



CAPÍTULO 25: TRATAMIENTOS TÉRMICOS

25.1. INTRODUCCIÓN

Un tratamiento térmico queda definido por su ciclo térmico y no por las propiedades que se logran con él.

Para cada caso particular lo que hay que fijar es: la temperatura de calentamiento, el tiempo de permanencia a dicha temperatura y la velocidad de enfriamiento.

Las temperaturas de calentamiento siempre son inferiores a la temperatura de fusión de la aleación considerada.

Al calentar piezas de máquinas o herramientas a temperaturas convenientes durante un cierto tiempo y luego enfriarlas adecuadamente se logra: modificar su estructura microscópica, produciendo transformaciones físicas (variación de las propiedades mecánicas) y a veces cambios en la composición química de ellas.

El calentamiento debe realizarse lentamente y lo más uniforme posible, especialmente cuando se trata de piezas con espesores apreciables. Con ello se trata de no crear tensiones internas por calentamiento desparejo entre las secciones delgadas y las más gruesas, siendo el ideal la mantención de una misma temperatura en el centro y en la periferia de la pieza.

El tiempo de permanencia se estima como una hora por cada 25 milímetros de espesor de la pieza tratada.

Los tratamientos térmicos más usados en la industria son:

- Recocido, Normalizado, Temple y Revenido.
- Cementación: Sólida, Líquida, Gaseosa.
- Envejecimiento Artificial (Endurecimiento Por Precipitación)

En la figura 1 se muestran algunos T.T. típicos.

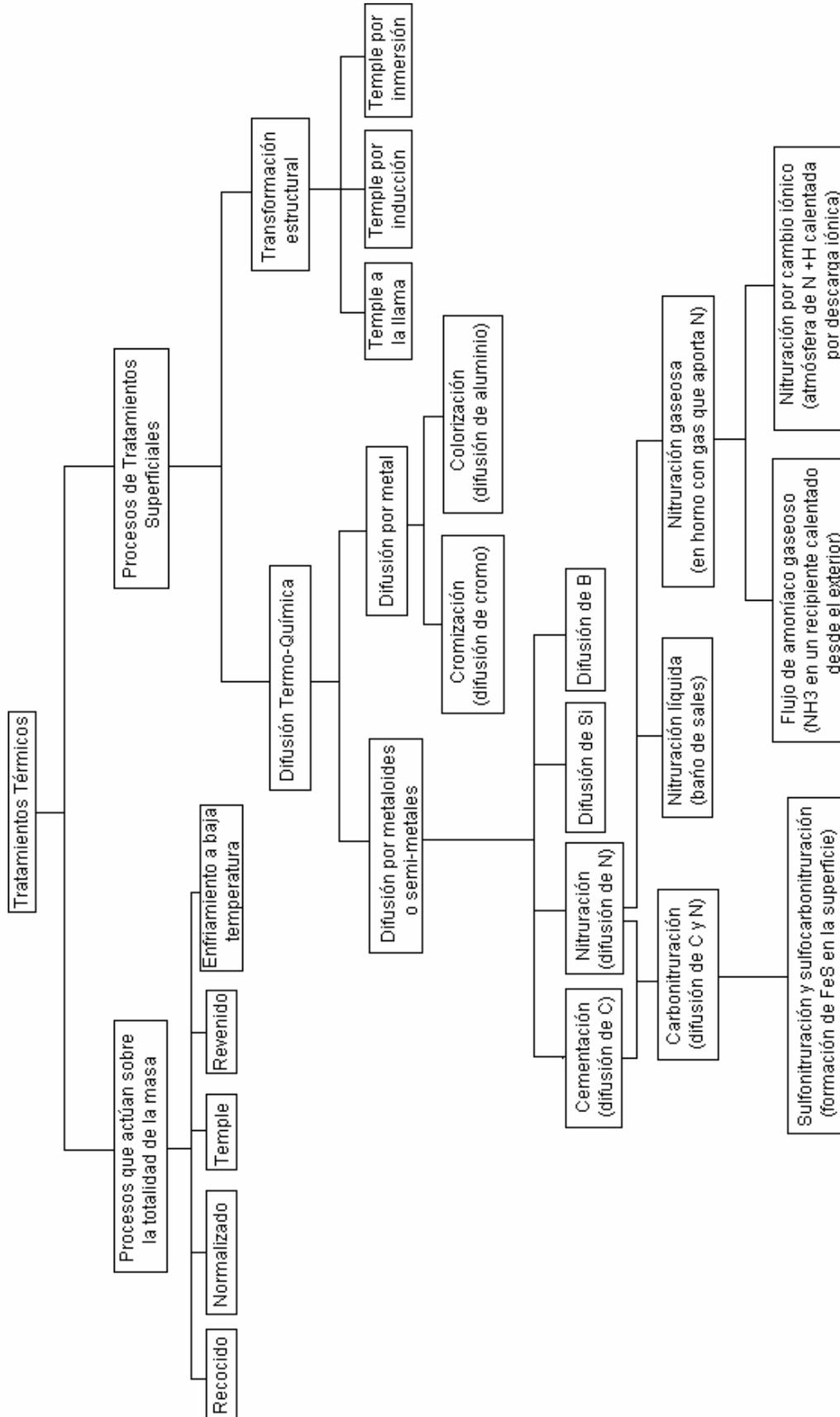


Figura 1: Tratamientos térmicos más comunes



25.2. EFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN LOS ACEROS

Para el estudio de los tratamientos térmicos de los aceros es conveniente hacer uso del diagrama hierro - carbono y en especial la parte mostrada en la figura 2.

Los aceros se pueden clasificar como: Hipoeutectoides, Eutectoides e Hipereutectoides.

Son aceros Hipoeutectoides son aquellos en que su contenido en carbono es menor que el contenido Eutectoide.

Los aceros Eutectoides contienen $\approx 0.78\%$ C y los aceros Hipereutectoides, cantidades mayores de carbono.

El diagrama de la figura indica esquemáticamente las microestructuras metalográficas resultantes de enfriar lentamente desde la región Austenítica (Recocido) los tres tipos de aceros. Un acero Eutectoide se transforma totalmente a Perlita (láminas alternadas de Cementita y Ferrita) mientras que en los Hipoeutectoides contienen Ferrita primaria y Perlita. En los aceros Hipereutectoides se forma primero Cementita y luego la Perlita. Utilizando este hecho, es posible estimar el % de carbono de un acero recocido por medio de un análisis metalográfico sin necesidad de un análisis químico, ya que en aceros Hipoeutectoides a mayor cantidad de Ferrita corresponda un menor % de C y en los aceros Hipereutectoides, a mayor presencia de Cementita indica un aumento en % de carbono.

25.3. TRATAMIENTO TÉRMICO DE RECOCIDO

El calentamiento se hace a una temperatura ligeramente superior a A_3 y luego se enfría lentamente (por lo general dentro del horno). El principal objetivo es ablandar el acero, deseándose a veces también regenerar su estructura o eliminar tensiones internas. La figura 3 muestra el ciclo de tratamiento.

La figura 4 muestra en forma esquemática las transformaciones que se producen en un acero con 0.45%C cuando su enfriamiento es lento.

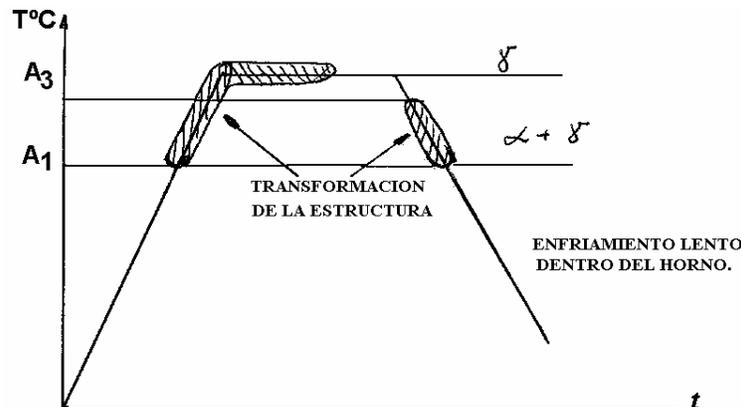


Figura 3: Ciclo térmico utilizado en un T.T. de Recocido.

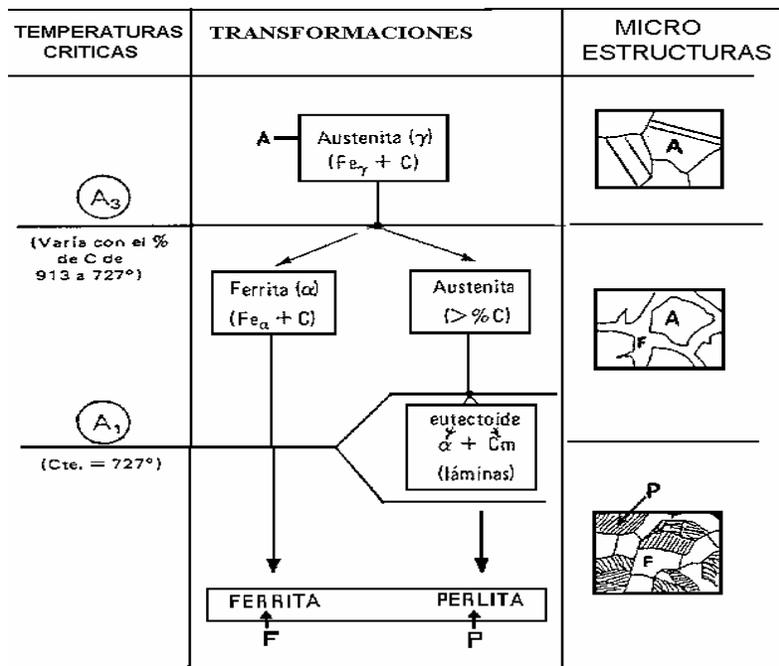


Figura 4: Esquema de las transformaciones que se producen en un acero con 0,45% C durante el recocido.

25.4. TRATAMIENTO TÉRMICO DE NORMALIZADO

Se emplea en piezas fundidas, forjadas o conformadas mecánicamente. Su objetivo es afinar la estructura y eliminar las tensiones que suelen aparecer en la solidificación u otras operaciones posteriores. Los aceros se calientan a una temperatura superior a la crítica A_3 o A_{cm} y luego se dejan enfriar al aire tranquilo (Figura 5).

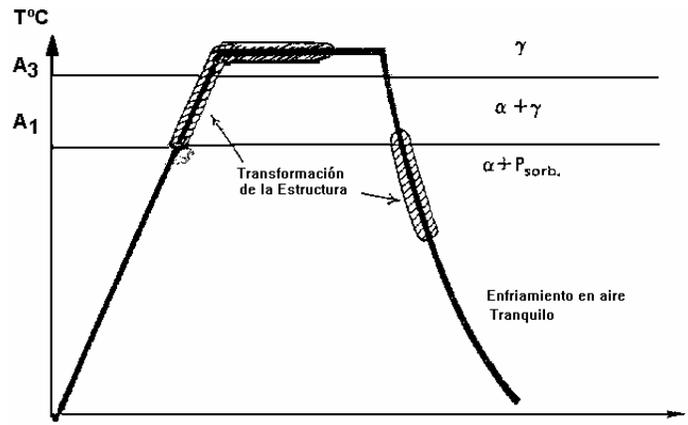


Figura 5: Ciclo térmico utilizado en un T.T. de Normalizado.

25.5. TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLE

Consiste en austenizar un acero y luego enfriarlo en forma más o menos rápida (según composición química y tamaño de las piezas) en un medio adecuado como ser: agua, aceite o sales fundidas. Tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia del acero. En la figura 6 se esquematiza el ciclo térmico de un temple

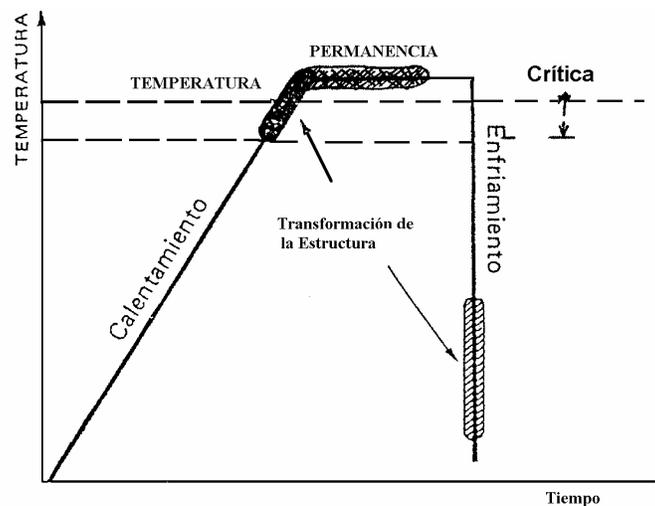


Figura 5: Ciclo térmico utilizado en un T.T. de Temple.

La gran dureza obtenida -sobre 60 Rc- se debe al componente estructural fuera de equilibrio llamado "Martensita" que se ve al microscopio bajo la forma de agujas en V o en Z. La martensita es el constituyente estructural típico del temple.

En esta estructura el carbono queda atrapado en la estructura del hierro que pasa de f.c.c. (austenita) a b.c.t. (ferrita distorsionada). Esto produce el endurecimiento, baja la ductilidad y tenacidad pero a la vez provoca la fragilización del acero. Luego la Martensita puede ser considerada como una Ferrita distorsionada por estar sumamente sobresaturada en Carbono pero en forma de placas que se ven como agujas (acicular) en el microscopio, tal como se muestra en la figura 7.



Figura 7: Microestructura acicular de la martensita

25.6. TRATAMIENTO TÉRMICO DE REVENIDO

Es el tratamiento térmico que sigue a todo temple. El objetivo es modificar y no eliminar los efectos del temple. El revenido consiste en calentar el acero, previamente templado, a temperaturas inferiores a la crítica A_1 (723°C), mantenerlo un tiempo adecuado y luego enfriarlo a temperatura ambiente como se indica en la figura 8.

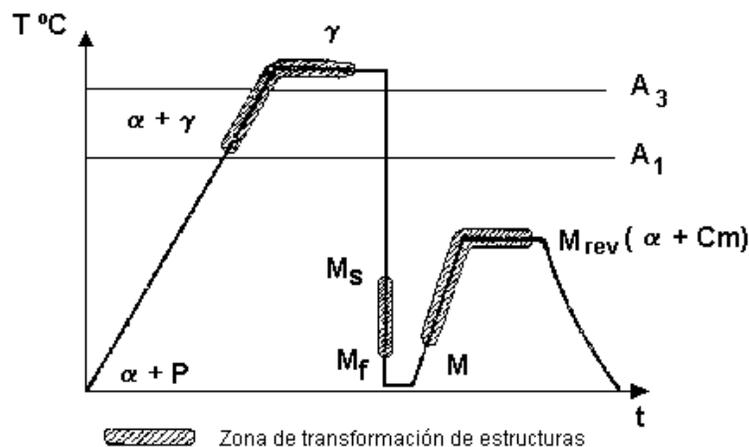


Figura 8: Ciclo térmico utilizado en un T.T. de Temple y Revenido.

El microconstituyente típico del Revenido es la "Martensita revenida".

En la figura 9 se presenta un esquema que muestra las microestructuras de un acero eutectoide que se obtienen al someterlo a distintos tratamientos térmicos. Se aprecia la diferencia en morfología (forma y distribución de las fases ferrita y cementita) entre las estructuras producidas por un normalizado y las de un temple y revenido. Esto produce una diferencia en las propiedades mecánicas del acero.

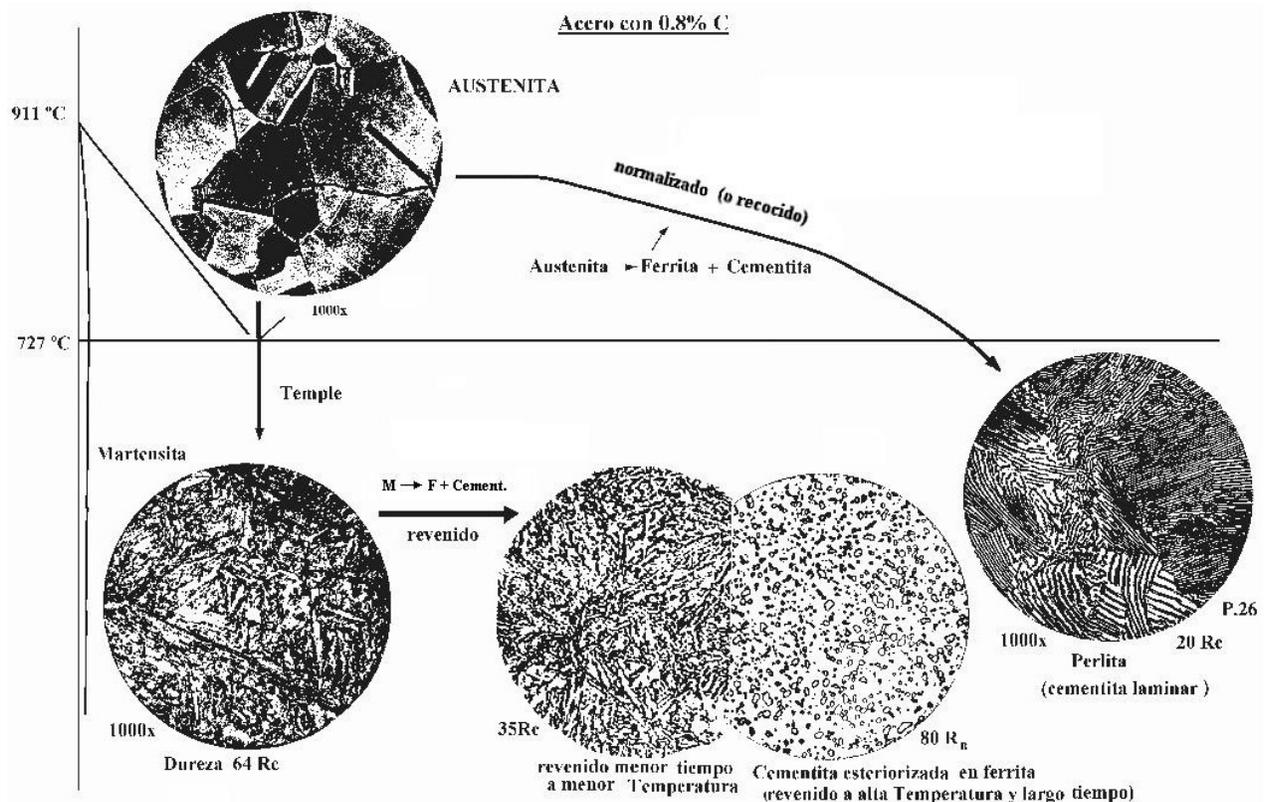


Figura 9: Microestructura de un acero eutectoide sometido a distintos tratamientos térmicos.

El acero normalizado contiene sólo Perlita (láminas alternadas de Ferrita y Cementita), en tanto, en que el acero templado y revenido se observa la Cementita globulizada en una matriz ferrítica.

Esto ilustra categóricamente que no basta sólo saber la composición química de un acero sino que mucho más importante es conocer su microestructura, la que se determina con ayuda del microscopio metalográfico, herramienta fundamental del metalurgista físico.



25.7. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ESTRUCTURAS

Veamos ahora en general las propiedades mecánicas relacionadas con el porcentaje de carbono y los respectivos microconstituyentes.

Ferrita: Es el constituyente más blando, dúctil y maleable de los aceros. El valor medio de sus propiedades es: $\sigma_t = 28 \text{ Kg/mm}^2$, $A = 35\%$ y $HB = 90$

Cementita: Es el constituyente más duro y frágil de los aceros. Las propiedades son muy poco conocidas salvo su gran dureza y fragilidad: $HB = 650$; $\sigma_t = 228 \text{ Kg/mm}^2$ (estimada)

Dada su fragilidad ha sido prácticamente imposible preparar y ensayar probetas con C_m pura. Presenta no obstante alta resistencia a la compresión.

Austenita: Es un constituyente dúctil y tenaz y de elevada resistencia al desgaste. No es un constituyente natural a temperatura ambiente y sólo puede aparecer a dicha temperatura, en temple muy enérgicos y especialmente en aceros aleados. Sus propiedades dependen del porcentaje de C y de los elementos de aleación: $HB = 300$, $\sigma_t = 88$ a 105 Kg/mm^2 , $HRC = 40$ y $A = 30$ a 60%

Perlita: Es un constituyente resistente y tenaz y sus propiedades mecánicas dependen grandemente de la finura de sus laminillas de C_m y F, la cual es a su vez función del enfriamiento: a mayor velocidad de enfriamiento mayor finura y mayor dureza.

	HB	σ_t	A (%)
Perlita Gruesa (recocido)	220	80	15
Perlita Media	250	84	14
Perlita Fina	300	94	12

Esferoidita (Cementita globular): Esta estructura se obtiene en los aceros por medio del recocido de globulización o por revenidos a altas temperaturas (cerca de A_1). En estos tratamientos no se forma la perlita. Estructuralmente está formada por glóbulos de Cementita en una matriz de ferrita. Es la estructura más blanda que se obtiene para una determinada composición. Sus propiedades dependen del % de C y del tamaño de los glóbulos.

Podemos deducir aproximadamente que la dureza Brinell de esta estructura es: $HB_{\text{esf.}} = 90 + 100 X (\% C)$

Estos constituyentes combinados en la estructura conducen también a una combinación más o menos compleja de sus propiedades. En el gráfico de la figura 10 detallamos las propiedades mecánicas de los aceros en función de su porcentaje de carbono.

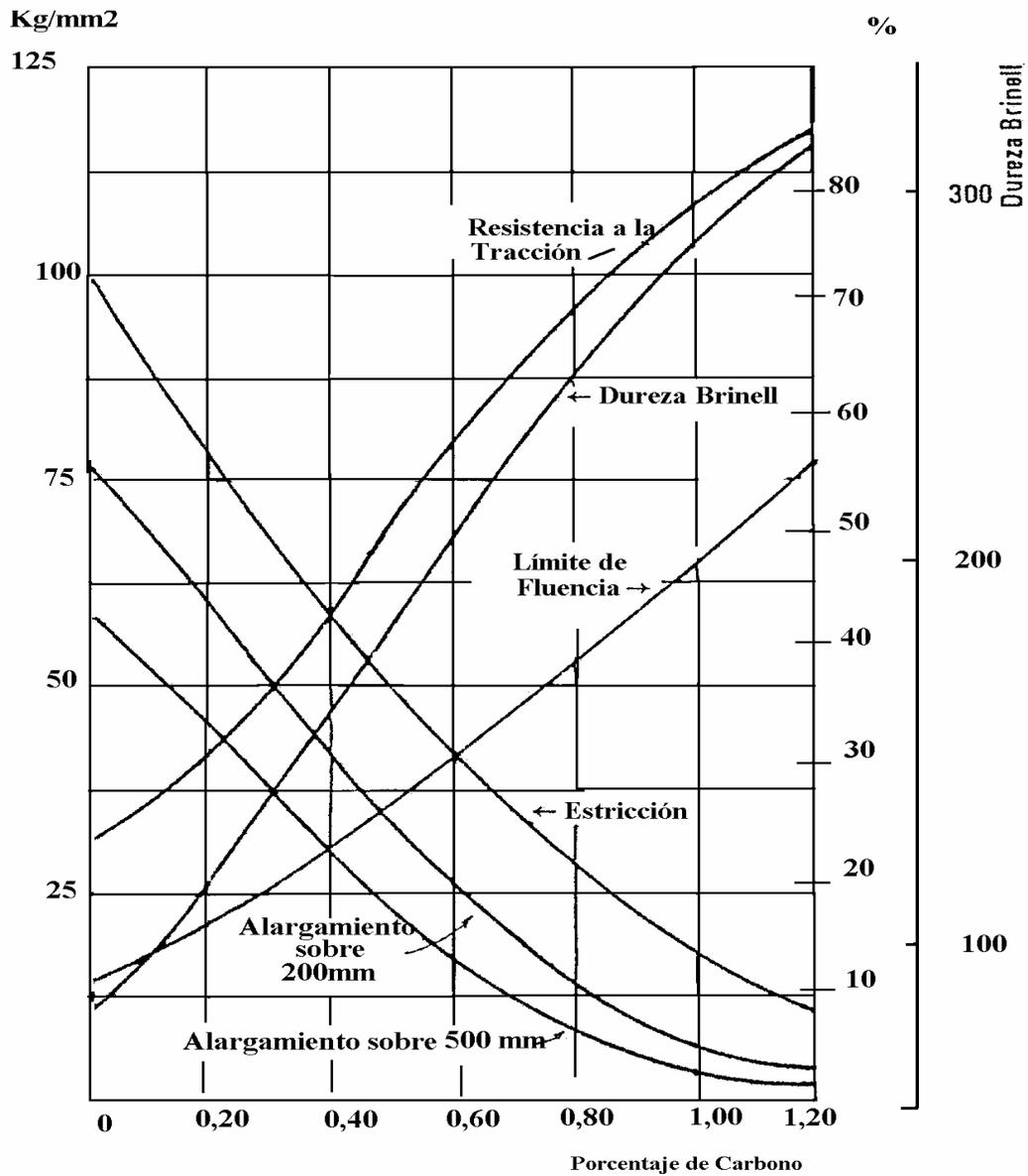


Figura 10: Variación de las propiedades mecánicas con el porcentaje de carbono.

**TABLA DE PROPIEDADES MECÁNICAS**

ENSAYO	SÍMBOLO	UNIDAD	INFORMACIÓN QUE APORTA
DUREZA:			
Brinell	HB	Conven- cional	Relacionada Directamente con la Resistencia
Rockwell	HR		
Vickers	HV		
TRACCIÓN			
- Resistencia a la Tracción	σ_t	Kg/mm ²	<u>Resistencia Máxima</u>
- Límite de Fluencia	σ_f	psi** MPa**	Límite de las condiciones de uso
- Alargamiento	A	%	Ductilidad
- Estricción	ψ	%	
RESISTENCIA AL IMPACTO:	ρ	Kg · m Libra - pie	Tenacidad

** 1psi = 7,032 X 10⁻⁴ Kg/mm²

1 Kg/mm² = 1,422 psi = 9,8 MPa (mega pascal ≈ 10⁶ newton / m²)

Como ya se indicó, la estructura más dura de los aceros es la Martensita. Esto se muestra en la figura 11. La dureza de la martensita depende fuertemente de su contenido en carbono.

Las estructuras de recocido son mucho más blandas tanto más si se realiza por períodos muy largos de tiempo y a temperaturas cercanas a la crítica.

Si el tratamiento de revenido se efectúa por tiempos cortos y a temperaturas más bajas se pueden obtener resistencias comprendidas entre la de la martensita y la de las estructuras de ferrita y carburos.

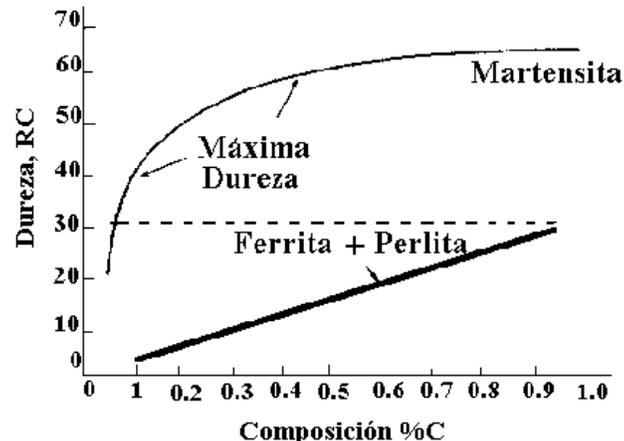


Figura 11: Dureza en función del contenido de carbono.

Supongamos que se desea utilizar un acero que tenga una dureza de 30 Rockwell C.

Del estudio del gráfico dureza v/s % de C existen a lo menos tres posibilidades distintas de obtener esa propiedad.

La primera sería tomar un acero con 0.1%C y templearlo, otra sería elegir un acero con 1% de C y efectuar un recocido y por último, utilizar un acero con composición intermedia en carbono y templearlo y revenirlo a una temperatura adecuada. Cada uno de los tres casos nos daría una pieza con igual dureza, pero con estructuras bastante distintas. La pregunta es ¿cuál es el más conveniente? Para ello hay que tomar en cuenta, además de factores de disponibilidad, costo, forma y dimensiones de la pieza, un factor muy importante conocido como "tenacidad" del acero. La tenacidad es la propiedad contraria a la fragilidad. Mientras mayor es el contenido en carbono de la Martensita, mayor será su tendencia a fallar en forma frágil, en otras palabras, menor será su tenacidad.

Sólo nos queda saber como es la tenacidad entre las estructuras "Martensita revenida" y la "Perlita".

Se sabe que la cementita es una fase muy dura y por consiguiente, muy propensa a la fragilidad (es la causa de la enorme fragilidad de la fundición blanca). Esta cementita está presente tanto en la perlita como en la martensita revenida, pero en distinta morfología. En la perlita son láminas largas y en la otra son glóbulos pequeñísimos, luego si se somete a esfuerzos que logran agrietar la cementita, la grieta tiene la posibilidad de ser mucho más grande en la perlita que en la martensita revenida, y esto explica por qué la martensita revenida tiene mejor tenacidad que la perlita a igual dureza. Luego concluimos que en todo caso crítico es preferible usar el acero en su condición de martensita revenida, aunque ello obviamente es más caro, por el tratamiento térmico más complicado que involucra el temple y revenido comparado con el simple normalizado. Hay veces que también es imposible realizar el tratamiento térmico de temple por el tamaño de la pieza, basta con pensar si se desea aplicar a un

puente o a un barco. Más aún, no es una solución aplicar el tratamiento térmico por piezas, pues es fácil imaginarse que si las partes son cada vez más gruesa, llegará un momento que por rápido que se enfríe el exterior en agua, el interior no puede enfriarse tan rápido y podrá tener una estructura más parecida a un normalizado, no pudiendo obtener la pieza totalmente martensítica. No todos los aceros tienen la misma "penetración de temple", o sea, la posibilidad de obtener martensita, en todo su espesor, llamado también "templabilidad". Mientras mayor el contenido de carbono mayor es la templabilidad. También la razón más importante por el cual se usan los aceros aleados es por su mayor templabilidad y no porque tengan mayor resistencia.

La máxima resistencia de un acero sólo depende de su contenido de carbono, mientras pueda obtenerse totalmente con estructura martensítica y aquí es donde esto resulta más fácil, en piezas gruesas, al usar aceros aleados. Esto está ilustrado en la figura 12 en la cual se muestran dos barras redondas de igual dimensión, una de acero al carbono (SAE-1040) y la otra de acero aleado (SAE-4140), ambos tienen igual contenido de carbono 0.40% C como lo indica la sigla de clasificación, pero el aleado además, contiene 1% cromo y 0.2% molibdeno. Por las medidas de dureza en la sección transversal, que están graficadas, se ve que en la superficie la dureza es igual en ambas barras, pues se formó martensita y es de 55 tal como lo predice el gráfico de la dureza de la martensita versus contenido de carbono. Pero en el centro es mucho más baja en el acero corriente al carbono que en el aleado, indicando que en el primero hay una buena cantidad de perlita y muy poca martensita, mientras que la barra de acero aleado tiene casi pura martensita hasta el centro.

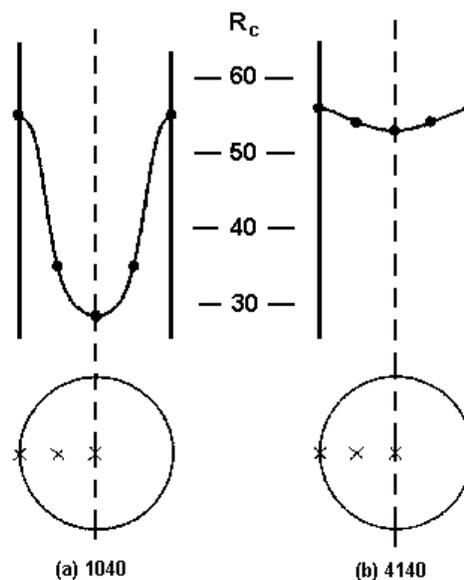


Figura 12: Templabilidad de dos aceros distintos.

El inconveniente de los aceros aleados es su mayor costo, por eso es sólo recomendable hacerlo para aquellos casos en que sea imprescindible obtener estructura martensítica en piezas más o menos gruesas. No tiene mucho sentido para fabricar hojas de cuchillo, salvo que se desee que sea inoxidable, pues como ya se dijo,



la dureza la provee el contenido de carbono y no los elementos de aleación. Para que se formen una idea del tipo de aceros aleados más usados se da la tabla de clasificación de aceros de la SAE y AISI (Society for Automotive Engineers y American Iron and Steel Institute).

AISI o Número SAE	Composición
10xx	Aceros al carbono corriente
11xx	Aceros resulfurados para maquinabilidad
13xx	Al manganeso (1.5-2.0%)
23xx	Al níquel (3.25-3.75%)
25xx	Al níquel (4.75-5.25%)
31xx	Al níquel (1.10-1.40%) cromo (0.55-0.90%)
33xx	Al níquel (3.25-3.75%) cromo (1.40-1.75%)
40xx	Al molibdeno (0.20-0.40%)
41xx	Al cromo (0.40-1.20%) molibdeno (0.08-0.25)
43xx	Al níquel (1.65-2.00) cromo (0.40-0.90%), molibdeno (0.20-0.30%)
46xx	Al níquel (1.40-2.00%), molibdeno (0.15-0.30%)
48xx	Al níquel (3.25-3.75%), molibdeno (0.20-51xx Al cromo (0.70-1.20%)
61xx	Al cromo (0.70-1.10%), vanadio (0.10%)
81xx	Al níquel (0.20-0.40%), cromo (0.30-0.55%), molibdeno (0.80-0.15%)
86xx	Al níquel (0.30-0.70%), cromo (0.40-0.85%), molibdeno (0.08-0.25%)
87xx	Al níquel (0.40-0.70%), cromo (0.40-0.60%), molibdeno (0.20-0.30%)
92xx	Al silicio (1.80-2.20%)

xx Indica el contenido en C ; 0,xx%

25.8. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ALEACIONES DE ALUMINIO

Como un ejemplo de un tratamiento térmico distinto al de los aceros, veamos la aleación Aluminio con 4% cobre, que es un tipo de "duraluminio".

Empecemos entonces por analizar el diagrama de fases Al-Cu, representado en la figura 13. En el extremo izquierdo está el aluminio puro que funde a 660°C, cristalizando en la estructura FCC y no sufre cambios alotrópicos a temperatura alguna. En este diagrama en el extremo derecho llega solo hasta el 54% Cu, que es la composición del compuesto CuAl_2 , fase dura equivalente al Fe_3C del sistema Fe-C. Este sistema contiene un eutéctico con 33% de Cobre y que funde a 548°C formado por solución sólida α de cobre disuelto en aluminio y el compuesto θ o CuAl_2 .

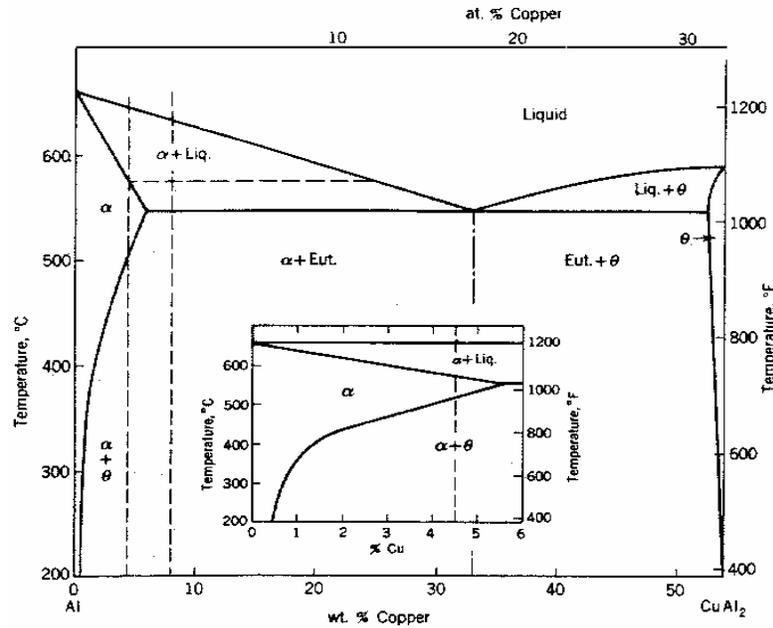


Figura 13: Diagrama de fases Al-Cu

Al calentar la aleación Al + 4% Cu sobre los 500°C está constituida sólo por una fase y ésta es α , en la cual todo el cobre está disuelto en el aluminio sustitucionalmente. Si enfriamos lentamente (recocido) esta aleación, la solución sólida α expulsa el cobre en exceso de la red precipitando éste en forma de CuAl_2 .

Si templamos esta aleación en agua se retiene el cobre en solución y obtenemos a temperatura ambiente una solución sólida α de aluminio sobre-saturado en cobre, sin cambio alguno en la estructura pues el aluminio no sufre cambio alotrópico.

El resultado de ambos tratamientos térmicos son estructuras blandas, o sea, en este caso el temple no produjo endurecimiento alguno. Ahora si tomamos la aleación templada y la recalentamos a unos 200°C por varias horas encontraremos que en vez de ablandarse aún más, como en el caso del revenido de los aceros, empieza a endurecerse, este tratamiento recibe entonces el nombre de endurecimiento por envejecimiento artificial, reservando el nombre de envejecimiento natural cuando esto ocurre a temperatura ambiente, aunque se demora mucho más.

Un ejemplo de curva de envejecimiento en el acero de muy bajo carbono ($\text{Fe}+0.06\% \text{C}$) se muestra en la figura 14.

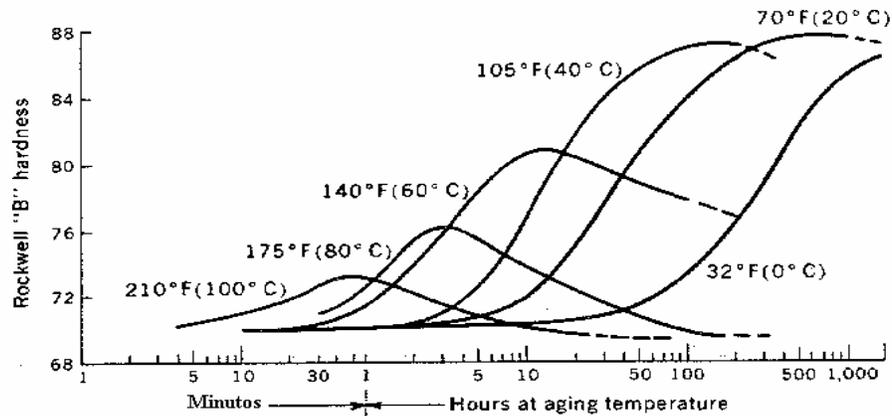


Figura 14: Curvas de envejecimiento de un acero con 0.06% C.

Nótese que el endurecimiento es más rápido a más altas temperaturas y que la dureza pasa por un máximo después del cual la dureza baja, este fenómeno se conoce con el nombre de sobre-envejecimiento. El endurecimiento en esta aleación se debe a la formación de precipitados pequeñísimos, tan finos que ni aún el microscopio óptico es capaz de detectarlos, son submicroscópicos, sólo visibles con ayuda del microscopio electrónico. Estos precipitados finísimos anclan muy eficientemente las dislocaciones pero dejan de ser efectivas al engrosar, razón por la cual ocurre el sobre-envejecimiento y también por la cual la aleación en su estado de recocido es blanda a pesar de tener las partículas precipitadas. El esquema de la Fig. 15 muestra el desarrollo del proceso de cambio de estructura en el proceso de envejecimiento. Nuevamente destaca la importancia de la morfología de las fases por sobre la composición de la aleación.

0.2%C) a 900 - 950°C en atmósfera carburizante formada por CO/CO₂ o CH₄/H₂ que produce carbono en la superficie y que penetra por difusión en el acero. Una vez lograda la penetración deseada 1 o más mm se procede a templar la pieza con la cual obtendremos una martensita dura de 0.8% C o más en la superficie y el centro más blando por tener mucho menos carbono (Figura 16).

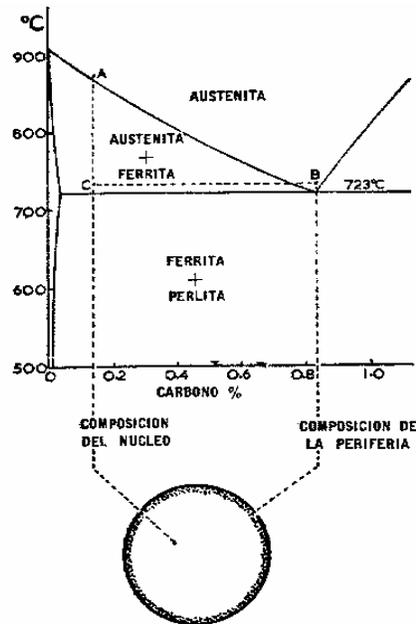


Figura 16: Tratamiento térmico después de la carburación, A indica la temperatura de tratamiento del centro y B la temperatura de tratamiento de la cubierta.

La nitruración se logra colocando la pieza en una atmósfera de NH₃/H₂ (amoníaco) a 500-600°C, o sea, bajo la temperatura crítica y una vez ya efectuado el tratamiento de endurecimiento por temple martensítico. En este caso penetra por difusión el nitrógeno que precipita formando nitruros finos que endurecen en forma similar que el caso del duraluminio. Los nitruros más efectivos son los del cromo y aluminio, siendo entonces imprescindible el uso de aceros aleados para aceros de nitruración. Tiene la gran ventaja que no requiere tratamiento térmico posterior a la nitruración.