



# Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

## “MANUAL DE TRATAMIENTOS TERMICOS PARA ACERO AL CARBONO”

Trabajo para optar al Título de:  
Ingeniero Mecánico.

Profesor Patrocinante:  
Sr. José Salazar Corrales.  
Prof. De estado en Estructuras.

ALEX GUSTAVO OPORTO IBÁÑEZ  
Valdivia – Chile  
2005

El Profesor Patrocinante y Profesores Informantes del Trabajo de Titulación comunican al Director de la Escuela Mecánica de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería que el Trabajo de Titulación del señor:

**Alex Oporto Ibáñez.**

Ha sido aprobado en el examen de defensa rendido el día \_\_\_\_\_, como requisito para optar al Título de Ingeniero Mecánico. Y, para que así conste para todos los efectos firman:

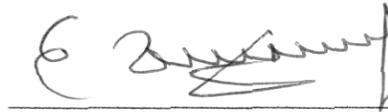
Profesor Patrocinante:

Sr. José Salazar C.

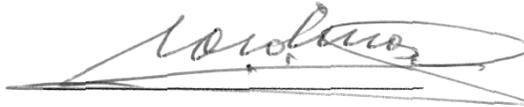


Profesores Informantes:

Sr. Ernesto Zumelzu D.



Sr. Luis Cárdenas G.



V° B° Director de Escuela

Sr. Enrique Salinas A.



## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo a través de estas líneas expresar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que, de forma directa o indirecta hicieron posible la realización de este trabajo de titulación.

Agradezco de manera muy especial a mi profesor patrocinante Sr. José Salazar, el cual me otorgo su apoyo, guía y conocimientos, que hicieron posibles llegar a concretar este trabajo, de la mejor forma posible. También agradezco la excelente colaboración de los señores Ernesto Zumelzu y Luis Cárdenas, que actuaron como profesores informantes. No puedo dejar de expresar mis agradecimientos a todo el cuerpo docente y al personal que labora en el campus miraflores, y en especial a la Sra. Erica Flores, secretaria de la escuela de mecánica, por su buena disposición y acogedor carácter.

Finalmente expreso mi más profundo agradecimiento a Dios y a mí Familia, por el apoyo incondicional entregado durante este importante período de la formación profesional. Sin ellos no hubiese alcanzado la meta.

**Dedicado con mucho cariño y aprecio a mi querida hermanita Maribel.**

**Alex Oporto I.**

## Índice de materia.

	<b>Pág.</b>
Índice de Figuras.	I.
Índice de Tablas.	IV.
Índice de Expresiones.	V.
Simbología.	VI.
Resumen.	1.
Summary.	2.
Introducción.	3.
Capítulo <b>I</b> : Definición de las Propiedades mecánicas de un Material.	5.
1.1. Ensayos Destructivos.	6.
1.1.1. Ensayos a la Tensión.	6.
1.1.2. Propiedades Mecánicas.	9.
1.2. Ensayo de Choque o Resiliencia.	11.
1.2.1. Resistencia al Impacto.	11.
1.2.2. Pruebas de Impacto.	11.
1.3. Prueba no Destructiva.	12.
1.3.1. Ensayo de Dureza.	12.
1.4. Efectos de Termofluencia y Temperaturas.	14.
Capítulo <b>II</b> : Proceso de manufactura y Endurecimiento mecánico.	15.
2.1. Conceptos Previos.	15.
2.1.1. Trabajo en Frió y Endurecimiento por Deformación.	15.
2.1.2. Laminado en Frió.	15.
2.1.3. Trefilados.	15.
2.2. Trabajo en Caliente.	16.
2.2.1. Rolado o Laminado en Caliente.	16.
2.2.2. Forjado.	16.
Capítulo <b>III</b> : Aleaciones: El Acero.	18.
3.1. Acero.	18.
3.2. Acero al carbono.	18.

3.2.1. Influencia de los constituyentes del Acero.	19.
3.3. Clasificación de los Aceros al Carbono.	21.
3.3.1. Aceros al bajo Carbono.	21.
3.3.2. Aceros al medio Carbono.	21.
3.3.3. Aceros al alto Carbono.	21.
Capítulo IV: Estructura de los Metales.	22.
4.1. Diagrama Hierro-Carbono.	22.
4.2. Crecimiento de los Granos de la Austenita.	26.
Capítulo V: Tratamientos Térmicos del Acero.	29.
5.1. Definición.	29.
5.2. Temple Directo.	29.
5.2.1. La Martensita.	31.
5.2.2. Objeto del Temple.	32.
5.2.3. Factores del Temple sobre la Microestructura y las propiedades mecánicas del Acero al Carbono.	33.
5.2.4. Relación de Transformación Isotérmica y la Austenítica durante el enfriamiento continuo.	39.
5.3. Templabilidad y el Ensayo de Jominy.	47.
5.3.1. Ensayo de Jominy.	51.
5.3.2. La Templabilidad del Acero al Carbono.	53.
5.4. Calentamiento y Mantenimiento en el Templado.	53.
5.4.1. Defectos en Piezas Templadas.	54.
5.4.2. Oxidación y Descarburación.	55.
5.4.3. Acero Quemado.	55.
5.4.4. Deformación y Grietas.	55.
5.4.5. Variación Dimensional.	56.
5.5. Revenido del Acero Templado.	52.
5.5.1. Objetivos del Revenido.	57.
5.5.2. Efecto de la Temperatura del Revenido sobre las Propiedades mecánicas y la Microestructura del Acero.	57.

5.5.3. Principales factores del Revenido.	59.
5.6. Recocido del Acero al Carbono.	62.
5.6.1. Tipos de Recocido.	62.
5.6.2. Factores del Recocido.	63.
5.6.3. Defectos en el Recocido.	64.
5.7. Otros Tratamientos Térmicos.	65.
5.7.1. Normalizado.	65.
5.7.2. Bonificado.	65.
Capítulo VI: Práctica de los Tratamientos Térmicos.	66.
6.1. Primera y Segunda Operación: Calentamiento y Mantenimiento	66.
6.1.1. Temperatura de Temple, Recocido y Revenido.	66.
6.1.2. Tiempo de Calentamiento y Mantenimiento.	67.
6.1.3. Instrumentos y Equipos necesarios.	67.
6.1.4. Calentamiento y Mantenimiento para Recocido.	67.
6.1.5. Calentamiento y Mantenimiento para Templado.	67.
6.1.6. Calentamiento y Mantenimiento para Revenido.	67.
6.2. Tercera Operación: Enfriamiento.	68.
6.2.1. Instrumentos y equipos necesarios.	68.
6.2.2. Enfriamiento del Recocido.	68.
6.2.3. Enfriamiento del Revenido.	68.
6.2.4. Enfriamiento del Temple.	68.
6.3. Ejemplo.	72.
Conclusiones.	78.
Bibliografía.	79.

## Índice de figuras

Nº	Figura.	Pág.
1-1.	Probeta de ensayo.	6.
1-2.	Curvas de esfuerzo –deformación.	6.
1-3.	Curva esfuerzo –deformación, limite proporcional.	8.
1-4.	Curva esfuerzo –deformación para aceros.	8.
1-5.	Probeta de ensayo a tensión de acero dulce.	9.
1-6.	Probeta de ensayo a tensión de hierro.	9.
1-7.	Curvas esfuerzo-deformación, puntos $f_e$ y.	10.
1-8.	Probetas de ensayo de Izod y Charpy.	12.
1-9.	Relación entre la dureza y la resistencia.	13.
2-10.	Trefilado.	17.
3-11.	Relación entre la dureza y el porcentaje de carbono.	21.
4-12.	Diagrama Hierro-Carbono.	23.
4-13.	Diagrama Hierro-Carbono, en la zona de acero.	23.
4-14.	Cambios en la estructura del grano durante el calentamiento y enfriamiento de un acero con 0.25 % de carbono.	26.
4-15.	Gráfico que muestra la estabilidad a temperatura ambiente del grano alcanzado durante el calentamiento de un acero eutectoide a pesar de producir un cambio físico durante su enfriamiento.	27.
4-16.	Esquema de la dependencia de la resiliencia (tenacidad) de la temperatura y la dimensión del grano del acero.	27.
4-17.	Esquema del crecimiento del grano de austenita en dependencia del tiempo de permanencia ( $\mu$ es tamaño de grano).	28.
4-18.	Esquema de la dependencia del tamaño del grano de austenita y por tanto, el de perlita durante el calentamiento del acero.	28.
5-19.	Representación esquemática del recocido de regeneración, normalizado y temple de un acero.	30.
5-20.	Imagen microscópica de agujas de martensita (X 1000) de agujas de martensita sobre un fondo de austenita.	32.
5-21.	Efecto del contenido de carbono sobre la dureza en un acero en estado recocido y templado.	32.

## II

5-22. Diagrama Hierro-Carbono.	35.
5-23. Efecto de la velocidad de enfriamiento sobre la microestructura y la dureza.	38.
5-24. Diagrama de transformación de la austenita cuando un acero con 0.8% de C se enfría continuamente.	39.
5-25. Diagrama Temperatura-Tiempo-Transformación (T-T-T).	40.
5-26. Curvas o Diagramas de velocidad de enfriamiento.	41.
5-27. Relación del porcentaje de carbono con la velocidad de enfriamiento.	45.
5-28. Relación del tamaño de grano con la velocidad de enfriamiento ( $\mu$ = tamaño de granos).	46.
5-29. Disminución de la velocidad de enfriamiento desde el exterior al interior.	46.
5-30. Disminución de la velocidad de enfriamiento desde el exterior al interior, de barras de diferentes diámetros, enfriada en agua y aceite.	47.
5-31. Disminución de la dureza en una barra de acero al carbono y aleado.	48.
5-32. Relación entre la dureza, la estructura y la velocidad de enfriamiento.	49.
5-33. Curvas U.	49.
5-34. Promedio de dureza que se obtiene en aceros al carbono después del temple, en función del % de carbono y según el % de martensita obtenida.	50.
5-35. Probeta y equipo ensayo de jominy.	51.
5-36. Correlación del diagrama T-T-T y datos de templabilidad.	52.
5-37. Esquema del templado y revenido.	57.
5-38. Influencia de la temperatura del revenido sobre las características mecánicas de los aceros al carbono.	59.
5-39. Influencia de la temperatura del revenido sobre la resistencia, resiliencia (tenacidad) y el fenómeno de la fragilidad del primer tipo, de los aceros al carbono.	60.
5-40. Influencia de la temperatura del revenido en las propiedades: tenacidad ( $a_k$ ), resistencia mecánica ( $S_{ut}$ ), dureza (HB) y la resistencia elástica o de fluencia ( $S_f, S_y$ ).	62.

### III

- |                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6-41. Forma correcta de introducir diferentes piezas en el medio de enfriamiento. | 65. |
| 6-42. Manera de agitar la pieza en el medio de enfriamiento.                      | 70. |
| 6-43. Barra redonda de acero SAE/AISI 1045.                                       | 72. |
| 6-44. Temperatura y colores de revenido.                                          | 77. |

**Índice de tablas**

<b>Nº</b>	<b>Tabla.</b>	<b>Pág.</b>
1-1.	Equivalencia de durezas.	14.
4-2.	Resumen de los componentes.	24.
4-3.	Puntos críticos del diagrama Hierro-Carbono.	25.
5-4.	Temperaturas óptimas de temple.	37.
5-5.	Durezas de las estructuras del acero.	42.
5-6.	Medios de enfriamiento.	44.
5-7.	Medios de enfriamiento.	45.
5-8.	Penetración del templado en una barra redonda de acero Y10.	53.
5-9.	Temperaturas adecuadas para el calentamiento y mantenimiento en hornos de cámaras.	54.
5-10.	Volumen específico de la martensita y el conglomerado ferrítico-cementítico.	56.
5-11.	Temperatura de revenido sugeridas.	61.
5-12.	Temperaturas adecuadas para el recocido de regeneración.	63.
6-13.	Defectos, detección y soluciones de los tratamientos térmicos.	72.
6-14.	Dimensiones originales de las piezas de acero SAE/AISI 1045.	72.
6-15.	Dimensiones de las piezas luego del recocido regenerativo.	73.
6-16.	Diferencias de diámetro y peso luego del recocido.	73.
6-17.	Durezas después del templado de acuerdo al fabricante.	75.
6-18.	Dimensiones de las piezas luego del templado.	76.
6-19.	Diferencias apreciadas de las piezas originales luego del templado	76.
6-20.	Durezas de revenido dadas por el fabricante.	77.

**Índice de expresiones**

<b>Nº</b>	<b>Expresión.</b>	<b>Pág.</b>
1.1.	Esfuerzo ( $\sigma$ ).	7.
1.2.	Deformación ( $e$ ).	7.
1.3.	Módulo de Elasticidad ( $E$ ).	7.
1.4a.	Transformación de Dureza Brinell a resistencia a la tracción (Psi).	13.
1.4b.	Transformación de Dureza Brinell a resistencia a la tracción (Mpa).	13.
3.5a.	Densidad de aceros brutos de laminación.	19.
3.5b.	Densidad de aceros recocidos.	20.
5.6a.	Temperatura de temple.	34.
5.6b.	Temperatura de temple aceros eutectoides.	34.
5.6c.	Temperatura de temple aceros hipoeutectoides.	34.
5.6d.	Temperatura de temple aceros hipereutectoides.	35.
5.7.	Velocidad de enfriamiento.	37.

**Simbología**

$\sigma$  = Esfuerzo.

$e$  = Deformación.

$E$  = Módulo de Elasticidad o Módulo de Young.

$S_{ut}$  = Resistencia máxima a la tracción, resistencia mecánica, resistencia a la tracción.

$S_y$  = Resistencia a la fluencia o cedencia.

$S_f$  = Resistencia elástica.

$ar$  = Flexibilidad.

$ak$  = Tenacidad, Resiliencia.

**HB** = Dureza Brinell o Índice de dureza Brinell.

**HRB** o **Rb** = Dureza Rockwell B o Índice de dureza Rockwell B.

**HRC** o **RC** = Dureza Rockwell C o Índice de dureza Rockwell C.

**HV** = Dureza Vicker o Índice de dureza Vicker.

**AISI** = American Iron and Steel Institute.

**SAE** = Society of Automovite Engineers.

**D** = Densidad.

**C** = Carbono.

**Cr** = Cromo.

**Va** = Vanadio.

**Fe $\alpha$**  = Ferrita.

**Fe $3$ C** = Cementita.

**Ac $1$**  = Punto crítico en calentamiento (721 o 732°C)

**Ac $2$**  = Punto crítico en calentamiento (768°C).

**Ac $3$**  = Punto crítico en calentamiento (721-911°C).

**Ar $1$**  = Punto crítico en enfriamiento.

**Ar $2$**  = Punto crítico en enfriamiento.

**Ar $3$**  = Punto crítico en enfriamiento.

**M** = Martensita.

**Mi** = **Mm** = Martensita inicial.

**Mf** = Martensita final.

**Mt** = Martensita de temple.

**P** = Perlita.

**Tt** = Temperatura de temple.

**V** = Velocidad de enfriamiento.

**Y10** = Acero al carbono (1.0% C) para herramientas, según normas Rusas (GOST).

**V<sub>cr</sub>** = Velocidad crítica de enfriamiento.

**T-T-T** = Temperatura-Tiempo-Transformación.

**T** = Troostita.

**D<sub>n</sub>** = **D<sub>cr</sub>** = Diámetro crítico.

**Ø** = Diámetro.

**μ** = Tamaño del grano.

## Resumen

El presente trabajo de titulación es un manual de tratamientos térmicos del acero al carbono, el cual pretende satisfacer al menos dos propósitos: Contar como un material bibliográfico que trate de los tratamientos térmicos de los aceros al carbono tanto el aspecto teórico como tecnológico, que pueda ser utilizado como un texto auxiliar para aquellos estudiantes que cursan los ramos relacionados con esta materia, como ser: ciencias de los materiales, diseño mecánico, proyectos mecánicos, tratamientos térmicos del acero, entre otras asignaturas; además brindar a los talleres, maestranzas el conocimiento teórico-práctico necesario para llevar a cabo un tratamiento térmico contemplado en este manual de la mejor forma posible.

Para alcanzar lo anteriormente señalado, el manual en primer lugar contiene los términos y conceptos que están involucrados con el tema de los tratamientos térmicos de los aceros al carbono, como son las propiedades mecánicas (dureza, resistencia mecánica, ductilidad, flexibilidad, tenacidad, etc.), los procesos de manufactura que ha recibido el material que puede ser empleado para tratar térmicamente y definir los aceros al carbono y su clasificación. Posteriormente antes de comenzar a conocer y definir cada uno de los tratamientos térmicos del acero al carbono es muy importante recurrir a las ciencias de los materiales ya que por medio de esta ciencia se logra comprender cada uno de los procesos y cambios que ocurren a nivel microestructural durante un tratamiento térmico al acero. Al conocer y comprender los diagramas hierro-carbono, temperatura-tiempo, temperatura-tiempo-transformación (curvas S) se logra valorar la importancia que tiene cada uno de los factores (temperatura, tiempo, etc.) de los tratamientos térmicos, factores que son fundamentales para lograr resultados óptimos.

Con la adquisición de los conocimientos teóricos y tecnológicos el usuario del manual estará en buenas condiciones de poder llevar a cabo el tratamiento térmico del acero al carbono que requiera. Con la finalidad de efectuar correctamente y adecuadamente cada uno de los tratamientos térmicos contenidos en el manual, se describen las operaciones y herramientas necesarias para cada. Es importante que el usuario cuente con el catálogo del acero a tratar, ya que este cuenta con información útil y necesaria.

## Summary

The present piece of work scholarships it is heat treatments manual about the carbon steel, which intend, to satisfy at least two purposes: First of all, to have a bibliographical material about the heat treatments in relation to the metals of steel through carbon as an the theoretical aspects as technological, so it can be used as an auxiliary text for those students who are coursing the subjects related with this subject matter. Such as the science of the materials, mechanic design, mechanical projects, heat treatments of the steel among other subjects matters. Besides to bring to the personal training places, teaching as the basic theoretical and practical knowledge to achieve a termical treatments based on this manual through the best possible way.

In order to achieve the previously mention assignments the manual in first place it has the terms and concepts which are involved with the subject of the heat treatments from the metals of steel to the carbon, like they are the mechanical proprieties (Hardeness, Mechanical Strength, Ductility, Flexibility, Toughness, etc.). The processes of manufacturing which have received the material that can it used to treat termically this issue and define the metals of steel that it can be used for its classification. Afterwards before to begin to know and defign each one of the head treatment of the steel to the carbon, it is very important to follow to each one of the treatment thermical of the steel to the carbon, it is very important to follow to each one of the processes and changes that are present microestructurally during the heat treatment of the steel. To know and understand the diagrams of carbon plus iron, time and temperature, the transformation of time and temperature it is useful to validate the important of each one of the factors (temperature, time, etc.) from the heat treatments, factors that are fundamental in order to get optimal results.

With the theoretical knowledge data plus the technological, the user of this manual will be in good conditions in order to carry out the carbon of steel heat treatment that it is necessary. In order to achieve rightly and finely each one of the treatments thermical on the manual, it is described the treatments. It is important that the user has a catalog of the steel to treat it, because this has useful and necessary information.

## Introducción

Los tratamientos térmicos consisten en calentar una pieza hasta una determinada temperatura y luego enfriarla a una velocidad adecuada, con el objeto de modificar sus características mecánicas, debido a un cambio en su estructura interna. Si se desea cambiar las propiedades mecánicas de un acero, debemos cambiar su microestructura.

Por medio de los tratamientos térmicos se le puede otorgar al acero una elevada dureza y resistencia mecánica, por lo que se puede emplear un menor tamaño de las piezas para una misma carga solicitada. Al aumentar la dureza se incrementa la resistencia al desgaste por abrasión. En ciertas ocasiones se requiere de un tratamiento que reduzca la dureza con el fin de conseguir una mayor facilidad de mecanizado, como ser un torneado o un frezado.

Para conseguir las características mecánicas deseadas, se debe optar por un tratamiento determinado, si se requiere ablandar un acero, se debe aplicar un recocido de regeneración, si se requiere elevar la resistencia mecánica y la dureza, se debe aplicar un templado y un posterior revenido para que la pieza templada adquiera tenacidad. Para que cada uno de los tratamientos térmicos al acero al carbono sea lo más eficaz e eficientemente posible, se deben respetar los factores involucrados en cada uno de los tratamientos térmicos.

Los objetivos generales de este Manual de tratamientos térmicos del acero al carbono son:

- Entregar los conocimientos teóricos y tecnológicos sobre los tratamientos térmicos mas empleados para modificar propiedades mecánicas de las piezas y partes fabricadas en aceros al carbono. Los tratamientos térmicos vistos este manual son: *los recocidos, templado directo y revenido.*
- Ser una herramienta de apoyo de los catálogos técnicos de barras de aceros.
- Lograr que el usuario realice los tratamientos térmicos de templado, revenido y recocido por medio del apoyo del manual confeccionado, de una manera fácil, correcta, confiable y eficaz.

Los objetivos específicos del presente Manual son:

- a.-** Definir los conceptos y términos relacionados con el tema, tales como: las propiedades mecánicas, los procesos de manufactura, el diagrama hierro-carbono, la templabilidad y el ensayo jominy, entre otros temas relacionados de los cuales se deben tener conocimiento.
- b.-** Indicar los beneficios, defectos y fallas que se producen en el desarrollo del tratamiento térmico.
- c.-** Señalar una secuencia de operaciones, las herramientas, y las técnicas adecuadas para aplicar un tratamiento térmico de una manera correcta.

Para alcanzar los objetivos señalados, se utilizo la siguiente metodología de trabajo:

- En primer lugar se recopilo toda la información disponible en biblioteca e Internet, y más el aporte de experiencias personales.
- Analizar la información para luego seleccionar la materia que sea útil de acuerdo a los objetivos de este manual.
- Comenzar a desarrollar el manual el que se comienza con las definiciones y conceptos involucrados en los tratamientos térmicos del acero al carbono, como ser: las propiedades mecánicas, los ensayos, procesos de manufactura, el acero y sus características, diagrama hierro-carbono, diagrama temperatura-tiempo-transformación, etc., para luego detallar la manera correcta de efectuar un *templado*, *revenido* y *recocido* de una manera eficaz.
- Efectuar los tratamientos de acuerdo a lo estudiado y detallar los resultados.

## CAPITULO I

### **Definición de las propiedades mecánicas de un material y los ensayos para determinar sus propiedades y aplicaciones.**

Las propiedades mecánicas son aquellas respuestas que un material tiene al aplicársele fuerzas mecánicas. Para poder conocer las propiedades mecánicas de un determinado metal, se le extraen pequeñas muestras para someterle a diversos ensayos. Las muestras a ensayar se le denominan *probetas*.

Los ensayos se clasifican en dos tipos, los *destructivos* y *no destructivos*. En los ensayos destructivos las muestras del material, se deforman hasta romperse o ser destruirlos, bajo condiciones de carga controlada, la cual se aplica en forma lenta (carga estática), o de golpe (carga súbita), y también variando a través del tiempo (carga dinámica). En los ensayos no destructivos, no se llega a la destrucción de la probeta del metal ensayado.

Las cargas de prueba, excepto en casos especiales, no entregan con exactitud las cargas reales de servicio que experimentan los elementos de las máquinas. Además no hay ninguna garantía de que una pieza en particular que se compre ofrezca las mismas propiedades de resistencia que las muestras de material similar anteriormente probadas. Habrá alguna variación estadística en cuanto a la resistencia de cualquier muestra en particular, en comparación con las propiedades promedio probadas para el material de que este hecha. Por esta razón, gran parte de los datos publicados de resistencia se dan como valores mínimos.

Por medio de los parámetros de las propiedades mecánicas se determinan las cargas de trabajo a que puede ser sometida una determinada pieza, por lo que es de vital importancia conocer los parámetros de resistencia. Cabe señalar que las propiedades mecánicas de un metal provienen de la estructura interna del material.

Las principales propiedades mecánicas son:

- Resistencias (a la tensión, máxima a la tensión, a la fatiga).
- Ductilidad.
- Tenacidad (Resistencia al golpe).
- Dureza (Resistencia a la penetración).

## 1.1. Ensayos Destructivos

### 1.1.1. Ensayos a la Tensión (carga estática)

A una pequeña porción del material a probar, denominada probeta de ensayo, como se puede ver en la figura 1-1, se maquina a diversos diámetros estandarizados  $d_0$  y una longitud calibrada  $l_0$ . La longitud calibrada es una longitud arbitraria definida a lo largo del tramo de pequeño diámetro de la probeta mediante dos marcas de punzón de manera que su aumento pueda ser medido en el ensayo. Los extremos de la probeta son de un diámetro mayor, con el objeto de lograr una buena sujeción de la probeta en la máquina de ensayo. El acabado superficial debe ser de terminación espejo para eliminar concentraciones de esfuerzos provenientes de defectos superficiales.

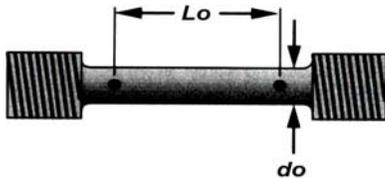


Fig. 1-1. Probeta de ensayo de tracción.

La barra es estirada lentamente a tensión (tracción) hasta que se rompa, en tanto que se observa continuamente la carga y la longitud calibrada. El resultado es una gráfica (o curvas) de *esfuerzo-deformación* del comportamiento del material bajo carga, según se aprecia en la figura 1-2, que muestran materiales dúctiles, como un acero de bajo carbono o acero dulce, y un acero recocido alto en carbono.

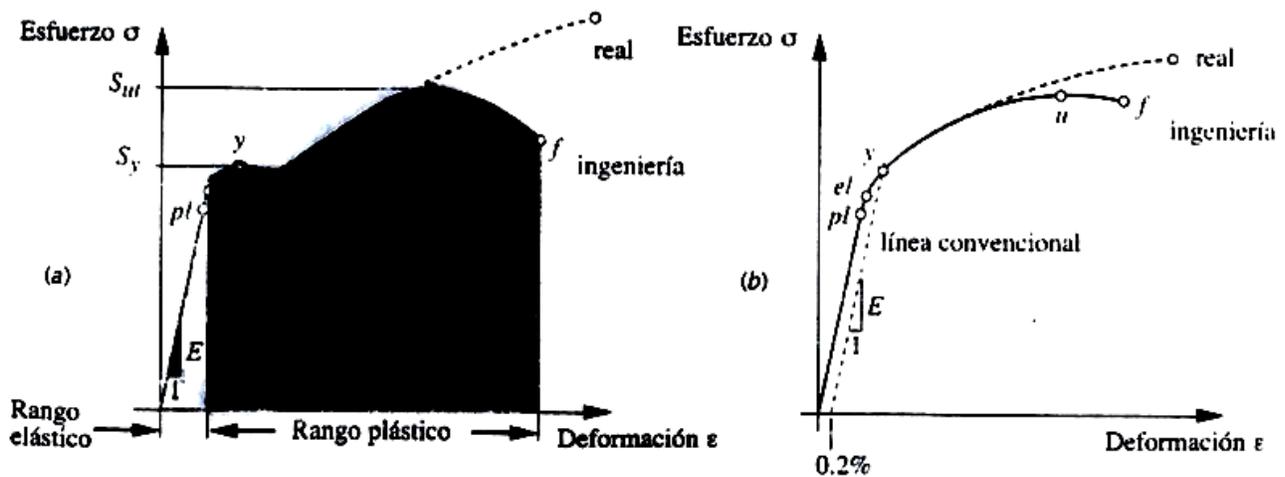


Fig. 1-2. Curvas de esfuerzo-deformación, (a) acero bajo de carbono, (b) acero recocido alto de carbono.

**Esfuerzo ( $\sigma$ ):** Se define como la carga o fuerza aplicada por unidad de área. Para la probeta se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\sigma = P/A_0 \quad (1.1)$$

Donde: P es la carga o fuerza aplicada en cualquier instante y  $A_0$  es el área original de la probeta.

Las unidades más empleadas para expresar el esfuerzo son: kg/cm<sup>2</sup>, kg/mm<sup>2</sup>, lb/plg<sup>2</sup>, psi, N/M<sup>2</sup>, KN/M<sup>2</sup>.

**Deformación:** Se define la deformación como la variación de la unidad de longitud. Se determina por medio de la expresión matemática:

$$e = (l_f - l_i) / l_i \quad (1.2)$$

Donde:  $l_f$  es la longitud que experimenta la probeta.

$l_i$  es la longitud que original la probeta.

La deformación es adimensional, o sea carece de unidades dimensionales, pero igual se expresa en cm/cm, mm/mm, %, etc.

En el ensayo de tracción, los metales presentan 2 tipos de deformaciones, la *deformación elástica* y *plástica*.

**Deformación elástica:** Es un proceso reversible, es aquella deformación que se produce al aplicar un esfuerzo, pero desaparece al quitarle el esfuerzo aplicado, quedando la pieza o el cuerpo con sus dimensiones originales.

*Límite elástico y proporcional:* La deformación elástica se mantiene hasta el límite elástico, en la figura 1-2, el punto *el* es el límite elástico. La deformación elástica manifiesta una proporcionalidad de esfuerzo ( $\sigma$ ) versus deformación elástica ( $e$ ), la que se mantiene hasta el punto *pl*, el cual es el límite de proporcional, como se puede ver en la figura 1-2. Los puntos *el* y *pl* están por lo general muy cercanos por lo que a menudo se le considera como uno mismo.

*Módulo de Elasticidad:* La deformación elástica es proporcional a la cantidad de esfuerzo aplicado, se puede calcular mediante la *ley de Hooke*.

$$\sigma = Ee \quad (1.3a)$$

Donde  $E$ : módulo de elasticidad.

$e$ : deformación elástica.

Despejando tenemos:

$$E = \sigma / e \quad (1.3b)$$

El módulo de elasticidad ( $E$ ) se define como la razón entre el esfuerzo aplicado ( $\sigma$ ) y la deformación elástica ( $e$ ) que el esfuerzo produce. El valor de este módulo está relacionado con la rigidez, ya que es una medida de rigidez en su rango elástico y tiene las unidades de esfuerzo. El módulo de elasticidad, también denominado *módulo de Young*, se define gráficamente como la pendiente de la *curva esfuerzo-deformación*, hasta el límite de proporcionalidad, denominado punto  $pl$ , como se puede apreciar en la figura 1-3.

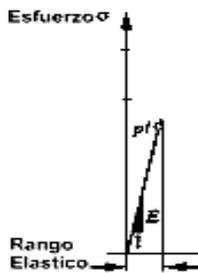


Fig.1-3. Curva esfuerzo-deformación, límite proporcional, punto  $pl$ .

El valor de este módulo está fundamentalmente determinado por la composición del material, y solo está indirectamente relacionado con otras propiedades mecánicas. Es importante saber que la mayor parte de los materiales exhiben un comportamiento de rigidez lineal y sus módulos varían muy poco con tratamientos térmicos o al agregarles elementos de aleación. Por ejemplo para el *acero* de más baja resistencia tiene el mismo módulo que el más resistente, el que mantiene después de cualquier tratamiento térmico (ver figura 1-4) el que tiene un valor de  $2.1 \cdot 10^6$  (Kg. /cm<sup>2</sup>).

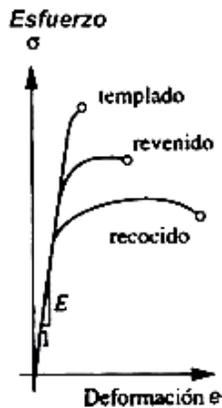


Fig.1-4. Curvas esfuerzo-deformación para aceros recocidos, templados y revenidos.

### 1.1.2. Propiedades Mecánicas

➤ **Ductilidad y Fragilidad:** Se define la *ductilidad* como una medida o cantidad de deformación plástica, antes de la ruptura del material. La ausencia de una deformación significativa antes de la fractura se conoce como la *fragilidad*.

*Ductilidad:* La ductilidad de un material se mide en función de su porcentaje de elongación, o en función a la reducción porcentual de su área en la fractura. Los materiales que en la fractura tengan una elongación superior a 5% se consideran dúctiles. En la figura 1-5 se puede apreciar una probeta de un material dúctil que a sido traccionada hasta romperse.

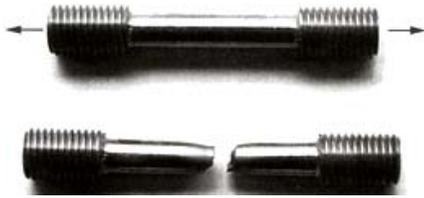


Fig.1-5. Probeta de ensayo a tensión de acero dulce después de la fractura.

*Fragilidad:* Los materiales frágiles como lo demuestra una probeta no demuestra ninguna evidencia de estricción (figura 1-6) y tiene los contornos suaves superficiales finos propios de una fractura frágil.

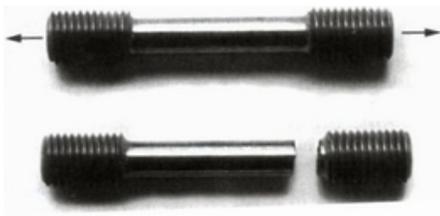


Fig.1-6. Probeta de ensayo a tensión de hierro colado después de la fractura.

Un metal puede ser dúctil o frágil, dependiendo del proceso de manufactura, o del tratamiento térmico que recibe. Aquellos metales forjados, trefilados, estirados, o conformados de manera sólida hasta ciertas dimensiones y formas estando en frío o calientes, suelen ser mas dúctiles que los metales colados vaciando el material fundido dentro de un molde o forma (dados). Este enunciado general tiene, sin embargo, muchas excepciones. El trabajo en frío del metal, tiende a reducir su ductibilidad y a incrementar su fragilidad. El tratamiento térmico también tiene un marcado efecto sobre la ductilidad en los aceros.

**-Resistencia:** Se define como la capacidad del material a ser deformado. Es la magnitud del esfuerzo que logra alcanzar el material ensayado. Se tiene diversos tipos de resistencias mecánicas, las más empleadas para los cálculos de diseño son:

**1. Resistencia máxima a la tracción ( $S_{ut}$ ):** Es el máximo esfuerzo que puede soportar un material al solicitarlo, forzarlo o cargarlo. En la figura 1-7, el punto  $f$ , representa el valor máximo de resistencia a la tracción para un acero recocido. A la resistencia máxima a la tracción se le suele denominar por ciertos autores *resistencia mecánica* o simplemente *resistencia a la tracción*.

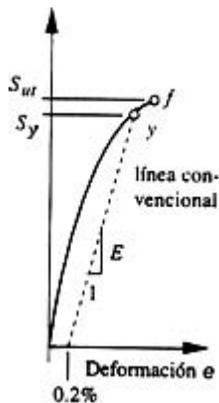


Fig.1-7. Curva esfuerzo-deformación, puntos  $f$  e  $y$ .

**2. Resistencia a la fluencia o Cedencia ( $S_y$ ):** También denominada límite a la cedencia o fluencia del material. Se define como el esfuerzo donde se inicia la deformación plástica (punto  $y$  de la figura 1-7), ubicado ligeramente sobre el límite elástico. Se calcula como norma universal el punto ( $y$ ) que da el 0.2 % de la deformación ( $e$ ), trazando una paralela a la recta de comportamiento elástico e interceptando a la *curva esfuerzo-deformación*, como se puede ver en la figura 1-7.

**-Curva de deformación verdadera o real:** Se considera para el cálculo del esfuerzo el área final de la pieza probada o ensayada, esto es una distinción importante, ya que un material dúctil adquirirá un área transversal algo reducida cuando este soportando la carga máxima.

**-Curva esfuerzo-deformación de ingeniería o nominal:** cuando se basa en el área original de la pieza ensayada. El esfuerzo-deformación es más importante para el ingeniero quien debe hacer sus diseños o cálculos estructurales en base a las dimensiones originales. Debido a que el área transversal de los materiales dúctiles se reduce antes de romperse, la resistencia

a la ruptura ha de ser menor que la resistencia a la tracción. Ambas curvas se pueden observar en la figura 1-2.

Los valores de resistencia de uso más común para cargas estáticas son el esfuerzo de fluencia  $S_y$  y el esfuerzo de resistencia máxima a la tracción o tensión ***Sut***.

## 1.2. Ensayo de Choque o Resilencia

### 1.2.1. Resistencia al Impacto (carga súbita)

La prueba o ensayo de esfuerzo-deformación se efectúa a velocidades de deformación muy lenta y controlada, lo que permite que el material se organice frente a cargas variables. Si la carga se aplica de manera súbita, la capacidad de absorción de energía del material se torna muy importante. La energía en cuestión es su energía de deformación, es decir el área bajo la curva esfuerzo-deformación. La flexibilidad y tenacidad del material son funciones importantes en esta área.

*Flexibilidad (ar)*: Es la capacidad de un material para absorber energía sin deformación permanente, es proporcional al área bajo la curva esfuerzo-deformación hasta el límite elástico (figura 1-2).

Esta relación muestra que un material más rígido y con similar resistencia elástica es menos flexible que uno más dúctil. Una bola de hule absorbe más energía sin deformación permanente que un vidrio.

*Tenacidad (ak)*: Es la capacidad de un material para absorber energía sin fracturarse, con una deformación permanente se conoce como la tenacidad, es proporcional al área por debajo de la curva esfuerzo-deformación (figura 1-2) hasta el punto de fractura (*f*).

Un material dúctil de un punto de fluencia similar a uno frágil resultara mucho más tenaz. Una carrocería de lámina de acero absorberá más energía en una colisión mediante deformación plástica, que una frágil carrocería de vidrio.

**1.2.2. Pruebas de impacto:** La tenacidad se puede evaluar mediante pruebas de impacto, las pruebas de *Izod* y *Charpy* son de estos procedimientos, que implican golpear con un péndulo una probeta con muesca con entalla en ojo de llave para la prueba de *Charpy* y con una entalla en V, para la prueba de *Izod* (ver figura 1-8), registrando a una temperatura en particular, la energía cinética necesaria para romper la probeta. La resistencia al impacto

en los aceros varía con las temperaturas. En la mayoría de los aceros alcanzan un valor máximo sobre los 100°C y a temperatura ambiente es un algo menor, alcanzando un valor mínimo muy reducido a temperaturas bajas. Existe un rango pequeño de temperatura, donde se producen grandes diferencias de resistencia al impacto.

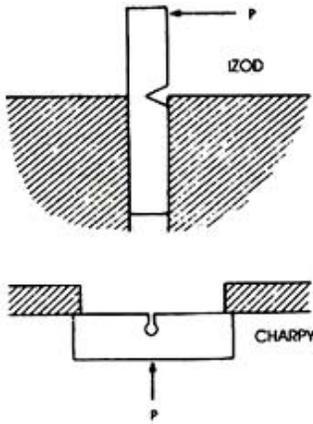


Fig.1-8. Ensayo de Izod y Charpy.

El ensayo de Izod se realiza a temperaturas ambientes, en cambio la prueba de Charpy se aplica a temperaturas extremas, altas o bajas.

### 1.3. Prueba no Destructiva

#### 1.3.1. Ensayo de Dureza

**Dureza:** Se define como la resistencia que presenta un material a la penetración en su superficie. La dureza de un material podría ser un indicador de su resistencia ante el desgaste (aunque no es garantía de resistencia desgaste).

La resistencia y la dureza están íntimamente correlacionadas, es decir a mayor dureza, mayor resistencia (ver figura 1-09). Por tratarse de ser una prueba no destructiva y de fácil aplicación, es ampliamente utilizado en controles de calidad tanto en el proceso de fabricación como en los tratamientos térmicos de piezas mecánicas.



Fig.1-9. Relación entre la dureza y la resistencia.

La dureza suele medirse por medio de tres ensayos mecánicos o escalas, que son las siguientes: Brinell (**HB**), Rockwell (**HRB** o **HRC**) y Vicker (**HV**).

-*Dureza Brinell (HB)*: El número de dureza Brinell es un índice de dureza que se determina en base a un penetrador, que es una esfera de acero endurecido o de carburo de tungsteno, de un centímetro de diámetro, bajo una carga de 500 o 3000 kilogramos, según el rango de dureza del material.

-*Dureza Rockwell (HRB o HRC)*: Es otro índice de dureza, muy utilizado en materiales muy duros, se utiliza una esfera de 1/16 de pulgada o un diamante en forma de cono de un ángulo de 120°, y se mide la profundidad de la penetración. Se disponen de varias escalas de medición (Cargas estandarizadas), las que puedan ser 100 o 150 kilogramos, rockwell B (**HRB**) ó C (**HRC**) respectivamente según se trate, de materiales de regular o alta dureza.

-*Dureza Vicker (HV)*: Emplea un deformador de diamante piramidal y se mide bajo un microscopio el ancho de la deformación.

De las tres pruebas más conocidas, la más utilizada es la dureza o *prueba de Rockwell*, debido a que es fácil de aplicar, y es de una gran precisión debido a que no hay una medición con microscopio, el cual genera errores de lectura. La *dureza Brinell* permite de una manera muy fácil, estimar la resistencia máxima a la tensión (*Sut*), por medio de la siguiente ecuación:

$$Sut \approx 500 \text{ HB} \pm 20 \text{ HB} \quad \text{psi} \quad (1.4a)$$

$$Sut \approx 3.45 \text{ HB} \pm 0.2 \text{ HB} \quad \text{Mpa} \quad (1.4b)$$

Donde **HB** = número de dureza Brinell, para 3000 kg..

Con el empleo de esta ecuación, se obtiene de una medición experimental aproximada de la resistencia de cualquier acero al carbono, ya sea de baja, media o alta aleación, en piezas que estén en servicio y que no puedan ser probadas de manera destructiva.

Para poder conocer la equivalencia de las diferentes durezas con las resistencias se utiliza tablas de equivalencias, como se muestra a continuación:

Equivalencia aproximadas se Dureza y Resistencia  
Máxima a la Tracción

Brinell <i>HB</i>	Vickers <i>HV</i>	Rockwell		Última, $\sigma_u$	
		<i>HRB</i>	<i>HRC</i>	MPa	ksi
627	667	—	58.7	2393	347
578	615	—	56.0	2158	313
534	569	—	53.5	1986	288
495	528	—	51.0	1813	263
461	491	—	48.5	1669	242
429	455	—	45.7	1517	220
401	425	—	43.1	1393	202
375	396	—	40.4	1267	184
341	360	—	36.6	1131	164
311	328	—	33.1	1027	149
277	292	—	28.8	924	134
241	253	100	22.8	800	116
217	228	96.4	—	724	105
197	207	92.8	—	655	95
179	188	89.0	—	600	87
159	167	83.9	—	538	78
143	150	78.6	—	490	71
131	137	74.2	—	448	65
116	122	67.6	—	400	58

Nota: carga de 3000kg para HB

Tabla N° 1.1. Equivalencias de Durezas.

#### 1.4. Efectos de Termofluencia y Temperatura

El ensayo de tensión, aunque lento, no dura lo suficiente en comparación con el tiempo durante el cual, en la vida real, puede una pieza de máquina sujetarse a carga constante. Todos los materiales expuestos a alta temperatura, cederán (se deformarán lentamente) al ser expuestos a esfuerzos a pesar que sea muy debajo del límite elástico. En los materiales o metales ferrosos no experimentan deformaciones por termo fluencia a temperaturas ambientes o inferiores. Pero al incrementarse la temperatura, experimentan un cambio notable, significativo el cual oscila entre un 30-60% de la temperatura de absoluta de fusión del material.

## **CAPITULO II**

### **Proceso de Manufactura y Endurecimiento mecánico**

#### **2.1. Conceptos previos**

Con una sola excepción, todas las formas y tamaños obtenibles con los metales tienen comienzo en la forma de una pieza colada, o sea en estado líquido o fundido. El metal fundido se cuela en un molde apropiado y luego se deja enfriar, adquiriendo la forma del molde donde fue vertido. La única excepción a esta técnica es cuando el metal se halla en polvo y se le da la forma deseada prensándolo con un molde metálico. Una clase especial de piezas coladas obtenidas vertiendo el acero fundido en un molde de hierro colado es el lingote de acero, esta es la forma en la cual se cuela el acero, previo a aplicarle el moldeo plástico, tal como el laminado o para el forjado.

##### **2.1.1. Trabajo en Frío y Endurecimiento por Deformación:**

El proceso de manufactura a temperatura ambiente, a fin de modificar su forma o tamaño, también los endurecerá, pero incrementará su resistencia a expensas de la ductibilidad. Los materiales que se trabajan con esta técnica deben tener una suficiente ductibilidad al principio, pero esa ductibilidad se reduce conforme la dureza y resistencia a cedencia y la tracción va en aumento, conforme aumenta la deformación se va poniendo más duro debido a la dislocación.

**2.1.2. Laminado en Frío:** El trabajo en frío es logrado mayormente del proceso de rolado (Laminado entre rodillos), en el cual las barras son laminadas de manera progresiva al ser pasadas entre rodillos, o también a través de cualquier método que lleve al material dúctil más allá del punto de fluencia para deformarlo permanente.

Este fenómeno de endurecido por deformación, realizado mecánicamente, se puede eliminar o anular, al aplicar determinadas temperaturas altas (recocido), ya que ocurren cambios microestructurales.

Del rolado se obtienen productos planos, como cintas, hojas, placas o barras, como también se pueden obtener secciones transversales cuadrada, redonda, rectangular, hexagonal y otros perfiles.

**2.1.3. Trefilado:** Es un tipo de trabajo en frío que se aplica posterior al laminado, el que consiste en hacer pasar una barra o alambre por dados endurecidos que reducen la sección transversal, logrando una mayor exactitud que el laminado (ver figura 2.10).

## 2.2. Trabajo en Caliente

El trabajo en caliente es una deformación mecánica llevada a cabo a una temperatura superior a la recristalización. Si el metal se trabaja mecánicamente por encima de su temperatura de recristalización (trabajo en caliente), tendera, al enfriarse, a recocerse parcialmente a si mismo y por lo tanto va a poseer una estructura de grano normal, con una tenacidad y ductilidad normales. Por el trabajo en caliente se reduce el problema de endurecimiento por deformación, pero se introduce sus propios problemas de rápida oxidación de la superficie, debido a las elevadas temperaturas.

Los metales de rolados en caliente tienen tendencia a tener una mayor ductibilidad, menor resistencia y terminado de superficie de calidad inferior al ser comparados con el trabajo en frío, del mismo material. El trabajo en caliente no incrementa apreciablemente la dureza del material, aunque puede incrementar su resistencia al mejorar la estructura del grano y alinear el grano del metal a lo largo de la pieza (fibrado).

Algunos de los métodos mas empleados del trabajo en caliente de los metales podemos señalar al *laminado, forjado, prensado, extrusión y centrifugado*.

**2.2.1. Rolado o Laminado en Caliente:** El laminado en caliente sirven para los dos fines siguientes: el primero, para el fin puramente mecánico de obtener el acero en la forma deseada y el segundo, no menos importante, es para mejorar las propiedades mecánicas, destruyendo la estructura de la colada. La modificación de la estructura o “afino del grano” es importante porque hace al acero más tenaz y dúctil, y le da una resistencia al choque mas elevada. La forma de laminación en caliente es similar a la de frío.

**2.2.2. Forjado:** El forjado o martillado es el método más sencillo de transformar un material en un producto por deformación. El primer paso consiste en calentar al material, en su estado original (lingote), una temperatura adecuada, para luego proceder a darle una forma determinada por medio de golpes .En la forja moderna se utiliza una serie de troqueles martillo, martinets y prensas para ir conformando de manera gradual el metal caliente a su forma definitiva.

El metal forjado crea un metal de mayor resistencia mecánica que el conformado por fundición o un maquinado. El conformado en caliente de un material de forja a su forma final hace que las “líneas de flujo” o “fibras” internos del material se aproximen a los contornos de la pieza, lo que puede dar como resultado una mayor resistencia que si las líneas de flujo (fibras) de un material estándar se cortaran mediante maquinado hacia el contorno final. Las piezas forjadas se emplean en piezas muy solicitadas, tales como *cigüeñales, bielas, alas y fuselajes de naves aéreas*.

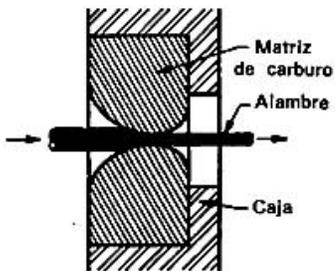


Fig. 2-10. Trefilado.

### CAPITULO III Aleaciones y el Acero

Las aleaciones son una sustancia compuesta por dos o más elementos químicos, de los cuales al menos uno es metal fundido.

#### 3.1. Acero

El acero es una aleación compleja, ampliamente utilizada en la Ingeniería en general. Químicamente el acero esta compuesto por hierro y carbono, mas otros metales y metaloides, todos los cuales coexisten en forma de solución sólida, combinaciones simples de compuestos intermetálicos o fases y mezclas. El hierro es el componente que entra en mayor proporción en todos los tipos de aceros (solvente) y sus propiedades varían de acuerdo a la presencia de otros metales como por ejemplo., *el manganeso, níquel, cromo, molibdeno y vanadio*, y metaloides como *carbono, boro, fósforo, azufre y silicio*, siendo *el carbono* uno de los mas influyentes. La composición química influye mucho en la estructura y propiedades del acero. Físicamente, el acero esta formado por granos poliédricos o cristales, que pueden variar mucho en cuanto a forma o tamaño. Además de los elementos mencionados anteriormente, a pesar del esmero aplicado en la fabricación del acero, se encuentran productos de reacción no metálicos como óxidos, sulfuros y silicatos. Estos elementos son generalmente perjudiciales, por lo que se deben evitar al máximo. Sin embargo, para ciertos empleos determinados, se le agrega intencionalmente al acero, algunos elementos como el *fósforo, azufre y selenio* con el objeto de producir una cantidad regulada de inclusiones no metálicas, que comuniquen al acero algunas propiedades deseadas. El acero en general se clasifica en dos grandes grupos o clases, de acuerdo a su composición química, ellos son: *aceros al carbono* y *aceros aleados*.

#### 3.2. Acero al carbono

Aunque todos los aceros contienen carbono, el término *acero al carbono* se usa para distinguir un acero al cual no se le añade ningún elemento aleado especial, tal como *níquel, tungsteno, vanadio, silicio, manganeso o cromo* en cantidades apreciables. En todos los aceros, ya sea al carbono o aleado, el *carbono* es el factor principal, a pesar que se encuentra presente en pequeñas cantidades. El carbono, mas que cualquier otro constituyente, determina las propiedades y aplicaciones del acero.

**Carbono contenido en el acero:** El carbono contenido en el acero puede variar desde unas pocas centésimas hasta un 2.14% aproximadamente. Los porcentajes pequeños están casi

en el límite del hierro puro, y las propiedades que posee son similares al hierro casi puro. El límite máximo de carbono (2.14%) ha sido determinado prácticamente, y este límite se controla por dos efectos:

- a) La disminución en plasticidad y fragilidad resultante para los porcentajes más elevados de carbono.
- b) El peligro de la descomposición de la cementita (FeC) en grafito y ferrita. Con un contenido superior al 2.14% resulta un acero débil y frágil.

### 3.2.1. Influencia de los constituyentes del acero

En los aceros al carbono el *carbono* propiamente tal, es elemento que mas influye en las propiedades mecánicas del acero, transformando al hierro de un material o metal simple a una aleación compleja, aumentando su dureza y resistencia mecánica y a su vez reduciendo la plasticidad. Junto con el *carbono* todos los aceros al carbono contienen cantidades variables de *manganeso*, *silicio*, *azufre*, *fósforo*, entre otros *elementos*. Los elementos que acompañan al acero al carbono se les denominan por ciertos autores impurezas útiles e impurezas perjudiciales. Las impurezas útiles aquellas que mejoran las propiedades del acero, por lo tanto se les suele añadir al acero. Las impurezas perjudiciales son aquellas que producen efectos negativos en las propiedades. Estas impurezas o elementos perjudiciales provienen, a que estos se coexisten juntos al hierro y el carbono. El efecto adverso de los denominadas impurezas solo se presenta en determinadas concentraciones, las que al ser mínimas no producen efectos negativos, y hasta ciertas cantidades se convierten en beneficiosos.

**Carbono:** el carbono es el elemento más importante que determina la estructura del acero, así como todas sus propiedades mecánicas, y el comportamiento en general de todas las clases de acero. Con el aumento de la cantidad de carbono en el acero, la dureza aumenta, y las plásticas disminuyen, independiente del proceso de conformado (laminado en frío o en caliente), con o sin tratamientos térmicos (recocidos, templado y revenido). En la figura 3-11 se ilustra la relación dureza/contenido de carbono.

El peso específico del los aceros al carbono es función del contenido de carbono, y de los tratamientos térmicos. Para los aceros brutos de laminación y recocidos se pueden calcular por las siguientes expresiones:

$$D= 7.855-0.032C \text{ Kg. (Aceros brutos de laminación)} \quad (3.5a)$$

$$D = 7.860 - 0.04 C \text{ Kg. (Aceros recocidos)} \quad (3.5b)$$

Donde, **C** es el contenido de carbono % .

**Manganeso:** El fabricante de aceros no puede obtenerlos de buena calidad sin la ayuda del manganeso. El manganeso permite obtener lingotes sanos de acero sanos debido a su efecto desoxidante y por impedir la formación perjudicial del sulfuro de hierro, con lo cual promueve la forjabilidad del acero. El manganeso contenido en el acero al carbono varia entre 0.30 a un 0.80 %, pero en aceros especiales puede llegar hasta 2.50 %. Se combina fácilmente con todo el azufre del acero, formando sulfuro de manganeso (MnS), de este modo se impide que el azufre se combine con el hierro, si llega a combinar el azufre con el hierro se forma un sulfuro de hierro, el que producirá un acero frágil en caliente, difícil de forjar y de utilizar.

**Silicio:** al igual que el manganeso, se considera un agregado o también denominado como una impureza útil. El silicio contenido en los aceros al carbono varia desde 0.05% a un 0.5 %. El silicio influye al aumentar la elasticidad del acero y otorga mayor resistencia a la oxidación.

**Azufre:** En determinadas concentraciones, se le considera como una elemento perjudicial en el acero, ya que lo convierte en frágil en altas temperaturas e impide la conformación en caliente (laminado, forja). En cantidades reducidas (-0.012%) no ejerce efectos perjudiciales, sin embargo en cantidades de 0.06% suele producir efectos perjudiciales. El manganeso elimina el efecto perjudicial del azufre, debido a que combina para formar sulfuro de manganeso. Se suele agregar intencionalmente cantidades sobre 0.12% para darle una mejor maquinabilidad para tornillería.

**Fósforo:** En el pasado se le consideraba unos de los elemento más perjudiciales que se podían encontrar presente en el acero. Sin embargo, según investigaciones meticolosas realizadas, han demostrado que hasta cantidades de 0.08% de su presencia no es perjudicial en la mayoría de las aplicaciones. Una cantidad mayor produce fragilidad en frío, a causa de su tendencia a originar estructura de grano grueso y segregaciones. El fósforo en presencia del cobre aumenta la capacidad del acero para resistir a la corrosión atmosférica y aumenta la resistencia eléctrica. También mejora la resistencia al rozamiento y mejora la maquinabilidad en los aceros para tornillería.

### 3.3. Clasificación de los aceros al carbono

Los aceros al carbono se pueden clasificar de acuerdo a un sistema de numeración, desarrollado por la *American Iron and Steel Institute (AISI)* y la *Society of Automotive Engineers (SAE)*, en el cual a los aceros se les designan un código de 4 dígitos. Al acero al carbono le corresponde el código 10XX, donde 10 indica que es un acero al carbono y XX indica la cantidad de carbono presente, expresada en centésimas de porcentaje. Por ejemplo un SAE/AISI 1045, es un acero al carbono con un 0.45% de carbono. Las designaciones SAE/AISI también especifican los límites máximos aceptables de los elementos acompañantes del acero al carbono. De acuerdo al contenido de carbono los aceros al carbono se clasifican en: *aceros al bajo carbono*, *aceros al medio carbono*, *aceros al alto carbono*.

**3.3.1. Aceros al bajo carbono (SAE/AISI 1005-1030):** contienen menos de un 0.35% de carbono, estos aceros son ampliamente utilizados. Sus aplicaciones comunes son partes de *láminas metálicas para automóviles*, *plancha de aceros para fabricación* y *rieles del tren*. Estos aceros son muy dúctiles, fácil de conformar, y son de baja resistencia mecánica.

**3.3.2. Aceros al medio carbono (SAE/AISI 1035-1055):** el contenido de carbono fluctúa entre un 0.35 a un 0.55% y se especifican para aplicaciones que requieran mayores resistencias que a las del acero al bajo carbono las aplicaciones para estos aceros son: *construcción de piezas de máquinas como ejes, pasadores, pernos, cremalleras, chavetas, engranajes de baja velocidad, cigüeñales, acoplamientos, etc.*

**3.3.3. Aceros al alto carbono (SAE/AISI 1060-1090):** el contenido de carbono es superior a 0.55% de carbono. Se especifica en aplicaciones de alta resistencia y donde se solicita alta rigidez y dureza a la vez. Por ejemplo podemos mencionar a. *resortes, herramientas de corte y las cuchillas*, así como las *piezas resistentes al desgaste*.

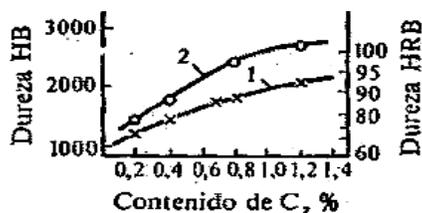


Fig. 3-11. Relación entre la dureza y el porcentaje de carbono. 1: recocido; 2: laminado.

## CAPITULO IV Estructura de los Metales

### 4.1. Diagrama Hierro –Carbono

Es de gran importancia conocer el *diagrama hierro-carbono* de la figura 4-12 y 4-13, debido a que este diagrama no solo muestra las aleaciones formadas, si no que también indica las temperaturas apropiadas para los tratamientos térmicos y contribuye a explicar por que las propiedades de los aceros pueden variar enormemente al aplicarles un tratamiento térmico.

Las aleaciones que contienen menos de del 0.008% de carbono, son monofásicas y tienen estructura de ferrita.

La ferrita es la solución sólida del carbono en el hierro  $\alpha$ , **Fe  $\alpha$  (C)**. La solubilidad máxima del carbono en la ferrita de un 0.008% a 20° C y de un 0.03% a 727° C. La red cristalina es un cubo volumétrico centrado. La ferrita es una solución sólida intersticial; los átomos de carbono se sitúan en los espacios internodales de la red cristalina del hierro. La ferrita es magnética y sumamente plástica. La dureza de la ferrita **HB**  $\approx$  800 a 1000 Mpa.

Las aleaciones con un contenido de carbono de 0.008% y más a la temperatura ambiente tienen dos fases: *ferrita* y *cementita*. La *cementita* es un compuesto químico de *hierro* y *carbono* **Fe<sub>3</sub>C**. La cementita tiene una red cristalina complicada (róbica), una dureza muy alta y es muy frágil. En las estructuras de estas aleaciones, con el aumento del contenido del carbono (mas de 0.03%), se genera la perlita (*eutectoide*). Esta última es una mezcla mecánica de dos fases: de *ferrita* y de *cementita*.

La perlita se forma de la austenita durante el enfriamiento lento a la temperatura de 727 °C y contiene el 0.8% de carbono. En dependencia de la forma de las partículas de cementita, la perlita puede ser laminar o granulosa. La dureza de la perlita laminar, **HV** 1600 a 2500 y de la granular, **HV** 1600 a 2200. La cantidad de perlita crece proporcionalmente con contenido de carbono. A la par con el aumento del contenido de carbono crece la dureza de las aleaciones. Las aleaciones de hierro y carbono en las cuales el contenido de carbono no supera el 2.14%.

Según el contenido de carbono se distinguen los *aceros hipoeutectoides* (con el contenido de **C** del 0.03 al 0.8%), *eutectoides* (con un contenido de **C** del 0.8%) e *hipereutectoides* (con un contenido del 0.8 al 2.14%).

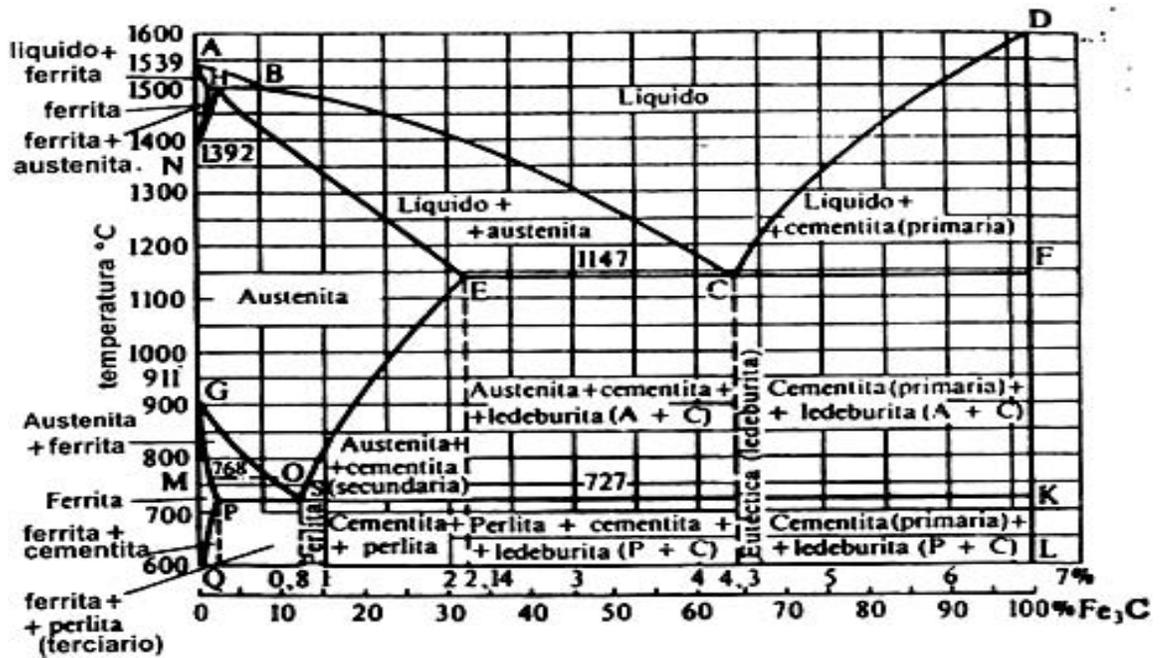


Fig. 4-12. Diagrama hierro-carbono.

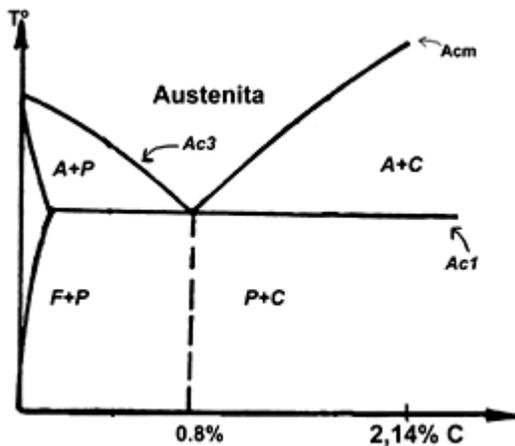


Fig. 4-13. Diagrama hierro-carbono simplificado, en la zona de acero.

La estructura del *acero hipoeutectoide* consta de *ferrita* y *perlita*. El *acero eutectoide* tiene la estructura de la *perlita*. La estructura de los aceros *hipereutectoides* constituye *perlita* y *cementita* (secundaria). Para obtener buenas propiedades mecánicas después del temple la estructura del *acero hipereutectoides* recocido debe ser *perlita* granular.

Para los aceros hipoeutectoides se admite que todo el carbono se halla en la *perlita* (0.8% de C).

Las aleaciones de hierro-carbono que contienen mas de un 2.14% de carbono reciben el nombre de fundiciones.

De acuerdo al diagrama del estado hierro-carbono las fundiciones blancas pueden ser hipoeutecticas ( $C < 4.3\%$ ), eutecticas ( $C = 4.3\%$ ) e hipereutecticas ( $C > 4.3\%$ ). La estructura de las fundiciones blancas se caracteriza por la presencia de *ledeburitas*. La *ledeburita* es una mezcla de austenita y cementita. La *ledeburita* se forma cuando la solución líquida (SL) de composición constante (4.3%) cristaliza a la temperatura de 1147°C.

A continuación se muestra una tabla resumen de los componentes estructurales de la mezcla hierro carbono calentado y enfriado lentamente.

Estructura	definición	Condición de la formación	Temperaturas de estable, °C	Propiedades físicas	Dureza Brinell, <b>HB</b>
<i>Austenita</i>	Solución sólida de carbono y otros elementos en hierro gamma. Contenido de carbón hasta 2.14%	Calentando sobre puntos críticos	Sobre Ac3, Ac <sub>m</sub> y Ac1	Blando, amagnético, maleable. Alta resistencia eléctrica	170-220
<i>Ferrita</i>	Solución sólida de carbono y otros elementos en hierro -alfa. Contenido de carbono sobre el 0.04%	Separado de la austenita por lento enfriamiento del acero hipoeutectoide bajo Ar3	Bajo Ac1	Blando, muy maleable, magnético	60-100
<i>Cementita</i>	Combinación química de hierro y carbono. Carburo de hierro Fe <sub>3</sub> C, contiene 6.67% de carbón.	Separado por soluciones líquida y sólida en enfriamiento lento.	Bajo Ac1	Duro, frágil, Magnético hasta 210 °C en calentamiento sobre 210° C se convierte en amagnético.	820
<i>perlita</i>	Mezcla mecánica de eutectoide de cementita y ferrita.	Formado por el decantado de la austenita	Bajo 727	Duro y resistente que la ferrita, pero menos dúctil. magnética	160-700

Tabla N° 4.2. Resumen de los componentes estructurales del diagrama hierro-carbono.

Es útil mostrar una tabla donde se señala y describen los cambios de estructuras o fases, y en especial la designación de los puntos críticos los cuales serán muy citados en el desarrollo de este manual.

Líneas de transformación	Temp. de transformación°C	Clase de transformación	Designación de los puntos críticos	
			En calentamiento	En enfriamiento
<b>PSK</b>	727	Transformación de perlita a austenita. Transformación de austenita a perlita.	<b>Ac1</b>	<b>Ar1</b>
<b>MO</b>	768	Pérdida del magnetismo para los aceros que contienen aproximadamente hasta 0.5% de carbón.	<b>Ac2</b>	<b>Ar2</b>
<b>GOS</b>	911-727	El termino de la disolución de ferrita en austenita en aceros hipoeutectoides. El comienzo de la separación de ferrita desde la austenita en aceros hipoeutectoides.	<b>Ac3</b>	<b>Ar3</b>
<b>SE</b>	727-1147	El termino de la disolución de cementita en austenita en los aceros hipereutectoides. El comienzo de la separación de la cementita desde la austenita en aceros hipereutectoides.	<b>Ac<sub>m</sub></b>	<b>Ar<sub>m</sub></b>
<b>IE</b>		El comienzo de la fusión del hierro calentado. El fin de la solidificación de acero enfriado.		
<b>ECF</b>	1147	El comienzo de la fusión de la parte de hierro en el calentamiento. El termino de la solidificación de la parte de hierro fundido en el enfriamiento.	– –	
<b>ABCD</b>	-	El termino de la fusión de acero y del hierro fundido. El comienzo de la solidificación del acero de y el hierro fundido en el enfriamiento.	–	–

Tabla N° 4.3. Puntos críticos del diagrama hierro-carbono.

## 4.2. Crecimiento de los granos de la austenita

Para lograr la fase o estructura *austenítica* se puede por medio de dos procesos, uno por un *calentamiento continuo* y el otro por un proceso *isotérmico*. El proceso de calentamiento continuo será el detallado en este manual, ya que los tratamientos isotérmicos no serán parte de este trabajo.

Con el calentamiento continuo, en los aceros hipoeutectoides al sobrepasar el punto crítico **Ac1** (727-732°C), comienza la transformación estructural de la *perlita* a *austenita*, junto con el aumento de la temperatura del calentamiento no solo se produce un cambio de fase (estructura). También se produce cambio (de tamaño) en los granos(o cristales). En un principio al sobrepasar el punto crítico **Ac1** comienza una disminución del tamaño de los granos (recristalización), luego al sobrepasar el punto crítico **Ac3** se produce el menor tamaño de los granos, un afinamiento máximo para luego comenzar a aumentar el tamaño de los granos, como se puede observar en la figura 4-14.

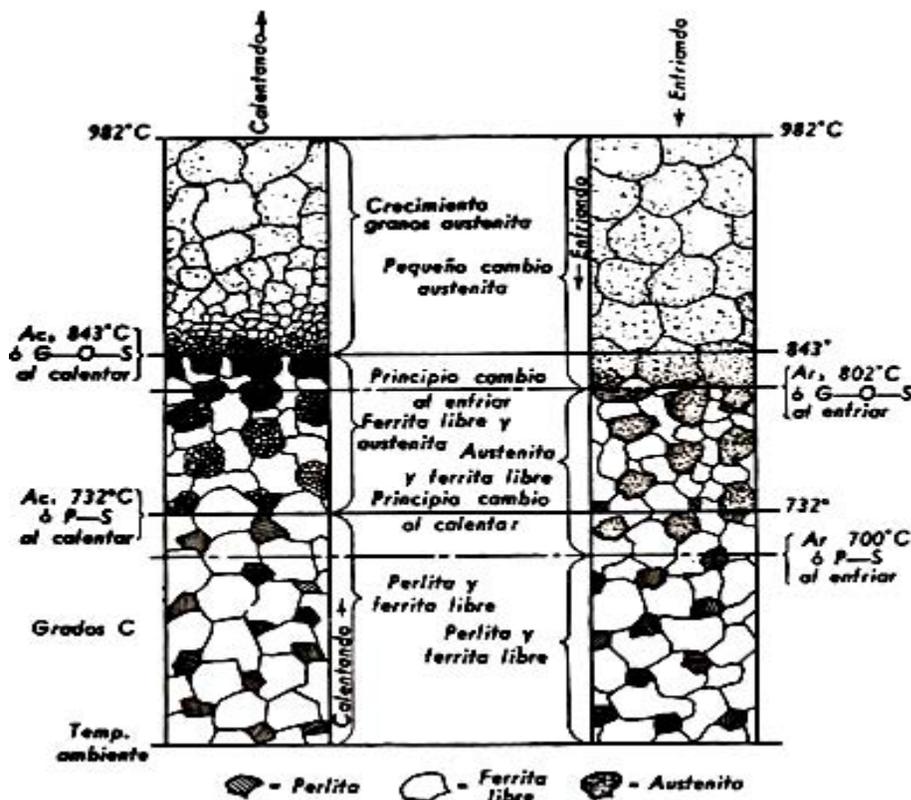


Fig. 4-14. Cambios en la estructura del grano durante el calentamiento y enfriamiento de un acero con 0.25 % de carbono.

Este fenómeno es relevante debido a que al detener el calentamiento y comenzar el enfriamiento, ya sea brusco o paulatino el tamaño de los granos se mantendrá a pesar del cambio de estructura, como lo demuestra el gráfico de la figura 4-15.

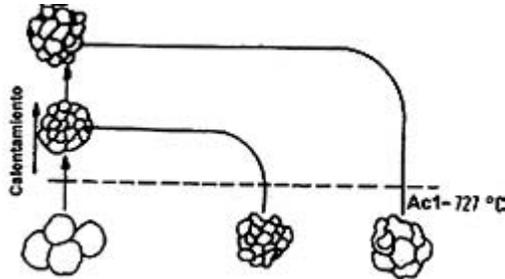


Fig. 4-15. Gráfico que muestra la estabilidad a temperatura ambiente del grano alcanzado durante el calentamiento de un acero eutectoide a pesar de producir un cambio físico durante su enfriamiento.

El tamaño o las dimensiones de los granos determinan mucho las propiedades mecánicas y la calidad del acero. Con el aumento de las dimensiones del grano las características estáticas ( $S_{ut}$ ,  $S_y$ ) no se ven modificadas, pero las dinámicas ( $a_r$ ,  $a_k$ ) se ven disminuidas bruscamente.

El aumento de las dimensiones del grano conduce al desplazamiento de la barrera de la fragilidad en frío a zonas de temperaturas más altas. Cuando existen dimensiones determinadas del grano, el acero puede ser frágil en frío a la temperatura ambiente como se puede ver en la figura 4-16.

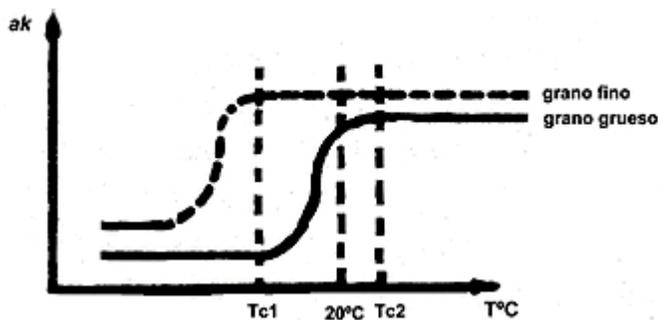


Fig. 4-16. Esquema de la dependencia de la resiliencia (tenacidad) de la temperatura y la dimensión del grano del acero.

El tamaño y el crecimiento del grano de austenita, no solo depende de la temperatura de calentamiento, existiendo otros factores:

- El tiempo de permanencia.
- El contenido de carbono.
- La elaboración del acero.

El mantenimiento o la permanencia de la temperatura por un tiempo prolongado ocasionan el crecimiento de los granos en la fase austenítica (Figura 4-17).

El contenido de carbono determina la temperatura del comienzo del crecimiento de los granos. Para los aceros hipoeutectoides sobre el punto crítico **Ac3** ocurre un aumento de las dimensiones de los granos, en los aceros hipereutectoides a las temperaturas superiores al punto crítico **Ac1** no se producen aumentos del tamaño de los granos, ya que existe un exceso de cementita situada a los bordes de los granos que impide mecánicamente el crecimiento del grano de austenita. Cuando el calentamiento sobrepasa el punto crítico **Ac<sub>m</sub>** el crecimiento suele ocurrir.

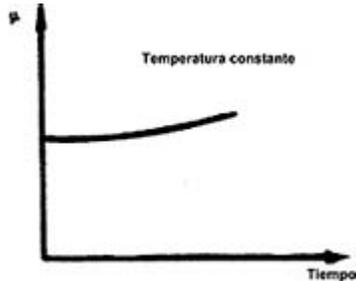


Fig. 4-17. Esquema del crecimiento del grano de austenita en dependencia del tiempo de permanencia.

El tamaño del grano de un acero, también depende del proceso con que haya sido elaborado. Un acero en estado perlítico, de un determinado tamaño, pasará aun estado austenítico con un grano de tamaño similar, como se puede apreciar en la figura 4-18.

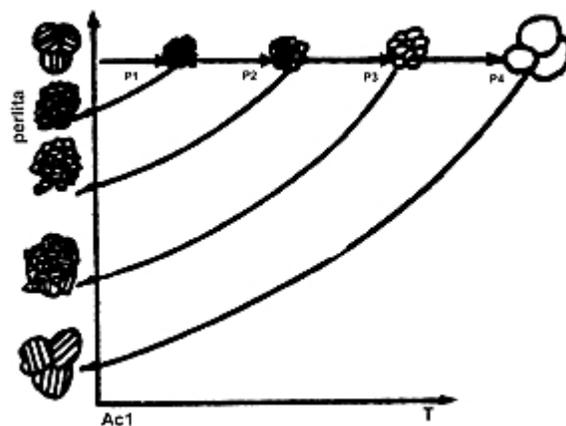


Fig. 4-18. Esquema de la dependencia del tamaño del grano de austenita y por tanto, el de perlita durante el calentamiento del acero.

## CAPITULO V

### Tratamientos Térmicos del Acero

#### 5.1. Definición

Los tratamientos térmicos consisten en *calentar* y *mantener* a temperaturas determinadas, por un cierto periodo de tiempo las piezas del metal a tratar, y luego se deben *enfriar* de acuerdo al propósito que se requiera conseguir. El objeto de los tratamientos térmico es el alterar parcialmente o totalmente las propiedades y características de la pieza o herramienta de acero, para lograr hacerlas mas adecuadas para ciertas aplicaciones.

Las propiedades de todos los aceros al carbono se pueden modificar por medio de un tratamiento térmico. Para lograr modificar o mejorar las propiedades, debemos modificar la estructura interna (microestructura), que se logra por medio de los tratamientos térmicos. Las propiedades modificadas son: *mecánicas, físicas, químicas y estructurales*.

El proceso de los tratamientos térmicos se puede dividir en tres periodos o etapas, primero *el calentamiento*; segundo, *la permanencia o mantenimiento*; y tercero el *enfriamiento* y se describe por los siguientes parámetros:

- A. Velocidad de calentamiento.
- B. Temperatura de calentamiento o de tratamiento, es decir, la temperatura máxima hasta la que ha de ser calentado el metal.
- C. Tiempo de permanencia (mantenimiento) a la temperatura del calentamiento.
- D. Velocidad de enfriamiento.

El *calentamiento* consiste en llevar la pieza a tratar desde la temperatura ambiente a la temperatura del tratamiento o calentamiento, lo que se logra en cierto tiempo (tiempo de calentamiento). Una vez alcanza la temperatura de calentamiento es necesario la *permanencia o mantenimiento* para asegurar que la pieza se caliente totalmente a la temperatura del tratamiento. Posteriormente corresponde el enfriamiento, que es el inverso al calentamiento, el cual consiste en reducir la temperatura de la pieza, a una velocidad (temperatura/tiempo) de acuerdo al tipo de tratamiento. Los procesos o periodos de los tratamientos térmicos comunes gráficamente se representan en la figura 5-19.

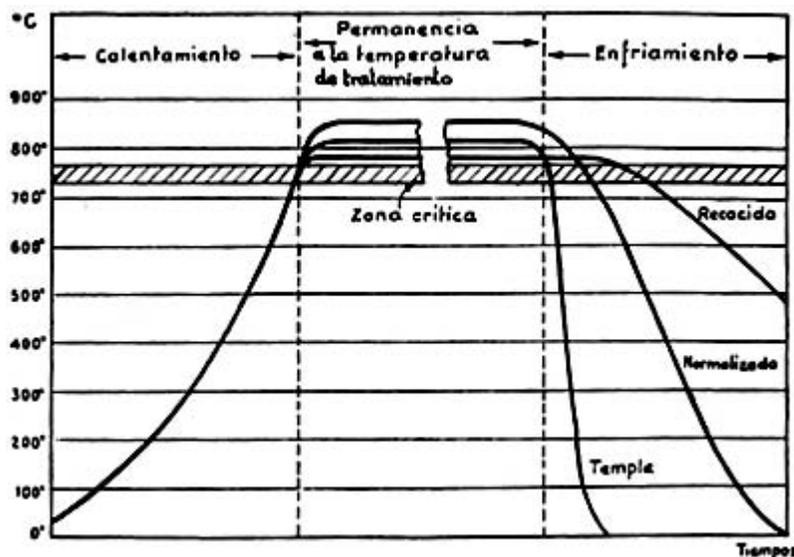


Fig. 5-19. Representación esquemática del recocido de regeneración, normalizado y temple de un acero.

Los tratamientos térmicos, según el medio donde se realicen clasifican en:

- a- Tratamientos térmicos.
- b- Tratamientos termo-químicos.

a- Los tratamientos térmicos tienen el objetivo de modificar las propiedades físicas y mecánicas sin alterar la composición química del acero tratado.

Hay diversos tratamientos térmicos, los más destacados son:

- Recocido.
- Temple.
- Revenido.
- Normalizado.
- Bonificado.

En este manual se estudiarán los principios y técnicas para la aplicación del *temple directo*, *recocido* y *revenido*, debido a que estos tratamientos son fáciles de aplicar y con resultados satisfactorios. Los cuales pueden ser aplicados en diversas áreas de la metal-mecánica, como: maestranzas, tornerías y talleres en general.

b- Como tratamiento termo-químico se definen a las operaciones que además de una acción térmica se produce una alteración química, por la incorporación de uno o más elementos al material que se trabaja. Tenemos como los principales tratamientos químicos a:

- Cementación.

- Nitruración.
- Sherardización.
- Calorización.

## 5.2. Temple Directo

Este tratamiento térmico es conocido también como templado, o endurecimiento. Como todos los tratamientos térmicos que serán vistos en este manual, el temple se aplica en tres operaciones, *la primera* consiste en calentar el acero a una temperatura por encima del *punto crítico superior*, luego mantener por un periodo de tiempo a la temperatura de calentamiento y posteriormente se le debe *enfriar bruscamente* en un medio de enfriamiento apropiado hasta una temperatura ambiente.

El objeto de la primera y segunda operación, que consiste en calentar y mantener al acero a una temperatura determinada por encima del punto crítico superior (Según composición de **C**), es para transformar el acero en una fase de estructura sólida denominada “*austenita*” a un 100%.

El objeto de la tercera operación, el de *enfriar bruscamente* o *sobrenfriar*, desde la fase austenítica ya que así se transforma rápidamente en una fase de estructura dura y relativamente frágil denominada “*Martensita*”. La *martensita* es una estructura que es relativamente dura, y en aceros de elevado contenido de carbono es frágil. Por medio de esta operación o técnica se transforma desde un acero *plástico y blando* en otro *frágil y duro*. Entonces para templar el acero, se es necesario llegar a dos condiciones: La primera, se debe llegar a la fase o condición *austenítica*, segundo debe proceder a enfriar bruscamente, para suprimir la precipitación, y lograr una fase de estructura tetragonal centrada en el cuerpo, llamada *martensita alfa*.

### 5.2.1. La martensita

La martensita de los aceros al carbono es una fase metaestable formada por una solución sólida intersticial sobresaturada de cementita en hierro tetragonal centrado en el cuerpo. La martensita formada por el temple se le denomina *martensita alfa*.

A medida que se produce el enfriamiento, la temperatura a la que comienza la transformación de *austenita* a *martensita* se denomina temperatura de inicio de martensita, **Mi**. la temperatura a la cual la transformación termina se denomina temperatura **Mf**. La temperatura de *Mi* para las aleaciones de hierro-carbono disminuye a medida que aumenta el porcentaje en peso de carbono en estas aleaciones.

Bajo el microscopio la martensita se caracteriza por tener una estructura en forma de agujas entrelazadas en forma de  $v$  con un ángulo de  $60^\circ$  de separación, como se observa en la figura 5-20. Las agujas son mas finas a medida que el grado de subenfriamiento aumenta, transmitiendo mejores propiedades mecánicas al acero.



Fig. 5-20. Imagen microscópica (X 1000) de agujas de martensita sobre un fondo de austenita.

Entonces para lograr la fase martensítica se debe primeramente llegar a la fase *austenítica* y luego *enfriar bruscamente*. La estructura *martensítica* perfecta y con máxima dureza en los *aceros hipoeutectoides* solo se puede conseguir cuando al iniciarse el enfriamiento su estructura es totalmente *austenítica*, por ser el único constituyente capaz de transformarse en *martensita*.

### 5.2.2. Objeto del Temple

El objeto principal del temple en los aceros al carbono, es mejorar ciertas propiedades mecánicas, como el aumento de la resistencia a la tracción, dureza y la resistencia al desgaste, para así poder dar una mayor gama de aplicaciones al acero al carbono. Podemos detallar los cambios producidos según las diferentes propiedades:

#### 1.-Propiedades Mecánicas:

a) Aumenta la carga de rotura, el límite elástico ( $S_y$ ), la dureza y resistencia al desgaste.

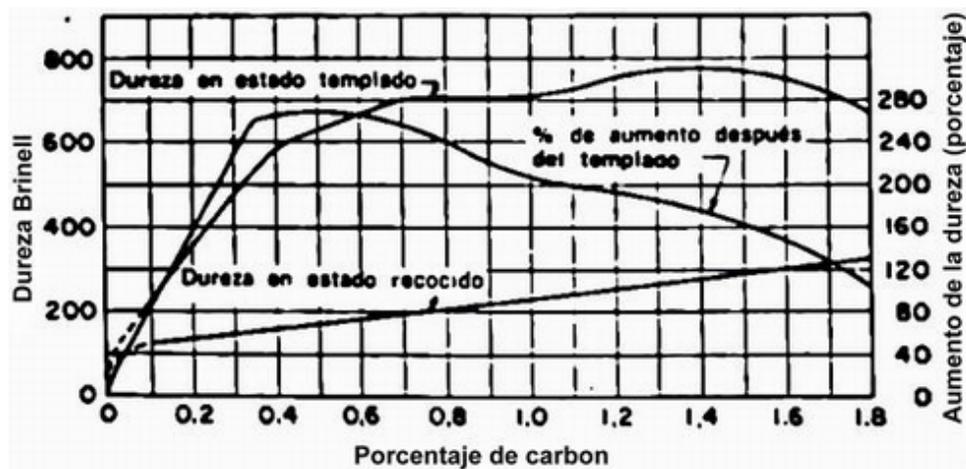


Fig. 5-21. Efecto del contenido de carbono sobre la dureza obtenible por un templeado acero un recocido.

**b)** Disminuye el alargamiento, la restricción y la resistencia al impacto (pierde tenacidad).

**2.-Propiedades Físicas:** las propiedades físicas se modifican o alteran de la siguiente forma:

**a) Densidad:** en los aceros aumenta de volumen, por lo que la densidad disminuye.

**b) Resistividad:** la resistencia eléctrica del acero aumenta.

**c) Magnetismo:** la intensidad magnética del acero disminuye.

**d) Sonoridad:** la sonoridad del acero disminuye luego del temple.

**3.-Propiedades Químicas:** los aceros templados tienen mayor resistencia al ataque de los ácidos.

### **5.2.3. Factores del Temple sobre la microestructura y las propiedades mecánicas del acero al carbono**

➤ **Porcentaje de Carbono:** El carbono desempeña dos papeles en el templeado del acero:

*Primero*, facilita el sobreenfriamiento de la austenita; por lo tanto, hace más fácil el templeado. Aparentemente el carbono actúa como un retardador, disminuyendo la velocidad de transformación.

*Segundo:* El carbono presente en la martensita recién nacida aumenta la dureza; de hecho, el carbono, disuelto o parcialmente precipitado en forma de cementita, es el factor más importante que hace que la *martensita* sea dura. En la figura 5-21 se muestra el efecto del carbono sobre la dureza de los aceros al carbono tanto templados como *perlítico* normal. Un hecho interesante es que la dureza máxima obtenida en el acero haciéndolo martensítico nunca excede de una dureza *Rockwell* de *C67* y una *Brinell* de *745*, independientemente del contenido de carbono y aleaciones especiales. Aumentando el contenido de carbono en más de 0.85% se aumenta la dureza del acero tanto en el *estado perlítico* como en el *martensítico*, pero, al mismo tiempo, un contenido elevado de carbono aumenta la velocidad de transformación de la austenita en perlita y, por lo tanto, hace más difícil endurecer este acero y volverlo completamente *martensítico*.

De un acero de composición *eutectoide* debería teóricamente resultar de un 100 % de martensita. De 0 a alrededor de 0.3 % de contenido de carbono, el acero es endurecible, pero con velocidades de enfriamiento extremadamente altas (15.000 °C/s) que no son

prácticas para tratamientos térmicos normales. Por lo tanto, se trata evitar temple el acero que contenga menos del 0.3 % de carbono. A medida que el contenido de carbono aumenta del 0.3 % al 0.7 % la dureza obtenible aumenta notoriamente. Por encima del 0.7 % la dureza obtenible aumenta solo ligeramente con el incremento de contenido de carbono. Por encima de la composición *eutectoide* el acero endurecido está compuesto por *martensita* y *cementita*; el hecho de que la cementita sea dura, es la razón por la cual no disminuye la dureza total, como en el caso de aceros hipoeutectoides donde la ferrita, que es blanda, está en exceso.

Para la mayoría de los propósitos donde el acero debe ser endurecido, se usa un contenido de carbono del 0.35 al 0.65 %. Esto produce alta dureza y al mismo tiempo da una buena tenacidad, la cual se pierde si se usa acero con alto contenido de carbono. Los aceros templados de alto contenido de carbono se utilizan principalmente en herramientas, en donde es necesario contar con una gran dureza y resistencia al desgaste.

➤ **Temperatura de temple:** La temperatura de temple en los aceros depende de la estructura de equilibrio (*hipoeutectoide*, *eutectoide* e *hipereutectoide*), la cual a su vez está relacionada con el contenido de carbono <0.8% C para los *hipoeutectoides*, 0.8% C para los *eutectoides*, >0.8 y <2.2% C para los *hipereutectoides*.

El valor de la temperatura de temple está determinado por aquella para la cual el acero alcanza el estado de máxima capacidad de temple y una estructura lo más fina posible.

La temperatura de temple “**Tt**” para los aceros al carbono está dada por la siguiente expresión general:

$$\mathbf{Tt: Tc + (\text{rango de temperatura})} \quad (5.6a)$$

En donde **Tc** la temperatura del punto crítico

Para los aceros *hipoeutectoides* les corresponde la temperatura del punto crítico **Ac3**. Por lo tanto la expresión queda de la siguiente forma:

$$\mathbf{Tt: Ac3 + (30 \text{ a } 50^\circ \text{ C})} \quad (5.6b)$$

Para los aceros *eutectoides* la Temperatura (**Tc**) corresponde a la designación del punto crítico **Ac1** más un rango de temperatura algo superior que los *hipoeutectoides*.

$$\mathbf{Tt: Ac1 + (50 \text{ a } 70^\circ \text{ C})} \quad (5.6c)$$

Para los aceros *hipereutectoides*  $T_c$  corresponde a la designación del *punto crítico*  $Ac1$  más una temperatura similar que los *eutectoides*.

$$T_t: Ac1 + (50 \text{ a } 70^\circ \text{ C}) \quad (5.6d)$$

Del diagrama de la figura 5-22, se ejemplificara lo que ocurre al calentar a diversas temperaturas un acero *hipoeutectoide* e *hipereutectoide* en donde quedara claro que es necesario llegar a la *temperatura de temple*, ya que así se logra obtener una estructura *austenítica* totalmente, además con un grano muy fino. Y si no se logra esta condición (*austenítica*) no se obtendrá un temple perfecto. Ya que la austenita es el único constituyente capaz de transformarse en *martensita*.

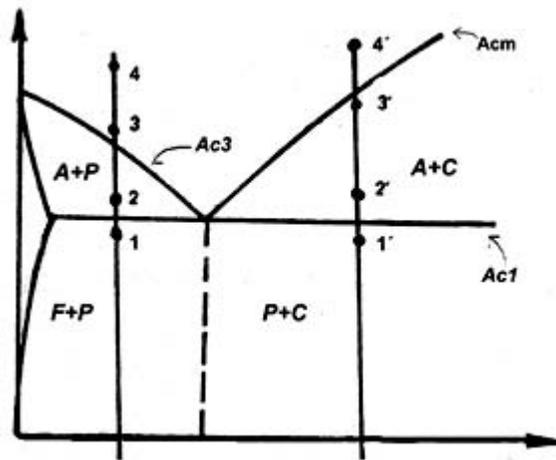


Fig. 5-22. Diagrama hierro-carbono.

Si al acero *hipoeutectoide*, se le imprime una temperatura inferior a  $Ac1$  (Punto 1, figura 5-22) y luego se temple, la dureza se mantendrá inalterable, ya que no habrá cambios o transformaciones de fase, y la estructura será la misma o sea *perlita + ferrita* ( $F+P$ ).

Al calentar el acero hipoeutectoide hasta una temperatura superior  $Ac1$  (punto 2), se obtiene una estructura *austenita + ferrita* ( $A+F$ ), con lo cual al enfriar rápidamente se la austenita se transforma en *martensita* y por lo tanto el acero obtiene una estructura compuesta de *ferrita + martensita* ( $F+M$ ), la cual es una estructura muy indeseable, ya que la existencia de ferrita en el acero templado baja su dureza y empeora sus propiedades mecánicas después del revenido.

Por eso no se debe temprar nunca un acero hipoeutectoide ( $<0.8 \text{ C}$ ) entre los puntos críticos  $Ac1$  y  $Ac3$ .

Al aumentar la temperatura superior del punto crítico **Ac3** (punto 3), la estructura se encontrara transformada en 100% austenítica, con un grano de gran fineza la cual al ser enfriada bruscamente deberá transformarse casi totalmente en martensita, la estructura metaestable que le otorga al acero una dureza máxima, además de la martensita habrá una pequeña cantidad de austenita residual.

Al otorgarle mayor calentamiento (punto 4), o sea al sobrepasar la temperatura de **Ac3** + (70 a 100°C), no es aceptable, ya que la austenita presentara un grano de tamaño elevado y la martensita posteriormente obtenida será formada por agujas gruesas. Al mismo tiempo obtendrá una martensita con mayor cantidad de austenita retenida, también conocida como austenita residual, con lo cual las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción y a la penetración serán disminuidas.

Por lo tanto la temperatura óptima de calentamiento, también conocida como temperatura de temple para los *aceros hipoeutectoides* es la temperatura de **Ac3** + (30 a 50°C).

Analizaremos a los aceros hipereutectoides. Al propinarles una temperatura inferior a **Ac1** (punto 1'), y luego enfriar enérgicamente. Al igual que los *hipoeutectoides*, no ocurre cambio alguno de estructura, y por lo tanto ningún cambio en las propiedades.

Posteriormente si calentamos al acero hasta la temperatura **Ac1** + (50 a 70°C), en el punto 2' de la figura 5-22, se obtendrá una estructura de austenita + cementita, la cual después del temple se transformara en una estructura compuesta en martensita (M)+ cementita(C)+ austenita (A) residual .La austenita residual en cantidad reducida.

Al calentarse el acero hasta el punto 3', es decir cuando el calentamiento llegue a la temperatura de **Ac1**+100° C, se obtendrá una estructura similar a la anteriormente señalada. Después del temple a esta temperatura, la austenita residual será mayor que el caso anterior.

Al seguir calentando el acero *hipereutectoide* hasta una temperatura de **Ac<sub>m</sub>** +( 20 a 30°C), el punto 4' en el la figura 5-22 se obtendrá luego del temple una estructura martensítica de agujas gruesas y una gran cantidad de austenita residual.

De acuerdo a lo dicho anteriormente, la temperatura optima de temple para los aceros *hipereutectoides* es **Ac1** + (50 a 70).

Las temperaturas óptimas recomendadas para el templeado de los aceros al carbono, se señalan en la tabla 5.4.

Composición % de carbono	Temperatura °C	
0.10	925°	<i>Austenización completa</i>
0.20	900°	
0.30	870°	
0.40	840°	
0.50	830°	
0.60	810°	
0.70	780°	
0.80	770°	
0.90	770°	
1.00	760°	<i>Austenización incompleta</i>
1.20	760°	
1.40	760°	

Tabla N° 5.4. Temperaturas óptimas de temple.

**-Velocidad de Enfriamiento:** Existe un solo camino para endurecer completamente al acero, es el de enfriar rápidamente *la austenita*.

La tasa de enfriamiento se le denomina velocidad de enfriamiento, la que se expresa en la siguiente ecuación:

$$V_{\text{enfriamiento}} = \frac{t_{\text{pieza}} - t_{\text{medio de enfriamiento}}}{\tau_{\text{enfriamiento}}} \quad (5.7)$$

Donde:  $t$  es la temperatura

$\tau$  es el tiempo

*La velocidad de enfriamiento es el factor principal en el templeado.* De este factor depende la estructura y las características del acero templeado. En la figura 5-23 se puede

observar con claridad la relación que existe entre la velocidad de enfriamiento con la estructura y la dureza.

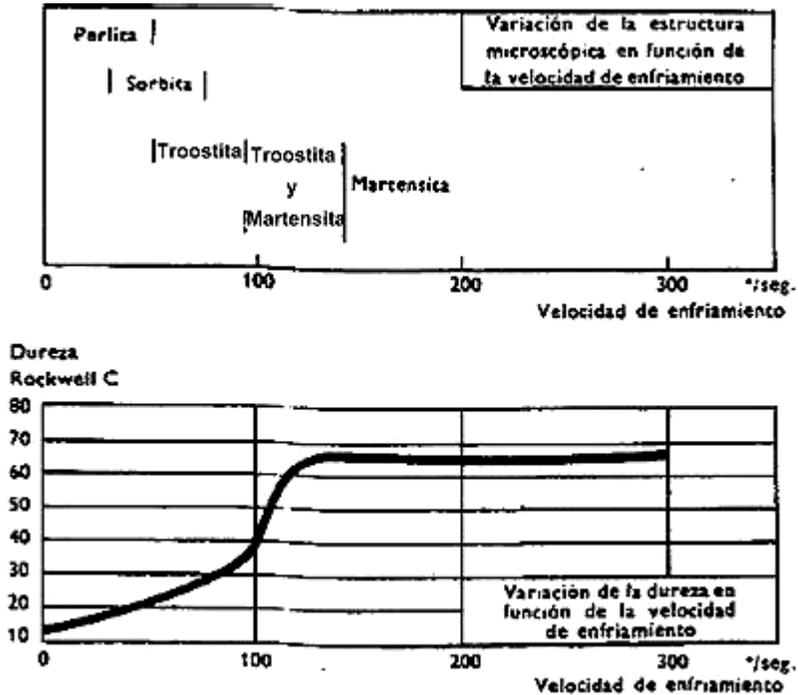


Fig. 5-23. Efecto de la velocidad de enfriamiento sobre la microestructura y la dureza.

Existe una velocidad denominada *velocidad crítica de temple* o también denominada *velocidad de enfriamiento crítica*, la que conduce y produce a una *estructura martensítica*. Al lograr esta estructura se dice que el temple es completo o total.

Si se realiza un enfriamiento a una velocidad menor a la crítica se obtendrá estructuras intermedias y mixtas.

En la figura 5-24 se puede observar con mayor claridad las estructuras que se forman con velocidades inferiores a la crítica.

A una velocidad de enfriamiento menor que la crítica y mayor que  $V_3$ , se obtendrá una estructura compuesta de *martensita de temple*, *troostita de temple*, y *austenita residual*, resultado un *temple incompleto*. Con una velocidad  $V_3$  se obtendrá *troostita de temple*, luego con una velocidad inferior  $V_2$  la estructura resultante será *sorbita de temple* y posteriormente con  $V_1$  resultara una estructura de *perlita fina* y luego a una velocidad inferior a  $V_1$  una *perlita gruesa*. Al igualar y superar la velocidad crítica de enfriamiento  $V_{cr}$ , el acero adquiere una estructura *martensítica* y *austenita residual*.

En la práctica no se puede obtener una estructura 100% martensítica, a pesar de propinarle una velocidad igual o superior a la crítica, por lo que la martensita siempre estará mezclada con un cierto porcentaje de austenita residual o retenida.

En la figura 5-24, también se puede observar que a medida que aumenta progresivamente la velocidad de enfriamiento, la temperatura de transformación de la *austenita equilibrada* a *austenita sobreenfriada* es cada vez mas baja.

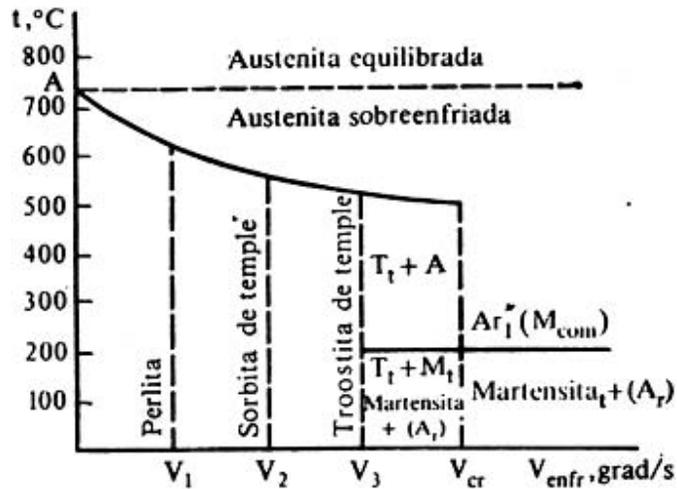


Fig. 5-24. Diagrama de transformación de la austenita cuando de un acero con 0.8% de C se enfría continuamente.

#### 5.2.4. Relación en las transformaciones isotérmica y la austenítica durante el enfriamiento continuo.

La manera descrita anteriormente, para poder obtener una estructura martensítica, es por medio de un enfriamiento continuo desde la fase austenita estable (equilibrada).

Existe otro procedimiento, conocido como transformación isotérmica, en donde se obtienen unas curvas, o también conocidas como diagrama de **T-T-T** (tiempo, temperatura y transformación). Las que se determinan registrando el proceso de transformación de la austenita a temperatura constante. Los ensayos se realizan con una serie de probetas de acero, las que se calientan a una temperatura crítica de superior a **Ac3** o **Acm**, para luego sumergirlas a un baño de sales o de metal fundidos y a continuación después de un determinado tiempo se sacan y se enfrían enérgicamente. Luego por medio de la observación con microscopio se puede apreciar la transformación sucedida. Las curvas de

enfriamiento S, también conocidas como curvas o diagrama de enfriamiento T-T-T, se pueden ver en la figura 5-25.

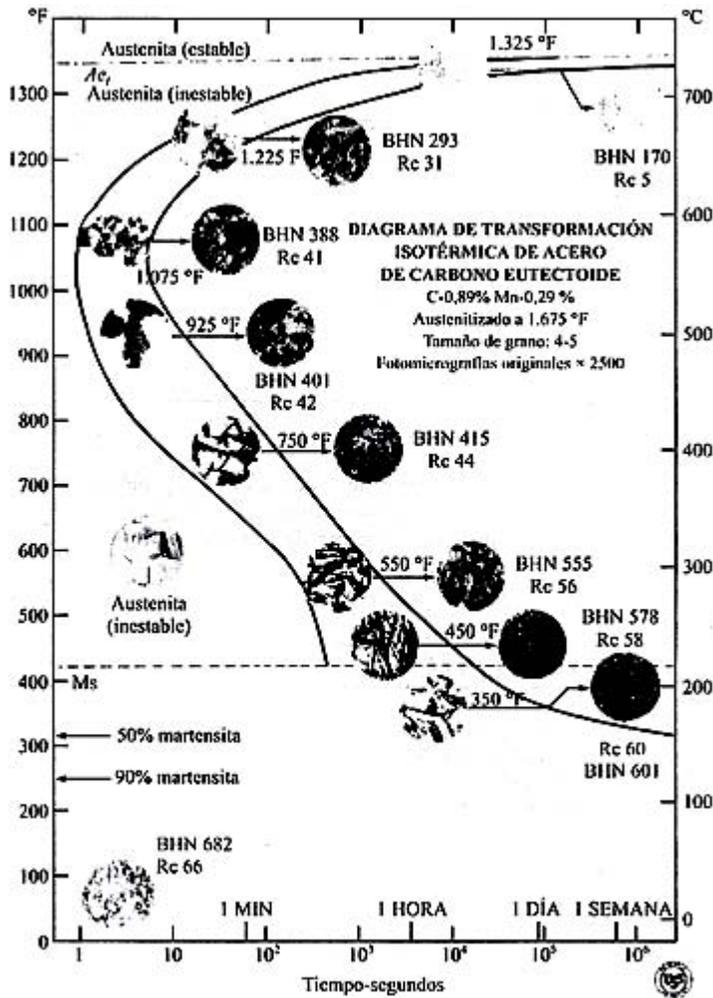


Fig. 5-25. Diagrama Temperatura-Tiempo- Transformación.

Existe una estrecha relación entre la transformación isotérmica y la transformación de la austenita por medio de un enfriamiento continuo. Esta relación se revela al superponer las curvas de enfriamiento continuo sobre el diagrama de T-T-T, obteniéndose un diagrama de la figura 5-26.

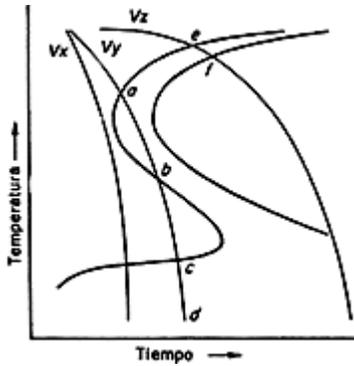


Fig. 5-26. Curvas o diagramas de velocidad de enfriamiento superpuestas a la curva T-T-T.

La curva de enfriamiento  $V_x$  representa una alta velocidad de temple. Como esta curva pasa por la izquierda del codo de la curva S, no comienza ninguna transformación hasta que se alcanza una temperatura baja. A esta temperatura de transformación el producto final es martensita. Si la velocidad de enfriamiento es  $V_y$  comienza en  $a$  un primer periodo de transformación y termina en  $b$ , y un segundo periodo comienza en  $c$  y termina en  $d$ . De  $a$  hacia  $b$  se formara perlita fina. Durante el intervalo de  $c$  a  $d$  la austenita remanente y aun no transformada se transforma en martensita. El resultado es una estructura mixta de perlita fina y martensita.

La curva  $V_z$  representa un enfriamiento lento, con transformación de austenita entre  $e$  y  $f$ . el producto final correspondiente al punto  $f$ , es perlita gruesa.

Durante el enfriamiento con velocidades iguales o mayores que la crítica ( $V_x$  de la figura 5-26) obtendremos una estructura martensítica. La *velocidad crítica* de temple se determina gráficamente como la tangente a la curva de inicio de transformación austenítica.

Las estructura que se forma de acuerdo a la velocidad de enfriamiento, tienen valores de dureza promedio determinas, las que se muestran en tabla 5.5. (Zúev 1986, Gualiev 1978)

Denominación de la estructura	Dureza Vickers HV, MPa	Dureza Brinell HB, Mpa
Ferrita	500...900	600...900
Austenita	1490...1770	1500...1800
Perlita	1900...2260	1900...2300
Sorbita	2500...3050	2500...3000
Troostita	3610...4850	3500...4500
Mezcla de troostita y Martensita	5510...7460	5000...6000
Martensita	8670...9400	6500...7000
Cementita	11140...12200	8000...8500

Tabla N° 5.5. Durezas de las estructuras del acero.

Los factores que influyen sobre la velocidad de enfriamiento en el acero al carbono son:

- 1.- Medio enfriador.
- 2.- Porcentaje de carbono.
- 3.- Tamaño del grano.
- 4.- Tamaño de la pieza.
- 5.- La temperatura del Temple.

➤ **Medio Enfriador:** Hemos visto que para endurecer al acero completamente, esto con el objeto de formar martensita, se requiere un enfriamiento rápido desde las temperaturas *austeníticas*, por lo que se requiere de un medio de enfriamiento que sobrenfrie la austenita a las proximidades de la temperatura ambiente con independencia de que sea elevada o reducida. Los medios enfriadores empleados en los *aceros* son el *agua*, *aceite* y *aire*, se aplican de acuerdo a cada tipo de *acero*. El *acero al carbono* necesita o requiere de una velocidad de enfriamiento elevada, como la que se obtiene enfriando en agua bruscamente y desde este punto de vista se clasifica como *aceros templados en agua*. Afortunadamente el agua es un medio de temple muy bueno y naturalmente barato, pero presenta defectos

debido a que se evapora fácilmente y es proclive a formar burbujas de aire, y requiere ciertas técnicas para lograr un templado adecuado.

La acción para el agua y para cualquier medio enfriador tiene 3 etapas:

**1.-** La primera etapa ocurre cuando un trozo de acero caliente es sumergido a un baño de líquido y éste, en contacto con el metal caliente se convierte en vapor, el cual envuelve completamente al metal caliente, formando una capa a su alrededor e impidiendo todo contacto con el líquido enfriador. A menos que esta película de vapor se rompa, el enfriamiento del metal caliente tiene lugar por radiación o conducción a través de esta película, dando como resultado una velocidad de enfriamiento relativamente pequeña. Si esta película se mantiene, se conseguirá un endurecimiento o la formación de martensita.

**2.-** La segunda etapa tiene lugar cuando la película formada por el vapor que rodea al metal caliente se rompe y desprende de la superficie del metal caliente y le permite ponerse en contacto con el líquido enfriador. En esta etapa, el líquido enfriador moja las superficies del metal caliente, estalla en vapor y crea una ebullición del baño. En esta etapa el enfriamiento es más rápido, removiéndose gran cantidad de calor. Un antiguo refrán dice de esta etapa “el agua muerde al acero”.

**3.-** La tercera etapa del enfriamiento ocurre cuando el metal caliente se aproxima al punto de ebullición del medio enfriador líquido y el enfriamiento continúa por conducción y convección líquida, dando como resultado una velocidad de enfriamiento pequeña. Sin embargo durante esta etapa del enfriamiento, una velocidad de enfriamiento rápida no es tan necesaria como en las primeras etapas.

La película de vapor formada durante la primera etapa del enfriamiento brusco dificulta el templado del acero. Produce acero blando, zonas blandas, alabeamiento y formación de grietas por el vapor formado. En esta etapa ocurren la gran mayoría de las dificultades comunes en el templado.

El agua pura como medio enfriador es muy usada en el templado del acero al carbono corriente. Con el fin de mejorar la velocidad de enfriamiento para templar el acero al carbono en forma positiva, el agua se mantiene a una temperatura bajo los 27° C (80° F), siendo entre 15 a 20° una temperatura adecuada, además se debe agitar y circular continuamente durante el templado, para mejorar las propiedades refrigerantes. Por medio de una agitación se consigue un enfriamiento más uniforme y rápido. El agregarle al agua

un 10% de *cloruro sódico* y con esto formar una solución al agua (salmuera), origina un medio más energético que el agua pura. La salmuera produce un enfriamiento rápido, uniforme y esta menos afectado por el aumento de la temperatura, pero acentúa la oxidación en las piezas de acero. La soda cáustica en una solución de 3 a un 30%, da buenos resultados en aceros al carbono.

También se suele emplear aceite en el temple de acero al carbono, cuando la pieza a tratar es de una delgada sección transversal. En el aceite se pueden temprar con éxito en *cuchillos, hojas de afeitar y alambres*. El aceite se recomienda como medio enfriador con preferencia al agua siempre que se use para reducir el peligro de agrietamiento, distorsión y tensiones internas. En la tabla 5.6 y 5.7 se muestran diversos medios de enfriamiento para tratamientos térmicos, con dos rangos de temperatura.

Medio de enfriamiento	Temperatura de Ebullición de burbujas de inferior a:	Velocidad de enfriamiento °C/seg	
		600-400°C	≈200°C
Agua 20° C tranquila	400	200	700
Agua 40° C tranquila	350	100	550
Agua 80° C Tranquila	250	30	200
Agua 98.5° C tranquila	200	20	20
Agua 20° circulante	400	350	700
Agua destilada	350	150	700
Agua + 1% de NaCl	500	1200	700
Agua + 10% de NaCl	650	2200	700
Agua + 5 a 10% Emulsión acuosa	300	200	700-800
Aceite mineral 20°C	500	10	10
Aceite mineral 80°C	500	200	10

Tabla N° 5.6. Medios de enfriamiento.

**Nota:** estas características son para las esferas de plata de 20 mm de diámetro.

Medio de enfriamiento	Velocidad de enfriamiento °C/seg	
	650-550°C	300-200°C
Agua jabonosa a 18 °C	30	200
Aceite de transformador	120	25
Aceite de máquina	150	30
Mercurio	500	130
Aire comprimido	30	10
Aire tranquilo	3	1

Tabla N° 5.7. Medios de enfriamiento.

**Nota:** Estas características son para piezas pequeñas.

➤ **Porcentaje de Carbono:** Al ir aumentando el contenido de carbono hasta un 0.90% la velocidad de enfriamiento disminuye, posteriormente sobre 0.9% comienza a aumentar la velocidad de enfriamiento (figura 5-27).

Este aspecto de la curva se conservara si la temperatura del temple para los aceros hipereutectoides superior a **Ac1**, pero inferior a **Ac<sub>m</sub>**. Si la temperatura del temple para los aceros hipereutectoides es superior a **Ac<sub>m</sub>**, entonces con el contenido de carbono disminuirá.

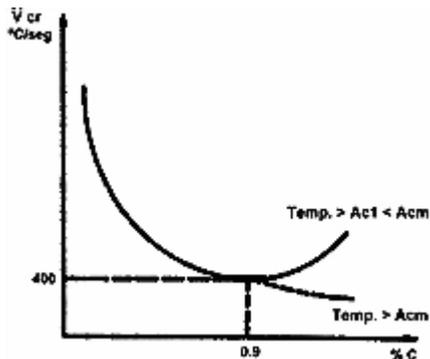


Fig. 5-27. Relación del porcentaje de carbono con la velocidad de enfriamiento.

➤ **Tamaño del grano:** El tamaño del grano influye notoriamente en la velocidad crítica de temple. Esto se explica porque los centros de cristalización surgen solo en los límites del grano de austenita, por eso con el aumento del tamaño de grano la extensión de los límites disminuye, es decir disminuye la cantidad de centros de cristalización y disminuye la velocidad crítica de temple (figura 5-28).

A veces intencionalmente se calientan las piezas de acero, para hacer crecer los granos, y así poder lograr una velocidad crítica de temple menor, por lo tanto se emplea un medio de enfriamiento menos enérgico, para evitar la formación de grietas y simultáneamente se obtienen durezas aceptables.

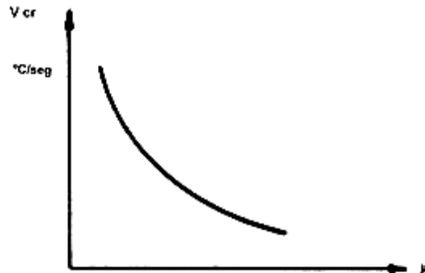


Fig. 5-28. Relación del tamaño de grano con la velocidad de enfriamiento.

➤ **Tamaño de la pieza:** El volumen y espesor de las piezas tiene una notable influencia en el templeado de los aceros en general. Si estudiamos el enfriamiento en agua de un cilindro que ha sido calentado a alta temperatura, fácilmente se comprende que la capa exterior, que esta en contacto directo con el medio de enfriamiento, es la que se enfría rápidamente (ver figura 5-29). Las capas interiores se van enfriando a menor velocidad a medida que se avanza hacia el centro. A medida que aumenta el tamaño de las piezas se va produciendo una disminución la velocidad de enfriamiento de la superficie, y por lo tanto menor también es la velocidad hacia los interiores de la pieza. En la figura 5-30 se puede apreciar con mayor claridad lo señalado.

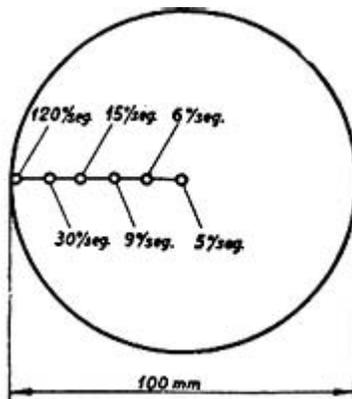


Fig. 5-29. Disminución de la velocidad de enfriamiento desde el exterior al interior.

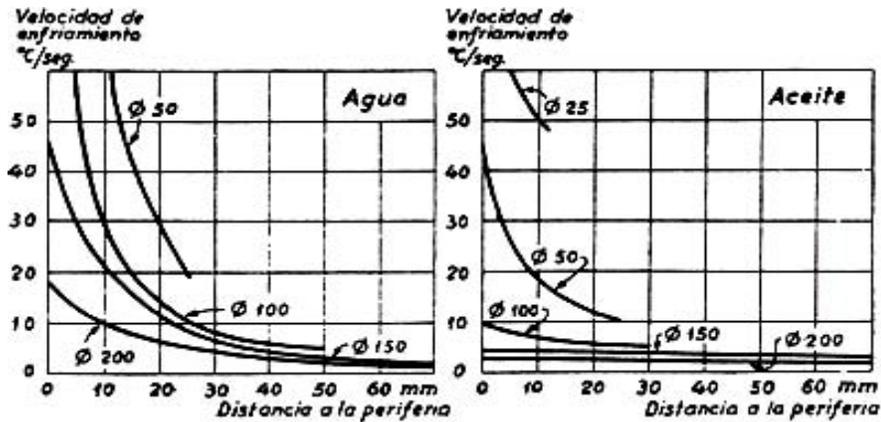


Fig. 5-30. Disminución de la velocidad de enfriamiento desde el exterior al interior, de barras de diferentes diámetros, enfriada en agua y aceite.

- **Temperatura de Temple:** Una temperatura superior a temperatura de temple, ocasiona un aumento de la velocidad crítica de enfriamiento.

### 5. 3. Templabilidad y el Ensayo de Jominy

La templabilidad, también conocida como endurecibilidad o penetración del temple, se define como la propiedad que determina la profundidad y la distribución de la dureza por enfriamiento desde la condición austenítica. También se define como facilidad del acero para desarrollar su máxima dureza, a si mismo el espesor de la capa de martensita que se forma debajo de la superficie templada.

Se dice que un acero tiene buena templabilidad cuando puede ser completamente endurecido con un enfriamiento lento.

Es importante comprender que la característica *de templabilidad* no es lo mismo que la *dureza*. Si templamos una varilla de 100mm de diámetro de acero al carbono de 0.45% de carbono puede hacerse extremadamente duro si se enfría lo suficientemente rápido. Sin embargo la templabilidad de tal acero es mucho mas pobre que un varilla de diámetro similar acero aleado de cromo y vanadio (0.40% **C**, 1% **Cr** y 0.18% **Va**), como se puede observar en la figura 5-31.

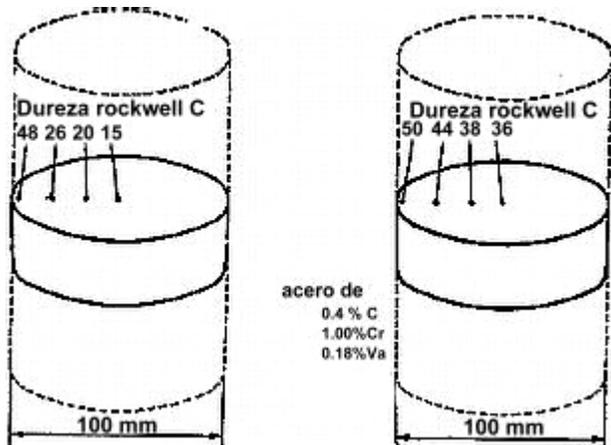


Fig. 5-31. Disminución de la dureza en una barra de acero al carbono y aleado.

La templabilidad influye notablemente en los resultados cuando se ensayan piezas de gran espesor, pero cuando se templen piezas de delgada sección transversal influye muy poco. Es decir que con aceros especiales o de aleación, con el mismo porcentaje de carbono se obtienen características casi idénticas cuando se trata de pequeños diámetros, pero cuando son diámetros mayores las diferencias son notables.

Este es un factor importante, que generalmente no se toma en cuenta, con el resultado de que, frecuentemente se malgasta dinero especificando un *acero aleado* para aplicaciones donde el *acero al carbono* podría endurecerse completamente y cumplir casi con los mismos requisitos en cuanto a las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción, dureza y tenacidad.

La templabilidad o penetración del temple se explica, ya que durante el temple la pieza se enfría más rápido en la superficie y va disminuyendo hacia el centro de la pieza. La templabilidad está estrechamente relacionada con la velocidad de transformación.

La influencia de la velocidad de enfriamiento en la dureza se representa por la curva que tiene un ascenso brusco al cambiar las estructuras de *perlita* en *martensita* (ver figura 5-32).

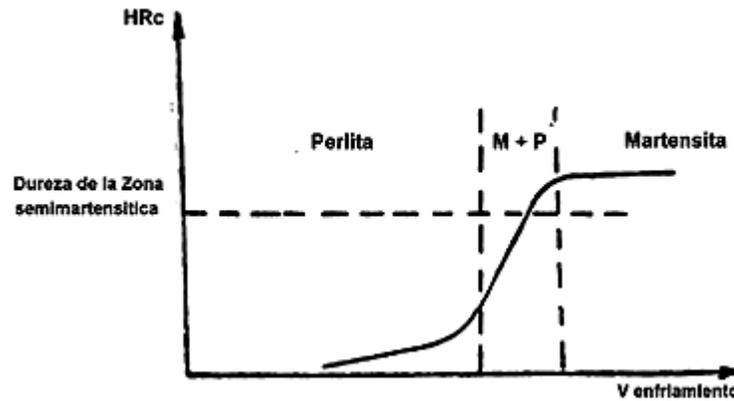


Fig. 5-32. Relación entre la dureza, la estructura y la velocidad de enfriamiento.

La templabilidad del acero se puede determinar midiendo la dureza por la sección transversal de una barra templada. Así se genera las denominadas curvas **U** (ver figura 5-33), para los aceros de baja templabilidad (aceros al carbono).

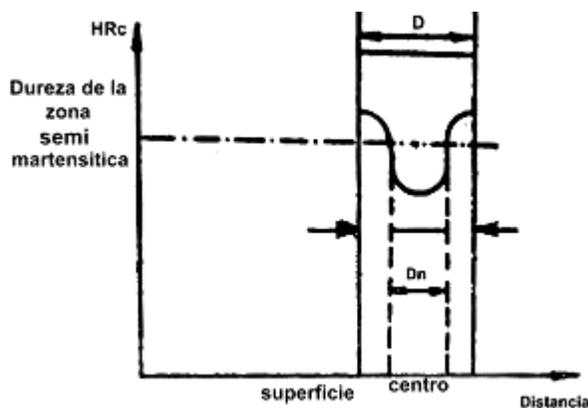


Fig. 5-33. Curvas U.

Al hablar de templabilidad, hay que establecer qué se considera por este término. Si consideramos el espesor de la zona templada exclusivamente la martensita, su medición encontraría dificultades experimentales, ya que en la estructura encontramos además de martensita un 5 a un 10% de troostita que casi no se refleja en la dureza media comprobada.

Es mas razonable pues, considerar por templabilidad la distancia desde la superficie del acero hasta la capa con la estructura *semimartensítica* es decir, donde la estructura consta de un 50% de *martensita* y 50% de *troostita*. Pero para conseguir después del

revenido mejores características mecánicas, el porcentaje de martensita debe ser un poco mayor, y ser entre un 50 a 90%, según el contenido de carbono del acero, como se puede ver en la figura 5-34, en donde se indican las durezas mínimas que se pueden conseguir después del temple para lograr después del revenido resultados satisfactorios.

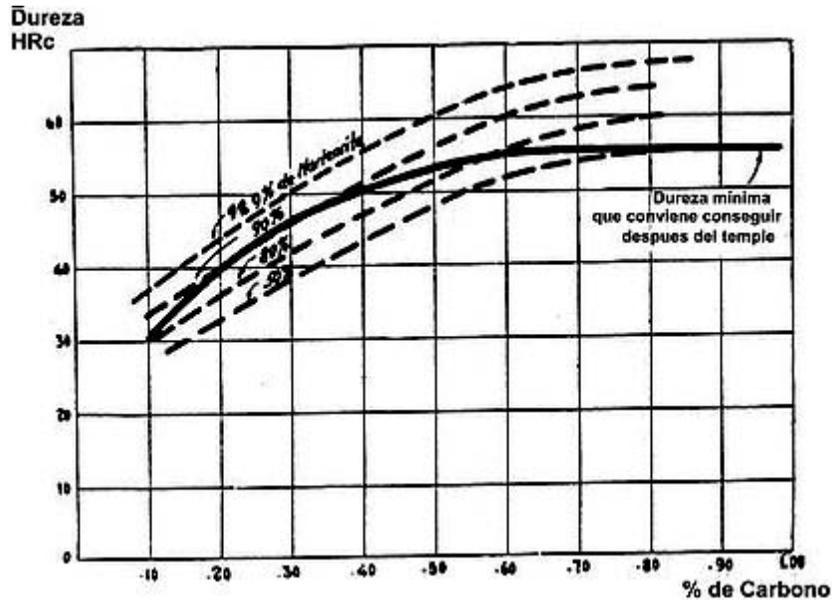


Fig. 5-34. Promedio de dureza que se obtienen en aceros al carbono después del temple, en función de % de carbono y según e % de martensita obtenida.

La zona semimartensítica es fácil de determinar según la microestructura, pero es mas fácil según la variación de la dureza.

La dureza de la martensita, depende prácticamente solo del contenido de carbono, pues es evidente que la dureza de la zona semimartensitica esta en función solo del contenido de carbono.

Existe un denominado diámetro crítico, el cual es el diámetro de sección máxima, que se temple en toda la sección, en un medio enfriante dado. Evidentemente el diámetro crítico varía al cambiar el medio templante, es decir el diámetro crítico caracteriza la templabilidad solamente bajo determinadas condiciones de enfriamiento. Cuanto más lentamente enfrié el medio templante, tanto menor será el diámetro crítico.

El método de las curvas U, y otros han sido empleados para determinar la templabilidad de los aceros, siendo el método de *jominy* unos de los mas notables.

### 5.3.1. Ensayo de Jominy

Como la templabilidad es una propiedad relevante para el acero empleado en la manufactura. Se ha desarrollado el método o el ensayo de *jominy* para determinar esta propiedad. Como se observa en la figura 5-35 a una muestra normalizada se calienta y luego se enfría por medio un rociado de agua. La muestra se enfría muy rápidamente en un extremo y progresivamente a menor velocidad hacia el otro extremo. La velocidad de enfriamiento en cualquier punto a lo largo de la muestra enfriada, puede ser determinada con precisión.

Después que la muestra se enfría, se hacen determinaciones de la dureza Rockwell C a lo largo de toda su longitud (2.5 pulgadas). Estos valores de dureza pueden relacionarse con los datos de velocidades de enfriamiento.

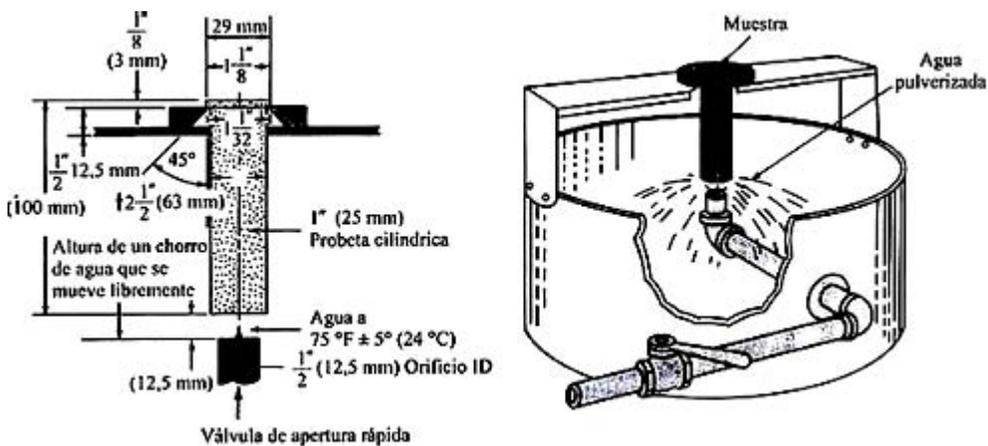


Fig. 5-35. Probeta y equipo ensayo de jominy.

La figura 5-36 relaciona los datos de templabilidad por enfriamiento de un extremo con el diagrama de transformación continua para un acero SAE/AISI 1080 e indican los cambios microestructurales que tienen lugar a lo largo de la barra a cuatro distancias A, B, C y D desde el extremo enfriado. (Van Vlack 1984)

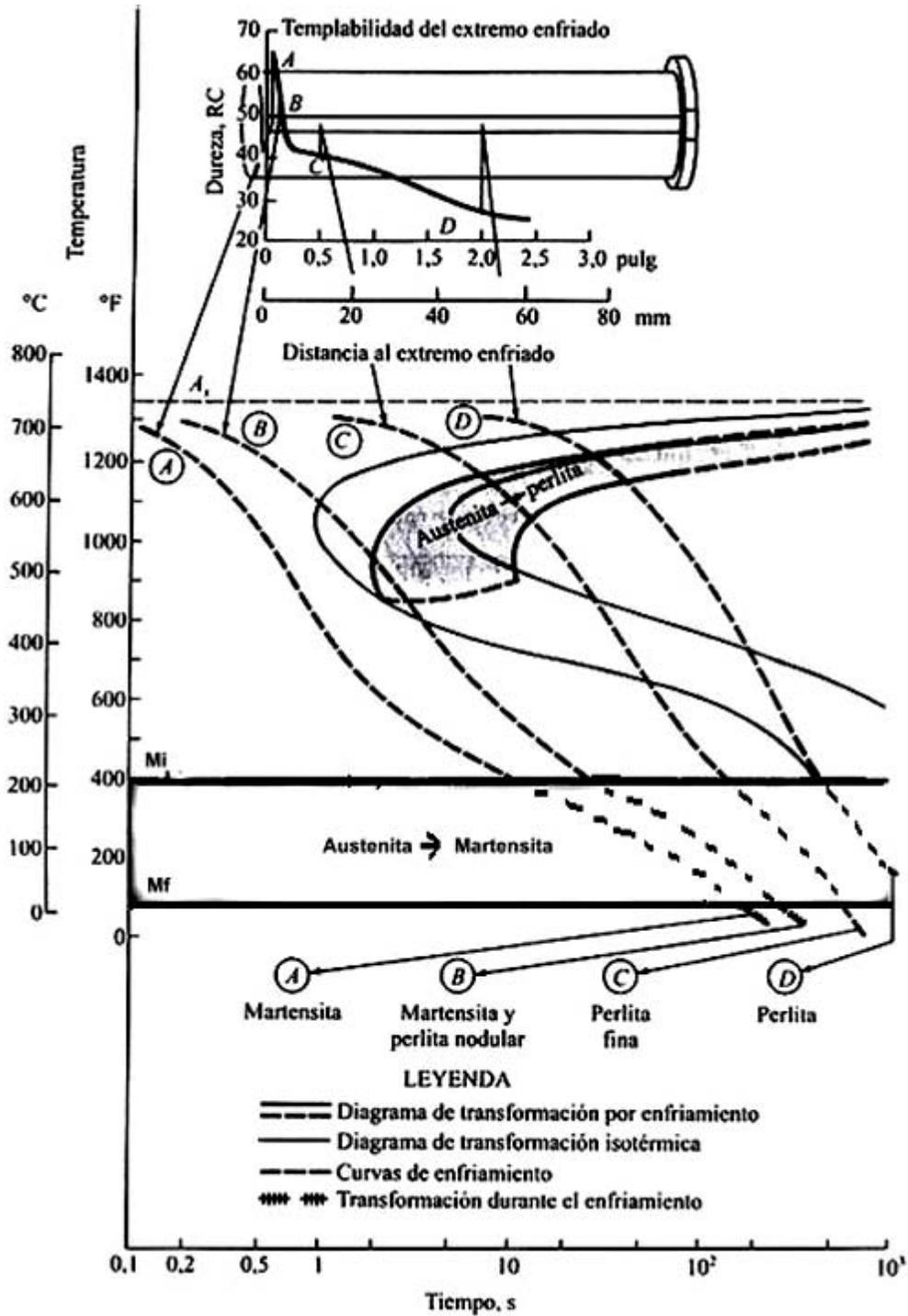


Fig. 5-36. Correlación del diagrama T-T-T y datos de templabilidad.

Los resultados que se obtienen en este ensayo, dependen fundamentalmente de la velocidad crítica de templado del acero, cuyo valor viene reflejado en las curvas que se obtienen en cada caso. También señala las durezas máximas y mínimas que

aproximadamente se pueden obtener en cada acero, la influencia de los diferentes elementos de aleación sobre la velocidad crítica del temple, y se puede medir la templabilidad y prever los resultados que se obtendrán templando en agua, aceite, etc., en barras de diferentes espesores.

Además, el valor de este ensayo aumenta al haberse comprobado que muchas de las propiedades mecánicas comunes de los aceros, como la resistencia a la tracción, el límite a la fluencia, y el alargamiento son función de la dureza del acero y esta a su vez, es función de la microestructura.

De esta manera pueden determinarse las velocidades de enfriamiento requeridas para producir una dureza especificada en el tipo de acero ensayado a lo largo de toda su longitud.

### 5.3.2. La templabilidad del acero al carbono

El acero al carbono se clasifica como un *acero de baja templabilidad*, el efecto total del temple enfriado energicamente en agua en una barra cilíndrica no penetra más de 10-15 mm en un acero de mediano y alto contenido de carbono, y un tanto menos en aceros de bajo contenido. Cuando se requiere una resistencia y dureza uniforme sobre la sección transversal entera de una barra de acero al carbono, se vera muy limitada.

Pero la baja templabilidad de los aceros al carbono resulta ventajosa cuando se requiere superficies muy duras y núcleos tenaces, como es el caso de ciertas herramientas como limas, brocas, machos y engranajes, etc.

En la tabla 5.8 se puede ver la templabilidad de un acero al carbono, utilizado para la fabricación de herramientas, enfriado en dos medios diferentes.

Marca del acero	Diámetro crítico, mm, enfriado en	
	Agua	Aceite
Y10	6-10	2-3

Tabla N° 5.8. Penetración del templado en una barra redonda de acero Y10.

### 5.4. Calentamiento y Mantenimiento en el templado

El calentamiento de un acero hasta una determinada temperatura debe realizarse con la velocidad máxima posible, ya que con ello se hace el proceso más económico al aumentar la productibilidad. La pieza debe comenzar a calentarse desde la temperatura

ambiente. Sin embargo, esto siempre no es posible al haber limitaciones debido a la velocidad permisible para cada material, así como las posibilidades técnicas del equipo para el tratamiento.

La velocidad óptima de calentamiento para el templado será aquella para la que no aparezcan tensiones internas, como consecuencia de un calentamiento no uniforme de la pieza.

En la tabla 5.9 se puede obtener las temperaturas adecuadas para el calentamiento y mantenimiento en hornos de cámaras.

Espesor (mm)	Calentamiento	Mantenimiento
25	20	5
50	40	10
85	60	15
100	80	20
125	100	25
150	120	30
175	140	35
200	160	40

Tabla N° 5.9. Temperaturas adecuadas para el calentamiento y mantenimiento en hornos de cámaras.

#### **5.4.1. Defectos en piezas templadas**

El temple es la operación más compleja de los tratamientos térmicos, debido fundamentalmente a los cambios estructurales que se producen.

Algunos de los defectos son corregibles y otros provocan con su aparición, que las piezas sean desechables e inutilizables.

Las correcciones de los defectos pueden realizarse por medio de un tratamiento térmico posterior o un mecanizado.

Unos de los defectos mas comunes que se presentan en el temple de los aceros, son la oxidación y la descarburación.

#### **5.4.2. Oxidación y Descarburación**

El acero al encontrarse a temperaturas elevadas en presencia del oxígeno y otros gases oxidantes ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ), se ve sometido a un proceso doble de oxidación y descarburación. Esta condición se produce en los hornos de tratamientos ya sea estos de cámaras o eléctricos y en menor cuantía, en hornos de baños de sales.

La magnitud del proceso de oxidación y descarburación depende del combustible empleado, de la atmósfera (En su composición y presión), de la temperatura, del tiempo de calentamiento y de la composición del acero.

La pérdida de material que se llega a producir en ocasiones es de alrededor de un 2% en peso del material.

A elevadas temperaturas los aceros no solo se ven sometidos a los procesos de oxidación en presencia de oxígeno puro, sino también en presencia de *aire, vapor de agua* y  $\text{CO}_2$ , siendo la actividad de estos gases en el orden señalado.

Conjuntamente con la oxidación del hierro se produce en el acero una oxidación del carbono. Con el fin de evitar este proceso se han desarrollado numerosas técnicas, como el cubrir la pieza a tratar con una mezcla cementante que disminuya la acción de los gases oxidantes, sin embargo los resultados no son los más satisfactorios.

El uso de baños de sales activamente desoxidantes, hornos con atmósfera controlada ha contribuido a reducir notoriamente los defectos de la oxidación y descarburación.

#### **5.4.3. Acero Quemado**

Cuando una pieza se calienta a temperaturas elevadas, cerca del punto de fusión, queda muy frágil, con una estructura muy grosera y brillante.

El acero quemado, no es utilizable y no admite remedio alguno. Este fenómeno comienza aproximadamente a los  $1350^\circ\text{C}$  para los aceros de bajo contenido de carbono (aceros extra dulces), a  $1300^\circ\text{C}$  para los de 50% de carbono y a  $1200^\circ\text{C}$  para los de 0.90% de carbono.

#### **5.4.4. Deformación y Grietas**

La aparición de formación y grietas en los aceros se deben fundamentalmente a dos causas. Una debido a las tensiones que se producen por estar sometidas a diferentes zonas de la pieza a regímenes de temperatura diferentes. También se producen deformaciones,

debido a las transformaciones estructurales que se producen al presentar diferentes fases y volúmenes específicos como se puede observar en la tabla 5.10.

Fase	Volumen específico (cm <sup>3</sup> /g)
<i>Martensita</i>	0.127 a 0.130
<i>Austenita</i>	0.122 a 0.125
<i>Conglomerado ferrítico-cementítico</i>	0.127

Tabla N° 5.10. Volumen específico de la martensita y el conglomerado ferrítico-cementítico.

Un método para prevenir las deformaciones y grietas, es someter a un tratamiento térmico preliminar al templeado, el recocido de regeneración (Ver capítulo V, página 59).

#### 5.4.5. Variación Dimensional

Este defecto se produce siempre al ser templeado un acero, debido a las transformaciones martensíticas. Estos cambios generalmente no son notorios, por ejemplo en acero de alto carbono el cambio volumétrico alcanza no más de un 1%. Esto significa que las dimensiones lineales de las piezas aumentan en un 0.3%. (Gordon 1985)

### 5.5. Revenido del acero Templeado

El tratamiento térmico conocido como *revenido* del acero se realiza después del templeado. El revenido del acero consiste en calentar acero templeado martensítico a una temperatura comprendida entre la temperatura ambiente y la crítica del acero (**A<sub>c1</sub>**) durante un determinado tiempo, seguido de un enfriamiento al aire quieto (siempre que el acero no presente tendencias a la fragilidad del revenido, en cuyo caso se enfriará en un medio más energético).

Después del temple los aceros presentan un cierto estado tensional, a causa de las transformaciones *martensíticas*, que es indeseable. Por otra parte, la estructura no es homogénea, por tener el acero alguna estructura austenítica retenida (residual); además, la dureza puede no alcanzar su valor máximo y el acero es frágil. La microestructura de los aceros hipoeutectoides está compuesta de martensita y austenita retenida, y la de los *hipereutectoides* está compuesta de martensita, cementita y austenita retenida.

La estructura del acero templado es metaestable y tiende a variar con el tiempo, lo que provoca, en ocasiones, la aparición de grietas como resultado de las transformaciones. *Es por ello que el revenido es una operación obligatoria para los aceros templados, y debe ejecutarse inmediatamente después del temple.*

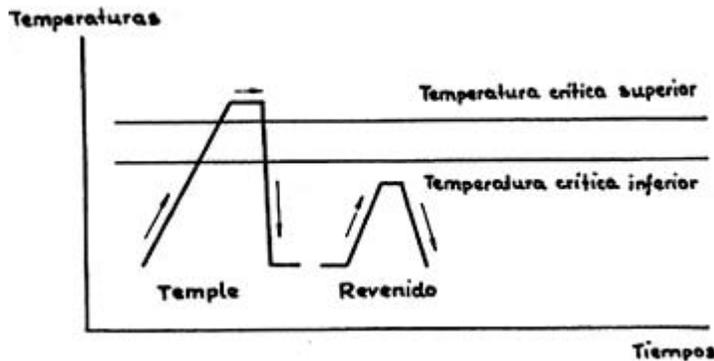


Fig. 5-37. Esquema del templado y revenido.

El templado, si realiza en un 100 %, comunica al acero las siguientes características:

1. Grano de tamaño mínimo.
2. Dureza máxima.
3. Ductilidad mínima.
4. Produce tensiones y deformaciones internas.

#### 5.5.1. Objetivos del revenido

El objetivo fundamental del revenido no es eliminar los efectos del temple sino modificarlos, al obtener una microestructura y propiedades mecánicas, físicas óptimas para el funcionamiento de la pieza de acero. Podemos detallar los siguientes objetivos del *revenido*:

1. Aumentar la tenacidad.
2. Disminuir la dureza.
3. Quitar tensiones internas.
4. Estabilizar la estructura.
5. Cambiar de volumen.

#### 5.5.2. Efecto de la temperatura del revenido sobre las propiedades mecánicas y la microestructura del acero

Los efectos del revenido se deben a los cambios microestructurales, estos cambios están a su vez en función de la temperatura del revenido.

Uno de los objetivos principales del revenido no es disminuir la dureza del acero templado, sino el aumentar *la tenacidad*. El acero templado a fondo con un contenido de carbono mayor a 0.60 % es frágil y, por lo tanto peligroso para herramientas o piezas de maquinado. Cualquier sobrecarga ligera o choque repentino produciría una fractura. La aplicación del *revenido* reduce la *fragilidad* y aumenta la *plasticidad*. Estas modificaciones de las propiedades mecánicas en la dureza y la tenacidad, se deben a los cambios o descomposición de la *martensita* y de *austenita residual* al aplicarles un calentamiento gradual y progresivo. La *martensita* formada por el templado se denomina *martensita alfa* (*de estructura tetragonal*), esta al ser calentada desde los 70°C (150°F) a los 205°C (400°F) se transforma *martensita beta* (*de estructura cúbica*). Difiere de la *martensita alfa* por su estructura cristalina. Se distingue al microscopio por su color levemente castaño. Ya que tiene una estructura de red normal, esta mas libre de tensiones que la *martensita alfa*, es dimensionalmente mas estable y tiene solo un poco menos de dureza.

Si la *martensita beta* se calienta, el proceso de descomposición continúa. Se usa una temperatura de revenido entre 205°C ( $\approx 400^\circ\text{F}$ ) a 400°C ( $\approx 750^\circ\text{F}$ ) se obtendrá una estructura formada por una perlita muy fina. Es considerablemente más blanda y más dúctil que la martensita. A esta estructura se le denomina *Troostita de revenido*.

Cuando se usa temperaturas de revenido desde los 400°C ( $\approx 750^\circ\text{F}$ ) a los 595°C ( $\approx 1.100^\circ\text{F}$ ), también se obtendrá una perlita fina, cuyo grado de finura es inversamente proporcional a la temperatura de revenido. Esta estructura es todavía más blanda y más dúctil que la perlita extremadamente fina. A esta estructura se le denomina *Sorbita de revenido*.

A temperaturas de revenido más altas, por encima de los 595°C ( $\approx 1.100^\circ\text{F}$ ), los granos aumentan de tamaño y la estructura que resulta a altas y prolongadas temperaturas de temple, se le denomina a menudo *esferoiditas*.

Si continuamos aumentando la temperatura de calentamiento, obviamente llegaremos a formar austenita, por lo tanto el límite de la temperatura de revenido es de 700° C. En la figura 5-38. Se puede apreciar las variaciones que experimentan las propiedades mecánicas (resistencia y la tenacidad) de los aceros al carbono de 0.25 a 0.65 % C en función de la temperatura de revenido.

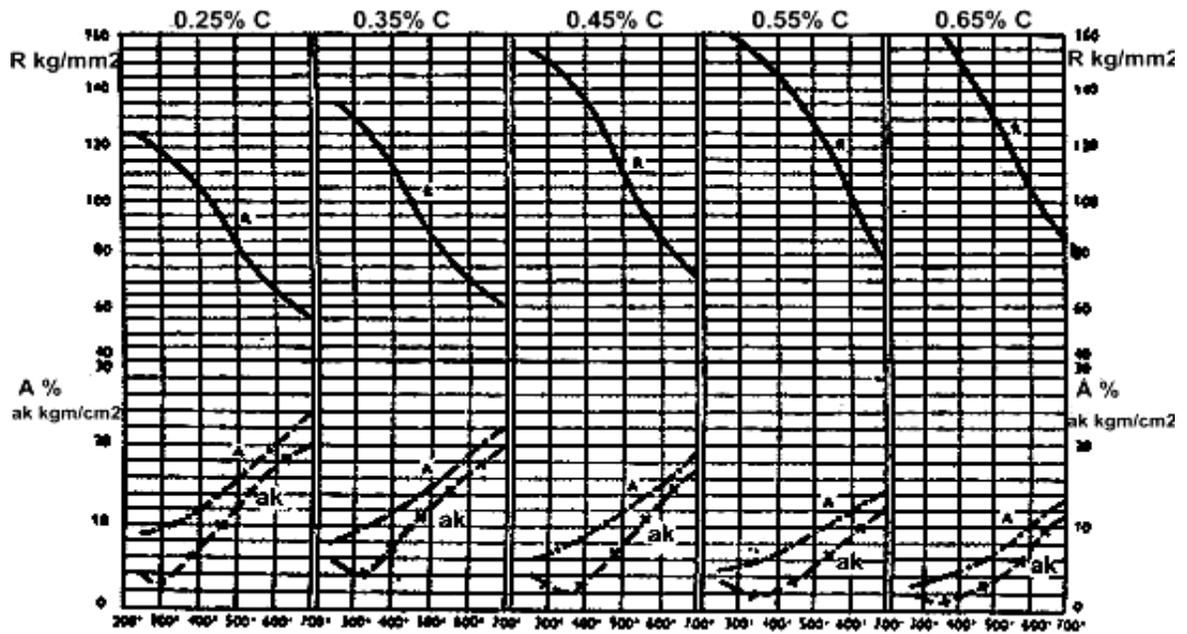


Fig. 5-38. Influencia de la temperatura del revenido sobre las características mecánicas de los aceros al carbono.

**Quitar tensiones internas y estabilización de la estructura:** la *martensita alfa* es un material inestable y tiende a variar con el tiempo, provocando tensiones lo cual es contrarestando por medio del revenido.

**Cambios de volumen:** Se sabe que cuando la austenita pasa a *martensita alfa* durante el templado tiene lugar una marcada dilatación. La martensita tiene en el acero el volumen más grande de todas las estructuras. El envejecimiento de la martensita recientemente formada a la temperatura ambiente da como resultado una contracción de volumen, la cual continúa durante el revenido. Este cambio de volumen ayuda a resolver el problema de controlar el tamaño y forma del acero durante el tratamiento térmico. El revenido generalmente devuelve al acero casi su volumen original.

### 5.5.3. Principales factores del revenido

**Tiempo en el revenido:** En general cuanto mas larga es la duración del tratamiento a una temperatura de revenido dada, tanto mejor es el resultado conseguido, pues se eliminan, en una extensión mas grande, las tensiones creadas en el acero templado y se aumenta la plasticidad y tenacidad sin disminuir notoriamente la dureza.

Se recomienda un tiempo de revenido de una hora por cada milímetro de espesor de la pieza.

**Temperatura de revenido:** La temperatura de revenido depende de la composición y las aplicaciones del acero al carbono. El efecto de este tratamiento aumenta con la temperatura y para un valor dado de la misma, depende del tiempo, siendo tanto mayor el efecto de la duración cuanto mayor es la temperatura.

A medida que aumenta la temperatura, disminuye la resistencia, la dureza y aumenta la tenacidad. Sin embargo, en los aceros al carbono en el intervalo entre 250 y 350° C ocurre una disminución en la resistencia al impacto (tenacidad), llamada *fragilidad de primer género* o también denominada *fragilidad irreversible*.

Esta fragilidad consiste en una disminución en los valores de la resistencia al impacto, se observa en los aceros al carbono y en los aleados en los intervalos de temperaturas entre los 250 y 350° C, independiente del contenido químico del acero. Este fenómeno no puede ser evitado por ningún medio de los hasta ahora conocidos, y por ello debe evitarse el revenido a estas temperaturas para piezas sometidas altas cargas de impacto. La aparición de la fragilidad se explica porque durante el proceso de revenido del acero, por los límites de los granos primarios de la austenita, se desprenden carburos que tienen forma de pétalos, los cuales disminuyen grandemente la plasticidad. En la figura 5-39 se puede apreciar el efecto de la temperatura de revenido sobre la resistencia, la resiliencia y el fenómeno de la fragilidad irreversible.

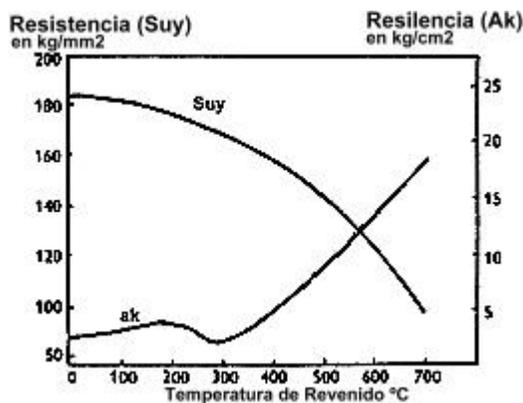


Fig. 5-39. Influencia de la temperatura del revenido sobre la resistencia, resiliencia (tenacidad) y el fenómeno de la fragilidad del primer tipo, de los aceros al carbono.

La temperatura de revenido, se determina por la dureza, tenacidad y resistencia ( $S_{ut}$  y  $S_y$ ) que requiera la pieza o herramienta. En la tabla 5-11 se señalan las temperaturas de revenido sugeridas.

<i>Aplicaciones para el acero al carbono</i>	<i>Temperatura de Revenido</i>	<i>Acero adecuado</i>	<i>Propiedades mecánicas</i>
Brocas, machos, herramientas de torno, escariadores, cortapapeles, limas	180-220	Alto contenido de carbono (> 0.9% de carbono)	Máxima dureza y una elevada resistencia al desgaste
Herramientas para cortar madera, terrajas, cuchillos, instrumentos de cirugía, fresas	230-240	Alto contenido de carbono (> 0.9% de carbono)	Alta dureza, con una tenacidad mayor que la anterior
Granetes, cinces, caras de martillo, cuchillas de cizallas, destornilladores.	250-260	Alto contenido de carbono (de 0.7-0.8% de Carbono)	Alta dureza, resistencia combinado con una tenacidad regular
Ejes, pasadores herramientas para trabajar madera	270-280	Alto contenido de carbono( de 0.7-0.8% de Carbono)	Alta resistencia ( $S_{ut}$ ) y límite de fluencia ( $S_y$ ), con una tenacidad mayor que la anterior
Resortes helicoidales, semi-elípticos,	300-350	Mediano-alto contenido de carbono (de 0.5 a 07 % de carbono)	Máxima fluencia ( $S_y$ ), y con tenacidad media

Tabla N° 5-11. Temperatura de revenido sugeridas.

De la tabla 5-11, se puede apreciar que la temperatura de revenido es de 300-350° C para los aceros al carbono para resortes, ya sean helicoidales o de hojas semi-elípticas. Esta temperatura esta ubicada en la zona de la fragilidad irreversible o de primer género, esto se debe a que la propiedad que se requiere para un resorte, es una máxima elasticidad ( $S_y$ ), y esta se consigue a esas temperaturas de revenido, como se puede ver en la figura 5-40.

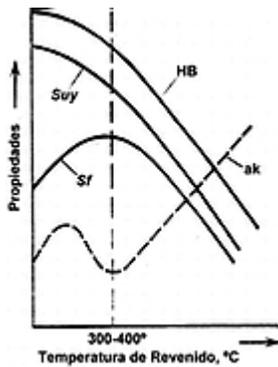


Fig. 5-40. Influencias de la temperatura del revenido las propiedades: tenacidad ( $ak$ ), resistencia mecánica ( $S_{uy}$ ), dureza (HB) y la resistencia elástica o de fluencia ( $S_f, S_y$ ).

## 5.6. Recocido del acero al carbono

**Recocido:** son tratamientos térmicos, que se aplican a piezas fabricadas de acero, ya sea para liberar tensiones, mejorar la tenacidad, la maquinabilidad, la resistencia, reducir dureza, otorgar una mayor ductibilidad o dejar preparada una pieza para someterla a un templeado.

De acuerdo al objetivo buscado y de la temperatura de tratamiento, se tienen diversos tipos de recocidos.

Independiente del tipo de recocido, estos al igual que el *templado* y *el revenido* este se realiza por medio de *tres operaciones* de los tratamientos térmicos. La primera operación consiste en propinarle una *alta temperatura* y la segunda operación es mantener la pieza a la temperatura anteriormente señalada y la tercera operación, es el *enfriar* la pieza según el tipo de recocido que se trate.

### 5.6.1. Tipos de recocido

Los diferentes tipos recocidos se definen de acuerdo al objetivo buscado y de la temperatura de tratamiento.

Los tipos de recocidos que serán vistos en este manual, son: recocido de relajación, y el recocido de regeneración, todos estos se pueden aplicar con relativa facilidad y con buenos resultados.

**Recocido de Relajación o de eliminación de tensiones:** Este tipo de recocido se aplica para remover de tensiones a estructuras soldadas, o que hayan sido conformadas mecánicamente (forjado por ejemplo).

**Recocido de regeneración:** por medio de este tipo de recocido se logra obtener una reducción de la dureza y así facilitar el maquinado. También se aplica para dejar preparada la pieza para un posterior templado y también se utiliza para anular un temple defectuoso o mal aplicado.

### 5.6.2. Factores del recocido

Los factores de recocido independiente del tipo de recocido que se trate son: *la temperatura de recocido, el tiempo de calentamiento y la velocidad de enfriamiento* principalmente.

- *La temperatura de recocido:* la temperatura de calentamiento depende del tipo de recocido, la cual esta relacionada con el objeto del recocido.

**a.-**La temperatura para un *recocido de relajación* es de 500 a 600°C, independiente de porcentaje de carbono contenido de la pieza del acero.

**b.-**Para un *recocido de regeneración* la temperatura para los aceros hipoeutectoides debe ser de 20-40° sobre el punto crítico **Ac3**. Para los hipereutectoides la temperatura debe ser de 40-50° sobre el punto crítico **Ac1**. En la tabla 5-12 se señalan las temperaturas adecuadas para el recocido de regeneración.

% de carbono	Temperatura, °C
0.1	910°
0.2	890°
0.3	860°
0.4	840°
0.5	820°
0.6	800°
0.7	775°
0.8	760°
0.9	760°
1.0	760°
1.1	760°
1.2	760°

Tabla N° 5-12. Temperaturas adecuadas para el recocido de regeneración.

-*El tiempo de calentamiento* depende de la capacidad del horno en alcanzar la temperatura de recocido desde la temperatura ambiente. La pieza se debe introducir antes de encender el horno.

-*El tiempo de mantenimiento*: el tiempo de mantenimiento rige por igual para cualquier tipo de recocido y revenido. El tiempo de calentamiento de una pieza se estima en *una hora* por cada *pulgada (25mm) de espesor*.

-*Velocidad de enfriamiento*: la velocidad de enfriamiento, es un factor muy relevante, por lo tanto se deben tomar precauciones. El enfriamiento en el recocido de regeneración, debe realizarse lentamente, por eso se recomienda no sacar la pieza del horno, hasta una temperatura de 500° C. Luego de enfriarse hasta alcanzar los 500° C, se puede extraer la pieza y se recomienda colocarla en arenas calientes o cubrirla con virutas de fierro, para otorgar un enfriamiento de una baja velocidad. Un enfriamiento fuera del horno, antes de tiempo podría causar efectos no buscados.

### **5.6.3. Defectos en el recocido**

Los defectos del recocido se presentan durante la etapa del calentamiento y el mantenimiento, y son principalmente *la oxidación* y *la descarburación*. En el recocido de relajación ocurre solo oxidación, ya que a 400° C ya se manifiesta notoriamente la oxidación en el acero al carbono.

En el recocido de regeneración se presenta una oxidación de mayor intensidad que en la de recocido de relajación, debido que a mayor temperatura, mayor es la oxidación. La descarburación o también denominada oxidación del carbono, se produce en el recocido de regeneración, pero levemente, ya que a las temperaturas de regeneración, la descarburación es parcial.

## 5.7. Otros Tratamientos Térmicos

### 5.7.1. Normalizado

Este tratamiento térmico consiste en calentar un producto siderúrgico a una temperatura por sobre el punto crítico superior (**Ac3**) para luego enfriarlo rápidamente desde los 920° C a los 600° C. Desde los 600° C a la temperatura ambiente se efectúa lentamente en el horno. Este tratamiento se realiza preferentemente en los aceros al carbono con un máximo de 0.5 % de carbono.

#### Objetivos del normalizado

Los principales objetivos del normalizado son:

- 1- Refinar el grano del acero colado y producir por consiguiente mejores características.
- 2- Afinar el grano de las piezas soldadas.
- 3- Destruir las tensiones provocadas por la forjadura.

### 5.7.2. Bonificado

Tratamiento térmico conocido como *refinado* o *mejorado*, consiste en un templado con un posterior revenido a una alta temperatura (450-650°C) de manera que el acero quede tenaz.

Tanto el *normalizado* como el *bonificado* son tratamientos aplicados por los proveedores del acero, sin embargo pueden ser aplicados por los usuarios si el producto no cuenta con estos tratamientos. El fabricante del acero debe especificar el tratamiento con que entrega sus productos.

## CAPITULO VI

### Práctica de los tratamientos térmicos

Para poder realizar los tratamientos térmicos de este manual con resultados óptimos, el usuario debe primeramente conocer los principios, conceptos que se relacionan con esta área de la metal-mecánica.

Los contenidos de los capítulos anteriores, han sido extraídos de bibliografía especializada en el tema, cuyos autores han entregado todos sus conocimientos adquiridos en el arte de los tratamientos térmicos.

En esta fase del manual, el usuario podrá practicar el tratamiento que requiera, guiado por una secuencia de operaciones, la cual incluye las herramientas, equipos y las técnicas apropiadas para lograr óptimos resultados.

El proceso de todos los tratamientos se realiza por medio de 3 etapas u operaciones:

**1º** El calentamiento.

**2º** Mantenimiento.

**3º** Enfriamiento.

El tiempo y la temperatura son los factores principales, se fijan de acuerdo a la composición del acero (**% de carbono**), el tamaño de la pieza y las características que se desean obtener.

#### **6.1. Primera Operación y Segunda Operación: Calentamiento y Mantenimiento**

La operación de calentamiento y el mantenimiento se le considera generalmente como una sola operación.

En estas dos primeras operaciones los factores más relevantes son: la *temperatura de temple, recocido, revenido y el tiempo de calentamiento y mantenimiento*.

Los factores se encuentran en los capítulos anteriores, los que serán citados para cada tratamiento requerido.

##### **6.1.1. Temperatura de temple, recocido y revenido**

*Recocido de regeneración*: Página 63; Tabla N° 5-12.

*Recocido relajación* : Página 63.

*Templado* : Página 37; Tabla N° 5-3.

*Revenido* : Página 61; Tabla N° 5-11.

### **6.1.2. Tiempo de calentamiento y mantenimiento**

*Recocido de regeneración* : Página 64.

*Recocido relajación* : Página 64.

*Templado* : Página 53; Tabla N° 5-9.

*Revenido* : Página 59.

### **6.1.3. Instrumentos y Equipos necesarios**

Para realizar la primera y segunda operación de los tratamientos térmicos, se debe contar con ciertos instrumentos y equipos, tales como:

-Tenazas de forja.

-Horno de sales, plomo fundido u horno eléctrico de resistencias con reóstato, termocuplas y pirómetro.

-Cronómetro.

-Vestuario de seguridad.

Una vez que se cuenta con los factores e instrumentos y equipos necesarios, se esta en condiciones de comenzar a realizar las primeras dos operaciones de los tratamientos térmicos.

### **6.1.4. Calentamiento y Mantenimiento para *recocidos***

#### **Secuencia de operaciones**

1.-La pieza se introduce al horno antes de comenzar ha calentarlo.

2.-Se procede a calentar el horno con el material adentro hasta *la temperatura de recocido* que le corresponde a cada tipo de recocido.

3.-Una vez alcanzada la temperatura de calentamiento, esta temperatura se debe mantener por un tiempo (tiempo de mantenimiento) para lograr que la pieza quede completamente calentada en toda su estructura.

### **6.1.5. Calentamiento y Mantenimiento para *templado***

El proceso es idéntico a los recocidos.

### **6.1.6. Calentamiento y Mantenimiento para *revenido***

El proceso es idéntico al templado y recocidos.

## 6.2. Tercera Operación: Enfriamiento

En la tercera y última operación de un tratamiento térmico, es de gran relevancia, al igual que las dos primeras operaciones los factores involucrados, en esta última etapa los factores más relevantes son: *la velocidad de enfriamiento, temperatura y tiempo de calentamiento.*

### 6.2.1. Instrumentos y equipos necesarios

- Tenazas de forja.
- Alambres.
- Recipiente.
- Medio de enfriamiento.
- Pie de metro.
- Escobilla de acero y lijas.
- Vestuario de seguridad.

### 6.2.2. Enfriamiento del recocido

Como se ha señalado página 64 las piezas sometidas a recocidos deben enfriarse en el mismo horno hasta una determinada temperatura, para lograr los efectos buscados.

### 6.2.3. Enfriamiento del revenido

De una metodología similar al recocido.

### 6.2.4. Enfriamiento de temple

El enfriamiento en temple es relevante, este debe realizarse en el medio adecuado, con las técnicas apropiadas para alcanzar resultados satisfactorios. En la página 44 se detallan diversos medios de enfriamiento con las características respectivas. Si bien existen medios de enfriamiento que propinan una gran velocidad de enfriamiento, los empleados en la práctica son el agua común y corriente, a temperaturas de entre 15 a 20° C, y los aceite, ya sean mineral o de origen vegetal.

### Secuencia de operaciones

- 1.- La pieza se le debe efectuar correctamente las operaciones previas de *calentamiento y mantenimiento.*
- 2.-Se debe extraer las piezas del horno lo antes posibles con el empleo de las tenazas de forja.
- 3.- Sumergir y agitar de acuerdo a las indicaciones siguientes.

Un aspecto muy relevante, el cual esta relacionado con la efectividad y calidad del templado, es la técnica correcta de sumergir (introducir) y agitar (mover) las piezas calientes en el medio de enfriamiento.

Se debe seguir las siguientes reglas generales:

- a) Las piezas largas y finas, como cuchillos, hojas deben ser sumergibles en forma estrictamente vertical y deben moverse en líneas rectas, para evitar el pandeo.
- b) Las piezas formadas por secciones de diferentes dimensiones, deben introducirse en el baño, sumergiendo primeramente la sección de mayor tamaño.
- c) Las piezas finas de forma circular, como las arandelas (golillas) deben introducirse por el canto perpendicular al baño.
- d) Las piezas gruesas de forma circular deben introducirse con su eje perpendicular a la superficie de baño.

La figura 6-41 muestra las maneras correctas para introducir las piezas de acuerdo a su geometría y tamaño y la figura 6-42 señala la manera correcta mover piezas de sección gruesas en el baño de enfriamiento.

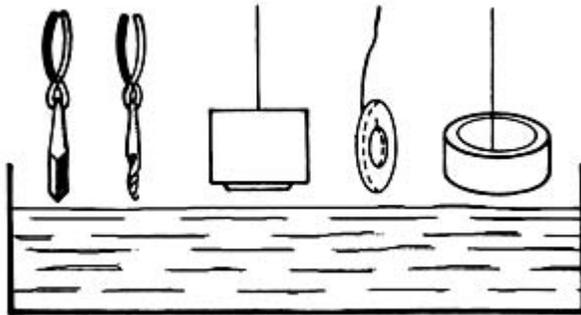


Fig. 6-41. Forma correcta de introducir diferentes piezas en el medio de enfriamiento.

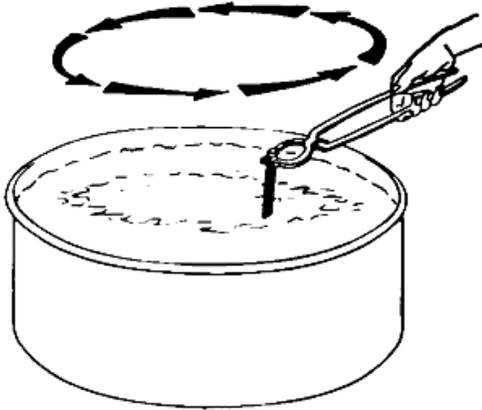


Fig. 6-42. Manera de agitar la pieza en el medio de enfriamiento.

4.- Se debe mantener la pieza agitando en el medio de enfriamiento (baño) hasta lograr un enfriamiento total. El enfriamiento total se alcanza cuando la pieza deja de vibrar, señal que ha cesado de ebullición. Otra regla a aplicar es el mantener la pieza en el medio de enfriamiento a razón de 1 segundo cada 5mm de espesor. Cuando se trata de aceite como medio de enfriamiento, se debe doblar el período de tiempo de agitado.

5.- Luego la pieza al ser extraída debe ser limpiada del óxido formado durante el *calentamiento y mantenimiento*, para efectuar control de calidad por medio de inspecciones y así poder detectar posibles fallas o defectos que se pueden hacer presentes en esta etapa del templado. (Feirer 1966)

Por medio de una inspección visual se puede detectar grietas, deformaciones, puntos blandos. También es necesario inspeccionar la dureza alcanzada. La dureza que se debe lograr esta dada por el fabricante y se encuentra generalmente tabulada en los manuales que entrega el fabricante. Empleando medidores de dureza (durómetro) u otro tipo de instrumento se puede conocer la dureza alcanzada. Si no se cuenta con los instrumentos mencionados, utilizando una lima, se puede verificar la dureza ya que un templado satisfactorio presenta dificultades al limado.

En la tabla número 6-13 resume los defectos, causas y soluciones más comunes en el templado y tratamientos térmicos en general.

<i>Defectos</i>	<i>Detección</i>	<i>Causas</i>	<i>Soluciones</i>
Grietas	Inspección visual y detector de grietas.	Tensiones causadas por cambios estructurales	Es irreparable. Medios preventivos: 1) Evitar ángulos

			agudos y cambios de sección agudos 2) Usar agua pura a una temperatura de entre 15 a 20°C
Baja dureza	Ensayo de dureza	Temperatura de temple baja, o poco mantenimiento o poca velocidad de enfriamiento	Por medio de un recocido de regeneración se deja en condiciones de templar nuevamente
Fragilidad	Inspección visual en fractura. Ensayo de impacto	Alta temperatura de temple o mantenimiento prolongado	Aplicar un recocido de regeneración y repetir el temple
Puntos blandos	Ensayo de dureza en varios puntos	Enfriamiento inadecuado, descarburación	Es corregible excepto en el caso de descarburación. Proceder igual que los casos anteriores
Oxidación y descarburación	Inspección, en el caso de oxidación y ensayo de dureza en el de descarburación	Reacción entre la atmósfera y el acero	Si la profundidad es mayor que la permisible para ser rectificado el defecto, es irreparable. Para prevenirlo; debe usarse atmósferas controladas o baños de sales
Deformación	Control de dimensiones	Transformaciones estructurales o	Es reparable cuando es leve, pero cuando

		introducción incorrecta en el medio de enfriamiento	es severo no tiene solución. Para prevenirlo debe aplicarse el tratamiento correctamente
--	--	-----------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------

Tabla N° 6-13. Defectos, detección, causas y soluciones de los tratamientos térmicos.

### 6.3. Ejemplo

Dos barras redondas de acero **SAE/AISI 1045** (ver figura 6-43), serán templadas. Es recomendable someterla previamente a un *recocido de regeneración* (ver página 56).

Las dimensiones originales de ambas barras son:

	Diámetro	Peso
Pieza dos	1 1/4 (31.7mm)	282 .0 grms
Pieza uno	1 1/4 (31.7mm)	270.5 grms

Tabla N° 6-14. Dimensiones originales de las piezas de acero SAE/AISI 1045.

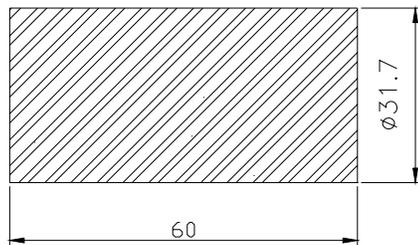


Fig. 6-43. Barra redonda de acero SAE/AISI 1045.

#### -Recocido de regeneración

#### Primera Operación y Segunda Operación del recocido: Calentamiento y Mantenimiento

##### Temperatura de recocido

La temperatura de recocido de regeneración para un acero SAE/AISI 1045 corresponde a 850° C.

##### Tiempo de calentamiento y mantenimiento

El tiempo de calentamiento y mantenimiento sugerido corresponde a 60 minutos por cada 25mm de espesor, como las piezas tienen un diámetro de 31.7 mm les corresponden un tiempo de mantenimiento de 80 minutos aproximadamente.

### Instrumentos y Equipos necesarios

Para realizar la primera y segunda operación, se debe contar con:

- Tenazas de forja.
- Horno eléctrico de resistencias con reóstato, termocuplas y pirómetro.
- Cronómetro.
- Vestuario de seguridad.

### Secuencia de operaciones del calentamiento y mantenimiento

- 1.-La pieza se introduce al horno antes de comenzar ha calentarlo.
- 2.-Se procede a calentar el horno hasta *la temperatura de 850° C.*
- 3.-Una vez alcanzada la temperatura de recocido, se deben mantener las piezas durante 80 minutos.

### Tercera Operación: Enfriamiento de recocido

Como se ha señalado anteriormente las piezas sometidas a recocidos deben enfriarse en el mismo horno hasta una determinada temperatura, para lograr los efectos adecuados.

Las piezas son extraídas después de varias horas del horno, estas presentan una notoria oxidación. Las piezas adquirieron las siguientes dimensiones:

	Diámetro	Peso
Pieza dos	31.10 mm	263.5 grms
Pieza uno	31.10 mm	253.0 grms

Tabla N° 6-15. Dimensiones de las piezas luego del recocido regenerativo (de regeneración).

Al comparar las dimensiones originales (tabla 6-15) con las adquiridas luego del recocido se ven reducidas las siguientes dimensiones en:

	Diferencia en Diámetro	Diferencia en Peso
Pieza dos	0.60 mm 1.89 %	18.5 grms 6.7%
Pieza uno	0.60 mm 1.89 %	17.5 grms 6.5%

Tabla N° 6-16. Diferencias de diámetro y peso luego del recocido.

Completado el proceso de recocido de regeneración, las piezas están listas para recibir el templado.

**-Templado****Primera Operación y Segunda Operación del templado: Calentamiento y Mantenimiento****Temperatura de templado**

La temperatura de templado para un acero SAE/AISI 1045 en agua corresponde a 820° C y en aceite a 860° C. Estos valores son dados por el fabricante. Si el fabricante no entrega estos datos, se pueden extraer de la tabla N° 5-4, de la página 37.

**Tiempo de calentamiento y mantenimiento**

El tiempo de calentamiento depende de la capacidad del horno para llegar a la temperatura del templado. El tiempo de mantenimiento para el templado es similar a los del recocido de regeneración. Para las piezas les corresponden un tiempo de mantenimiento de 80 minutos.

**Instrumentos y equipos necesarios**

Se debe contar con:

- Tenazas de forja.
- Horno eléctrico de resistencias con reóstato, termocuplas y pirómetro.
- Cronómetro.
- Vestuario de seguridad.

**Secuencia de operaciones del calentamiento y mantenimiento**

La secuencia de operaciones es similar a los recocidos.

**Tercera Operación: Enfriamiento del templado****Instrumentos y equipos necesarios**

- Tenazas de forja.
- Dos Recipientes de un volumen mínimo de un galón.
- Medio de enfriamiento: Agua (1 galón) y aceite mineral en lo posible (1 galón).
- Pie de metro.
- Pesa.
- Escobilla de acero y lijas.
- Vestuario de seguridad.
- Medidor de dureza.
- Lima.

### Secuencia de operaciones del enfriamiento del templado

- 1.- La pieza se le debe efectuar correctamente las operaciones previas de *calentamiento* y *mantenimiento*.
- 2.- Se debe extraer las piezas del horno lo antes posibles con el empleo de las tenazas de forja.
- 3.- Como se trata de piezas de sección de iguales dimensiones y gruesas se sumergen desde cualesquiera de los extremos y agitan en forma circular o como haciendo un ocho, independiente en el medio que se enfríe ya sea en el agua o el aceite.
- 4.- Se debe mantener las piezas agitando en el medio de enfriamiento (baño) hasta lograr un enfriamiento total.
- 5.- Luego la pieza debe ser limpiada del óxido formado durante los procesos de *calentamiento* y *mantenimiento*, para efectuar control de calidad por medio de inspecciones y así poder detectar posibles fallas o defectos que se pueden hacer presentes en esta etapa del templado.

Ambas piezas presentan oxidación producto del calentamiento. Una vez que son limpiadas se les mide e inspecciona para detectar posibles fallas o defectos. Lamentablemente no se realizaron ensayos de dureza por problemas técnicos de los durómetros con que cuenta la Facultad de Ingeniería. La dureza que debería obtener, de acuerdo al comerciante (KUPFER) esta indicada en la tabla 6-17:

Calidad del acero	Dureza templado en agua	Dureza templado en aceite
AISI/SAE 1045	58-60 <b>Rc</b>	35-40 <b>Rc</b>

Tabla N° 6-17. Durezas después del templado, de acuerdo al comerciante.

Es notoria la diferencia de dureza obtenible entre emplear como medio de enfriamiento agua o aceite. Se utiliza aceite como medio de enfriamiento adecuado para proteger las piezas de los defectos producidos por enfriamientos severos. Además de una disminución de la dureza superficial, hay una disminución de la penetración del temple (templabilidad).

No se ha detectado deformaciones y defectos señalados en la tabla N° 6-13 de defectos, causas y soluciones, excepto la oxidación que ha causado una reducción de las dimensiones y un acabado superficial rugoso. En la tabla 6-18 se entrega las nuevas dimensiones apreciadas.

	Diámetro	Peso
Pieza dos	30.80 mm	- grms
Pieza uno	30.80 mm	- grms

Tabla N° 6-18. Dimensiones de las piezas luego del templado.

Al realizar una comparación con las dimensiones originales y luego del recocido, se tienen las siguientes diferencias:

	Diferencia de diámetro	Diferencia de peso
Pieza dos original	0.90 mm 2.84 %	-
Pieza uno original	0.90 mm 2.84 %	-
Pieza dos recocida	0.30 mm 0.96 %	-
Pieza uno recocida	0.30 mm 0.96 %	-

Tabla N° 6-19. Diferencias apreciadas de las piezas originales luego del templado.

**Las reducciones de las dimensiones en las piezas son una seria limitación para efectuar las operaciones de calentamiento y mantenimiento en hornos de cámaras. Para evitar la oxidación se recomienda utilizar hornos de atmósfera controlada, que protegen a las piezas tratadas. También se utilizan hornos de sales, con este fin.**

### **-Revenido**

Es estrictamente necesario someter a un revenido a las piezas templadas, por las razones señaladas anteriormente en capítulo 5, página 56-57.

### **Primera Operación y Segunda Operación del revenido: Calentamiento y Mantenimiento**

#### **Temperatura de revenido**

La temperatura de revenido para un acero SAE/AISI 1045 es de acuerdo a dureza y tenacidad que requiera la pieza. Ciertos fabricantes suelen señalar ciertas temperaturas de revenido, en cambio otros no la especifican. En la tabla 5-11 se sugieren temperaturas de revenido de acuerdo a la composición y aplicación de diferentes aceros al carbono.

### Tiempo de calentamiento y mantenimiento

El tiempo de calentamiento y mantenimiento rige igual que a los anteriores tratamientos.

### Instrumentos y equipos necesarios

Se debe contar con el mismo equipamiento utilizado en los anteriores tratamientos.

### Secuencia de operaciones del calentamiento y mantenimiento

La secuencia de operaciones es similar a los recocidos, y templado\*.

*\* Cuando no se cuenta con hornos con pirómetro o termómetros, la temperatura se puede determinar de acuerdo con los colores del óxido del metal caliente, la figura 6-44 indica los colores que corresponde a diferentes temperaturas, pero hay que tener en cuenta que este método es impreciso que se ve afectados por diferentes factores.*

### Tercera Operación: Enfriamiento

Similar a los recocidos.

### Secuencia de operaciones del enfriamiento del revenido

Similar a los recocidos.

Las durezas obtenibles de acuerdo al fabricante esta detalladas en la tabla siguiente:

Calidad del acero	Dureza revenido a 400 ° C (templado en aceite)	Dureza revenido a 550° C (templado en agua)
AISI/SAE 1045	31 <b>Rc</b>	40 <b>Rc</b>

Tabla N° 6-20. Durezas de revenido dadas por el fabricante.

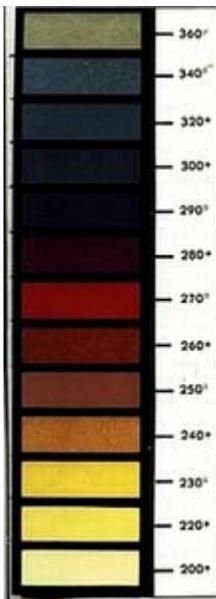


Fig. 6-44. Temperatura (°C) y colores de revenido.

## Conclusiones

Los objetivos fijados en este trabajo de titulación han sido cumplidos tal como se propuso. Para cumplir con las metas propuestas se ha recurrido en primer lugar a recopilar y luego ha analizar toda la materia relacionada con el tema, que se encontró disponible en el medio, la cual es limitada y escasa tanto en bibliotecas, como en la red.

Basándose en los conocimientos teóricos y tecnológicos entregados por este manual de tratamientos térmicos, el usuario puede llegar a efectuar cada uno de los tratamientos que conforman el manual, de una manera confiable.

Si bien los cambios experimentados en cuanto a las propiedades mecánicas de las piezas tratadas térmicamente son notables, hay que tener muy en cuenta las serias limitaciones de los tratamientos térmicos de los aceros al carbono. Limitaciones debido a los defectos y deformaciones que se presentan en las piezas tratadas, ya sea oxidación, grietas, etc., y la reducida penetración del temple, la que en la mejor de los casos llega a templar completamente a una barra de 15mm de diámetro. Las limitaciones de defectos y deformaciones pueden ser reducidas por medios adecuados, como ser el emplear hornos de atmósfera controlada u hornos de sales para evitar la oxidación, pero estos aparatos son de un costo económico considerable. En cuanto a la templabilidad es una seria limitación para el acero al carbono, y debido ha esto el acero al carbono a sido reemplazado por aceros especiales para requerimientos de alta templabilidad.

Si bien este manual esta enfocado para los tratamientos térmicos de los aceros al carbono, puede ser utilizado para los aceros aleados, ya que los principios son semejantes para ambos tipos de aceros. Pero hay que tomar en cuenta que los factores pueden variar considerablemente de un acero aleado a otro. Si se pretende aplicar un tratamiento térmico a un acero aleado, se debe contar con el catálogo de este, ya que el fabricante entrega los datos necesarios para lograr un correcto tratamiento.

Existe una amplia variedad de aceros al carbono templables, de acuerdo a la AISI/SAE, pero en el mercado local se encuentra disponible solamente el acero AISI/SAE 1045, el cual combina muy bien dureza y tenacidad, propiedades mecánicas muy necesarias para las piezas mecánicas.

**Bibliografía.**

- Norton, Robert L. Diseño de Máquinas. Prentice Hall. México, México.1999.
- Feirer, John. Trabajos en Metal. Organización Editorial Novaro S.A. México, México.1966.
- Moore, Harry D. y Kibbey, Donald R.. Materiales y Procesos de Fabricación. Editorial Limusa. México, México.1987.
- Parker, Charles M.. Metalurgia de los Aceros de Calidad. Aguilar S.A.de Ediciones. Madrid, España. 1951.
- Johnson y Weejs. Metalurgia. Editorial Reverté S.A.. Barcelona, España. 1961.
- Van Vlack, Lawrence H.. Tecnología de los Materiales. Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A.. México, México.1984.
- Jorochoilov , Víctor y Gordon, Jorge. Teoría y Tecnología del Tratamiento Térmico. La Habana, Cuba. 1988.
- Guliaev, A. P.. Metalografía tomo 2. Editorial Mir. Moscú, Rusia.1978.
- Kamenichny, I.. A short handbook of heat treatment. Mir Publishers. U.R.S.S., Moscow. 1980.
- Zúev, V. Trabajos de Laboratorio para la Capacitación de Termistas. Editorial Mir. Rusia, Moscú. 1986.
- Sturla, Antonio E. y Castellano, Enrique. Metalografía Microscópica. Librería y Editorial Alsina. Buenos Aires, Argentina. 1951.
- Martínez, F. y Gordon, J. Teoría y Tecnología del Tratamiento Térmico .Editorial Pueblo y Educación. La Habana, Cuba. 1985.
- Gordon, J. Tecnología del tratamiento térmico de los Aceros. Editorial pueblo y Educación. La Habana, Cuba. 1985.
- Apraiz, José. Tratamientos Térmicos del los Aceros. Editorial Dossat-Plaza. Madrid, España. 1974.
- Smith, William F. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. 1980.