

**TRATAMIENTOS**

Son los procesos a que se someten los metales y aleaciones para modificar su estructura, bien sea por un cambio de forma y tamaño de los granos, bien por transformación de sus constituyentes. El objeto de los tratamientos es mejorar las propiedades mecánicas o adaptarlas, confiriéndoles caracte-

rísticas especiales, a las aplicaciones que se van a dar a las piezas. De esta manera se obtienen aumentos de dureza a la resistencia mecánica, así como mayor plasticidad o maquinabilidad para facilitar su conformación. Estos procesos pueden ser mecánicos y térmicos, y también consistir en la aportación de algún elemento a la superficie de la pieza. Pueden clasificarse de acuerdo a los siguientes grupos (tabla VIII):

Tratamientos térmicos .....	{	Recocido Temple Revenido
Tratamientos termoquímicos .....	{	Cementación Cianuración Nitruración Carbonitruración Sulfínuración
Tratamientos mecánicos.....	{	En caliente: forja En frío { Deformación profunda Deformación superficial
Tratamientos termomecánicos .....	{	Ausforming
Tratamientos superficiales.....	{	Cromado duro Metalización Implantación iónica y otros

**Tabla VIII.** Clasificación de los tratamientos.

**Factores que intervienen en los tratamientos térmicos**

Los tratamientos térmicos son operaciones de calentamiento y enfriamiento mediante las cuales se modifican la constitución y la estructura de los metales o aleaciones. Se basan en que las transformaciones en el estado sólido, para que puedan realizarse completamente, necesitan el tiempo suficiente. Un enfriamiento lento hasta la temperatura ambiente permitirá la total transformación de los constituyentes, obteniéndose con ello una estructura y una constitución determinadas. Si calentamos de nuevo hasta temperaturas superiores a la de transformación, y al enfriar otra vez, no

se aumenta la velocidad de enfriamiento, la transformación encontrará más dificultades para realizarse y será sólo parcial (o será impedida totalmente si la velocidad es suficientemente rápida), obteniéndose así una constitución y una estructura distintas a las anteriores. Los tratamientos térmicos son especialmente indicados para los aceros, si bien se trata también con éxito gran número de aleaciones no férreas. En todo ciclo de tratamiento térmico hay que considerar tres fases, a saber: calentamiento hasta una temperatura determinada, tiempo de permanencia en ella y enfriamiento hasta la temperatura ambiente, siendo los siguientes factores los que intervienen en el resultado final:

Atmos...

— Efecto de ma...  
la pieza.  
— Diferencia de...  
mea.  
— Forma de...  
tratamiento.

**Recocido**

Este tratamiento...  
sus objetivos, como...  
estructuras anorm...  
res, consisten al me...  
mento o reproducir...  
en caso de haber se...  
mento. Provocar e...  
mecanizado, elimi...  
na y disminuir las...  
acción química del...  
El ciclo term...  
hasta la temperat...  
mento subterráneo...  
temperatura y un...  
una ley predeterm...  
tura, debiendo, ent...  
los aceros, se debe...  
que deben utiliz...  
pieza, pues en otr...  
ración de grana...  
res internas se pro...  
ca, que consisten...  
lentamente.

El recocido se...  
de no sólo para la...  
ser preparados, s...  
hacen de temple...  
están siendo somet...

**1. Tipos de recocido**

Según sea el...  
varios tipos de rec...

Recocido total...  
este recocido se p...  
dades que le corre...  
composición. Se el...  
dido, solidarios y...  
cocido de hom...  
norma, las propie...  
correspondientes.



s aplicaciones que se  
De esta manera se ob-  
reza a la resistencia  
por plasticidad o ma-  
tar su conformación.  
er mecánicos y térmi-  
en la aportación de  
perficie de la pieza.  
uerdo a los siguien-

- Efecto de masa (espesor o diámetro de las piezas).
- Duración de ciertas fases del ciclo térmico.
- Forma de enfriamiento y medio de enfriamiento.

### Recocido

Es un tratamiento orientado a conseguir varios objetivos, como eliminar particularidades estructurales anormales en metales y aleaciones, conferir al metal un estado de ablandamiento o reproducir el estado original del metal en caso de haber sido perturbado en otro tratamiento. Provocar estructuras favorables para mecanizado, eliminar o reducir tensiones internas y disminuir heterogeneidades en la composición química del metal.

El ciclo térmico supone calentamiento hasta la temperatura de recocido, mantenimiento isotérmico u oscilante alrededor de esa temperatura y un enfriamiento lento, según una ley predeterminada. En los trabajos de forja, doblado, enderezado, torneado, etc., de los aceros, se desarrollan tensiones internas que deben eliminarse antes de templar la pieza, pues en otro caso daría origen a la formación de grietas. Para eliminar estas tensiones internas se procede al recocido de las piezas, que consiste en calentarlas y enfriarlas lentamente.

El recocido antes del temple se recomienda no sólo para las herramientas que acaban de ser preparadas, sino también siempre que hayan de templarse las que, hallándose en uso, están siendo sometidas a choques.

#### 1. Tipos de recocido

Según sea el fin perseguido se practican varios tipos de recocido, que son los siguientes:

**Recocido total o de regeneración.**—Con este recocido se pretende devolver las propiedades que le corresponderían al acero según su composición. Se utiliza en piezas de acero fundido, soldaduras y piezas que han sufrido el recocido de homogeneización. Regula por norma, las propiedades mecánicas y elásticas correspondientes a su composición química.

Se calienta hasta el  $Ac_3 + 50^\circ$ , y se enfría al aire, y así se regeneran las propiedades de ese material. La nueva estructura es más tenaz y resistente, quedando el acero más blando.

**Recocido isotérmico.**—Tratamiento consistente en calentar el acero a una temperatura superior a la crítica  $Ac_3 + 50^\circ$ , y enfriarlo luego rápidamente hasta una temperatura ligeramente inferior a la de austenización,  $Ac_1$ , manteniéndolo en ésta el tiempo necesario para que se verifique toda la transformación de la austenita en perlita. Finalmente, se deja que siga enfriándose al aire. La estructura obtenida depende de la temperatura de austenización. Si ésta es próxima a  $Ac_1$ , se logran estructuras aptas para el torneado. Si es mucho más elevada, las estructuras serán aptas para el fresado y el taladrado. Por otra parte, este recocido tiene la ventaja de que es mucho más rápido que el enfriamiento continuo. Se aplica a piezas forjadas y a aceros para herramientas.

**Recocido de homogeneización.**—Se aplica a los aceros brutos de colada para destruir las heterogeneidades de tipo químico que se han originado durante la solidificación. También se utiliza en forjados y laminados para eliminar las heterogeneidades estructurales que perjudican los valores de tenacidad del acero. La temperatura ha de ser muy elevada, por encima del  $Ac_3 + 100^\circ$  (temperatura a la cual la austenita empieza a transformarse en ferrita en el enfriamiento en el diagrama Fe-C para los aceros susceptibles de la transformación de Fe- $\alpha$  a Fe- $\gamma$ ), consiguiendo así disolver los carburos en la matriz y consiguiendo la homogeneización en la composición química. No se especifica la forma de enfriamiento.

**Recocido de engrosamiento de grano.**—El aumento de tamaño de grano se consigue aplicando  $Ac_3 + 150^\circ$ . Con ello disminuyen las propiedades mecánicas y las plásticas. El enfriamiento depende de si queremos unas propiedades u otras. Si lo enfriamos al agua, mejoran las propiedades mecánicas y plásticas. Si lo enfriamos al aire, son mejoradas de forma inferior.

**Recocido globular.**—Se aplica a los aceros para herramientas con un elevado porcentaje de carbono, en los cuales hay gran cantidad de carburos muy difíciles de disolver y que dificultan el mecanizado. Su nombre se debe a la estructura que se observa al microscopio y en la cual los carburos adoptan la forma esférica o

ión profunda  
ión superficial

otros

l de enfriamiento, la  
ará más dificultades  
parcial (o será impe-  
ocidad es suficiente-  
ose así una constitu-  
intas a las anteriores.  
s son especialmente  
, si bien se trata tam-  
ero de aleaciones no  
tratamiento térmico  
ses, a saber: calenta-  
eratura determinada,  
n ella y enfriamiento  
iente, siendo los si-  
intervienen en el re-



globular. Se efectúa a temperatura ligeramente superior a la de transformación crítica,  $Ac_1 + 20^\circ$  (temperatura a la cual la austenita eutectoide comienza a formarse en las condiciones del calentamiento utilizado), y de forma oscilante. Se mantiene esta temperatura prolongadamente y se enfría a velocidad conveniente.

**Recocido de ablandamiento.**—Es un tipo de revenido. Se aplica a aquellos aceros que, después de la forja o laminación, han quedado con durezas tan elevadas que casi no se pueden mecanizar. Se recomienda para ablandar los aceros aleados de gran resistencia, al Cr-Ni o Cr-Mo. La temperatura adoptada es inferior a la crítica  $Ac_1$  y la duración total es pequeña. Se realiza a algunas decenas de grados por debajo del  $Ac_1$ , con el fin de mejorar la maquinabilidad o aptitud a la deformación en frío.

**Recocido de estabilización.**—Se da a las piezas que han sufrido un trabajo de forjado o laminado, u otros tratamientos, para destruir las tensiones internas que se hayan originado y que podrían producir deformaciones en las piezas una vez acabadas. Se realiza a temperaturas no muy altas, por debajo del  $Ac_1$ , lo que permite eliminación de tensiones internas a  $700^\circ$  y una media hora, y también una atenuación o alivio de tensiones, desde los  $700^\circ$  hacia abajo.

#### NOTA:

*Es aconsejable la atenuación de tensiones a una temperatura de  $400^\circ$  durante unas tres horas más o menos. Ya que la temperatura y el tiempo están en razón inversa: cuanto más tiempo menor tendrá que ser la temperatura de realización.*

La única distinción que existe entre estas dos formas de recocido es que, en el primer caso, se eliminan una mayor cantidad de tensiones internas que en el segundo. El primer caso es el más utilizado en la industria.

**Recocido de restauración.**—Efectuado por debajo del  $Ac_1$  con el fin de restaurar, por lo menos parcialmente las propiedades físicas y mecánicas sin modificación aparente de la estructura (disminución de dureza, resistividad, acritud, etc.).

**Recocido de recristalización o contra acritud.**—Se da a los aceros trabajados en frío para eliminar la acritud. La acritud produce una disminución en las propiedades plásticas, seguidas de un envejecimiento del acero. Se produce una precipitación de carburos (Fe-C) en los bordes de los granos, haciendo que se pierda la cohesión entre ellos. Consiste en un calentamiento a  $500^\circ\text{C}$  ó  $700^\circ\text{C}$  seguido de un enfriamiento al aire dentro del horno.

### Temple

El temple, en general, consiste en someter el metal a un ciclo térmico que comprenda, sucesivamente, un calentamiento destinado a solubilizar ciertos constituyentes dando lugar a la fase estable a alta temperatura (austenización). Un enfriamiento apropiado, efectuado desde la temperatura de temple hasta otra más baja que puede ser diferente a la ambiente.

Para los aceros hipoeutectoides, es decir los que tienen entre 0% a 0,8% de carbono, la temperatura de austenización es  $Ac_3 + 50^\circ$ , dichos  $50^\circ\text{C}$  son un margen de seguridad.

Para los aceros hipereutectoides, es decir 0,8% a 2,06% de carbono, no sobrepasan el valor de  $Acm$  en la temperatura de austenización. ( $Acm$  es la temperatura de transformación de la austenita, en el caso de los hipereutectoides, por encima de la cual se obtiene austenita estable y por debajo, la cementita aparece progresivamente). Nada más pasar el  $Ac_1$ , si templamos el Fe-C" (cementita proeutectoide, véase diagrama de Fe-C, figura 32), se nos queda como estaba, pero la austenita pasa a martensita. Si sobrepasamos el  $Acm$ , todo el Fe-C" se ha transformado en austenita y, por tanto, al templearlo, tendremos todo martensita.

La diferencia más importante entre estos dos modos de obtener martensita es que el compuesto de Fe-C" y martensita es mucho más duro que si tenemos solamente martensita, pero hablando cristalográficamente la martensita es mucho más dura que la mezcla de carburos y martensita.

Con este tratamiento se mejoran las características mecánicas, aumentando:

- Resistencia a la tracción.
- Límite elástico.
- Dureza.



ización o contra acris-  
trabajados en frío para  
titud produce una dis-  
les plásticas, seguidas  
el acero. Se produce  
uros (Fe-C) en los bor-  
o que se pierda la co-  
e en un calentamien-  
do de un enfriamien-

consiste en someter  
o que comprenda, su-  
ento destinado a so-  
ntes dando lugar a la  
tura (austenización).  
o, efectuado desde la  
sta otra más baja que  
ambiente.

eutectoides, es decir  
0,8% de carbono, la  
ión es  $Ac_3 + 50^\circ$ , di-  
de seguridad.

eutectoides, es decir  
o, no sobrepasan el  
eratura de austeniza-  
ra de transformación  
de los hipereutectoio-  
se obtiene austenita  
se obtiene austenita  
mentita aparece pro-  
pasar el  $Ac_1$ , si tem-  
tita proeutectoide,  
figura 32), se nos  
la austenita pasa a  
nos el  $Ac_m$ , todo el  
en austenita y, por  
nos todo martensita.  
portante entre estos  
martensita es que el  
martensita es mucho  
olamente martensita,  
camente la martensi-  
la mezcla de carbu-

se mejoran las carac-  
ntando:

cción.

A costa de disminuir:

- Alargamiento.
- Estricción.
- Resiliencia.

También modifica las propiedades físicas (aumento del magnetismo remanente y de la resistencia eléctrica) y las propiedades químicas (aumento de la resistencia a la acción de ciertos ácidos). La temperatura del temple depende de la clase del acero, por lo que se debe consultar a la casa suministradora. Para los aceros com-  
munes suele ser:

- Hasta el rojo cereza oscuro (700 °C) para aceros duros.
- Hasta el rojo cereza (800 °C) para aceros de dureza media.
- Hasta el rojo cereza claro (900 °C) para aceros dulces.

Los aceros rápidos se calientan lentamente hasta el color rojo y luego rápidamente hasta el blanco (1.200 °C). Para enfriarlos, el baño más empleado es el de agua a 15 °C ó 20 °C, teniendo cuidado de que haya tal cantidad que su temperatura no varíe sensiblemente al templar. Para obtener temples más duros se adiciona al agua un 10% de sal de cocina (cloruro sódico) o ácido sulfúrico. Para temples suaves sirven el agua de cal o los aceites. Los aceros rápidos se enfrían en una corriente de aire, aunque también pueden emplearse sebo o aceite. No debe usarse el petróleo porque, además de no dar mejor resultado, es peligroso.

Los factores que influyen en el temple del acero son los siguientes:

- Composición.
- Tamaño del grano.
- Estructura.
- Forma y tamaño de las piezas.
- Estado superficial.
- Medio de enfriamiento.

Todos ellos tienen gran importancia en el resultado final del tratamiento; por ejemplo, para las mismas condiciones de enfriamiento, la dureza de los aceros de carbono templados es mayor cuanto más alto es su porcentaje de carbono.

## 1. Fluidos de temple

El enfriamiento necesario para lograr el temple correcto se consigue por inmersión del acero, cuya temperatura se ha elevado en un medio refrigerante adecuado: sólido, líquido o gaseoso. Los más utilizados son:

**Agua.**—Se emplea a temperaturas no superiores a 20 °C y en baños refrigerados en los que se produce una circulación continua del líquido. Para disminuir la etapa de enfriamiento, se agita (el agua o la pieza) o se le añaden sales.

**Aceite.**—Los aceites para temple, de origen mineral, pueden ser convencionales (no aditivados) o especiales (aditivados). Se usan para templar aceros de alto porcentaje de carbono o bien aceros aleados.

**Sales o metales fundidos.**—Tanto los metales fundidos (mercurio, plomo, etc.) como ciertas sales (cloruros, nitratos, etc.) se emplean como medios de enfriamiento en los tratamientos isotérmicos.

**Gases.**—Las piezas se pueden enfriar mediante gases, pero este medio sólo es eficaz en aceros de autotemple.

## 2. Tipos de temple

Según el proceso seguido y los resultados obtenidos, existen varios tipos de temple para el acero que se describen a continuación.

**Temple estructural o martensítico.**—La temperatura se eleva hasta unos 50 °C por encima de la crítica y se mantiene el tiempo necesario. Sigue un enfriamiento rápido y continuo en el medio adecuado. El constituyente final es martensita sola si el acero es hipoeutectoide (menos del 0,89% de carbono), o cementita si es hipereutectoide (más del 0,89% de carbono).

**Martempering.**—Tratamiento isotérmico, llamado temple escalonado martensítico, que consiste en calentar el acero a la temperatura de austenización, hacerlo permaneciendo en ella el tiempo necesario y enfriarlo después rápidamente en un baño de sales hasta la temperatura de inicio de transformación de la austenita en martensita, en la cual se mantiene (permanencia isotérmica) hasta que toda la masa adquiere esa temperatura. A continuación se enfría al aire. Las principales ventajas de este tratamiento consisten en que elimina las tensio-



nes producidas por la transformación y, como consecuencia, minimiza las deformaciones y grietas de temple. Se aplica a herramientas, rodamientos, engranajes, troqueles, etc.

Se le conoce con los nombres de temple en dos tiempos, temple diferido o temple interrumpido. No implica transformación isotérmica de la austenita. Se utiliza también para evitar las deformaciones y grietas de la transformación martensítica cuando ésta tiene lugar con una gran velocidad de enfriamiento. Sirve para templar, al agua, herramientas de formas complicadas.

**Austempering.**—Tratamiento isotérmico denominado temple escalonado bainítico. Proceso parecido al del *martempering* si bien la permanencia isotérmica se realiza a mayor temperatura, transformándose la austenita en bainita. Su ventaja principal es la de que, como las tensiones internas propias de la transformación son en él muy débiles, resulta una deformación mínima y libre de las grietas microscópicas de temple. El enfriamiento se efectúa de forma tal que se evita la formación en la zona superior austenita-perlita, la transformación austenita-martensita. Se aplica a muelles, alambres, piezas pequeñas, etc.

### 3. Denominaciones complementarias

Según el modo de realizar el temple, la denominación puede complementarse.

*Según el modo de enfriamiento (severidad de temple)*

- Temple al aire ( en calma o agitado).
- Temple en niebla.
- Temple por aspersión o rociado de líquidos.
- Temple en aceite.
- Temple en agua.
- Temple en solución salina.
- Temple en agua con aditivos.
- Temple en baño de plomo o de otro metal.
- Temple en baño de sales.
- Temple en matrices metálicas.

*Según el modo de calentamiento*

1. Temple a la llama.—Se realiza un calentamiento rápido mediante sopletes hasta la temperatura de austenización. El calentamiento

puede alcanzar una zona más o menos profunda de la pieza.

2. Temple por inducción.—En el cual se realiza el calentamiento por corrientes inducidas hasta la temperatura de austenización. Las temperaturas alcanzadas son del orden de los 1.000 °C en pocos segundos y para tal fin se emplean generalmente unos dispositivos arrollados en forma de bobinas. El conjunto es un transformador en el cual el primario lo constituye la bobina de inducción, y la pieza hace de secundario. La profundidad del temple depende de la frecuencia, la potencia y el tiempo del calentamiento.

*Según la localización*

La más o menos amplia extensión de la zona afectada permite diferenciar entre temple total o localizado.

*Según la penetración*

La mayor o menor profundidad de la zona afectada permite diferenciar entre temple superficial hasta temple en el núcleo.

En el temple superficial existen piezas que, por el tipo de trabajo que han de realizar, requieren, por una parte, gran tenacidad y resiliencia en el núcleo y, por otra, gran dureza y resistencia superficial (por ejemplo, engranajes, cigüeñales, árboles de levas, etc.).

El método del temple superficial consiste en producir un calentamiento muy rápido en la superficie de la pieza, de forma que solamente una delgada capa alcance la temperatura de austenización, seguido de un enfriamiento muy rápido. Para este tratamiento se emplean aceros con un 0,3-0,6% de carbono, siendo su estado inicial el de recocido o normalizado. Actualmente existe gran variedad de dispositivos e instalaciones automáticas para aplicar este tratamiento de forma continua a series de piezas iguales. También se denomina flameado.

### Revenido

Consiste en calentar el acero a una temperatura determinada pero por debajo del  $A_{c1}$ , después de haber sido templado a una temperatura inferior a la de austenización y luego someterlo a uno o varios enfriamientos más bien rápidos hasta la temperatura de ambiente. Con



más o menos profun-  
ción.—En el cual se  
por corrientes induci-  
de austenización. Las  
son del orden de los  
ndos y para tal fin se  
nos dispositivos arro-  
as. El conjunto es un  
primario lo constitu-  
n, y la pieza hace de  
ad del temple depen-  
encia y el tiempo del

plia extensión de la  
erenciación entre temple

profundidad de la zona  
ciar entre temple su-  
el núcleo.

al existen piezas que,  
e han de realizar, re-  
ran tenacidad y resi-  
r otra, gran dureza y  
ejemplo, engranajes,  
as, etc.).

de superficial consiste  
imiento muy rápido en  
de forma que sola-  
cance la temperatu-  
guido de un enfria-  
este tratamiento se  
3-0,6% de carbono,  
de recocido o nor-  
existe gran variedad  
ciones automáticas  
ento de forma conti-  
ales. También se de-

el acero a una tem-  
por debajo del  $Ac_1$ ,  
plado a una tempera-  
nización y luego so-  
enfriamientos más bien  
ra de ambiente. Con

este tratamiento se pretende conseguir algunos de los fines siguientes:

- Mejorar los efectos del temple.
- Disminuir las tensiones internas originadas en el temple.
- Modificar las características mecánicas disminuyendo dureza y resistencia a la rotura, así como aumentando tenacidad, plasticidad y estiración.

Es, por tanto, un tratamiento complementario del temple. Al conjunto de las operaciones de temple y revenido a que se somete un producto siderúrgico se le denomina bonificado. El revenido da al acero las propiedades adecuadas al fin a que se destina. Cuanto mayor sea la dureza del acero templado, o sea, cuanto mayor sea la cantidad de martensita que contenga, más alto será el nivel de las propiedades que puedan lograrse con un buen revenido, disminuyendo la dureza hasta un valor suficiente y aumentando, en cambio, la tenacidad.

### 1. Fragilidad del revenido

Existen algunos aceros en los cuales, en determinados intervalos de la temperatura de revenido, la resiliencia, en vez de aumentar, disminuye. A este fenómeno se le conoce como fragilidad del revenido y, según la zona en que se presenta, se distinguen dos tipos:

*Fragilidad de revenido entre 250 °C y 400 °C.*—Es debida a la formación de una delgada capa de cementita en los contornos de la martensita, que disminuye la tenacidad y aumenta la fragilidad. Se logra desplazar esta zona mediante adiciones de 0,5-2% de Si.

*Fragilidad de revenido entre 450 °C y 550 °C.*—Se presenta en aceros que contienen pequeñas cantidades de Cr y Ni. Se puede eliminar o retrasar con la adición de Mo o modificando las condiciones de temperatura, tiempo de revenido y velocidad de enfriamiento.

### Otros tratamientos térmicos

#### *Normalizado*

Tratamiento térmico que se da a los aceros al carbono de construcción. Se utiliza también

en piezas fundidas, forjadas, laminadas, mecanizadas, etc., y en general siempre que se trate de eliminar las tensiones producidas por cualquier método de conformación. También tiene interés para destruir los efectos de un sobrecalentamiento o un tratamiento térmico anterior, ya que afina la estructura. Consiste en calentar el acero a una temperatura de 30 °C a 50 °C superior a la crítica ( $Ac_3$ ) y, una vez transformado completamente, dejarlo enfriar al aire en calma. Se diferencia el recocido de regeneración y del temple en que el enfriamiento es más lento que en temple y más rápido que en el recocido. Es más fácil de ejecutar y requiere menos tiempo. Su resultado depende del espesor de la pieza, pues las velocidades de enfriamiento son distintas, siendo mayores en las piezas delgadas que en las gruesas.

### *Envejecimiento*

Es la variación en función del tiempo, a la temperatura ambiente o por medio de un ligero calentamiento, de las propiedades de un metal que ha sufrido un tratamiento previo.

El envejecimiento puede ser natural o espontáneo, si se produce a temperatura ambiente y sin ningún otro factor, o envejecimiento artificial o acelerado, cuando se realiza a una temperatura moderada. El objeto de este tratamiento es obtener rápidamente modificaciones de propiedades que sólo serían conseguidas de forma espontánea al cabo de un tiempo mucho más largo.

### *Recocido azul o pavonado*

Tratamiento efectuado en un medio y a una temperatura convenientes para que la superficie pulida del metal se recubra de una película uniforme de óxido adherente de aspecto azul brillante.

### *Temple austenítico o hipertemple*

Conservar la austenita a temperatura ambiente impidiendo cualquier transformación a lo largo del enfriamiento. Es aplicable únicamente a los aceros en los que el principio de transformación martensítica («Ms») es inferior a la temperatura ambiente (aceros austeníticos).



### Tratamiento subcero

El tratamiento subcero se usa para los aceros que, después del temple normal en agua o aceite, conservan todavía cierta cantidad de austenita sin transformar. Con él, se consigue transformar la austenita residual en martensita continuando el enfriamiento a temperaturas inferiores a  $0^{\circ}\text{C}$ . La transformación es casi completa. Utilizado para aceros rápidos, de cementación, indeformables, etc. Es muy útil para obtener calibres de precisión, pues evita que con el tiempo se modifiquen sus medidas por efecto de la lenta transformación de la austenita residual que queda en la estructura si, como se ha dicho, se efectúa el temple en agua o aceite.

### Tratamientos termoquímicos

Los tratamientos térmicos, en ocasiones, no son suficientes para mejorar ciertas características, particularmente en la superficie de los metales. Cuando se necesitan piezas con una superficie muy dura, resistentes al desgaste y la penetración, y con el núcleo central muy tenaz para poder resistir y soportar los esfuerzos a que están sometidas, se usan diversos procedimientos, tales como los tratamientos termoquímicos. Se denominan termoquímicos (o de cementación) porque, aparte las operaciones de calentamiento y enfriamiento, modifican la composición química del acero en la capa superficial mediante el aporte o la difusión de ciertos elementos (carbono, nitrógeno, azufre, etc.).

Con ellos se trata de conseguir algunos de los fines siguientes:

- Aumentar la dureza superficial sin alterar la tenacidad del núcleo.
- Favorecer las cualidades de lubricación y rozamiento.
- Aumentar la resistencia al desgaste.
- Aumentar la resistencia a la fatiga.
- Mejorar la resistencia a la corrosión.

Se deben realizar en unos hornos especiales del tipo «mufla» (Fig. 38), o en unos hornos con atmósfera controlada de nitrógeno, durante un tiempo dado, que determina el espesor de la capa que se ha querido endurecer.

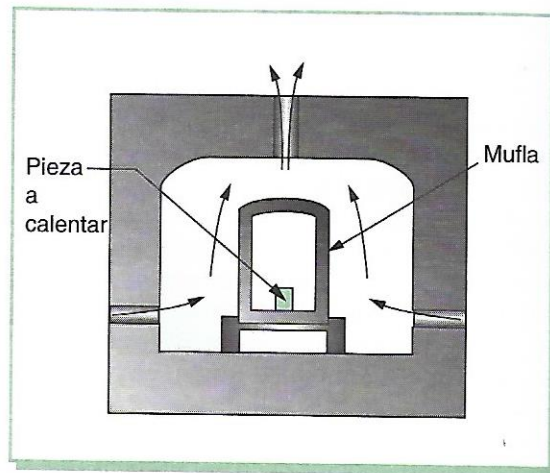


Fig. 38. Horno de mufla.

### Cementación

Aumentar el contenido de carbono de la superficie de un acero mediante un calentamiento a temperaturas comprendidas entre  $850^{\circ}\text{C}$  y  $950^{\circ}\text{C}$  en presencia de un medio capaz de cederle carbono, denominado agente cementante o carburante. La cementación va seguida siempre de temple y revenido. Se aplica a piezas que requieran gran dureza superficial (60 a 65 HRC) y resistencia al desgaste, junto a elevados niveles de ductilidad y resistencia para poder soportar esfuerzos de importancia. Se emplean principalmente aceros de bajo contenido de carbono (menos del 0,2%), aleados o no.

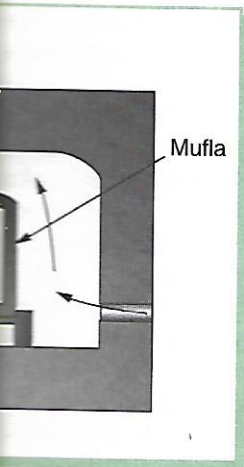
El proceso a seguir depende de varios factores que influyen sobre la estructura y el espesor de la capa (0,3 a 1,5 mm). Estos son:

- Composición del acero.
- Agentes cementantes.
- Temperatura de cementación.
- Tiempo de cementación.

Según sea la naturaleza del agente cementante, se pueden utilizar tres procedimientos distintos:

**Cementación sólida o en caja.**—Se colocan las piezas completamente rodeadas de un agente cementante sólido (carbón vegetal, huesos calcinados y mezcla Caron) y en cajas metálicas, las cuales, perfectamente tapadas, se introducen en hornos calentados a menos de  $1.000^{\circ}\text{C}$ , donde se mantienen el tiempo nece-





do de carbono de la  
mediante un calenta-  
comprendidas entre  
presencia de un medio  
denominado agente  
la cementación va se-  
revenido. Se aplica a  
dureza superficial (60  
desgaste, junto a ele-  
dad y resistencia para  
importancia. Se em-  
de bajo contenido  
(%), aleados o no.  
pende de varios fac-  
estructura y el espe-  
(m). Estos son:

acero.  
tes.  
cementación.  
ación.

del agente cemen-  
tres procedimientos

o en caja.—Se colo-  
ente rodeadas de un  
carbón vegetal, hue-  
aron) y en cajas me-  
nente tapadas, se in-  
ntados a menos de  
nen el tiempo nece-

sario para que en las piezas se alcance el espesor de capa deseado. A continuación, y una vez enfriadas, se las extrae de las cajas y se les da el tratamiento térmico adecuado. Si sólo se requiere cementar determinadas zonas, es preciso proteger previamente las restantes mediante sobreespesores o materias protectoras capaces de evitar su contacto con el carbono. Para ello se emplean, generalmente, pastas, cinturas, cobreado, casquillos, etc.

**Cementación líquida.**—Los cementantes líquidos ejercen su acción en estado fundido y están constituidos por mezclas de sales (cianuros, cloruros, carbonatos, fluoruros, etc.). El proceso consiste en introducir las piezas en el baño de sales a la temperatura adecuada. Este método es mucho más rápido, limpio y económico, pues con él se pueden emplear dispositivos automáticos que efectúan las operaciones de cementación y temple. Sus inconvenientes son la toxicidad de los baños empleados y los riesgos de proyección o explosión del baño.

**Cementación gaseosa.**—Las piezas son introducidas en hornos previamente calentados y en presencia de una atmósfera gaseosa carburante (gas de alumbrado preparado, mezcla de hidrocarburos, etc.) que ha sido preparada en instalaciones adecuadas o en el mismo horno.

Se emplea en gran escala en la industria del automóvil y similares, ya que ofrece la posibilidad de trabajar en serie en hornos continuos. Además, las piezas salen completamente limpias y se pueden tratar las que, por sus grandes dimensiones, no podrían serlo con los métodos anteriores.

Los tratamientos térmicos posteriores a la cementación son algo complicados debido a que las piezas tienen un 0,10% a 0,20% de carbono en el núcleo y un 0,80% a 0,90% del mismo en la periferia, por tanto, las temperaturas de transformación son distintas: 900 °C y 750 °C, respectivamente. Así, si se calienta el acero a 900 °C y se enfría rápidamente, quedan templados el núcleo y la capa cementada, pero ésta resultará con un grano grande y muy frágil por efecto del sobrecalentamiento. En cambio, si se calienta a 750 °C, la capa quedará templada, pero no el núcleo. Por ello, y según los casos, se emplean los tratamientos térmicos indicados en la figura 39.

- Temple directo desde la temperatura de cementación y revenido posterior.
- Temple a temperaturas inferiores a  $A_{c3}$  y revenido.
- Doble temple a temperaturas superiores a  $A_{c3}$  y  $A_{c1}$  y revenido.
- Temple a temperaturas superiores a  $A_{c3}$  y revenido.
- Austempering y martempering.

### Nitruración

Enriquecer la superficie del acero por medio de la absorción del nitrógeno, calentándolo a unos 500 °C en una corriente de amoníaco, provocando la formación de una capa rica en nitruros complejos. Consigue capas extraordinariamente duras sin necesidad de un

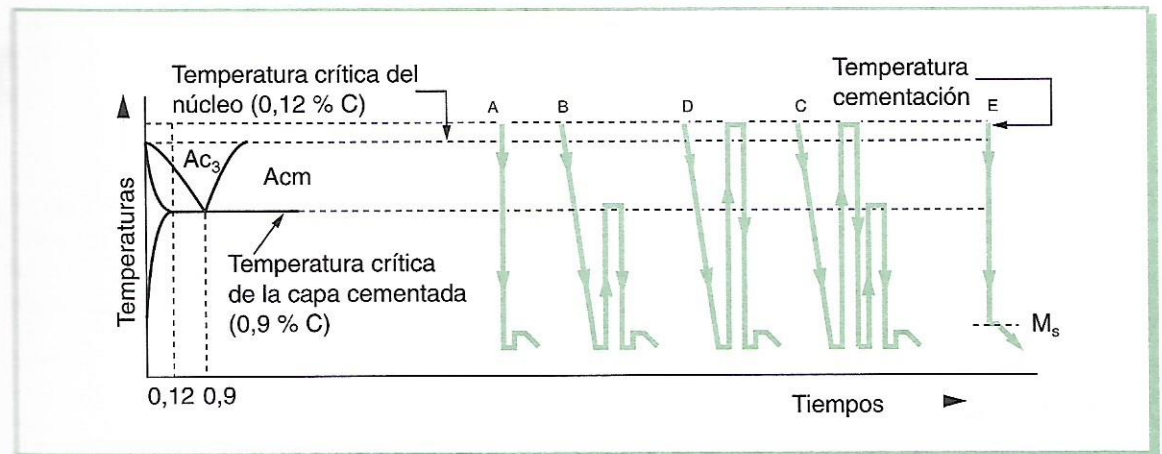


Fig. 39. Diagrama de los tratamientos utilizados después de la cementación.



tratamiento posterior. Los efectos que intenta conseguir son:

- Capas superficiales más duras (78 HRc) que las cementadas.
- Superficies más resistentes al desgaste y, en algunos casos también, más resistentes a la corrosión.

Se aplica a piezas que van a ser sometidas a esfuerzos simultáneos de choque y rozamiento (punzones, matrices, etc.) o que deben ser muy resistentes al desgaste (engranajes, instrumentos de medida, etc.). Los espesores de capa obtenidos varían entre 0,20 y 0,70 milímetros y dependen de la duración del tratamiento. Las ventajas de la nitruración, además de las excelentes condiciones de dureza y resistencia al rozamiento, residen en que, al ser templadas y revenidas previamente las piezas, no existe el peligro de deformaciones y grietas después del tratamiento y, por tanto, se tratan casi con sus dimensiones finales. El inconveniente mayor es el de su duración, ya que, para un espesor de 0,5 mm, se requieren cerca de 70 horas de tratamiento. Los principales métodos de nitruración son: nitruración gaseosa, que solamente le suministra nitrógeno, y en baño de sales fundidas, que además de nitrógeno puede aportar pequeñas cantidades de carbono.

### Cianuración

Se utiliza para crear una capa superficial, rica en carbono y nitrógeno, introduciendo el acero en un baño líquido a 800 °C ó 900 °C y formado fundamentalmente por cianuro sódico y otras sales (cloruros y carbonatos sódicos). El espesor de la capa cianurada depende de la duración del proceso, siendo en general igual o inferior a 0,30 mm en un tiempo inferior a una hora. Se emplea para endurecer y aumentar la resistencia al desgaste de piezas de acero de bajo medio contenido de carbono. Una vez realizado el tratamiento, se les da un temple para conseguir la máxima dureza (hasta 65 HRc).

### Carbonitruración

Tiene por objeto crear una capa rica en carbono y nitrógeno, calentando el acero entre

700 °C y 900 °C y en una atmósfera gaseosa formada por una mezcla de hidrocarburos, amoníaco y óxido de carbono. De esta forma se obtienen capas que oscilan entre 0,1 y 0,6 mm de espesor en un proceso que dura varias horas. Presenta las ventajas, sobre la cementación, de producir menos deformaciones y de efectuarse a menor temperatura. Se aplica a aceros al carbono y a aceros de aleación, consiguiéndose su máxima dureza con un tratamiento de temple posterior al proceso. Se usa preferentemente para tratar ruedas dentadas y piezas de poco espesor.

### Sulfinuzación

Incorpora azufre, nitrógeno y carbono a la superficie de la pieza, introduciéndola en un baño de sales a 570 °C. El baño está compuesto por una mezcla de cianuro y sulfito sódico. La profundidad máxima de la capa es de 0,3 mm y se consigue en tres horas. Se aplica a materiales ferrosos (aceros y fundiciones) y a algunas aleaciones de cobre, siendo las siguientes las principales características obtenidas:

- Gran resistencia al gripaje o agarrotamiento.
- Gran resistencia al desgaste y coeficiente de rozamiento bajo.
- Capa porosa, muy favorable para la lubricación.

Se emplea preferentemente en ejes, camisas de cilindros, herramientas de acero de corte (para aumentar su duración útil), engranajes y, en general, piezas de maquinaria sometidas a rozamiento.

### Recarburación

Restauración del contenido en carbono de la capa superficial descarburada por un tratamiento anterior. En este tratamiento, el metal puede no recuperar todas sus características originales.

### Cromización

Tiene por objeto incrementar el contenido de cromo.



na atmósfera gaseosa  
la de hidrocarburos,  
ono. De esta forma se  
n entre 0,1 y 0,6 mm  
que dura varias horas.  
re la cementación, de  
ciones y de efectuarse  
aplica a aceros al car-  
ón, consiguiéndose su  
tratamiento de temple  
usa preferentemente  
s y piezas de poco es-

trógeno y carbono a  
introduciéndola en  
C. El baño está com-  
de cianuro y sulfito  
máxima de la capa es  
e en tres horas. Se  
s (aceros y fundi-  
ones de cobre, sien-  
ncipales caracterís-

al gripaje o agarrota-

al desgaste y coefi-  
ento bajo.

favorable para la lu-

mente en ejes, cami-  
tas de acero de corte  
n útil), engranajes y,  
quinaria sometidas a

enido en carbono de  
burada por un trata-  
tratamiento, el metal  
s sus características

mentar el contenido

#### NOTA:

*Este tratamiento no debe confundirse con el cromado, que es la deposición electrolítica del cromo, ni con la cromatización, que es la formación, mediante intercambio iónico, de complejos basándose en cromo en la superficie del metal.*

### Tratamientos mecánicos

Se somete al metal a operaciones de deformación (en frío o en caliente) para mejorar sus propiedades mecánicas y, además, darle formas determinadas. Al deformar mecánicamente un metal mediante prensado, estirado, laminado, etcétera, sus granos son deformados y aplastados, alargándose en el sentido de la deformación y ocurriendo lo mismo con las impurezas y defectos, por lo cual se origina una modificación en la estructura y, en consecuencia, en las propiedades del metal. Las deformaciones en caliente (o tratamientos termomecánicos), denominadas también forja, son las que se realizan a temperaturas superiores a la de recrystalización.

Las deformaciones en frío tienen lugar por debajo de la temperatura de recrystalización y pueden ser profundas o superficiales, según se efectúe la modificación.

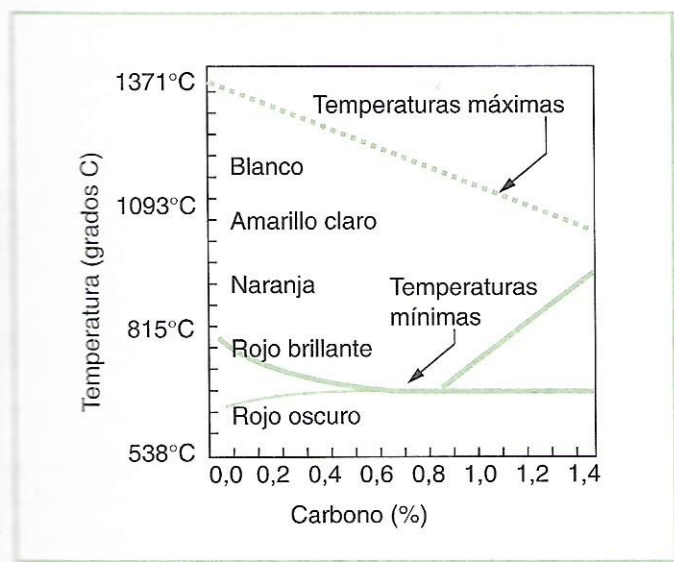


Fig. 40. Temperaturas máximas y mínimas de forja en los aceros al carbono.

### Tratamientos mecánicos en caliente. Forja

Pueden obtenerse grandes deformaciones sin que se produzca acritud. Si la aleación está formada por diversos constituyentes, debe tomarse como temperatura de forja la correspondiente al constituyente que tenga la temperatura de recrystalización más elevada (Fig. 40).

Pero es muy importante no subirla demasiado, pues el tamaño de los granos podría aumentar en exceso. Si tanto se ha elevado que se acerca a la de fusión, el metal pasa a tener una estructura de granos muy grandes y se debilita. A este fenómeno se le llama quemado, y es imposible compensarlo con ningún otro tratamiento (Fig. 41).

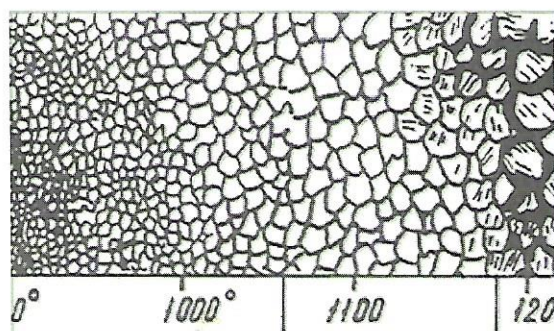


Fig. 41. Aumento del tamaño de grano de la austenita de un acero de 0,60% de C.

La forja da lugar:

- Afino del grano, por trituración y reconstrucción del mismo en un tamaño más pequeño.
- Soldadura de las porosidades y sopladuras internas.
- Mejora de la macroestructura, por deformación y orientación de los granos, lo cual crea una especie de fibra.

Todo ello se traduce en una mejora de las características, si bien la creación de fibra da lugar a ciertas propiedades direccionales que aumentan a aquéllas en el sentido de la fibra y las reducen transversalmente. La intensidad de la deformación la



da el coeficiente de forja, que es la relación entre las secciones inicial y final de la pieza sometida a según la clase del trabajo y su forma de ejecución; la forja se denomina laminado, embutido, aplanado, estirado, recalado, extruido, estampado, etc.

### Tratamientos mecánicos en frío

Produce un aumento de la dureza y la resistencia a la tracción de los metales y aleaciones, disminuyendo su plasticidad y tenacidad. El cambio en la estructura se debe a la deformación de los granos y a las tensiones que se originan. Cuando un metal ha recibido este tratamiento, se dice que tiene acritud.

**Restauración y recristalización.**—Los metales sometidos a una deformación en frío van perdiendo con el tiempo parte de su acritud y recobran parcialmente sus características mecánicas iniciales, disminuyendo también las tensiones producidas por la deformación. Este efecto se llama restauración y se logra sin que cambie la estructura granular del metal, pues los granos siguen siendo alargados y deformados. La recristalización consiste en transformar los granos alargados por la deformación en granos equiaxiales calentando el metal por encima de una temperatura determinada para cada metal o aleación (600 °C ó 700 °C para el acero). Se diferencia de la restauración porque realiza una reconstrucción total de la estructura micrográfica del metal y, por tanto, recupera totalmente sus propiedades mecánicas iniciales. La recristalización se logra prácticamente por medio del recocido contra acritud que ya hemos mencionado.

**Envejecimiento de los aceros.**—En los aceros, el endurecimiento y la pérdida de tenacidad originados al ser estirados o laminados en frío van aumentando lentamente con el tiempo, hasta alcanzar el máximo al cabo de cierto tiempo (meses o años) si el acero permanece a la temperatura ambiente. Esto es lo que se llama envejecimiento de los aceros. Este fenómeno se puede acelerar calentándolos hasta 200 °C ó 300 °C, con lo cual alcanzan mucho antes su máxima dureza. Este tratamiento se denomina envejecimiento artificial. Y como aumenta su fragilidad, y el acero entre 200 °C y 300 °C tiene color azul de revenido, a aquélla

se la conoce como fragilidad azul del acero. El envejecimiento y la fragilidad azul afectan sólo al hierro no técnicamente puro y al acero.

**Tratamientos mecánicos en frío por deformación superficial.**—Así como en la deformación profunda se logrará un endurecimiento por deformación de toda masa, se puede obtener un efecto menor martilleando las superficies del metal, con lo cual se endurece por acritud, se eleva su límite de fatiga y se reduce la posibilidad de roturas originadas por las fisuras artificiales. Modernamente se someten los muelles al bombardeo por perdigones, logrando endurecer así su superficie.

### Tratamientos termomecánicos. «Ausforming»

Tratamiento derivado del temple martensítico normal y se realiza deformando del 60% al 90% el acero una vez calentado a temperatura de temple, evitando la recristalización de la austenita. Posteriormente se enfría de manera tradicional. Práctica del *ausforming* (Fig. 42):

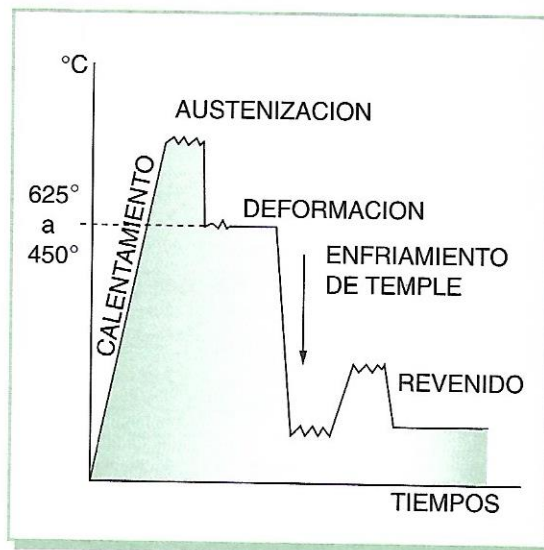


Fig. 42. Diagrama del tratamiento «ausforming».

— Se calienta el acero a temperatura de temple.

— Se lleva el acero a un horno, que puede ser de sales (Fig. 43). Este se encuentra a una temperatura de 625° a 450°, según la clase de acero.



idad azul del acero. El  
idad azul afectan sólo  
e puro y al acero.

icos en frío por defor-  
como en la deforma-  
á un endurecimiento  
masa, se puede obten-  
trillando las superfi-  
se endurece por acrí-  
e fatiga y se reduce la  
ginadas por las fisuras  
se someten los mue-  
digones, logrando en-

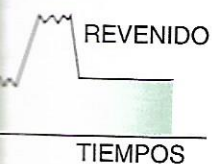
mecánicos.

del temple martensí-  
deformando del 60% al  
entado a temperatura  
recristalización de la  
se enfría de manera  
ausforming (Fig. 42):

ACION

RMACION

ENFRIAMIENTO  
DE TEMPLE



to «ausforming».

ro a temperatura de

un horno, que puede  
se encuentra a una  
º, según la clase de

— Se procede seguidamente a la deformación del metal. Es la fase fundamental, que se puede realizar en una o en varias etapas por forja, embutición, laminación, extrusión, estirado e incluso por explosión. La deformación debe ser como mínimo de un 60%.

— Una vez deformado el material, se somete a enfriamiento del temple, en la forma acostumbrada.

— Finalmente se revienen las piezas.

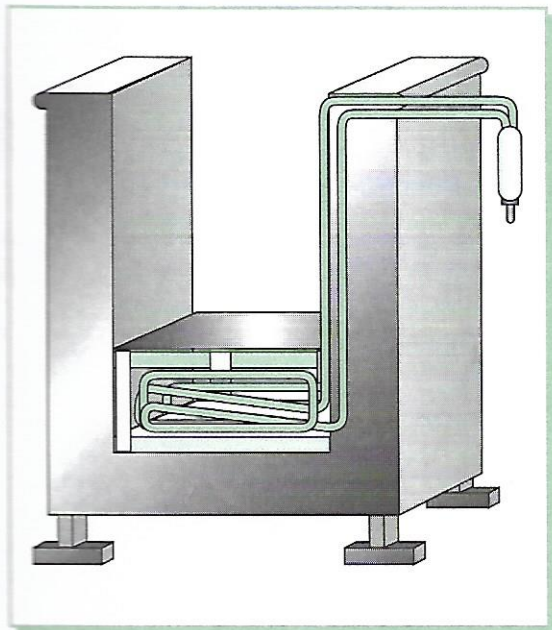


Fig. 43. Horno de sales con calentadores sumergidos.

Los aceros para *ausforming* son de bajo contenido en carbono, inferior al 0,5%, altos en silicio, con 1,5% de media, aleados con cromo, níquel, molibdeno y algunas veces vanadio.

El proceso del *ausforming* se aplica en la fabricación de barras de torsión, muelles y multitud de piezas aerodinámicas.

## Tratamientos superficiales

### Cromado duro

Recubrimiento galvánico que se realiza sobre metales con arreglo a una técnica especial que mejora algunas de las propiedades del metal base, como resistencia al desgaste, al rayado, penetración y corrosión, como también el coeficiente de rozamiento del metal.

Se aplica tanto a piezas de nueva fabricación como a piezas desgastadas. Se utiliza en la fabricación de motores de explosión, para el cromado de cilindros, camisas, ejes de levas, cigüeñales, segmentos, etc. (Fig. 44).

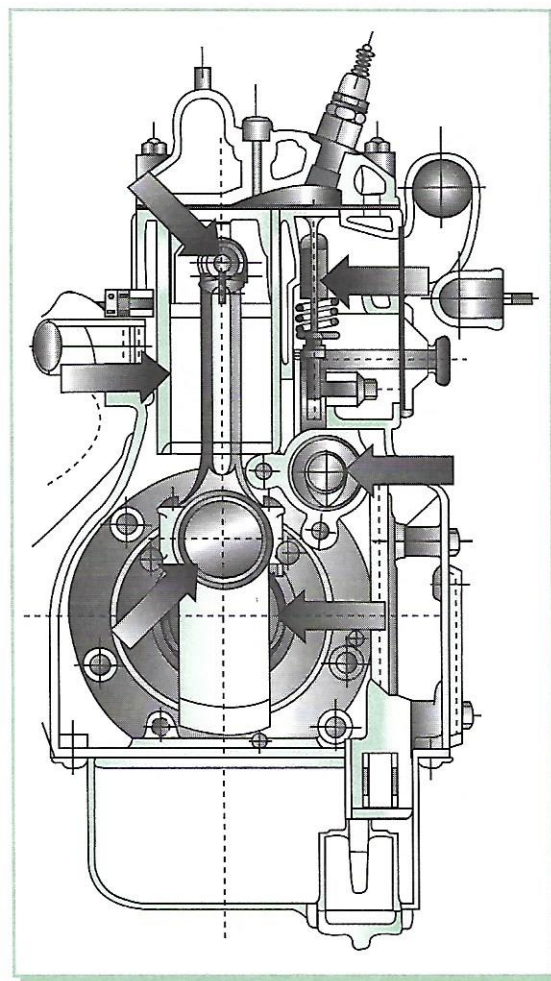
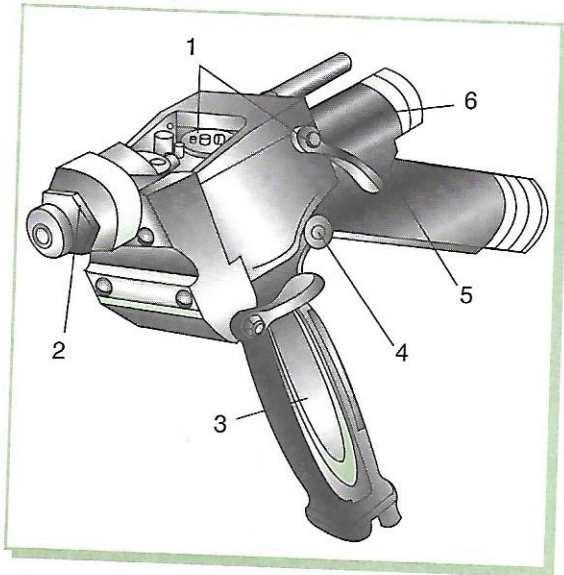


Fig. 44. Sección de motor Rolls-Royce, con indicación de espesores de cromado duro.

### Metalización

Proyección de partículas en estado plástico o fundido, sobre una pieza, por medio de una pistola metalizadora (Fig. 45). Está formada por un soplete que funde el metal de aportación, y de un suministro de aire comprimido que proyecta el metal y acciona el mecanismo de avance del alambre (Fig. 46). Se emplea para recargues de ejes o piezas desgastadas, reparación de defectos en piezas fundidas, protección de piezas contra el desgaste, contra la corrosión





**Fig. 45.** Pistola de proyección TOP-YET: 1) mandos; 2) boquilla de proyección; 3) soporte con las tuberías de entrada de oxígeno, acetileno y aire; 4) mecanismo del mando del hilo; 5) motor de aire comprimido, y 6) mando micrométrico para el avance automático del hilo.

atmosférica, mejora del acabado de piezas, fabricación de moldes y de electrodos y aplicaciones decorativas.

### Implantación iónica

Bombardeo con iones acelerados (Fig. 47) para introducir distintos tipos de átomos en las

primeras capas del material con el fin de modificar su superficie y hacerlas más resistentes al desgaste y corrosión. Los tiempos requeridos van desde segundos hasta horas por centímetro cuadrado de superficie a tratar.

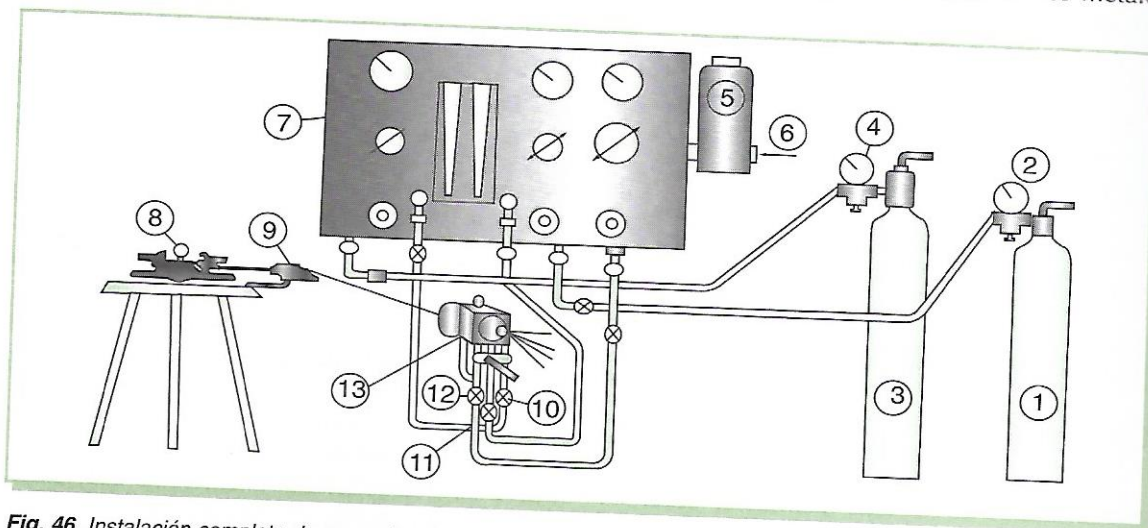
## CORROSION, OXIDACION. CAUSAS Y PROTECCIONES

### Oxidación

Reacción fundamental derivada de la corrosión de los metales y se define como el efecto producido por el oxígeno en la superficie de un metal como consecuencia de factores externos que facilitan su desarrollo. Hay metales, como el aluminio y el cobre, que no presentan un fenómeno de agrietamiento por oxidación y tienen un espesor crítico de la capa oxidada que los protege de la oxidación progresiva.

### Corrosión

Estado de equilibrio, o forma estable de los metales, en el que se presentan en la naturaleza combinados con otros elementos con los cuales forman compuestos químicos (óxidos, carbonatos, sulfatos, etc.). Mediante los procesos metalúrgicos se obtienen los metales



**Fig. 46.** Instalación completa de un equipo de metalización: 1) botella de acetileno; 2) manorreductor de acetileno; 3) botella de oxígeno; 4) manorreductor de oxígeno; 5) depurador de aire; 6) llegada de aire comprimido; 7) cuadro de reglaje; 8) bobinadora; 9) enderezador del alambre; 10) tubo de oxígeno; 11) tubo de acetileno; 12) tubo de aire; y 13) pistola metalizadora.



**Fig. 47.** Equipo de implantación iónica.

parte, a partir de las condiciones de equilibrio durante largos periodos, tales como una temperatura elevada, como una atmósfera oxidante, que el proceso es irreversible y rápido. En ciertos puntos, incluso se halla en un estado de equilibrio, que reaccionan en condiciones limitadas, por lo que, por tanto, la reacción más lenta es la que determina el tiempo de vida de la superficie.

### Causas

La corrosión de los metales, así en un medio que está más húmedo, tienen un carácter más del hidrógeno. Pero si con igual carácter, en forma de vapor, y algunas veces, quedan expuestas a la experiencia. Actualmente se la produce por dos causas: la química y la