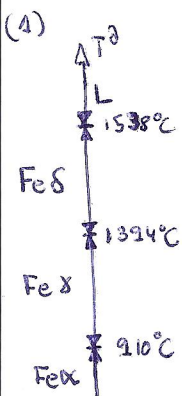


I. BLOQUE: MATERIALES

5. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS

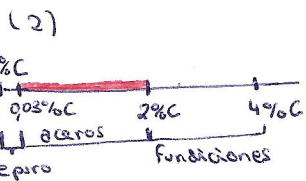
5.1. DIAGRAMA HIERRO - CARBONO



Al enfriar una probeta de hierro puro, se producen una serie de transformaciones alótropicas (4):

- A 1538°C, el hierro pasa de estado líquido a sólido, con una estructura BCC de $a_0 = 29,3 \text{ nm}$, el hierro δ
- A 1394°C, el hierro pasa de fase δ a hierro γ , con estructura FCC y $a_0 = 36,5 \text{ nm}$
- A 910°C, el hierro alcanza la fase α , caracterizada por ser BCC y $a_0 = 29 \text{ nm}$

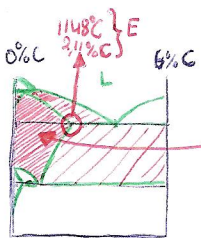
Al calentar la probeta se verifican los mismos cambios pero a una t° ligeramente superior debido a la inercia del sistema. Esto provoca una histéresis que será mayor cuanto más brusco sea el enfriamiento o calentamiento. Estos cambios alótropicos provocan también cambios volumétricos bruscos.



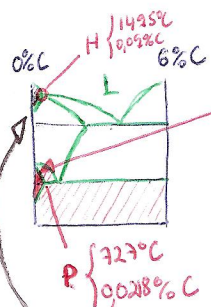
Las aleaciones Fe-C se dividen en tres grupos, en función del % de C:

- Hierro puro: se considera Fe puro si posee menos del 0,03% de C en peso.
- Aceros: poseen entre un 0,03 y un 2% de C en peso
- Fundiciones: formadas por un 2% a un 4% de C. Si es mayor de un 5% de C, no son útiles por su fragilidad.

En las aleaciones Fe-C, se encuentran los siguientes constituyentes:

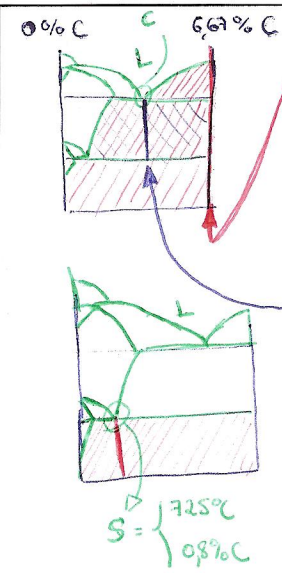


• Austenita: es la solución sólida por inserción de los átomos del carbono en los huecos intersticiales octaédricos de hierro γ (FCC). Los átomos del C no encajan totalmente por lo que distorsionan la red cristalina, de forma que a 1148°C se consigue la solubilidad máxima de 2,11%, punto E.



• Ferrita α : solución sólida de inserción de átomos de C en los huecos intersticiales del hierro α (BCC) octaédricos. La diferencia de radios provoca que exista una gran distorsión de la red, generando una escasa solubilidad que alcanza el máximo a 0,0218% C con una t° de 727°C, por lo que se considera hierro puro, siendo el más blando y dúctil de los aceros, punto P.

• Ferrita δ : solución intersticial de carbono en el Fe δ (BCC), que posee una constante de red algo mayor que la del Fe α lo que permite que la solubilidad máxima sea de 0,09% de C a 1495°C, punto H



Cementita: compuesto intermetálico (con enlaces metálicos y no metálicos, aunque con carácter global metálico) cuya composición es del 6,67% C y responde a Fe_3C . Cristaliza de forma ortorrómbica y es el más duro y frágil de los constituyentes de los aceros.

Ledeburita: es una aleación eutéctica con un 4,3% de C que solidifica a 1148°C con un 52% de cementita y un 48% de austenita del 2% de C. A temperaturas inferiores a la eutéctica (725°C), desaparece para conformarse como cementita y perlita aunque se percibe su presencia anterior y a veces se denomina ledeburita transformada.

Perlita: es la estructura resultante de un acero eutéctico, cada grano está formado por láminas de cementita y ferrita α . Si el enfriamiento tiene lugar de forma rápida la estructura resultante es más borrosa y se llama perlita sorbítica o sorbita. Si la perlita laminar se calienta adopta la forma de glóbulos incrustados en β ferrita con el nombre de perlita globular.

En el diagrama Fe-C, aunque en realidad es Fe-cementita, se pueden observar las siguientes transformaciones:

- **Eutéctica**: tiene lugar en el punto C, con un 4,3% de C y 1148°C, donde el acero líquido se convierte en ledeburita con un 6,67% de C en la cementita y un 2,11% de C en la austenita.

- **Eutécticoide**: se produce en el punto S, con 725°C y un 0,8% de C, de forma que la austenita se convierte en perlita, formada por ferrita α y cementita. ~~En la que la fase matriz es la ferrita α~~ Esta transformación es muy relevante en algunos tratamientos térmicos de los aceros.

- **Peritéctica**: en el punto E, con 1495°C y un 0,09% de C se crea austenita a partir de líquido con un 0,53% de C y ferrita δ con un 0,02% de C, para crear austenita 0,17% de C. En una reacción peritéctica una fase líquida y una sólida se combinan para crear otra sólida.

5.1.a. Solidificación de aceros

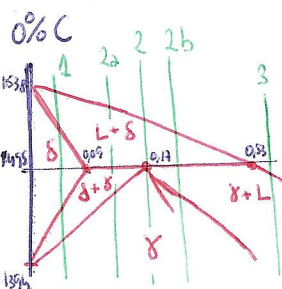
El estudio de las transformaciones en el área peritéctica carecen de utilidad puesto que quedan sumergidos posteriormente. El acero, en función de su % de Carbono puede solidificarse de tres modos:

= Si la aleación es menor de 0,09% de C, solidifica en ferrita δ que pasa a austenita más tarde (4)

- Si se encuentra entre el 0,09% y el 0,53%, se produce una solidificación peritéctica que pasa de $L + \delta$ a $\delta + \gamma$, γ ó $L + \gamma$, para acabar como austenita (2)

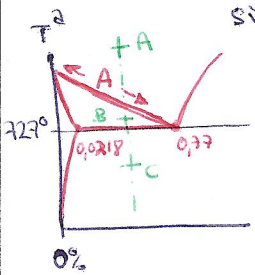
= Si la aleación posee más de 0,53% de C (y menos del 4,3%), solidifica directamente en austenita.

Una vez solidificadas, todas las aleaciones son totalmente austeníticas si son mayores del 2,11%, en algún momento y si no, poseen austenita.



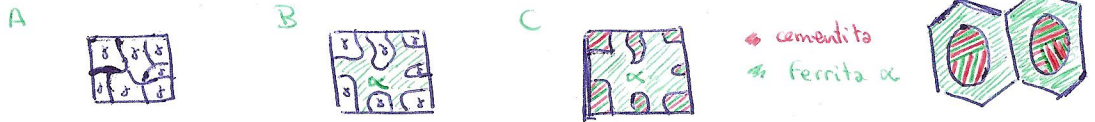
5.1.b. Descomposición de la austenita en el enfriamiento

(1) Según el contenido en carbono del acero, la austenita experimenta las siguientes transformaciones:

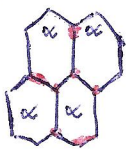


- Los aceros hipo eutectoides, de entre 0,0218% y un 0,77% de C, comienza la transformación austenítica en la temperatura A (1), formándose ferrita α hasta que a la temperatura eutectoide (727°C), la austenita que resta se convierte en perlita (3). La fase matriz es la ferrita α y la fase dispersa es la perlita que es más dura y menos elástica. (2)

(2)

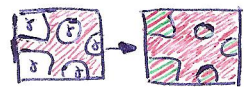
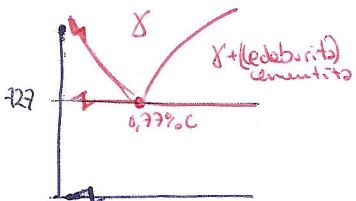


(3)



cementita

En los aceros hipo eutectoides con menos del 0,0218% de C, toda su estructura se convierte en ferrita α y no se produce en ellos fase perlítica, sino que debido al descenso de saturación del carbono en el hierro α , éste precipita y se forma cementita en los puntos más energéticos de la red (3), denominada cementita terciaria.



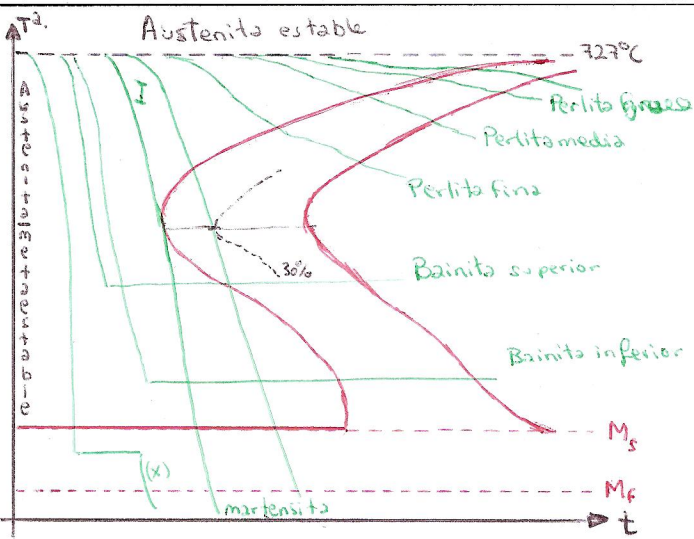
cementita

- Los aceros hiper eutectoides (>0,77% C) comienza la transformación en la temperatura (C) creándose cementita (cementita terciaria) en los puntos más energéticos y a la t° eutectoide (727°C) la austenita restante se transforma en perlita. En este caso la fase matriz es la cementita que es mucho más dura que la perlita. La fase matriz es la que soporta los esfuerzos, por eso estos aceros no se emplean en piezas susceptibles de recibir golpes y romper frágilmente.

5.2. CURVAS TTT

El diagrama de equilibrio Fe-C se refiere tanto a transformaciones que suceden a muy bajas velocidades de enfriamiento, por lo tanto, no reflejan la realidad del proceso. Por ello Bain y Davenport idearon una gráfica donde se exponen el tiempo, la temperatura y la transformación del acero, siempre con composición constante.

Para obtener estas curvas TTT, se realizan varias probetas con la misma composición y se calientan hasta que estén completamente austenizadas (si es una aleación eutectoide: 727°C), a continuación se enfrían por separado con distintas velocidades de enfriamiento y se mide el tiempo hasta que aparece un primer núcleo que no sea austenita y cuando no quede nada de austenita. Estos puntos se unen y forman las características formas en "C" de las curvas TTT, en un proceso de nucleación y crecimiento.



Por una aleación eutécticoide, a temperaturas ligeramente inferiores a la eutécticoide, se necesita un tiempo muy elevado para que se complete la transformación.

La transformación se produce a velocidades máximas en una franja intermedia, dado que depende de la velocidad de nucleación y del proceso de difusión.

El tamaño del grano será menor cuanto mayor sea la velocidad de enfriamiento y por consiguiente, la dureza y resistencia mecánica del material, mayor, pero más frágil. Esto produce que exista perlita gruesa, media y fina, en función del tamaño de su grano.

Las estructuras que se forman a temperaturas menores a la "nariz" de la curva, son distintas de la perlita y se denominan bainitas, esto se debe a la dificultad para la difusión del 'C' a menos de 500°C, creando un compuesto intermedio perlita-martensita, que solo se alcanza por enfriamientos no continuos, es decir, que mantienen la temperatura durante algún tiempo.

La martensita se origina cuando se producen enfriamientos muy rápidos de estructuras de austenita. Debido a la deformación sufrida por la red, ~~algunos p'...~~ la inserción de átomos de C, se verifica una estructura tetragonal centrada en las caras, cuya dureza sólo es menor que la de la cementita. Para que toda la austenita se convierta en martensita existe una velocidad crítica de temple (I), puesto que enfriamientos más lentos, generarían estructuras mixtas de perlita y martensita (II).

5.2.2 Transformación martensítica

La conversión en martensita no es un proceso de nucleación y crecimiento, puesto que a bajas temperaturas no se verifica la difusión y el cambio de estructura se debe a una reorientación atómica, que no depende del tiempo sino, únicamente, de la temperatura, de forma que si durante el proceso, se mantiene la temperatura, el estado se mantiene (x), por ello se dice que es atérmica. Esta transformación produce un aumento de volumen, pero no es proporcional a la temperatura, es decir, no guarda una relación constante.

La temperatura de inicio de martensitificación disminuye al aumentar el contenido en aleantes del acero, ya sea C u otros.

5.3. TRATAMIENTOS DE LOS METALES PARA MEJORAR SUS PROPIEDADES

Los tratamientos son procesos industriales que buscan mejorar las propiedades de los metales, pero que en ningún momento pueden alterar su composición química general, puesto que no sería un tratamiento, sino una transformación. Se distinguen cuatro clases de tratamientos:

- T. térmicos: el metal se somete a procesos térmicos que varían su estructura interna.
- T. termoquímicos: el metal se calienta y enfría, a la vez que se altera su composición superficial.
- T. mecánicos: mejoran las propiedades por medio de deformaciones mecánicas en frío o caliente.
- T. superficiales: mejoran las características superficiales, sin alterar la composición química básica.

5.4. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los tratamientos térmicos consisten en someter a los metales a calentamientos y enfriamientos para conseguir cambios en su estructura cristalina sin afectar a su composición.

Existen cuatro tratamientos térmicos básicos:

- Temple: consiste en un alto calentamiento y un súbito enfriamiento del metal, que produce gran dureza.
- Revenido: se aplica después del temple, calentando un poco la pieza para disminuir su fragilidad y acritud.
- Normalizado: es similar al temple pero con menor velocidad de enfriamiento.
- Recocido: el metal se calienta y se deja enfriar muy lentamente, eliminando tensiones internas y dando al metal gran plasticidad.

5.4.2. Temple

El temple es un tratamiento típico de los aceros, que consiste en su sostenización completa, seguido de un enfriamiento lo suficiente mente rápido como para obtener martensita.

La capacidad para templar un acero depende de:

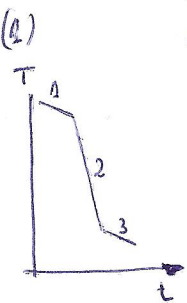
- Su templabilidad, facilidad de templado, determinada por sus curvas TTT, cuanto más a la derecha, menor velocidad hará falta.
- La velocidad de enfriamiento en función del medio refrigerante que se utiliza, que puede ser agua, el más rápido; aceites o aire, el más lento. La agitación del medio ayuda a una mayor velocidad.

En el enfriamiento con un medio líquido existen tres etapas:

1ª. El líquido entra en ebullición al acercarse a la pieza y se crea una cortina de vapor que ralentiza el proceso.

2ª. La capa de vapor desaparece y se crean corrientes de convección que acercan el enfriado

3ª. La t^1 superficial desciende a la t^2 del medio pero los interiores tardan más frenando el proceso. (4)



El temple del acero nunca constituye un tratamiento final, debido a que la estructura martensítica es muy dura, muy frágil y con un alto grado de acritud (tensiones internas). Por ello, una vez templado el acero, se somete a un tratamiento térmico de revenido, calentándolo a una temperatura menor que la de austenización para recuperar parte de la ductilidad y tenacidad. El tratamiento de temple + revenido, se denomina bonificado.

5.4.2.I. Determinación de la templabilidad.

La capacidad de temple de un acero viene determinada por la posición de sus curvas TTT, cuanto más a la derecha, menor será la velocidad crítica y por tanto, más fácil de templar.

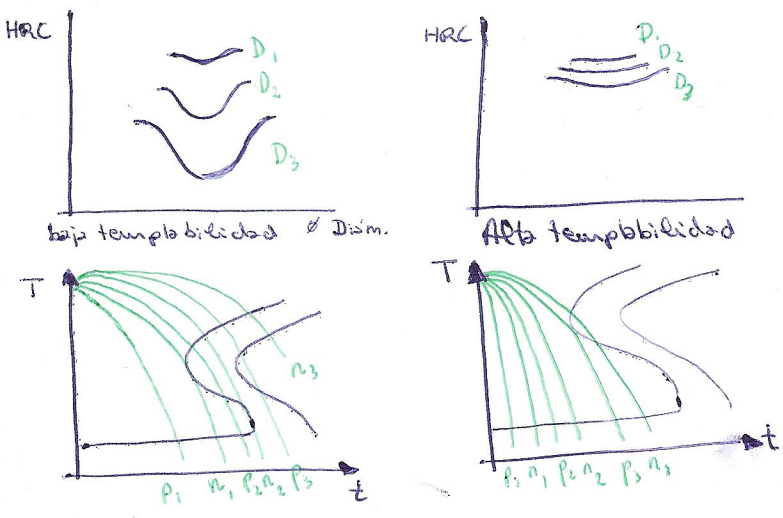
Se puede conocer la templabilidad sin haber las curvas TTT mediante:

- Profundidad de temple sometiendo a cilindros de acero de distintas aleaciones a iguales condiciones de temple, mediante un corte transversal se observa la zona templada de grano fino (1), que será mayor cuando la templabilidad sea más alta.

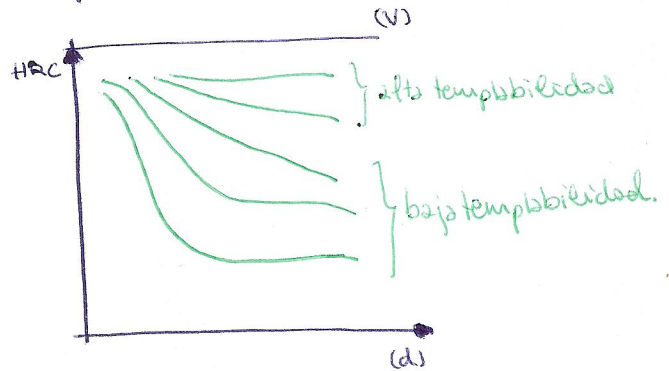
- Curvas de dureza: se pueden analizar las curvas de dureza a lo largo de un diámetro de un redondo sometido a temple (curvas en U) ⁽²⁾, de forma que la dureza en un acero de alta templabilidad será así constante, y en uno de baja, tendrá altibajas.



(2)



- Ensayo Jominy: se somete una probeta cilíndrica normalizada, a una austenización completa y se hace incidir un chorro de agua sobre una de sus bases. Cuando finaliza el enfriamiento se desbastan dos generatrices y se mide la dureza en relación a la distancia de la base del chorro. Cuanto más uniforme sea la dureza, mayor templabilidad.



5.4.b. Normalizado

Se suele emplear en piezas fundidas o forjadas con objeto de afinar el grano de su estructura, homogeneizar la composición y destruir la anisotropía.

Consiste en un calentamiento hasta unos 50°C por encima de la temperatura de austenización, seguido de un enfriamiento al aire. La velocidad de enfriamiento no es suficiente para crear martensita, resultando perlita y ferrita o cementita de grano fino.

Es especialmente indicado para los aceros con menos del 0,25% de C, puesto que poseen baja templeabilidad, y es, por ello, muy adecuado.

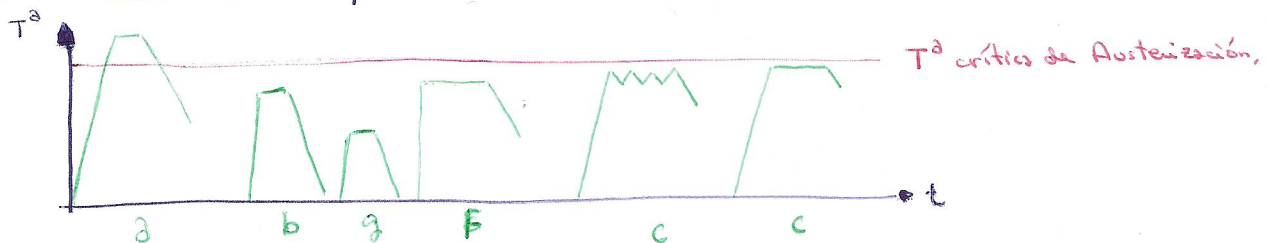
5.4.c. Recocido

Consiste en calentar el material hasta una temperatura cercana a la de normalizado y someterlo a un enfriamiento calentamiento muy lento. Las estructuras resultantes son ferrito-perlíticas en hipoeutectoides o cementito-perlíticas en hipereutectoides. Se aplica para ablandar el acero y proporcionarle ductilidad y maleabilidad suficiente para conformarlo plásticamente o por mecanizado.

La diferencia entre los tratamientos de temple, normalizado y recocido, es la velocidad de enfriamiento, lo que determina la dureza y resistencia del producto final.

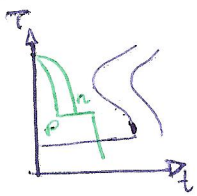
Existen multitud de tipos de recocido:

- Recocido de austenización completa o regeneración: típico de hipoeutectoides.
- Recocido de austenización incompleta: típico de hipereutectoides donde conviven austenita y cementita en forma globular.
- Recocido subcrítico: se busca la globulización de la cementita para ablandar el acero.
- Recocido isotérmico: se obtiene a t° constante, puede ser de austenización completa o no.
- Recocido de homogeneización: homogeneiza la estructura mediante la difusión.
- Recocido de recristalización: en piezas deformadas en frío para restaurar las propiedades mecánicas, por debajo de la t° de Austenización.
- Recocido de relajación de tensiones: elimina tensiones internas a t° subcríticas.

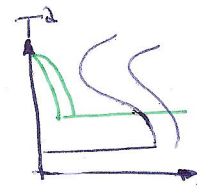


5.4.d. Tratamientos isotérmicos

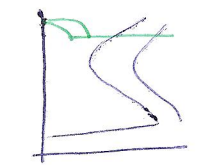
Son aquellos tratamientos térmicos en los que el enfriamiento no se lleva a cabo de forma regular y continua, sino que se interrumpe o modifica en ciertas temperaturas. Se trata de obtener piezas de una gran tenacidad, con mínimas deformaciones y tensiones internas.



- Martempering o temple escalonado: la pieza austenizada se mantiene a una t^a constante superior a la de martensificación, hasta que se iguala la temperatura del núcleo y periferia, prosiguiendo con el enfriamiento después. Se obtiene una pieza totalmente templada y con pocos gradientes térmicos.



- Austempering o temple bainítico: a una pieza austenizada se enfría y se mantiene a una temperatura superior a la de la formación de martensita, resultando bainita, reduciendo las grietas y deformaciones internas, eludiendo el revenido.



- Patenting o patentado: se mantiene la pieza austenizada, a una t^a superior a la de la "nariz" de la curva TTT, obteniendo una estructura de perlita fina, con gran ductilidad, ideal para la fabricación de alambres.

5.4.e. Tratamientos térmicos superficiales

Están destinadas a endurecer la superficie de la pieza y mejorar su comportamiento ante el desgaste y la fatiga. Se fundamentan en un temple periférico, manteniendo la tenacidad del núcleo de la pieza. Según el método usado pueden ser:

- Temple superficial a la llama: aplicado con un soplete y enfriado con agua o aceite.

Es difícil controlar la profundidad y necesita revenido.

- Temple superficial por inducción: calentamiento debido al efecto Joule mediante variaciones en el campo magnético.

- Temple por rayo láser: el alto gradiente térmico produce un autotemple de la superficie cuando se deja de aplicar el láser.

- Temple por bombardeo electrónico: similar al láser.

5.5. TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS

Los tratamientos termoquímicos consisten en operaciones de calentamiento y enfriamiento de metales, que se complementa con la adición de nuevos elementos que modifican la composición superficial.

Un material idóneo para estos tratamientos sería con alta resistencia y tenacidad, pero es imposible de aunar. El propósito de estos tratamientos es mejorar las propiedades superficiales de los materiales, sin modificar las propiedades interiores.

5.5.a. Cementación o carburación

Consiste en añadir carbono mediante difusión, a la superficie de un acero con bajo contenido en éste, para aumentar su dureza superficial. Para facilitar la difusión se realiza en un medio carburante a elevadas temperaturas (900°C). La atmósfera carburante se puede conseguir en medios sólidos, líquidos o gaseosos, los más usados.

La cantidad de carbono absorbido por la pieza, depende de:

- Composición química inicial del acero.
- Naturaleza de la atmósfera carburante
- Temperatura
- Tiempo de duración del tratamiento.

Una vez realizado la cementación, se distinguen dos partes o zonas, en la pieza:

- Zona exterior: es la capa cementada que posee un contenido en carbono superior al inicial y cuyo espesor varía según la finalidad. La capa más exterior es la capa dura, que comprende un 0,25 a 0,5 el espesor de la capa cementada.
- Zona central o alma: cuya composición no ha variado.

Debido a los cambios de temperatura, se crean tensiones internas que se solucionan con un revenido de baja temperatura.

La cementación posee un carácter reversible, de manera que parte del carbono de la superficie del material pase a la atmósfera (descarburación) de forma que su dureza desciende drásticamente.

5.5.b. Nitruación

Se persigue un endurecimiento superficial del acero mediante la incorporación de nitrógeno. Se somete la pieza en un horno a una corriente de amoníaco a unos 500°C, donde el nitrógeno es absorbido.

Se diferencia de la nitruación de la carbonitración en que:

- La temperatura a la que se realiza es muy inferior, lo que evita distorsiones estructurales en el interior de la pieza, evitando tener que realizar tratamientos térmicos posteriormente.

- El nitrógeno no se introduce como solución sólida, sino que debido a su afinidad con ciertos elementos, se forman nitruros submicroscópicos insolubles.

Estos nitruros son extremadamente duros y se sitúan de forma dispersa aumentando la dureza superficial y originando un aumento de volumen que causa esfuerzos residuales de compresión que aumentan la dureza y mejoran el comportamiento frente a la fatiga y la corrosión. La capa nitrurada se forma al intervenir ciertos elementos aleantes del acero, en especial, el Aluminio; y suele ser más dura que la capa cementada, con la ventaja de poder aplicarse sobre aceros con alto contenido en carbono.

5.5.c. Carbonitración

Es un tratamiento intermedio entre los anteriores, que persigue un aumento de dureza superficial mediante la absorción simultánea de carbono y nitrógeno, mediante una atmósfera carburante con amoníaco. Se produce a una temperatura menor que la de cementación y mayor que la de nitruación, reduciendo el sobrecalentamiento y solo precisando de un revenido a baja temperatura. El nitrógeno aumenta en gran medida la tenacidad del acero que se puede realizar desde la t° de carbonitración (775°C).

Los aceros utilizados no precisan elementos de nitruación puesto que se absorbe como solución química, lo que produce una menor dureza, pero mayor libertad en cuanto al contenido inicial en carbono y aleantes.

Normalmente se realiza mediante atmósferas gaseosas, pero si es en un medio líquido, se denomina cianuración.

5.5.c. Sulfinización

Se consigue incorporar al metal una capa de carbono, nitrógeno y, sobre todo, azufre; por medio de un baño con sales especiales a unos 565°C.

Con este tratamiento aumenta considerablemente la resistencia al desgaste, se disminuye el coeficiente de rozamiento y se favorece la lubricación, puesto que la capa sulfatada se comporta como los metales anti-fricción, logrando una vida útil más de cinco veces superior a la vida útil sin sulfatización.

La resistencia al desgaste se debe, más que a la dureza, a la gran resistencia al rozamiento de la capa sulfatada.

5.6. TRATAMIENTOS MECÁNICOS

Los tratamientos mecánicos mejoran las características de los metales mediante deformación plástica, que se puede producir:

= En caliente: denominado como forja, consisten en deformar el material mediante golpes cuando se encuentra a una temperatura determinada, lo que afina su grano y elimina soplos duros y cavidades internas, mejorando su estructura.

= En frío: consisten en deformar el material a temperatura ambiente, de forma que se endurece y gana resistencia, restando ductilidad y tenacidad.

5.7. TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

Consisten en una modificación de la superficie de los metales sin variar la composición másica, sin que sea necesaria la aportación de calor.

Existe multitud, entre los más usados:

- Cromado: se deposita cromo sobre la superficie del metal a proteger. Se consigue una disminución del coeficiente de rozamiento, aumento de la dureza superficial y de la resistencia al desgaste y, sobre todo, una gran resistencia a la corrosión.

Se puede realizar electrolíticamente o por difusión a 1000°C con un 30% de admisión. Para evitar los carburos de cromo se realiza en aceros con poco carbono o con aleantes que formen carburos como el Ti.

- Metalización: Se proyecta un metal fundido pulverizándolo sobre otro, de manera que éste adquiere, superficialmente, las propiedades del otro.