, el calentamiento conduce a una cierta pérdida de metal por la formación de escoria de óxido debido a su oxidación. Esta pérdida es llamada desperdicio y

debemos distinguir el desperdicio debido al calentamiento (desperdicio del horno), y en la forja (desperdicio de la pieza al forjarla). Hay una falsa opinión muy difundida de que el desperdicio mayor ocurre principalmente durante el proceso de calentamiento en el horno, y de que el de la forja es insignificante. Pero las investigaciones han establecido que la pérdida de metal debida a las costras de óxido que se forman fuera del horno es considerable y en algunos casos, es mayor que el desperdicio en el horno.

El desperdicio causa grandes pérdidas a la producción y conduce a considerables pérdidas de acero junto con la costra. Durante la forja, hasta un tres por ciento, y más, de acero, se pierde como costra de óxido; pero esto no es en manera alguna la totalidad de las pérdidas causadas por el desperdicio. Las escorias que permanecen en la superficie del material son prensadas dentro del metal cuando este es forjado, deteriorando de esta manera la superficie de la pieza y reduciendo su resistencia.

Durante el estampado, las escorias al caer en el troquel alteran las dimensiones de la pieza y reducen la vida del mismo troquel.

Es imposible evitar el desperdicio cuando se calienta acero en hornos de forja de llama, sin embargo, siempre debemos tratar de crear las condiciones al calentar que aseguren la formación de una cantidad mínima de escoria y además, de unas escorias que puedan separarse fácilmente de la superficie del material antes de forjarlo. Por esta razón, los herreros deben entender la esencia del proceso de formación de escoria y saber cómo prevenir la pérdida del metal.

El hierro comienza a oxidarse en su superficie y el proceso de oxidación se produce gradualmente de la superficie al interior. La propagación de este proceso dentro del material puede tener lugar como sigue:

1. El gas oxidante ( $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$  y otros) penetra, o sea, se difunde dentro del metal desde la capa de escoria de la superficie del hierro, simultáneamente, una difusión similar de hierro (Fe) tiene lugar en la

dirección opuesta. Este proceso se acompaña de las siguientes reacciones químicas.



2. Debido a los diferentes coeficientes de expansión de escoria (FeO) y hierro (Fe), parte de las escorias cae de la superficie del material, y la superficie descubierta del mismo es sometida a una oxidación adicional.
3. A altas temperaturas se funden las escorias, exponiéndose de nuevo el hierro puro del material a la oxidación. Debido a la alta temperatura el hierro vuelve a oxidarse rápidamente.

La rapidez y la cantidad de la formación de escoria dependen de los siguientes factores: a) la temperatura del acero; b) la duración del calentamiento; c) el medio gaseoso en el cual el calentamiento tiene lugar; d) la composición y las propiedades del acero que se calienta; e) la forma y las dimensiones del acero que se calienta.

La pérdida de acero aumenta con su temperatura. Las investigaciones han establecido que si aceptamos la velocidad de la oxidación a 900 °C como unidad, su velocidad a 950 °C será 1,25; a 1000 °C, 2; a 1100 °C, 3,5 y a 1300 °C de 7. Particularmente, la velocidad de la formación de escoria (oxidación) aumenta repentinamente de 1350 a 1375 °C, pues a esta temperatura la escoria comienza a fundirse.

La duración del calentamiento del acero en el horno también influye en la cantidad de pérdida. Mientras más tiempo el acero permanece en el horno (altas temperaturas y siendo otras condiciones iguales) mayor es la pérdida. De aquí que podamos deducir, que para reducir la pérdida de acero, es necesario tenerlo el menor tiempo posible sometido a altas temperaturas.

La atmosfera del horno es otro factor importante y determinante de la cantidad de pérdida de acero, en relación con su efecto sobre el acero, los gases son clasificados como: gases oxidantes, reductores y neutros. Los gases oxidantes

incluyen: oxígeno ( $O_2$ ); dióxido carbónico ( $CO_2$ ); vapor de agua o vapor ( $H_2O$ ) y dióxido de azufre ( $SO_2$ ); los gases reductores incluyen: monóxido de carbono ( $CO$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ), mientras que el nitrógeno ( $N_2$ ) es un gas neutro.

Hasta cierto punto, la influencia de la atmosfera del horno sobre el acero depende de la proporción de los gases oxidantes y reductores. Como sabemos, los productos de combustión incluyen:  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $O_2$  y algunas veces  $CO$ . El contenido de oxígeno de los productos de combustión depende del coeficiente del exceso de aire empleado para quemar el combustible, mientras que el contenido de  $CO$  depende del grado de combustión incompleta. Como regla, los gases del horno son casi siempre oxidantes. En la cámara de trabajo del horno, los productos de combustión no pueden formar una atmosfera neutra, y todavía menos pueden crear una atmosfera reductora. Para tener una atmosfera neutra o una reductora, los productos de combustión deben tener un alto contenido de gases reductores, hidrógeno y monóxido carbónico, lo cual no es posible cuando se quema combustible en hornos.

La formación de escoria depende en gran medida de la composición del acero. El aluminio, el cromo, el silicio, el tungsteno y el cobre en el acero, retardan la oxidación de la superficie del acero, pues al ser calentado, las escorias forman una capa densa, la cual se adhieren firmemente a la superficie del acero y así la protege de ulterior oxidación. Todos los grados de aleaciones de acero (en igualdad de todas las otras condiciones) son menos propensos a la oxidación que los aceros al carbono.

Consecuentemente, las siguientes condiciones deben ser observadas para reducir las pérdidas de metal como desperdicios, ocasionadas cuando se calienta acero en hornos de forja:

1. Las condiciones de calentamiento deben proporcionar la duración mínima posible del mantenimiento del acero en el horno a altas temperaturas (sobre  $900$  a  $1\ 000$  °C) a, la cual tiene lugar la oxidación máxima. En este caso, el horno operara a altos regímenes de calor y la pérdida de metal

debida al desperdicio será reducida. De esta manera, todas las condiciones necesarias para una alta productividad del horno conducirá simultáneamente a una reducción en la pérdida de metal.

2. Los lingotes deben ser cargados y descargados del horno a promedios uniformes y continuamente, sin ser indebidamente mantenidos en las zonas de altas temperaturas. El mejor método es el cargar una pieza del material dentro del horno, al mismo tiempo que una pieza de material previamente calentada es descargada del horno.
3. El proceso de combustión debe ser conducido de manera que asegure el contenido mínimo posible de oxígeno libre en los productos de la combustión. La combustión debe tener lugar con un exceso de aire mínimo, al mismo tiempo, debe asegurarse una combustión completa.
4. El horno debe estar bien cargado y, al mismo tiempo, para evitar la succión de aire debe ser mantenida una ligera presión positiva en el hogar del horno.
5. El hogar del horno debe estar revestido con materiales básicos, esto es, magnesita, cromo-magnesita y ladrillos de talco.

Esto excluirá toda posibilidad de formación de combinaciones fundidas de escoria a bajas temperaturas con el revestimiento del hogar y la formación de escoria fusible, el horno operará con lo que es llamado un hogar seco.

A altas temperaturas, la oxidación del acero estará acompañada por su descarburación. El proceso de descarburación consiste en la reducción del contenido de carbono en su superficie (el carbono se quema). La descarburación reduce las propiedades mecánicas del acero. Cuando está descarburado, el acero de herramientas se vuelve suave y las herramientas manufacturadas de tales aceros tienen una vida corta. Los experimentos han demostrado que el acero, al ser calentado, es primero descarburado y después comienza a oxidarse, esto es, la capa descarburada del acero siempre se encuentra debajo de la capa de escoria. El grado de descarburación aumenta con la temperatura del acero.

El grado de descarburación también depende de la composición química del acero, mientras mayor es el contenido de carbono más alto será el grado de descarburación del acero. El aluminio promueve grandemente la descarburación, como lo hace el cromo, mientras que el manganeso la retarda.

## **2.9. Sobrealeamiento y quemadura del acero**

Si calentamos acero sobre el punto crítico más alto  $A_{c3}$  y entonces continúa elevándose su temperatura, podemos observar un crecimiento del tamaño de sus granos si los examinamos bajo un microscopio, mientras más alta la temperatura más energético será el crecimiento de los granos, y estos serán más gruesos, cuando más largo sea el proceso de exposición del acero a una temperatura dada. El acero que posee granos excesivamente gruesos es llamado acero sobrealeado.

Cuando es forjado, el acero sobrealeado se desgarrará y rajará, especialmente en las esquinas de un lingote o pieza de material, su fractura exhibirá una estructura considerablemente gruesa, la cual puede verse a simple vista. El sobrealeamiento depende de dos factores: la temperatura y la duración del calentamiento del acero.

De la experiencia práctica en la operación de hornos de forjado, es bien conocido, que si un lingote o pieza de acero es mantenida en un horno a altas temperaturas (por ejemplo, en la cámara de impregnación o igualación de un horno continuo) más tiempo que el usual, tal lingote o pieza de acero, al forjarse, exhibirá gotas (lágrimas) debido al sobrealeamiento. Por otra parte, los lingotes mantenidos por un tiempo más corto o a la misma temperatura, se forjarán normalmente.

De esta manera, el acero puede ser sobrealeado a cualquier temperatura sobre el punto crítico más alto  $A_{c3}$ . El grado de sobrealeamiento a cualquier temperatura dada depende del tiempo que el acero es mantenido a esta temperatura.



El acero sobrecalentado puede ser mejorado por el subsiguiente recocido, esto es, por calentamiento lento a una temperatura de 10 a 30 °C sobre el punto crítico  $A_{c3}$ , y el subsiguiente enfriamiento lento.

Si una pieza de acero calentado se deja permanecer por un tiempo considerable en el horno a una alta temperatura, la misma se quemará. La quemadura del acero es debido al oxígeno de los gases del horno, que penetra de la superficie del acero a su interior, la oxidación de los límites del grano y la fundición de las sustancias formadas entre los granos gruesos. Como resultado se forman capas finas entre los granos del acero, el contacto entre los granos se rompe y el acero se vuelve débil, mientras que grandes rajaduras aparecen en la superficie de la pieza, que se rompe en pedazos. Cualquier calentamiento adicional conducirá a la fundición o destrucción de secciones separadas de la pieza.

La quemadura depende principalmente de la temperatura de calentamiento, la composición de los gases del horno y la duración de calentamiento del acero a altas temperaturas. El acero quemado no puede rectificarse, tal material es usualmente rechazado como chatarra y el resto del metal solo puede ser utilizado como chatarra, para hornos de hogar abierto.

Para evitar que el acero se queme deben observarse las siguientes condiciones principales cuando se calienta:

1. Ver que el combustible se quema con el menor coeficiente de exceso de aire, de manera que asegure la ausencia de oxígeno libre en los gases del horno.
2. No cargar el material en el hogar en montón, sino de tal manera que asegure la circulación de los gases del horno alrededor del mismo, sin que la llama de los quemadores o atomizadores choque directamente con la superficie del material que se calienta.
3. Cargar el horno con el acero suficiente para asegurar la forja de una pieza de material, mientras la próxima pieza alcanza la temperatura de forjado en el horno. El horno debe ser cargado por el método de pieza, esto es,

cargar una o dos piezas de acero dentro del horno al mismo tiempo que se saca la misma cantidad de material. Esto asegurará que el acero se mantenga a altas temperaturas por el tiempo suficiente para llevarlo a una temperatura requerida uniforme. Esto, a su vez, evitará el sobrecalentamiento y la quemadura del acero.

## **2.10. Introducción: La temperatura para la forja**

La diferencia de temperatura entre las temperaturas de forja inicial y final se llama el intervalo de la temperatura de forja.

Para forjar, el metal debe ser calentado en una temperatura en que poseerá altas propiedades plásticas al comienzo y al final del proceso de forjado. De aquí se deduce que es mejor calentar el metal a las más altas temperaturas, por cuanto su plasticidad (forjabilidad o maleabilidad) aumenta con la temperatura. Por otro lado, el peligro de sobrecalentamiento limita las posibilidades de aumentar la temperatura de calentamiento. Para evitar la quemadura, la temperatura a la cual el metal debe ser calentado, será de 180 a 200 °C por debajo de aquella en la que ocurra la quemadura.

La estructura del acero, calentado de 1,100 a 1,280 °C (dependiendo de su grado), se vuelve de grano grueso. Durante la forja, sin embargo, sus granos se rompen y se vuelven más finos. Si la temperatura final de la pieza es alta (superior a 900°C), el grano crecerá otra vez durante el proceso de enfriamiento al aire; la pieza fría tendrá entonces una estructura de grano grueso y bajas propiedades mecánicas. Si terminamos de forjar a bajas temperaturas (inferior a 900°C), los granos no crecerán cuando el acero se enfría, a causa de la baja temperatura. Por esta razón, la pieza forjada enfriada poseerá una estructura de grano fino y altas propiedades mecánicas.

De esta manera, si terminamos de forjar una pieza de acero dentro de un intervalo de temperatura de 900 a 700°C, dependiendo de su grado, la pieza

poseerá una estructura de grano fino y por el contrario, mientras más alta sea la temperatura final del forjado, más grueso será el grano en la pieza.

Para asegurar buena calidad en las piezas forjadas, debemos completar el proceso de forjado a una temperatura definida, correspondiente a los diferentes grados de acero. No se recomienda forja a temperaturas por debajo de la temperatura establecida (de 900 a 700°C), porque el grano en vez de ser roto solo es comprimido (deformado), el acero se endurece por el frío, como se dice, se vuelve duro y frágil y, como resultado, propenso a rajaduras. El endurecimiento por frío puede ser eliminado por el recocido, pero las rajaduras no siempre pueden ser eliminadas y la pieza tendrá que ser rechazada como desecho.

*De lo anterior, podemos deducir las siguientes conclusiones:*

Antes de forjar el acero, este debe ser calentado a la temperatura más alta posible, la cual, en todos los casos, debe ser más baja que la temperatura a la cual es propenso a quemarse. La temperatura de quemadura debe ser determinada en cada grado de acero, con muestras mantenidas por varios intervalos de tiempo en cada temperatura que se prueba. Después de determinar la temperatura de quemadura para cada grado de acero, determinamos la temperatura máxima de calentamiento para forjar; esta temperatura debe ser de 180 a 200°C por debajo de la temperatura de quemadura.

1. La pieza forjada debe ser terminada a una temperatura a la cual el acero no muestre una textura ulterior. Esta temperatura se determina experimentalmente y está indicada en la hoja tecnológica de proceso.
2. El intervalo de la temperatura de forja de cierto grado de acero ampliamente usado varía de 700 a 1280°C. La tabla 3 da los intervalos de temperatura de forja aproximados para varios grados de acero.

<b>Grado de acero</b>	<b>Temperatura máxima de calentamiento, (temperatura forja inicial) de °C de</b>	<b>Temperatura de Forja Final °C</b>	
		<i>Para operaciones preparatorias</i>	<i>Para operaciones finales.</i>
<b>C.2, C.3, 10, 15, 25</b>	1 280	800	700
<b>C.5, C.6, C.7 40,45,50,55,15X, 20X,35X,49X,30H, 40h,40CX,45X, 25XCMA,30XH3M 18XHBA, 18XHMA, 5XHM,5XGM, 6XHM,45XH, Y7, Y8, Y10, 7X3,9X,9X2</b>	1 220	800	700
	1 200	800	700
	1 150	850	800

**Tabla 2.2 Intervalos de temperatura de forja para varios grados de acero**

*El proceso de Calentamiento del Acero en los Hornos.*

*El calentamiento adecuado del acero para forjar presupone:*

1. Calentamiento a la temperatura requerida uniformemente por toda su sección transversal.
2. Calentar el acero al régimen máximo permisible sin perjudicar su calidad.
3. Calentar el acero, con la menor pérdida posible y consumo mínimo de combustible.

En hornos de llama, el calor se transmite a la superficie del metal de dos maneras: por convección y por radiación. Por convección entendemos la transmisión del calor por el contacto directo de partículas de gases del horno, que se mueven continuamente, con la superficie del objeto que se calienta. Como resultado de esto, las partículas más calientes de los gases del horno ceden su calor a la superficie más fría del material que se calienta.

Por radiación se entiende la transmisión del calor a través del espacio de un cuerpo a otro a temperatura más baja. El calor, en este caso se transmite como

energía radiante, la cual al pasar sobre la superficie del segundo cuerpo es completa o parcialmente convertida en calor.

En los hornos de forja, el acero se calienta simultáneamente por convección y por radiación. Hasta  $600^{\circ}\text{C}$ , el calentamiento se realiza principalmente por convección, solo una cantidad insignificante de calor es transmitida por radiación. A temperaturas sobre  $600^{\circ}\text{C}$ , sin embargo, el calor es transmitido al acero principalmente por radiación y no por convección. Mientras mayor es la diferencia entre la temperatura del acero que se calienta y las de los gases del horno, hogar, cubierta y paredes del horno, más rápido será transmitido el calor al acero. El calor transmitido por radiación y convección al metal es absorbido por la superficie de la pieza o del lingote. La ulterior difusión del calor del material o del lingote tiene lugar como resultado de la conductividad térmica del acero.

La temperatura no está distribuida uniformemente por toda la sección transversal de piezas pesadas de acero o lingote; la temperatura en el centro es más baja que en la superficie; además, mientras más baja sea la conductividad térmica del acero mayor será la diferencia entre la temperatura en el centro del lingote o de la pieza y en su superficie.

La diferencia entre la temperatura del horno y la de la superficie del lingote que se calienta será mayor mientras mayores sean la tasa de calentamiento y la sección transversal del acero.

Esta difusión dispareja de la temperatura a través de la sección transversal de un lingote o pieza de material, da lugar a lo que se llama tensiones térmicas. Las tensiones térmicas son ocasionadas por el hecho de que las capas exteriores del acero, como están a una temperatura más alta que sus porciones centrales, se dilatan en volumen en una mayor extensión que las últimas. Como resultado, las capas exteriores del metal del lingote o material se esfuerzan por separarse de las capas interiores menos calientes, lo cual retarda la expansión de las capas exteriores (superficie) del acero. Consecuentemente, si un lingote no es

calentado uniformemente por toda su sección transversal, ocurrirán esfuerzos de compresión en la superficie y esfuerzos de tensión en el centro; estos son los que dan lugar a las rajaduras durante el calentamiento.

El proceso de calentamiento del material o los lingotes puede ser dividido en dos períodos: el primer período, de calentamiento o bajas temperaturas (de 500 a 700°C) y el segundo período de calentamiento a altas temperaturas o zona de forjado.

El primer período de calentamiento es muy importante, porque a temperaturas comparativamente bajas, la plasticidad de los aceros al carbono y de baja aleación y la conductividad térmica de acero de altas aleaciones es baja. Particularmente grandes lingotes o piezas pesadas de acero de alta aleación deben ser calentados con extrema preocupación para prevenir la formación de tensiones térmicas que puedan conducir a rajaduras. Por esta razón, el calentamiento debe ser realizado tan lentamente como sea posible, y la temperatura del horno al cargar lingotes fríos, particularmente de lingote de acero de aleación no debe exceder de 600 a 800°C. El material de aceros al carbono suaves y piezas delgadas de acero de aleación (hasta de 100mm de grueso) puede ser cargado dentro de hornos calentados hasta la temperatura de forjado.

El segundo período de calentamiento, el de calentamiento en la zona de alta temperatura, se caracteriza por los altos regímenes de calentamiento. A temperatura entre 500 y 700°C, los aceros al carbono poseen un buen grado de plasticidad y, por tanto, las tensiones térmicas internas que ocurren durante el calentamiento de este acero no pueden dar lugar a rajaduras en los lingotes o piezas. Durante el segundo período de calentamiento, debe tenerse cuidado de evitar la quemadura del acero. Con este propósito, la temperatura de los gases del horno, en hornos de caja en los cuales los aceros son calentados a altas temperaturas, nunca debe ser más alta de 100 a 150°C sobre la temperatura requerida por el acero

### 2.11. Como determinar la duración del Calentamiento del Acero.

Por duración del calentamiento entendemos el tiempo necesario para el calentamiento uniforme de un lingote o pieza de material a una temperatura definida.

Hay muchos métodos para determinar el tiempo de calentamiento del acero. La fórmula más simple y que da como resultado los valores cercanos más próximos a los reales es la propuesta por el académico N. N. Dobrokhotov.

El académico Dobrokhotov recomienda la siguiente fórmula para determinar la duración del calentamiento de lingotes fríos o piezas de material hasta 1200°C.

$$Z = KD\sqrt{D} \text{ horas}$$

- ❖  $Z =$  tiempo de calentamiento, en horas.
- ❖  $D =$  diámetro o longitud de los lados opuestos del cuadrado de los lingotes o material, en metros
- ❖  $K =$  factor, igual a 10 para acero al carbono con un contenido hasta 0,4% de carbono, y 20, para acero de aleación.

Cuando se determina la duración del calentamiento por la fórmula de N. Dobrokhotov, debemos recordar que esta fórmula es efectiva solo para el caso en que un lingote o pieza de material sea calentado por sus cuatro lados. Realmente, la posición de los lingotes o material en el hogar del horno varia; por esa razón, los resultados obtenidos de la formula antes mencionada deben ser multiplicados por un factor que depende de la posición del material del horno. Estos factores se dan en **Figura 1.1**. El tiempo requerido para calentar una pieza de material colocada en el hogar de un horno, es aceptado como 1. Para otras posiciones, por ejemplo, cuando se carga material redondo en el hogar de un horno sin espacios entre ellos, el tiempo de calentamiento requerido será el doble. Para asegurar la mejor utilización del hogar del horno y para reducir el consumo del combustible cuando se calienta material redondo, este último debe ser cargado sobre calzos entre ellos y el hogar y con espacios entre ellos igual a la mitad del diámetro del diámetro del material. El material cuadrado y

rectangular debe ser colocado sobre calzos; en este caso, el material será tocado en todos los lados por los gases del horno; las distancias entre las piezas del material deben ser iguales a la longitud del lado del cuadrado.

Ejemplo: Determinar el tiempo de calentamiento para una pieza de material de acero de aleación de 1m de diámetro. El material se carga en el hogar con espacios iguales a la mitad de su diámetro.

Solución:

De acuerdo con la fórmula:  $Z = KD\sqrt{D} = 20 * 1\sqrt{1} = 20h$ . Esto solo es efectivo cuando la pieza de material es colocada en el horno y es redondeada por todos los lados por los gases del horno. En nuestro caso, sin embargo, tres piezas redondas de material son cargadas simultáneamente dentro del horno, la distancia entre cada pieza de material es igual a la mitad de su diámetro (ver, **Figura 1.1**). El factor de corrección en este caso depende del método de cargar el material en el hogar del horno y será de 1,4. Por tanto, el tiempo real de calentamiento será:

$$Z = 20 * 1,4 = 28\text{horas}$$



a No.	b Colocación de tochos en el horno	c Calentam. en horas	d Colocación de tochos en el horno	e Calentam. en horas
1		1		1
2		1		1.4
3		2		4
4		1.4		2.2
5		1.3		2.0
6				1.8

**Fig.2.6 – La influencia de la posición del material en el horno para la duración del calentamiento**

Hasta aquí, ninguno de los métodos teóricos para determinar la duración del calentamiento da resultados que coincidan con los datos prácticos. Usualmente, el tiempo de calentamiento es antes que todo determinado por fórmula y se encuentra más exactamente en la práctica. En la realidad, las fabricas hacen uso de diferentes tablas de calentamiento del acero fijadas sobre la base de las condiciones que prevalecen y el estado de su equipo.

## **CAPITULO 3. EL COMBUSTIBLE Y SU COMPOSICIÓN**

### **3.1. Introducción**

Información general:

En ingeniería reciben el nombre de combustible aquellos materiales que durante el proceso de combustión son capaces de generar energía térmica, que puede ser empleada para propósitos industriales. A mayor cantidad de calor generado por el combustible mejor se le considera. Evidentemente, para evaluar un combustible debemos conocer la cantidad de calor que el mismo puede generar durante la combustión, es por ello que se requiere conocer la unidad de medida de ese calor.

Se ha aceptado una unidad especial para medir la cantidad de calor generado por cualquier combustible, mientras tiene lugar el proceso de la combustión y a esa medida se le denomina caloría, de la cual hay dos clases: la caloría grande y la caloría pequeña.

La caloría grande (abreviada: Kcal) es la correspondiente a la cantidad de calor que se necesita para elevar a un grado centígrado a la temperatura de un kilogramo de agua.

La caloría pequeña (cal) equivale a la cantidad de calor que se requiere para elevar a un grado centígrado la temperatura de un gramo de agua. De ello se deduce que la (Kcal) es 1,000 veces mayor que la pequeña (cal).

En cálculos técnicos se emplea la gran caloría y, por tanto, cuando se menciona la palabra caloría, se entiende siempre, que se refiere a la caloría grande (Kcal).

### **3.2. Tipos de combustible y sus características**

Todos los tipos de combustibles existentes se clasifican en: sólidos, líquidos y gaseosos. Ciertos combustibles, a su vez, se subdividen en dos grupos, uno de los cuales comprenden los combustibles en su estado natural y se les conoce con el nombre de combustibles naturales y el segundo grupo comprende los que

resultan del procesamiento de los combustibles naturales y se les conoce como combustibles artificiales.

Los combustibles sólidos comprenden:

1. Los combustibles naturales, o sea, madera, hulla, antracita y turba.
2. Los combustibles artificiales: carbón vegetal, coque y combustible pulverizado, obtenido de la trituración de la hulla.

Los combustibles líquidos comprenden:

1. Combustibles naturales como el aceite crudo.
2. Combustibles artificiales como petróleo, keroseno, alquitrán.

Los combustibles gaseosos comprenden:

1. Combustibles naturales, como el gas natural.
2. Combustibles artificiales como el gas pobre, obtenido de la gasificación de varios tipos de combustibles sólidos (turba, madera, hulla, etc.); gas de horno de coquización; gas de altos hornos, gas de alumbrado y otros.

Todos los combustibles están integrados por los mismos elementos. La diferencia entre los distintos tipos de combustibles reside en las diferentes proporciones en que los diversos combustibles contienen estos elementos. Los elementos susceptibles de ser combustibles se dividen en dos grupos: el primer grupo comprende los elementos que son combustibles de por sí o que favorecen la combustión. A este grupo pertenecen el carbono, el hidrogeno y el oxígeno. El segundo grupo que incluye los elementos que no arden ni favorecen la combustión, comprenden el nitrógeno y el agua (como líquidos o vapor no descompuestos). El azufre comprende un grupo por sí mismo. El azufre es un combustible que al arder genera calor, su presencia, sin embargo, es indeseable en los combustibles, ya que cuando arde forma dióxido de azufre, que es absorbido por el metal que se va a calentar y es perjudicial para las propiedades mecánicas del mismo.

Ya hemos dicho que la cantidad de calor generado por un combustible durante su combustión se mide en calorías. Cada combustible al arder genera una determinada cantidad de calor. La cantidad de calor (en calorías) generada durante la combustión completa de un kilogramo de combustible sólido o líquido, o de un metro cubico de combustible gaseoso, recibe el nombre de valor calorífico. Ejemplo: el valor calorífico del mazut es de cerca de 10,000cal/kg, etc. A más alto valor calorífico mejor es el combustible, ya que se requiere menor cantidad del mismo para generar la misma cantidad de calor. Con la finalidad de poder comparar el valor calorífico de los combustibles, se ha adoptado una unidad de medida, que es la de un combustible que posee un valor calórico de 7,000cal/kg y se le denomina combustible convencional.

Los combustibles naturales siguientes son los más comúnmente empleados en la fragua y hornos de forja: lignito, hulla y combustibles gaseosos. La madera y la turba, por su bajo calor calorífico no se emplean en la práctica para el calentamiento de los metales.

**Lignito.** Geológicamente los lignitos son las formas más jóvenes del carbón de piedra y contienen entre el 9% y el 45% de cenizas. El valor calorífico de los lignitos varía de 2,500 a 5,000cal/kg y al ser extraídos de las minas contienen una gran proporción de humedad (hasta un 60%). Sometidos a la acción del aire, los lignitos pierden parte de la humedad, hasta un 30%. Sin embargo, sometidos a esa misma acción los lignitos se descomponen rápidamente y se desmoronan. Si se almacenan durante un tiempo considerablemente largo, son propensos a la combustión espontánea. En la Rusia solo se emplean sin mezclar los lignitos Karaganga y otros tipos para hornos de forjas, conjuntamente con otros combustibles semigaseosos, ya que son inadecuados para el calentamiento del acero a las temperaturas requeridas.

**Hulla.** La hulla o carbón de piedra es uno de los principales combustibles para los hornos de forja y en el resultado de la conversión gradual de las sustancias vegetales durante periodos de tiempo considerablemente largos, en el curso de los cuales los depósitos de hulla así formados son cubiertos por gruesas capas

de tierra. La descomposición de las materias vegetales y su conversión en hulla, tiene lugar a considerable presión y con total ausencia de aire.

El proceso de la formación de la hulla es extraordinariamente lento y requiere muchos miles de años. El tipo de hulla y su valor calorífico dependen de la duración de su formación. La mejor hulla para los hornos de forja es la que tiene un alto contenido de materiales volátiles que producen llama grande y gases de hulla. El empleo de la hulla de llama grande asegura un calentamiento más uniforme de los metales en el horno.

**Combustibles gaseosos.** El único gas natural es el gas ardiente, que sale del suelo por agujeros naturales o por pozos. El valor calorífico del gas (natural) es de cerca de 8 000 a 8 500 cal por metro cubico y en algunos casos llega a tener hasta 15 000 cal por metro cubico.

En la actualidad, el gas natural se emplea en gran escala en la industria y para uso doméstico, particularmente en las regiones donde se le encuentra.

**Coque.** Se obtiene por destilación de la hulla en hornos especiales de coquización con ausencia, de aire. Durante este proceso las sustancias volátiles se extraen de la hulla, en forma de gas que posee un alto valor calorífico y que se conoce con el nombre de gas de horno de coquización y es muy buen combustible.

El coque contiene cerca del 87% de carbono, un 4% de materias volátiles, un 8% de cenizas y de 1 a 2% de azufre. En la práctica de la forja, el coque se emplea preferentemente en hornos de forjar.

**Carbón vegetal.** Se obtiene de la madera quemándola en hornos especiales y constituye el mejor combustible para los hornos de forjar. El carbón vegetal contiene muy poca ceniza y prácticamente ningún azufre. Debido a su alto costo, raramente se emplea en la forja.

Contiene un 84% de carbono, un 14% de materias volátiles y un 2% de cenizas. Su valor calorífico es de 7 000 a 8 000cal/kg.

Estos dos tipos de combustible (coque, carbón vegetal) son los utilizados en la práctica de forjado que estamos evaluando.

**Combustible líquido.** El único combustible líquido natural de alguna importancia industrial es el petróleo crudo, aunque el mismo no se emplea en los hornos de forja. Se emplea el mazut que es un subproducto del petróleo. La composición del mazut, que se obtiene como un residuo después de la destilación del keroseno y de la gasolina a partir del petróleo crudo, no es constante y frecuentemente contiene de 84 a 86% de carbono, 12,4% de hidrogeno, 1,3% de oxígeno + nitrógeno + azufre combinados, 0.3% de cenizas y de 1 a 2% de humedad. Su valor calorífico es de 9 500 a 10 000cal/kg.

**Combustible gaseoso.** Los combustibles gaseosos artificiales se obtienen de la gasificación de los combustibles sólidos o como un subproducto de otros procesos, por ejemplo, el gas de horno de coquización durante la coquización de la hulla y de los altos hornos cuando están trabajando. El coque se produce en hornos especiales de coquización, en plantas de elaboración de hierro y acero; y el gas de los hornos de coquización que tiene un valor calorífico de entre 4 000 a 5 000cal/kg se obtiene como subproducto.

Para su mejor y más adecuado empleo, los combustibles sólidos se convierten en gases, en equipos especiales llamados productores de gas. Ejemplo: el gas pobre de turba se obtiene de la turba y el gas de los hornos de coquización se obtiene de la hulla, etcétera.

El valor calorífico de un gas pobre depende del tipo de combustible del cual procede y de los métodos de gasificación. Por ejemplo: el valor calorífico del gas pobre de la turba es de 1 500 a 1 600cal/kg, mientras que el de la hulla es de 1 200 a 1 400cal/kg.

**Combustible pulverizado.** Cuando se emplea la hulla pulverizada para los hornos de calentamiento, se la pulveriza en molinos especiales, en partículas de 0,07 a 0,05 mm. Cuando la hulla pulverizada se emplea como combustible, se pueden obtener muy altas temperaturas para el acero.

### 3.3. Selección del combustible para los hornos de Forjar

Los combustibles para este propósito deben cumplir los requisitos siguientes:

1. Asegurar la temperatura requerida dentro del horno que varía de 1 200 a 1 350°C.
2. Satisfacer las demandas necesarias que aseguran un diseño compacto en los hornos, alta eficiencia y la más completa combustión posible.
3. Garantizar alta eficiencia de los hornos.
4. Asegurar fácil regulación del régimen térmico con la ayuda de instrumentos automáticos de regulación.
5. Asegurar condiciones higiénicas y de limpieza adecuadas en el funcionamiento de los hornos.

El factor decisivo en la elección de un combustible para los hornos de calentamiento es el costo de calentamiento y la posibilidad de tener reservas locales del combustible.

No todos los tipos de combustibles llenan las especificaciones para emplearlos en los hornos de forja. El efecto térmico de la electricidad (energía eléctrica) es el mejor combustible para los talleres de forja; pero su uso es extraordinariamente limitado porque es, en su caso, el combustible más caro. Además las plantas industriales frecuentemente no disponen de suficiente energía eléctrica para el calentamiento del acero. Es por esto que la energía eléctrica tiene aún un empleo muy limitado en los talleres de forja, donde los aceros se calientan exclusivamente por electricidad.

El mazut es un excelente combustible para los hornos de forja; pero debido al hecho de que es una materia prima de muy alto valor para la elaboración de muchos productos, su empleo se ha disminuido lo más posible. Por ejemplo, el

mazut se usa en la destilación del petróleo, aceite para husillos, maquinarias, cilindros, aceites para parafina, aceite para autos y otros importantes productos industriales. Además, el transporte de los combustibles líquidos a grandes distancias, de su centro de producción aumenta su costo y dificulta los problemas de transportes. Por estas razones, el empleo de combustibles líquidos para propósitos de forja es recomendable solo en casos excepcionales o cuando los centros de producción están próximos a los depósitos. En los distritos ubicados a grandes distancias de los depósitos de petróleo y otros combustibles líquidos, los hornos que trabajan con combustibles líquidos deben adaptarse para trabajar con combustibles gaseosos o para utilizar combustibles sólidos producidos en su localidad.

Los combustibles gaseosos llenan todos los requerimientos de los combustibles para hornos de forjar. El gas pobre obtenido de la hulla o de la turba; se recomienda para los hornos de forja. Para asegurar la temperatura necesaria para el calentamiento del acero y las condiciones adecuadas para simplificar la construcción de los hornos los combustibles líquidos deben tener un valor calorífico de por lo menos 1 400 a 1 500cal/kg.

La hulla y la antracita son los principales combustibles sólidos empleados en los hornos de forjar. Las principales desventajas de los combustibles sólidos son:

- 1. Resulta muy difícil lograr una temperatura constante y uniforme en la cámara de trabajo de un horno, cuando quema combustibles sólidos.*
- 2. Debe introducirse una considerable cantidad de aire dentro del horno, para lograr la completa combustión de los combustibles sólidos.*
- 3. Se requieren cámaras de combustión especiales para quemar combustibles sólidos, lo que complica la construcción de los hornos e impone el empleo de obreros extra para el mantenimiento del horno (fogoneros, extractores de cenizas, etc.).*
- 4. El mover los combustibles sólidos y la acumulación de considerables cantidades de cenizas en los talleres, hace necesario el empleo de obreros extra auxiliares y además humedece y ensucia los depósitos.*



*5. El régimen térmico del horno no se puede controlar automáticamente cuando se emplea combustibles sólidos.*

Sin embargo, a pesar de todas las desventajas anteriormente mencionadas, se consumen considerables cantidades de combustibles sólidos para el calentamiento de los hornos de forja. Los principales combustibles sólidos empleados en el horno de forja son el carbón vegetal, el coque y la hulla y en muy raros casos se usa gas.

Los combustibles para los hornos de forjar deben contener la menor cantidad posible de azufre, ya que cuando se calienta el acero absorbe azufre y ya se ha dicho que este es perjudicial al acero. El mejor combustible para el horno de forjar es el carbón vegetal, que debe ser compacto y que al romperse debe mostrar una factura brillante; cuando se golpea un trozo de carbón vegetal de buena calidad, su sonido debe ser claro como el de una campana. El carbón vegetal no contiene azufre ni ceniza, prácticamente; por esa razón, es ampliamente empleado para calentar aceros de alta calidad y se le recomienda particularmente para la soldadura. Su única desventaja es su alto costo.

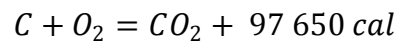
Las concreciones de la hulla o también llamadas nueces se consideran el mejor tipo de hulla para los hornos de forja. Mide entre 15 a 20 mm de diámetro. La hulla de buena calidad debe ser negra con brillo alquitranado; al entrar en combustión se concreciona creándose una corteza exterior dura, lo que facilita el desarrollo de una alta temperatura en el horno. La principal desventaja de la hulla como combustible para el horno de forja es su alto contenido de cenizas y azufre. El coque es mucho mejor que la hulla en este aspecto, pero su desventaja, sin embargo, es su alto costo.

### **3.4. Proceso de la combustión**

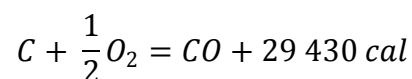
La combustión es la rápida combinación química del oxígeno con los elementos combustibles (carbono, hidrogeno y azufre), acompañada de desprendimiento de calor y de luz. El oxígeno se introduce dentro de la cámara de combustión conjuntamente con el aire. El aire seco está constituido por dos elementos: 21%

de oxígeno y 79% de nitrógeno (en volumen). Solo el oxígeno del aire participa en el proceso de la combustión.

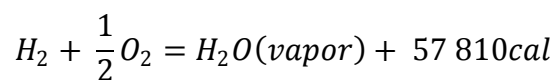
Antes de que cualquier combustible comience a arder debe ser calentado hasta su temperatura de inflamación, entonces tiene lugar la combustión, independientemente de cualquier otro calentamiento. La temperatura de inflamación depende del tipo de combustible empleado y de las condiciones bajo las cuales tenga lugar el proceso. La temperatura de inflamación del mazut varia de 500 a 700°C; la de la hulla es de 500°C, la de la antracita 700°C y la de la madera 300°C. El carbono que es el elemento principal de cualquier combustible arde y forma dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) o monóxido de carbono (CO). Cuando se suministra una cantidad suficiente de aire (y, por tanto, de oxígeno) dentro de la cámara de combustión, la reacción de combustión tendrá lugar completamente de acuerdo con la siguiente ecuación:



Un suministro insuficiente de aire producirá una combustión insuficiente del carbono, generando una cantidad de calor mucho menor. Como resultado de la combustión insuficiente del carbono se formara monóxido de carbono en lugar de dióxido de carbono (gas), de acuerdo con la siguiente ecuación:



El segundo elemento combustible de los combustibles es el hidrogeno (H<sub>2</sub>). La combustión del hidrogeno va acompañada también de desprendimiento de calor.



De las anteriores ecuaciones de la combustión del carbono, como el principal elemento de cualquier combustible, podemos ver, que durante la combustión incompleta de aire, se ganara solo una tercera parte de la cantidad de calor; en este caso se producirá el monóxido de carbono (CO) en lugar de dióxido de

carbono ( $\text{CO}_2$ ). De aquí que debe tratarse de crear condiciones que aseguren la completa combustión del combustible, o sea, suministrarle la suficiente cantidad de aire requerido para que al arder el carbono genere dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

Conociendo la composición química de cualquier combustible se podrá calcular siempre la cantidad de aire necesario, que se debe suministrar al hogar para la combustión de 1kg o de  $1\text{m}^3$  de combustible. De la cantidad calculada o teórica de aire requerido a tal propósito, obtenemos una cifra conocida con el nombre de coeficiente de aire excedente, lo que significa que ese coeficiente equivale a la relación entre el aire requerido para la combustión de una unidad de combustible (1kg o  $1\text{m}^3$ ) y la cantidad calculada (teórica) de aire requerido a tales fines.

Ejemplo: se calcula que se requiere  $10,4\text{m}^3$  de aire para la combustión de 1kg de mazut. Determínese la cantidad que en la práctica se requiere para la combustión de 1kg de mazut, si el coeficiente de aire excedente es de 1,15, o sea, 15%.

Solución: la cantidad de aire excedente requerido para la combustión de 1kg de mazut en adición a la cantidad teórica de aire será  $10,4 * 0,15 = 1,56\text{m}^3$ . La cantidad practica de aire será  $10,4 + 1,56 = 11,96\text{m}^3$  por kg de mazut.

Los coeficientes siguientes de aire excedente han sido determinados por la combustión de varios combustibles en los hornos de calentamiento: Para el carbono 1,3 a 1,5 (30 a 50%); para los combustibles gaseosos que arden en quemadores de llama 1,15 a 1,2 (15 a 20%); para combustibles gaseosos que arden en quemadores sin llama: 1,1 a 1,15 (10 a 15%); para el mazut 1,2 a 1,25 (20 a 25%) y para los combustibles pulverizados 1,2 a 1,25 (20 a 25%).

Se debe tratar de obtener una combustión completa del combustible con un coeficiente máximo de aire excedente. El exceso de aire suministrado al hogar no se utiliza para quemar el combustible, sino que se calienta hasta la temperatura de inflamación del combustible y conjuntamente con los gases del

combustible absorbe una cantidad extra de calor, lo que aumenta el consumo de combustible y el grado de oxidación del acero en el horno.

La cuestión se plantea así: ¿Cómo puede entonces un trabajador saber cuándo está calentado el horno correctamente, si él está suministrando suficiente cantidad de aire al horno o si el deberá aumentar esa cantidad?

Generalmente, los obreros tienen que determinar que la combustión es completa por el calor de la llama. Un exceso de aire producirá una llama corta y aguda con pequeñas lenguas. El acero no debe calentarse nunca con ese tipo de llama porque en ese caso el calentamiento nunca es uniforme, además, cuando semejante llama hace contacto con la superficie del acero, se pueden producir quemaduras locales y aun la fusión local del metal. Para evitar esos problemas debe reducirse la cantidad de aire hasta obtenerse una llama más larga y que las llamas de todas las cámaras de combustión tengan un color blanco lechoso sin lenguas brillantes.

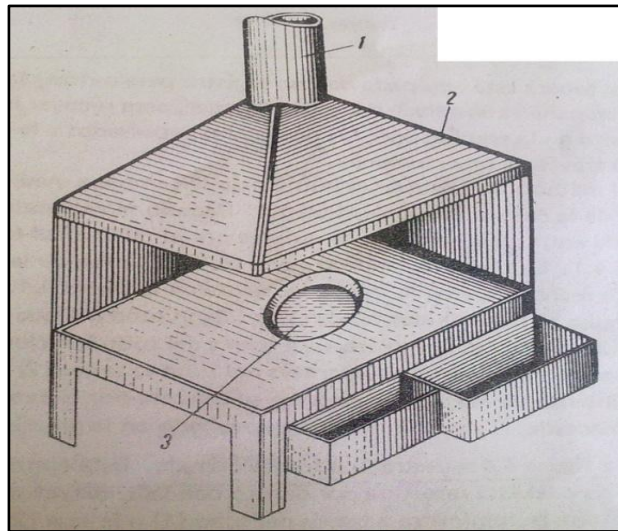
El suministro insuficiente de aire producirá una llama larga y roja vetada de negro. Una insuficiencia de aire producirá a la salida del horno nubes densas de humo negro. Además de estos signos externos que caracterizan al proceso de combustión se emplean instrumentos especiales para analizar la composición de los gases de combustión. Por la composición de estos se puede determinar si la combustión se está efectuando correctamente o no.

## CAPITULO 4. DISPOSITIVOS DE CALENTAMIENTO

### 4.1. Introducción

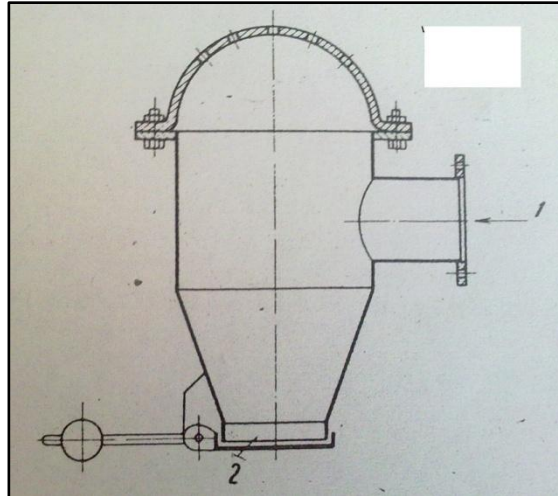
#### Fraguas del Forjador

Los hornos de herreros o fraguas, como también se les llama, se emplean para calentar metales que son forjados a mano. Estas fraguas se clasifican como de hogar abierto o cerrado. Las fraguas de herrero están hechas con uno o dos hogares y son llamadas, respectivamente, fraguas simples o dobles (**Fig. 4.1**).



**Fig. 4.1** Fragua de un solo hogar: 1) Chimenea; 2) Campana; 3) Alcribís (hogar para quemar el combustible)

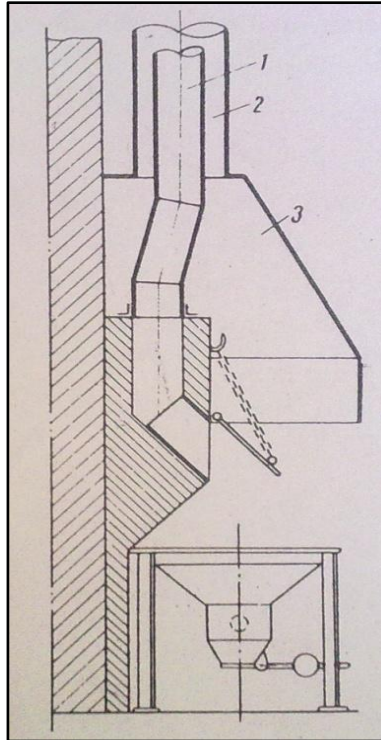
El aire necesario para quemar el combustible se hace llegar al hogar mediante un tubo, por debajo o por un costado. La presión de aire (corriente de aire a presión) en el hogar, debe ser de 150 a 200mm de la columna de agua y es producida por un fuelle o ventilador. El extremo del tubo de aire termina en el hogar, en lo que se llama alcribís (**Fig. 4.2**).



**Fig. 4.2 Alcubis de Fragua: 1) Entrada de aire; 2) Salida de escoria**

La tobera está equipada con un registro para extraer las cenizas y las escorias. Una campana va instalada encima del hogar, para recoger los humos y los gases productos de la combustión, las cuales son expulsados a la atmosfera desde la campana a través de una chimenea.

El método de expulsar el humo bajo la campana mediante el tiro natural, a través de la chimenea, no es eficiente. Cuando se enciende la fragua, el humo, en lugar de entrar a la campana se esparce por el taller. Tal fragua se muestra en la **Figura 4.1**. **La Figura 4.3** muestra una fragua abierta, de la cual el humo se expulsa de otra manera que en la fragua mostrada en la **Figura 4.1**. En esta fragua el humo se expulsa a través de dos tubos (1) y (2) que es insertado dentro del tubo (2). Parte del humo escapa a través del tubo interior (1) y el remanente entra en la campana (3), y escapa a través del tubo exterior (2). En esta disposición, el tubo interior de humo, o chimenea, se calienta por el exterior y la corriente de aire es aumentada. Tales chimeneas han probado en la práctica su eficiencia.

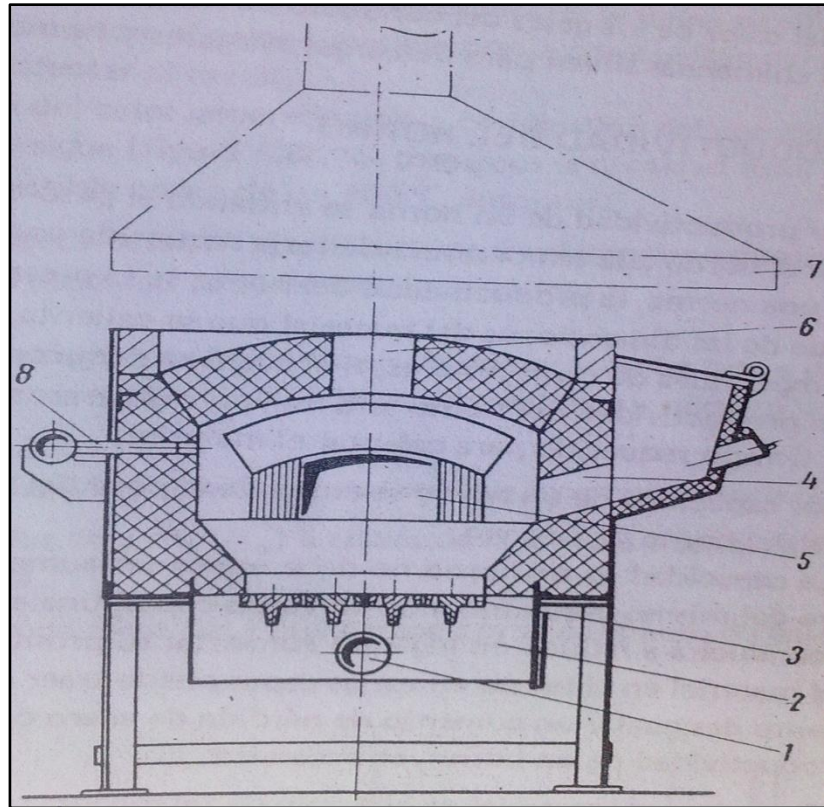


**Fig. 4.3 Fragua abierta: 1 y 2) Tubos para salida de humo y productos de la combustión; 3) Campana**

La **Figura 4.4** muestra una fragua cerrada. Esta consiste en una armazón de acero, la cual está revestida por dentro con ladrillos refractarios.

El aire suministrado a través del tubo (1) a la caja (2) de donde pasa a través de la parrilla (3) al hogar.

El carbón se carga a través de la boca (4), y el acero para ser calentado a través de la puerta (5). Los productos de la combustión son extraídos de la fragua a través del conductor (6) bajo la campana (7). Una corriente secundaria de aire se suministra a la parte superior de la fragua para asegurar la combustión completa de los volátiles, a través del tubo (8).



**Fig. 4.4 Fragua cerrada: 1) Entrada de aire; 2) Caja; 3) Parrilla; 4) Puerta de carga de carbón; 5) Puerta de carga y descarga del acero; 6) Conducto de humo; 7) Campana**

Las fraguas cerradas se emplean en la producción en masa para calentar piezas pequeñas.

Las desventajas más importantes de las fraguas que utilizan carbón ordinario son:

1. El acero se pone en contacto directo con el combustible, el cual siempre contiene azufre. A altas temperaturas, el azufre es absorbido por el acero y así se reducen sus propiedades mecánicas. Por esto las fraguas necesitan quemar carbón especial que tengan un contenido mínimo de azufre. El acero debe ser colocado en estas fraguas solo después que el carbón ha comenzado a quemarse apropiadamente y el azufre ha sido quemado.



2. *Hay el peligro que el acero al ser calentado se ponga en contacto directo con la corriente de aire, produciendo por tanto, una considerable pérdida del metal en forma de escoria.*
3. *En estas fraguas el calor del acero no es uniforme; el carbón no se quema completamente y parte de ese se pierde junto con las cenizas. Además, los productos de la combustión, calentados a altas temperaturas, escapan a la atmósfera, arrastrando una cantidad considerable de calor.*

Estas desventajas ocasionan un consumo mucho mayor de combustible para calentar acero en fraguas, comparado con el que se consume en hornos – el consumo de combustible es de 40 a 50% del peso del acero -, con una pérdida de 8% del peso del acero como escoria.

Las ventajas de las fraguas consisten en su simplicidad y en que su manufactura es barata. Además, cualquier sección de una pieza larga de trabajo puede ser calentada en una fragua ordinaria como por ejemplo, para trabajo de doblado, esto no siempre es posible en hornos de forjar.

#### **4.2. Normas fundamentales para trabajar la Fragua**

Cuando se calienta una pieza de acero en la fragua, el herrero debe observar siempre la llama del combustible. El metal se calentará mejor en una llama brillante, ligeramente humeante; esta llama excluye toda posibilidad de sobrecalentamiento del metal.

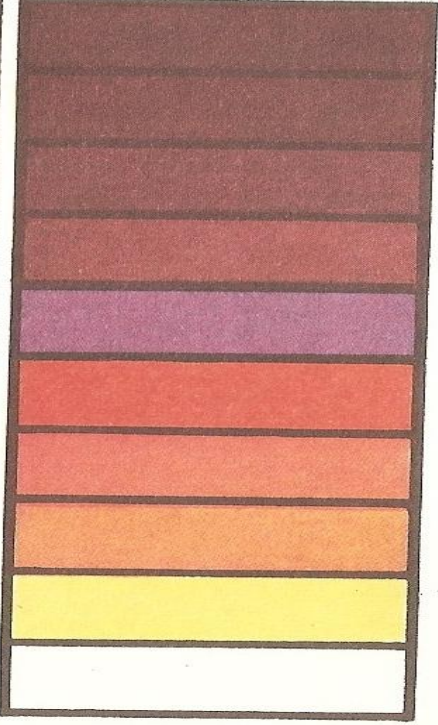
Si la llama es cegadoramente brillante, lo cual sucede si hay exceso de aire, una capa gruesa de escoria se formará en la superficie del acero, que estará en peligro de quemarse, el acero se calentará lentamente, una cantidad considerable de carbón será consumido y la temperatura será insuficiente. Una pieza de material pobremente calentada será difícil de forjar y será fácil que se agriete.

Por tanto, se deduce que cuando se calienta una pieza de acero en la fragua es necesario mantener una llama brillante, ligeramente humeante. Además, el herrero debe saber cómo colocar el material en la fragua de manera que se caliente rápido y uniformemente.

El material que se calienta debe estar protegido contra el enfriamiento por el aire (la corriente de aire) y por esta razón el espesor de la capa de combustible debajo del trabajo debe ser por lo menos de 100 mm. El trabajo debe estar cubierto con una capa de carbón. Para obtener una mejor llama en un lugar determinado, el carbón debe estar humedecido con agua y ligeramente prensado. En el punto donde se desea tener la llama, el carbón debe ser aflojado con el espetón. Para asegurar el calentamiento uniforme del trabajo por todos lados debe voltearse en redondo de vez en cuando. Para mantener la llama constante en la forja durante la jornada completa, debe añadirse carbón fresco, no directamente dentro de la zona de combustión, sino alrededor del hogar y llevado al centro mientras se quema.

La temperatura del acero para forjar a mano es generalmente determinada por el calor. La tabla 4 da los colores para el acero, según su temperatura.

<b>Comienzo de la luminiscencia</b>	<b>530 – 580° C</b>	<b>Amarillo claro</b>	<b>220° C</b>
<b>Rojo oscuro</b>	<b>580 – 650° C</b>	<b>Amarillo pajizo</b>	<b>230° C</b>
<b>Cereza oscuro</b>	<b>650 – 720° C</b>	<b>Amarillo oro</b>	<b>240° C</b>
<b>Cereza</b>	<b>720 – 780° C</b>	<b>Marrón</b>	<b>255° C</b>
<b>Cereza claro</b>	<b>780 – 830° C</b>	<b>Marrón rojo</b>	<b>265° C</b>
<b>Rojo</b>	<b>830 – 900° C</b>	<b>Violeta azul</b>	<b>285° C</b>
<b>Rojo claro</b>	<b>900 – 1050° C</b>	<b>Azul oscuro</b>	<b>295 – 310° C</b>
<b>Amarillo</b>	<b>1050 – 1150° C</b>	<b>Azul claro</b>	<b>315 – 325° C</b>
<b>Amarillo claro</b>	<b>1150 – 1250° C</b>	<b>Gris</b>	<b>350° C</b>
<b>Blanco</b>	<b>1250 – 1350° C</b>		
	<b>Y más</b>		

<i>Comienzo de la luminiscencia</i>	<i>580-580°C</i>	
<i>Rajo obscuro</i>	<i>580-650°C</i>	
<i>Cereza obscuro</i>	<i>650-720°C</i>	
<i>Cereza</i>	<i>720-780°C</i>	
<i>Cereza claro</i>	<i>780-830°C</i>	
<i>Rajo</i>	<i>830-900°C</i>	
<i>Rajo claro</i>	<i>900-1050°C</i>	
<i>Amarillo</i>	<i>1050-1150°C</i>	
<i>Amarillo claro</i>	<i>1150-1250°C</i>	
<i>Blanco</i>	<i>1250-1350°C y más</i>	

**Colores de incandescencia**

**Tabla 4.2. Tabla de colores de incandescencia**

## CAPÍTULO 5. OPERACIONES PRINCIPALES DE LA FORJA MANUAL

### 5.1. Información general sobre las herramientas del Forjador

El forjador realiza diversos tipos de trabajos de forja, para lo cual necesita diversas herramientas e instrumentos. Dentro de las herramientas que fundamentalmente emplea, tenemos:

**El Yunque.** Es un bloque pesado de hierro o acero, sobre el cual se forja el metal. Los yunques tienen que ser muy pesados para poder resistir los golpes del martillo sin que se produzca ningún movimiento visible. Estos se hacen generalmente de acero y pesan desde 80 a 300kg, comúnmente 150kg. La parte superior del yunque a la cual se le llama cara debe estar endurecida y siempre lisa.

El forjador juzga un yunque generalmente por el sonido que este produce cuando se golpea con un martillo. Si se golpea un buen yunque con un martillo, este rebotará y el yunque dará un sonido agudo y claro. Un yunque defectuoso, esto es, rajado, producirá un sonido apagado. Es siempre más fácil trabajar sobre un yunque que produzca un sonido claro y agudo.

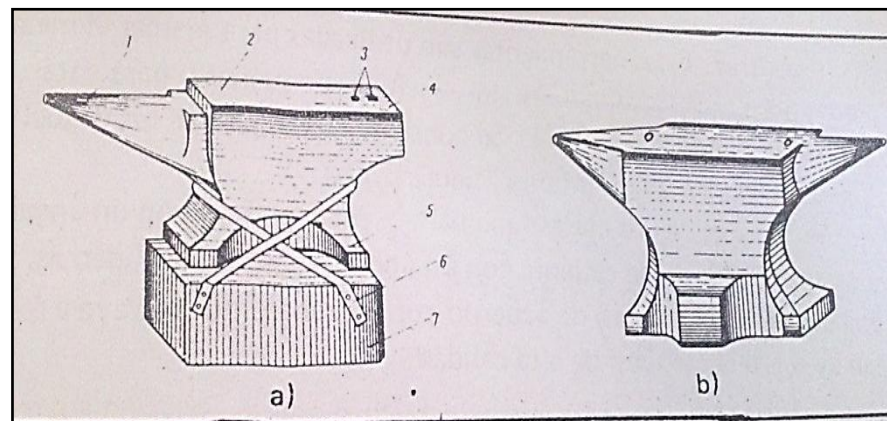
Usualmente, el yunque se monta sobre un bloque pesado de madera y se le asegura con clavos o gramos. Los yunques deben estar instalados a una altura definida, de forma que el forjador pueda tocar la cara con la punta de los dedos, cuando él está parado justamente al lado del yunque.

La **Figura 5.1a** muestra un yunque. Desde un lado se proyecta la punta o cono (1), la cual sirve para doblar las piezas en forma circular tomando diferentes radios y diámetros. Seguido al cuerno se encuentra la cara del yunque (2), la cual es utilizada para darle la forma y dimensiones requeridas a la pieza. El extremo opuesto al cono de yunque termina en un saliente rectangular (4), llamado cola y sirve para doblar la pieza en ángulo recto. El yunque tiene cuatro patas (5) en su base. Estas patas sirven para asegurar el yunque a su

cimentación (7) con los estobos o clavos grandes (6). Todos los tipos de operaciones de forjado se realizan sobre la cara del yunque.

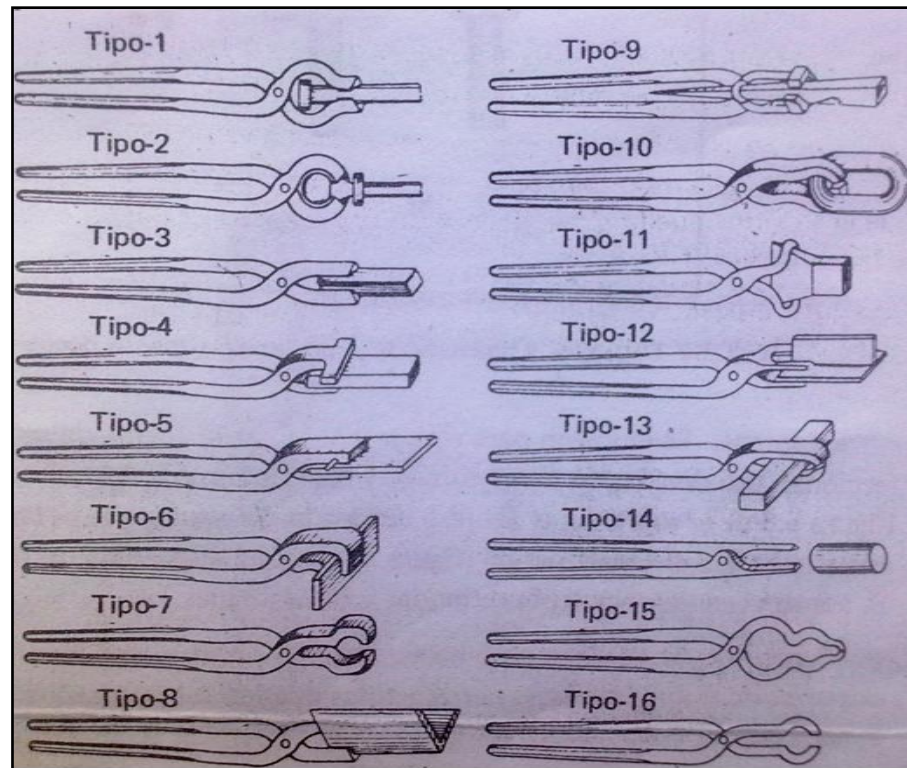
La cola del yunque tiene dos agujeros (3), uno redondo y otro cuadrado (ojos). El agujero redondo se usa cuando se punzona en el cuadrado, cuando se fijan los aditamentos de espiga durante las operaciones de forjado.

Se emplean dos tipos de yunque, el yunque de pico simple (**Figura 5.1 a**) y el yunque de pico doble (**Figura 5.1 b**). Los yunques de doble pico se usan con mayor frecuencia.



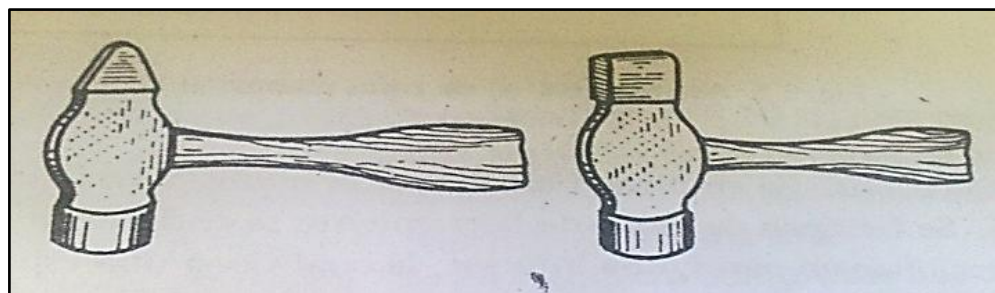
**Figura 5.1 Yunque: a) de un pico; b) de dos picos.**

**Tenazas.** Ellas se emplean para sujetar y voltear el material durante el forjado. Se fabrican de acero al carbón y contienen desde 0,3 a 0,4 por ciento de carbono. Las mismas consisten en dos barras de aceros aseguradas por un remache. Se dividen en dos secciones: una sección corta llamada quijada y una sección larga llamada mango. La longitud total de una tenaza varía desde 475 a 650mm, siendo la longitud de la quijada desde 75 a 140mm. Estas se construyen de distintas formas para adaptarse a las diferentes formas y dimensiones de la pieza que va a forjar. En la **Figura 5.2** se muestran los tipos más comúnmente usados.



**Figura 5.2 Tenazas del forjador**

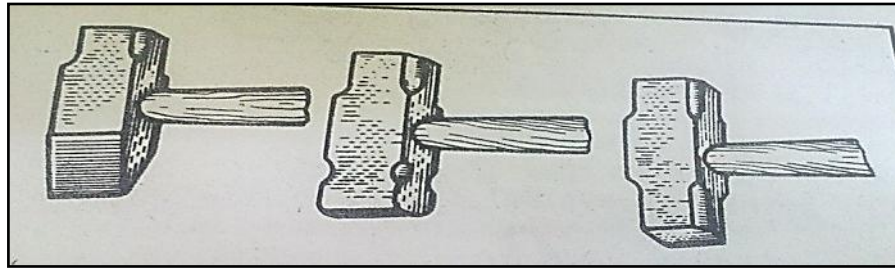
**Martillos.** Estos se emplean para hacer trabajos livianos. Se construyen desde 0,5 a 1,5kg. Además, son utilizados para mostrar (marcar) al ayudante donde debe golpear con la mandarina y lograr la deformación requerida. Los mangos (cabos) de estos martillos están hechos de madera seca, fuerte y resistente, como por ejemplo: abedul, arce, etc. Estos se fijan firmemente y se acuñan dentro del cuerpo del martillo. Usualmente la longitud del martillo es de 350 a 400mm (**Figura 5.3**). Generalmente se construyen de acero al carbono de alta calidad de herramienta.



**Figura 5.3 Martillos del forjador.**

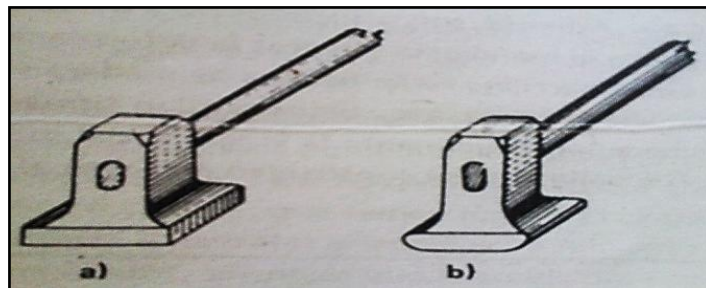
**Mandarria.** Es la herramienta principal del ayudante con la cual el golpea la pieza. La superficie de golpear debe estar ligeramente convexa, lisa y equilibrada. Se construyen con un peso que varía de 2 a 10kg (**Figura 5.4**).

Los mangos de las mandarrias se hacen desde 700-900mm de largo, su longitud para que corresponda al brazo del que la usa y su estatura.



**Fig. 5.4 Mandarrias del forjador.**

**Asentadores.** Se emplean para alisar y terminar superficies planas. Se hacen con caras planas (**Fig. 5.5a**) y bordes redondeados (**Fig. 5.5b**). Los mangos se fijan firmemente dentro del cuerpo del asentador y su longitud varia de 350-400mm de longitud.



**Fig. 5.5 Asentadores: a) de caras planas; b) bordes redondeados**

**Degüellos.** Se emplean para estirar el metal, terminar ranuras y superficies cóncavas. Se fabrican de acero de herramientas se endurecen y se pulen sus caras. Se confeccionan en pares, una inferior, la cual tiene una espiga para insertarla dentro del agujero cuadrado del yunque y la superior o de mano, la cual tiene un mango de madera (**Fig. 5.6**).

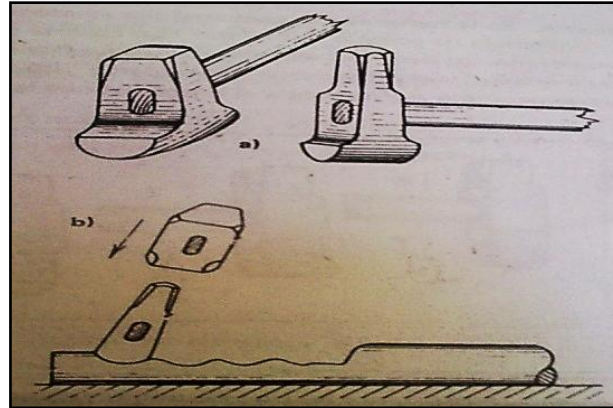


Figura. 5.6 Degüellos: a) de cara redonda; b) empleo de un degüello

**Tajaderas.** Estas herramientas son utilizadas para marcar el metal mediante cortes poco profundos, para cortar secciones pequeñas y para entallar el material antes estirado (**Fig.5.7**). Se construye, al igual que los degüellos, en pares superior (**Fig. 5.7a**) o inferior (**Fig. 5.7b**).

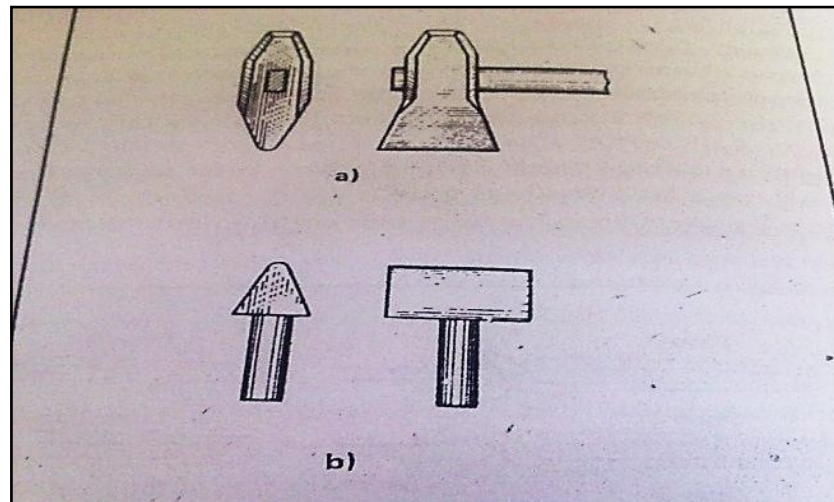


Fig. 5.7 Degüellos y tajaderas: a) degüello de mano; b) degüello de yunque

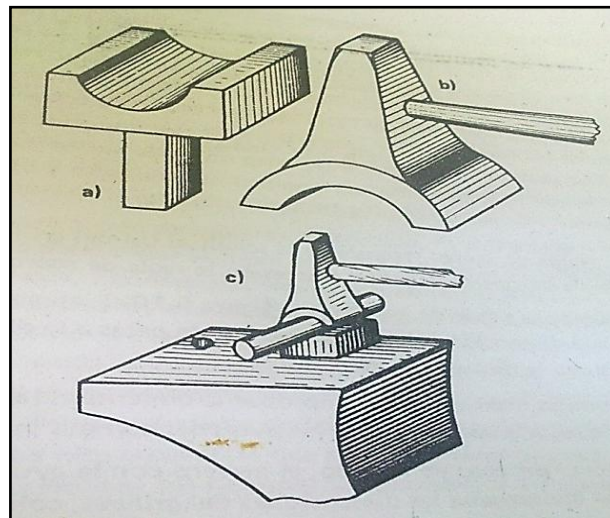
**Estampas.** Se emplean para estirar y cambiar la forma de un material. Se confeccionan usualmente en pares o juegos superior e inferior. La estampa inferior (**figura 5.8a**) se sujeta en el agujero cuadrado del yunque insertando su vástago en este (**figura 5.8c**) y la superficie (**fig. 5.8b**) está ajustada a un mango de madera. Se construyen generalmente redondas y hexagonales.



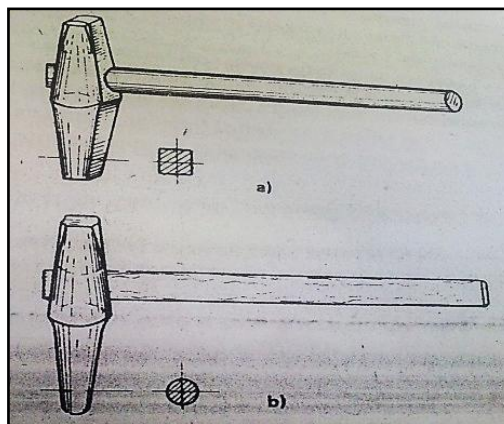
**Punzones.** Se utilizan para hacer agujeros en las piezas durante el forjado. Los extremos de trabajo de estas herramientas pueden ser cuadrados (**Fig. 5.9a**), redondos (**Fig. 5.9b**) y ovalados, son siempre de viaje o cónicos por dos razones:

1. Para facilitar la extracción del mismo.
2. Para hacer agujeros de distintos tamaños.

Estos se ajustan a mangos (cabos de madera).



**Fig. 5.8** Estampas y sufrideras: a) estampas de yunque (inferior); b) estampa de mano (superior); c) estirado de una pieza con ayuda de la estampa



**Fig. 5.9** Punzones: a) punta cuadrada; b) punta redonda

## 5.2. Instrumentos de medición

Los forjadores emplean instrumentos de medición simples para comprobar las piezas durante el proceso de elaboración. Dentro de los instrumentos fundamentalmente tenemos:

1. Compases de grueso.
2. Compás doble de grueso.
3. Compás triple de grueso.
4. Compás interior.
5. Plantillas.

Se emplean los compases de grueso (**Figura 5.10a**), para comprobar solo una dimensión de la pieza. El forjador ajusta las patas del compás a la distancia requerida y en el proceso de su trabajo comprueba repetidamente las dimensiones de la pieza con el compás de grueso ajustado de esa manera.

**Compás doble de grueso.** Se emplea para comprobar dos dimensiones de una pieza. El forjador ajusta un par de patas a la segunda medida; en el proceso de su trabajo, el comprueba las dimensiones de la pieza con los compases de grueso así ajustado (**Figura 5.10b**).

**Compás triple de grueso.** Se emplea para comprobar tres dimensiones de una pieza, y se ajustan y usan en la misma forma que los compases dobles de grueso (**Figura 5.10c**).

**Compás interior.** Se emplea para comprobar el tamaño de los agujeros y cajuelas en las piezas (**Figura 5.10d**).

**Plantillas.** Se emplean para comprobar la precisión de las piezas de formas complicadas (**Figura 5.10f**). Las plantillas se hacen cortando de un pedazo de plancha de acero, la forma y dimensiones de la pieza requerida; cuando se comprueban las piezas con una plantilla, esta última se coloca sobre la pieza que se desee comprobar. **La Figura 5.10** muestra dos plantillas: una (f) para comprobar el perfil de una palanca y otra (g) para comprobar el perfil de una

ménsula. Las plantillas pueden ser empleadas solo para comprobar las piezas para la cual se han fabricado.

A demás de los instrumentos anteriores mencionados, el forjador debe emplear también un metro plegable, una regla de acero (**Figura 5.10i**), una escuadra (**Figura 5.10h**), el pie de rey (**Figura 5.10j**), así como otras herramientas especiales (**Figura 5.10e**). Estos instrumentos los conocerás cuando describamos las distintas operaciones vinculadas a la forja manual.

Cuando se hacen las piezas, el forjador emplea usualmente instrumentos de medición simultáneamente. Por ejemplo, supongamos que tenemos que forjar un grillete (**Figura.5.11**), esto requeriría varias operaciones o pases, como se les llama a estas.

Antes de ejecutar las operaciones finales, el herrero ajustara el instrumento de medición para comprobar las dimensiones del grillete, según las dimensiones indicadas en el dibujo. En este caso, usara los siguientes instrumentos.

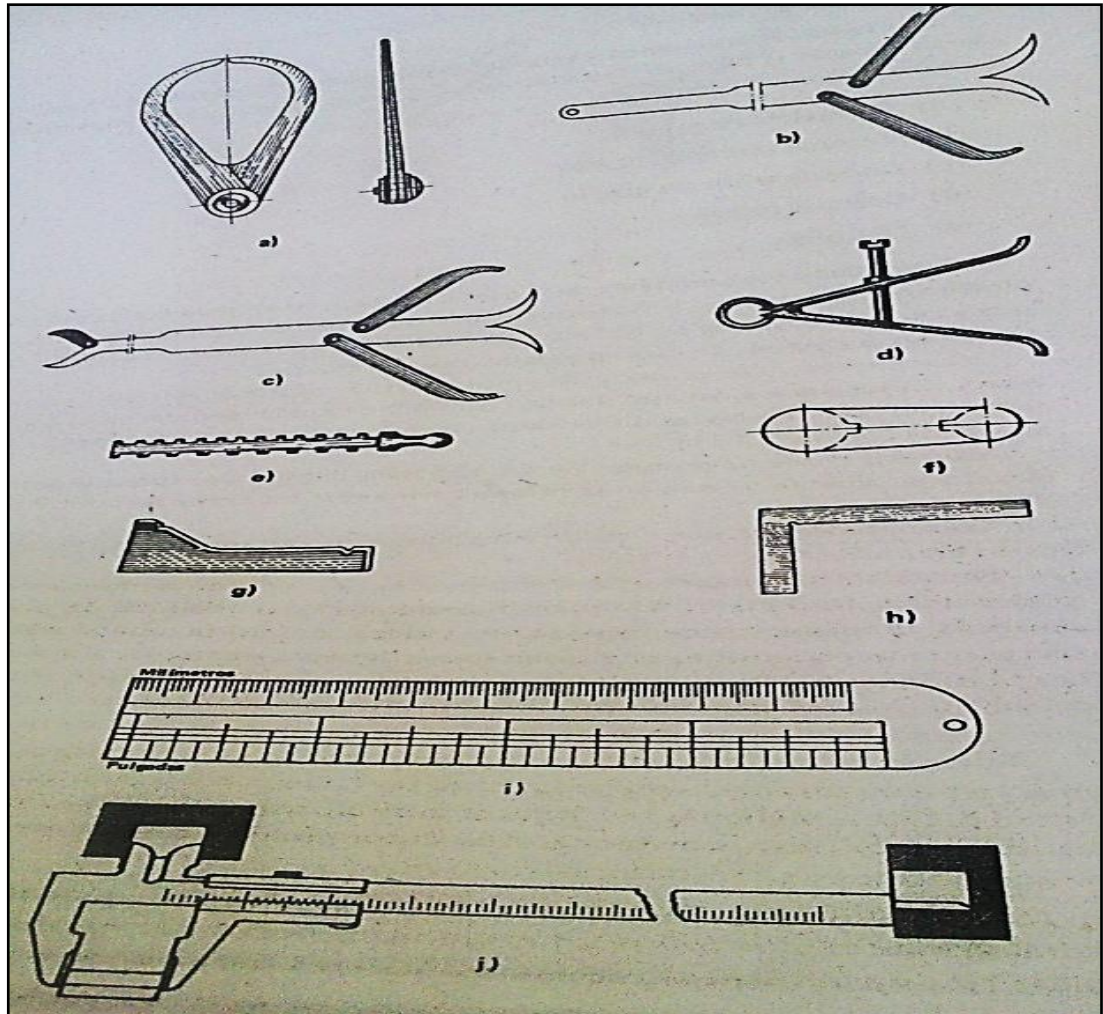


Figura 5.10 Instrumentos de medición: a) compás para diámetro exterior; b) compás de doble grueso; c) compás de triple grueso; d) compás interior; e) galga; f) plantillas; g) plantilla; h) escuadra; i) escala graduada o regla; j) pie de rey con Vernier

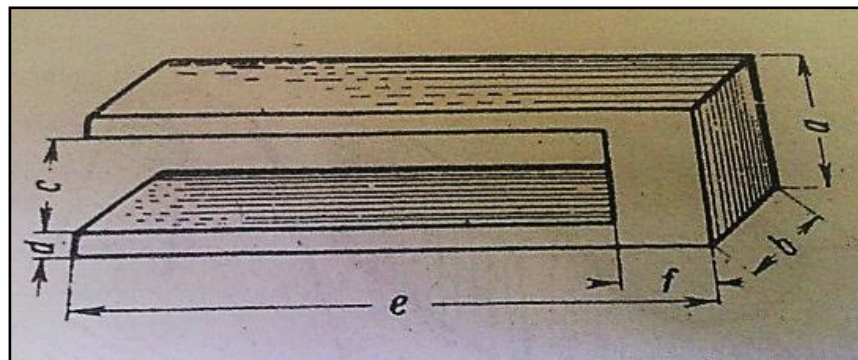


Figura 5.11 Grillete

1. *Regla de acero. Transfiere la longitud (b) del grillete a la regla de acero con la ayuda de su metro plegable, marcando la regla de acero con un pedazo de tiza.*
2. *Compás triple de grueso (ver figura 5.10c), ajusta un par de las patas del compás a la dimensión (a), el segundo par de patas a la dimensión (b) y el tercer par de patas a la dimensión (c).*
3. *Compás interior para comprobar la dimensión (c) (ver figura 5.10d), con la ayuda de la regla graduada ajusta las patas del compás interior a la dimensión (c).*

Durante el proceso de forjado, el herrero con la ayuda de estos instrumentos de medición comprueba las dimensiones del grillete, colocando el instrumento correspondiente contra la pieza.

El cuidado apropiado de las herramientas e instrumentos prolonga su duración, reduce el costo de su reparación y aumenta la productividad de la labor del forjador. Las normas principales para el mantenimiento de las herramientas e instrumentos del herrero son: almacenamiento cuidadoso, manteniéndolas limpias de polvo y suciedad, comprobándolas a intervalos regulares y reparándolas a tiempo. Las herramientas deben ser enfriadas en agua tan frecuentemente como sea posible durante el proceso de trabajo.

La cabeza de las herramientas del herrero, esto es, la parte de la herramienta que se golpea con la mandarina, por ejemplo, la cabeza de un repartidor, punzón y herramientas similares, nunca deben ser endurecidas, los golpes fuertes pueden hacer que las astillas salten y lastimen al forjador. Antes de comenzar el trabajo, vea siempre que los mangos estén asegurados apropiadamente a sus martillos y mandarrias.

### **5.3. Información general sobre la Forja Manual**

Cuando se forja una pieza a mano, el herrero toma con su tenaza (la cual él sujeta con su mano izquierda) el metal que ha sido calentado a la temperatura de forjar en una fragua o en un horno pequeño y lo coloca sobre el yunque.

Su ayudante o majador golpea la pieza con la mandarría en el lugar requerido, el cual es indicado por el forjador con el martillo que sujeta en su mano derecha.

Cuando necesita cualquier herramienta (repartidor, degüello, etc.), el forjador deja el martillo y toma la herramienta requerida en su mano derecha, mientras el ayudante golpea la cabeza de la herramienta con la mandarría.

Si la temperatura de la pieza llega a ser más baja que la temperatura de forjar especificada para la calidad del acero dado, el trabajo en esta debe ser detenido y la pieza recalentada a la temperatura de forjar requerida, antes de reanudar el trabajo.

Algunas veces, una pieza tiene que ser recalentada seis o aún más veces, antes de que adquiera su forma y dimensiones apropiadas.

A pesar del hecho de que el herrero, en el curso de su trabajo, tiene que hacer piezas de muchas formas y tamaños diferentes, ellos emplean las mismas operaciones, pero en un orden variado. En general, se emplean solo unas pocas operaciones durante el forjado y estas pueden llamarse las operaciones principales del forjado a mano. Estas incluyen:

1. Estirado y ensanchado
2. Cortes
3. Recalcado
4. Doblado
5. Perforado y punzonado de agujeros
6. Soldaduras

Todo herrero debe tratar siempre de hacer las piezas de alta calidad con el menor número de pases, y consecuentemente, recalentar la pieza tan pocas veces como sea posible. Producir una pieza de alta calidad con un gasto mínimo de energía física y tiempo, depende de la habilidad del herrero. El trabajo de un herrero es muy complicado y demanda una alta habilidad. Con el material aun

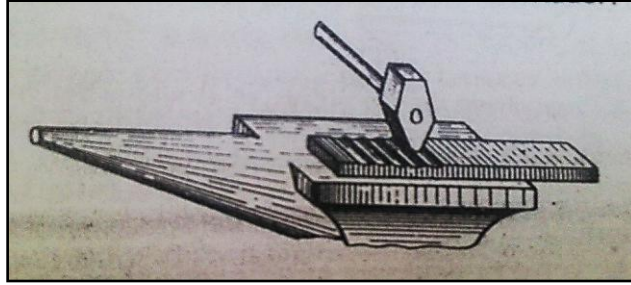
en la fragua, el herrero debe visualizar mentalmente las distintas operaciones que tiene que ejecutar en el acero caliente. Es un trabajador deficiente quien coloque el metal sobre el yunque y no tenga una idea clara de lo que pretende hacer primero.

### **5.3.1. Estirado y Ensanchado**

El estirado es una operación del forjado durante la cual la sección transversal de un pedazo de material se reduce y su longitud se aumenta. Durante la operación de estirado, la fibra del metal se alarga más o menos uniformemente a través de toda su sección transversal.

Prácticamente, la operación de estirado consiste en golpear con martillo un pedazo de material después que este ha sido sacado de la fragua y horno y colocado sobre el yunque directamente con martillo, mandarina o con la ayuda de herramientas para el estirado. El material adelgazará en el lugar donde este se golpea, pero al mismo tiempo se alargará y ensanchará. Entonces, se voltea 90 grados (colocado sobre su borde) y su porción estirada es martillada del mismo modo, reduciendo así su ancho y aumentando su longitud. Después de cada golpe, la pieza debe ser volteada 90 grados y movida constantemente atrás y adelante, de este modo un pedazo de metal puede ser estirado a cualquier longitud y sección transversal requerida. Si es necesario aumentar la longitud y ancho de una pieza, esta debe ser colocada sobre el yunque y forjada con un martillo o mandarina; si se va a alargar solamente, se debe golpear la pieza con un degüello y después alisarla con un martillo o mandarina

El procedimiento de estirado se efectuara con mayor rapidez cuando se trabaja con herramientas de caras estrechas (**Figura 5.12**). Después de estirada, la superficie de la pieza debe ser alisada con una herramienta llamada asentador.

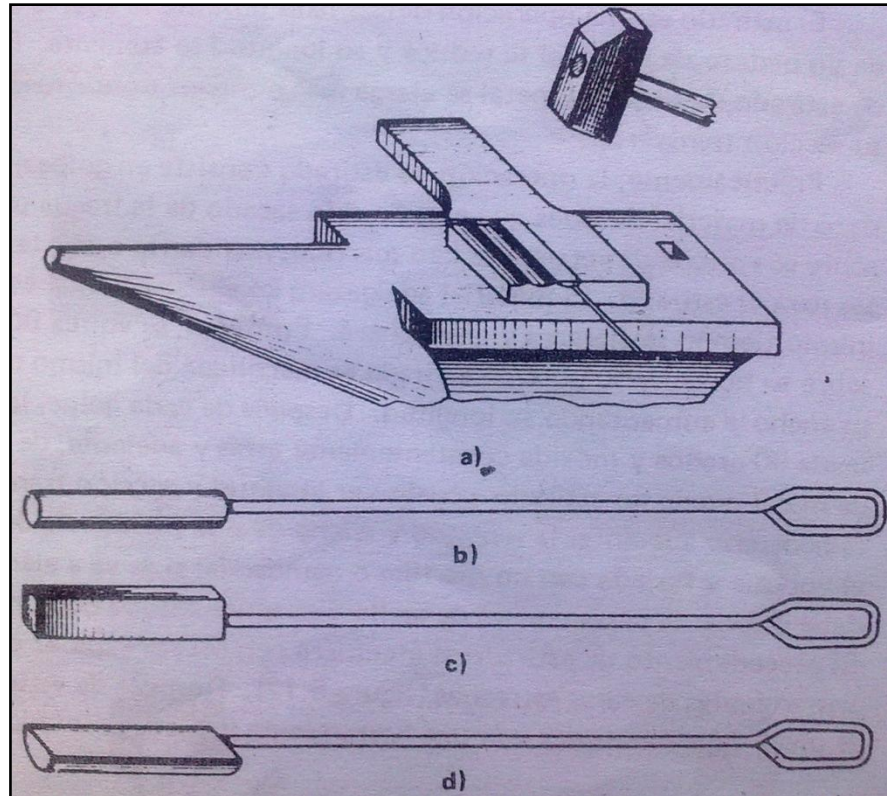


**Figura 5.12 Estirado de una barra**

La pieza debe ser estirada hasta obtener secciones cuadradas. Si una pieza redonda de material se va a forjar hasta obtener una barra redonda de un diámetro más pequeño, esta debe ser primero forjada a una barra cuadrada, estirada a una sección transversal acercándose al diámetro final deseado, entonces la barra cuadrada debe ser forjada a un hexágono y la barra hexagonal a una barra redonda. Sin embargo, si intentamos estirar el material redondo sin estas operaciones intermedias, la cara de la mandarina golpeará solo una pequeña sección del metal, el cual se alargará muy lentamente y aún más forjándose solo las capas metálicas de la superficie, pero no así las interiores, esta circunstancia puede producir el desarrollo de grietas en la pieza.

Ensanchado es una operación del forjado donde el ancho de una pieza se aumenta a una extensión mayor que su longitud. El ensanchamiento debe comenzar desde la mitad del material. Una herramienta llamada repartidor se coloca en el medio del material (**Figura 5.13a, b, c y d**) y se golpea con la mandarina, la fuerza del golpe sobre el repartidor se transfiere al metal sobre un área pequeña, después de lo cual el repartidor se cambia primero a la derecha y después a la izquierda, siendo golpeado cada vez con la mandarina.





**Figura 5.13** Ensanchado de una pieza: a) esquema del ensanchado; b) degüello de caras redondas; c) degüello de caras planas; d) degüello de media caña.

Así, moviendo el repartidor desde la mitad de la pieza a sus extremos, el metal será ensanchado gradualmente desde su centro a sus extremos. Después de ser ensanchada, la barra debe ser alisada con el asentador o con la superficie ancha de la mandarria.

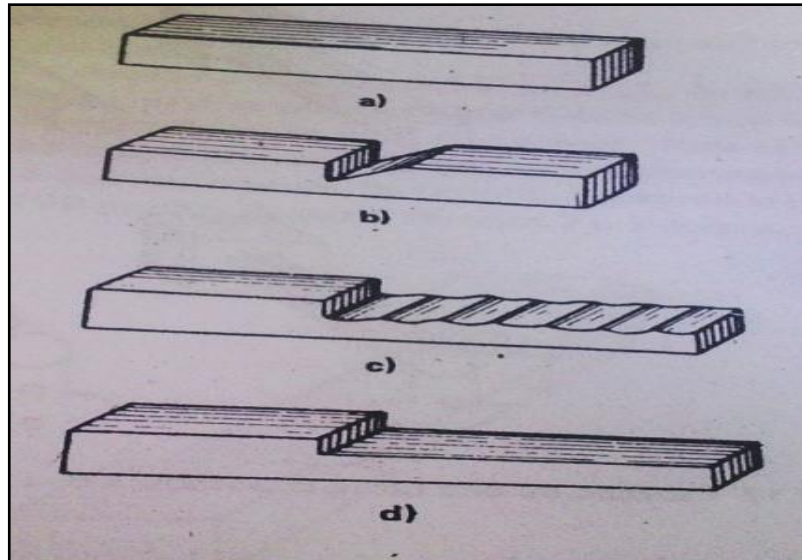
Vamos a estudiar algunos ejemplos de estirado, ensanchando y terminado superficial de una pieza.

Ejemplo 1: Es necesario estirar una barra cuadrada (**Figura 5.14a**) por un solo lado hasta obtener una barra con un hombro (**Figura 5.14d**), este trabajo se ejecutara mediante las siguientes operaciones y con las siguientes herramientas:

1. *Entallado del material.* Para marcar el lugar desde el cual el material tiene que ser estirado, debe ser degollado a profundidad igual a la del hombro, esto es, debe ser entallado. El material debe ser calentado

en una fragua o en un horno pequeño a la temperatura de forjar (1 500 a 1 200°C) y sacado con la ayuda de un par de tenazas de quijadas cuadradas, se desliza un anillo sobre el mango de las tenazas y se coloca el material sobre el yunque. La distancia desde la cual se va a estirar la barra cuadrada hasta convertirla en una barra plana se mide con un metro plegable de acero o regla, el forjador coloca la tajadera en ese punto y el ayudante introduce su borde dentro del metal a la profundidad requerida con golpes livianos de su mandarina, después del entalle al material lucirá como el mostrado (**Figura 5.14b**). Si durante la operación de entallado la temperatura del material baja a 800°C, este debe ser recalentado en la fragua.

2. *Estirado del material.* El material caliente se coloca entonces sobre el yunque que, el cual ha sido previamente limpiado con un trapo. El forjador coloca su degüello sobre la parte del material a estirar y el ayudante golpea el degüello con golpes pesados frecuentes. El forjador cambia gradualmente el degüello desde la entalladura al extremo de la parte a estirar.
1. Para asegurar un forjado sano, el material debe ser volteado de vez en cuando (después de cada dos o tres golpes) en su borde y golpeado con el martillo en esta posición con golpes ligeros. Cuando se golpea con un martillo sobre el borde de una pieza delgada, se debe tener cuidado de no doblarla. Si esta se dobla, deber ser enderezada inmediatamente.



**Fig. 5.14 Estirado de una barra de resalto sencillo**

Después que el material ha sido estirado, su conformación será como la mostrada en la **Figura 5.14c**, la superficie de la sección estirada estará dispereja. Esta debe ser alisada con la ayuda de un asentado (**vea Figura 5.5a**), después de lo cual esta lucirá como se muestra en la **Figura 5.14d**.

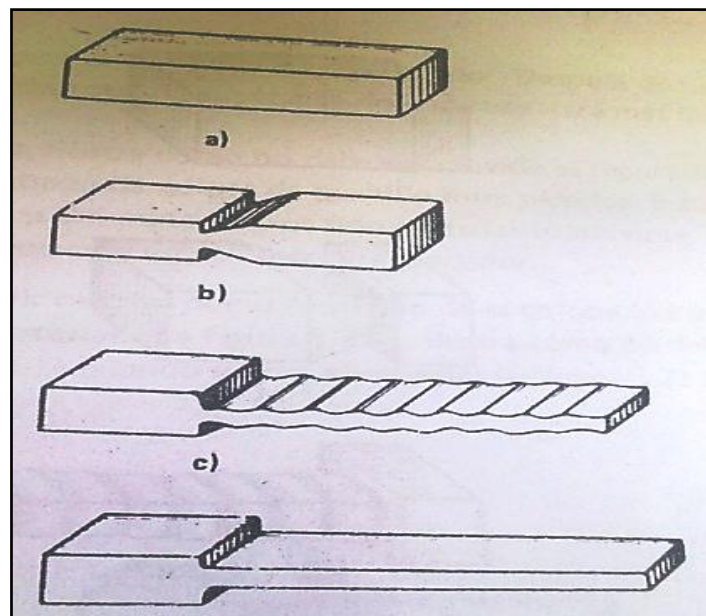
Ejemplo 2: Se necesita estirar una barra cuadrada (**Figura 5.15a**), hasta convertirla en una barra plana de una sección transversal más pequeña en su centro, como se muestra en la **Figura 5.15d**.

Esto se efectuara mediante las siguientes operaciones y con las siguientes herramientas:

2. *Entalle el material por ambos lados.* Coloque el material caliente sobre la tajadera de yunque insertada previamente en el agujero del yunque. El forjador debe colocar la tajadera sobre el material, el ayudante golpea ligeramente la tajadera con la mandarria, forzando así la tajadera de yunque, entallado el material a la profundidad deseada en la parte inferior y superior del mismo. Después del entallado, el material lucirá como el mostrado en la **Figura 5.15b**, se debe tener cuidado de colocar la tajadera sobre el material

verticalmente y ver que esta está exactamente en línea con la tajadera del yunque.

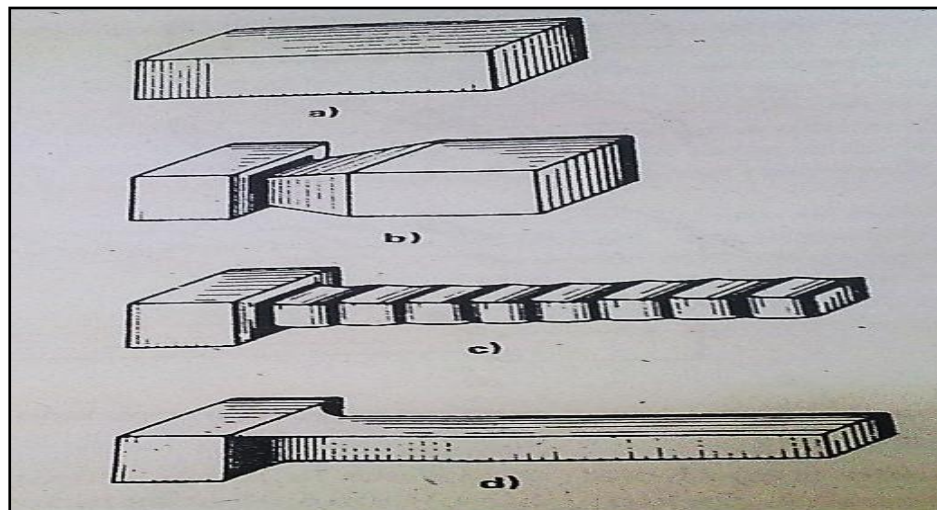
3. Después de entallado, se estirará el material con la ayuda de los degüellos, como se describió en el primer ejemplo. Al hacerlo, este debe ser estirado con el degüello por un lado, volteando entonces  $180^\circ$  y estirado el lado opuesto. Este debe ser volteado  $90$  grados después de cada dos o tres golpes, y su borde, martillado con golpes ligeros de mandarina. Después de estirado, lucirá como se muestra en la **Figura 5.15c**.
4. *Acabado de la superficie.* Como en el primer ejemplo, la sección estirada de la pieza, tendrá una superficie desigual. Para acabar la superficie, la pieza debe ser calentada, limpiada cuidadosamente de la capa de óxido y alisados todos sus lados con un asentador (**vea Figura 5.5a**) después de lo cual, quedara como se ilustra en la **Figura 5.15d**.



**Figura 5.15 Estirado de una barra cuadrada desde ambos lados a una barra plana con dos resaltes**

Ejemplo 3: Se necesita estirar el extremo de un material hasta cuadrarlo en dimensiones más pequeñas (**Figura 5.16d**). Para este propósito es necesario:

1. *Entallar (degollar) la pieza*, desde ambos lados, como en el caso previo justamente descrito; entallado el material por los dos lados opuesto, lo volteamos 90 grados y entallamos los otros dos lados a la profundidad necesaria al hombro; después de esto, el trabajo lucirá como se ilustra en la **Figura 5.16b**.
2. *Estirar material*. El material debe ser estirado con la ayuda de los degüellos. Después de cada golpe, voltea 90 grados. El material lucirá finalmente como se ilustra en la **Figura 5.16c**.
3. *Acabado superficial*. Caliente la pieza (**Figura 5.16c**), límpiela cuidadosamente de la capa de óxido y alísela con el asentador, voltee la pieza a 90 grados después de cada 2 o 3 golpes. Después del acabado superficial, la pieza lucirá como se ilustra en la **Figura 5.16d**.



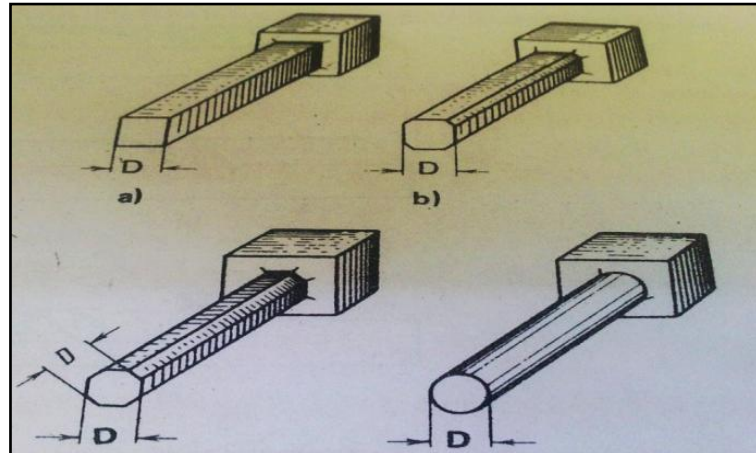
**Figura 5.16 Estirado de una barra cuadrada a otra barra cuadrada de sección transversal más pequeña**

Ejemplo 4: Conversión de una barra cuadrada a una barra redonda. Un material cuadrado no debe ser nunca forjado directamente a una barra redonda de diámetro considerablemente menor (esto es, haciendo una reducción considerable de la sección transversal), ya que esto trae consigo el peligro de rajadura. La barra debe ser estirada primero a una barra de sección transversal más pequeña, con los lados opuestos iguales o ligeramente más pequeños que el diámetro requerido en la barra redonda.

1. *Estirado del material a una barra cuadrada de dimensiones más pequeñas.* Las operaciones y herramientas serán las mismas que empleadas en el tercer ejemplo. Después del estirado, la pieza lucirá como se ilustra en la **Figura 5.17a**.
2. *Forjado de la barra cuadrada a una barra de sección transversal octogonal.* Después de calentar y limpiar la pieza de la capa de óxido, el forjado rebaja las esquinas colocando la pieza, con la ayuda de sus tenazas, sobre sus bordes en el yunque y haciendo que el ayudante aplaste los bordes con frecuentes golpes pesados de la mandarria. El material debe ser volteado 90 grados después de cada 2 o 3 golpes, de forma tal que sus bordes se reduzcan gradualmente en sus cuatro lados. Después de tales golpes de mandarria, cuando todos sus bordes han sido rebajados, la pieza lucirá como se ilustra en la **Figura 5.17c**.

Forjando con estampa (redondeando) la barra octogonal a una barra redonda. Antes de proceder a esta operación, el material debe ser calentado, limpiado de la capa de óxido y colocado sobre la sufridera (**vea Figura 5.8a**), insertada en el agujero cuadrado del yunque, el herrero coloca entonces la estampa (**vea Figura 5.8b**) sobre la pieza y el ayudante golpea la estampa ligeramente con su mandarria (**vea Figura 5.8c**). Durante esta operación, el forjador debe voltear la pieza alrededor de su eje y moverla gradualmente hacia adelante hasta que esté

completamente forjada a la sección transversal requerida. Después del forjado, la pieza lucirá como se ilustra en la **Figura 5.17d**.



**Figura 5.17 Estirado de una barra cuadrada a una barra de sección transversal redonda.**

Ejemplo 5: Ensachar una barra. Con este propósito, es necesario realizar las siguientes operaciones:

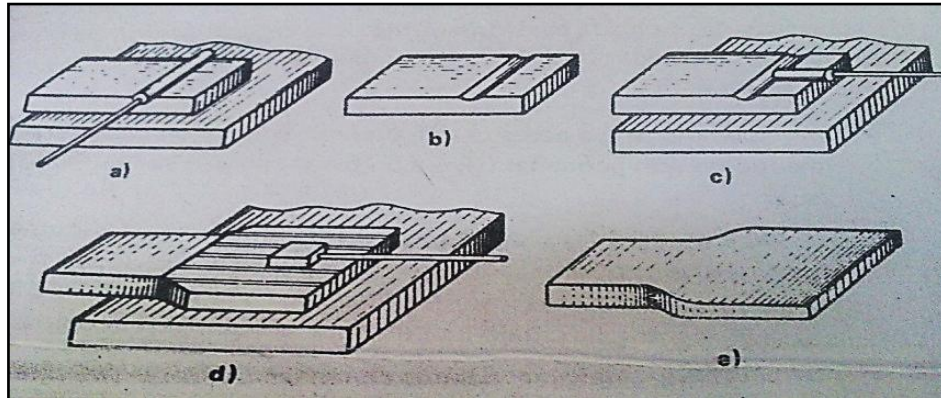
1. *Entalle del material.* Coloque el material caliente sobre el yunque y con un metro plegable o regla de acero, mida la distancia desde la cual el ancho de la barra va a ser ensachada, coloque entonces un repartidor redondo y delgado a través de la barra (**Figura 5.18a**). El ayudante debe entonces golpear el repartidor dentro del metal a la profundidad requerida, con su mandarría. La barra lucirá entonces como se ilustra en la **Figura 5.18b**.

1. *Ensachado de la barra.* Coloque el repartidor en el medio de la barra y golpéelo suavemente con una mandarría (**Figura 5.18c**).

Mueva uniformemente el repartidor a lo largo de la barra, alternando a la izquierda y a la derecha. Después de ensachada, la barra lucirá como se ilustra en la **Figura 5.18d**.

2. *Alisado de la superficie tosca del material.* Después que el trabajo (pieza) ha sido ensachado, su superficie estará áspera y dispareja. Para emparejar las irregularidades de la superficie, caliente la pieza, colóquela sobre el yunque y entonces alísela con el asentador

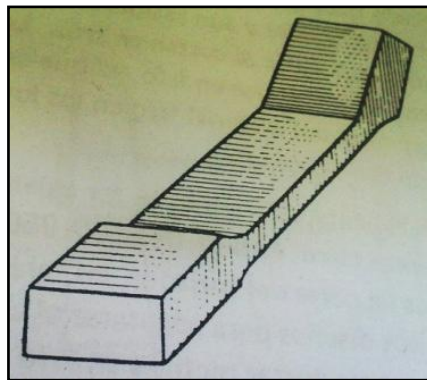
(**Figura 5.18d**). Después que esté alisada la pieza ensanchada se verá cómo se ilustra en la **Figura 5.18e**.



**Figura 5.18** Ensanchado de una barra.

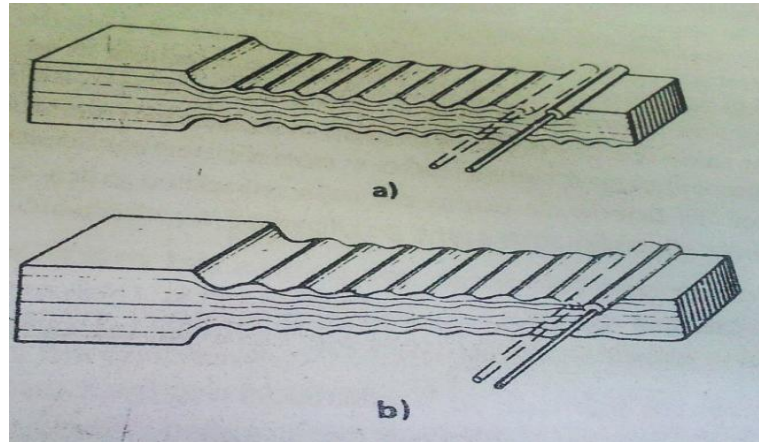
Defecto durante el estirado y ensanchado. Los siguientes defectos pueden ocurrir durante el estirado y ensanchado:

1. El material se pandea debido a que fue martillado solo de un lado sin ser volteado (**Figura 5.19**). Además, este se puede doblar debido a que no fue calentado uniformemente a través de toda su sección transversal. Para evitar que la pieza se dobla cuando se está estirando, debe ser calentada completamente a través de toda su sección transversal a la temperatura de forjado. Durante la operación de estirado debe ser volteada 180 grados después de cada 2 o 3 golpes.



**Figura 5.19** Una pieza doblada durante la forja



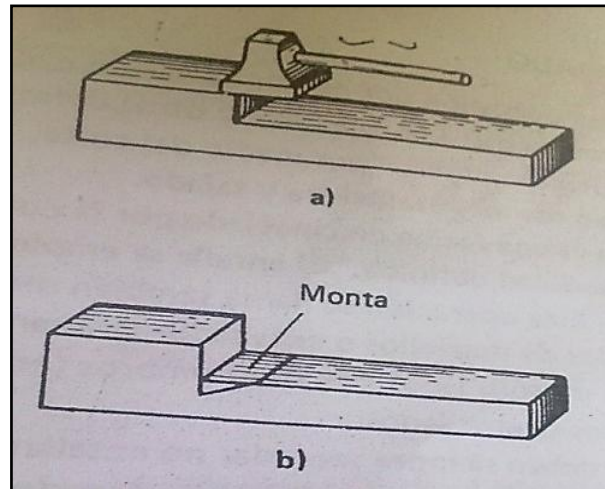


**Figura 5.20 La fibra del metal durante el estirado**

2. Si el trabajo se está estirando con la ayuda de degüellos y repartidores y se le hacen depresiones profundas, existe el peligro de cortar las fibras del acero, disminuyendo de esta forma las propiedades mecánicas. Para evitar ese defecto, el degüello repartidor debe ser movido a lo largo del trabajo de forma tal que cada golpe traslape el lugar donde se dio el golpe previo. Después de haber realizado un estirado o ensanchado total, la superficie de la pieza estará más lisa y sus fibras no estarán cortadas.

La **Figura 5.20a**, ilustra cómo no debe ser movido el repartidor a lo largo del material; como resultado de golpes de martillo muy pesados, los agujeros son muy profundos y las fibras del material han sido cortadas totalmente; la **Figura 5.20b**, muestra la manera correcta de cambiar un repartidor.

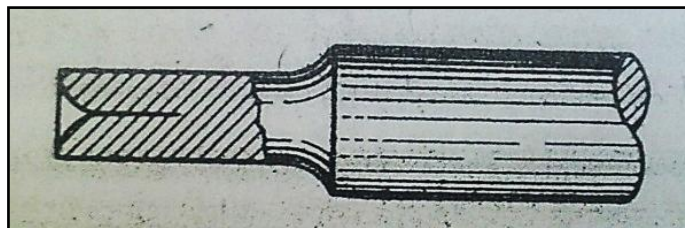
3. Pueden ocurrir montas como resultado de la colocación impropia de la herramienta sobre el material. La **Figura 5.21a**, ilustra cómo no debe ser colocado un asentador sobre la pieza cuando se está alineando; la **Figura 5.21b** muestra una pieza con una monta.



**Figura 5.21 Formación de una monta en una pieza.**

4. Si convertimos un material redondo o cuadrado en una barra redonda de un diámetro más pequeño sin los pasos intermedios como previamente se describió, el material no será forjado uniformemente a través de toda su sección transversal, solo sus capas superficiales serán estiradas y esto puede ocasionar rajaduras axiales.

La **Figura 5.22** ilustra rajaduras y pliegues que resultan de forjar (estirar) impropriamente una barra redonda a una barra redonda de diámetro más pequeño; los golpes de martillo fueron muy livianos en este caso.



**Figura 5.22 Formación de grietas y pliegues durante la forja.**

El forjado del metal a baja temperatura (temperatura inferior a la requerida) ocasiona lo que se conoce como metal trabajando en frío, esto es, el aumento de la dureza o fragilidad de la superficie del metal. El martillado continuado

sobre el metal frío puede producir rajaduras superficiales y aun internas; trabajar en frío es un descuido el cual puede ser evitado, pero en la mayor parte de los casos, las rajaduras no pueden ser remediadas y tales piezas forjadas tienen que ser desechadas.

Las piezas se recosen, generalmente, para eliminar los efectos del trabajo en frío. Para evitar el trabajo en frío y las rajaduras, cuando se está estirando una pieza, particularmente en barras de secciones pequeñas, estas deben ser estiradas rápidamente con frecuentes golpes pesados y la pieza volteada a través de un Angulo de 50 grados después de cada 2 o 3 golpes. Nunca estire una pieza la cual se ha enfriado durante la forja, siempre recalíentelo a la temperatura de forjado requerida.

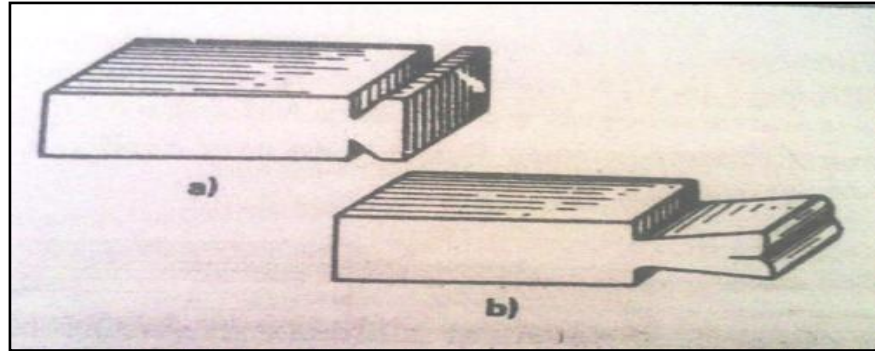
### **5.3.2. Corte o Tajado**

El tajado es una operación por medio de la cual una parte del metal se separa del material o de una pieza. Las rajaduras y otros defectos superficiales pueden ser separados de una pieza o material por medio del corte. Se emplean dos tipos de corte en el forjado a mano: entalladura y tajado.

La entalladura es una forma de cincelado por la cual la pieza se entalla o se ranura a una profundidad definida. El entalle se emplea para hacer cuellos u hombros en una pieza. Esta operación se llama también marcar o degollar. Previamente, describimos ejemplos de degüellos o entalladuras, cuando se estiran barras con un hombro (esto es de un solo lado) con dos hombros (esto es, desde los dos lados opuestos) y desde los cuatro lados.

Los forjados deben siempre recordar no entallar jamás una pieza demasiado cerca de su extremo, debido a que durante las operaciones subsecuentes de estirado, pueden aparecer rajaduras axiales y pliegues al extremo de la pieza, las cuales tendrán que ser desechadas.

La **Figura 5.23** ilustra un ejemplo de la formación de pliegues y rajaduras axiales en una pieza, debido a que esta fue entallada muy cerca del extremo del material.



**Fig.5.23 Formación de grietas y pliegues durante la forja**

El corte es una operación por medio de la cual una pieza larga de material se corta en varias longitudes especificadas o una pieza se separa (corta) del material. Los metales pueden ser cortados en frío o en caliente. Es peligroso cortar en frío, ya que las astillas del metal están expuestas a saltar en distintas direcciones y a distancias considerables, y herir a los trabajadores. Por esta razón, se deben tomar todas las precauciones de seguridad recomendadas cuando se corta en frío; y sobre todo, los lugares de trabajo deben estar protegidos con tela metálica y prohibir a los trabajadores que vaguen cerca del extremo del material que se corta.

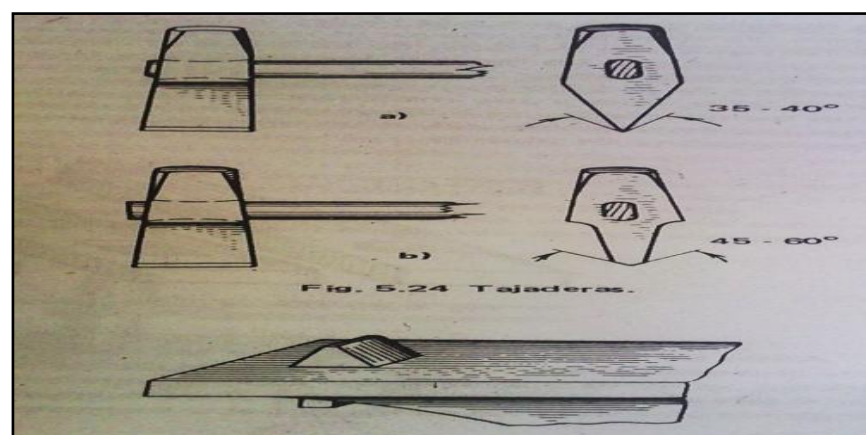
El corte de barras gruesas o anchas en frío es una operación larga. A demás, esto trae consigo el afilado frecuente de la tajadera. Durante el corte, pueden ocurrir en el metal esfuerzos considerables y aun rajaduras. Por esta razón, solo las barras delgadas y estrechas de acero dulce se cortan en frío. Los aceros de alta aleación y especiales no deben nunca cortarse en frío, ya que ocurren esfuerzos internos considerables en los extremos del material frío en los lugares en donde se corta, estos esfuerzos producen rajaduras.

Para el corte en caliente, el acero debe ser calentado en una fragua u horno a una temperatura rojo cereza claro, esto es, de 850 a 950°C.

Las herramientas de corte del forjador, las tajaderas, se usan para cortar acero. Se fabrican de distintos diseños para adaptarse al corte en frío y en caliente de los metales. Las tajaderas para cortar metales en frío deben ser afiladas a un Angulo de 35 a 40°, mientras que aquellas para cortar metales en caliente deben ser afiladas a un Angulo de 45 a 60°.

La **Figura 5.24a**, muestra un juego de tajaderas usadas para cortar en frío, mientras que la **Figura 5.24b**, muestra una tajadera para cortar en caliente. Estas herramientas se fabrican de acero de herramientas endurecido, después de cortar el borde de corte (labio) de la tajadera debe ser afilado al ángulo apropiado y endurecido. La cabeza de la tajadera se fija a un mango de madera o se asegura el mango a la cabeza con la ayuda de alambre de acero. Cuando se corta en caliente; el labio (borde de corte) de la tajadera debe ser enfriado frecuentemente en agua fría, ya que de otro modo, este se calentara demasiado y consecuentemente se ablandara y se inutilizara rápidamente. El borde de corte de una tajadera para cortar en frio debe ser engrasado con aceite de máquina para prolongar su duración.

Cada corte con tajaderas, los golpes del martillo o mandarina deben ser dirigidas hacia la cabeza de esta, la cual debe estar ligeramente redondeada. Frecuentemente se usa una tajadera de yunque para aliviar las operaciones de cortes.



**Figura 5.24 Tajaderas de yunque**

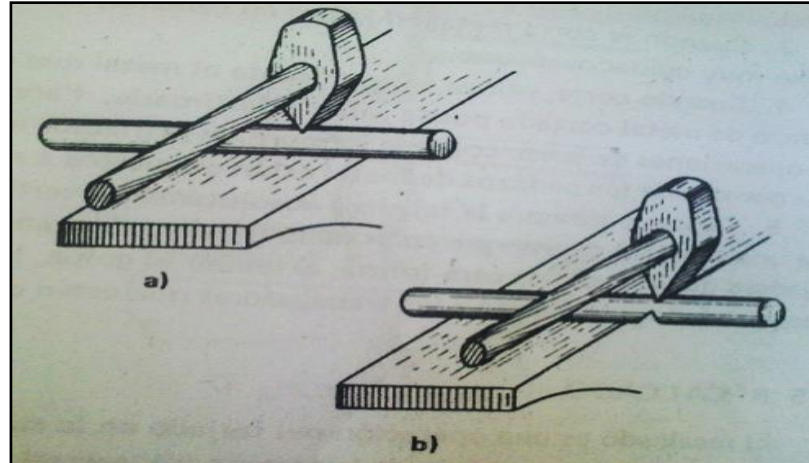
Las tajaderas de yunque se hacen con espigas cuadradas, para insertarlas en el agujero (ojo) del yunque. La boca de la tajadera de yunque se afila, como la tajadera de mano, a un ángulo correspondiente a la operación a realizar, corte de frío o en caliente. La tajadera de yunque se inserta primero en el agujero del yunque y el trabajo se coloca sobre su borde; entonces la tajadera para cortar en caliente (o en frío) según el tipo de operación, se coloca sobre el material y se golpea con la mandarria. La tajadera de yunque aligera considerablemente las operaciones de corte.

Las tajaderas de yunque están fabricadas de acero de herramientas endurecido; sus filos (bordes de corte) se revienen después de ser templados.

Ejemplos y métodos de corte. Antes de cortar un material en frío, el herrero marca el lugar donde se va a cortar el material con tiza. Entonces coloca el material sobre el yunque, sujetándolo en su sitio con la mano izquierda y coloca la tajadera para cortar en frío en el punto en donde se va a cortar el material (**Figura 5.25a**).

El ayudante golpea la tajadera con la mandarria para hacer un corte de cerca de la mitad del grueso o del diámetro del material. Se debe tener cuidado de sujetar el acero firmemente sobre el yunque y la tajadera perfectamente vertical sobre la pieza, ya que de otra manera, cuando reciba el golpe de la mandarria, la tajadera puede saltar y lastimar a las personas que están cerca.

Después que el punto donde el material se va a cortar ha sido entallada, el material debe ser volteado en un ángulo de 180 grados y la tajadera colocada exactamente opuesta a la entalladura; la longitud requerida del metal será entonces cortada, dándole a la tajadera algunos golpes con la mandarria. Antes de dar el último golpe el herrero debe colocar el material sobre el yunque de forma tal que la línea del corte que se ejecuta, este paralela con el borde del yunque, como se muestra en la **Figura 5.25b**.



**Fig. 5.25 Corte de barras en frío**

Si el acero es muy duro se necesitarán 4 cortes en lugar de dos, esto es, el material tendrá que ser volteado 90 grados después de cada golpe, en lugar de 180°. La cara del yunque debe estar protegida con una plancha de acero dulce para evitar que el filo de la tajadera se melle al golpear la superficie endurecida de la cara del yunque cuando se cortan hojas delgadas de acero.

Los aceros de aleación y especiales, así como planchas gruesas de acero (mayores de 20mm de grueso) y material de acero para ingeniería, se cortan en caliente. El material se calienta primero en el hogar de la fragua u horno a una temperatura de rojo cereza claro (850 a 900° C), el forjador lo agarra entonces con la tenaza y lo coloca sobre el yunque donde marca el lugar en el cual el material va a ser cortado, después de lo cual se coloca sobre la tajadera de yunque y la tajadera de mano en posición vertical sobre el material. El ayudante golpea la tajadera de mano varias veces hasta dejar un espesor pequeño entre las tajaderas de yunque y de mano. Durante la operación de corte, el forjador debe tener cuidado de mantener la tajadera de mano exactamente sobre la tajadera de yunque.

Después de esto, el trabajo debe ser colocado sobre el yunque con su corte sobre el borde del yunque, la tajadera de mano colocada dentro del corte y se termina el corte con un golpe liviano sobre la tajadera.

Normas de seguridad para el corte. En adición a las normas ordinarias de seguridad, se deben observar las siguientes reglas durante las operaciones de corte:

1. No permita jamás que la cabeza de la tajadera se expanda. Cuando se golpea una cabeza de esta forma está expuesta a rajarse y las esquirlas pueden saltar y lastimar a los trabajadores cercanos.
2. Cuando los forjadores y sus ayudantes están cortando metal con tajaderas deben estar siempre parados de forma tal de no ser alcanzados por las esquirlas de metal.
3. Cuando se corta metal en frío o en caliente, el último golpe debe ser siempre hecho muy cuidadosamente.
4. Cuando corte, nunca se pare frente al metal que se está cortando, ya que el pedazo de metal cortado puede saltar y lastimarlo. Para evitar accidentes durante las operaciones de corte coloque siempre un protector móvil cerca del lado del yunque por donde los pedazos de metal están expuestos a saltar.
5. Coloque siempre la tajadera absolutamente vertical sobre la pieza, cuando use una tajadera de yunque coloque la tajadera de mano exactamente opuesta a la tajadera de yunque, de otra forma, al recibir el golpe, la tajadera de mano saltara hacia un lado y lastimara a los trabajadores que estén cerca.

### **5.3.3. Recalcado**

El recalcado es una operación del forjado en la cual la longitud de una pieza metálica disminuye y el área de la sección transversal aumenta. Se aplican 3 tipos de recalcado en la práctica del forjado: completo, de cabeza y central. Algunas veces a los dos últimos tipos se les llaman cabeza. El recalcado total o completo se emplea cuando es necesario aumentar la sección transversal del material a todo su largo. Con este propósito, el material debe ser calentado previamente y colocado verticalmente sobre el yunque; su extremo superior es



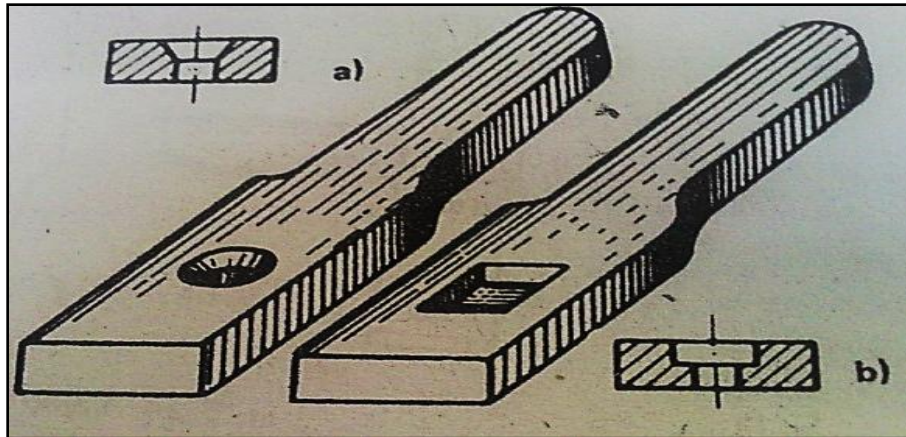
entonces golpeado con una mandarina con lo cual este se corta en longitud, pero aumenta su sección transversal.

El recalco de cabeza se emplea en casos donde se necesita aumentar la sección transversal de un extremo del material; pero en el recalco central solo se calienta la sección central del material, el material se coloca entonces sobre el yunque, se golpea su extremo superior (cabeza) con una mandarina, aumentando así, o recalco el área de la sección transversal del centro del material. Cuando se requiere recalco solo una pequeña sección de un material, el cual ha sido calentado en una longitud considerable, la longitud en exceso del material calentado que no va a ser recalco, debe ser enfriada en agua.

Cuando se recalca, el material se abomba y toma la forma de un barril. Por esta razón, la fibra de un material recalco será doblada. Si un acero muy duro se recalca demasiado, la fibra se puede rajar produciendo esto el desarrollo de una rajadura. Para asegurar una estructura perfectamente homogénea del metal a través de toda su sección transversal después de recalco, la fibra del material debe correr paralela a la dirección de los golpes del martillo.

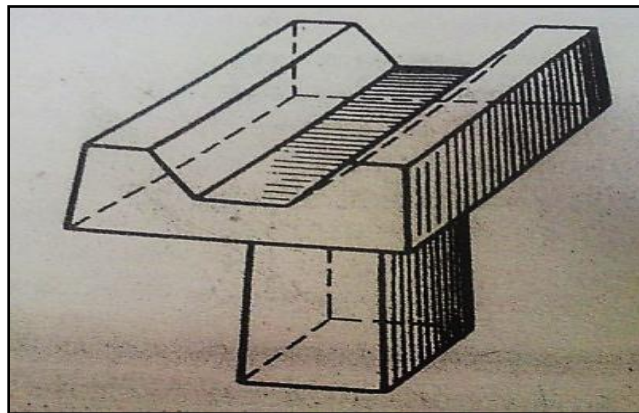
Los metales suaves son más fáciles de recalco que los metales duros y mientras más grueso sea el material, mayor es la energía que se necesita para recalcarlo.

Las herramientas del taller de forja que se emplean usualmente para el recalco son: el yunque, las tenazas, los martillos y las mandarinas. En adición se emplean varios implementos, según el material a recalco. La **Figura 5.26a**, ilustra una encabezadora de tornillo para recalco la cabeza de un tornillo de cabeza avellanada; la **Figura 5.26b**, ilustra una encabezadora de tornillo para recalco la cabeza cuadrada de un tornillo; la **Figura 5.27** muestra una sufridera utilizada para enderezar y terminar la cabeza hexagonal de un tornillo después que este ha sido recalco en una encabezadora de tornillo.



**Figura 5.26 Dados de encabezar claveras**

Antes de recalcar, la pieza debe ser calentada total y uniformemente a través de toda la sección transversal y a lo largo de toda la longitud de recalcar; la temperatura del acero, la cual debe ser alta, dependerá de su calidad y esta estará especificada por el jefe del taller o tecnólogo. Para asegurar un recalcado uniforme la pieza debe ser girada alrededor de su eje constantemente al mismo tiempo que esta es golpeada.



**Figura 5.27 Sufridera hexagonal**

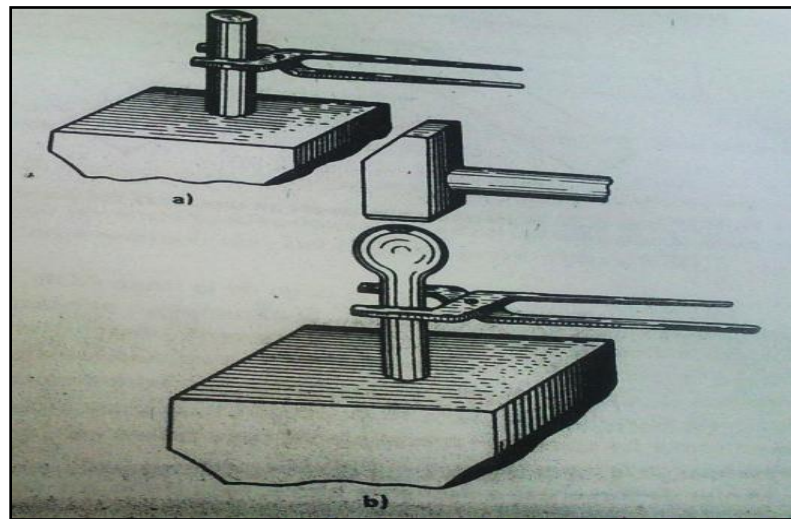
La longitud de la sección recalcada del material no debe ser nunca mayor de 2 a  $2\frac{1}{2}$  veces su diámetro o la longitud de los dados opuestos del cuadrado, de otra forma, esta se doblara durante el recalcado. Por ejemplo, si el diámetro de un material es de 25mm, la longitud máxima de su parte recalcada puede ser  $25 * 2,5 = 62,5\text{mm}$ , si la longitud de la sección a recalcar es de 150mm, el material se doblara durante el recalcado.

Vamos a considerar varios casos de recalado.

Ejemplo 1: Se necesitara recalcar el extremo de una material.

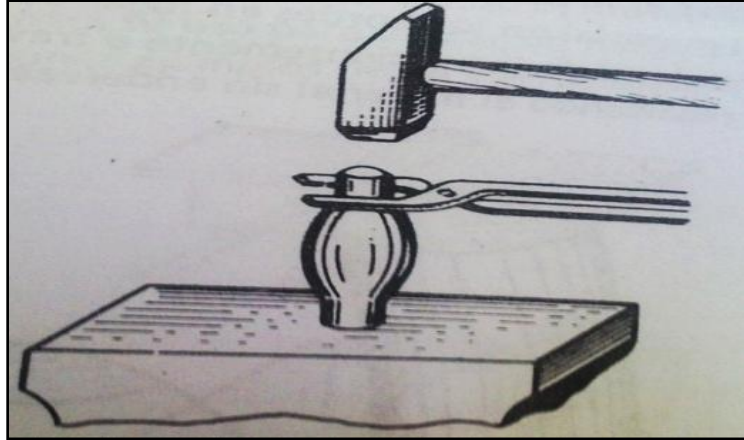
Caliente el extremo a recalcar en una fragua a la temperatura de forjar, coloque entonces el material, con el extremo caliente arriba sobre el yunque, el herrero sostiene el material con las tenazas en su mano izquierda y con el martillo sujeto con su mano derecha, le muestre al ayudante donde golpear la pieza con la mandarrria. Si se coloca la pieza con la cabeza caliente sobre el yunque, la longitud de la cabeza recalcada será mayor, pero su diámetro será más pequeño.

La **Figura 5.28a**, muestra cómo se coloca un material sobre el yunque para recalcarlo y la **Figura 5.28b**, ilustra el recalado de un extremo del material.



**Figura 5.28** Recalado del extremo de una pieza

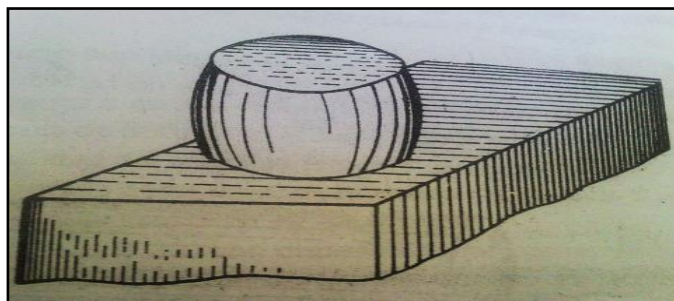
Ejemplo 2: Recalado de la parte central de una pieza. Caliente la parte central del material en una fragua hasta la temperatura de forjar. Colóquelo entonces verticalmente, sobre el yunque y agárrelo con las tenazas por el lugar donde no va a ser recalado. Golpee la parte superior del material con una mandarrria o martillo, recalcando así la parte central del material. La **Figura 5.29** ilustra la operación de recalcar la parte central de una pieza.



**Figura 5.29 Recalado**

Ejemplo 3: recalado total de una pieza. La pieza debe ser calentada uniformemente a lo largo de toda su longitud y colocada entonces verticalmente sobre el yunque, sostenida en posición por las tenazas sujetando su centro. Golpee entonces la parte superior del material ligeramente al principio y después con golpes más pesados y continúe aumentando la fuerza y frecuencia.

La **Figura 5.30** ilustra una pieza después que ha sido recalada. Cuando el trabajo se ha terminado, se debe tener cuidado de evitar que esta se doble o que pierda su figura.

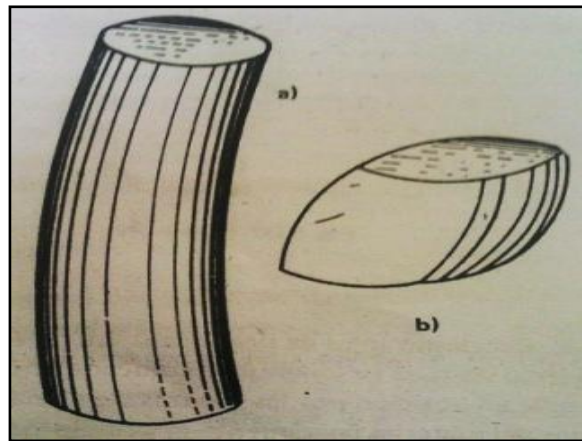


**Figura 5.30 Piezas completamente recaladas**

Defectos en el recalado. Los defectos del recalado incluyen:

1. Doblado del material durante el proceso de recalado (**Figura 5.31a**).
2. Las caras del material pierden la cuadratura (**Figura 5.31b**). El material está expuesto a doblarse y perder su cuadratura como resultado de:

- a. La longitud del material siendo mayor que 2 a 2,5 veces su diámetro.
- b. Olvido de girar el material alrededor de su eje durante el recalco.
- c. Forjado del material en los bordes en lugar del centro de su extremo.
- d. El material calentado insuficientemente a través de su sección transversal.
- e. Continuar recalco el material sin enderezarlo después que este ha comenzado a doblarse.



**Figura 5.31** Pieza pandeada (a) y deforma (b) durante el recalco

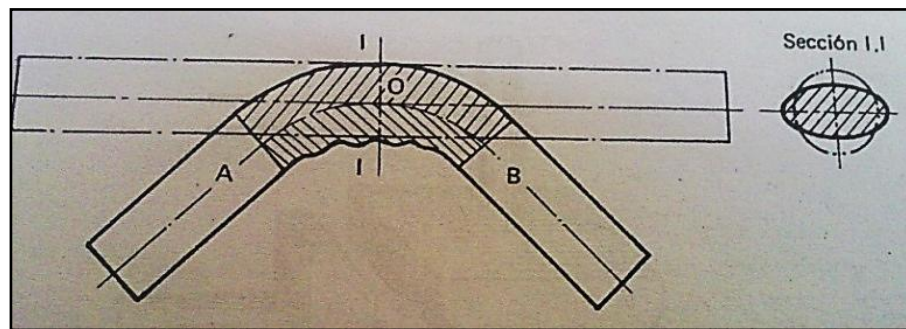
Además de estos defectos pueden ocurrir pliegues (arrugas) en la pieza que se recalca, estos aparecen a menudo después de enderezar una pieza doblada considerablemente.

Rajaduras superficiales e internas es posible que ocurran si la pieza no ha sido calentada a la temperatura apropiada o si este no ha sido calentado uniformemente a través de toda su sección transversal.

#### **5.3.4. Doblado**

En el forjado a menudo se tiene necesidad de doblar un material o pieza forjada. El método más simple de doblar una pieza metálica durante el forjado a mano es

colocándola sobre un borde lateral de la cara del yunque y sujetándola en posición con una mandarina, golpeando su extremo libre con una segunda mandarina. Si el taller de forja está equipado con martinets, el material puede ser sujetado fuertemente entre la masa superior y el yunque inferior, y doblada golpeando su extremo libre con una mandarina. Cuando se dobla un pedazo de metal, sus capas exteriores están expuestas a esfuerzos de tracción y sus capas interiores a esfuerzos de compresión (**Figura 5.32**). Consideramos una barra, la cual tiene que ser doblada como en la **Figura 5.32**. Antes de doblado, el metal en esta barra estaba distribuido uniformemente a través de toda su longitud. Después del doblado, el metal a la izquierda del punto A y a la derecha del punto B en la barra, no ha sufrido cambio alguno. Pero el metal en la sección de la barra entre los punto AOB, sufre los siguientes cambios: el metal que yace sobre la línea AOB, será estirado y a mayor extensión mayor las distancias de sus partículas desde la línea AOB. Sin embargo, el metal debajo de la línea AOB, será comprimido aumentando el grado de compresión con la distancia debajo de la línea AOB.

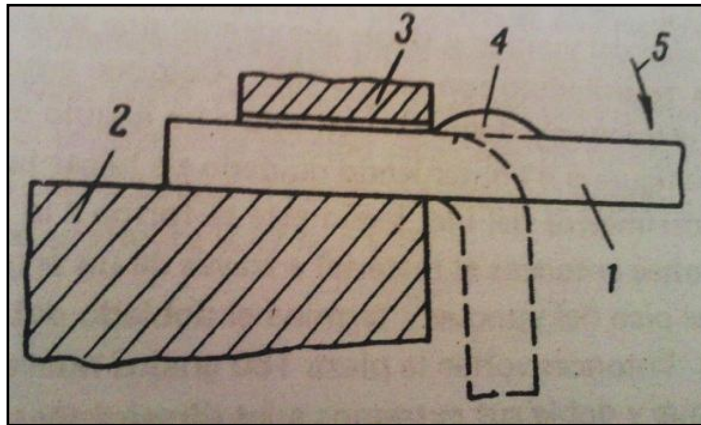


**Figura 5.32 Ubicación de tensiones en una barra del acero al doblarla**

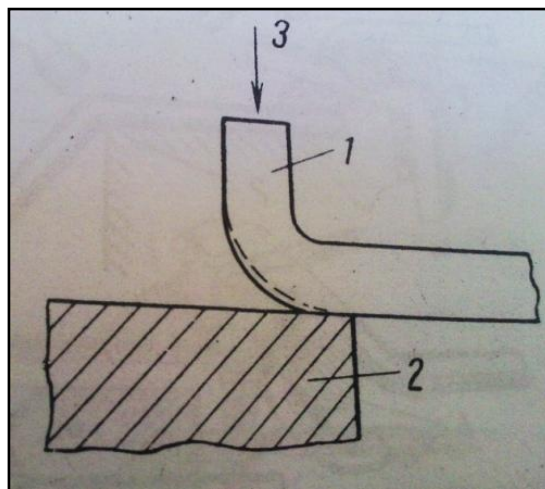
La capa de metal colocada a lo largo de la línea AOB, no será ni comprimida ni estirada; se le llama la capa neutral. Si el metal no es plástico o si esta calentado insuficientemente antes de doblarla, se pueden desarrollar rajaduras sobre la superficie exterior de la barra doblada, y pliegues en su superficie interior, además, la forma de la sección transversal de la barra cambiara después de ser doblada, esta será ovalada como se muestra en la sección I-I (**Figura 5.32**). Por

esta razón, se deben tomar las siguientes precauciones para preservar la forma inicial de la sección transversal de la barra cuando se dobla.

Antes de comenzar a doblar la barra, este debe ser recalcado en el punto donde esta va a ser doblada (**Figura 5.33**). El metal sobrante en este después del recalcado, ayudara a conservar la forma inicial de la sección transversal de la barra después que esta ha sido doblada (**Figura 5.34**).



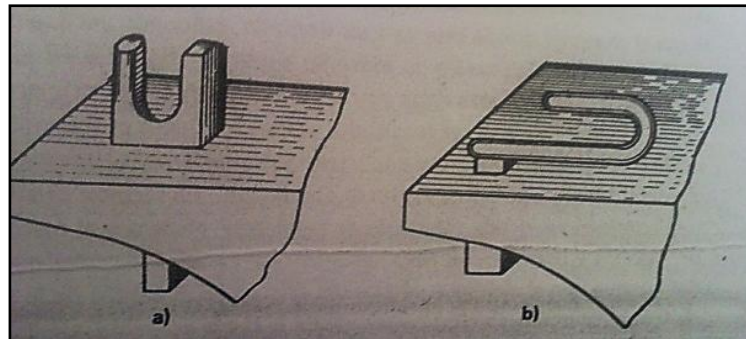
**Figura 5.33** Doblado de una barra previamente recalcada. 1) Barras; 2) Yunque; 3) Mandarrias; 4) Metal recalcado; 5) Dirección de los golpes para doblar el material.



**Figura 5.34** Recalado de una barra después del doblado. 1) Barras; 2) Yunque; 3) Dirección de golpes

Caliente solo la parte de la pieza que se va a doblar, si se calienta una longitud mayor de la que realmente se necesita, los extremos de la sección calentada se

doblarán y tendrán que ser enderezados después. Las barras delgadas de acero de bajo carbono se doblan a menudo sin calentamiento previo (**Figura 5.35**).

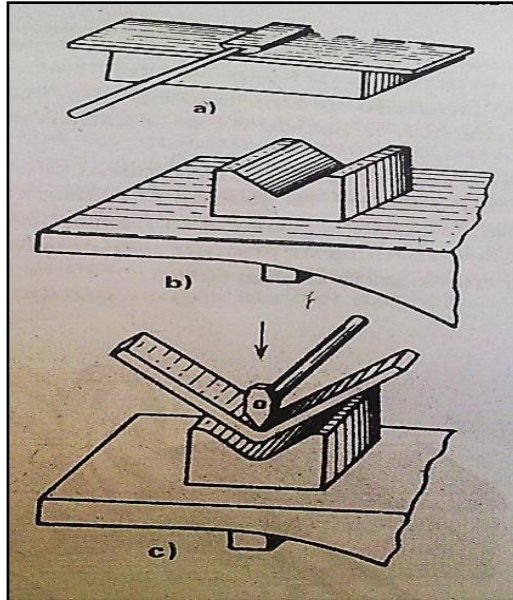


**Figura 5.35** Artefactos de doblado. a) Grifa, b) Eslabón de doblado

Se usan varios aditamentos para doblar: grifas, grampas, eslabones, plantillas, cepos, etc., la **Figura 5.35a**, muestra una grifa para doblar sobre el yunque; la **Figura 5.35b**, una argolla para doblar también sobre los yunques. En adición los forjadores emplean frecuentemente los repartidores, los cuales facilitan las operaciones de doblado.

La **Figura 5.36a**, muestra un repartidor para doblar ganchos de material de acero en plancha y redondo. La **Figura 5.36b**, muestra una sufridera en forma de V y la **Figura 5.36c**, ilustra su uso para doblar un material plano en ángulo recto. Vamos a considerar algunos ejemplos de las operaciones de doblado.



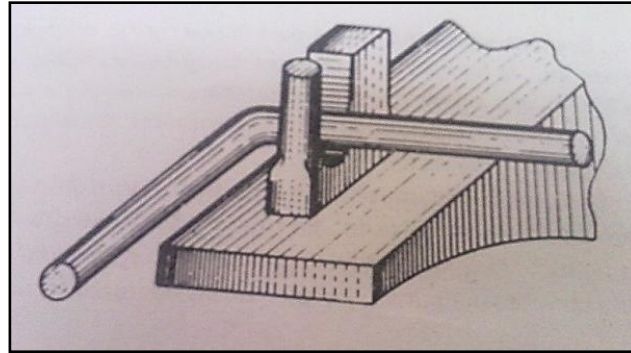


**Figura 5.36 Doblado de una plancha. a) Estampa media caña; b) Sufridera, c) Degüello**

Ejemplo 1: doblado de barras redondas. Para asegurar un doblado sano cuando se doblan barras o varillas redondas, estas deben ser calentadas totalmente al rojo, esto es cerca de  $800^{\circ}\text{C}$ , en el lugar donde estas se van a doblar.

Según la calidad del acero, la temperatura de calentamiento para el doblado puede ser aumentada generalmente, mientras más duro es el acero mayor será la temperatura a la cual este debe ser calentado.

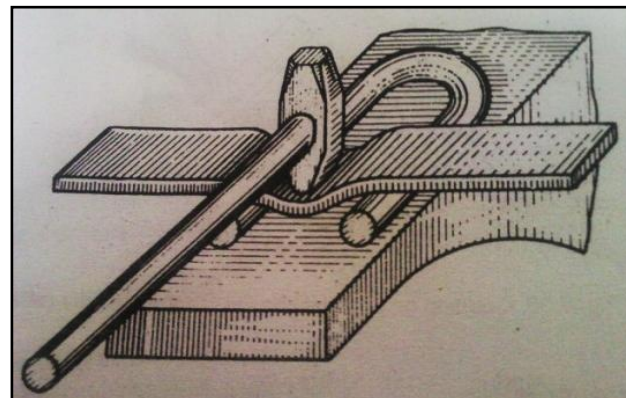
Las grifas (**Figura 5.37**) son dispositivos muy convenientes para doblar barras redondas de acero de un diámetro no muy grande. La sección calentada del material se inserta dentro de la grifa y se dobla entonces al ángulo requerido golpeando su extremo libre con una mandarria o un martillo, según el grueso del material.



**Figura 5.37 Doblado de cabilla con grifa**

Ejemplo 2: doblado de una barra plana. Las barras planas pueden ser dobladas convenientemente con la ayuda de un eslabón para doblar o una sufridera en forma de V.

La **Figura 5.38** muestra como una barra plana puede ser doblada con la ayuda de un eslabón para doblar. Se coloca el eslabón sobre el yunque, y la barra sobre la parte superior del eslabón se coloca la parte que se va a doblar entre las patas del eslabón. Se dobla entonces el ángulo requerido golpeando un degüello colocado sobre este con una mandarria o martillo.

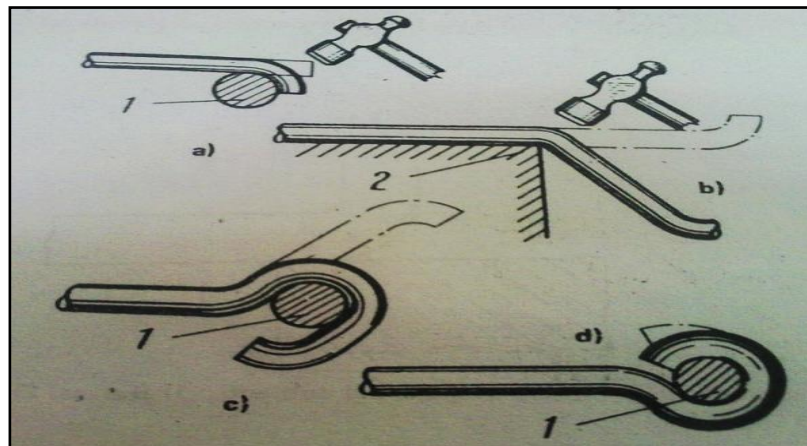


**Figura 5.38 Doblado de una barra plana empleando eslabón de doblar**

Se ilustra el doblado de una barra en una sufridera en forma de V. el método de doblar material en sufrideras en formas de V es el mismo que el utilizado en los eslabones. La barra debe ser colocada sobre el eslabón o en la sufridera perpendicularmente a las patas del eslabón o en la sufridera, ya que de otra

manera la barra se doblara impropriadamente. El degüello debe ser colocado exactamente en el centro del eslabón o de la sufridera.

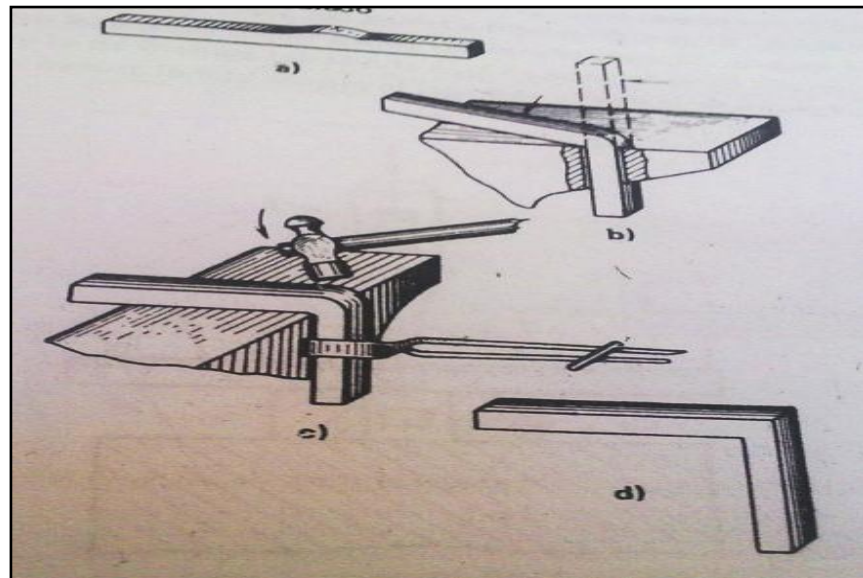
Ejemplo 3: hacer un ojo pequeño. Coloque el extremo calentado del material a través del pico del yunque y doble el extremo que sobresale como se ilustra en la **Figura 5.40a**, golpeándolo con un martillo. Coloque entonces el material sobre su borde sobre el yunque y doble un extremo a un ángulo de 60 a 70°, como se muestra en la **Figura 5.39b**, teniendo cuidado que la longitud del doble igual a la longitud (perímetro) del ojo, según este se forma a lo largo de su línea neutral (central). Voltee entonces el material a través de un ángulo de 180°, colóquelo sobre el pico del yunque y termine el doblado del ojo como se muestra en la **Figura 5.39c**. Entonces voltee la pieza 180° nuevamente, colóquela sobre el pico del yunque y doble sus extremos a las dimensiones requeridas y termine el ojo con golpes livianos del martillo de mano (**Figura 5.39d**).



**Figura 5.39** Doblado de ojo con el pico del yunque. 1) Pico del yunque; 2) Cara del yunque

Ejemplo 4: doblado de un ángulo vivo. Se necesita una cantidad extra de metal para asegurar una esquina aguda en los dobles de una material. Este metal extra puede ser obtenido previamente por un recalcado local. Con este propósito, se calienta el material donde este va a ser doblado, colocado verticalmente sobre el yunque y recalcado golpeando su extremo superior (**Figura 5.40a**). Si el material a doblar es muy largo, este debe ser recalcado

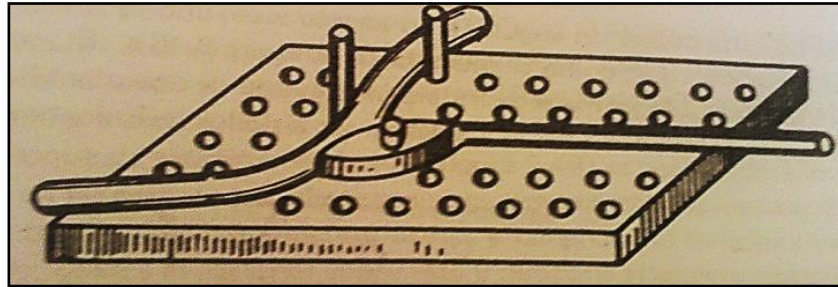
como sigue: primero calienta el material en el lugar que va a ser calentado; golpee entonces el material verticalmente sobre una plancha de acero o sopórtelo horizontalmente contra el lado del yunque y golpee su extremo opuesto con la mandarría. La sección calentada del material será entonces recalcado. Después de recalcado, enderece el material sobre la cara del yunque con el dobles o vértice del ángulo en el centro de la sección recalcada, de forma tal que la sección calentada de la barra coincida con el borde del agujero; doble entonces su otro extremo sobre el yunque (**Figura 5.40b, c y d**) con la mandarría. La sección calentada del material será entonces recalcada. Después de recalcado, enderece el material sobre la cara del yunque y dóblelo entonces hasta formar un ángulo recto, metiéndolo en el ojo del yunque con el dobles o vértice del ángulo en el centro de la sección recalcada, de forma tal que la sección calentada de la barra coincida con el borde del agujero; doble entonces su otro extremo sobre el yunque (**Figura 5.40b, c y d**).



**Figura 5.40 Doblado de una pieza de ángulo recto con esquinas vivas**

Los cepos (o claveras) para doblar son muy convenientes e indispensables para los talleres de forja. Estos son bloques masivos perforados por agujeros en los cuales se pueden insertar espigas. La pieza se dobla en estos cepos como

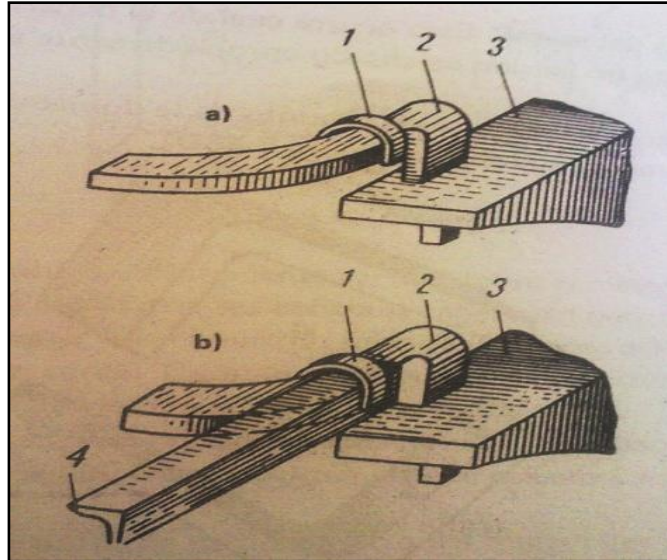
sigue: el material a doblar se coloca entre una serie de espigas, insertadas previamente en los agujeros (**Figura 5.41**) y se dobla con una palanca especial. La pieza así doblada no tendrá esquinas vivas. Para aguzar las esquinas de los dobleces el material debe ser recalcado primero sobre el yunque como se muestra en la **Figura 5.40a** y martillado, siendo la dirección de los golpes como se muestra por las flechas en la **Figura 5.40c**.



**Figura 5.41 Cepo de doblar el forjador**

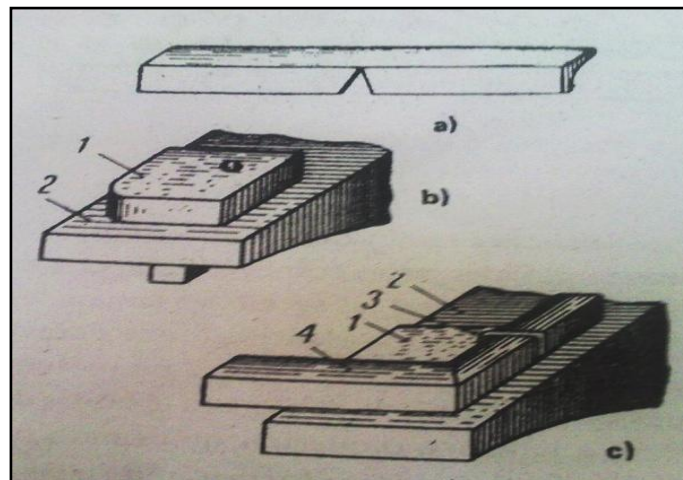
*Doblado de secciones laminada.* Los forjadores frecuentemente tiene que doblar secciones laminadas, tales como: angulares, barras en forma de T, y así sucesivamente. Por regla general las secciones laminadas se doblan contra plantillas.

La **Figura 5.42a**, ilustra una plantilla usada para doblar angulares sobre un yunque, mientras que la **Figura 5.42b**, muestra un método para doblar un angular. El angular, después de ser calentado se asegura al borde de la plantilla por una grampa movable y doblada a la forma requerida, golpeando su extremo libre con un martillo. Durante el proceso del doblado se formaran arrugas sobre el angular, estas arrugas pueden ser alisadas con la ayuda del asentador. Después de alisar (terminar) la sección doblada del angular, la grampa debe ser movida nuevamente y continuando el doblado hasta obtener la longitud requerida del doblez.



**Figura 5.42** Plantilla (a) y esquema de doblar en angular (b). 1) Grilletes; 2) Plantilla; 3) Yunque; 4) Ángulo que hay que doblar

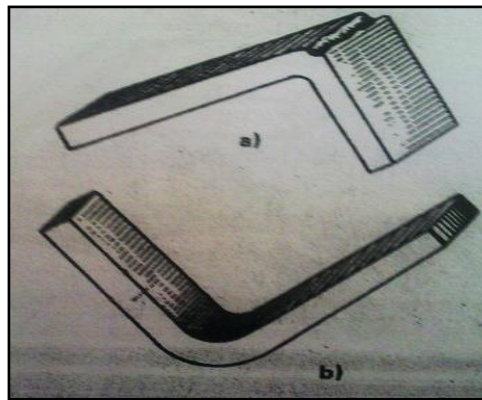
Si se necesita doblar un angular a un ángulo vivo, uno de los lados del angular debe ser ranurado en V, como se muestra en la **Figura 5.43a**. El angular puede ser entonces doblado a la forma requerida con la ayuda de una plantilla (**Figura 5.43b y c**). Después del doblado sus lados deben ser aislados (terminados) con el asentador.



**Figura 5.43** Doblado de un angular en un ángulo recto con esquinas viva. 1) Plantilla; 2) Yunque; 3) Grillete; 4) Angular

Defecto en el doblado. Los siguientes defectos pueden ocurrir durante el doblado:

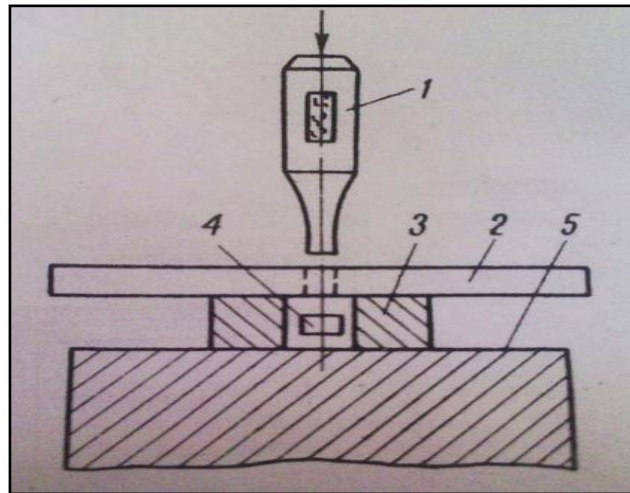
1. *Ruptura del metal.* Esto ocurre cuando el material se ha enfriado durante el doblado o este no ha sido calentado apropiadamente antes de iniciar el doblado (**Figura 5.44a**).
2. *El material se adelgaza en el punto de la dobladura.* Esta resulta por no recalcarlo previamente al doblado (**Figura5.44b**).



**Figura 5.44 Defectos del doblado. a) Desgarradura; b) Reducido del metal**

### 5.3.5. Perforado y punzonado de agujeros

El punzonado y perforado se emplean para hacer agujeros en el metal durante el forjado. Los agujeros en los materiales delgados se hacen por perforación; para esto, el metal (previamente calentado a 900 o 1000°C) debe ser colocado sobre el yunque (5) (**Figura 5.45**) que de forma tal, que el lugar a perforar coincida con el agujero u ojo del yunque o el material (2) se coloca sobre el anillo o sufridera (3), el diámetro interior del cual es ligeramente mayor que el del agujero que se necesita. El punzón (1) se coloca entonces sobre el punto a perforar y se golpea su cabeza con la mandarria. El punzón pasara a través del acero casi sin ensanchar el metal alrededor del agujero. Cuando el punzón pasa a través del metal esta fuerza el pedazo de metal cortado llamado pepita (4), a través del agujero en el yunque o de la sufridera (3), la altura de la pepita será casi la misma que el grueso del material que se perfora.

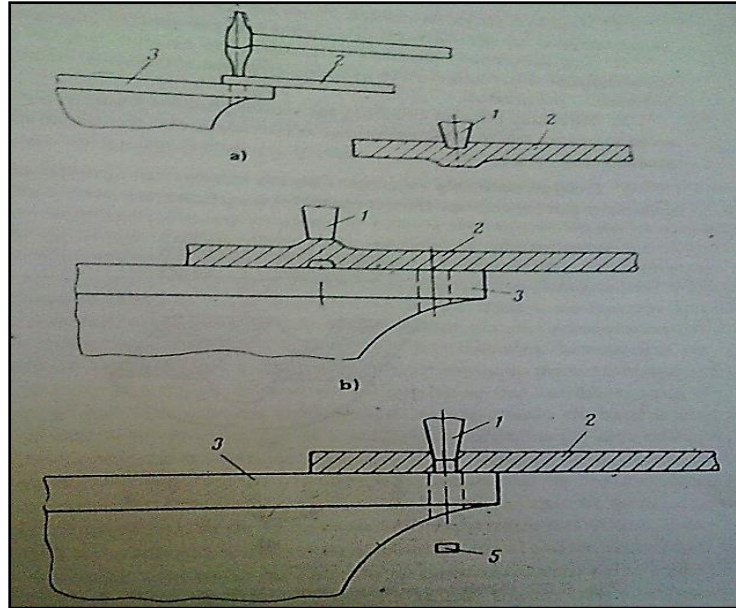


**Figura 5.45 Punzonado de un agujero en una planchuela**

En materiales de grueso mayor se punzonan los agujeros. El procedimiento de punzonado de agujeros es del todo diferente del perforado.

Ante todo, el material después de ser calentado hasta 900 o 1000°C, se coloca sobre el yunque de forma tal que el futuro agujero coincida con el ojo del yunque. Se coloca entonces el punzón sobre el punto en el cual se va hacer el agujero. El punzón (1) se fuerza hasta la mitad del material (2), golpeándolo ligeramente con la mandarina hasta que se forme una comba en el lado opuesto del material (**Figura 5.46a**). Se saca entonces el punzón, se voltea la pieza, se golpea la comba varias veces como un martillo de mano, se coloca el punzón sobre la comba (**Figura 5.46b**) y se introduce dentro del material con golpes de mandarina.





**Figura 5.46 Perforación de un agujero en una planchuela**

La pepita (5) que resulte **Figura 5.46c** puede entonces ser sacada a través del ojo del yunque (3), golpeando el punzón con la mandarria.

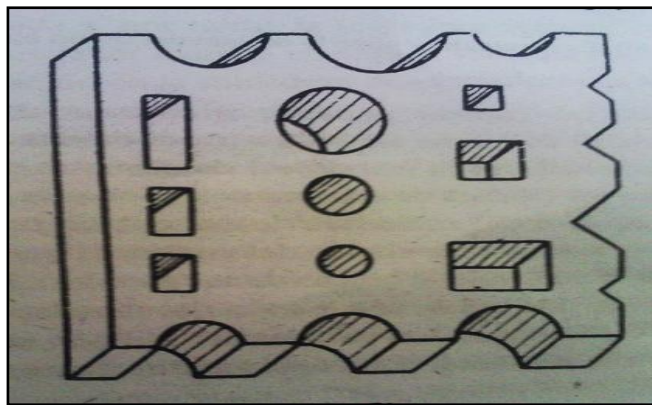
Cuando se hacen agujeros con punzones, el metal se expande cambiando la forma de la pieza.

Los agujeros se punzonan cuando estos se van a realizar al comienzo del trabajo, esto es, antes que la pieza sea completamente forjada; por el contrario, se perforan los agujeros cuando estos son hechos en una pieza casi terminada, debido a que la forma del material no cambia prácticamente después del perforado.

Durante el forjado a mano, los agujeros se punzonan o perforan en el acero con la ayuda de punzones o perforadores. Los extremos de trabajo de estas herramientas, pueden ser cuadrados (**Figura 5.47**) o redondos y son siempre de viaje o cónicas por dos razones: por la facilidad al sacarlos del agujero, así como también para hacer agujeros de distintos tamaños. Estos se ajustan a mangos (cabos) de madera. Cuando se están haciendo agujeros, se golpea la cabeza del punzón, con un martillo a mandarria.

El bloque de estampar o clavera (**Figura 5.47**) se usa por los herreros para hacer agujeros en las piezas. Las claveras son bloques cuadrados macizos de acero o hierro fundido, con agujeros de muchas formas y tamaños. El forjador elige el agujero apropiado, coloca el material sobre este y punzona el agujero requerido con la herramienta adecuada. Los lados de la clavera están hechos con rebajos de diferentes formas, diseñados para darle a la pieza la forma requerida y para alisarla, esto se hace colocando la pieza caliente en el rebajo elegido y sobre la pieza un asentador y golpeándolo entonces hasta que sea necesario.

El acero debe estar siempre caliente para punzonar o perforar agujeros. El punto a punzonar o perforar debe ser calentado a una temperatura amarillo anaranjado, el cual corresponde a cerca de 900 o 1000°C. No se recomienda punzonar o perforar agujeros en acero frío, aunque el material sea delgado, ya que esto puede producir rajaduras y rebabas en los bordes del agujero.



**Figura 5.47 Clavera**

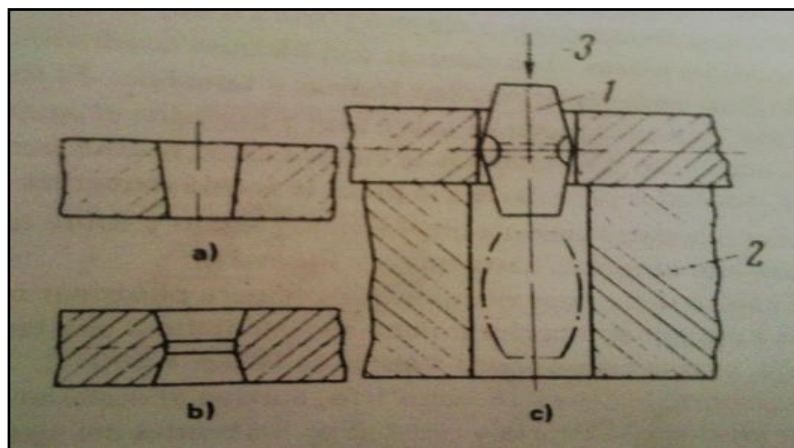
Coloque el punzón exactamente vertical sobre el material y vea siempre que el primer golpe de la mandarina sea contra la cabeza del punzón. Un golpe pesado e inclinado puede hacer que el punzón salte de las manos del forjador y lastime a las personas que están cerca. Después de cada golpe, el punzón debe ser movido ligeramente, para evitar que este se atasque en el acero.

Si el material es muy grueso, el punzón debe ser sacado de vez en cuando y su punta enfriada en agua. De otra forma, esta se calentara y se doblara sin perforar el acero.

Se debe rociar polvo de carbón dentro del agujero que se punzona, los gases producidos por la combustión evitaran que el punzón se pegue al acero.

Después de punzonar o perforar, las paredes de un agujero nunca serán exactamente verticales. Esto es a causa de que el punzón es cónico.

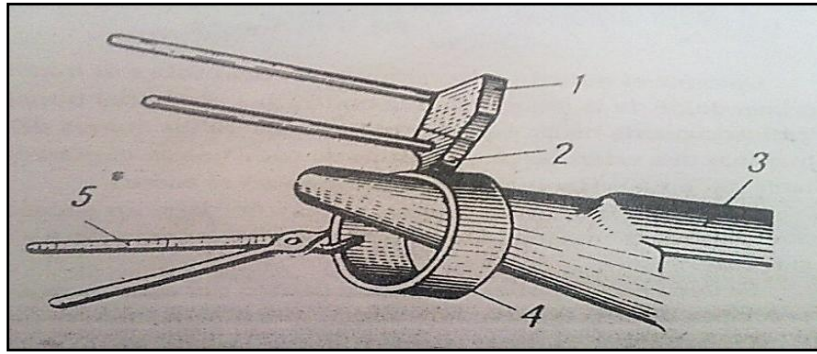
La **Figura 5.48a**, muestra un agujero perforado y la **Figura 5.48b**, un agujero punzonado. Las paredes de los agujeros hechos de esta forma deben estar lisas y los agujeros con una forma circular apropiada, forzándole un mandril de forma ahusada a través de este, como se muestra en la **Figura 5.48c**.



**Figura 5.48** Ensanchado y alisado de paredes de un agujero. 1) Ensanche; 2) Aro

Después del punzonado, se puede agrandar un agujero si es necesario introduciendo un mandril de forma ahusada a través de este. Algunas veces hay que utilizar varios ensanchadores (o mandriles) de diámetro en aumento. Los anillos sin costura pueden ser hechos de esta manera. Con este propósito, después que el diámetro del agujero del anillo ha sido aumentado suficientemente con los mandriles, se coloca el anillo sobre el pico del yunque (**Figura 5.49**) y se aumenta el diámetro interior reduciendo el grueso de sus

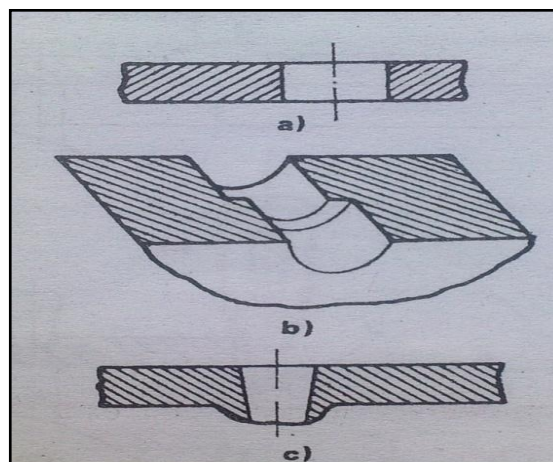
paredes. Esto se efectúa golpeando el anillo con un martillo o con una mandarría, el anillo se hace girar constantemente sobre el pico del yunque. Las paredes del anillo se estiran y adelgazan y el diámetro del agujero aumenta. Esta operación se llama ensanchar o mandrilar.



**Figura 5.49 Estirado de un aro. 1) Mandarría; 2) Degüello; 3) Yunque; 4) Aro; 5) Tenaza**

Defectos que pueden ocurrir durante el perforado o punzonado:

1. Agujero fuera de centro (**Figura 5.50a**); esto puede ocurrir cuando se perfora un agujero en un material grueso en una operación, sin voltear el material.
2. Las secciones opuestas del agujero no están alineadas (**Figura 5.50b**), debido a colocar impropiamente el punzón sobre el material después que esta ha sido volteado 180 grados.



**Fig. 5.50 Defectos que se producen al punzonar y perforar agujeros**

3. Rebabas (**Figura 5.50c**), las cuales pueden ocurrir si el diámetro del agujero en el yunque, bloque de estampar o sufridera es considerablemente mayor que el agujero que se perfora.
4. Desgarraduras y rajaduras en los bordes del agujero como resultado del punzonado o perforado en frío o material insuficientemente calentado.

### **5.3.6. Soldadura por Forjado**

La soldadura forjada (calda) es un procedimiento en donde los pedazos de metal calentados a un estado plástico, se unen bajo presión externa. Como sabemos, el acero al calentarse a una temperatura definida, se hace altamente plástico, si aumentamos la temperatura de dos piezas de acero hasta que sus superficies se hagan pastosas y juntas estas las presionamos o martillamos, se soldaran, esto es, formaran un solo pedazo de acero.

Si los dos pedazos de acero están propiamente soldados, la fuerza tensil de la pieza de acero resultante en la junta soldada será igual a la de la pieza que se sueldan. Esto es igual a la resistencia de cualquiera de las dos piezas separadas. No obstante, nunca podemos obtener una unión perfectamente uniforme de todas las partículas del material que se suelda y por esta razón, la fuerza tensil de una pieza soldada en sus juntas es usualmente menor que la de sus dos componentes separados. Se considera que una soldadura es buena si la fuerza tensil de la junta soldada no es menor del 85% de la fuerza tensil de los metales soldados.

La soldadura se emplea principalmente al forjar una pieza que presenta dificultades generales. En tales casos, forjamos la pieza en partes y entonces la soldamos. La soldadura se practica también extensamente en trabajos de reparación.

La soldadura se practica a calda consiste de las siguientes operaciones separadas.

- 1. Preparación de los extremos de las piezas a soldar.*
- 2. Caldeo de las piezas para soldarlas.*
- 3. Soldadura de los extremos, martillado y terminado de la junta soldada.*

La junta soldada debe ser martillada totalmente. Para que después de soldada y martillada, la sección del material sea la misma que era antes de la soldadura, los extremos de las piezas a soldar deben ser recalcados previamente y entonces martillados según el método de soldadura empleado. Después que los extremos han sido preparados para la soldadura, estos deben ser calentados (caldeados) a la temperatura de soldadura. Esto se hace usualmente en la fragua o en hornos especiales para soldaduras. Por regla general, los hornos de forja no son apropiados para calentar el acero a las temperaturas de soldadura y no son capaces de asegurar las temperaturas de soldaduras requeridas. Los combustibles mejores para calentar soldaduras son el carbón vegetal y el coque. El carbón de piedra se usa también para el calentamiento de las soldaduras solo en caso en que su contenido de azufre este por debajo del 1% ya que el azufre es perjudicial a las juntas soldadas de alta calidad.

Las temperaturas de soldadura están entre los límites de 1274 a 1400°C; estas están considerablemente sobre la temperatura inicial de forja ordinaria. Esta alta temperatura asegura una unión de las piezas que se sueldan. La temperatura de soldadura depende de la composición química del acero, mientras mayor sea el contenido de carbono y elementos aleantes en el acero, más baja debe ser la temperatura de forjar. Se debe de detener el calentamiento de los aceros de bajo carbono cuando los extremos de las piezas a soldar tienen una temperatura rojo blanco; el de los aceros de alto carbono cuando estos tienen un color blanco, moteado en amarillo. La temperatura de forjar se determina generalmente con la ayuda de pirómetros ópticos y algunas veces a simple vista.

El calentamiento de los acero a soldar demanda una atención considerable. Es absolutamente necesario que los lugares a soldar estén libres de óxido, escoria, etc., las superficies de los aceros deben estar absolutamente limpias. La limpieza de las superficies a soldar es una condición principal para asegurar soldaduras sanas, ya que toda materia extraña (escoria, oxido, etc.) evitara el contacto íntimo de las partículas del acero, disminuyendo por tanto la resistencia mecánica de la junta soldada. El acero debe ser calentado de forma tal que se evite una llama oxidante en el hogar o en el horno, en otras palabras, la llama debe estar libre de cualquier traza de exceso de aire; también, el acero que se caliente debe estar protegido contra el contacto directo con la llama. Por este motivo, la superficie del acero debe ser rociada, durante el calentamiento, con lo que se llama fundente. El fundente puede consistir en arena fina de río tamizada y mezclada con bórax.

El fundente se derrite muy rápidamente para formar una escoria, la cual protege las superficies del acero que se suelda. Este disuelve también cualquier oxidación la cual pudo haberse formado antes de rociar el acero con el fundente. Después de calentar los extremos a la temperatura de soldadura necesaria, estos deben ser sacados rápidamente del hogar u horno, golpeándolos contra el yunque para remover toda escoria que pudo haberse adherido a sus superficies, se limpia rápidamente con un cepillo de acero o un rascador y se coloca con no menos rapidez uno encima del otro y después se martillan suavemente al principio y fuertemente después, con un martillo o mandarria. Los pedazos de acero se unirán más estrechamente y serán soldados, esto es, se unirán para formar una sola pieza de acero.

El martillado vigoroso de las piezas soldadas es también una condición importante para asegurar buenas soldaduras. Cuando se efectúan soldaduras por forjado, el material debe ser martillado rápido y fuertemente, ya que solo así se asegura un contacto íntimo entre las partículas a soldar a las temperaturas más altas posibles. Además, la estructura granular de las partes soldadas del acero se ponen gruesas cuando el acero se calienta a la temperatura de

soldadura, el martilleo vigoroso rompe y refina el grano, mejorando así la calidad de la unión soldada.

Se debe recordar que una buena soldadura solo puede ser lograda con una temperatura apropiada y, por tanto, la soldadura debe ser completa a esta temperatura. Esto solo puede ser logrado cuando la soldadura se realiza rápidamente.

La última operación en la soldadura por forjadores es la terminación de la junta soldada; esto se efectúa con la ayuda de estampas y degüellos, según la forma del material soldado y el método de soldadura.

No todos los metales poseen lo que se llama soldabilidad. Por ejemplo, el plomo no puede ser soldado. Todos los aceros no poseen de ningún modo buena soldabilidad. Mientras menos sean los elementos de aleación en un acero, este suelda mejor. El hierro puro es altamente soldable, pero cualquier elemento de aleación disminuye esta propiedad. Mientras más alta sea el contenido de carbono, más pobre es la soldabilidad de un acero. La soldabilidad de un acero disminuye con el aumento de fósforo, azufre, cromo, cobre, etc. Un contenido de manganeso hasta 0,6 o 0,8% mejora su soldabilidad y por esta razón, los aceros al manganeso destinados para ser soldados pueden tener un mayor contenido de carbono.

Los siguientes contenidos máximos de elementos de aleación se recomiendan para asegurar buenas soldaduras: carbono desde 0,2 hasta 0,3%, pero no excediendo del 0,5%; silicio no más de 0,2%; manganeso desde 0,6 a 0,8%; fósforo y azufre tan bajo como sea posible, pero no más del 0,05% de cada uno. Si es necesario soldar un acero cuyo contenido sea sobre 0,3% de carbono, se debe agregar limalla de algún acero dulce que tenga un contenido pequeño de carbono al fundente para la soldadura. Esto traerá como consecuencia la descarbonación del acero en la soldadura, asegurando así una soldadura mejor.



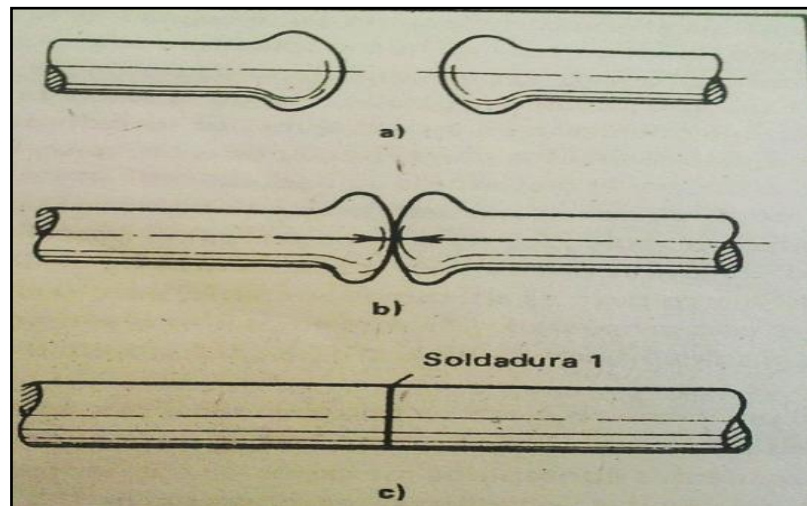
Métodos de soldadura. Los métodos principales para soldar piezas son:

*Soldadura a tope.*

1. *Soldadura a solapa (por superposición).*
2. *Soldadura de muesca (boca de caballo).*
3. *Soldadura de junta en T.*
4. *Soldadura en V.*

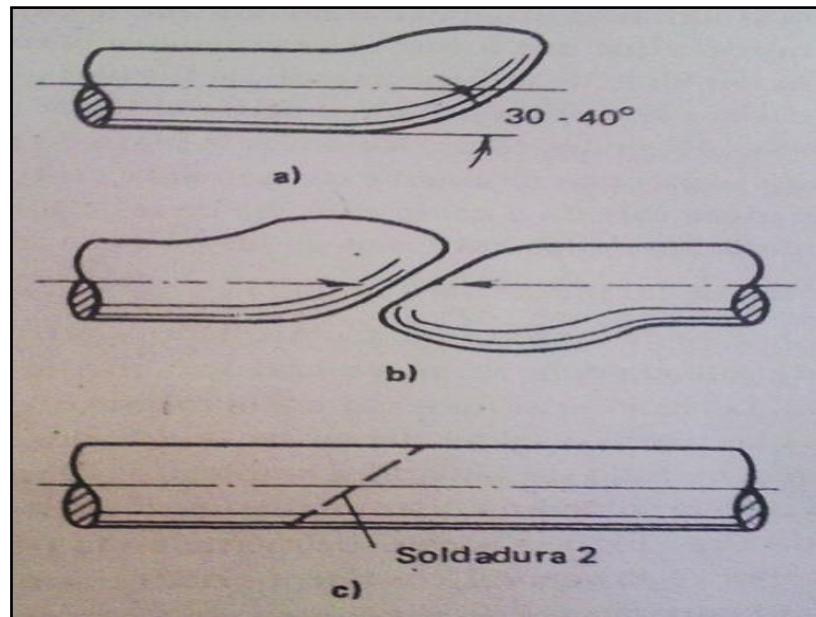
La soldadura a tope impone las siguientes operaciones: recalado ligero de los extremos de las piezas a soldar y entonces redondeado ligero de las caras de los extremos (**Figura 5.51a**). Los extremos recalados son redondeados para remover la escoria formada en sus superficies cuando estas son calentadas a la temperatura de forjar. Se calientan entonces ambos extremos hasta la temperatura de soldadura.

El forjador y su ayudante, cada uno toma una de las piezas con sus tenazas, colocan los extremos calentados tocándose uno frente al otro (**Figura 5.51b**) y golpean los extremos fríos opuestos del trabajo con un martillo, soldando así los extremos (**Figura 5.51c**). Hecho esto, la unión soldada debe ser martillada muy bien y terminada con estampa y asentador.



**Figura 5.51 Soldadura a tope**

1. **La soldadura a solapa** es un método más seguro que la soldadura a tope. Antes de soldar por este método, los extremos del material se recalcan y entonces se martillan y se rebajan en chaflán, como se muestra en la **Figura 5.52a**. Se calientan los extremos a la temperatura de soldadura, se limpian de la escoria y oxido, después de lo cual se pone un extremo sobre el otro como se muestra en la **Figura 5.52b**, y se martillan ambos extremos para que suelden. La junta solapada se termina entonces con la ayuda de estampas o asentadores y según el material (**Figura 5.52c**).

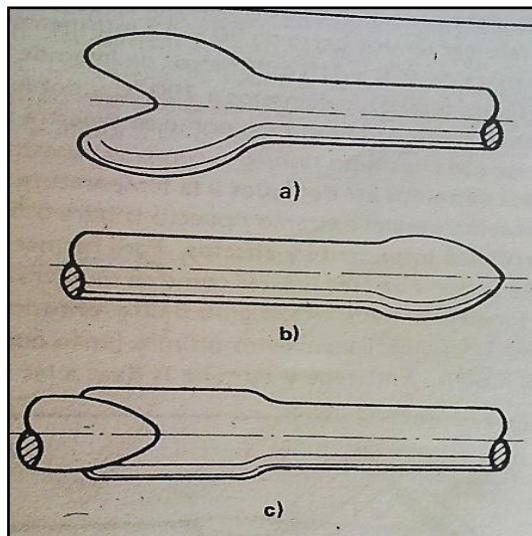


**Figura 5.52 Soldadura con chaflán**

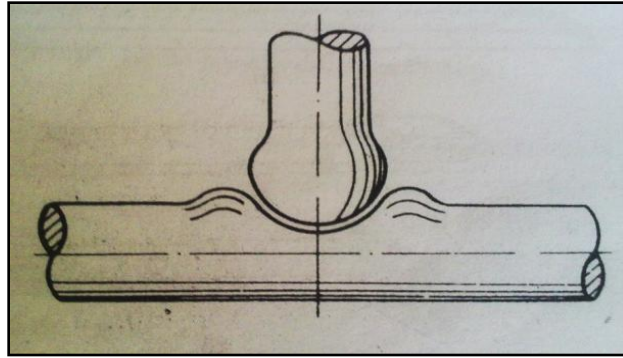
2. **La soldadura de muesca** o boca de caballo se emplea para unir piezas de sección transversal gruesa y para soldar dos aceros de diferentes calidades. Por este método, un extremo de la barra, preferiblemente el del acero más suave, se calienta y se recalca; el extremo recalcado se raja y se abre, como se muestra en la **Figura 5.53a**. El extremo de la segunda barra, después de estar recalcada, se martilla hasta que forme una punta, como se muestra en la **Figura 5.53b**. Se calientan ambos extremos a la temperatura de soldadura, se limpia de la escoria y oxido. El extremo terminado en punta se inserta dentro de la abertura en el extremo de la

primera barra (**Figura 5.53c**). La junta soldada se martilla y termina con estampas y asentadores. Si piezas de acero de distintas cualidades se van a soldar, sus temperaturas de soldadura diferirán y por esta razón deben ser calentadas en hogares separados.

3. **La soldadura de junta en T** es un método de soldar dos piezas que formen una junta T (**Figura 5.54**).
4. **La soldadura en V** se emplea para unir piezas pesadas. Los extremos de las piezas (a) y (b) se recalcan primero y se cortan para formar un viaje de conicidad aproximada de 30 a 40°, como se muestra en la **Figura 5.55**. Entonces, se forjan dos cuñas (c) de acero de la misma cualidad al mismo ángulo que las piezas a soldar. Los extremos a soldar se calientan a la temperatura de soldadura después de lo cual las cuñas se llevan también a la temperatura de soldadura y se insertan dentro del espacio triangular entre los extremos de (a) y (b) y se martilla el conjunto completo bajo los golpes de una mandarina. Este método es muy conveniente para soldar partes circulares, particularmente cuando se reparan argollas rotas.



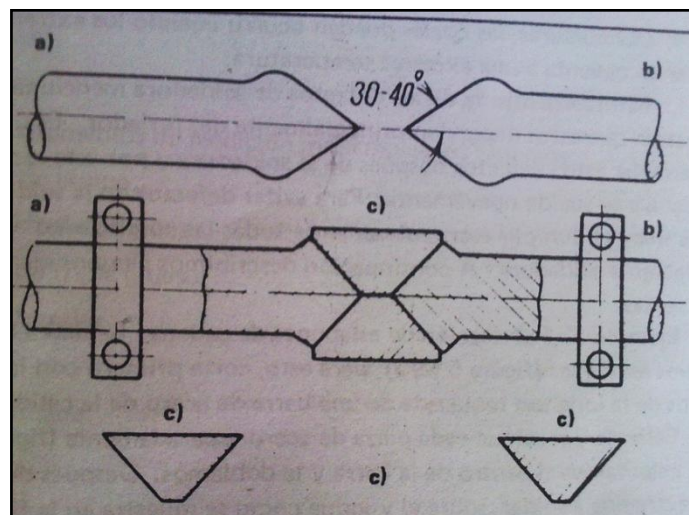
**Fig. 5.53 Horquilla y cuña o soldadura boca de caballo**



**Figura 5.54 Soldadura en T**

Inspección de las soldaduras y defectos de las mismas. Se considera que una soldadura esta buena si la resistencia de la junta no es menor del 85% de la resistencia del metal de las piezas soldadas. Por regla general la resistencia de una junta la resistencia de una junta soldada es del 60 al 80% de la resistencia de los metales a soldar.

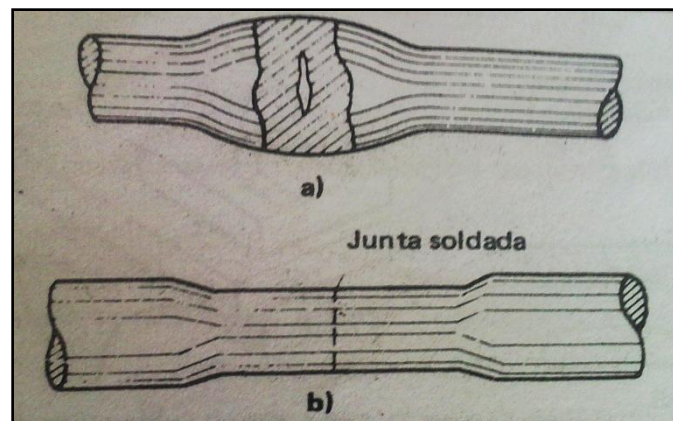
La resistencia de una junta soldada se determina por ensayo mecánico, para tal propósito se cortan las muestras y se preparan del acero de la misma calidad que el usado para hacer la soldadura. En la práctica, la calidad de una soldadura puede ser comprobada doblando la barra en la junta doblada. Si al doblarla la junta no se separa, esto es, muestra signos de rajaduras, se considera que la soldadura es suficientemente buena.



**Figura 5.55 Soldadura en V**

La superficie de una soldadura debe estar pareja y lisa, sin embargo, pueden ocurrir los siguientes defectos en una junta soldada:

1. Soldadura incompleta, la cual puede ser producida por el óxido dejado sobre la superficie de los extremos que se sueldan; por esta razón, el óxido debe ser siempre removido totalmente y los extremos a soldar deben ser rociados con fundente (una mezcla de arena de cuarzo y bórax).
2. Soldadura incompleta (**Figura 5.56a**). Esto puede ser debido a la escoria y óxido en los extremos del trabajo si no han sido redondeados, evitando consecuentemente la soldadura apropiada, esto ocurre generalmente durante la soldadura a tope.
3. El grueso (la sección transversal) de la pieza en la junta soldada es menor que la requerida (**Figura 5.56b**). Esto resulta de no recalcar los extremos de las barras antes de soldarlas, por tanto, la sección transversal de la barra soldada en su junta se reduce cuando se golpea.



**Figura 5.56 Defectos de la soldadura**

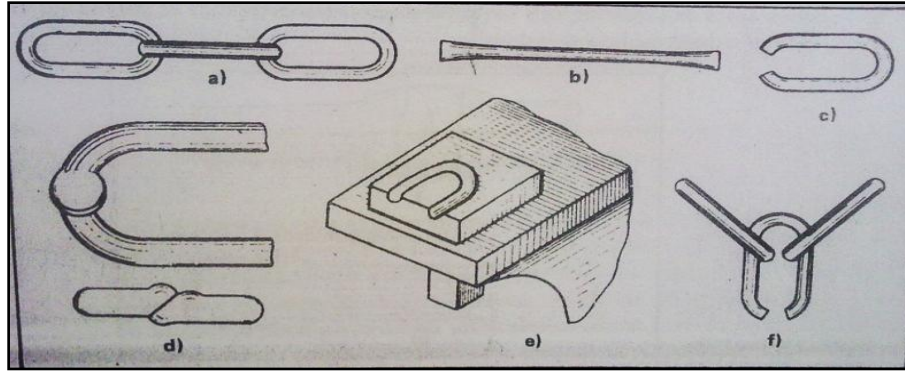
4. Quemaduras, las cuales pueden ocurrir cuando los extremos del material a soldar se calienta a una excesiva temperatura.

La naturaleza misma de los defectos de soldadura mencionados anteriormente muestra que estos dependen principalmente del forjador. Es difícil si no imposible arreglar estos defectos después de la soldadura y por esta razón, el trabajo se desecha o se suelda nuevamente. Para evitar defectos en la soldadura, el forjador debe siempre cumplir escrupulosamente todas las condiciones y operaciones para el trabajo a soldadura. A continuación describimos algunos ejemplos de cómo soldar piezas.

Ejemplo 1: fabricación de eslabones de cadena. Se desea hacer una cadena de tres eslabones (**Figura 5.57a**), para esto, corte primero con la tajadera tres pedazos de la longitud requerida de una barra de acero de la calidad apropiada.

Caliente y recalque cada pieza de acero separadamente (**Figura 5.57b**). Entonces, calentamos el centro de la barra y la doblamos. Después del doblado rebaje los extremos a soldar, sobre el yunque como se muestra en la **Figura 5.57c**. Doble entonces los extremos rebajados en el pico del yunque hasta que estos se superpongan uno sobre el otro (**Figura 5.57d**). Caliente estos extremos a la temperatura de soldadura, remueva todo el óxido y coloque la barra sobre la estampa de yunque con un receso circular (**Figura 5.57e**). Cubra entonces el eslabón con una estampa de diseño similar a su sección y suelde los extremos del eslabón golpeando la estampa de mano.

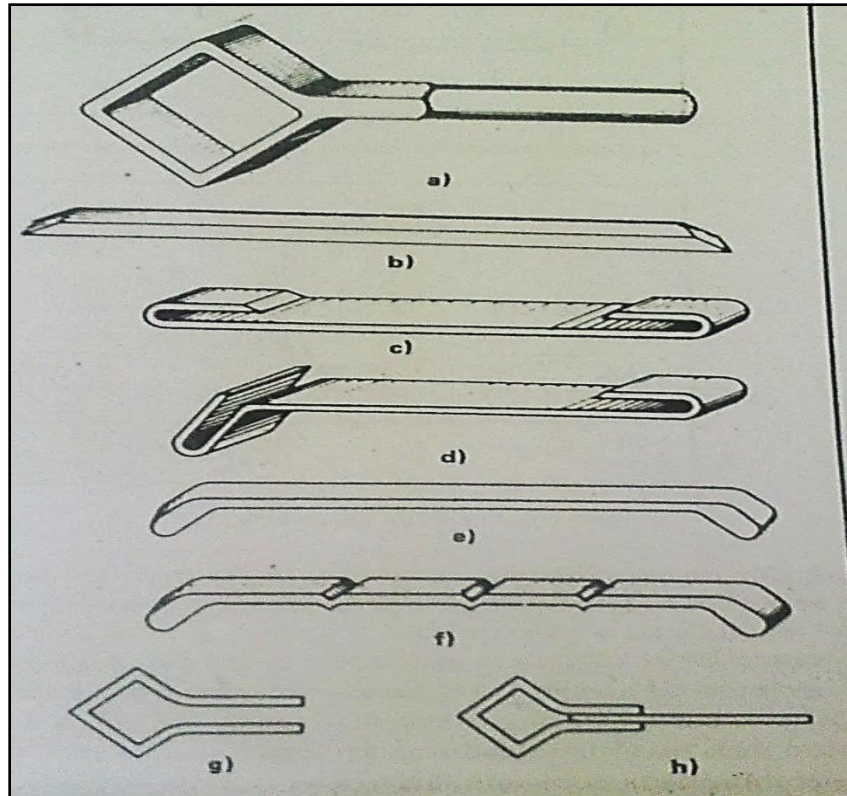
La junta soldada debe ser entonces martillada y terminada en el pico del yunque para hacer una cadena de tres eslabones, dos eslabones se sueldan primero y se terminan como se describió anteriormente y se unen después por el tercer eslabón (**Figura 5.57f**), el cual se suelda y se termina de la misma manera que los dos primeros. Si se necesita fabricar una cadena de varios metros de largo, se deben hacer varias secciones de tres eslabones y se unen todas las secciones para formar la cadena de la longitud requerida. Todos los eslabones deben tener la misma forma y dimensión.



**Figura 5.57 Como hacer una cadena soldada**

Ejemplo 2: fabricar una llave para una tuerca de dos pulgadas (**Figura 5.58a**). Esta se puede fabricar de una barra de 50\*12 milímetros de la siguiente manera:

Corte una pieza de 400 a 410 milímetros de largo de la barra, caliente y bisele sus extremos (**Figura 5.58b**), caliéntelos a 700°C y dóblelos sobre sí una longitud de 100 milímetros desde cada extremos como se muestra en la **Figura 5.58c**, doble entonces a su vez cada extremo doblado, como se muestra en la **Figura 5.58d**, caliente uno de los extremos así doblados a la temperatura de soldadura y suéldelo, repita esta operación para el extremo opuesto (**Figura 5.58e**). Después de soldar los extremos, martíllelos totalmente y alíselos. Para formar los ángulos vivos que se necesitan degüelle la barra en tres lugares como se muestra en la **Figura 5.58f**, y dóblela según la forma mostrada en la **Figura 5.58g**, entonces, después de insertar el mango entre los extremos, suelde estos últimos junto con el mango, como se muestra en la **Figura 5.58h**. Enderece y termine la llave a las dimensiones requeridas.

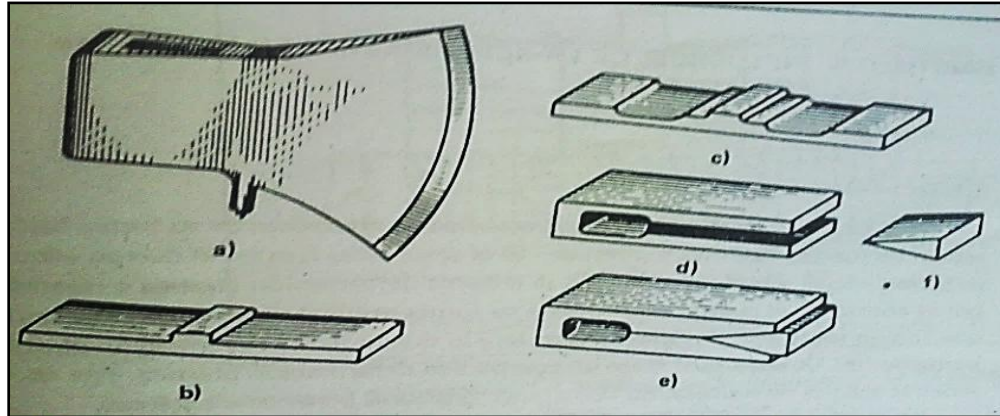


**Figura 5.58 Como hacer una llave por soldadura**

Ejemplo 3: se desea fabricar una cabeza de hacha (**Figura 5.59a**) con una hoja de acero de herramientas y su cuerpo de acero de bajo carbono. Se usara una barra de 60 por 35 milímetros. La cabeza del hacha se fabrica en el orden siguiente:



Mida y corte la longitud necesitada de la barra. Caliente la pieza cortada y estírela como se muestra en la **Figura 5.59b**, degüelle entonces, según se muestra en la **Figura 5.59c**, y doble el material como en la **Figura 5.59d**.



**Figura 5.59 Como hacer una cabeza de hacha**

Prepare una pieza en forma de cuña martillando la hoja de acero de herramienta, su ancho debe ser igual al de la hoja de la cabeza del hacha. Inserte y ajuste esta cuña dentro de la pieza principal de acero de bajo carbono, después de lo cual caliente el material a la temperatura de soldadura y suéldelo. Hecho esto, forje y termine la cabeza de hacha.

#### **5.4. Normas de seguridad**

Esto debe de ir en las prácticas de laboratorio como normas de seguridad

Para evitar accidentes, los herreros deben observar las siguientes normas de seguridad:

1. Emplear solo aquellas tenazas cuyas quijadas se ajustan a la forma de la pieza o material que va a sostener.
2. Ver que los martillos y mandarrias estén fijados con seguridad en sus mangos (cabos).

3. Limpiar totalmente el material caliente, así como el yunque de cualquier acumulación de escorias, con un cepillo de acero o con un rascador; por ningún motivo limpie el yunque con sus manos, aunque estas estén protegidas por guantes.
4. Observar que el yunque no esté nunca húmedo ni grasiento.
5. No intentar nunca forjar acero frío o quemado.
6. Mantener su sitio de trabajo limpio y arreglado; nunca acumule desechos, piezas, recortes calientes o algo que pueda interferir con su trabajo y puede producir accidentes.
7. Trabajar siempre con ropa de trabajo especificada por las normas de seguridad.

**Antes de iniciar el trabajo el herrero debe siempre:**

1. Ver que su equipo está en buenas condiciones, remover toda la escoria, agua y grasa del yunque.
2. Escoger y preparar todas las herramientas que pueda necesitar en su trabajo, ver que estén en buenas condiciones, limpiar todas las trazas de agua y aceite de las herramientas e instrumentos con un trapo y calentar las herramientas que tienen que ser golpeadas antes de comenzar a trabajar.
3. Ver que tiene el número de piezas correspondientes para cumplimentar su tarea. Comprobar el material y ver que este es de buena calidad.
4. Poner en orden su lugar de trabajo.

**Durante el trabajo, el herrero debe:**

1. *Usar cada herramienta solo para el tipo de trabajo para la cual fue diseñada.*
2. *Proteger su equipo y herramientas del deterioro, roturas y limpiar completamente el yunque de suciedades e incrustaciones.*

*3.No permitir jamás acumulaciones de pieza y desperdicios de material en su sitio de trabajo, colocar todas las piezas y material de desperdicio en sus sitios correspondientes.*

Al finalizar su trabajo, el herrero debe limpiar sus herramientas e instrumentos de trabajo con un trapo, colocar todas sus piezas y material de desperdicio en lugar adecuado y poner en orden el área alrededor del yunque.

## **CAPÍTULO 6. INFLUENCIA DE LA DEFORMACION EN LAS PIEZAS FORJADAS**

### **6.1. Deformación Plástica**

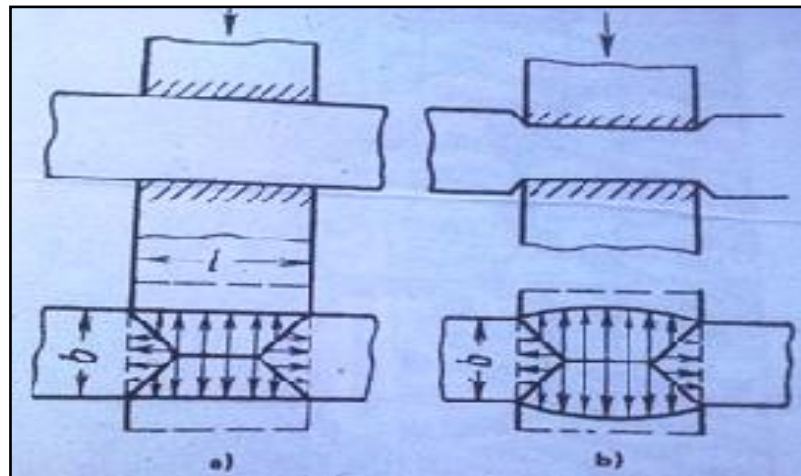
Se entiende por deformación de un cuerpo la alteración de su forma bajo la acción de fuerzas externas o internas. Si al cesar estas fuerzas el cuerpo adquiere su forma inicial, a esta deformación se le llama deformación elástica o reversible. Si, por el contrario, el cuerpo no adquiere su forma original después de cesar las fuerzas que actúan sobre este, la deformación será lo que se llama deformación plástica o permanente. Cuando se somete un cuerpo a la deformación plástica, este no debe mostrar señales de ruptura, no debe tener rajaduras internas o externas.

La forja se basa en la deformación plástica, durante la cual el metal forjado, bajo los golpes de un martillo o la presión de un prensa, cambia su forma sin romper la continuidad del metal, sin producir rajadura alguna. Después de la deformación plástica (forja), el volumen de una pieza de metal dada permanecerá inalterable., el único cambio que ocurrirá será la localización relativa de las partículas de la cual consiste el metal dado.

Durante el procedimiento de trabajo de una pieza el material calentado a la temperatura de forjar, el forjador, con la ayuda de los golpes del martillo o la presión de una prensa, y empleando distintas herramientas, fuerza al metal a que fluya en las direcciones requeridas hasta que obtiene las formas y dimensiones específicas. Para asegurar piezas sanas con un gasto mínimo de tiempo y energía, los forjadores deben dominar las leyes principales del flujo de los metales en estado de plasticidad.

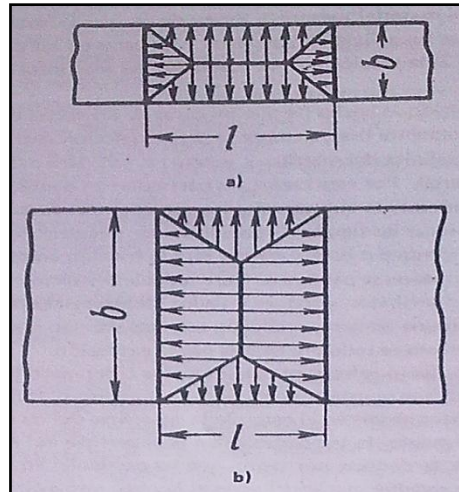
Vamos a considerar como un material cambia su forma bajo la acción de los golpes de un martinete, para el caso de la deformación plástica cuando se martilla o forja.

Bajo los golpes del martinete se reduce la altura del material, pero su longitud y ancho aumentan simultáneamente. Esto se ilustra esquemáticamente en la **Figura 6.1 a y b**. Las flechas indican la dirección del flujo de las partículas del metal comprimidas por el martinete. El volumen del metal comprimido entre la cabeza y la sufridera o yunque del martinete se llama el centro de deformación. La proporción entre el aumento de la longitud y el aumento del ancho de una barra metálica, de los volúmenes de metal desplazados a lo largo de su longitud y ancho, dependerá de la forma del centro de deformación.



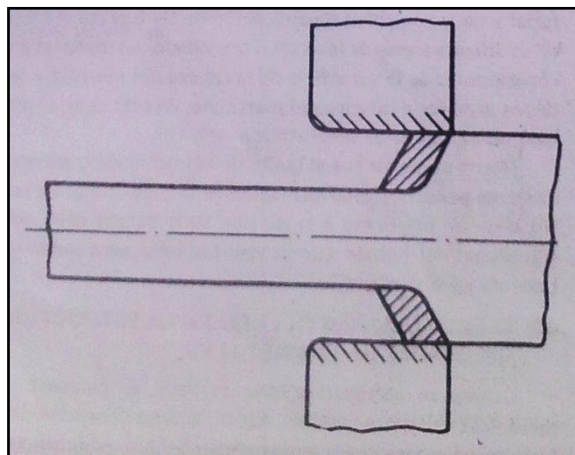
**Figura 6.1 Esquema del flujo del metal: a) Comienzo de la deformación; b) Fin de la deformación**

La forma del centro de deformación **Figura 6.2a, b**, depende de la sección ( $l$ ) de la cabeza del martinete y del espesor ( $b$ ) de la barra. Mientras más largo y más estrecho sea el centro de deformación mayor será el aumento de la barra en longitud y menor en ancho. Tal flujo del metal en la longitud y ancho durante el forjado está gobernado por la ley de menor resistencia. De acuerdo a esta ley, la partícula de metal que está sujeta a la presión de un martinete o prensa trata de liberarse por la vía más corta. En un centro de deformación largo la mayor parte del metal se moverá a lo largo de su longitud, los herreros utilizan hábilmente esta ley.



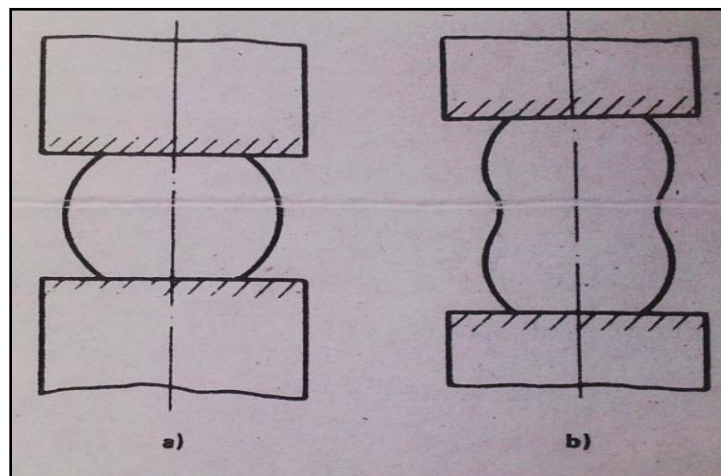
**Figura 6.2 Forma del centro de la deformación**

Las cabezas de los martinetes, así como las caras del yunque y los dados superiores e inferiores con caras estrechas, deben ser empleados para estirar metales o el estirado efectuado con agarres cortos como se muestra en la **Figura 6.3**. Un hecho que debe ser tomado en consideración es que, mientras más baja sea la profundidad de la deformación menos forjado será el metal a través de su sección transversal. El ancho de la cabeza del martinete o parte superior del dado se determina generalmente de la experiencia práctica. Si la pieza va a ser estirada con agarres cortos, el material debe ser movido hacia adelante, movido a través de la maseta o dado del yunque por una parte definida del ancho de la cabeza o dado del martinete para asegurar una superficie lisa.



**Figura 6.3 Estirado (reducido) de una pieza con agarres cortos**

Hemos discutido el efecto de la ley de menor resistencia en el metal para el caso de la deformación plástica de una pieza que se forjará en largo y ancho, entre el martillo y la maseta (dados). Sin embargo, la deformación de una pieza de material es igualmente desigual a lo largo de su altura. Por ejemplo, cuando se recalca un cilindro sólido corto, el metal fluirá menos intensamente en su centro, que en las áreas entre los dados superior e inferior (**Figura 6.4a**). Además, durante su recalado, el material tomará la forma de un barril debido a dos causas. 1) la fricción entre las superficies del material y sus caras de los dados superiores e inferior del martinete; 2) la sección fría de los dados del martinete sobre el metal que se está forjando.



**Figura 6.4** Deformación desigual de una pieza a lo largo de su altura

Debido al hecho de que las caras de los dados del martinete nunca pueden ser perfectamente lisas, siempre se genera fricción entre el metal que se está forjando y las superficies del martillo y yunque o sufridera o dados, donde hacen contacto con el material. Por esta razón, las partículas en contacto con estas superficies fluirán más lentamente que aquellas localizadas en el centro del material. Podemos, por tanto, sacar las siguientes conclusiones, mientras más lisa sea la superficie del martillo y yunque o dados, menor será la fricción entre ellos y el metal consecuentemente menos se pandeará. Para reducir la fricción del metal, las caras de las cabezas de los martinetes, yunques o dados, deben

estar altamente pulimentadas y lubricadas con una grasa especial, aun así, este pandeo nunca se elimina completamente, ya que solo se reducirá en una cierta extensión.

El efecto refrescante de los dados o del martillo y yunque sobre la superficie de la pieza que se está forjando influye también en el flujo del metal, los martillos y yunques fríos absorben el calor de la superficie del metal que se está forjando, consecuentemente, la temperatura en la superficie del material será menor que en su núcleo, se deduce, por tanto, que las partículas en la superficie del material serán menos móviles que aquellas en el núcleo, esto estimula el aumento del pandeo de la pieza cuando se está forjando.

Cuando se recalca una pieza larga, esto es, cuando la longitud del material es 2.5 veces o más que su diámetro o la distancia entre sus lados opuestos, se puede observar una deformación doble semejante a un barril (**Figura 6.4.b**). Esto puede ser explicado por el hecho que depende del grado de reducción en longitud del material y de la velocidad de aplicación de las fuerzas del metal, la deformación del metal es difusa a través de la sección martillada del material a una profundidad definida, comenzando con la superficie de la cabeza del martillo y la maseta o las caras de los dados superiores e inferior del martinete, en este caso, el metal en el centro del trabajo no es objeto de deformación.

Mientras mayor sea el grado de deformación y menor su velocidad, más profundamente penetrara la deformación dentro del metal forjado. Por esta razón, la capacidad de un martinete o la presión de la prensa debe corresponder a la sección transversal del trabajo que se esté forjando para asegurar que el metal se está trabajando apropiadamente.

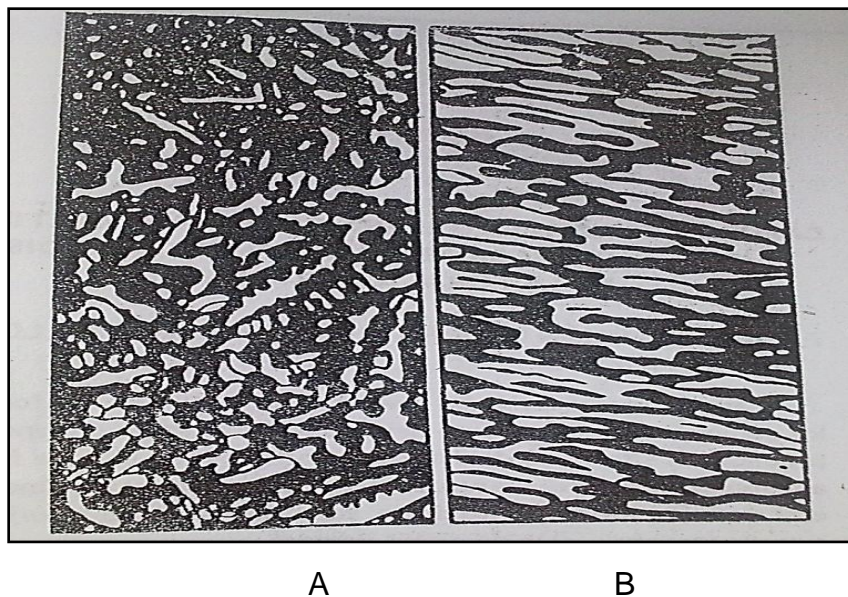
## **6.2. Efecto del martillado en la estructura y propiedades de los metales**

Cuando se martilla o se forja un metal, su macro estructura y sus propiedades mecánicas sufren un cambio. Estos cambios dependen de los siguientes factores:



- 1) *Las condiciones de las temperaturas del procedimiento de forjar*
- 2) *El grado de reducción del área de la sección transversal*
- 3) *El método de forjar*
- 4) *La composición química del metal.*

Al forjarse, la estructura del metal cambia en dos direcciones diametralmente opuestas. La estructura de un lingote, cuando se martilla, se hace fibrosa. La formación de una estructura-fibrosa se caracteriza por el hecho de que, cuando un lingote, digamos, de acero, se forja, las zonas de licuación, burbujas de gas, inclusiones de escoria, etc., y, a bajas temperaturas, los granos del acero (dendritas) se estiran en la dirección en la que fluye el metal. La estructura del lingote cambia de un grano grueso a un grano fino, porque los cristales se trituran bajo los golpes del martinete o la presión de la prensa. La **Figura 6.5 a y b** ilustra la macro estructura del metal fundido y del metal forjado.



**Figura 6.5 Alargado de cristales durante la forja. a) Macroestructura del acero fundido; b) macro estructura del metal después del forjado**

Ocurre también otro cambio estructural de metal cuando se forja metal laminado. Los granos cambian en menor grado, ya que ellos han sido triturados a una cierta extensión durante el procedimiento de laminación. El forjado a diferencia

del laminado, resulta en un mayor grado de desorientación de la fibra del metal. Por esta razón, las propiedades mecánicas de los metales forjados, son mejores que los metales laminados.

Como resultado de forjar a altas temperaturas, los granos del metal crecen simultáneamente con el cambio en los cristales. Esto se debe a la creación de las condiciones que fomentan la combinación de los granos diminutos a formar granos mayores. Este fenómeno del crecimiento del grano, de la combinación de los granos pequeños para formar granos más grandes, se llama recristalización colectiva (transformación alotrópica). A mayor temperatura durante el forjado mayor será el crecimiento del grano.

La recristalización colectiva tiende a disminuir la resistencia de un metal a la deformación. Consecuentemente, los metales deben ser forjados a temperaturas que ayuden al crecimiento del grano (recristalización) y terminados a una temperatura en la cual no ocurra más la recristalización. Esto asegurará piezas de grano fino, las cuales tiene altas propiedades mecánicas.

De lo anterior, podemos concluir que la estructura de un metal, y al mismo tiempo, las propiedades mecánicas de una pieza, dependerán del grado de la trituración de sus granos como resultado de su deformación y recristalización.

La estructura de un metal depende así mismo del factor de reducción, esto es, en la reducción del área de la sección transversal (durante el estirado). Por factor de área de reducción entendemos la relación del área de la sección transversal primitiva de un pedazo de material a aquella de la pieza terminada. A mayor factor de reducción de la sección transversal, esto es, el grado de estiramiento, más fino será el grano y más pronunciada será la estructura a lo largo de la pieza forjada. Los lingotes pueden ser reducidos en mayor grado que el material laminado.

La reducción mínima para el forjado del acero al carbón (en piezas planas) es en 3,0; para aleaciones de acero (partes más planas) 2,0; para vigas y hombres de

aleaciones de acero 1,6. El factor de reducción aceptado para forjar los lingotes es de 3 a 4 (piezas planas) y de 1,5 a 1,75 para vigas y hombros.

Al forjar un lingote, se destruyen los cristales grandes y el metal se hace más denso (se comprime), esto resulta de la eliminación de las cavidades en el lingote, burbujas soldadas, etc., mientras que la estructura lineal cristalina del metal en las secciones laminadas han sido destruidas (trituras) durante el procedimiento de laminación. A mayor temperatura de calentamiento del metal antes del forjado mayor será el factor de reducción.

Si al forjar un trabajo esta ha sido reducido a un grado mayor que el normal, las propiedades mecánicas del metal aumentaran a lo largo de la dirección del estirado y se reducirán en la dirección transversal.

Ejemplo: determinar el factor de reducción de una pieza cuando se estira (se reduce) desde 300 \* 300mm a 200 \* 200mm.

Solución: La sección transversal del área a forjar

$$A_{\text{pieza}} = 20 * 20 = 400\text{cm}^2$$

Sección transversal del área del material

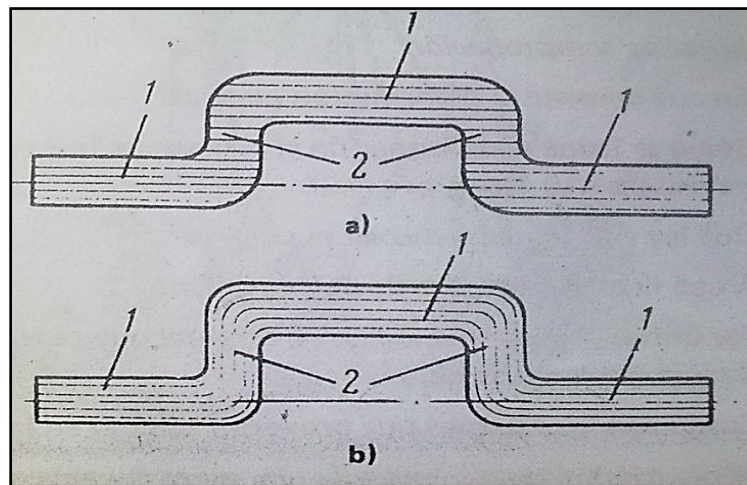
$$A_{\text{material}} = 30 * 30 = 900\text{cm}^2$$

$$\text{Factor de reducción} = \frac{A_{\text{material}}}{A_{\text{de forjar}}} = \frac{900}{400} = 2,25$$

Las propiedades mecánicas de la pieza dependen también del método de su producción. El mismo trabajo puede ser forjado por métodos diferentes, además, las piezas que resultan de estos métodos pueden poseer propiedades mecánicas diferentes. Es siempre necesario tratar de hacer las piezas sin cortar la fibra del metal.

Vamos a estudiar dos métodos para hacer un eje cigüeñal:

Método 1 (figura 6.6a), cortando las manivelas y Método 2 (figura 6.6b) por doblado. Las propiedades mecánicas del eje cigüeñal hecho por doblado, será la misma en todas sus secciones (en muñones 1 y manivelas 2), ya que las fibras del metal no han sido interrumpidas y continúan a lo largo de toda la longitud del eje. Las fibras del metal del eje cigüeñal hecho por el primer método, han sido interrumpidas, y por esta razón, las propiedades mecánicas de este eje serán más pobres que la del eje cigüeñal producido por el procedimiento de doblado.



**Figura 6.6 Dos métodos de forjar un cigüeñal: a) Por calado; B) Por doblado**

## CAPÍTULO 7. REDISEÑO DE LA FRAGUA

En este capítulo se realizaron los cambios, mejoras, de cada uno de los puntos a rediseñar. Así como su solución, mostrando el diseño de sus elementos.

El funcionamiento de la fragua, en cuanto a su tipo de combustible era de forma gaseosa, pero ahora con la constante alza de los precios, el combustible será sustituido por combustible sólido. Para el sistema de inyección, apertura y cierre de aire se instaló un nuevo sistema de tuberías agregando turboventilador, válvulas, etc. para este nuevo sistema de aire se tuvo que hacer una modificación interna en la mesa de la fragua donde se realizó un agujero de 4 pulgadas de diámetro para la inyección de aire (**Ver figura 7.1**). El caudal de este, está controlado mediante una válvula de mariposa de 2 pulgadas.



**Fig. 7.1. Sistema de inyección de aire**

Se realizó un nuevo sistema eléctrico totalmente independiente del resto de los dispositivos encontrados en el laboratorio de fundición, tomando todas las medidas cautelares de seguridad eléctrica y de protección al operario.

En lo que respecta al rediseño se hicieron varias modificaciones:

- a. Turboventilador
- b. Tubería y accesorios
- c. Sistema de combustible
- d. Sistema eléctrico

### **7.1. Turboventilador**

Se agregó un turboventilador al sistema el cual fue colocado a un costado de la fragua, es necesario este dispositivo ya que es de mucha importancia en este trabajo, porque es el que provee de flujo de aire al sistema, ya que de este modo se regula la intensidad del fuego.

#### **Características técnicas**

Este dispositivo está anclado mediante 4 pernos de expansión de ½ pulgada, con esto se logra una buena base para evitar averías, desalineación o fugas de aire en la tubería, corrigiendo también las vibraciones causadas por el mismo turboventilador.

### **7.2 Motor eléctrico**

Es una máquina eléctrica rotativa, capaz de convertir la energía eléctrica trifásica suministrada, en energía mecánica. La energía eléctrica trifásica origina campos magnéticos rotativos en el bobinado del estator lo que provoca que el arranque de estos motores no necesite circuito auxiliar, son más pequeños y livianos que uno monofásico de inducción de la misma potencia, debido a esto su fabricación representa un costo menor.

Los motores eléctricos trifásicos, se fabrican en las más diversas potencias, desde una fracción de caballo hasta varios miles de caballos de fuerza (HP), se los construye para prácticamente, todas las tensiones y frecuencias (50 y 60 Hz) normalizadas y muy a menudo, están equipados para trabajar a dos tensiones nominales distintas.

Por su variedad de potencia y tamaño son muy usados en la industria no siendo así en el sistema residencial y doméstico debido fundamentalmente a que en este sector no llega la corriente trifásica. En la industria se emplean para accionar máquinas-herramienta, bombas, montacargas, ventiladores, extractores, elevadores, grúas eléctricas, etc.

*Datos de fábrica*

- Marca =Mez italiana
- Tipo= ZAP 60.2
- Hp =1.5
- Voltaje= 220-380 v 3~
- Giro= 3,300 rpm
- Frecuencia= 60Hz
- Pf =0.8



**Fig.7.2. Motor eléctrico, ventilador**

### 7.3. Ventilador

El ventilador consiste de una serie de aspas rotativas que actúan sobre el aire y las dispersan en un medio determinado.

Generalmente, las aspas, fundamentales en los ventiladores, están contenidas dentro de algún tipo de estructura o caja. Esto le permite dirigir el flujo de aire hacia la dirección deseada y también lo hace más seguro, las cuales comúnmente se mueven con la suficiente fuerza y velocidad como para que podamos considerarlos peligrosos.

Es por esto que en la succión de aire de nuestro ventilador se instaló una cubierta, esto con el fin de proteger las aspas en caso de que succione algún tipo de basura u objeto que puede permitir el fallo total de nuestro sistema, así como también descuidos de parte de los usuarios. **Ver figura 7.3**

Los ventiladores producen flujos de aire con alto volumen y baja presión, a diferencia de los compresores, que producen altas presiones a volúmenes comparativamente bajos. La mayoría de los ventiladores modernos son impulsados por motores eléctricos como es en nuestro caso.



**Fig. 7.3. Capa protectora, Succion del ventilador**





**Fig. 7.4 Ventilador, Motor eléctrico**

*Datos de fábrica*

- Marca= mgro
- Modelo= MA 250S
- Flujo=  $500 \text{ m}^3/\text{h} = 294 \text{ cfm}$
- Presión Hst\* (baja presión)= 100
- Giro= 3,400 rpm

#### 7.4. Tubería y accesorios

Este es el canal por donde el aire es conducido hacia su combustión con el combustible a trabajar, además la cual se observa en la **Figura. 7.5**, es que se puede regular el flujo de aire utilizándose una válvula de mariposa. Para esto se cortaron las tuberías dándoles las medidas adecuadas y se maquinaron en el torno para realizar las roscas.



**Fig. 7.5. Válvula de mariposa**

Se perforo un agujero de 2 pulgadas por la parte inferior de la fragua para la alimentación de aire al sistema. Así como también en la parte superior donde se encuentra el combustible, se perforo un agujero en el ladrillo refractario de 4 pulgadas de diámetro con la ayuda de un anillo reductor Galvanizado 4 pulgadas a 2 pulgadas.



**Fig.7.6. Tubería de dirección del flujo de aire**

En la parte inferior existe un dámper que garantiza la evacuación de la ceniza y escoria que desciende del hogar de la fragua. **Ver figura 7.6**

### **7.5. Sistema de combustible**

Anteriormente estaba trabajando con gas propano, por lo que se hicieron todos los cambios y modificaciones para utilizarlo con el nuevo combustible, acatando todas las normas de seguridad e higiene.

Se realizó un trabajo en los costados de la fragua, de forma que se soldaron láminas de  $\frac{1}{2}$  pulgadas de acero, esto para mantener un deposito adecuado de carbón y que no se escape por los costados. **Ver figura 7.7**



**Figura 7.7. Lamina protectora**

En el trabajo se proponen tres combinaciones de combustibles sólidos, carbón vegetal, carbón coque, y 50% carbón vegetal+50% carbón coque. **Ver figura 7.8.**

Se determina sobre un diseño experimento cuál de ellos es el más apropiado de acuerdo a las condiciones de nuestro laboratorio.



**Fig.7.8. Combustible de la Fragua**

### 7.6. Sistema eléctrico

Se tomaron diferentes componentes y requirió hacer una nueva instalación eléctrica, se reajusto completamente la carga con sus protectores y guarda motores para el turboventilador, independiente de todo el cableado existente en el laboratorio. A continuación el diagrama unifilar.

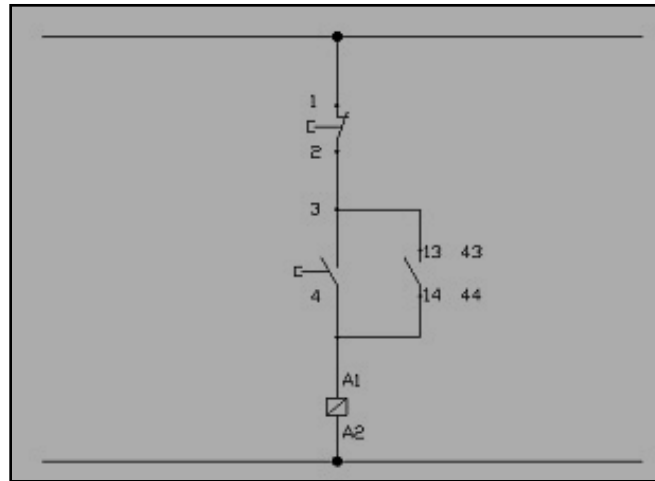


Fig.7.9. Circuito de mando del turboventilador

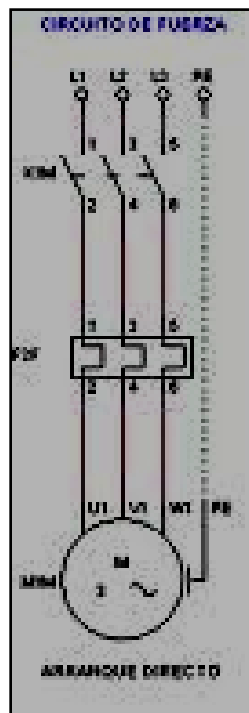


Fig. 7.10 Circuito de fuerza

### 7.7. Panel eléctrico

El panel eléctrico recibe la energía principal de un subpanel principal y distribuye la corriente eléctrica a los diversos dispositivos conectados. Tomando las medidas de seguridad eléctricas.



**Fig. 7.11 Panel electrico**

### 7.8. Botonera

Esta destinado a la maniobra y la proteccion del turboventilador, esta incorporado ala mesa de la fragua, la temperatura no puede afectar esta zona ya que esta alejada de zona de trabajo. Cabe señalar que este dispositivo electrico es importante porque de el depende la parada y marcha del motor. Haciendo seguro el manejo tanto electrico como de la fragua misma al trabajar con temperaturas altas.



**Fig.7.12. Botonera**

## 7.9. Sistema de evacuación de los gases



**Fig. 7.13 Tubería para la evacuación de los gases**

El sistema de evacuación de los gases ya se encontraba instalado, y funciona correctamente, de este sistema depende mucho del confort de los usuarios mientras se está trabajando en la fragua, ya que su función principal es evacuar de manera inmediata los gases que se generan en la fragua, y de esta manera no afecta ningunos de los laboratorios que se encuentran cercanos a este.

## CAPÍTULO 8. DISEÑO FACTORIAL

### ANOVA Multifactorial

Este procedimiento está diseñado para construir un modelo estadístico describiendo el impacto de dos o más factores categóricos en este caso los factores que influyen en la temperatura y tiempo para identificar qué tipo de combustible o si la mezcla de ellos es la más apropiada. Se realizaron pruebas para determinar si hay o no diferencias significativas entre las medias a diferentes niveles de los factores y si hay o no interacciones entre los factores. Por lo tanto para determinar si los factores tienen o no un efecto significativo en la variable dependiente, se realiza un análisis de varianza. Los resultados serán desplegados en las tablas siguientes, dependiendo del tipo de combustible que se realizaron las pruebas.

#### 8.1. ANOVA Multifactorial- Temperaturas

Variable dependiente: TEMPERATURAS

Factores:

MEZCLA

Temperatura CODF\*

\*Temperatura Codificada

Corrida	Tipo de combustible que se utilizó en las prácticas	Temperatura alcanzada	Tiempo alcanzado
1	CVG* (Carbón Vegetal)	800°C	137 minutos ( 2,2 hrs)
2	CQ* (Coque)	1500°C	128 minutos (2,13hrs)
3	VC* (Carbón vegetal-Coque) Mezcla	854°C-1100°C	104 minutos (1,73 hrs)

Número de casos completos: 73



**El StatAdvisor**

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de varios factores para TEMPERATURAS. Realiza varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre TEMPERATURAS. También evalúa la significancia de las interacciones entre los factores, si es que hay suficientes datos. Las pruebas-F en la tabla ANOVA le permitirán identificar los factores significativos. Para cada factor significativo, las Pruebas de Rangos Múltiples le dirán cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La Gráfico de Medias y la Gráfica de Interacciones le ayudarán a interpretar los efectos significativos. Los Gráficos de Residuos le ayudarán a juzgar si los datos han violado los supuestos subyacentes al análisis de varianza.

**Análisis de Varianza para TEMPERATURAS - Suma de Cuadrados Tipo III**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
<b>A:MEZCLA</b>	962042.	2	481021.	9.03	0.0003
<b>B:TCODF</b>	2.92899E6	3	976330.	18.34	0.0000
<b>RESIDUOS</b>	3.56767E6	67	53248.8		
<b>TOTAL (CORREGIDO)</b>	7.52651E6	72			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

**El StatAdvisor**

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de TEMPERATURAS en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la

significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que 2 valores-P son menores que 0.05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre TEMPERATURAS con un 95.0% de nivel de confianza.

### Pruebas de Múltiple Rangos para TEMPERATURAS por MEZCLA

Método: 95.0 porcentaje Duncan

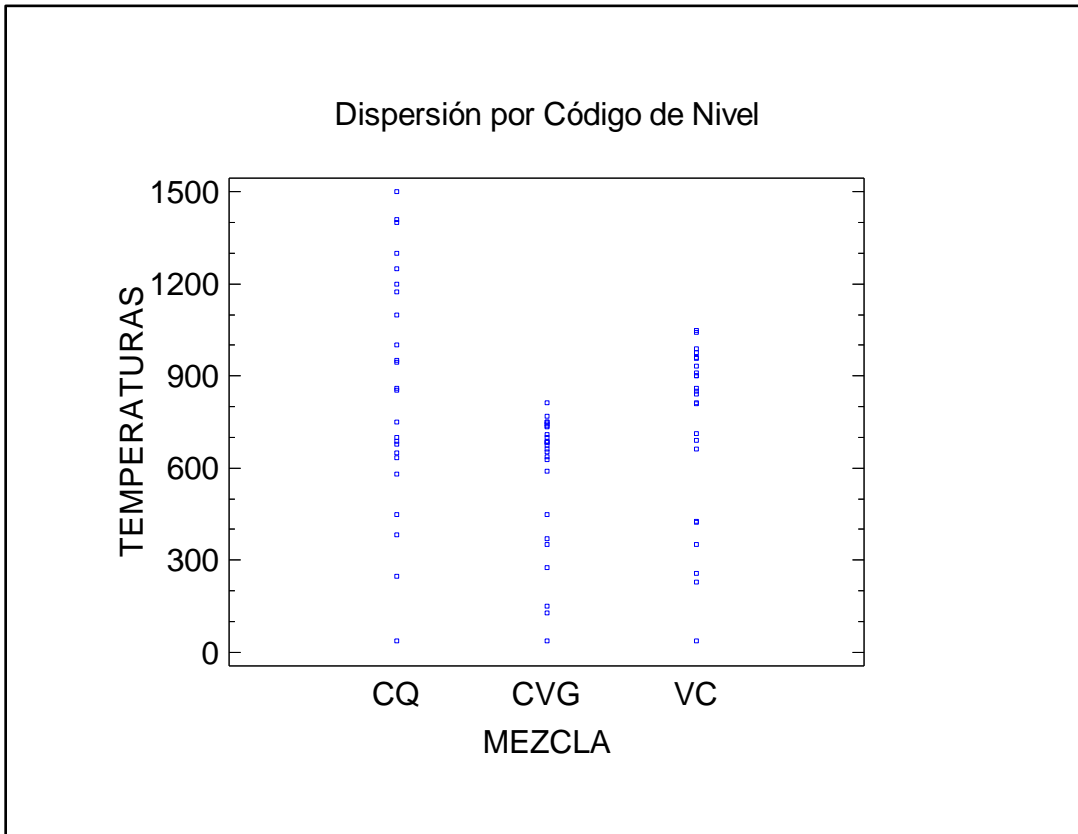
<b>MEZCLA</b>	<b>Casos</b>	<b>Media LS</b>	<b>Sigma LS</b>	<b>Grupos Homogéneos</b>
CVG	25	584.198	46.1884	X
VC	24	732.292	47.1031	X
CQ	24	864.333	47.1031	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>
CQ - CVG	*	280.135
CQ - VC		132.042
CVG - VC	*	-148.093

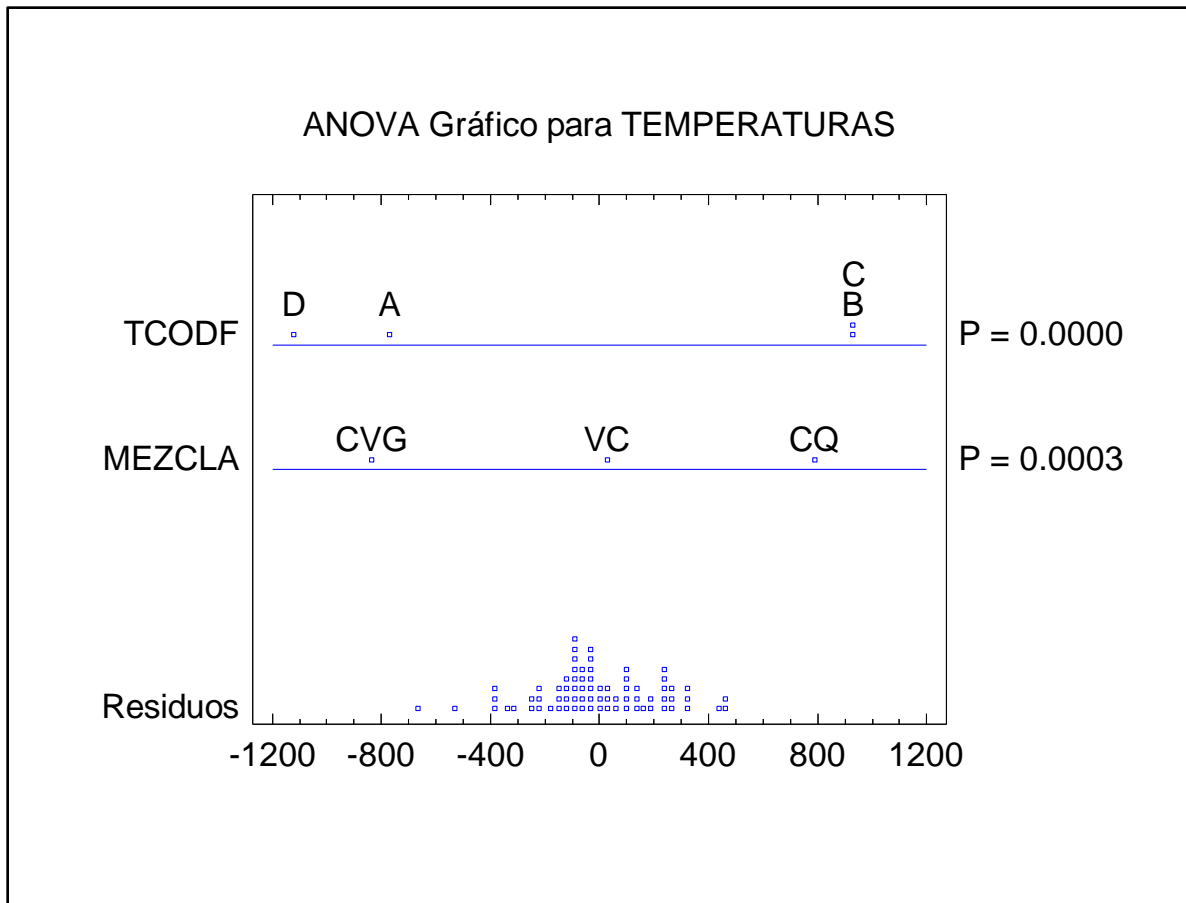
\* indica una diferencia significativa.

### El StatAdvisor

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.



El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de comparación múltiple de Duncan. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.



## 8.2. ANOVA Simple- Temperaturas por MEZCLA

Variable dependiente: TEMPERATURAS

Factor: MEZCLA

Número de observaciones: 73

Número de niveles: 3

### El StatAdvisor

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de un factor para TEMPERATURAS. Construye varias pruebas y gráficas para comparar los valores medios de TEMPERATURAS para los 3 diferentes niveles de MEZCLA. La prueba-F en la tabla ANOVA determinará si hay diferencias significativas entre las medias. Si las hay, las Pruebas de Rangos Múltiples le dirán cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Si le preocupa la presencia

de valores atípicos, puede elegir la Prueba de Kruskal-Wallis la cual compara las medianas en lugar de las medias. Las diferentes gráficas le ayudarán a juzgar la significancia práctica de los resultados, así como le permitirán buscar posibles violaciones de los supuestos subyacentes en el análisis de varianza.

### Resumen Estadístico para TEMPERATURAS

MEZCLA	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
CQ	24	864.333	383.28	44.3439%	36.0	1500.0	1464.0
CVG	25	574.88	224.175	38.9951%	36.0	814.0	778.0
VC	24	732.292	288.307	39.3705%	36.0	1048.0	1012.0
Total	73	721.795	323.319	44.7937%	36.0	1500.0	1464.0

MEZCLA	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
CQ	-0.420563	-0.477804
CVG	-2.58591	0.393143
VC	-2.14392	0.0504641
Total	-0.210236	0.197462

### El StatAdvisor

Esta tabla muestra diferentes estadísticos de TEMPERATURAS para cada uno de los 3 niveles de MEZCLA. La intención principal del análisis de varianza de un factor es la de comparar las medias de los diferentes niveles, enlistados aquí bajo la columna de Promedio. Selecciones Gráfico de Medias de la lista de Opciones Gráficas para mostrar gráficamente las medias.

ADVERTENCIA: El sesgo estandarizado y/o la curtosis estandarizada se encuentran fuera del rango de -2 a +2 para los 2 niveles de MEZCLA. Esto indica algo de no normalidad significativa en los datos, lo cual viola el supuesto de que los datos provienen de distribuciones normales. Tal vez quisiera transformar los datos, ó utilizar la prueba de Kruskal-Wallis para comparar las medianas en lugar de las medias.

**Tabla ANOVA para TEMPERATURAS por MEZCLA**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1.02986E6	2	514928.	<b>5.55</b>	<b>0.0058</b>
Intra grupos	6.49666E6	70	92809.4		
Total (Corr.)	7.52651E6	72			

### El StatAdvisor

La tabla ANOVA descompone la varianza de TEMPERATURAS en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 5.54824, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de TEMPERATURAS entre un nivel de MEZCLA y otro, con un nivel del 95.0% de confianza. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, seleccione Pruebas de Múltiples Rangos, de la lista de Opciones Tabulares.

### 8.3. Pruebas de Múltiple Rangos para TEMPERATURAS por MEZCLA

Método: 95.0 porcentaje LSD

<b>MEZCLA</b>	<b>Casos</b>	<b>Media</b>	<b>Grupos Homogéneos</b>
<b>CVG</b>	25	574.88	X
<b>VC</b>	24	732.29	XX
		2	
<b>CQ</b>	24	864.33	X
		3	

<b>Contraste</b>	<b>Sig.</b>	<b>Diferencia</b>	<b>+/- Límites</b>
		<b>a</b>	
<b>CQ - CVG</b>	*	<b>289.453</b>	173.636
<b>CQ - VC</b>		132.042	175.399
<b>CVG - VC</b>		-157.412	173.636

\* indica una diferencia significativa.

#### El StatAdvisor

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. Se ha colocado un asterisco junto a 1 par, indicando que este par muestra diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este

método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

### Verificación de Varianza

	<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
Levene's	3.46821	<b>0.0366278</b>

### El StatAdvisor

El estadístico mostrado en esta tabla evalúa la hipótesis de que la desviación estándar de TEMPERATURAS dentro de cada uno de los 3 niveles de MEZCLA es la misma. De particular interés es el valor-P. Puesto que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95.0% de confianza. Esto viola uno de los supuestos importantes subyacentes en el análisis de varianza e invalidará la mayoría de las pruebas estadísticas comunes.

### 8.4. Prueba de Kruskal-Wallis para TEMPERATURAS por MEZCLA

<i>MEZCLA</i>	<i>Tamaño Muestra</i>	<i>Rango Promedio</i>
<b>CQ</b>	24	44.6667
<b>CVG</b>	25	26.0
<b>VC</b>	24	40.7917

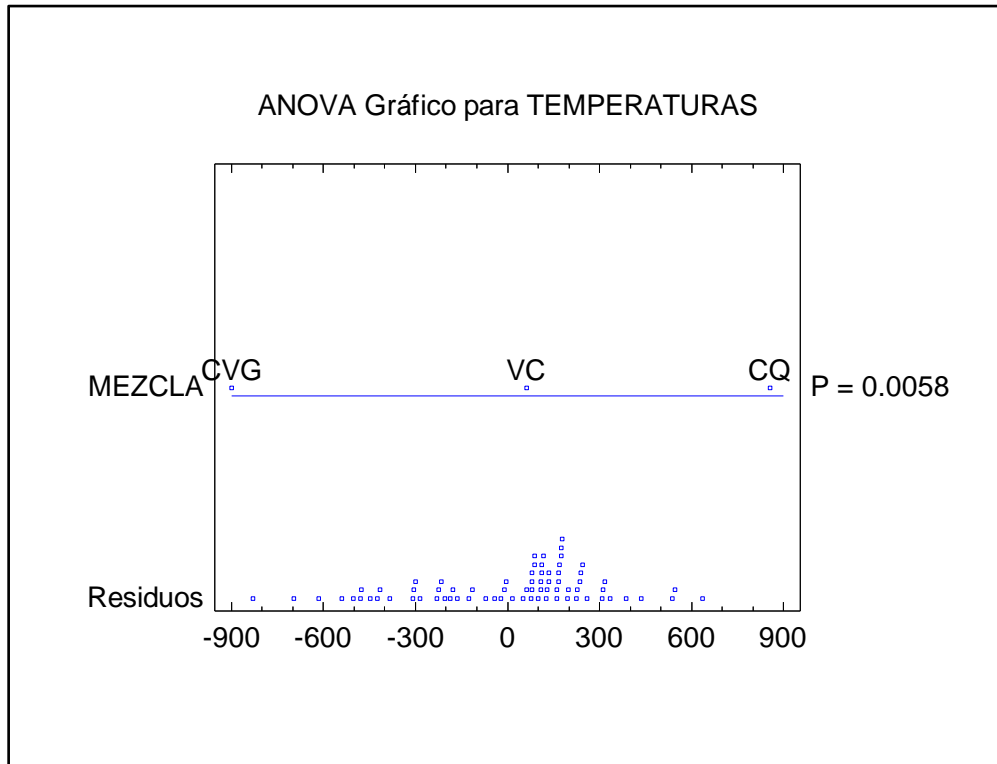
Estadístico = 10.6222 Valor-P = **0.0049366**

### El StatAdvisor

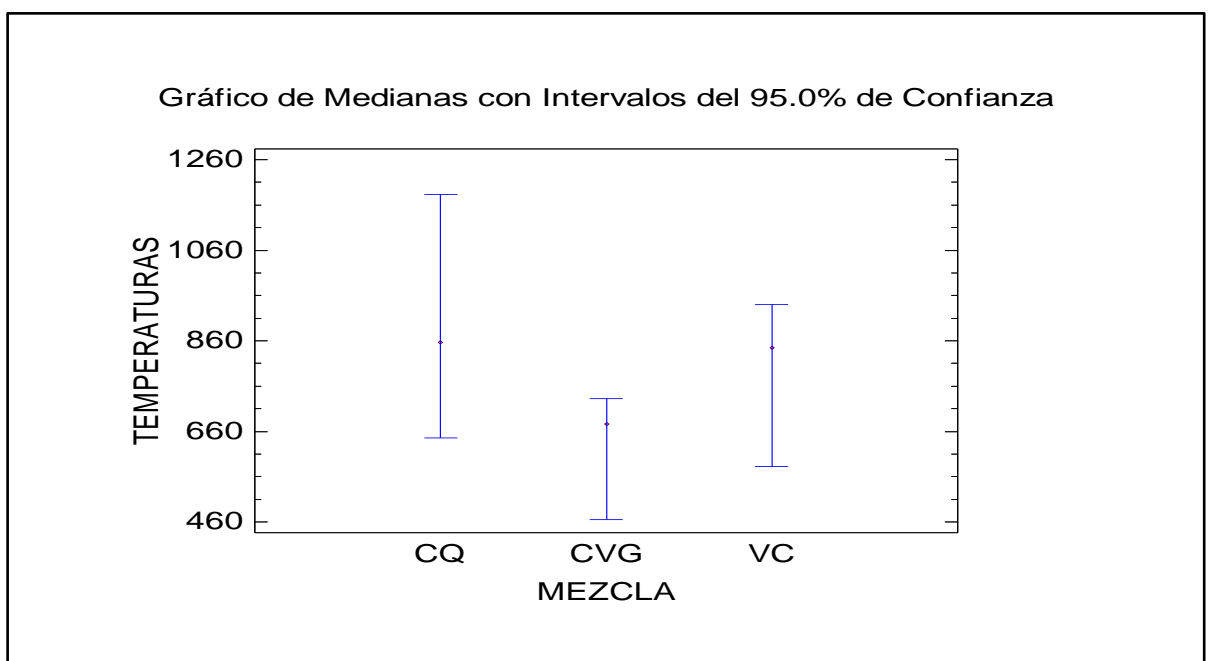
La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de TEMPERATURAS dentro de cada uno de los 3 niveles de MEZCLA son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango (rank) promedio para los datos de cada nivel.

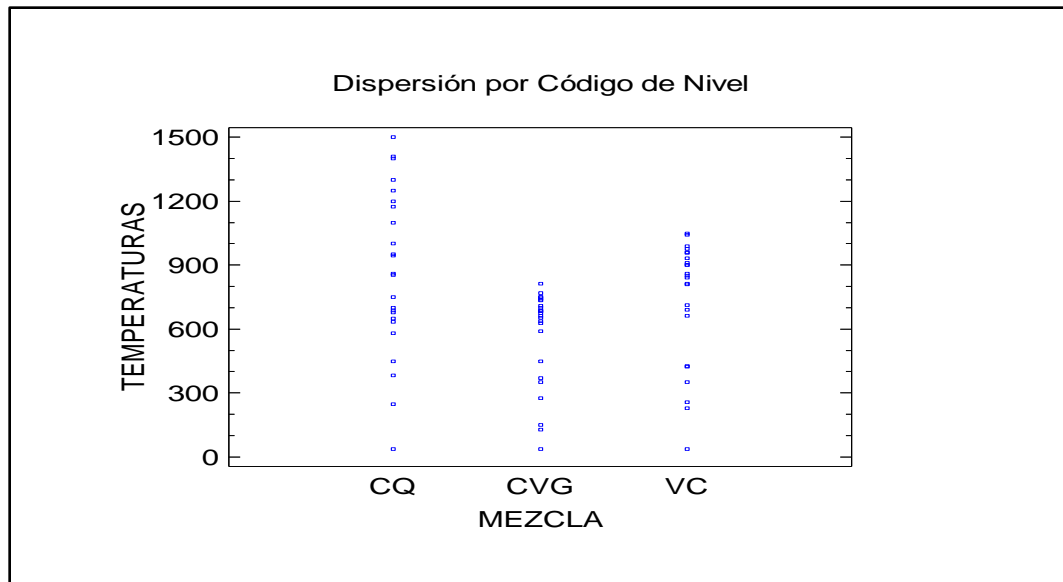


Puesto que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza



Para determinar cuáles medianas son significativamente diferentes de otras, seleccione Gráfico de Caja y Bigotes, de la lista de Opciones Gráficas, y seleccione la opción de muesca de mediana.





### 8.5. Resumen

Estas graficas fueron la conclusión del programa StatGraphics, el cual nos arroja un resultado significativo y a la vez crucial para seleccionar de manera adecuada el tipo de combustible a utilizar.

El cual resulta un 95% de confianza al utilizar la mezcla CVG\* (Carbón vegetal-Coque), ya que mantiene el tiempo suficiente y la temperatura de recristalización del metal que se va a utilizar.

También nos ofrece una visualización amplia, no solo del aspecto del comportamiento de las cualidades de cada combustible sino de su desempeño y eficiencia a la hora de comparar con otro tipo de combustible.

Cabe destacar que las estadísticas mostradas en las tablas evalúan la hipótesis de que la desviación estándar de TEMPERATURAS dentro de cada uno de los 3 niveles de MEZCLA es la misma. De particular interés es el valor-P. Puesto que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95.0% de confianza

## CAPÍTULO 9. RESULTADO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

### 9.1. Introducción y Desarrollo

En este capítulo se estudió, analizo y grafico los resultados obtenidos en la realización de la práctica de forjado libre, con la ayuda de un pirómetro para monitorear la temperatura y un cronometro para el tiempo.

La masa del metal fue la misma en cada una de las prácticas que fue de 360gr; 4 varillas de hierro para construcción de  $\frac{3}{4}$  de 12 pulgadas de largo; y el combustible fue la masa de metal multiplicado 10 veces. Esto fue debidamente calculado ya que se realizaron dos pruebas anteriores debido a que el combustible se quemaba con anticipación y no se obtenía ni el tiempo de trabajo ni la temperatura de recristalización que el metal necesita para su estado de plasticidad. Obteniéndose así un cálculo simple para el manejo de la cantidad de combustible necesitado para trabajar.

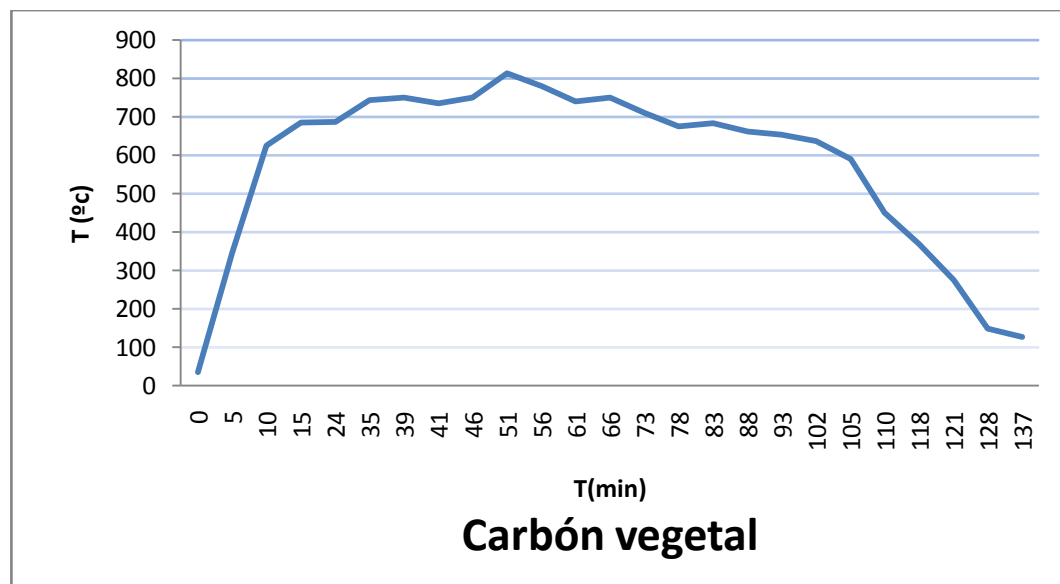
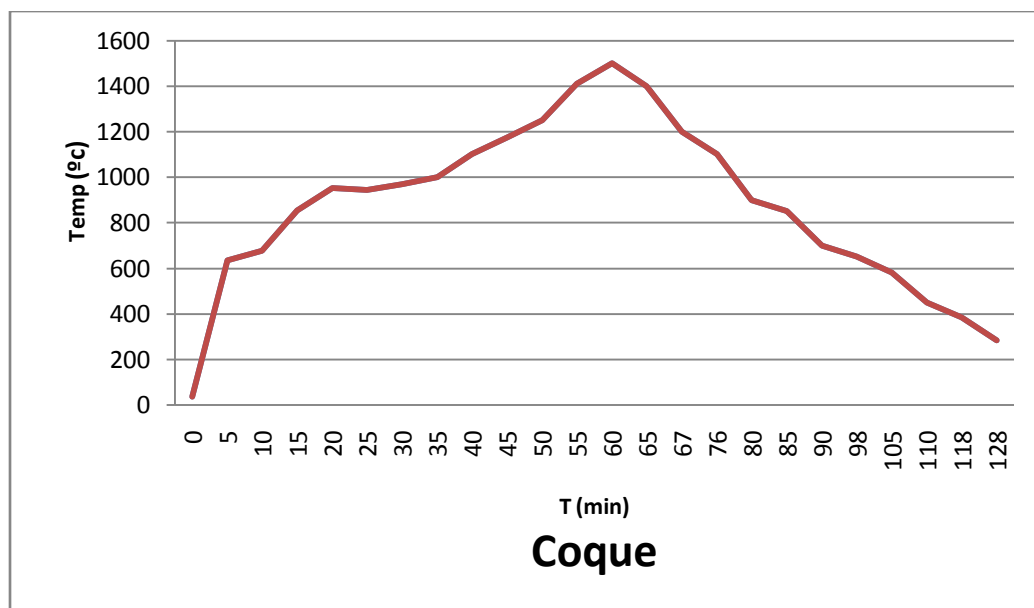


Tabla.9.1. Resultados del Carbón Vegetal

**T (min).** Este es el tiempo en el cual se realizó la práctica con carbón vegetal en el cual duro alrededor de dos horas con treinta minutos.

**Temp (°c).** Ésta es la temperatura registrada, obtenida durante la práctica con un intervalo de 5 a 15 minutos aproximadamente, con una temperatura máxima de 800°c.

Se puede observar que el carbón vegetal no logro la temperatura de recristalización, obteniéndose en 10 minutos la máxima temperatura, ya que después de esto se consume rápidamente, por lo que no se obtiene el tiempo requerido para hacer las diferentes operaciones.

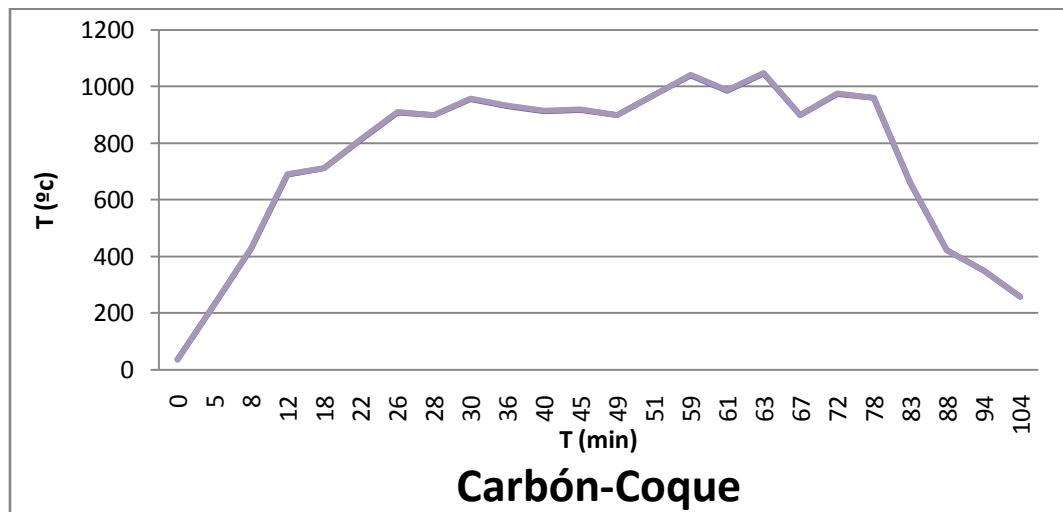


**Tabla.9.2. Resultados del Coque**

**T (min).** Este es el tiempo en el cual se realizó la práctica con carbón Coque en el cual duro aproximadamente dos horas.

En esta grafica claramente se observa una temperatura elevada aproximadamente de 1500°c, lo que nos puede decir que el coque tiene alto

poder calorífico, pero el tiempo que este lo logra muestra una caída dramática por lo que no es suficiente el tiempo de permanencia. Otro problema que se encontró es que se necesita de otro agente como es el gas kerosene en grandes cantidades para que este comience a quemarse y un poco de leña en forma de chips. Un punto importante a resaltar es su alta temperatura, ya que esta temperatura oxida el metal y lo quema. Hay que tener mucho cuidado con esta temperatura y el metal cuando se está sacando y trabajando fuera de la fragua ya que puede originar quemaduras sino se usan los dispositivos de seguridad y sensaciones de extremo calor, por lo que puede tornarse un ambiente no apto para las prácticas.



**Tabla.9.3. Resultados del Carbón-Coque (MIXTO)**

T (min). Este es el tiempo en el cual se realizó la practica con carbón Coque y carbón vegetal en el cual el experimento duro aproximadamente una hora con cincuenta y cuatro minutos.

Claramente se observa un mejor comportamiento del tiempo y temperatura, dando lugar a trabajar bajo este esquema de trabajo, la temperatura de recristalización es la óptima y el tiempo da lugar para realizar los diferentes tipos de trabajos.

Otro punto a resaltar es que todos estos valores se analizaron bajo un programa estadístico para conocer el mejor rendimiento, lo que nos arrojó que fue mejor la mezcla carbón vegetal-coque.

Para calcular la mezcla, fue la misma masa del metal que en los casos anteriores multiplicado 10 veces (3,600gr), la masa del combustible fue de 50% de carbón vegetal, 50% de coque.

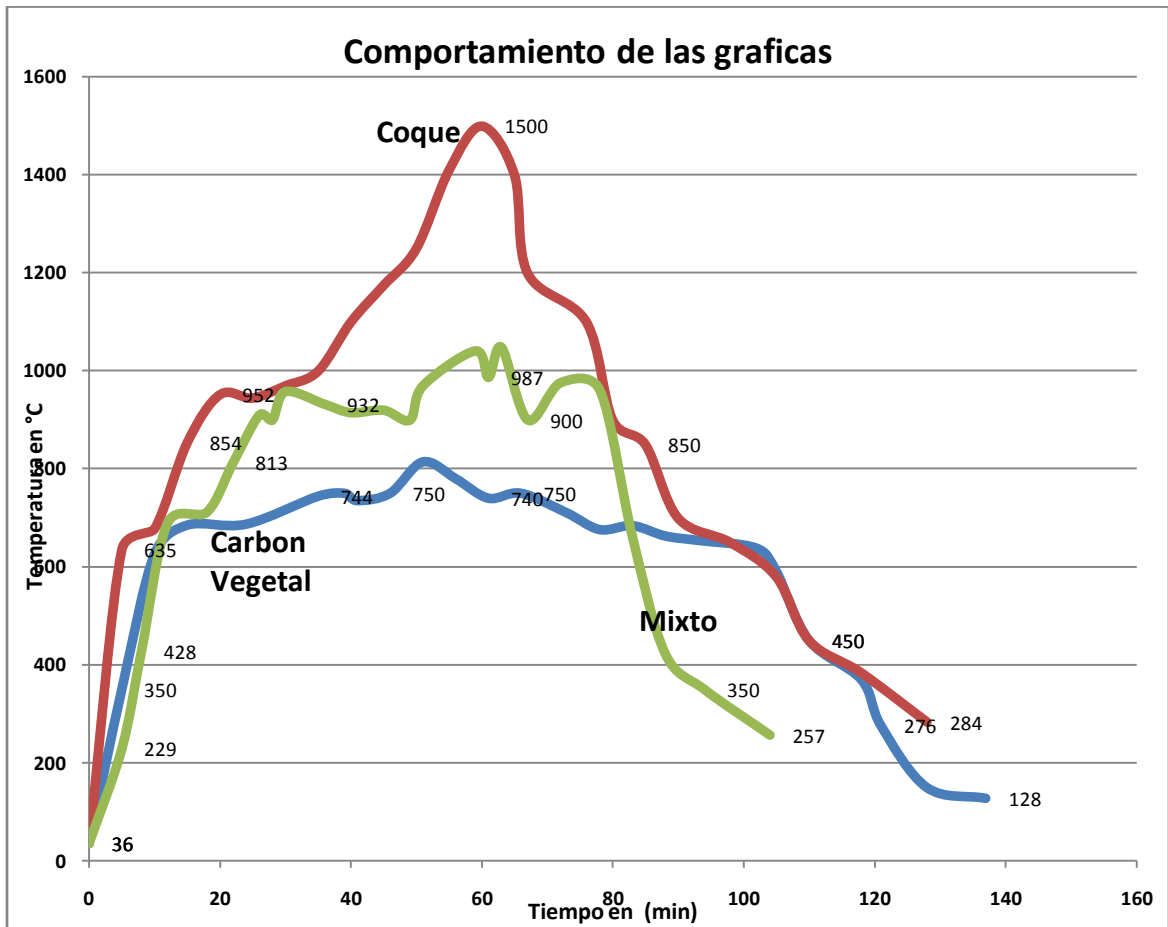


Tabla 9.4. Comportamiento de las graficas

En esta grafica se puede observar el comportamiento de cada uno de los combustibles, donde representa las prácticas obtenidas en el laboratorio.

**Resultados:**

1. En el empleo de carbón vegetal la temperatura de recristalización es muy baja.
2. En la curva de Coque se alcanzan altas temperaturas que son un peligro para el quemado del acero y su agrietamiento, el periodo de tiempo es muy reducido.
3. La combinación Coque-Vegetal es la que permite el mayor tiempo de utilización en la fragua para el trabajo realizado, y alcanza temperaturas de recristalización aceptables.

## **CAPÍTULO 10. TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS METALES**

### **10.1. Nociones Generales**

Las propiedades mecánicas indispensables de los metales que aseguran un trabajo normal de las piezas de las máquinas y de las herramientas, pueden obtenerse cambiando la composición química o la estructura del metal. La estructura de los metales puede cambiarse con el tratamiento térmico.

Se llama tratamiento térmico al proceso de cambio de estructura de los metales y de las aleaciones al calentarlos hasta una temperatura determinada, a la duración de ese calentamiento y al seguido enfriamiento de las aleaciones metálicas, que se hacen con el fin de comunicar a estos las propiedades mecánicas (tenacidad, dureza) y tecnológicas necesarias (resistencia al desgaste, hacerlas de fácil elaboración) o propiedades químicas y físicas especiales, así como también para cambiar su tensión.

El tratamiento térmico permite cambiar las propiedades mecánicas y físicas de las aleaciones en unos límites muy amplios.

Se someten a tratamiento térmico, tanto las aleaciones del hierro como al carbono, además algunas aleaciones de metales no ferrosos. Sin embargo, en la industria mecánica, el tratamiento térmico del acero es el más difundido.

En la fabricación de piezas el tratamiento térmico es generalmente una de las operaciones finales y por esto, al efectuarlo, es muy importante eliminar todo aquello que pueda conducir a la fabricación de piezas defectuosas o de baja calidad.

De las propiedades del acero y de las piezas de este, dependen de la temperatura y velocidad del calentamiento, de la temperatura y duración de este y de la velocidad y temperatura final de enfriamiento. El conjunto de estas condiciones se denomina régimen del tratamiento térmico.



Calentamiento: En el tratamiento térmico tiene una gran importancia el cumplimiento de las exigencias siguientes:

1. El calentamiento debe ser gradual, es decir, no demasiado rápido.
2. La pieza debe calentarse uniformemente por todos los lados.
3. En el calentamiento no debe permitirse el contacto directo de las piezas con la llama.
4. Al calentarse se debe asegurar la mediación de la temperatura.

## **10.2. Clases de Tratamiento Térmico**

En la actualidad se emplean diferentes clases de tratamiento térmico destinado para diferentes fines. Las clases principales de tratamiento térmico son: el recocido, el normalizado, el temple y el revenido. Además de estos, se usa ampliamente el tratamiento termoquímico del acero.

### **10.2.1. Recocido**

Es una operación de tratamiento térmico que consiste en calentar el acero mantenerlo a una temperatura dada y enfriarlo a continuación lentamente junto con el horno o en arena, a un velocidad 2-3°C por minuto. Como resultado del recocido se forma una estructura estable del acero, libre de tensiones residuales.

El recocido es una de las operaciones principales de gran escala del tratamiento térmico del acero.

#### Fines del Recocido:

1. Disminuir la dureza y elevar la ductilidad para facilitar el trabajo de los metales a corte.
2. Disminuir la tensión interior que surge después de la elaboración a presión (forjado, estampado), elaboración mecánica, etc.
3. Eliminar la fragilidad y elevar la resistencia al choque.

4. Eliminar la heterogeneidad estructural en la composición del material que surge como resultado de la segregación.
5. Cambiar las propiedades del metal endurecido.

Según las tareas planteadas, el recocido se efectúa a temperaturas diferentes y puede ser de dos clases: Incompleto y Completo.

Como norma general, la temperatura del recocido debe ser superior en 20-30°C a los 723°C (punto crítico), que es la temperatura a la que tiene lugar el cambio fundamental en la estructura interna del acero.

La velocidad de enfriamiento durante el recocido debe ser pequeña. Los aceros al carbono se enfrían en el recocido a un velocidad de 100- 200 °C por hora; los aceros de bajo carbono se enfrían a un velocidad de 50-60°C por hora; los de aleaciones ricas aún más despacio. Generalmente, las piezas en el recocido se enfrían conjuntamente con el horno hasta la temperatura normal.

El objetivo del recocido incompleto es el de eliminar las tensiones internas, el acero con cualquier contenido de carbono se calienta hasta 750-760°C.

En el recocido completo el acero con contenido de carbono superior a 0.8 por ciento se calienta también hasta 750-760°C, y si el contenido es menor, es menester elevar gradualmente la temperatura del recocido hasta 930-950°C. Las piezas se mantienen a las temperaturas indicadas hasta el calentamiento total. La duración del calentamiento depende de la forma de las piezas. Seguidamente las piezas se enfrían lentamente hasta la temperatura normal 20°C. La calidad del recocido se determina por el aspecto de la fractura.

Aplicación:

En los trabajos de forja es preciso, con frecuencia someter las piezas repetidamente y durante largo tiempo a la acción de elevadas temperaturas, y se calienta hasta la temperatura de temple. Si el material es acero al carbono se sumerge en agua, con los aceros aleados se sumerge en aceite.

### **10.2.2. Normalizado**

Es una de las variedades del recocido y se diferencia de este en que el enfriamiento de las piezas que se trabajan se efectúa a la intemperie. Al normalizado se someten los semiproductos estampados y forjados, tanto de acero al carbono como de acero de liga y también las piezas cementadas. El objeto del normalizado es mejorar la Microestructura del acero, elevar las propiedades mecánicas de este y prepararlo para el tratamiento térmico sucesivo. Con el normalizado se puede eliminar el recalentamiento después de estampado y forjado de las piezas, se puede eliminar el recalentamiento después de la soldadura de piezas y eliminar las tensiones en el cordón de la soldadura. Después del normalizado de moldaduras estas tiene límite de tenacidad y resistencia bastante alto, y también tiene elevada resistencia al choque. Para algunas marcas de aceros al carbono y aceros especiales el normalizado es una operación definitiva del tratamiento térmico.

### **10.2.3. Temple**

Se llama Temple a la operación térmica que aumenta la dureza y resistencia de las piezas que se elaboran. El temple se efectúa calentando el acero hasta una temperatura determinada, manteniéndolo a esa temperatura y enfriándolo bruscamente a continuación en medios diferentes: agua, en una solución acuosa de sosa cáustica o de sal blanca, en aceite, así como también en plomo, salitre, álcalis, etc.

Los resultados del temple dependen de la marca del acero y del contenido de carbono.

La duración del calentamiento depende de la sección de las piezas y de la conductividad calorífica del metal.

El enfriamiento en el temple se efectúa a una velocidad de 150-200°C por 1 segundo. La velocidad de enfriamiento del acero al carbono se establece según

el contenido de carbono en él, cuánto más carbono tenga, menor debe ser la velocidad de enfriamiento, ya que así se evitará el surgimiento de diferentes defectos. Sobre todo, es necesario establecer minuciosamente la velocidad de enfriamiento al templar las piezas de forma compleja que tiene secciones diferentes a lo largo.

Las diferentes velocidades de enfriamiento de las piezas calentadas hasta la temperatura de incandescencia se logran eligiendo el medio de enfriamiento. La mayor velocidad de enfriamiento se logra en agua destilada y la menor en agua jabonosa.

Al enfriar piezas templadas es necesario cumplir los requisitos siguientes:

1. La cantidad de líquido refrigerante debe ser suficiente para que su temperatura cambie poco durante el enfriamiento de los artículos que se templan.
2. Antes de sumergir la pieza caliente en el medio de refrigeración (agua, aceite), es necesario mezclar este último para igualar la temperatura en todas las capas.
3. Para eliminar la camisa de vapor que se forma alrededor de la pieza que se sumerge en el líquido y que impide el acceso de la corriente de aire puro, la pieza que se elabora debe agitarse en diferentes direcciones.
4. Para evitar el torcimiento de las piezas finas y largas, estas no deben enfriarse sumergiéndolas de plano en el líquido, ya que las capas inferiores del metal, al ser las primeras en enfriarse, se contraen. Las piezas de sección variable deben sumergirse con la parte más gruesa hacia abajo. La forma de las aristas en las piezas influyen considerablemente en la formación de grietas.

Además del procedimiento descrito de temple en medios diferentes, en las fábricas se utiliza el temple superficial con corriente de alta frecuencia (c a f), así como también el temple con llama oxiacetilénica.

El acero templado tiene alta tenacidad y dureza, pero poca ductilidad.

### *Aplicación en las piezas forjadas*

Las aplicaciones en piezas forjadas, tendremos que cumplir lo siguiente: si el material es acero al carbono se sumergirá en agua, con los aceros aliados se sumergirá en aceite. El enfriamiento de la pieza se lleva a cabo sumergiéndola caliente en un baño de inmersión que puede contener, en orden ascendente de eficacia, como los mencionados con anterioridad.

Los aumentos en el contenido de carbono o de los elementos de aleación en el acero (Mn, Cr, Ni, Mo, V, W) proporcionan mayor templabilidad; algunos materiales (por ejemplo algunos aceros para herramientas) son tan latamente aleados que templan por completo al ser enfriados al aire.

#### **10.2.4. Revenido**

Se llama revenido al proceso de tratamiento térmico que se emplea después del temple para disminuir la fragilidad y hacer de fácil elaboración.

El revenido bajo (150-200°C) disminuye las tensiones residuales y también la fragilidad de las piezas.

A revenido bajo se someten preferentemente las piezas que no experimentan cargas de percusión, por ejemplo, las herramientas cortantes como brocas, machos de roscar y otras.

El revenido medio (350-500°C) eleva la ductilidad de las piezas conservando su dureza. A revenido medio se someten principalmente las piezas que sufren cargas de percusión, como cinceles, martillos, muelles, etc.

El revenido alto (500-650°C) da a las piezas alta ductilidad, conservando al mismo tiempo la dureza suficiente. A revenido alto se someten aquellas piezas de las máquinas que funcionan con grandes tensiones y choques: ruedas dentadas, árboles, bielas, etc.

El temple y el revenido de las herramientas de formas simples (botadores, granetes, cinceles, etc.), se efectúan generalmente de un solo calentamiento. Este procedimiento de tratamiento térmico se llama temple de autorrevenido. La herramienta calentada para el temple no se enfría toda, sino que se moja. Solamente su parte de trabajo Y, sin sacarla del agua, se desplaza verticalmente. Con esto se logra un cambio uniforme de las propiedades del metal. El revenido se efectúa después que la herramienta se ha sacado del agua, a costa del calor que guarda la parte inferior de esta que no se enfría. La parte de trabajo de la herramienta se limpia rápidamente con una lima vieja, con un pedazo de muela de esmeril o papel lija. Al aparecer en la superficie de la parte del trabajo el calor del revenido que corresponde a la temperatura necesaria, la herramienta se sumerge de nuevo en el líquido hasta enfriarse por completo.

### **10.3. Ejecución del Tratamiento Térmico**

Los procedimientos de ejecución del tratamiento térmico los examinaremos en los ejemplos del temple de las herramientas que más a menudo se emplean en el ajuste.

Temple de Cortafríos: El cortafrío del ajustador se fabrica de acero para herramientas al carbono Y7 o Y8 y el régimen del tratamiento térmico debe corresponder al material.

Después de proceso del forjado (forjado del filo y de la cabeza), la punta de trabajo del cortafríos (en una longitud de 15-30mm) de limpia y se caliente uniformemente (en la fragua u horno) hasta la temperatura de 760-780 °C (color, del temple, cereza claro).

El cortafrío calentado se sumerge verticalmente a una profundidad de 15-20mm y se mueve hacia arriba y hacia abajo sin sacarlo del agua. Semejante enfriamiento del cortafrío en el agua elimina la creación de pasos bruscos de la parte templada a la no templada.

Después que oscurezca la parte incandescente, el cortafrío se saca del agua y se limpia su superficie observando la temperatura (de acuerdo con el destino del cortafrío) por los colores del revenido (violeta o azul claro).

Al aparecer en la parte de trabajo del cortafrío el color necesario del revenido, se procede a sumergirse en el agua (Primero la mitad y después completamente) para su enfriamiento definitivo.

#### **10.4. Factores de Importancia en un Tratamiento Térmico**

- Es uno de los pasos principales para que pueda alcanzar las propiedades mecánicas para las cuales esta creado.
- La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material, tanto en los aceros como en las aleaciones no férricas, y ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de las piezas, con unas pautas o tiempos establecido.
- A través de los Tratamientos se modifican la constitución del acero, variando el estado en el que se encuentra el carbono, y el estado alotrópico del hierro.
- Se modifica la estructura, variando el tamaño de grano y el reparto de los constituyentes.
- El estado mecánico queda afectado por las tensiones a las cuales son sometidos los materiales luego de algunos TT, principalmente después de un temple.
- El Producto Sólido se expone parcial o totalmente a ciclos Térmicos según lo amerite la ocasión.
- Por medio de Tratamientos Termoquímicos se pueden alterar las propiedades químicas del material esencialmente del acero.
- Deben ser tomadas en cuenta tanto la temperatura de enfriamiento como la de calentamiento y de igual forma los medios en lo que se efectúen los tratamientos como tales.

- Otros factores que deben ser Considerados son: La composición del Material, La Velocidad de Calentamiento, duración del Tratamiento.

### **10.5. Conclusiones del tratamiento térmico para el trabajo en forjas.**

El tratamiento es el proceso de cambio de las estructuras de los metales y de las aleaciones al calentarlos hasta una temperatura determinada seguido de un enfriamiento.

El tratamiento térmico permite cambiar las propiedades mecánicas y físicas.

Los Tratamientos Térmicos se refieren a una amplia gama de operaciones llevadas a cabo a elevadas temperaturas, con las cuales se transforman las propiedades de los metales y de las aleaciones para poder trabajarlos eficientemente o para conferirles determinadas características mecánicas o tecnológicas. Desde el momento en el que un material entra en la fabricación de la mayoría de los objetos metálicos sufre por lo menos un tratamiento térmico en alguna fase de su producción, puede considerarse que este tratamiento es parte importante de la moderna tecnología industrial.

De lo antes expuesto podemos deducir que los tratamientos térmicos son operaciones de calentamiento y enfriamiento a temperaturas y en condiciones determinadas, a que se someten los aceros (y otros metales y aleaciones) , para darles características más adecuadas para su empleo ; estos no modifican la composición química pero si otros factores como su constitución , estructura y estado mecánico.



## **CAPÍTULO 11. GUIA PRÁCTICA PARA CONFORMADO DE METALES, FORJA LIBRE**

El forjado es un proceso en el que por medio de fuerzas de compresión sucesivas aplicadas a través de matrices, dados o herramientas se conforma la pieza. Es uno de los procesos más antiguos de trabajo con metales, 8000 A.c., se utilizaba para la obtención de monedas, joyería...martillando el metal con herramientas de piedra.

Se puede realizar la forja de forma tradicional con un marro de mano, o maceta y un yunque. Sin embargo, la mayor parte de las forjas requieren un conjunto de matrices, prensas o martinets. Las operaciones de forjado a diferencia que las operaciones de laminado producen piezas discretas.

Los productos más típicos que se pueden obtener a través del forjado son: tornillos, remaches, ejes de turbinas, engranajes, bielas, piezas estructurales para maquinaria, aviones, ferrocarriles...

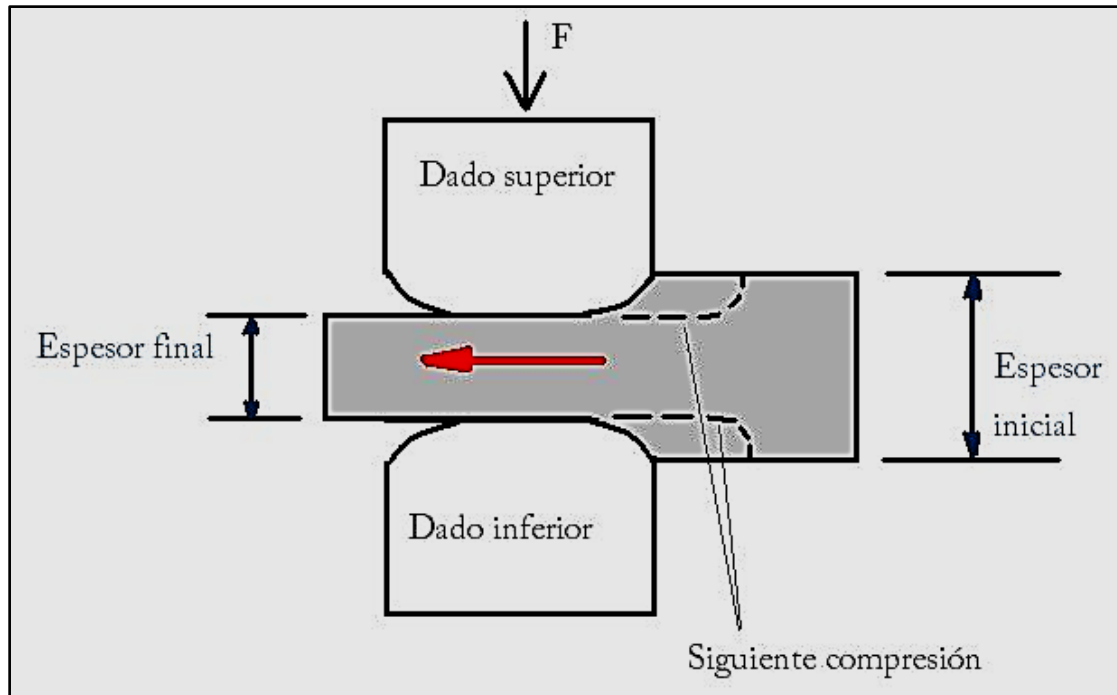
Para que las piezas forjadas tengan buena resistencia y tenacidad se puede controlar el flujo del metal y la estructura del grano, así se pueden usar en aplicaciones donde se requieran grandes resistencias.

El forjado se puede realizar a temperatura elevada (forjado en caliente) o a temperatura ambiente (forjado en frío).

En el forjado en caliente se requieren menores esfuerzos pero se obtiene un acabado superficial y una precisión dimensional no tan buena como en el forjado en frío que aunque requiere mayores fuerzas por la alta resistencia que ofrece el material se obtienen mejores resultados de precisión y acabado superficial, también existe el inconveniente que en el forjado en frío el material de la pieza debe tener ductilidad suficiente a temperatura ambiente.

En general, las piezas que ya han sido forjadas requieren operaciones de acabado, como tratamiento térmico para modificar sus propiedades, o maquinado para obtener las dimensiones exactas. Estas operaciones pueden ser reducidas al mínimo con el forjado de precisión así pues se consigue una reducción del coste de manufacturación para llegar al producto final.

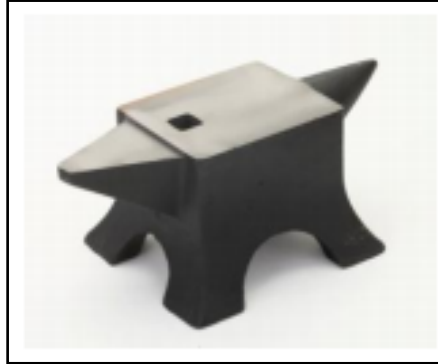
Una pieza que se puede forjar también puede fabricarse por otros métodos, por metalurgia de polvos, por fundición o por maquinado. Sin embargo, en cada proceso se obtienen piezas con distintas características y limitaciones, sobre todo en las propiedades de tenacidad, acabado superficial, resistencia, defectos externos o precisión dimensional.



**Fig. 11.1 Fuerzas de compresión actuando sobre el metal**

### 11.1 Forja Libre.

La forja es el arte y el lugar de trabajo del forjador o herrero, cuyo trabajo consiste en dar forma al metal por medio del fuego y del martillo. Una forja contiene básicamente una fragua para calentar los metales (normalmente compuestos de hierro), un yunque y un recipiente en el cual se pueden enfriar rápidamente las piezas forjadas para templarlas. Las herramientas incluyen tenazas para coger el hierro caliente y martillos para golpear el metal caliente.

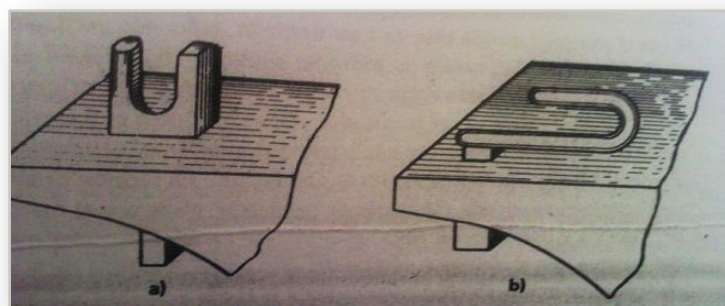


**Fig. 11.2 Yunque para Forja**

En la forja se modela el metal por deformación plástica y es diferente de otros trabajos del hierro en los que se retira o elimina parte del material mediante brocas, fresadoras, torno, etc., y de otros procesos por los que se da forma al metal fundido vertiéndose dentro de un molde (fundición).

### 11.2. Dirección de golpes

Caliente solo la parte de la pieza que se va a doblar, si se calienta una longitud mayor de la que realmente se necesita, los extremos de la sección calentada se doblaran y tendrán que ser enderezados después. Las barras delgadas de acero de bajo carbono se doblan a menudo sin calentamiento previo (**Figura 11.4**)



**Figura 11.4 Artefactos de doblado. a) Grifa, b) Eslabón de doblado**

Se usan varios aditamentos para doblar: grifas, grampas, eslabones, plantillas, cepos, etc., la figura 11.4a, muestra una grifa para doblar sobre el yunque; la figura 11.4b, una argolla para doblar también sobre los yunques. En adición los forjadores emplean frecuentemente los repartidores, los cuales facilitan las operaciones de doblado.

### **11.3 Ejemplo. FORJADO DE CINCEL**

#### **OBJETIVO**

Forjar una barra de acero AISI 1045 para darle la forma de un cincel

#### **EQUIPO UTILIZADO**

- \* Barra de acero AISI 1045
- \* Careta, peto y guantes
- \* Mazos
- \* Pinzas sujetadoras
- \* Fragua
- \* Yunque
- \* Esmeriladora

#### **11.3.1. Introducción**

Los cinceles son herramientas de mano diseñadas para cortar, realizar ranuras o desbastar material en frío, mediante la transmisión de un impacto. Son de acero en forma de barras, de sección rectangular, hexagonal, cuadrada o redonda, con filo en un extremo y biselado en el extremo opuesto.

### Partes principales

- \* La arista de corte
- \* Cuña
- \* Cuerpo
- \* Cabeza
- \* Extremo donde se golpea

### Clasificación

Los distintos tipos de cinceles se clasifican en función del ángulo de filo y éste cambia según el material que se desea trabajar, tomando como norma general los siguientes:

- \* Materiales muy blandos - 30°
- \* Cobre y bronce - 40°
- \* Latón - 50°
- \* Acero - 60°
- \* Hierro fundido - 70°

### Tipos de cincel de acuerdo a la forma de su filo

- \* Recto
- \* Redondo
- \* Estrella

### PRÁCTICA.

Se coloca la barra en la fragua. Esto con el propósito de que el metal eleve su temperatura y por ende se torne maleable. La forja se realiza entre temperaturas de entre los 800 y los 1000 °C, dejando el metal un instante hasta alcanzar dichas temperaturas.

Ya que la barra se ha dejado en la fragua calentándose, se procede al forjado de la barra hasta llegar a una forma horizontal de la parte inferior del cincel, se procede al calentamiento de nuevo de la probeta en la fragua hasta que se torne de nuevo naranja. En este paso se golpea la barra con la ayuda de un mazo para empezar a darle forma al cincel. Para realizar esto, se coloca el cincel sobre el yunque y con la ayuda de las pinzas y el mazo se empieza a golpear a los costados de la parte plana para quitar lo que sería un cierto pandeo en la barra que se haya formado al golpearlo con la prensa hidráulica.

Pasamos a la fase de enfriado del material para que adquiriera ciertas propiedades como dureza, darle el acabado al cincel con la esmeriladora. Con la esmeriladora eliminamos algunos bordes que le sobraban y se le hizo la punta más afilada al cincel.

Finalmente, volvimos a poner el cincel en la fragua y se deja unos 2 minutos pero ahora no fue solo la punta sino todo el cincel; ya que estuvo el cincel con cierta temperatura se pasó al choque térmico; esto aumentara su dureza.

### **11.3.2.Conclusiones**

La ventaja de forjar un metal en caliente reside en la facilidad que se tiene para lograr la deformación de éste. Si se cuenta con una temperatura elevada, dicho proceso causa en el metal que sus granos se agranden y asuman estructuras fibrosas, lo cual ocasiona que bajen su fuerza en dirección del flujo, posibilitando su cambio de forma fácilmente. El resultado del proceso mejora las propiedades mecánicas del material. Cabe resaltar que las propiedades finales de la pieza forjada también dependen de los tratamientos térmicos que se realicen después del forjado. Entonces, como resultado final del forjado y el temple, tenemos una pieza con el equilibrio deseado entre la dureza y la tenacidad del producto terminado.

### **11.3.3. Guía de la práctica de laboratorio**

TITULO: FORJA LIBRE.

TIEMPO DE DURACIÓN: 1.5 HORAS.

LABORATORIO DONDE SE DESARROLLA LAPRACTICA:

LABORATORIO DE FUNDICIÓN.

MATERIALES Y EQUIPOS A UTILIZAR.

1. Fragua abierta.
2. Coque (combustible)
3. Carbón vegetal (combustible)
4. Varilla  $\frac{3}{4}$  Hierro-Carbón.
5. Yunque
6. Pinzas
7. Mazo
8. Pila de templado.
9. Pirómetro óptico.
10. Cronometro

### **11.3.4. Medidas de seguridad**

1. Utilizar los medios de protección empleados en fundición.
2. En caso de incendio verter arena.
3. Realizar el vaciado de la fragua rápidamente en cazuela.

OBJETIVOS.

1. Conocer la construcción, características y funcionamientos de la forja libre en Fraguas.
2. Conocer los métodos para las formas de metales en forjas.

**BIBLIOGRAFÍA.**

- S. Kalpakjian, Manufactura, Ingeniería y Tecnología
- <http://es.scribd.com/doc/30459166/Tema-Forjado-de-Materiales>
- <http://www.caja-pdf.es/2011/11/04/manufactura-ingenieria-y-tecnologia-s-kalpakjian/manufactura-ingenieria-y-tecnologia-s-kalpakjian.pdf>

**11.3.5. Modelo de informe de la práctica de laboratorio práctica de forjado**

NOMBRE: \_\_\_\_\_ GRUPO: \_\_\_\_\_

No. \_\_\_\_\_

SUBGRUPO DE LABORATORIO No. \_\_\_\_\_

**PREGUNTAS DE CONTROL.**

1. ¿Cuál es la importancia de utilizar forja libre en los procesos metalmecánicos?
2. Mencione los tipos de forjas.
3. Mencione los metales más comunes para el forjado.
4. Cuáles son los principales dispositivos de seguridad en el momento de realizar las prácticas?
5. ¿A qué se le llama tratamiento térmico?
6. Mencione las clases de tratamiento térmico.
7. Como influye la temperatura en el forjado.
8. En que se basa el método de forjado.
9. Construya el grafico temperatura contra tiempo del experimento realizado.



## **CAPÍTULO 12. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO DEL TALLER Y MEDIDAS DE SEGURIDAD**

### **12.1. Utilización racional del equipo de Forja**

Siempre que en el taller de forja se recibe un nuevo pedido para la producción de piezas forjadas, hay que planificar en base a los mejores equipos que deben emplearse en la manufactura de esas piezas.

Primero se redacta un gráfico de procedimiento de forjar, el cual especifica el método de producir la pieza forjada y el equipo y las herramientas para la fabricación de una pieza específica. Esto es necesario a fin de que pueda mejorar el procedimiento tecnológico, aumentar la productividad de su labor y esforzarse por bajar el precio de costo de las piezas forjadas.

La elección de un método de forjar y la elección del equipo de forjar dependerán de la cantidad de piezas que haya de fabricarse y de la sección de las mismas.

Si la cantidad es comparativamente pequeña, si no se espera que el pedido se repita, entonces será mejor producirlas en martinete, por el método de forjar en un martinete de vapor o en una prensa de forjar. Si por el contrario, el pedido requiere una gran cantidad de piezas iguales y se espera que el pedido se repita en fecha posterior, sería más aconsejable producirlas estampadas con el martinete o la prensa y también en la máquina de forjar y recalcar.

La capacidad requerida del equipo de forjar depende de la sección transversal de la pieza forjada. La correcta elección del equipo de forjar es un factor sumamente importante. Si el martinete o la prensa no son suficientemente potentes, la pieza requerirá más tiempo en hacerse, necesitando caldeos adicionales y más consumo de combustible y, en consecuencia, el costo aumenta. Por otra parte, el trabajo hecho en dichos martinetes y prensas nunca quedará completamente forjado en toda su sección transversal y dichas piezas forjadas tendrán bajas propiedades mecánicas. Por otra parte, no debe

escogerse unidades de una capacidad demasiado alta, ya que también aumentará el costo de la pieza forjada.

### Aumento de la Productividad del Equipo de Forjar

Toda fábrica de martinets, prensas y máquinas de forjar, siempre indica la capacidad de la máquina de fábrica, es decir, la cantidad de trabajo en unidades de peso o en piezas, que dicho equipo puede producir por unidad de tiempo, digamos: por hora.

Los modos de aumentar la productividad del equipo incluyen: 1) el aumento del conocimiento técnico del obrero; 2) el constante cuidado del equipo y reparaciones del mismo; 3) el usar metales de calidad idónea para el trabajo que ha de hacerse, 4) el uso de accesorios y herramientas que aligeren y aceleren las operaciones de forja; 5) el introducir procedimientos tecnológicos racionales; 6) el equipar adecuadamente el puesto de trabajo y su correcta organización; 7) la reducción de operaciones auxiliares y el aumento (dentro de lo posible) del tiempo de trabajo de maquinaria para las operaciones principales.

Todo obrero debe aumentar constantemente su conocimiento técnico a fin de poder aumentar la eficiencia de su equipo, mejorar los procedimientos tecnológicos de forja, aligerar sus condiciones de trabajo y trabajar con el menor gasto posible de fuerza física, pero con la mayor eficiencia (productividad); el constante cuidado del equipo: martinets, prensas, hornos, etc., y las reparaciones a tiempo (aunque estas nunca puedan eliminar completamente la necesidad de hacer reparaciones mayores) que reducirán la frecuencia de éstas y, por lo tanto, reducirán el tiempo de inactividad.

La calidad y las dimensiones del material también desempeñan un papel importantísimo en el aumento de la productividad. A mejor calidad de material cuyas dimensiones estén en desproporción con relación a las de la pieza acabada exigirá operaciones adicionales que de otro modo se hubiesen evitado. Por ejemplo, un pedazo de material que tenga un grosor desproporcionado

exigirá una operación adicional de estiramiento. El hacer piezas forjadas usando tochos largos requerirá el recorte de las puntas, lo cual puede evitarse al usarse un pedazo de material de longitud correcta. El empleo de diferentes accesorios, dispositivos y herramientas que propenden a aligerar las operaciones y el dibujo de procedimientos tecnológicos racionales, también son de suma importancia.

El forjado de metales ha sido considerada desde los tiempos antiguos una labor física ardua y, al mismo tiempo, un arte. En realidad, el trabajar con material calentado a alta temperatura, la necesidad de garantizar un alto grado de deformación a un material en un período muy corto durante el cual todavía retiene su plasticidad, exige una gran tensión de fuerza física y una gran destreza.

En la actualidad, el carácter y el alcance de la producción moderna de piezas forjadas, exigen con persistencia creciente, la simplificación y aligeramiento de los métodos de forjar a mano, y sobre todo, la transición de la producción para forjar a martinete a la de forjar por troquel. Donde quiera que por alguna razón, esta transición no sea aconsejable todavía, se hace necesario aligerar la forja a martinete mecanizando las operaciones manuales arduas, mediante el uso de diferentes disposiciones, ejecutando en matrices o troqueles de construcción sencilla por lo menos algunas de las operaciones de forjar.

He aquí algunas de las principales medidas mediante las cuales los forjadores simplifican y aceleran su trabajo:

1. Fabricando herramientas manuales convenientes.
2. Usando accesorios y dispositivos que aligeren las operaciones de forja en material pesado.
3. Usando accesorios que ayuden a combinar varias operaciones manuales de forja en una sola.

4. Usando herramientas especiales en cada operación degüellos, repartidores, tajaderas, extensiones, etc., en vez de herramientas universales de forja manual.
5. Usando sencillos accesorios y dispositivos en vez de matrices.
6. Fabricando nuevas herramientas con el fin de hacer más fáciles las operaciones de forja manual.
7. Haciendo matrices para los lotes pequeños de piezas duplicadas forjadas a mano.
8. usando accesorios y dispositivos con el fin de mecanizar las operaciones manuales.
9. reduciendo el tiempo auxiliar al emplear accesorios para la producción simultánea de varias piezas.

#### El aumento de la Productividad de los hornos

En la práctica de la forja se pierde con frecuencia, bastante tiempo al tener que esperar a que el metal alcance la temperatura exigida. Esto ocasiona una cuantiosa reducción de la productividad del martinete o de la prensa. Se puede liquidar parcial o totalmente el tiempo de inactividad.

1. Reemplazando los hornos existentes por nuevos hornos de productividad más alta o instalando hornos adicionales.
2. Introduciendo medidas para el aumento de la productividad de los hornos ya existentes.

Algunas veces, las condiciones locales y económicas como también otras consideraciones, no aconsejan que instale un horno adicional ni que se modifiquen los que están en uso. Por esta razón, los obreros progresistas están tratando constantemente en descubrir las reservas latentes de productividad que tienen los hornos en uso activo y de introducir nuevas normas de calentar los metales.

*Las medidas para aumentar la productividad del horno incluyen:*

1. La utilización del calor de los gases de la combustión para calentar el metal en la cámara de precalentamiento del horno con lo que se acelera el índice de calentamiento y se aumenta la eficiencia del horno.
2. La reducción del tiempo exigido para que el material alcance la temperatura de forja; reducción que se logra al colocarse el material en el hogar del horno en forma que se obtengan las condiciones óptimas para exponer la superficie del material al calor de los gases calientes del horno.
3. Poner en los hornos una carga racional de material.

El mejor método de cargar un horno es el de colocar en el horno un pedazo de metal frío al mismo tiempo que se saca del horno un pedazo de material ya calentado. Este método se recomienda para calentar todo material con la excepción del material para piezas pequeñas cuando el procedimiento de forja o estampado es muy rápido y el operario del horno no puede entregar al martinete o a la prensa el material calentado y, al mismo tiempo colocar nueva carga de material al horno. En tales casos el martinete o la prensa tendrán que permanecer inactivos.

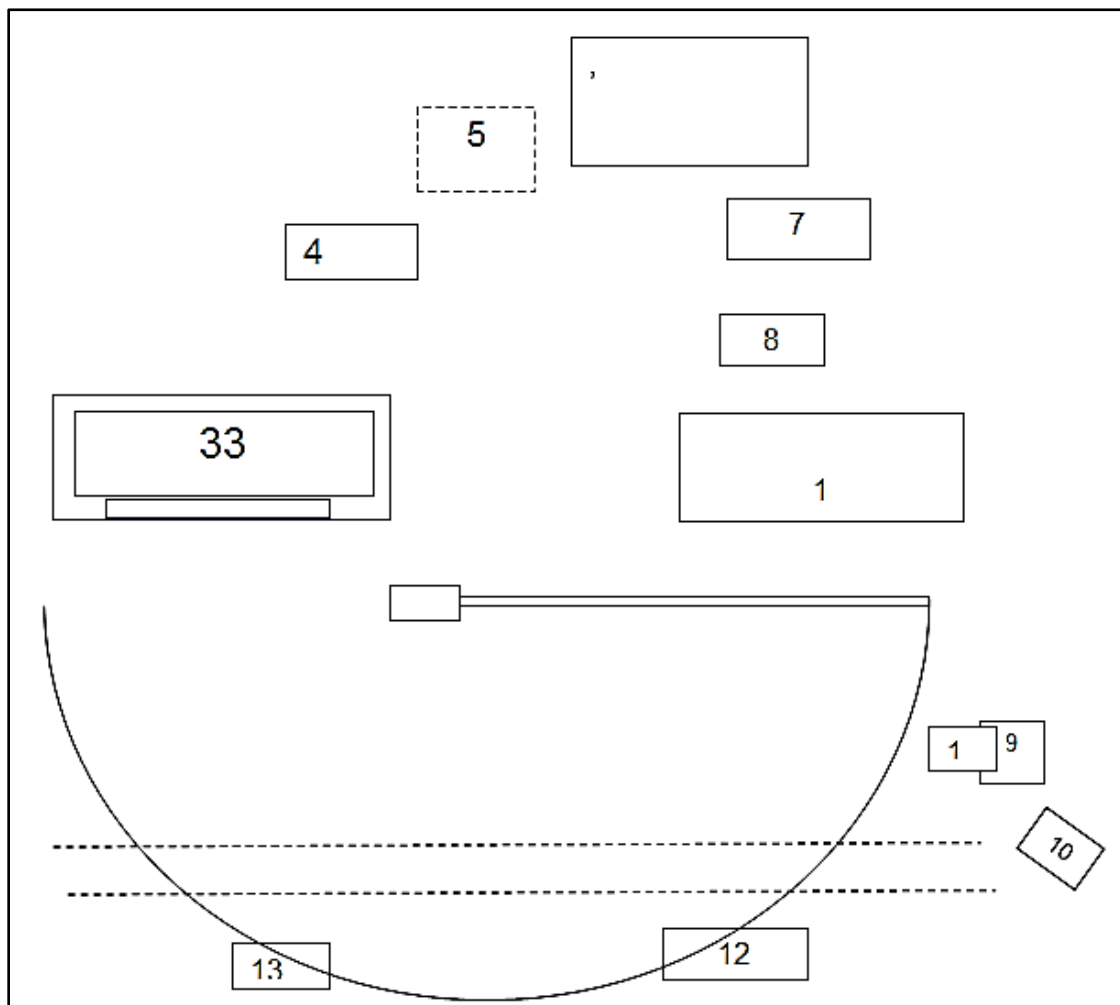
En casos tales, el horno debe cargarse por tandas. La cantidad de material por tandas dependerá del tiempo de caldeo y del tiempo para la operación del martinete o de la prensa por pieza forjada.

## **12.2. Taller del Forjador**

Todo lugar de trabajo del forjador comprende un área del taller de forja directamente adyacente y circundante a la unidad de forjar (martinete o prensa) en la que él trabaja. Es de gran importancia la organización completa del lugar donde uno trabaja a fin de mejorar la productividad del trabajo.

Al organizar el lugar de trabajo, debe siempre observarse estrictamente la siguiente norma principal: No se tenga en el lugar de trabajo nada que no se necesita durante el trabajo. Al mismo tiempo, téngase a mano todo lo que se necesita para trabajar. El equipo básico (martinete, horno), así como el equipo auxiliar (grúas, banco, carro de herramientas, etc.), deben estar situados de tal manera que se evite todo movimiento innecesario por parte del forjador.

La **Figura. 12.1** muestra el esquema de la organización de la cuadrilla de G.Kovalenko en el martinete en el taller de forja de la fábrica Uralmash. Esto puede servir como ejemplo de lo que es la organización correcta y bien planificada del lugar del trabajo del forjador. Así fue organizada nuestra área de trabajo en el laboratorio de fundición.



**Fig.12.1 Diagrama esquemático del sitio de trabajo y organización ceca del martinete de tres toneladas: 1) martinete; 2) pescante de la grúa; 3) hornos; 4)caja de la escoria; 5) almacenamiento para las herramientas pesadas; 6) gabinete para herramientas livianas; 7) caja para los desperdicios; 8) depósito de agua; 9) sitio del operador del martinete; 10) ventilador; 11) mesa para los instrumentos de medición; 12) mesa del inspector; 13) área para el enfriamiento de las forjas**

Sin embargo, no se suponga que en todos los casos sea absolutamente necesario disponer el equipo tal como aparece en la **Figura 12.1**. Son posibles, y también se practican muchos otros métodos para el arreglo del lugar del trabajo, dependiendo del tipo de equipo y de la clase de piezas que han de hacerse. Solo debe tenerse presente la norma fundamental: Es imperativo garantizarle al forjador y a su cuadrilla condiciones de trabajo que sean conveniente y segura.

El lugar de trabajo siempre debe estar bien iluminado, deben instalarse Campanas de escape en cada horno y hay que proteger con tela metálica todos los sitios que sean de peligros, etc. En otras palabras, el lugar de trabajo debe reunir todos los requisitos y exigencias aprobadas en el código de la ingeniería de seguridad. Todas las herramientas de trabajo y accesorios de cada lugar de trabajo deben guardarse de modo tal que garanticen la manipulación conveniente de los mismos y, además que garanticen su accesibilidad a cualquier hora que se desee examinarlos e inspeccionarlos. Sepárense las herramientas que estén en buenas condiciones de las que no lo estén.

Los forjadores nunca trabajan sin una cuadrilla (brigada de ayudantes). La composición de dicha cuadrilla siempre depende del tipo de martinete con que trabaja el forjador y del carácter de su trabajo. Como norma general la cuadrilla debiera comprender siempre los mismos hombres. El forjador es el director del grupo y sus deberes consisten no solo en llevar a cabo su propio trabajo, sino que también de supervisar el trabajo de cada miembro de su cuadrilla. Él siempre debe recordar que le ha confiado un equipo costoso y complicado. Del

trabajo correcto del forjador dependerán la buena condición del equipo, la seguridad del trabajo, el cumplimiento y sobre cumplimiento de su tarea, y, por lo tanto, el salario de cada miembro de su cuadrilla.

¿Entonces cómo debe trabajar el forjador durante todo su turno? Al llegar al taller y antes de empezar a trabajar debe tomar posesión del lugar de trabajo que le ha sido entregado el turno anterior. Hay que entregárselo limpio y en buen estado. También debe examinar la condición del equipo y de las herramientas en caso de hallar defectos debe informar enseguida al responsable del taller. Una vez hecho esto obtener del responsable del taller (jefe de taller) la tarea y la hoja de trabajo a realizar. Antes de empezar a trabajar, el forjador contará las piezas de materiales y se cerciorará de que estén en condiciones propias para la forja. Por regla general, el turno anterior debe entregar el material en el taller del forjador y debe cargar el horno con una cantidad suficiente de material a fin e garantizar que esté a la temperatura correcta cuando se empiece a trabajar.

Después el forjador sitúa a cada miembro de su cuadrilla en su respectivo lugar de trabajo. Es solo entonces cuando le ordenará al operador del horno que saque el material del horno y lo coloque en el yunque.

Durante todo el turno, el forjador no debe abandonar su lugar de trabajo por mucho tiempo. Puede salir su cuenta con el permiso del responsable del taller o jefe de taller. Tampoco ningún miembro de la cuadrilla debe salir sin el permiso del forjador.

Al terminar su turno, el forjador debe poner en orden su lugar de trabajo (taller) y entregárselo al siguiente turno. No debe abandonar el taller antes de la llegada de su relevo y sin haberle entregado el taller. En caso de que su relevo dejase de venir al trabajo (por ejemplo, en caso de enfermedad) el forjador podrá abandonar el taller únicamente con el permiso del jefe taller.



### **12.3. Las calificaciones del Obrero**

Todas las clases de trabajo no tienen el mismo grado de dificultad. Una cosa es forjar un cortafríos, trabajo este comparativamente fácil y que puede ejecutarlo cualquier principiante, pero es totalmente distinto forjar un cigüeñal u otra pieza complicada. Esto es muy difícil, exige un alto grado de experiencia de parte del forjador y solo puede confiarse a obreros con experiencia y técnicamente preparados.

Hay muchas clases de obreros en cualquier taller de forja: majadores ayudante, operadores de horno, operadores de martinete y de prensa, etc. Los obreros algunos oficios también están clasificados según sus especialidades, por ejemplo: forjadores con martinete; forjadores con matrices; operaciones de martinetes; operadores de grúas viajeras, etc.

### **12.4. Ingeniería de seguridad en el territorio de una empresa**

A fin de la seguridad en el trabajo y reducir al mínimo la cantidad de accidentes industriales, es necesario: a) organizar correctamente los procedimientos de producción; b) organizar racionalmente cada taller y c) observar estrictamente todas las leyes de seguridad en el trabajo y todos los reglamentos de ingeniería de seguridad durante el trabajo.

La norma de seguridad más importante es: nunca hagan ningún trabajo en un equipo cuyo manejo se desconoce. Antes de proceder a ejecutar una nueva operación antes de comenzar a trabajar en una máquina o equipo que un obrero no haya operado con anterioridad, hay que instruir siempre al obrero en cuanto a los métodos de trabajos seguros y en cuanto a los reglamentos para operar la máquina o el equipo. Recuérdese siempre que el peligro principal no reside en el martinete u hogar del horno u otro equipo, como tales, si no es la manipulación y operación que inhábil y descuidadamente se hacen con los mismos.

Cada taller de forja no es más que uno de los muchos departamentos de producción en una fábrica y como tal, tiene comunicaciones (transporte, suministro de corriente y agua) con otros departamentos y servicios de la fábrica. Por lo tanto, todo forjador está en la obligación de conocer las reglas de seguridad no solo de su departamento, sino las de todas las fábricas donde él está empleado. He aquí los reglamentos principales que todo obrero en toda fábrica debe observar:

1. El área de la fábrica o laboratorio debe estar nivelada, sin zanjas, etc. Sin embargo, muchas instalaciones siempre se colocan subterráneas (tuberías albañales, redes maestras del agua, vapor y electricidad, etc.). Estas instalaciones se examinan, limpian y reparan con regularidad. Con este fin puede ser necesario que se caben fosos o zanjas profundas que por lo general se circundan con barreras que dicen, por ejemplo, no pase, para evitar la posibilidad de que la gente caiga en ellos accidentalmente. Nunca pase trepando dichas barreras ni incluso cruce los lugares que llevan estos letreros.
2. Por regla general, debe iluminarse por las noches el territorio de las fábricas. Sin embargo, sucede a veces que, debido a reparaciones en el alimentador o al fundirse una lámpara queden sin luces algunas secciones del territorio de la fábrica. Tenga mucho cuidado al caminar por secciones oscuras. Es mejor buscar un camino que esté iluminado que caminar por secciones oscuras.
3. Toda fábrica o laboratorio tienen predio y departamentos, la entrada a los cuales están terminantemente prohibida a personas que no estén autorizadas (aquí se incluye subestaciones de energía eléctrica, estaciones de compresores, etc.). Nunca entre en los predios que digan no se admiten extraños si no tiene permiso especial del departamento o

de la fábrica. Un obrero del departamento de forja no debe entrar en ningún otro departamento de la fábrica (digamos, al taller de maquinaria) si no tiene nada que hacer allí y sin el permiso de la administración del departamento de forja desconocen las características de los reglamentos de seguridad y de trabajo de otros departamento, estarían poniéndose en peligro al visitar sin permiso dichos departamentos.

4. Por lo general se prohíbe fumar en el territorio de la mayoría de las empresas. Hay lugares especiales dedicados a fumar en ellos. El no cumplir los reglamentos para fumar puede provocar fuego. El fumar en lugares donde hay almacenadas sustancias muy inflamables (digamos, bencina) puede causar explosiones que ocasionarían la muerte no sólo de los fumadores mismo, sino también de muchos otros obreros; sin mencionar el cuantioso daño que el Estado puede sufrir.
5. Las operaciones de carga y descarga se realizan en lugares definidos del territorio de la fábrica. La mayor parta se realiza con grúas y otros mecanismos. Debe tenerse especial cuidado cuando se esté en otros lugares. Para evitar accidentes nunca se pare debajo de una carga suspendida.

Estas son algunas de las normas que todo obrero debe practicar indefectiblemente siempre que se encuentre en el terreno de alguna fábrica.

Cada fábrica o laboratorio tiene sus propios reglamentos de seguridad que difieren hasta cierto punto de los de otras fábricas. Por ello, además de observar las seis normas generales antes mencionadas, todo obrero también debe cumplir con todos los reglamentos de seguridad de la fábrica donde trabaja.

Por regla general, toda fábrica tiene su propia instrucción especial que regula la conducta de los obreros mientras están en el terreno de la misma. A los nuevos

obreros se les admite en los terrenos de una fábrica únicamente después que un personal especial los haya instruido respecto a los reglamentos de dicha fábrica.

### **12.5. Primeros auxilios en caso de accidentes. Servicios médicos y sanitarios**

En caso de accidente, la víctima debe ir siempre inmediatamente a la casa de socorro; en caso de que la herida sea leve, si es seria, sus compañeros deben hacer que lo lleven hasta allí. Si por alguna razón esto no pudiese hacerse, debe llevarse a un médico o a una enfermería enseguida. De todos modos, hay que dar los primeros auxilios. Todo obrero debe saber cómo ayudarse a sí mismo o a sus compañeros en caso de accidente.

**Curación de las heridas:** Por muy ligera que se una herida, hay que mantenerla muy limpia a fin de evitar la septicemia. Si su camarada se ha herido, usted debe sacar del botiquín del taller un paquete individual de primeros auxilios, coger una venda y vendarla la herida sin pérdida de tiempo. En caso de hemorragia severa, póngale en la herida una almohadilla adicional y con una toalla o pañuelo hágale en vendaje apretado. Nunca lave con agua ninguna herida.

**Magulladuras:** En el caso de magulladuras leves externas póngale una compresa de agua fría y a ese miembro o parte del cuerpo contusionado dele todo el descanso que sea posible. Si la contusión es tan severa que ha afectado algún órgano interno del cuerpo, ponga a la víctima, con cuidado en una camilla o en una cama, después de haberle aflojado o quitado toda ropa apretada. Llámese al médico lo antes posible. Mientras llegue el médico ponga compresas frías en la contusión.

**Huesos fracturados:** En el caso de una pierna fracturada coloque al paciente en una camilla o en el suelo y vende con tablillas, cartón o algo similar la parte fracturada. Este vendaje evitará que se desplacen las puntas del hueso

fracturado y también aliviará el dolor. Los brazos fracturados se vendan del mismo modo, aunque no hay necesidad de acostar a la víctima en una camilla.

**Heridas en el ojo:** Nunca se frote los ojos, aun cuando le haya caído alguna partícula de polvo, limadura, astilla de metal, etc. Si usted mismo no puede sacársela del ojo, llame a un médico o vaya a él.

**Choques eléctricos:** cuando alguien ha recibido un choque eléctrico, lo primero que hay que hacer es desconectar la corriente, bien usando el interruptor o usando una herramienta de cabo de madera seca (digamos, un hacha) con el fin de coartar los cables eléctricos. La persona que esto haga debe estar muy bien asilada del suelo, de lo contrario, ella también recibirá un choque. Es por ello que usted nunca debe de estar descalzo o parado en suelo mojado cuando esté prestando este auxilio. Póngase siempre zapatos de goma o guantes de goma. Si no puede conseguirlos al momento, párese en una piedra o en una tabla seca. Únicamente después que la víctima haya sido liberada de la corriente, es cuando se puede proceder a prestarle los primeros auxilios.

En caso de inconsciencia, coloque al paciente boca arriba afloje toda su ropa, abra todas las puertas y ventanas y mande a buscar al médico en seguida. Mientras llegue el médico, practíquelo al paciente la respiración artificial. Dicha respiración se practica no solo en los paciente de choque eléctrico cuando dan señales de vida, sino también si no dan ninguna señal de vida. Esto es necesario, porque en la mayoría de los casos, lo que aparenta ser muerto a causa de un choque eléctrico, no es más que un profundo desmayo.

**Quemaduras:** Coloque una compresa de bicarbonato de sodio (1 cucharada por vaso de agua) en la quemadura o báñela con una loción de plomo. Si no se puede conseguir ni el bicarbonato ni la loción, cubra la quemadura con un vendaje limpio y diríjase en seguida al policlínico.

***Insolación:*** La insolación puede ocurrir cuando el cuerpo se calienta demasiado. El paciente muestra señales de desmayo, el pulso es débil y, en ciertos casos, muestra señal de convulsión.

En este caso de insolación, lleve al paciente a un lugar fresco, aflójele la ropa, riéguela agua fría por el pecho y la cara y póngale en el cuerpo compresas frías. Si el paciente no respira practíquela respiración artificial y mande a buscar un médico o una enfermera.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### **CONCLUSIONES**

1. Se logra modificar la fragua existente, que operaba con gas empleando ahora combustible sólido, carbón vegetal, coque o su combinación.
2. Se deja plasmado la guía metodológica para los estudiantes de Ingeniería en las prácticas de forja libre
3. Se realizó el diseño de experimento para la evaluación de los diferentes combustibles sólidos, utilizando el programa de variables StatGraphics, determinándose la composición de porcentaje de coque y porcentaje de carbón vegetal más rentable y eficiente, relacionado con la temperatura de recristalización y tiempo requerido para la operación.
4. Se determinó que la relación 50% de coque y 50% de carbón vegetal, para emplearse en la fragua, es la más racional, cumpliendo con satisfacción el tiempo necesario para cada operación y la temperatura de recristalización necesaria para los procesos de forja libre.
5. Los resultados obtenidos en el empleo de combustible en la fragua con la utilización de carbón de madera, abundante y relativamente económico en las condiciones de nuestro país, permite su utilización sin gran dificultad.
6. Se concluye totalmente el montaje de la instalación que incluye, fragua, herramientas, yunque, dispositivos, sistema de aire y evacuación de gases, permitiendo el trabajo con seguridad y relativa comodidad

### **RECOMENDACIONES**

1. Indispensable cumplir con las medidas de seguridad e higiene del trabajo en esta instalación, utilizar los medios de protección existente para el desarrollo de las actividades prácticas.
2. Implementar las prácticas de forja libre en la asignatura Conformado y metalurgia y tecnología mecánica en las carreras de Ingeniería Mecánica e Industrial.

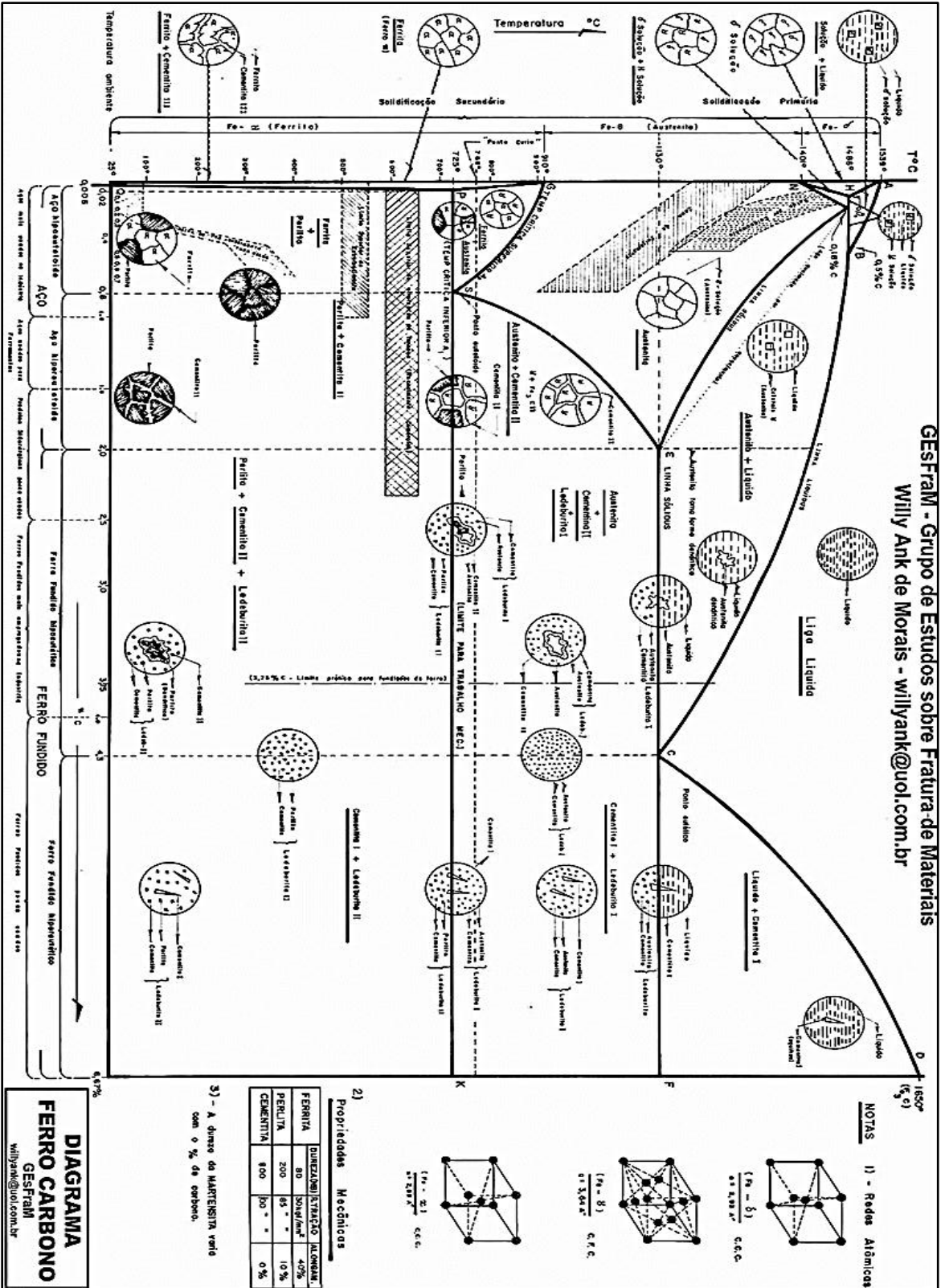


**BIBLIOGRAFÍA**

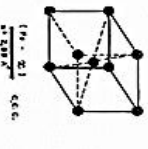
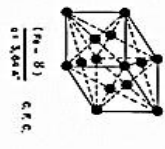
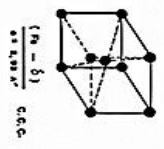
1. **Schev John, *Procesos de Manufactura, México. Editorial Mc Graw Hill 3ra edition***
2. **S. Kalpakjian, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología***
3. **<http://es.scribd.com/doc/30459166/Tema-Forjado-de-Materiales>**
4. **<http://www.caja-pdf.es/2011/11/04/manufactura-ingenieria-y-tecnologia-s-kalpakjian/manufactura-ingenieria-y-tecnologia-s-kalpakjian.pdf>**
5. **<http://es.scribd.com/doc/59197392/la-fragua>**
6. **<http://es.scribd.com/search?query=fragua>**
7. **-Gran enciclopedia didáctica ilustrada, HOMBRE Y MAQUINAS; editorial Salvat; edición 1988; Barcelona España.**
8. **-Apraiz Tratamientos térmicos; editorial Dossat, edición 1974, Madrid España.**
9. **-Temple del acero, editorial Aguilar, edición 1972, Madrid España**
10. **-Intrenet[www.temple.com](http://www.temple.com) , [www.templerevenido.com](http://www.templerevenido.com) .**
11. **-Microsoft Encarta 2003.**
12. **-Tecnología de los oficios metalúrgicos, editorial Reverte, edición 1974, Barcelona España.**

# Anexos

**GESFRAM - Grupo de Estudos sobre Fratura de Materiais**  
 Willy Ank de Moraes - [willyank@uol.com.br](mailto:willyank@uol.com.br)



NOTAS 1) - Redes Atômicas



2) Propriedades Mecânicas

	PUREZA	ESTRUC.	ALICAMANT.
FERRITA	80	3000/mm <sup>2</sup>	40%
PERLITA	200	95 - "	10%
CEMENTITA	100	90 - "	0%

3) - A direção da MARTENSITA vem com o % de carbono.

**DIAGRAMA FERRO CARBONO**  
 GESFRAM  
[willyank@uol.com.br](mailto:willyank@uol.com.br)

DIAGRAMA DE EQUILIBRIO HIERRO-CARBONO

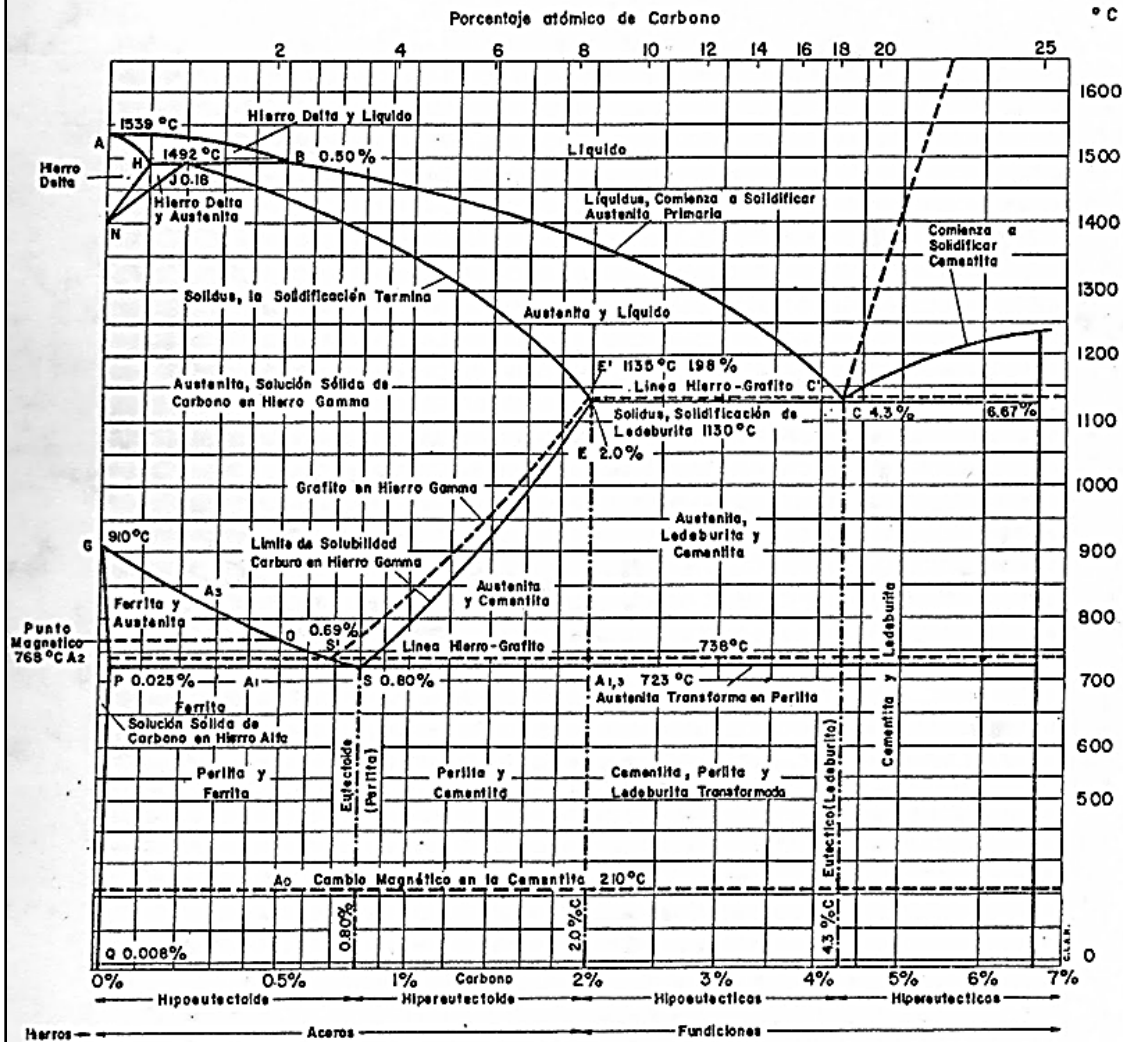
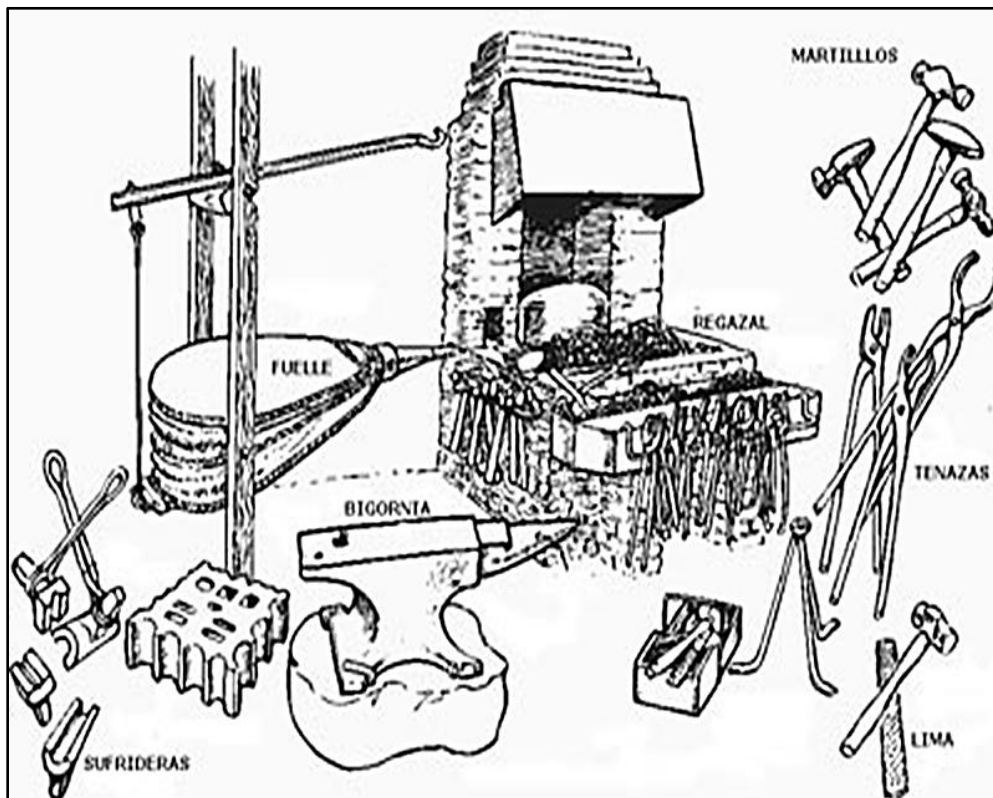


Figura 1. Diagrama de equilibrio de fases Hierro-Carbono



**Fragua en estado original**



**Después de la Modificación**









