



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

ACEROS GRADO HERRAMIENTA: SU CLASIFICACION,
SELECCION Y PRINCIPALES TRATAMIENTOS TERMICOS.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N:

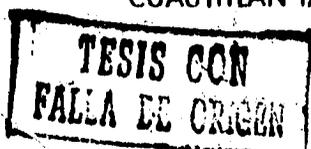
AGUIRRE QUIROZ BERNARDO
SANCHEZ MORALES JUAN CARLOS

ASESOR: ING. FELIPE DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ

COASESOR: M. EN I. ALBERTO REYES SOLIS

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1996



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR U. N. A. M.
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLAN

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FEB-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Caballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 29 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

Aceros grado herramienta: Su clasificación, selección y principales tratamientos térmicos.

que presenta el pasante Bernardo Aguirre Quiroz
con número de cuenta: 8440110-6 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista.

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuatitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 7 de Febrero de 1946

PRESIDENTE Ing. Samuel Pérez Díaz

VOCAL Ing. Manuel Burgos Bravo

SECRETARIO Ing. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez

PRIMER SUPLENTE Ing. Enrique Cortes González

SEGUNDO SUPLENTE Ing. Jesús García Lira.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR U. N. A. M.
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLAN

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

Aceros grado herramienta: Su clasificación, selección y principales tratamientos
técnicos.

que presenta el pasante: Juan Carlos Sánchez Morales
con número de cuenta: 8403097-3 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista.

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 7 de Febrero de 1996

PRESIDENTE	Ing. Samuel Pérez Díaz
VOCAL	Ing. Manuel Burgos Bravo
SECRETARIO	Ing. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez
PRIMER SUPLENTE	Ing. Enrique Cortes González
SEGUNDO SUPLENTE	Ing. Jesús García Lira

**Con gratitud inapreciable a la
FES-Cuautitlán UNAM, institución
que nos brindó la posibilidad de tener una
plataforma sólida de incalculable valor.**

**Con especial reconocimiento y agradecimiento al:
Ing. Alberto Reyes Solís, por su desinteresada ayuda
sin la cual no hubiera sido posible la realización de
este trabajo.**

**Con admiración y respeto al:
Ing. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez,
por su decidido y desinteresado apoyo
en la realización de este trabajo.**

Doy Gracias a Dios, por guiar mi camino.

**A mis padres: Nicolás Aguirre y Angelina Quiroz
Con cariño y especial agradecimiento porque
hicieron posible la terminación de mis estudios.**

**A mis hermanos: Por su ejemplo, comprensión,
amor y estímulos, gracias a todos.**

**A Oscar, Luis Fernando y José Luis:
por la amistad que hemos compartido.**

Dedico este trabajo a:

**A una persona muy especial, por su apoyo,
comprensión y cariño. Gracias por el constante
deseo de superación que me has inspirado.**

A Dios por todas sus bendiciones.

**Dedico este trabajo a Ma. Teresa Morales.
Mi más sincero agradecimiento y cariño por
su apoyo en mi formación profesional y personal.**

**A mi esposa Paty: por su amor,
comprensión e incondicional apoyo.**

**A todas aquellas personas que han creído en mí,
y que de alguna manera han influido en mi desarrollo
profesional. Siempre estaré comprometido en todas
las actividades de mi vida.**

ACEROS GRADO HERRAMIENTA: SU CLASIFICACIÓN, SELECCIÓN, Y PRINCIPALES TRATAMIENTOS TÉRMICOS.

INDICE

INTRODUCCION

Página

I. GENERALIDADES SOBRE LOS ACEROS.

I.1. LAS ALEACIONES HIERRO CARBONO.	1
I.2. MICROESTRUCTURAS DE LOS ACEROS AL CARBONO.	5
I.3. CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS ACEROS AL CARBONO.	18

II. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS.

II.1. GENERALIDADES SOBRE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS.	23
II.2. LOS PROCESOS DE RECOCIDO.	24
II.3. EL TEMPLE.	34
II.4. EL REVENIDO.	47
II.5. LOS DIAGRAMAS TTT.	50
II.6. LOS DIAGRAMAS CCT.	55

III. LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN EN LOS ACEROS PARA HERRAMIENTAS.

III.1. GENERALIDADES.	59
III.2. EFECTO DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN SOBRE EL DIAGRAMA DE EQUILIBRIO Fe-C.	60
III.3. EFECTO DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS RECOCIDOS.	68
III.4. EFECTO DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN SOBRE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE TEMPLE Y REVENIDO.	70

IV. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS GRADO HERRAMIENTA

IV.1. GENERALIDADES	87
IV.2. ACEROS PARA HERRAMIENTA AL CARBONO.	88
IV.3. ACEROS PARA HERRAMIENTA DE BAJA ALEACIÓN.	88
IV.4. ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA PROPÓSITOS ESPECIALES.	89
IV.5. ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN FRÍO.	89
IV.6. ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN CALIENTE.	91
IV.7. ACEROS PARA HERRAMIENTA DE ALTA VELOCIDAD.	94

V. SELECCIÓN DE LOS ACEROS GRADO HERRAMIENTA.	
V.1. GENERALIDADES.	101
V.2. SELECCIÓN DE ACUERDO A SU APLICACIÓN.	114
V.3. EJEMPLOS DE SELECCIÓN DE ACEROS PARA HERRAMIENTA.	124
VI. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS PARA HERRAMIENTA.	
VI.1. GENERALIDADES.	130
VI.2. PRINCIPIOS QUE CONTROLAN EL CALENTAMIENTO.	137
VI.3. PRINCIPIOS QUE CONTROLAN EL ENFRIAMIENTO.	143
VI.4. EQUIPO Y PROCEDIMIENTOS.	145
VII. MICROESTRUCTURA DE LOS ACEROS PARA HERRAMIENTA TIPO D2 DE FABRICACIÓN NACIONAL.	
VII.1. GENERALIDADES.	166
VII.2. ACEROS PARA HERRAMIENTA TIPO D2 EN ESTADO RECOCIDO.	170
VII.3. ACEROS PARA HERRAMIENTA TIPO D2 TEMPLADOS Y REVENIDOS.	170
VII.4. PRACTICA	176
CONCLUSIONES	185
BIBLIOGRAFÍA	187
ANEXOS	189

INTRODUCCIÓN:

El desarrollo industrial de estos últimos años ha multiplicado la necesidad de herramientas, creándose tipos especiales para cada trabajo, con características de dureza, tenacidad, indeformabilidad, etc., cada vez más elevadas. Actualmente se fabrican aceros adecuados para toda clase de herramientas, desde las más sencillas, como son las herramientas agrícolas o las de carpintería, hasta las cuchillas de acero rápido para máquinas herramientas. El mejor conocimiento de los tipos de aceros para herramientas que se fabrican actualmente y de sus características, es absolutamente indispensable para lograr mejores tiempos de fabricación, mayores rendimientos en la producción y una más alta productividad en la industria.

Consideramos que el uso inadecuado de un acero, origina al fabricante de herramientas una gran dificultad y requiere la mayor atención de simplificación. En esta tesis se pretende describir un método simplificado y accesible para la selección de un acero para la fabricación de herramientas. Es simple, porque se refiere enteramente a las herramientas y su uso, hechos que conoce el fabricante de herramientas y no requiere prácticamente de ningún conocimiento de los aceros para herramientas. Con este método se puede seleccionar un acero para herramientas que nunca se haya usado con anterioridad y encontrar los resultados que se requieren.

El trabajo de investigación contempla, el empleo de técnicas de clasificación así como de la selección de acuerdo a su aplicación y los principales tratamientos térmicos a los cuales se someten los aceros herramienta.

I. GENERALIDADES SOBRE LOS ACEROS

I.1 LAS ALEACIONES HIERRO-CARBONO.

Esencialmente, el acero es una aleación de dos elementos: el hierro y el carbono, pero dentro de este tipo de aleaciones, tenemos una variedad muy amplia de productos utilizados en la industria como son: hierros dulces, fundiciones de hierro, aceros al carbono y aceros aleados. El hierro en combinación con el carbono en porcentajes apropiados, además de porciones variables de manganeso y silicio, lo mismo que pequeñas cantidades de fósforo y azufre, así como otros elementos de aleación forman la gama de todos estos productos.

Las propiedades de los aceros que emplea la industria dependen, sobre todo, de la naturaleza y componentes secundarios. El valor del mineral, aparte su riqueza en hierro, es función precisamente de la cantidad que contengan de dichos elementos, la cual influye además en el tratamiento metalúrgico del mineral. Estos componentes secundarios podemos clasificarlos como: elementos de aleación e impurezas en los aceros.

Principales Elementos de Aleación en los Aceros:

- Carbono: El carbono es fundamental en los aceros. Determina la dureza, la resistencia y ductilidad del metal. Su efecto sobre estas propiedades puede variar ampliamente con el tratamiento térmico. Los efectos del carbono son efectivos sólo en secciones pequeñas.

Cuando se requieren durezas y resistencias homogéneas en toda la sección transversal de una pieza, es necesario que el acero sea aleado con otros elementos para que la templabilidad sea total. Un acero al carbono sin otra aleación tiene una profundidad de temple de unos 12 milímetros, como máximo, aunque se trate de porcentaje elevado.

- Silicio: El silicio es un refortalecedor de la ferrita, elevando la resistencia sin sacrificar ductilidad y tenacidad, cuando los porcentajes llegan hasta el 1.0%. Ordinariamente se considera el silicio como un desoxidante en la obtención del acero.

El silicio aumenta la resistividad eléctrica, teniendo grandes aplicaciones en circuitos magnéticos de corriente alterna, además retarda la cementación, ayuda al crecimiento de grano y reduce la profundidad de temple.

- Manganeso: El manganeso aumenta la resistencia a la tracción y mejora la relación de límite elástico a la resistencia a la tracción en todos los tipos de aceros. El manganeso aumenta la penetración de temple (dureza), siendo éste un índice de su eficacia como elemento de aleación. Así mismo actúa como desulfurante y desoxidante en la obtención del acero.

- Níquel: El níquel es soluble en la ferrita y la fortalece, mejora las propiedades del acero bruto de laminación, en cuanto a estiración, resiliencia y alargamiento. Se caracteriza por su tenacidad, en el tratamiento térmico disminuye las temperaturas de temple, retarda el crecimiento de grano, aumenta la resistencia a la oxidación, etc.

- Cromo: El cromo es un elemento formador de carburos, fortalece a la ferrita y aumenta la dureza, tenacidad y resistencia a la tracción de los aceros. El cromo reduce la velocidad de temple, disminuye el crecimiento del grano, retarda la descarburización periférica, da mayor profundidad a la dureza y aumenta la resistencia a la oxidación.

- Molibdeno: Es un formador de carburos, aleado con el carbono incrementa la templabilidad y la resistencia a la tracción a diversas temperaturas. El molibdeno es uno de los elementos que más favorece al tratamiento térmico. Combinado con cromo y níquel hace que el mecanizado del acero se facilite.

Vanadio: Este elemento de aleación en los aceros promueve el afino de grano, así como una mejor respuesta al tratamiento térmico. Además es buen desoxidante, aumenta la resistencia al choque, a la fatiga, a la abrasión y la resistencia a la tracción sin disminuir sensiblemente la ductilidad.

- Tungsteno: Es uno de los elementos de los aceros rápidos, ayudando a mantener una estabilidad estructural, a elevadas temperaturas lo que permite conservar una arista de corte en las herramientas, aunque estas se recalienten. El efecto del tungsteno es similar al del molibdeno, aunque se requieren mayores cantidades.

Impurezas del Acero:

- Azufre: En cantidades superiores al 0.12 % el azufre hace que los aceros sean frágiles en procesos de forja o laminación. El manganeso combinándose con el azufre elimina este efecto en los aceros.

- **Fósforo:** Las últimas investigaciones han demostrado que porcentajes hasta del 0.08% no son perjudiciales en la mayoría de las veces. Mayores porcentajes en los aceros al carbono, producen fragilidad en frío. El cromo y el cobre aumentan la tolerancia para el fósforo.

El fósforo actúa en el acero como el carbono, dando aumento de resistencia, dureza y límite elástico y disminuyendo la ductilidad. En consecuencia los aceros con bajos contenidos de carbono, toleran mejor los contenidos en fósforo. En algunos aceros de corte rápido, al igual que el azufre, el fósforo eleva la resistencia al desgaste y mejora la maquinabilidad.

- **Oxígeno:** Se encuentra en el acero en forma de silicatos o de óxidos. Los efectos de envejecimiento en los aceros con bajo contenido de carbono, se cree que son producidos por el oxígeno o por el nitrógeno. El aluminio elimina los efectos nefastos del oxígeno en el acero.

- **Arsénico:** Su presencia en los aceros es debida por contaminación. En los aceros al cromo-níquel tratados, la presencia de cantidades insignificantes de arsénico produce una fuerte pérdida de tenacidad. Este efecto es prácticamente nulo en los aceros al cromo-molibdeno. En los aceros al carbono el arsénico es más tolerable, llegando hasta porcentajes del 0.50%. El arsénico en los aceros provoca efectos de envejecimiento y reduce la tenacidad a bajas temperaturas.

- **Hidrógeno:** Este elemento se encuentra en casi la mayoría de los aceros en porcentajes de 0.0003% y aún menores. El hidrógeno es el que provoca las grietas de forja, copos o manchas brillantes y también la fragilidad que a veces se produce como consecuencia del uso de ácidos y otros compuestos químicos en la elaboración del acero.

I.2 MICROESTRUCTURAS DE LOS ACEROS AL CARBONO.

El hierro es un metal alotrópico, lo cual significa que presenta más de una estructura cristalina, dependiendo de la temperatura. Estas transformaciones de fase se muestran en la figura 1.1

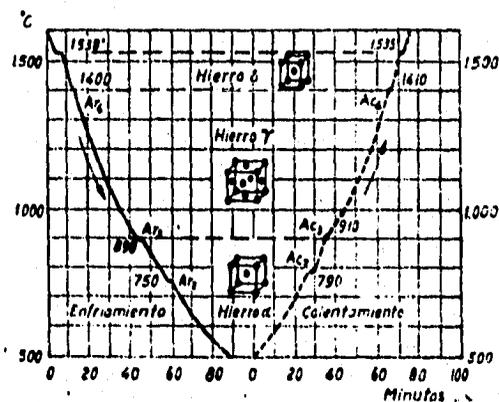


FIG. 1.1 CURVAS DE ENFRIAMIENTO Y CALENTAMIENTO DEL HIERRO PURO.

La curva de enfriamiento de la fig. 1.1 muestra de arriba a abajo, que el hierro solidifica a 1538°C, cristalizando en una red cúbica centrada en el cuerpo (BCC), esta fase es estable hasta los 1400°C y se conoce como hierro delta (δ). A la temperatura de 1400°C se lleva a cabo la primera recristalización, la red (BCC) se transforma en una red cúbica centrada en las caras (FCC); esta fase es estable desde los 1400°C hasta los 898°C y se le conoce como hierro gamma (γ).

A la temperatura de 898°C se lleva a cabo una segunda recristalización, la red (FCC) se transforma en una red cúbica centrada en el cuerpo (BCC); esta fase es estable hasta una temperatura ambiente y se le conoce como hierro alfa (α).

A los 770°C se presenta otro cambio, pero no de tipo alotrópico, si no un cambio a nivel atómico que se refleja en una modificación en las propiedades magnéticas del hierro; siendo éste por arriba de los 770°C no magnético (paramagnético), y por debajo magnético (ferromagnético). La diferencia entre A_{r3} (curva de enfriamiento) y A_{c3} (curva de calentamiento) de la gráfica 1.1, se llama histeresis térmica, siendo sobre todo la transformación en enfriamiento la que está retardada y ocurre siempre con un subenfriamiento.

Durante las diferentes transformaciones que sufre el hierro, la mayoría de las propiedades físicas como densidad, coeficiente de dilatación térmica, capacidad de conducción, etc., experimentan un cambio brusco. Sin embargo, el más importante es el de la solubilidad de la mayoría de los elementos de aleación, principalmente el del carbono. Siendo esto la base de la técnica de los tratamientos térmicos del acero.

El carbono puede encontrarse en las aleaciones hierro-carbono en 3 formas diferentes: Como solución sólida intersticial, en forma elemental como grafito; y en forma de compuesto como carburo de hierro (Fe, C).

Diagrama de Equilibrio. Hierro-Carburo de Hierro (Fe-Fe₃C).

Este diagrama es de los más importantes y utilizados en ingeniería y en la industria, tanto para el estudio de los aceros y fundiciones como para su fabricación.

Es importante hacer notar que éste no es un verdadero diagrama de equilibrio, pues el equilibrio implica que no hay cambio de fase con el tiempo; sin embargo, es un hecho que el compuesto carburo de hierro se descompondrá en hierro y carbono (grafito), el carburo de hierro se llama fase metaestable y aunque técnicamente representa condiciones metaestables, puede considerarse como representante de cambios en equilibrio, bajo condiciones de calentamiento y enfriamiento relativamente lentos. En aceros, solamente existe el sistema metaestable, mientras que en las fundiciones pueden coexistir el sistema estable (hierro-grafito) y el metaestable (hierro-carburo de hierro), en proporciones que dependen mucho de la velocidad de enfriamiento y de la presencia de ciertos elementos de aleación.

Para los aceros sólo consideraremos el diagrama metaestable. En éste se muestran los cambios de fase que ocurren en estado sólido durante las transformaciones que sufre el acero al variar la temperatura.

El diagrama Fe-Fe₃C, figura 1.2, se divide en un cierto número de campos de fases, cada uno ocupado por una sola fase o una mezcla de dos fases. la curva ABCD es la línea de liquidus, sobre la cual sólo hay una fase líquida consistiendo de hierro y carbono disueltos. La curva AEPGCH es la línea de solidus, bajo la cual las distintas aleaciones Fe-C se encuentran completamente sólidas. Las regiones entre esas dos líneas representan mezclas de sólido y líquido.

Debido a las tres variedades alotrópicas del hierro (α , γ y δ), las aleaciones hierro-carbono conservan esta nomenclatura y son capaces de disolver cierta cantidad de carbono, la cual varía de acuerdo a la temperatura. La solución sólida de hierro alfa recibe el nombre de ferrita, mientras que la solución sólida de carbono en hierro gamma recibe el nombre de austenita. La austenita es capaz de disolver más carbono que la ferrita, puede contener hasta 2.11 %C (punto G), mientras que la ferrita puede disolver hasta 0.025 %C (punto L). La solubilidad del carbono cambia con la temperatura, tanto en la austenita, como en la ferrita, lo cual se indica por las curvas GK para la austenita, y LI para la ferrita. A temperatura ambiente la ferrita disuelve solamente 0.008%C.

La tercer fase sólida que existe en el diagrama es la cementita, siendo un compuesto intermetálico con una composición de Fe₃C, que corresponde al 6.69% en peso de carbono. La cementita es dura y frágil, mientras que la ferrita es relativamente suave y maleable. La pequeña zona de existencia de la fase delta (δ) está separada de la zona de fase líquida y de la zona gamma (γ), por las zonas bifásicas AEB (Líquido + δ) y EFP (γ + δ), respectivamente.

Las transformaciones de una fase sólida en otra, como por ejemplo de la austenita a la ferrita o a la cementita, tienen lugar a ciertas temperaturas críticas indicadas en el diagrama por las líneas LKM, IK y GK. Esas líneas generalmente se designan por las letras A₁ (llamada línea de temperatura crítica inferior) y A₃ y A_{cm}, (llamadas líneas de temperaturas críticas superiores). Estas líneas representan las temperaturas de transición, tanto hacia arriba, como hacia abajo, que ocurren en condiciones de equilibrio.

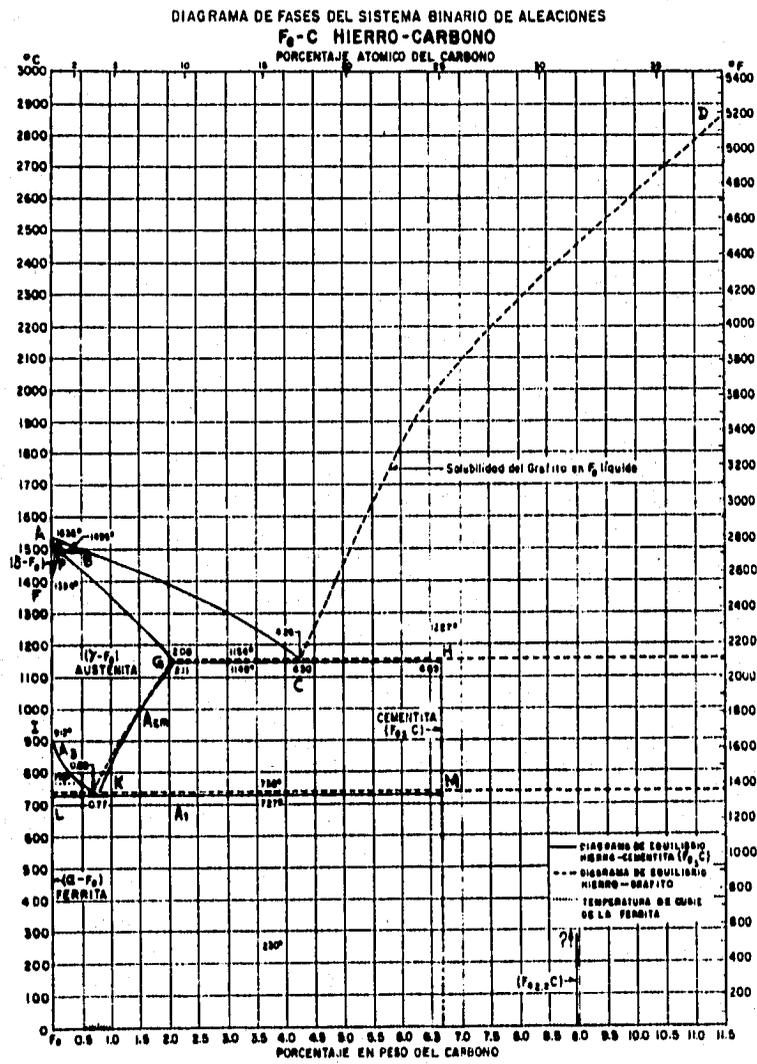


FIG. 1.2 DIAGRAMA DE EQUILIBRIO. HIERRO - CARBURO DE HIERRO.

Del diagrama de equilibrio podemos ver que existen puntos importantes, en los que se llevan a cabo reacciones entre fases:

a) Una reacción peritética ocurre a 1495°C entre la fase δ , conteniendo $0.10\% \text{C}$, y el líquido conteniendo $0.51\% \text{C}$, dando como resultado fase γ y conteniendo $0.16\% \text{C}$.

b) Una reacción eutéctica ocurriendo a 1148°C y una composición de $4.3\% \text{C}$. A esta temperatura y composición, la fase líquida está en equilibrio con la fase sólida cementita, con $6.69\% \text{C}$ y austenita saturada conteniendo $2.11\% \text{C}$. El producto de esta reacción se conoce como ledeburita.

c) Una reacción eutectoide ocurriendo a 727°C y a una composición de $0.77\% \text{C}$. Esta reacción se lleva a cabo en el estado sólido. Aquí la fase γ conteniendo $0.77\% \text{C}$ se encuentra en equilibrio con la fase α , conteniendo $0.025\% \text{C}$ y con la fase cementita con $6.69\% \text{C}$. El producto de esta reacción se conoce como perlita.

Las aleaciones hierro-carbono independientemente de los elementos de aleación, se pueden clasificar según su contenido de carbono en:

- Aceros: hasta 2.11% de carbono.
- Fundiciones: más de 2.11% y hasta 6.69% de carbono.

Los aceros, en relación a su posición con el diagrama de fases, se clasifican en:

- A) Eutectoides con 0.77 %C.
- B) Hipoeutectoides y C) Hipereutectoides.

En cuanto a la relación existente entre el contenido de carbono y la dureza, podemos clasificarlos como:

- Acero muy suave: % C < 0.10 %C
- Acero suave: 0.10% - 0.25 %C
- Acero medio-suave: 0.25% - 0.40 %C
- Acero medio-duro: 0.40% - 0.60 %C
- Acero duro: 0.60% - 1.00 %C
- Acero extra-duro: 1.00% < % C

MICROESTRUCTURA DE LOS ACEROS.

A continuación se hace una descripción de las principales estructuras metalográficas que se encuentran en los aceros, ya sea por enfriamiento lento en condiciones de equilibrio o por tratamiento térmico en condiciones fuera de equilibrio.

a) Ferrita.

Si examinamos el diagrama hierro-carburo de hierro fig. 1.2, veremos que la estructura de la ferrita consiste prácticamente en hierro puro, la cual a temperatura ambiente, es una solución sólida de tipo intersticial de carbono en hierro α , con una solubilidad límite de aproximadamente 0.008 %.

Disuelve como máximo 0.025 %C a la temperatura eutéctico de 727°C. Es la estructura más suave que aparece en el diagrama. Las propiedades promedio son: resistencia tensil, 40 000 lb/pulg²; elongación, 40% en 2 pulg.; dureza, menor que la Rockwell C 0 o que la Rockwell B 90.

b) Perlita.

Es el producto de la reacción eutéctico ocurriendo bajo condiciones de equilibrio a una temperatura de 727°C y una composición de 0.77 %C, los reactantes son la ferrita (0.025 %C) y la cementita (6.69 %C), y por otra parte la austenita con 0.77 %C. La estructura perlítica consiste de laminillas delgadas alternas de cementita y ferrita, denominándose este tipo de estructura como perlita laminar.

En aceros al carbono se presenta una estructura totalmente perlítica únicamente cuando la composición es la del punto eutéctico. En los aceros hipoeutécticos la estructura consiste de áreas de perlita rodeada de áreas de ferrita. En los aceros hipereutécticos un enfriamiento desde la zona austenítica, provoca la formación de cierta cantidad de cementita proeutéctico, antes que la perlita aparezca, quedando la parte formada por los límites de grano con una red continua de cementita mientras que el interior de los granos se transformaran completamente en perlita, cuando continúa el enfriamiento por debajo de los 727°C. Las propiedades promedio son: resistencia tensil, 120 000 lb/pulg²; elongación, 20% en 2 pulg.; dureza, Rockwell C 20, Rockwell B 95-100.

c) Cementita.

La cementita es un compuesto de hierro y carbono, duro y frágil, conteniendo 6.69 %C correspondiendo esto a la composición en porcentaje en peso de Fe, C.

En los aceros al carbono la cementita se encuentra de varias formas dentro de la fase principal; como red continua en los límites de grano con el interior formado por perlita, o también la podemos tener en una forma esférica en una matriz ferrítica. En los aceros aleados, la cementita en combinación con otros carburos formados por los elementos de aleación producen partículas extremadamente duras y resistentes a la abrasión. Es un compuesto intersticial duro y frágil de baja resistencia tensil: 5 000 lb/pulg², pero de alta resistencia compresiva.

d) Austenita.

Es una solución sólida de carbono en hierro γ . Esta fase se extiende sobre una gran sección del diagrama Fe-Fe₃C, con la solubilidad del carbono aumentando con la temperatura a un máximo de 2.11 %C a 1148°C. También del diagrama se observa que la austenita no existe a temperatura ambiente, para aceros al carbono, bajo condiciones de equilibrio. En ciertos aceros aleados, como en el caso de los aceros de herramientas, una pequeña porción de austenita puede retenerse en la estructura final. Las propiedades promedio son: resistencia tensil, 150 000 lb/pulg², elongación, 10% en 2 pulg., dureza, Rockwell C 40, y tenacidad alta.

e) Martensita.

Con rapidez de enfriamiento más allá de lentas y moderadas para un acero, no hay tiempo suficiente para que se difunda de la solución. La estructura resultante se le llama martensita, es una solución sólida sobresaturada de carbono atrapado en una estructura tetragonal centrada en el cuerpo. La martensita es el constituyente más importante en los aceros. Es un constituyente metaestable obtenido a partir de la transformación de la austenita, dependiendo su dureza (y fragilidad) del porcentaje de carbono hasta 0.9 %C.

La transformación de martensita es sin difusión y no hay cambio en la composición química, ésta se verifica durante el enfriamiento y cesa si éste se interrumpe y es independiente del tiempo. La temperatura de inicio de la formación de martensita se conoce como temperatura M_s y la del final de formación como M_f . La transformación de martensita de una aleación dada no puede eliminarse, ni la temperatura M_s modificarse al cambiar la rapidez de enfriamiento.

La figura 1.3 muestra la influencia del carbono en las temperaturas M_s y M_f . La línea M_f se muestra punteada, ya que por lo general no está claramente definida. La martensita después del temple es relativamente frágil y sin ductilidad, por lo tanto es necesario un subsecuente tratamiento térmico (revenido) para mejorar sus propiedades mecánicas. La dureza de la martensita varía desde 60 Rockwell C para 0.40% de carbono hasta 65 Rockwell C para 0.85% de carbono.

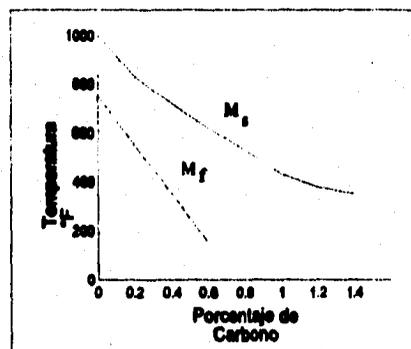


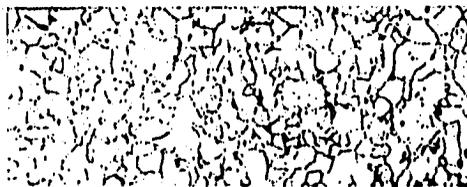
FIG. 1.3 INFLUENCIA DEL CARBONO SOBRE EL INTERVALO DE MARTENSITA.
(TOMADA DEL METAL HANDBOOK).

f) Bainita.

La Bainita es el producto de la descomposición de la austenita, consistiendo de un agregado de ferrita y carburo, puede considerarse como una perlita muy fina. Esta estructura se forma en el rango de temperaturas entre los 540°C y la temperatura M_s (inicio de la martensita). Debido a que las laminillas de carburo y ferrita son cada vez más finas, la dureza de la bainita es mayor que la de la perlita, aumentando entre más fina sea la bainita.

La microestructura de un acero se deduce de una observación del diagrama de equilibrio y de un conocimiento de la transformación de la austenita. Así, se determina que un acero hipoeutectoide se compone de ferrita más perlita, un acero eutectoide únicamente de perlita, y un acero hipereutectoide de perlita más cementita. La dureza de la bainita varía desde 40 a 60 Rockwell C.

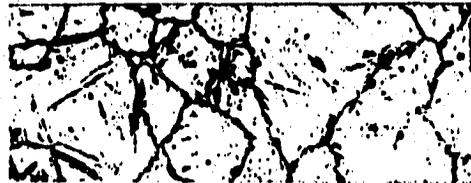
FIG. 1.4 DIFERENTES ESTRUCTURAS METALOGRAFICAS.



CRISTALES DE FERRITA EN UN ACERO DE 0.05% DE CARBONO. (VILELLA.)



CRISTALES DE FERRITA Y PERLITA EN UN ACERO DE 0.35% DE CARBONO RECOCIDO. (VILELLA)



**CRISTALES BLANCOS DE PERLITA Y RETICULA NEGRA DE CEMENTITA EN UN ACERO DE UN ACERO
1.10% DE CARBONO RECOCIDO**



CRISTALES DE AUSTENITA. x 500 (VILELLA)



AGUIAS DE MARTENSITA SOBRE UN FONDO BLANCO DE AUSTENITA. x 1000.



BAINITA ACICULAR DE ASPECTO ARBORECENTE, OBTENIDA POR LA PARCIAL TRANSFORMACION DE UN ACERO DE 0.90% DE C. A 290°C.

1.3 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS ACEROS.

Debido a la situación geográfica de México, se emplea la clasificación (por composición química) de los aceros emitida por los organismos "American Iron and Steel institute" (AISI) y de la "Society of Automotive Engineers" (SAE) las cuales se han considerado como normas reconocidas mundialmente.

La tabla 1.1 se muestra una breve descripción de algunos aceros bajo normas AISI.

TABLA 1.1

NUMERO AISI	CONTENIDO MEDIO DE ALEANTES %
10 XX	ACEROS AL CARBONO: BÁSICO DE HOGAR ABIERTO Y BESSEMER ÁCIDOS.
11 XX	ACEROS AL CARBONO: BÁSICO DE HOGAR ABIERTO Y BESSEMER ÁCIDOS,
12 XX	ACEROS AL CARBONO DE HOGAR ABIERTO, AZUFRE ALTO, FÓSFORO ALTO.
13 XX	MANGANESO 1.75 (Mn).
31 XX	NÍQUEL 1.25 (Ni) y CROMO 0.65 (Cr).
40 XX	MOLIBDENO 0.20 o 0.25 (Mo).
41 XX	CROMO 0.80 (Cr), MOLIBDENO 0.20 (Mo) y COBRE <0.35 (Cu).
43 XX	NÍQUEL 1.83 (Ni), CROMO 0.80 (Cr), MOLIBDENO 0.25 (Mo) y COBRE
51 XX	CROMO 0.80, 0.88, 0.93 o 1.00 (Cr).
61 XX	CROMO 0.90 (Cr) y VANADIO 0.13 o 0.15 (V).
86 XX	NÍQUEL 0.55 (Ni), CROMO 0.50 (Cr) y MOLIBDENO 0.20 (Mo).
87 XX	NÍQUEL 0.55 (Ni), CROMO 0.50 (Cr), MOLIBDENO 0.25 (Mo) y COBRE <0.35 (Cu)
92 XX	SILICIO 2.00 (Si) y COBRE <0.35 (Cu).
94 XX	NÍQUEL 0.45 (Ni), CROMO 0.40 (Cr), MOLIBDENO 0.12 (Mo) y COBRE

En la tabla anterior se puede notar que para identificar cualquier acero se cuentan con cuatro cifras y en algunos casos con cinco, en donde las dos primeras se refieren a los aleantes que contienen dichos aceros y las dos o tres siguientes se refiere al contenido de carbono en donde un punto es igual a una centésima por ciento. Además de esta clasificación para aceros (al carbono y aleados), existen otros tipos de acero muy utilizados en la industria; llamados "aceros herramienta" y "para propósitos especiales" de los que se hablará más adelante. A continuación se muestran las tablas de aceros de construcción, bajo las normas SAE-AISI.

US-Norma		Análisis										US-Norma		Análisis									
AISI (E=desc. (resaca))	SAE	C %	Si %	Mn %	P % máx.	S % máx.	Cr %	Mo %	Ni %	Otros elementos %	AISI (E=desc. (resaca))	SAE	C %	Si %	Mn %	P % máx.	S % máx.	Cr %	Mo %	Ni %	Otros elementos %		
C 1010	1010	0,08-0,13	< 0,10	0,30-0,60	0,04	0,05					3150	3150	0,45-0,53	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04	0,70-0,90		1,10-1,40			
C 1015	1015	0,13-0,19	< 0,10	0,30-0,60	0,04	0,05					F 3310	3310	0,08-0,13	0,20-0,35	0,45-0,60	0,025	0,025	1,40-1,75		3,25-3,75			
C 1020	1020	0,17-0,24	0,10-0,20	0,30-0,60	0,04	0,05					E 3316	3316	0,14-0,19	0,20-0,35	0,45-0,60	0,025	0,025	1,40-1,75		3,25-3,75			
C 1025	1025	0,21-0,28	0,20-0,30	0,30-0,60	0,04	0,05					4017	4017	0,13-0,20	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04			0,20-0,30			
C 1030	1030	0,27-0,35	0,20-0,35	0,60-0,90	0,04	0,05					4023	4023	0,20-0,25	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04			0,20-0,30			
C 1034	1034	0,31-0,39	0,20-0,35	0,50-0,80	0,04	0,05					4024	4024	0,20-0,25	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,05			0,20-0,30			
C 1040	1040	0,36-0,45	0,20-0,35	0,60-0,90	0,04	0,05					4027	4027	0,25-0,30	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04			0,20-0,30			
C 1045	1045	0,42-0,51	0,20-0,35	0,60-0,90	0,04	0,05					4028	4028	0,25-0,30	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,05			0,20-0,30			
C 1050	1050	0,47-0,56	0,20-0,35	0,60-0,90	0,04	0,05					4032	4032	0,30-0,35	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04			0,20-0,30			
C 1055	1055	0,50-0,60	0,20-0,35	0,60-0,90	0,04	0,05					4037	4037	0,35-0,40	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04			0,20-0,30			
C 1060	1060	0,54-0,66	0,20-0,35	0,60-0,90	0,04	0,05					4042	4042	0,40-0,50	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04			0,20-0,30			
C 1065	1065	0,59-0,71	0,20-0,35	0,60-0,90	0,04	0,05					4047	4047	0,45-0,50	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04			0,20-0,30			
C 1070	1070	0,64-0,76	0,20-0,35	0,60-0,90	0,04	0,05					4053	4053	0,50-0,56	0,20-0,35	0,75-1,00	0,04	0,04			0,20-0,30			
C 1109	1109	0,08-0,13	< 0,10	0,60-0,90	0,04	0,13					4063	4063	0,60-0,67	0,20-0,35	0,75-1,00	0,04	0,04			0,20-0,30			
B 1111	1111	< 0,13	< 0,10	0,60-0,90	0,12	0,13					4068	4068	0,63-0,70	0,20-0,35	0,75-1,00	0,04	0,04			0,20-0,30			
B 1112	1112	< 0,13	< 0,10	0,70-1,00	0,12	0,23					4118	---	0,18-0,23	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04	0,40-0,60		0,04-0,15			
B 1113	1113	< 0,13	< 0,10	0,70-1,00	0,12	0,33					---	4119	0,17-0,22	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04	0,40-0,60	0,20-0,30				
C 1114	1114	0,10-0,16	< 0,20	1,00-1,30	0,04	0,13					4130	4130	0,28-0,33	0,20-0,35	0,40-0,60	0,04	0,04	0,30-1,10	0,15-0,25				
C 1115	1115	0,13-0,18	< 0,20	0,60-0,90	0,04	0,13					TS 4130	---	0,28-0,33	0,20-0,35	0,45-0,65	0,04	0,04	0,30-1,20	0,08-0,13				
C 1116	1116	0,14-0,20	< 0,20	1,10-1,40	0,04	0,13					---	4132	0,30-0,35	0,20-0,35	0,45-0,65	0,04	0,04	0,30-1,20	0,08-0,13				
C 1117	1117	0,14-0,20	< 0,20	1,00-1,30	0,04	0,13					E 4132	---	0,30-0,35	0,20-0,35	0,40-0,60	0,025	0,025	0,30-1,10	0,10-0,25				
C 1118	1118	0,14-0,20	< 0,20	1,10-1,40	0,04	0,13					E 4135	---	0,33-0,38	0,20-0,35	0,70-0,90	0,025	0,025	0,30-1,10	0,10-0,25				
C 1119	1119	0,14-0,20	< 0,20	1,10-1,40	0,04	0,13					E 4137	4137	0,35-0,40	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04	0,30-1,10	0,15-0,25				
C 1120	1120	0,18-0,23	< 0,20	0,70-1,00	0,04	0,13					TS 4137	---	0,35-0,40	0,20-0,35	0,75-1,00	0,04	0,04	0,30-1,20	0,08-0,13				
C 1125	1125	0,23-0,29	< 0,20	0,70-1,00	0,04	0,13					E 4137	---	0,35-0,40	0,20-0,35	0,75-1,00	0,025	0,025	0,30-1,10	0,10-0,25				
C 1132	1132	0,27-0,34	< 0,20	1,15-1,65	0,04	0,17					4140	4140	0,38-0,43	0,20-0,35	0,75-1,00	0,04	0,04	0,30-1,10	0,15-0,25				
C 1137	1137	0,32-0,39	< 0,20	1,15-1,65	0,04	0,17					TS 4140	---	0,38-0,43	0,20-0,35	0,80-1,05	0,04	0,04	0,30-1,20	0,08-0,13				
C 1138	1138	0,34-0,40	< 0,20	0,70-1,00	0,04	0,13					4142	---	0,40-0,45	0,20-0,35	0,75-1,00	0,04	0,04	0,30-1,10	0,15-0,25				
C 1140	1140	0,37-0,44	< 0,20	0,70-1,00	0,04	0,13					TS 4142	---	0,40-0,45	0,20-0,35	0,80-1,05	0,04	0,04	0,30-1,20	0,08-0,13				
C 1141	1141	0,37-0,45	< 0,20	1,15-1,65	0,04	0,17					4145	4145	0,43-0,48	0,20-0,35	0,75-1,00	0,04	0,04	0,30-1,10	0,15-0,25				
C 1144	1144	0,40-0,48	< 0,20	1,15-1,65	0,04	0,17					TS 4145	---	0,43-0,48	0,20-0,35	0,80-1,05	0,04	0,04	0,30-1,20	0,08-0,13				
1320	1320	0,18-0,23	0,20-0,35	1,60-1,90	0,04	0,04					4147	---	0,45-0,50	0,20-0,35	0,75-1,00	0,04	0,04	0,30-1,10	0,15-0,25				
1321	1321	0,17-0,22	0,20-0,35	1,80-2,10	0,03	0,05					4150	4150	0,48-0,53	0,20-0,35	0,75-1,00	0,04	0,04	0,30-1,10	0,15-0,25				
1330	1330	0,28-0,33	0,20-0,35	1,60-1,90	0,04	0,04					TS 4150	---	0,48-0,53	0,20-0,35	0,80-1,05	0,04	0,04	0,30-1,20	0,08-0,13				
1335	1335	0,33-0,38	0,20-0,35	1,60-1,90	0,04	0,04					4317	4317	0,15-0,20	0,20-0,35	0,45-0,65	0,04	0,04	0,40-0,60	0,20-0,30	1,65-2,00			
1340	1340	0,38-0,43	0,20-0,35	1,60-1,90	0,04	0,04					4320	---	0,17-0,22	0,20-0,35	0,45-0,65	0,04	0,04	0,40-0,60	0,20-0,30	1,65-2,00			
1343	1343	0,43-0,48	0,20-0,35	1,60-1,90	0,04	0,04					4337	---	0,15-0,20	0,20-0,35	0,60-0,80	0,04	0,04	0,70-0,90	0,20-0,30	1,65-2,00			
2117	2117	0,15-0,20	0,20-0,35	0,40-0,60	0,04	0,04					4340	4340	0,38-0,43	0,20-0,35	0,60-0,80	0,04	0,04	0,70-0,90	0,20-0,30	1,65-2,00			
2330	2330	0,28-0,33	0,20-0,35	0,40-0,60	0,04	0,04					4608	4608	0,06-0,11	< 0,25	0,25-0,45	0,04	0,04			0,15-0,25	1,40-1,75		
2335	2335	0,33-0,38	0,20-0,35	0,60-0,80	0,04	0,04					4615	4615	0,10-0,15	0,10	0,10	0,04	0,04			0,20-0,30	1,65-2,00		
2340	2340	0,38-0,43	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04					E 4617	4617	0,15-0,20	0,20-0,35	0,45-0,65	0,025	0,025			0,20-0,27	1,65-2,00		
2345	2345	0,43-0,48	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04					4620	4620	0,17-0,22	0,20-0,35	0,45-0,65	0,04	0,04			0,20-0,30	1,65-2,00		
E 2512	2512	0,09-0,14	0,20-0,35	0,45-0,60	0,025	0,025					X 4620	X 4620	0,18-0,23	0,20-0,35	0,50-0,70	0,04	0,04			0,20-0,30	1,65-2,00		
E 2513	2513	0,12-0,17	0,20-0,35	0,40-0,60	0,04	0,04					F 4620	---	0,17-0,22	0,20-0,35	0,45-0,65	0,025	0,025			0,20-0,27	1,65-2,00		
E 2517	2517	0,15-0,20	0,20-0,35	0,45-0,60	0,025	0,025					4621	4621	0,18-0,23	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04			0,20-0,30	1,65-2,00		
3115	3115	0,13-0,18	0,20-0,35	0,40-0,60	0,04	0,04	0,55-0,75				4640	4640	0,38-0,43	0,20-0,35	0,60-0,80	0,04	0,04			0,20-0,30	1,65-2,00		
3120	3120	0,17-0,22	0,20-0,35	0,60-0,80	0,04	0,04	0,55-0,75				E 4640	---	0,38-0,43	0,20-0,35	0,60-0,80	0,025	0,025			0,20-0,27	1,65-2,00		
3130	3130	0,23-0,30	0,20-0,35	0,60-0,80	0,04	0,04	0,55-0,75				TS 4730	---	0,17-0,22	0,20-0,35	0,50-0,70	0,04	0,04	0,35-0,50	0,15-0,25	0,90-1,20			
3135	3135	0,33-0,38	0,20-0,35	0,60-0,80	0,04	0,04	0,55-0,75				4812	4812	0,10-0,15	0,20-0,35	0,40-0,60	0,04	0,04			0,20-0,30	1,25-1,75		
3140	3140	0,38-0,43	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04	0,55-0,75				4815	---	0,15-0,20	0,20-0,35	0,40-0,60	0,04	0,04			0,20-0,30	1,25-1,75		
3141	3141	0,38-0,43	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04	0,70-0,90				4817	---	0,15-0,20	0,20-0,35	0,40-0,60	0,04	0,04			0,20-0,30	1,25-1,75		
3145	3145	0,43-0,48	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04	0,70-0,90				4820	4820	0,18-0,23	0,20-0,35	0,50-0,70	0,04	0,04			0,20-0,30	1,25-1,75		

TABLA 1.2 ACEROS DE CONSTRUCCIÓN

US-Norms											US-Norms												
AISI (Equivalent)		Austenite									Other (Equivalent)	AISI (Equivalent)		Austenite									Other (Equivalent)
SAE	C %	Si %	Mn %	P % max.	S % max.	C %	Mn %	Ni %	Other %	SAE		C %	Si %	Mn %	P % max.	S % max.	C %	Mn %	Ni %	Other %			
5015	50150.12-0.17	0.20-0.35	0.30-0.50	0.04	0.30-0.50	0.04	0.30-0.50				81 B 50	0.47-0.55	0.20-0.35	0.75-1.05	0.04	0.35-0.60	0.08-0.15	0.20-0.40					
5045	50450.43-0.48	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.35-0.75	0.04	0.35-0.75				TS 8150	0.48-0.53	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.35-0.60	0.08-0.15	0.20-0.40					
5046	50460.43-0.50	0.35-0.75	1.00-0.04	0.04	0.20-0.35	0.04	0.20-0.35				TS 8155	0.51-0.58	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.35-0.60	0.08-0.15	0.20-0.40					
5120	51200.17-0.22	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.70-0.90	0.04	0.70-0.90				TS 8160	0.55-0.62	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.35-0.60	0.08-0.15	0.20-0.40					
5130	51300.28-0.33	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.80-1.10	0.04	0.80-1.10				TS 8165	0.60-0.70	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.35-0.60	0.08-0.15	0.20-0.40					
5132	51320.30-0.35	0.20-0.35	0.80-0.90	0.04	0.75-1.00	0.04	0.75-1.00				8615	0.13-0.18	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
5135	51350.33-0.38	0.20-0.35	0.80-0.90	0.04	0.80-1.05	0.04	0.80-1.05				TS 8615	0.13-0.18	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
5140	51400.38-0.43	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.70-0.90	0.04	0.70-0.90				8617	0.15-0.20	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
5145	51450.43-0.48	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.70-0.90	0.04	0.70-0.90				TS 8620	0.18-0.23	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
5147	51470.45-0.52	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.85-1.15	0.04	0.85-1.15				TS 8620	0.18-0.23	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
5150	51500.48-0.53	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.70-0.90	0.04	0.70-0.90				8622	0.22-0.25	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
5152	51520.48-0.55	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.80-1.20	0.04	0.80-1.20				TS 8622	0.20-0.25	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
5155	51550.50-0.55	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.70-0.90	0.04	0.70-0.90				8623	0.23-0.28	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
5160	51600.55-0.65	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.70-0.90	0.04	0.70-0.90				TS 8625	0.23-0.28	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
50100	50100.95-1.10	0.20-0.35	0.75-1.00	0.025	0.40-0.60	0.025	0.40-0.60				8627	0.25-0.30	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
51100	51100.95-1.10	0.20-0.35	0.75-1.00	0.025	0.40-0.60	0.025	0.40-0.60				TS 8627	0.25-0.30	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
52100	52100.95-1.10	0.20-0.35	0.75-1.00	0.025	0.40-0.60	0.025	0.40-0.60				8630	0.28-0.33	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
6117	61170.15-0.20	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.70-0.90	0.04	0.70-0.90		V > 0.10		TS 8630	0.28-0.33	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
6120	61200.17-0.22	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.70-0.90	0.04	0.70-0.90		V > 0.10		8632	0.30-0.35	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
6145	61450.41-0.48	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.80-1.10	0.04	0.80-1.10		V > 0.15		TS 8632	0.30-0.35	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
6150	61500.48-0.53	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.80-1.10	0.04	0.80-1.10		V > 0.15		8635	0.33-0.38	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
6152	61520.48-0.55	0.20-0.35	0.70-0.90	0.04	0.80-1.10	0.04	0.80-1.10		V > 0.10		TS 8635	0.33-0.38	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
80 B 20	80 B 200.17-0.23	0.20-0.35	0.45-0.70	0.04	0.15-0.35	0.03-0.15	0.20-0.40				8637	0.35-0.40	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
80 B 25	80 B 250.21-0.28	0.20-0.35	0.50-0.75	0.04	0.15-0.35	0.03-0.15	0.20-0.40				TS 8637	0.35-0.40	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
80 B 30	80 B 300.27-0.34	0.20-0.35	0.55-0.80	0.04	0.15-0.35	0.03-0.15	0.20-0.40				8640	0.38-0.43	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
80 B 35	80 B 350.32-0.39	0.20-0.35	0.65-0.95	0.04	0.15-0.35	0.03-0.15	0.20-0.40				TS 8640	0.38-0.43	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
80 B 40	80 B 400.37-0.45	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.15-0.35	0.03-0.15	0.20-0.40				8641	0.38-0.43	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
80 B 45	80 B 450.42-0.50	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.15-0.35	0.03-0.15	0.20-0.40				TS 8641	0.38-0.43	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
80 B 50	80 B 500.47-0.55	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.25-0.50	0.03-0.15	0.20-0.40				8642	0.40-0.45	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
80 B 55	80 B 550.50-0.60	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.30-0.55	0.03-0.15	0.20-0.40				TS 8642	0.40-0.45	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
80 B 60	80 B 600.55-0.65	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.30-0.55	0.03-0.15	0.20-0.40				8645	0.43-0.48	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
80 B 65	80 B 650.60-0.70	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.30-0.55	0.03-0.15	0.20-0.40				TS 8645	0.43-0.48	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
80 B 70	80 B 700.65-0.75	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.30-0.55	0.03-0.15	0.20-0.40				86 45	0.43-0.48	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
80 B 75	80 B 750.70-0.80	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.30-0.55	0.03-0.15	0.20-0.40				TS 8645	0.43-0.48	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
80 B 80	80 B 800.75-0.85	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.30-0.55	0.03-0.15	0.20-0.40				86 45	0.43-0.48	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
80 B 85	80 B 850.80-0.90	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.30-0.55	0.03-0.15	0.20-0.40				TS 8645	0.43-0.48	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
80 B 90	80 B 900.85-0.95	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.30-0.55	0.03-0.15	0.20-0.40				8647	0.45-0.50	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
80 B 95	80 B 950.90-1.00	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.30-0.55	0.03-0.15	0.20-0.40				TS 8647	0.45-0.50	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
80 B 100	80 B 1000.95-1.05	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.30-0.55	0.03-0.15	0.20-0.40				8650	0.48-0.53	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
81 B 15	81 B 150.32-0.39	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.30-0.55	0.03-0.15	0.20-0.40				TS 8650	0.48-0.53	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
81 B 20	81 B 200.35-0.42	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.30-0.55	0.03-0.15	0.20-0.40				8653	0.50-0.55	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
81 B 25	81 B 250.38-0.45	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.30-0.55	0.03-0.15	0.20-0.40				TS 8653	0.50-0.55	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
81 B 30	81 B 300.41-0.48	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.30-0.55	0.03-0.15	0.20-0.40				8655	0.50-0.55	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
81 B 35	81 B 350.44-0.51	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.30-0.55	0.03-0.15	0.20-0.40				TS 8655	0.50-0.55	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
81 B 40	81 B 400.47-0.54	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.30-0.55	0.03-0.15	0.20-0.40				8660	0.55-0.65	0.20-0.35	0.75-1.00	0.04	0.40-0.60	0.15-0.25	0.40-0.70					
81 B 45	81 B 450.50-0.57	0.20-0.35	0.70-1.00	0.04	0.30-0.55	0.03-0.15	0.20-0.40																

US-Norma		Análisis										Otras elementos %	US-Norma		Análisis										Otras elementos %
AISI (Especi- aciones)	SAE	C %	Si %	Mn %	P máx. máx.	S máx. máx.	Cr %	Mo %	Ni %	Zn %	AISI (Especi- aciones)		SAE	C %	Si %	Mn %	P máx. máx.	S máx. máx.	Cr %	Mo %	Ni %	Zn %			
8745	—	0,43-0,48	0,20-0,35	0,75-1,00	0,04	0,04	0,40-0,60	0,20-0,30	0,40-0,70	—	4621	H4621	H10,17-0,24	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	—	0,20-0,30	1,50-2,00	—	—	—		
8747	—	0,45-0,50	0,20-0,35	0,75-1,00	0,04	0,04	0,40-0,60	0,20-0,30	0,40-0,70	—	4640	H4640	H10,37-0,65	0,20-0,35	0,55-0,90	0,04	0,04	—	0,20-0,30	1,50-2,00	—	—	—		
8750	—	0,48-0,53	0,20-0,35	0,75-1,00	0,04	0,04	0,40-0,60	0,20-0,30	0,40-0,70	—	4812	H4812	H10,10-0,17	0,20-0,35	0,30-0,60	0,04	0,04	—	0,20-0,30	1,20-1,80	—	—	—		
9254	—	0,50-0,60	0,20-0,35	0,80-1,00	0,04	0,04	0,50-0,80	—	—	—	4813	H4813	H10,12-0,19	0,20-0,35	0,35-0,65	0,04	0,04	—	0,20-0,30	1,20-1,80	—	—	—		
9255	—	0,50-0,60	0,20-0,35	0,80-1,00	0,04	0,04	0,50-0,80	—	—	—	4817	H4817	H10,14-0,21	0,20-0,35	0,35-0,65	0,04	0,04	—	0,20-0,30	1,20-1,80	—	—	—		
9260	—	0,55-0,65	0,20-0,35	0,80-1,00	0,04	0,04	0,50-0,80	—	—	—	4820	H4820	H10,17-0,24	0,20-0,35	0,45-0,75	0,04	0,04	—	0,20-0,30	1,20-1,80	—	—	—		
9261	—	0,55-0,65	0,20-0,35	0,80-1,00	0,04	0,04	0,50-0,80	—	—	—	5120	H5120	H10,17-0,24	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	0,65-0,95	—	—	—	—	—		
9262	—	0,55-0,65	0,20-0,35	0,80-1,00	0,04	0,04	0,50-0,80	—	—	—	5130	H5130	H10,27-0,34	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	0,80-1,15	—	—	—	—	—		
E 9310	9310	0,08-0,13	0,20-0,35	0,45-0,65	0,025	0,025	1,00-1,40	0,08-0,15	1,00-1,50	—	5132	H5132	H10,28-0,35	0,20-0,35	0,50-0,85	0,04	0,04	0,70-1,05	—	—	—	—	—		
E 9314	—	0,11-0,17	0,20-0,35	0,40-0,70	0,025	0,025	1,00-1,40	0,08-0,15	1,00-1,50	—	5135	H5135	H10,32-0,39	0,20-0,35	0,55-0,85	0,04	0,04	0,75-1,10	—	—	—	—	—		
E 9315	9315	0,13-0,18	0,20-0,35	0,45-0,65	0,025	0,025	1,00-1,40	0,08-0,15	1,00-1,50	—	5140	H5140	H10,37-0,45	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	0,65-0,95	—	—	—	—	—		
E 9317	9317	0,15-0,20	0,20-0,35	0,45-0,65	0,025	0,025	1,00-1,40	0,08-0,15	1,00-1,50	—	5145	H5145	H10,47-0,50	0,20-0,35	0,64-0,95	0,04	0,04	0,65-0,95	—	—	—	—	—		
TS94417	—	0,15-0,20	0,20-0,35	0,75-1,00	0,04	0,04	0,30-0,50	0,08-0,15	0,30-0,60	—	5147	H5147	H10,44-0,52	0,20-0,35	0,63-1,00	0,04	0,04	0,65-1,20	—	—	—	—	—		
TS94420	—	0,17-0,25	0,20-0,35	0,75-1,00	0,04	0,04	0,30-0,50	0,08-0,15	0,30-0,60	—	5151	H5151	H10,46-0,54	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	0,65-0,95	—	—	—	—	—		
9437	9437	0,15-0,20	0,20-0,35	0,75-1,00	0,04	0,04	0,30-0,50	0,08-0,15	0,30-0,60	—	5152	H5152	H10,48-0,56	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	0,60-1,25	—	—	—	—	—		
9440	9440	0,18-0,23	0,20-0,35	0,90-1,20	0,04	0,04	0,30-0,50	0,08-0,15	0,30-0,60	—	5140	H5140	H10,53-0,65	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	0,65-0,95	—	—	—	—	—		
9442	9442	0,40-0,45	0,20-0,35	1,00-1,30	0,04	0,04	0,30-0,50	0,08-0,15	0,30-0,60	—	6150	H6150	H10,46-0,54	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	0,80-1,15	—	—	—	—	—		
9445	9445	0,43-0,48	0,20-0,35	1,00-1,30	0,04	0,04	0,30-0,50	0,08-0,15	0,30-0,60	—	8617	H8617	H10,14-0,21	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
9747	9747	0,45-0,50	0,20-0,35	0,80-1,00	0,04	0,04	0,10-0,25	0,15-0,25	0,40-0,70	—	8620	H8620	H10,17-0,24	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
9763	9763	0,60-0,67	0,20-0,35	0,80-1,00	0,04	0,04	0,10-0,25	0,15-0,25	0,40-0,70	—	8622	H8622	H10,20-0,27	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
9840	9840	0,38-0,43	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04	0,70-0,90	0,20-0,30	0,85-1,15	—	8625	H8625	H10,22-0,29	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
9845	9845	0,41-0,48	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04	0,70-0,90	0,20-0,30	0,85-1,15	—	8627	H8627	H10,25-0,32	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
9850	9850	0,44-0,51	0,20-0,35	0,70-0,90	0,04	0,04	0,70-0,90	0,20-0,30	0,85-1,15	—	8630	H8630	H10,27-0,34	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
2517	H2517	H10,14-0,21	0,20-0,35	0,35-0,65	0,04	—	—	—	4,70-5,30	—	8632	H8632	H10,30-0,37	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
3120	H3120	H10,17-0,24	0,20-0,35	0,55-0,85	0,04	0,04	0,50-0,80	—	1,00-1,50	—	8635	H8635	H10,32-0,39	0,20-0,35	0,55-0,70	1,05-0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
3130	H3130	H10,27-0,34	0,20-0,35	0,55-0,85	0,04	0,04	0,50-0,80	—	1,00-1,50	—	8637	H8637	H10,35-0,43	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
3135	H3135	H10,32-0,39	0,20-0,35	0,55-0,85	0,04	0,04	0,50-0,80	—	1,00-1,50	—	8640	H8640	H10,37-0,45	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
3140	H3140	H10,37-0,45	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	0,50-0,80	—	1,00-1,50	—	8641	H8641	H10,37-0,45	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
3310	H3310	H10,07-0,14	0,20-0,35	0,35-0,65	0,04	0,04	1,35-1,75	—	3,20-3,80	—	8642	H8642	H10,40-0,48	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
3316	H3316	H10,13-0,20	0,20-0,35	0,35-0,65	0,04	0,04	1,35-1,75	—	3,20-3,80	—	8643	H8643	H10,42-0,50	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
4032	H4032	H10,30-0,37	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	—	0,20-0,30	—	—	8647	H8647	H10,44-0,52	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
4037	H4037	H10,35-0,43	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	—	0,20-0,30	—	—	8650	H8650	H10,46-0,54	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
4042	H4042	H10,40-0,48	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	—	0,20-0,30	—	—	8653	H8653	H10,49-0,57	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
4047	H4047	H10,44-0,52	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	—	0,20-0,30	—	—	8655	H8655	H10,50-0,60	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
4053	H4053	H10,49-0,57	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	—	0,20-0,30	—	—	8660	H8660	H10,53-0,65	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
4063	H4063	H10,59-0,69	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	—	0,20-0,30	—	—	8720	H8720	H10,17-0,24	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
4058	H4058	H10,62-0,72	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	—	0,20-0,30	—	—	8735	H8735	H10,32-0,39	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
4130	H4130	H10,27-0,34	0,20-0,35	0,35-0,65	0,04	0,04	0,80-1,15	0,15-0,25	—	—	8740	H8740	H10,37-0,45	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
4132	H4132	H10,30-0,37	0,20-0,35	0,35-0,65	0,04	0,04	0,80-1,15	0,15-0,25	—	—	8742	H8742	H10,40-0,48	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
4135	H4135	H10,32-0,39	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	0,80-1,15	0,15-0,25	—	—	8745	H8745	H10,42-0,50	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
4137	H4137	H10,35-0,43	0,20-0,35	0,60-0,95	0,04	0,04	0,80-1,15	0,15-0,25	—	—	8747	H8747	H10,44-0,52	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
4140	H4140	H10,37-0,45	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	0,80-1,15	0,15-0,25	—	—	8750	H8750	H10,46-0,54	0,20-0,35	0,70-1,05	0,04	0,04	0,35-0,65	0,15-0,25	0,35-0,75	—	—	—		
4142	H4142	H10,40-0																							

II. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS

II.1 GENERALIDADES SOBRE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS.

Un tratamiento térmico se puede definir como una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento, en tiempos determinados, aplicados a un metal o aleación en estado sólido para variar sus propiedades físicas y/o mecánicas.

Los tratamientos térmicos tienen por objeto mejorar las propiedades y características de los aceros, consistiendo en calentar y mantener las piezas o herramientas de acero a temperaturas adecuadas, en cierto tiempo y enfriarlas luego en condiciones convenientes. De esta forma, se modifica la estructura microscópica de los aceros, se verifican transformaciones físicas y a veces también hay cambios en la composición del metal.

Todos los procesos básicos de tratamientos térmicos de los aceros incluyen la transformación o descomposición de la austenita. El tiempo y la temperatura son los factores principales y hay que fijarlos siempre de antemano, de acuerdo con la composición del acero, la forma y tamaño de las piezas y las características que se desean obtener.

Un tratamiento térmico siempre debe estar regido por una "velocidad crítica de temple" que se refiere a la velocidad mínima de enfriamiento ($^{\circ}\text{C}/\text{seg}$) y está en función de la composición química del acero y del tamaño del grano austenítico.

Los tratamientos térmicos en los aceros se clasifican en tres grupos principales:

- a) RECOCIDO.
- b) TEMPLE.
- c) REVENIDO.

II.2 LOS PROCESOS DE RECOCIDO.

El recocido es un tratamiento cuyo objetivo principal es ablandar el acero; aunque en algunas se emplea para regenerar su estructura o eliminar tensiones internas. Consiste en un calentamiento a temperatura adecuada, seguido generalmente de un enfriamiento lento.

Las diferentes clases de recocidos se pueden clasificar en:

- Recocido completo o recocido total.
- Recocido de difusión o de homogeneización.
- Recocido de ablandamiento (esferoidización).
- Normalización (normalizado).
- Recocido isotérmico.
- Recocido intermedio (subcrítico).

Recocido Completo o Total.

La finalidad del recocido en los aceros es reducir su dureza, mejorar la maquinabilidad, facilitar el trabajo en frío, producir una microestructura determinada, o para obtener propiedades mecánicas o físicas deseadas. El recocido depende grandemente de la formación de austenita y de la subsecuente transformación que ésta sufra.

Después de que el acero ha sido trabajado en frío, queda compuesto de una combinación de ferrita y carburo; estas estructuras se convierten en austenita calentandolas a una temperatura mayor a la crítica. En los aceros hipoeutectoides será aproximadamente 30°C arriba de la línea Ac₁. A esta temperatura ocurrirá la recristalización del acero que producirá un afino de grano; mientras que para un acero hipereutectoide la temperatura será aproximadamente 28°C arriba de la línea A_{3,1}. La microestructura de un acero hipereutectoide recocido, consistirá de áreas perlíticas grandes rodeadas de una red de cementita, por lo que no es recomendable el recocido como tratamiento térmico final para este tipo de aceros, debido a la fragilidad de la cementita, provocando una mala maquinabilidad del material.

Conforme se aumente la temperatura de austenitización, la estructura del acero se hace más homogénea, debido a que se facilita la transformación de la ferrita en austenita y la disolución de los carburos en esta misma fase. Este grado de homogeneidad es una consideración importante en el desarrollo de estructuras recocidas. A continuación se muestran las "reglas" del recocido:

Regla 1.- Entre más homogénea sea la estructura del acero austenitizado, más laminar será la estructura del acero recocido. Inversamente, entre más heterogénea sea la estructura del acero austenitizado, más esferoidal será la estructura recocida.

Regla 2.- Para desarrollar la condición más suave en el acero, austenitice a una temperatura menor de 50°C arriba de la crítica y transforme a una temperatura menor de 56°C debajo de la crítica inferior.

Regla 3.- Debido a que el tiempo para llevar a cabo una transformación completa, a una temperatura menor de 60°C debajo de la crítica inferior puede ser muy largo, permita que la mayor parte de la transformación se lleve a cabo a una temperatura mayor, donde se formará un producto suave y termine la transformación a una temperatura menor, donde el tiempo para que se complete la transformación es corto.

Regla 4.- Después de que el acero ha sido austenitizado, enfríelo tan rápidamente dentro del horno a la temperatura de transformación con el fin de decrecer el tiempo total de la operación de recocido.

Regla 5.- Después de que el acero se ha transformado completamente, a una temperatura que produce una microestructura y dureza deseada, enfríe el acero a la temperatura ambiente tan rápido como sea posible, para disminuir más el tiempo total de la operación de recocido.

Estas cinco reglas, con algunas excepciones, aseguran un recocido exitoso y deben seguirse y tomarse en cuenta para este tipo de tratamiento térmico.

Recocido de Difusión o de Homogeneización.

El objetivo de este tipo de recocido, es el de reducir la heterogeneidad química provocada por la solidificación, aprovechando el fenómeno de difusión para obtener un material homogéneo. Como la velocidad de difusión es una función exponencial de la temperatura, se hará el recocido de difusión a la temperatura más alta posible. La influencia de este tratamiento sobre las diferentes segregaciones depende principalmente de: las diferencias en concentración, las distancias de difusión y la velocidad de difusión. Las heterogeneidades debida a precipitaciones de fases no solubles en el estado sólido no pueden ser eliminadas por este tratamiento térmico.

El recocido de difusión se aplica en los lingotes de acero, durante el calentamiento como preparación al forjado y al laminado, aunque también puede utilizarse para reducir simultáneamente la heterogeneidad química y mecánica de un material trabajado en caliente.

A nivel industrial el propósito de este recocido, sólo es el de calentar el lingote hasta la temperatura de laminado en caliente y no el de llevar a cabo el proceso de homogeneización.

Recocido de Ablandamiento (Esferoidización)

El propósito de este tratamiento térmico es el de obtener una estructura de acero que corresponda a una dureza mínima. Esa estructura es la de carburos globulares en una matriz ferrítica en aceros hipereutectoides.

La dureza mínima corresponde a la óptima deformabilidad en procesos de conformado no cortante como el doblado, laminado, embutido, etc., para conformado cortante como aserrar, torneear, taladrar, fresar, y cepillar, también es válido, pero sólo para aceros con más de 0.5 %C. En el caso de aceros más suaves el ablandamiento es desfavorable para el conformado cortante, ya que las virutas se pegan y provocan una superficie rugosa.

La estructura deseada de carburos globulares se puede obtener por un calentamiento prolongado, enfriados lentamente y normalizados, a una temperatura justo por debajo de la temperatura crítica inferior. Tal operación se conoce como un recocido subcrítico. Pero para esto se requiere de un gran tiempo de permanencia en el horno. Sin embargo, se ha encontrado que el procedimiento de recocido utilizado para producir perlita (recocido isotérmico) con algunas modificaciones, se puede emplear para obtener una microestructura de carburos globulares. Después del tratamiento de austenitización existen carburos libres, la transformación (en el rango de temperaturas donde se debe obtener perlita basta) procederá como una globulización de los carburos más bien que con la formación de una microestructura perlítica. Esto se consigue empleando temperaturas de austenitización ligeramente encima de la temperatura crítica superior A_{c3} , fig. 2.1. También, se utilizan temperaturas de calentamiento no mayores de alrededor de 35°C sobre la temperatura crítica inferior A_{c1} .

Es posible aplicar este principio de dos formas:

1) Calentando el material un tiempo determinado a una temperatura por arriba de A_{c1} , seguido por una recristalización isotérmica a una temperatura por debajo de A_{c1} .

2) Dejando oscilar la temperatura alrededor de A_{c1} . Este último método da mejores resultados, pero sólo puede aplicarse a cantidades pequeñas de acero en hornos chicos, cuya inercia térmica permita dichas oscilaciones rápidas de temperatura.

TABLA 2.1 TEMPERATURAS RECOMENDADAS PARA EL RECOCIDO DE LOS ACEROS AL CARBONO DE CONSTRUCCIÓN.

COMPOSICIÓN % DE C.	RECOCIDO DE AUSTENITIZACIÓN COMPLETA °C	RECOCIDO DE AUSTENITIZACIÓN INCOMPLETA (GLOBULAR) °C
0.10	910	780
0.20	890	780
0.30	860	780
0.40	840	760
0.50	820	760

Normalización o Normalizado.

Este tratamiento consiste en un calentamiento a temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior, seguida de un enfriamiento en aire tranquilo. De esta forma, se deja el acero con una estructura y propiedades que arbitrariamente se consideran como normales y características de su composición. Se suele utilizar para piezas que han sufrido trabajos en caliente, trabajos en frío, enfriamientos irregulares o sobrecalentamientos, y también sirve para destruir los efectos de un

tratamiento anterior defectuoso. Por medio del normalizado, se eliminan tensiones internas y se uniformiza el tamaño de grano del acero. Se emplea casi exclusivamente para los aceros de construcción al carbono o de baja aleación. también se puede utilizar para mejorar la maquinabilidad y refinar estructuras dendríticas de piezas de fundición.

La práctica usual en el normalizado implica un calentamiento desde 35 a 65 °C sobre la temperatura crítica A_{c1} , o A_{cm} .

El incremento de rapidez de enfriamiento por aire afecta de varias formas la transformación de la austenita. Debido al enfriamiento bajo condiciones fuera de equilibrio, las cantidades de ferrita y perlita proeutectoide, o cementita y perlita proeutectoide que se obtendrán a temperatura ambiente, ya no serán las que se pueden obtener a partir del diagrama de equilibrio, ya que hay menos tiempo para la formación de la constituyente proeutectoide (ferrita o cementita), en consecuencia los aceros hipoeutectoides normalizados contendrán menos cantidad de ferrita proeutectoide y los aceros hipereutectoides contendrán menos cantidad de cementita proeutectoide, en comparación con los aceros recocidos.

En la tabla 2.2 se presentan las temperaturas de normalización para algunos grados de aceros al carbono. Basado en la experiencia a nivel industrial, las temperaturas dadas pueden variar entre 28°C debajo y 56°C arriba de los valores indicados.

TABLA 2.2 TEMPERATURAS TÍPICAS DE NORMALIZADO PARA ACEROS AL CARBONO.

ACERO SAE	TEMPERATURA DE NORMALIZACIÓN EN °C
1015	900 A 925
1020	900 A 925
1035	900 A 925
1040	870 A 900
1045	845 A 870
1050	845 A 870
1060	815 A 845

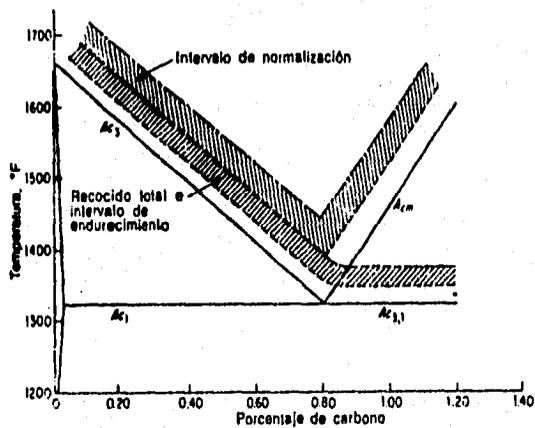


FIG. 2.1 INTERVALO DE RECOCIDO, NORMALIZACIÓN Y ENDURECIMIENTO PARA LOS ACEROS AL CARBONO.

Recocido Isotérmico.

Este tratamiento térmico tiene como objetivo principal obtener perlita basta, esto se puede lograr por medio de una transformación isotérmica del material, lo cual se logra enfriando hasta la temperatura de transformación apropiada para obtener perlita basta, y manteniendo a esta temperatura hasta que la transformación se complete. En la figura 2.2 se muestra el tratamiento térmico de recocido isotérmico.

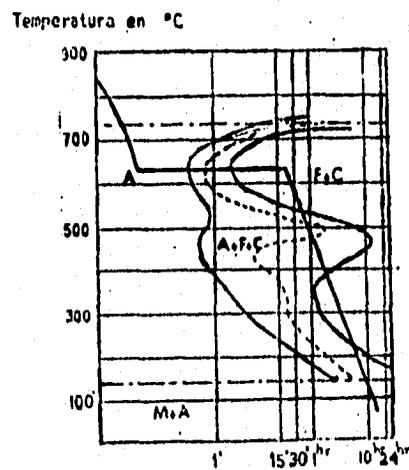


FIG. 2.2 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL CICLO DE RECOCIDO ISOTÉRMICO.

Este ciclo de recocido isotérmico puede hacer posible una reducción en el tiempo de uso del horno para recocido. Ni el tiempo desde la temperatura de austenización a la temperatura de transformación, ni el tiempo desde la transformación a temperatura ambiente son críticos y por tanto pueden disminuirse tanto como se desee o como sea posible en la práctica. Generalmente el acero se calienta de 740° - 880°C y luego se deja enfriar hasta una temperatura de 600° - 700°C.

Recocido Intermedio (Subcrítico).

Recocido intermedio es el término empleado para describir el recocido subcrítico de materiales trabajados en frío. En este caso se acostumbra calentar el material a una temperatura suficientemente alta, para causar la recristalización de la estructura trabajada en frío y de esta forma bajar la dureza, y sobre todo se eliminan las tensiones del material y se aumenta la ductilidad. El recocido intermedio generalmente se realiza dentro del intervalo de temperaturas que va de los 595° a los 705°C. El calentamiento y la permanencia a la temperatura seleccionada, generalmente toma alrededor de 24 horas después de lo cual la carga se enfría lentamente dentro del horno. El proceso entero toma alrededor de 40 horas.

II.3 EL TEMPLE.

El temple tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia al desgaste de los aceros. Para ello, se calienta en general el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y se procede a enfriar rápidamente a temperatura ambiente (según la composición y el tamaño de la pieza) en un medio conveniente: agua, aceite, aire, etc. Para obtener una estructura con las propiedades deseadas, el acero debe ser tratado térmicamente; El temple y el revenido son los tratamientos comúnmente utilizados para este fin.

El primer paso en el tratamiento de temple, es calentar el material a una temperatura a la cual se forme austenita, cuidando que la temperatura no sea muy elevada, ya que ello implicaría un crecimiento pronunciado del grano. Después hay que mantener el material a esa temperatura el tiempo necesario para que los carburos se disuelvan, pero cuidando que no sea excesivo para evitar un crecimiento de grano. Esto se conoce como una austenitización.

Para el caso de los aceros hipereutectoides se utilizan temperaturas menores a la línea Ac_m, ya que a esta temperatura la perlita se transformará en austenita, quedando un mínimo porcentaje de cementita sin transformar, y una vez templado el acero la austenita se transformará en martensita, permaneciendo la cementita intercalada con la martensita, obteniéndose una estructura más dura, ya que la cementita posee mayor dureza que la martensita. En caso de que se rebasara la línea Ac_m la cementita también se transformará en austenita, pero al templar los resultados que se tienen en el material son altas tensiones internas, la estructura será más gruesa y el peligro de agrietamiento será mayor.

causa de una pobre extracción de calor en el temple. En cuanto a la descarburización, esta trae como consecuencia una pérdida de dureza en la superficie del metal y puede afectar en forma seria la resistencia a la fatiga del acero. La cantidad de óxido que se forma esta determinada principalmente por el tiempo y la temperatura de austenitización, por lo tanto, éstos deben de ser tan bajos como sea posible, a fin de minimizar la formación de esta capa. Los aspectos que influyen sobre el comportamiento de una pieza de acero, en relación con su velocidad de calentamiento son: la conductividad térmica del acero, la naturaleza de la atmósfera del horno y el espesor de la sección.

La efectividad del temple depende de las características de enfriamiento del medio de temple, así como la habilidad del acero para endurecerse. Cuando se temple una pieza en determinado medio de temple, la velocidad de enfriamiento depende principalmente de los siguientes factores:

- El calor específico y poder de conducción del acero.
- El poder de enfriamiento del medio de temple.
- La masa, la forma, y el estado superficial de la pieza.
- Temperatura del medio de temple.

El parámetro principal que determina la velocidad de enfriamiento del acero, es el poder de enfriamiento del medio de temple. Este poder de enfriamiento para un medio de temple depende de factores como:

- Calor específico.
- Conductividad calorífica.
- Viscosidad.

- Calor de evaporación o de disociación.
- Formación de capas sólidas gaseosas aislantes, etc.

Un medio de temple ideal deberá mostrar una alta rapidez de enfriamiento inicial, para evitar la transformación de la austenita en el rango de temperaturas que abarca la nariz perlítica, y luego una velocidad de enfriamiento menor para el intervalo inferior de temperatura, a fin de minimizar la distorsión de las piezas.

A continuación se enlistan los medios de temple industriales, en orden de disminución de la severidad de temple:

- 1.- Solución acuosa al 10% de cloruro de sodio (salmuera).
- 2.- Agua.
- 3.- Sales fundidas.
- 4.- Aceites.
- 5.- Aire.

La habilidad de un medio de temple para extraer calor de una pieza caliente se puede expresar en términos del valor de la "severidad de templado", denotado por la letra H. Como valor patrón se utiliza $H = 1$ para el agua sin agitación y a partir de este se asignan valores de H para el aceite, agua y salmuera. El coeficiente H tiene unidades de mm^{-1} o pulg^{-1} . En la tabla 2.3 se muestran valores de H para algunos medios de temple con y sin agitación.

TABLA 2.3

MEDIO DE TEMPLE	(H) Pulg-1 SIN AGITACION	(H) Pulg-1 CON AGITACIÓN VIOLENTA
AGUA	1	4
SALMUERA	2	5
ACEITE	0.3	0.9

La estructura, dureza y resistencia resultantes del tratamiento de temple, están determinadas por la velocidad de enfriamiento durante el proceso. Es necesario conocer los mecanismos de extracción de calor durante el templado. Se reconocen cuatro etapas del mecanismo de extracción de calor durante el templado:

Etapas A: Etapa de contacto inicial del líquido. Se caracteriza por la formación de burbujas de vapor que preceden al establecimiento de una capa de vapor, envolvente sobre la pieza. Su tiempo de duración es de 0.1 seg. aproximadamente.

Etapas B: Etapa de enfriamiento por medio de una capa de vapor. Se caracteriza principalmente por la formación de una capa de vapor continua, delgada y estable que rodea al metal caliente y que es debida a la temperatura tan alta a la que se encuentra el metal, lo cual provoca la vaporización del medio de temple en la superficie del metal. Esta etapa es de enfriamiento lento y el enfriamiento ocurre principalmente por radiación a través de la capa de vapor, así como por conducción.

Etapa C: Etapa de enfriamiento por transporte de vapor. Esta etapa empieza cuando la temperatura del metal se ha reducido al grado de que la capa de vapor ya no es estable, rompiéndose. Entonces, el líquido del medio de temple produce una violenta ebullición y el calor es removido de la pieza a velocidad muy alta como calor latente de vaporización, siendo una etapa de enfriamiento rápido.

Etapa D: Etapa de enfriamiento por medio de líquido. Esta etapa empieza cuando la temperatura de la superficie de la pieza, llega a igualar la temperatura de ebullición de líquido de temple. Debajo de esta temperatura se detiene la ebullición y el enfriamiento se llevará a cabo por conducción y convección, siendo una etapa de enfriamiento más lento.

En las etapas descritas anteriormente, se considera que la pieza a templar se introduce en el medio de temple y permanece ahí hasta que se enfría totalmente; sin embargo, es posible modificar dichas etapas por medio del movimiento del medio de temple o por un movimiento de la pieza. A nivel industrial es más común el movimiento del medio de temple, lo que se conoce como "agitación" y se define como el movimiento del medio de temple producido externamente. Este movimiento influye en las características de transferencia de calor del líquido de temple, provocando un rompimiento mecánico de la capa de vapor formada en la etapa B, produciendo un desprendimiento más frecuente de burbujas de vapor durante la etapa C.

La temperatura del líquido afecta la habilidad para extraer el calor. Generalmente, conforme aumenta la temperatura del medio de temple, la velocidad de enfriamiento disminuye, lo cual se debe a un aumento en el tiempo de duración de la etapa A. En la figura 2.4 se muestran dos curvas de enfriamiento para dos muestras templadas en agua a distintas temperaturas, como se puede ver el

temple en agua a menor temperatura requiere de menos tiempo para enfriar la muestra, siendo cada vez mayor la diferencia para temperaturas más bajas.

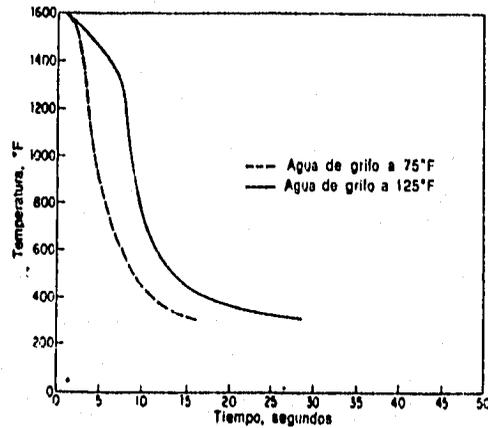


FIG. 2.4 CURVAS DE ENFRIAMIENTO OBTENIDAS EN EL CENTRO DE MUESTRAS
TEMPLADAS EN AGUA DE GRIFO SIN AGITACIÓN

Con esta variedad de medios de temple, se debe tener cuidado con la selección para realizar un templado. El medio de temple junto con el tamaño de la pieza, son los factores que deciden la velocidad de enfriamiento de las piezas de acero en los tratamientos térmicos. El medio de temple a seleccionar está en función de la velocidad crítica de temple del tipo de acero a tratar.

La velocidad crítica de temple, es la velocidad mínima de enfriamiento aplicada en el acero, con la cual la austenita se transforma totalmente en martensita mediante la disipación de calor por enfriamiento rápido, evitando así, que la fase austenita se transforme a perlita o bainita. La velocidad crítica de temple, disminuye conforme aumenta el contenido de carbono y el contenido de elementos de aleación para aceros aleados.

Entre mayor sea la velocidad de enfriamiento en relación a la velocidad crítica de temple, habrá lugar a que exista menor cantidad de austenita retenida y como consecuencia, aumenta la dureza y el índice de transformación de austenita a martensita, creándose además tensiones internas mayores. Para realizar el tratamiento de temple en una pieza de acero al carbono se utiliza la curva TTT correspondiente (que se detallará más adelante), en la que se observa claramente la velocidad crítica de enfriamiento a aplicar y así elegir el medio de temple adecuado, sin embargo, con la gran variedad que existe de aceros en la actualidad, crea dudas sobre el medio de enfriamiento más adecuado, para solventar esta situación es necesario guiarse por las recomendaciones de las acerías o por el análisis y dimensiones de la pieza. Para obtener mejores resultados, conviene utilizar el medio de enfriamiento menos energético que sea capaz de comunicar al acero una velocidad de enfriamiento superior a la crítica. De esta forma se consigue una estructura totalmente martensítica, la máxima dureza de acuerdo a su composición y se evita en lo posible las grietas y deformaciones.

ENFRIAMIENTOS	DIÁMETROS		
	25mm	50mm	75mm
AGUA AGITADA	56.0	15.0	7.0
ACEITE AGITADO	27.0	10.0	5.0
CORRIENTE DE AIRE	1.8	0.9	0.6
AIRE TRANQUILO	0.85	0.4	0.3

TABLA 2.4 VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO (GRADOS POR SEG) QUE SE CONSIGUEN A 570°C REDONDOS DE ACERO, TEMPLADOS EN DIVERSOS MEDIOS.

En general deben seguirse las siguientes reglas de templeado:

1.- Para aceros al carbono (independientemente de su composición). En piezas de más de 5 mm de espesor y aceros de baja aleación en espesores superiores a 25 mm, deben templarse en agua, debiendo tener ésta una temperatura entre 15° y 20°C, no debiendo sobrepasar los 30°C.

2.- Para los aceros antes citados, en perfiles inferiores a 5 o 10 mm aproximadamente y todos los aceros de alta aleación, el temple debe realizarse en aceite, estando éste entre 30° y 60°C se obtienen los mejores resultados.

3.- Los aceros de muy alta aleación se templean al aire. A continuación se analizan los medios de temple más usados para templear aceros:

1) Salmuera: Es una solución acuosa conteniendo ciertos porcentajes de sal, junto con aditivos especiales e inhibidores de corrosión. La salmuera ofrece las siguientes ventajas:

- La velocidad de enfriamiento es mayor que la del agua.**
- La temperatura es menos crítica que para el agua.**
- La aparición de manchas suaves debido a bolsas de vapor es mucho menor que en el temple en agua.**
- La distorsión es menos severa que en el temple en agua.**
- Los intercambiadores de calor son menos usados para el enfriamiento en baños de salmuera de lo que son empleados para el temple en agua.**

Algunas desventajas de la salmuera son:

- La naturaleza corrosiva de la salmuera, requiere que el equipo de temple se proteja con recubrimiento anticorrosivo.
- Se requiere de equipo de extracción de los vapores corrosivos que emanan los baños de salmuera.
- El costo aumenta debido a los aditivos e inhibidores que deben utilizarse.

2) Agua: El agua es una de las soluciones más baratas y de uso siempre y cuando la pieza a templear no sufra distorsiones excesivas o se agriete durante el temple. Además se puede usar sin problemas de contaminación o daño a la salud.

El agua como medio de temple posee una gran velocidad de enfriamiento, debido a su elevada acción de disipar el calor de la pieza de acero. Sin embargo, presenta los siguientes defectos:

- El agua tiene un punto de ebullición muy bajo comparado con otro medio de temple.
- El poder refrigerante del agua se reduce bruscamente al elevar su temperatura.
- Se crea una alta velocidad de enfriamiento en la zona de temperatura de deformación de martensita, provocando grandes tensiones internas.

3) Aceite: Los mejores aceites como medio de temple son los de origen mineral. En el aceite se alcanzan velocidades mayores de enfriamiento que en aire, la estructura va adquiriendo más dureza en la periferia que en el centro de la pieza. Aumenta la resistencia al desgaste, a la tracción y aumentan la templabilidad.

Un buen aceite debe poseer las siguientes propiedades:

- Su viscosidad debe estar comprendida entre ciertos límites, de manera que no sea muy viscoso porque tiende a carbonizarse, ni que tenga baja viscosidad porque tiende a volatilizarse.
- La volatilidad no debe ser demasiado elevada porque se pierde aceite con el uso y se espesa el baño, con la consiguiente pérdida en la velocidad de enfriamiento.
- La temperatura de inflamación y combustión deben ser lo más elevada posible, para evitar el exceso de humo en el taller y también el peligro de que se inflame el baño.

4) Aire: El proceso consiste en calentar la pieza de acero hasta alcanzar la temperatura de temple adecuada, y después de estar el tiempo suficiente para que se obtenga la estructura adecuada sacarla del horno y dejarla que se enfríe al aire. bajo esta condición de enfriamiento se obtiene una estructura no muy dura y más uniforme en toda la pieza. El aire también puede emplearse a cierta presión, alcanzando más rápido la temperatura ambiente y aumentando unos grados la dureza en comparación con el enfriamiento al aire quieto. El aire como medio de temple se aplica sólo a los aceros de muy alta templabilidad (aceros aleados).

Templabilidad o Penetración de Temple.

La templabilidad se define como la Penetración de dureza que alcanza la pieza de acero como resultado del temple. La profundidad de la dureza se debe principalmente a la composición del acero, dando lugar a que los aceros al carbono tengan menos templabilidad que los aceros aleados.

Cuando un acero se temple, la velocidad de enfriamiento es máxima en la superficie y disminuye hacia al centro. La formación de martensita solo ocurre en la parte de la pieza, donde se logró sobrepasar la *velocidad crítica* de enfriamiento.

Los elementos de aleación amplían la zona de estabilidad de la austenita, disminuyendo la velocidad crítica de temple, dando lugar a que el tiempo de transformación de la austenita a martensita sea mayor, y que al mismo tiempo la dureza alcance mayor profundidad.

El carbono extiende la zona y, la descomposición de la austenita en hierro α y cementita se reprime cuando aumenta la concentración de carbono, de modo que la velocidad crítica disminuye. La descomposición de la austenita también se ve influenciada por la presencia de límites de grano y carburos no disueltos, aumentando la velocidad crítica de enfriamiento. Otro factor que influye en la profundidad de dureza es el tamaño de la pieza, esto se ve en los resultados que se obtienen al temprar una pieza de acero de diámetro pequeño con una de diámetro mayor, siendo estos diferentes aún siendo enfriadas en el mismo medio de temple. Siendo mayor el porcentaje de martensita en la pieza de menor diámetro, mientras que en la de mayor diámetro el contenido de martensita estará en la superficie de la pieza y no así en el centro que tendrá una zona menos dura que en la superficie.

En la figura 2.5 muestra los resultados de la dureza, obtenidos para los diferentes diámetros. Esto puede llamarse *diagrama de penetración de dureza* o *diagrama transversal de dureza*, ya que muestra de un vistazo en qué extensión se ha endurecido el acero durante el temple.

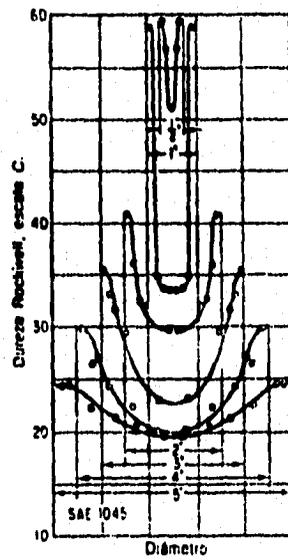


FIG. 2.5 CURVAS DE PENETRACION DE DUREZA "U" PARA MUESTRAS DE VARIOS DIÁMETROS TEMPLADAS EN AGUA. ACERO SAE 1045.

II.4 EL REVENIDO.

El revenido es el tratamiento térmico utilizado posteriormente de que una pieza de acero es sometida a un tratamiento térmico de temple. Sabemos que el acero templado en el estado martensítico es demasiado frágil para la mayoría de aplicaciones, además deja esfuerzos residuales altos en el acero. La finalidad del revenido es producir un alivio de esfuerzos residuales, así como aumentar la ductilidad y tenacidad, disminuyendo la dureza, la resistencia a la tracción y la resistencia al desgaste.

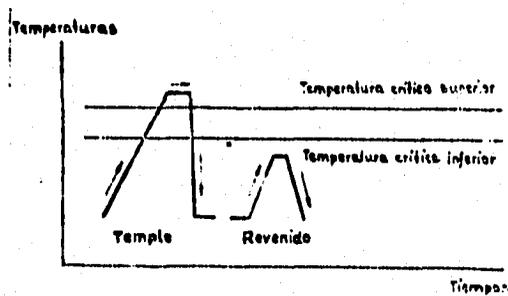


FIG. 2.6 ESQUEMA DE EL TEMPLE Y REVENIDO DE LOS ACEROS.

El revenido consiste en calentar la pieza de acero templado a una temperatura inferior a la crítica (A_{c1}), después de un determinado tiempo es enfriado a una velocidad conveniente hasta temperatura ambiente. Para poder fijar estos parámetros hay que tomar en cuenta variables como el tamaño, composición y forma de la pieza a revenir.

En general, los cambios que presentan las características mecánicas de los aceros sometidos al tratamiento de revenido son:

- La dureza disminuye gradualmente conforme la temperatura de revenido aumenta.
- La resistencia a la tracción disminuye gradualmente conforme aumenta la temperatura de revenido.
- La ductilidad y la tenacidad aumentan en forma gradual conforme aumenta la temperatura de revenido.

El rango de temperaturas de 200° a 425°C representa una zona divisoria entre aquellas aplicaciones que requieren dureza y aquellas que requieren tenacidad. Si la principal propiedad deseada es la dureza o resistencia al desgaste, la pieza se reviene a menos de 200°C , si se desea que la principal propiedad sea la tenacidad, la pieza se reviene arriba de 425°C .

La martensita es una solución sólida supersaturada de carbono atrapado en una estructura tetragonal a cuerpo centrado, siendo ésta una condición metaestable que mientras se aplique energía mediante el revenido, el carbono se precipitará como carburo y el hierro se hará cúbico a cuerpo centrado.

Al calentar el acero al carbono en el rango de 38° a 204°C, la estructura se hace negra (martensita negra). La martensita original comienza a perder su estructura cristalina tetragonal, formándose un "carburo de transición" hexagonal compacto (carburo epsilon) y martensita de bajo carbono. La precipitación de carburo de transición puede causar un ligero aumento en la dureza, quedando un acero con alta dureza y resistencia, baja ductilidad y tenacidad, y muchos de los esfuerzos residuales son aliviados.

Calentando en el rango de 232° a 400°C cambia el carburo epsilon a cementita ortorrómbica (Fe_3C), la martensita de bajo carbono se hace ferrita BCC y cualquier austenita retenida se transforma en bainita. La resistencia es mayor de 200 000 psi, la ductilidad ha aumentado ligeramente, pero la tenacidad es aún baja. La dureza está entre 40 y 60 Rc dependiendo de la temperatura de revenido.

En el rango entre 400° y 650°C se continúa con el crecimiento de partículas de cementita, lo que permite ver más de la matriz ferrítica. Las propiedades mecánicas en este rango son: la resistencia a la tensión 125 000 - 200 000 psi, la elongación 10 a 20% en 2 pulgadas, dureza 20 - 40 Rc, y un aumento rápido en la tenacidad.

El calentamiento en el rango de 650° a 720°C produce partículas grandes de cementita globular. Esta estructura es muy suave y tenaz, semejante a la estructura de la cementita esferoidal obtenida directamente de la austenita mediante el recocido de esferoidización. La temperatura y el tiempo de revenido son variables interdependientes del proceso de revenido. Por ejemplo, bajando la temperatura y aumentando el tiempo pueden generalmente producir el mismo resultado que aumentando la

temperatura y disminuyendo el tiempo. El acero generalmente se reviene en horno de aire o baños de sales ó metales fundidos, también pueden utilizarse baños de aceite.

ILS DIAGRAMAS TTT (Transformación-Tiempo-Temperatura).

En 1930, los metalurgistas Bain y Davenport, estudiando la transformación de la austenita a temperaturas constantes, idearon un diagrama que denominaron TTT (Transformation - Time - Temperature), siendo éste un valioso auxiliar para el estudio de los tratamientos térmicos, habiéndose desarrollado gracias a éste los tratamientos isotérmicos.

La representación de la transformación isotérmica (a temperatura constante) de la austenita se realiza llevando al eje de las ordenadas las temperaturas de transformación, y al eje de las abscisas los tiempos de duración de la transformación en escala logarítmica, partiendo de un tiempo muy pequeño pero nunca de cero. Las curvas se trazan anotando en la horizontal que pasa por cada temperatura los puntos de inicio y fin de la transformación de la austenita, y muchas veces también los de un 25% de transformación, un 50% y un 75% . Se unen todos los puntos de inicio de la transformación, los de 25%, del 50% del 75% y del fin de la transformación de la austenita, y se obtienen una serie de curvas que en general tienen forma de S, por lo que también reciben el nombre de "Curvas de las S" estos diagramas.

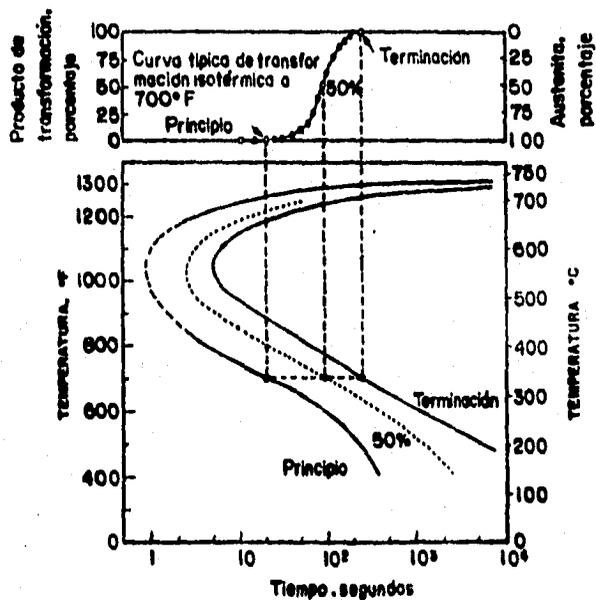


FIG. 2.7 DIAGRAMA QUE MUESTRA COMO SE RESUME LAS MEDICIONES DE LA TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA. (ATLAS OF ISOTHERMAL TRANSFORMATION DIAGRAMS).

Los diagramas TTT marcan los límites de transformación de la austenita en otros constituyentes, tanto el inicio como el fin de la misma. Estos límites se toman en cuenta para determinar la temperatura y el tiempo necesario para realizar un proceso térmico.

Para analizar un diagrama TTT, consideraremos un diagrama de composición eutectoide, reconociendo tres zonas principales que son: zona superior, intermedia e inferior.

La zona superior comprende el intervalo de temperaturas de 727° a 580°C, rango en el cual ocurre la transformación de austenita a perlita. A temperaturas inferiores pero próximas a 727°C ocurre muy lentamente la transformación de austenita a perlita, dando lugar a la formación de una estructura perlítica totalmente gruesa. Si la transformación isotérmica se realiza a una temperatura superior pero próxima a 600°C, el resultado de la transformación es una estructura de perlita fina, obteniéndose una mayor dureza debido al menor distanciamiento de las placas de cementita.

La zona intermedia se considera como la zona de temperaturas comprendida entre 580° y 220°C; en este intervalo ocurre la transformación de austenita en bainita. En la bainita el constituyente que se forma primero a partir de la austenita es la ferrita seguida por la cementita. La dureza de la bainita es mayor en comparación con la dureza que posee la perlita, este aumento en la dureza se debe a que el carburo se vuelve cada vez más fino.

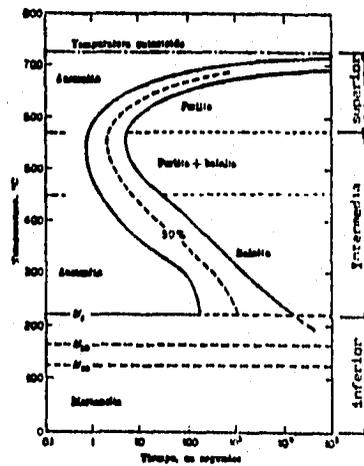


FIG. 2.8 DIAGRAMA DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA PARA UN ACERO EUTECTOIDE.
ACERO 1080 (AISI).

El tipo de bainita que se forma en el rango de temperaturas de 580° a 450°C se le llama bainita superior y presenta una estructura formada por una serie de agujas de ferrita y cementita paralelas entre si.

La bainita formada al descender la temperatura entre los 450° y 220°C se conoce como bainita inferior, en este rango de transformación las agujas que componen la bainita se hacen cada vez más finas lo que a su vez ocasiona que la dureza sea mayor que la de la bainita superior.

La zona inferior contiene la fase más dura llamada martensita. En un acero de composición eutectoide como el que se analiza, la región de martensita se encuentra en el intervalo de temperaturas de 220°C y la temperatura ambiente. La estructura de la martensita corresponde a una solución sólida intersticial sobrecargada de carbono en hierro con una red tetragonal centrada en el cuerpo, su microestructura se caracteriza por tener una forma tipo aguja. El intervalo de temperaturas para la formación de la martensita esté limitado por las líneas m_s y m_f . La línea m_s indica la temperatura a la que se inicia la formación de la martensita a partir de la austenita, y la línea m_f marca la temperatura del fin de la transformación de austenita a martensita.

En los diagramas TTT para aceros al carbono, las curvas de transformación se desplazan de izquierda a derecha conforme se incrementa el contenido de carbono en la aleación, hasta que alcanza el valor de 0.8% de C, sobrepasando éste las curvas tienden a desplazarse nuevamente hacia la izquierda.

En los diagramas TTT para aceros aleados, los elementos de aleación producen en general un fuerte desplazamiento de las curvas hacia la derecha, incrementándose éste mientras mayor sea el porcentaje de elementos de aleación, con excepción del cobalto, que las desplaza a la izquierda. Otra característica es la separación de las zonas perlítica y bainítica.

II.5.1 Aplicaciones de los diagramas TTT.

Con ayuda de los diagramas TTT se han aclarado mucho los procesos de transformación que ocurren en los tratamientos térmicos, y gracias a estos diagramas se realizan ahora con mejor conocimiento de causa, y no sólo basados en conocimientos empíricos.

Los diagramas TTT se consideran para predecir las transformaciones que tiene la austenita en otros constituyentes durante el enfriamiento en condiciones de equilibrio. En estos diagramas se lee con toda claridad el tiempo necesario y la temperatura adecuada para que determinado material de acero pueda ser tratado térmicamente.

Estos diagramas se utilizan en diferentes tratamientos térmicos como son: recocido, templado y revenido. Además de una gran utilización para los tratamientos térmicos industriales basados en un periodo isotérmico como son: Martempering, austempering, recocido isotérmico, etc.

II.6 DIAGRAMAS CCT (Transformación bajo Enfriamiento Continuo).

A nivel industrial, los tratamientos térmicos en su gran mayoría implican un enfriamiento continuo del material, lo que lleva a una limitación en el uso de los diagramas TTT, ya que no proporcionan información correcta en el caso de enfriamientos continuos. De aquí surge la necesidad de tener diagramas de transformación para enfriamiento continuo o curvas CCT (Continuos - Cooling - Transformation).

Estos diagramas se caracterizan por presentar un enfriamiento continuo hasta la temperatura ambiente. En general, el metal se calienta hasta la zona austenítica y se enfría hasta la temperatura ambiente, variando la velocidad de enfriamiento, ésta última se aplica de acuerdo al tratamiento, al tamaño y forma de la pieza.

Varios de los tratamientos térmicos efectuados en el acero son más bien por enfriamiento continuo que por enfriamiento lento. Debido a esto, los diagramas de enfriamiento continuo son los más utilizados en la industria del acero. Los diagramas CCT marcan los límites de transformación de la austenita en otros constituyentes.

La representación gráfica de las transformaciones en condiciones de enfriamiento continuo, se realizan en un diagrama temperatura contra logaritmo del tiempo, en el que se muestra:

- Las curvas que representan gráficamente las velocidades de enfriamiento.
- La indicación sobre las curvas del porcentaje aproximado de transformación.

- La indicación de las distintas zonas de fases.
- La línea punteada, de trazos cortos, que indica un 50 % de la fase transformada.
- Indicación en la parte inferior del diagrama de la dureza que obtiene el metal de acuerdo a cada curva de enfriamiento.

Cabe mencionar que al igual que en los diagramas TTT, en los diagramas CCT existe una notable diferencia en la forma de las curvas entre aceros al carbono y aceros aleados, habiendo desplazamientos hacia la izquierda ó a la derecha, hacia arriba o abajo dependiendo del elemento de aleación.

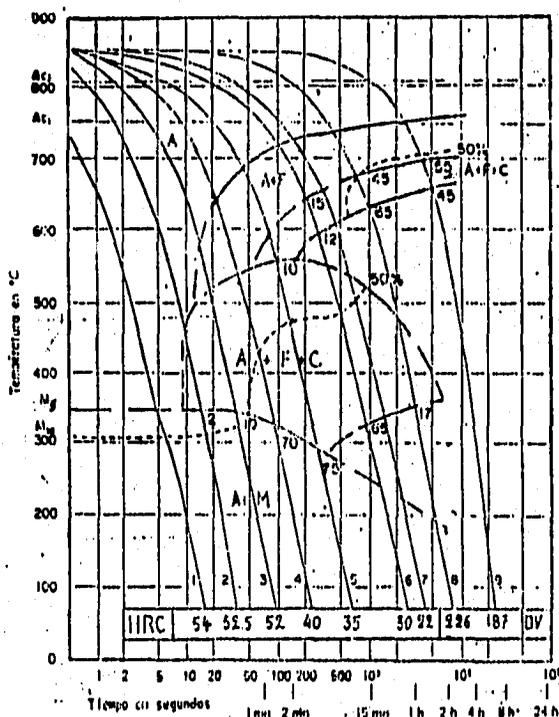


FIG. 2.9 CURVA CCT DE UN ACERO 4135.

II.6.1 Aplicaciones de los diagramas CCT.

En la figura 2.10 se muestra en forma esquemática una parte del diagrama CCT para un acero eutectoide, en él se muestra la variación de la microestructura en función de la velocidad de enfriamiento.

La curva marcada como "Recocido completo" representa un enfriamiento muy lento y generalmente se obtiene enfriando piezas (austenizadas) dentro de un horno. La velocidad de enfriamiento que se alcanza es muy pequeña, lo que tiene como consecuencia que la transformación de la austenita se realice a una temperatura muy cercana a la eutectoide, dando como resultado una estructura final formada por perlita gruesa.

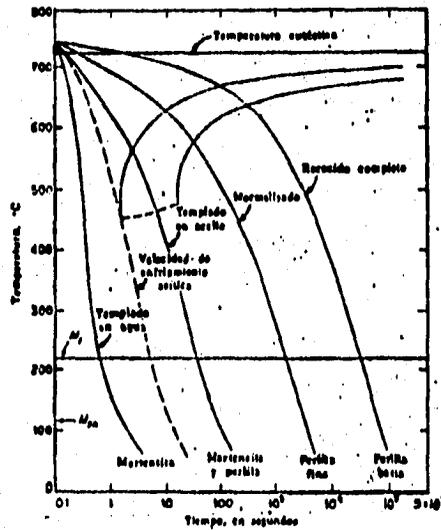


FIG. 2.10 VARIACIÓN DE LA MICROESTRUCTURA EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO PARA UN ACERO EUTECTOIDE.

La curva marcada como "Normalizado", representa un tratamiento térmico en el que el material se enfría a una velocidad ligeramente mayor que la anterior, ya que la pieza se saca del horno de austenitización, dejándola enfriar al aire. En este caso la transformación se lleva a cabo entre los 550° y 600°C. La estructura obtenida es perlita pero de textura más fina que en el caso anterior.

La siguiente curva marcada "Templado en aceite", representa una velocidad de enfriamiento mayor que para el normalizado. Esta velocidad de enfriamiento por lo general produce una microestructura formada por una mezcla de perlita y martensita.

La curva marcada "templado en agua", representa una velocidad de enfriamiento tan rápida que no se puede formar perlita y la estructura resultante es martensita.

La curva que se muestra con trazos punteados representa la velocidad de enfriamiento crítica. Cualquier velocidad de enfriamiento más rápida que ésta produce una estructura martensítica, mientras que cualquier velocidad más lenta produce una estructura que contiene perlita.

III LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN EN LOS ACEROS PARA HERRAMIENTAS

III.1 GENERALIDADES.

El desarrollo industrial en los últimos años ha multiplicado las necesidades de herramientas, creándose tipos especiales para cada trabajo, con características de dureza, de tenacidad, indeformabilidad, etc., cada vez más elevadas.

Actualmente se fabrican aceros adecuados para toda clase de herramientas, desde las más sencillas, como son las herramientas agrícolas o las de carpintería, hasta las cuchillas de acero rápido para máquinas herramientas.

Las características mecánicas que, en general, interesan en los aceros para herramientas, son la dureza, la tenacidad, la resistencia al desgaste y, a veces de manera especial, la indeformabilidad.

La dureza es la característica principal que deben poseer los aceros para herramientas. La dureza, depende del contenido de carbono y de los tratamientos térmicos a que sean sometidos los aceros.

La tenacidad es una propiedad en cierto modo contraria a la dureza. Si se dejan las herramientas después del temple con alta dureza, en general, resultarán frágiles. Y si se les da un revenido prolongado a alta temperatura, mejorará la tenacidad a costa de la dureza. Puede, sin embargo a veces, lograrse una buena solución de alta dureza y buena tenacidad, dando una gran dureza a la zona de trabajo de una herramienta (la punta o filo, por ejemplo) y dejando el resto de la pieza con poca dureza y bastante tenacidad.

La resistencia al desgaste interesa también en algunas herramientas sometidas al roce continuo. Esta resistencia no sólo depende de la dureza, sino que depende a veces tanto o más de la constitución del material. Así, se ha comprobado que la resistencia al desgaste de los aceros al cromo es debida a los granos de carburo.

La indeformabilidad de las herramientas interesa mucho, ya sea cuando se trata de fabricar matrices, troqueles, etc., cuyas dimensiones y forma deben variar lo menos posible en el tratamiento térmico.

III.2. EFECTO DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN SOBRE EL DIAGRAMA DE EQUILIBRIO Fe-C.

Todos los aceros son aleaciones que están formadas por muchos componentes que contienen una serie de impurezas inevitables (Mn, Si, P, O, N, H y otras), que pueden influir en sus propiedades. La presencia de impurezas se explica por la dificultad de su extracción durante la fusión (P, S) o por que pasan al acero durante el proceso de desoxidación (Mn, Si) o de la carga (chatarra) (Cr, Ni, y otros).

Además existen elementos introducidos especialmente para variar dichas propiedades y su estructura a nuestra conveniencia. Para la aleación se emplean fundamentalmente elementos que están ubicados cerca del hierro en el sistema periódico y, por esta razón, solubles en él.

Comúnmente, como elementos de aleación se usan el cromo, níquel, tungsteno, molibdeno, vanadio, titanio, aluminio, cobre, boro y raramente el circonio, niobio, plomo. El silicio, en una cantidad superior a un 0.4 - 0.5 %, y el manganeso, si el contenido de éste es superior al 1.0 %, también pertenecen a la categoría de elementos de aleación.

Durante la fusión del hierro con los elementos de aleación (sin la presencia del carbono) se forman las siguientes fases:

- 1) ferrita aleada: solución sólida del elemento de aleación en el hierro α
- 2) austenita aleada: solución sólida del elemento de aleación en el hierro γ
- 3) compuestos intermetálicos que pueden formar elementos de aleación con el hierro, si el contenido de estos es grande.

Todos estos elementos, excepto el carbono, nitrógeno y, posiblemente, el boro, forman con el hierro soluciones sólidas de sustitución.

Al disolverse en el hierro, los elementos de aleación influyen fuertemente en la posición de los puntos A_1 y A_2 , indicados por las flechas en la figura 3.1, que determinan la zona de temperatura de existencia del hierro α y γ .

Los elementos de aleación por su influencia en las formas alotrópicas del hierro pueden ser divididos en dos grupos. A los elementos del primer grupo pertenecen el níquel y el manganeso, ellos bajan el punto A_1 y suben el punto A_2 . Como resultado de esto en el diagrama del hierro - elemento de aleación se observa un ensanchamiento de la zona de la fase γ y un estrechamiento de la zona de existencia de la fase α , fig. 3.1.a, bajo la influencia de los elementos de aleación el punto

A, sube hasta alcanzar la línea de solidus, y el punto A₁ a una determinada concentración del elemento de aleación, descende hasta la temperatura ambiente.

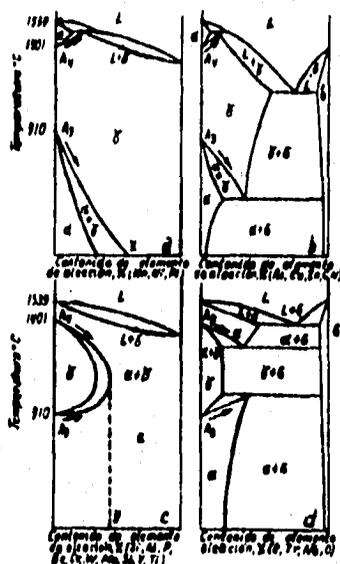


FIG. 3.1 ESQUEMAS DE PRINCIPIO DE LOS DIAGRAMAS BINARIOS DE ESTADO DEL HIERRO - ELEMENTOS DE ALEACIÓN

Por lo tanto, las aleaciones que tienen una concentración del elemento de aleación superior a la indicada en el punto X de la figura 3.1(a), no sufren transformaciones de fase durante el enfriamiento hasta la temperatura ambiente y, a todas las temperaturas, son una solución sólida del elemento de aleación en el hierro γ . Este tipo de aleaciones se llaman austeníticas.

A los elementos de este grupo pertenecen también el antimonio, cobre, zinc, carbono y nitrógeno. Sin embargo, si el contenido de éstos en la aleación no es muy grande, ellos amplían la zona de existencia de la fase γ fig. 3.1.b, pero a causa de su solubilidad limitada en el hierro, el cobre, el carbono, nitrógeno y otros elementos, si su contenido es mayor, al principio reducen la zona monofásica γ y posteriormente la eliminan por completo.

Los elementos del segundo grupo (Cr, W, Mo, V, Al, Si y otros) bajan el punto A_1 y suben el punto A_2 . Esto conduce a que, cierta concentración de los elementos de aleación (véase punto "y" en la fig.3.1.c), los puntos críticos coinciden y la zona de la fase γ se cierra por completo. Si el contenido del elemento de aleación es mayor que el indicado por "y" las aleaciones, a todas las temperaturas, están compuestas de una solución del elemento de aleación en el hierro α . Estas aleaciones se llaman ferríticas. A este grupo pertenecen también el boro, circonio y el niobio. Los elementos indicados, incluso si su contenido es comparativamente pequeño, reducen la zona de la fase γ . No obstante, como consecuencia de su débil solubilidad en el hierro, antes de cerrarse totalmente la zona de la fase γ , se forman aleaciones bifásicas fig. 3.1.d.

Al analizar el efecto de los elementos de aleación sobre las aleaciones hierro-carbono podemos clasificarlos debido al efecto sobre las temperaturas de transformación. Es de gran importancia la influencia en la transformación A_1 y A_2 . En casos menos frecuentes también lo es la influencia en la transformación A_3 . Al primer grupo clasificado pertenecen todos los elementos que desplazan la transformación A_1 del hierro hacia temperaturas más bajas. Al segundo corresponden los elementos que elevan la transformación A_1 , a medida que sube la proporción de aleantes. El hierro exento de carbono, su transformación de cristales δ en γ (A_1) se presenta a 1400°C aprox.,

y la de los cristales γ en α a unos 900°C aprox. Pero si se agrega carbono al hierro, la transformación de γ en α se desarrolla entonces a temperaturas más bajas, estando fijado el comienzo de la transformación por la línea G-S fig. 3.2. En cambio, la transformación de cristales δ en γ se desplaza hacia temperaturas más altas según sube el contenido en carbono, hasta que con aproximadamente 0.2% de carbono, sube hasta llegar a la línea de solidus, es decir, la temperatura del comienzo de la fusión. Este desplazamiento de la transformación es debido al efecto estabilizador de la red γ por el carbono. Por la misma causa se retrasa la formación de red α centrada en el cuerpo (A_3), o bien se favorece la de la red γ centrada en las caras durante la transformación de δ en γ . Se dice entonces, que se "amplia la región γ ".

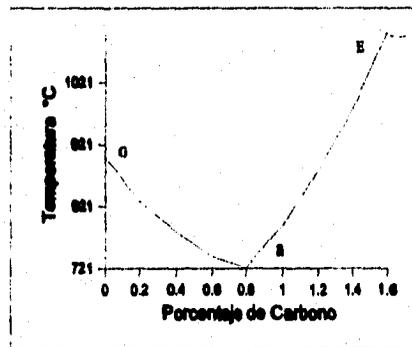


FIG. 3.2 AMPLIACIÓN POR EL CARBONO DE LA REGIÓN γ DEL HIERRO.

La ampliación de la región γ en la región de temperaturas elevadas, a causa del efecto del carbono, está limitada, naturalmente, por el comienzo de la fusión (línea de solidus). La ampliación de la región γ hacia temperaturas más bajas por disminución de la transformación A_1 (línea G-S) tendría, en cambio, que ser todavía mayor si por formación de una nueva fase (en este caso la precipitación de la combinación Fe₃C) no surgiese una constitución completamente distinta del material. Esto es debido a que la solución sólida γ carece de un poder de disolución ilimitado para el carbono, como sucede, por ejemplo, en el caso de otros elementos como el cobre con el níquel.

Los elementos de aleación que amplían la región γ sin la aparición de una nueva fase son el níquel, manganeso y cobalto, además de elementos del grupo como el platino que no tienen gran importancia para la fabricación del acero. Los elementos que amplían la región γ , pero que marcan un límite a la zona por aparición de otra fase, son, además del carbono, el nitrógeno y cobre. A este grupo pertenecen además los elementos: cinc, oro y renio, los cuales tampoco tienen gran utilidad en la práctica como aleantes.

Para los elementos de aleación que disminuyen la región γ , hay que hacer también diferencia entre dos subgrupos. Al primer grupo, cuyos elementos originan una restricción total, pertenecen los elementos del grupo del hierro, cromo, wolframio, molibdeno, vanadio y titanio, así como silicio, aluminio, fósforo y berilio. A dicho grupo hay que añadir además el arsénico, estaño y antimonio, sin embargo, carecen de interés como elementos de aleación, a no ser de que existan como impurezas fortuitas en el acero. Al segundo grupo pertenecen el tántalo y el niobio, así como el circonio y el cerio. Estos dos últimos empleados en la fabricación de aceros cromo-níquel austeníticos.

Los elementos de aleación cambian la posición del punto eutectoide en el diagrama hierro-carbono, ya que el acero aleado eutectoide no tiene ya el mismo porcentaje de carbono y, por tanto, se desplaza a derecha y a izquierda; ni la misma temperatura de transformación y por tanto se desplaza hacia arriba o hacia abajo. En líneas generales, ocurren las siguientes variaciones:

1.- El aluminio, el berilio, el niobio, el tantalio, el titanio y el circonio, forman carburos y aumenta, por tanto el contenido de carbono del eutectoide desplazándolo hacia la derecha.

2.- El cobalto, el cobre y el silicio forman soluciones sólidas con el hierro, pero no dan ningún carburo. Como consecuencia baja el contenido de carbono del eutectoide, desplazándose hacia la izquierda.

3.- El molibdeno, el cromo, el wolframio, el manganeso y el níquel disminuyen o aumentan el contenido de carbono del eutectoide, según la importancia de la aleación, pues de ella depende que formen soluciones sólidas con el hierro y el carbono o carburos metálicos.

Se ha tratado de concretar los desplazamientos del punto eutectoide, tanto vertical como horizontalmente, del diagrama hierro-carbono, que sirve en primera aproximación para estudiar las transformaciones de la nueva aleación.

Los valores de los desplazamientos se obtienen en función de dos coeficientes, uno para los desplazamientos verticales y otro para los horizontales. Se multiplican estos coeficientes por el tanto por ciento de la aleación y sobre el diagrama hierro-carbono se llevan los resultados obtenidos

con el signo que les corresponda. Los coeficientes propuestos para algunas aleaciones son los siguientes:

DESPLAZAMIENTOS.

	Ni	Cr	Mn	Ti	V	Mo	Co
Horizontales	-0.03	-0.065	-0.09	-0.08	-0.30	-0.13	-0.061
Verticales	-11.5	+8.30	-32.50	+7.00	+28.00	+3.00	+9.61

Por ejemplo, la aleación, que contenga el 1% de manganeso produce un desplazamiento de 32.5 hacia abajo, o sea, que el punto eutectoide estará a $723^\circ - 32.5^\circ = 690.5^\circ\text{C}$. y un desplazamiento de 0.09 unidades hacia la izquierda, o sea, que el punto eutectoide tendrá la abscisa correspondiente al contenido de carbono de: $0.89 - 0.09 = 0.8\%$

Si los elementos aleados son dos más, se suman las traslaciones obtenidas. (fig. 3.3).

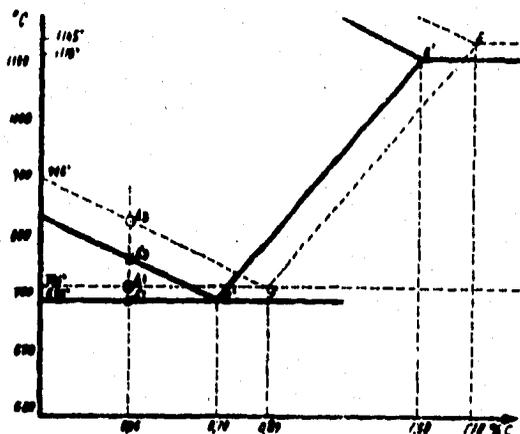


FIG. 3.3 INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN DE LOS ACEROS EN LA POSICIÓN DE LOS PUNTOS CRÍTICOS

III.3 EFECTO DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS RECOCIDOS.

Comercialmente los aceros se encuentran en estado de recocido, las herramientas de acero usualmente tienen una estructura de ferrita y carburo fino esferoidizado. La estructura de un acero recocido es la que más se aproxima al estado de equilibrio que se puede encontrar. Las propiedades mecánicas en los aceros en condiciones de recocido, dependen de su estructura y son el interés principal de los consumidores de aceros para herramienta, por su influencia en la maquinabilidad de los mismos.

Se ha comprobado que las propiedades mecánicas determinan el control de la maquinabilidad en las piezas de acero. Los efectos de los cambios en estas propiedades, sobre los esfuerzos de las herramientas, el consumo de energía, el acabado de la superficie, y el tiempo de vida de la herramienta se muestran en la Tabla 3.1. Esta claro en esta tabla, que un esfuerzo de corte bajo, una dureza baja, una templabilidad baja y un mínimo de inclusiones abrasivas, todas ellas contribuyen a ser más fácil el maquinado de los aceros.

La influencia de los elementos de aleación en la resistencia y la dureza de los aceros recocidos fomentan el endurecimiento de las soluciones sólidas de ferrita, por el incremento de partículas de carburos finas en la estructura, los cuales producen un endurecimiento por dispersión causando un tamaño de grano más fino y por cambiar la naturaleza de la fase de carburo a una aleación de carburo más abrasiva. El efecto de varios elementos de aleación en soluciones sólidas en el hierro se muestra en la Fig. 3.4

Además, el propósito común de los elementos de aleación es el de proporcionar la mínima dureza, en base al porcentaje en peso del elemento de aleación, que es producido por el Cromo, mientras que el mayor es producido por el Silicio.

A continuación se muestra la tabla 3.1

Tabla 3.1. Efecto de las propiedades mecánicas sobre las fuerzas, acabados de superficie y vida de la herramienta en el Maquinado.

Un decremento en la propiedad tiene el siguiente efecto:

Propiedad del metal a ser cortado.	Efecto conocido sobre los esfuerzos y el consumo de energía	Efecto usual sobre el acabado de la superficie	Efecto probable en la vida de la herramienta
Constante de Maquinado $C(a)$	Perjudicial	?	Perjudicial
Esfuerzo Cortante S_c	Bueno	Ninguno	Bueno
Coefficiente de Fricción C_f	Bueno	Bueno	Bueno
Dureza H	(b)	Ninguno	Bueno
Endurecimiento por deformación a	(b)	Bueno	Bueno
Cantidad de Dureza, inclusiones abrasivas en la microestructura	(b)	Ninguno	Bueno

(a) La constante de maquinado es una cantidad teóricamente relacionada al rango del cambio del esfuerzo de corte del metal con un esfuerzo de compresión aplicado. (b) Las fuerzas y las eficiencias están determinadas casi completamente por valores de la constante de maquinado, esfuerzo de corte y el coeficiente de fricción.

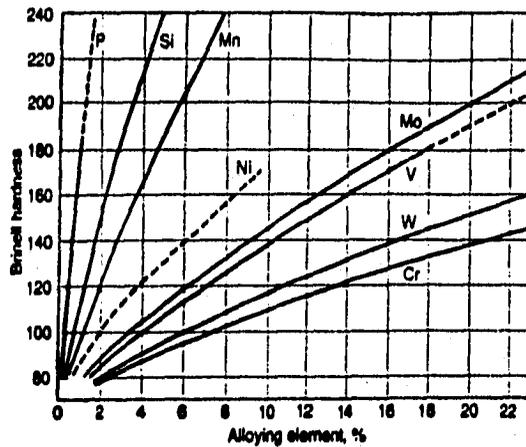


FIG. 3.4 EFECTOS PROBABLES DE ENDURECIMIENTO DE VARIOS ELEMENTOS DISUELTOS EN HIERRO PURO. UN GRAN TAMAÑO DE GRANO GRUESO ASUMIDO PARA TODAS LAS COMPOSICIONES, LA DUREZA DEL HIERRO PURO CONSIDERADA ES DE 70 BRINELL.

III. 4 EFECTO DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN SOBRE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE TEMPLE Y REVENIDO.

III.4.1 EN EL TEMPLE:

El primer paso en el tratamiento térmico de los aceros para herramienta es austenizar por calentamiento arriba del punto crítico. En el proceso de calentamiento, la ferrita y el carburo de la estructura recocida reaccionan para formar granos de austenita que crecen hasta chocar unos con otros, estableciendo así un tamaño inicial de grano de austenita. El calentamiento continuo da por resultado un crecimiento simultáneo de estos granos de austenita, y una solución de excedente de carburo.

Los elementos de aleación pueden tener los siguientes cambios en la etapa de calentamiento para el ciclo de templado

- 1. Aumenta o disminuye la temperatura crítica y altera el rango de temperatura sobre el cual la austenita es estable.**
- 2. Cambia la cantidad del carburo excedente en la estructura endurecida.**
- 3. Modifica el rango de solución del carburo excedente.**
- 4. Altera la características del grosor del grano.**

Formación de Austenita:

En las figuras 3.5, 3.6 y 3.7 se muestra gráficamente el efecto del manganeso, cromo y el molibdeno dentro de los límites de temperatura y los rangos de formación de austenita.

La parte inferior en forma de V, da la temperatura crítica para la formación de austenita (722.8 °C para el acero al carbono) y el contenido de carbono del punto eutéctico (0.75% C para acero al carbono). Como se podrá observar los elementos de aleación desplazan la temperatura y la composición del punto eutéctico y altera la posición del campo de austenita. Estos cambios son de considerable importancia por afectar la temperatura para dar un apropiado calentamiento, y evitar una cantidad de carburos sin disolver.

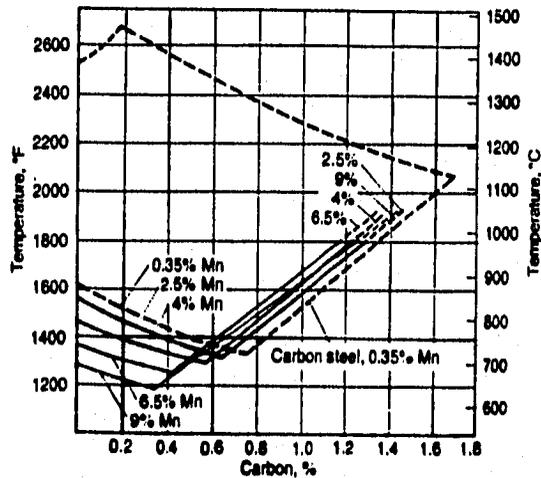


Fig. 3.5 EFECTOS PRODUCIDOS AL AUMENTAR EL MANGANESO EN DIVERSOS PORCENTAJES DE CARBONO EN LIMITES CON AUSTENITA PURA A ELEVADAS TEMPERATURAS.

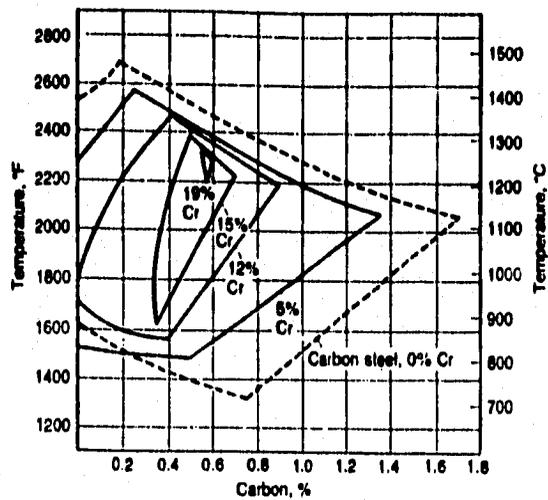


Fig. 3.6 EFECTOS PRODUCIDOS AL AUMENTAR EL CROMO EN DIVERSOS PORCENTAJES DE CARBONO EN LIMITES CON AUSTENITA PURA A ELEVADAS TEMPERATURAS.

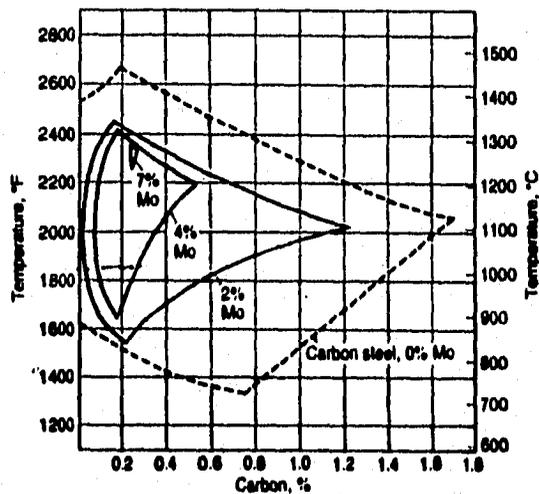


Fig. 3.7 EFECTOS PRODUCIDOS AL AUMENTAR EL MOLIBDENO EN DIVERSOS PORCENTAJES DE CARBONO EN LIMITES CON AUSTENITA PURA A ELEVADAS TEMPERATURAS.

Al comparar los efectos de varios elementos de aleación, podemos ver que generalmente al incrementar la cantidad del elemento aleante, a excepción del manganeso y el níquel, se incrementa la temperatura de temple. Fig. 3.8, con excepción del silicio, los elementos con mayor tendencia a formar carburos, incrementan la temperatura eutectoide a mayores distancias.

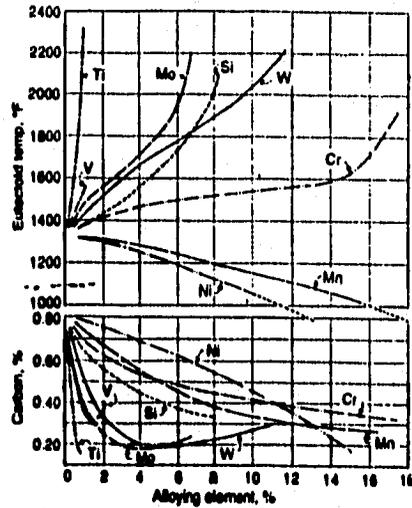


FIG. 3.8 EFECTOS DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN EN LA COMPOSICIÓN Y TEMPERATURA EUTECTOIDE.

La presencia de carburos aleados en la composición de los aceros herramienta tiende a mejorar la resistencia al desgaste, que es la más importante característica en el desempeño satisfactorio de los mismos.

En cuanto a lo que se refiere al tamaño de grano, lo más deseable es la obtención de un grano fino y así minimizar la posibilidad de distorsión o agrietamiento durante el templeado, así como obtener un máximo de tenacidad.

En estos aceros el exceso de carburo es responsable de retardar el crecimiento de grano durante el austenizado. La dispersión de estos carburos ayuda a mantener un tamaño de grano fino. Los elementos como el tungsteno, vanadio, molibdeno, cromo y titanio son fuertes restrictores al crecimiento de grano, mientras que el manganeso, el níquel y el silicio son menos efectivos.

Después del calentamiento para formar austenita y una reacción para disolver cantidad suficiente del excedente de carburo, una herramienta debe ser enfriada lo suficiente, para producir una estructura y dureza apropiada para la aplicación que se pretende. Usualmente, este requerimiento es equivalente a decir que el índice de enfriamiento debe ser lo suficientemente alto para producir suficiente martensita con muy poco producto de descomposición intermedia (carburo proeutectoide o ferrita, esferoidita, perlita o bainita). Los elementos de aleación influyen en el índice de enfriamiento necesario para lograr estas estructuras (influyen en la dureza). Cuando el carbono es el único elemento presente, se necesita un enfriamiento muy rápido (enfriar con agua) para producir martensita aún en pequeñas secciones; cuando se emplea un calentamiento menos rápido, el único producto de transformación que se consigue es perlita, que es considerablemente de menor dureza que la martensita. La dureza de la martensita depende principalmente de su contenido de carbono y se incrementa al aumentar el mismo (Fig. 3.9)

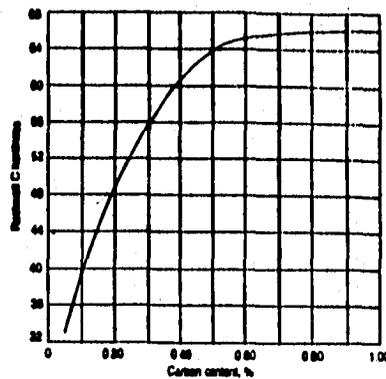


FIG. 3.9 EFECTO DEL CONTENIDO DE CARBONO SOBRE LA DUREZA DE LA MARTENSITA EN ACEROS DE BAJA ALEACIÓN.

Con excepción del cobalto, todos los elementos de aleación añadidos a los aceros herramienta tienden a desplazar la curva de transformación isotérmica, incrementando la templabilidad con medios de temple menos severos.

La figura 3.10 muestra el diagrama de transformación isotérmica para acero al carbono al 0.8% C con curvas de enfriamiento sobrepuestas para templeado en aceite y aire de una barra redonda de 3/4 pulg. Las principales características de este diagrama son una nariz predominante de perlita de 1330° a 1000°F (720.4° a 537.3°C), una sección de bainita rebajada entre 1000° y 470°F (537.3° y 243.1°C), y un rango de transformación de martensita de 470°F (243.1°C) a temperatura ambiente. Debido a que este es un acero para temple en agua, resulta un templeado suave en varias porciones de suave perlita en la estructura.

Las adiciones de aleaciones a los aceros para herramientas, afectan la porción de enfriamiento del ciclo de endurecimiento en una o más de las siguientes formas:

1. Mueve la curvas de transformación isotérmicas a tiempos más largos o más cortos, por lo que cambia el índice de enfriamiento y el medio de temple requerido para un endurecimiento completo.
2. Altera la forma de las curvas de transformación isotérmica, por lo que cambia las estructuras obtenidas y los rangos de la temperatura de transformación a índices de enfriamiento por abajo de los requeridos para un endurecimiento completo.
3. Cambia los puntos M_s y M_f para transformación de martensita a temperaturas más altas o más bajas, por lo que cambia la cantidad de austenita retenida en el templeado ó después del tratamiento de térmico.
4. Cambia la susceptibilidad del acero a la estabilización de la austenita de un enfriamiento lento o isotérmico sostenido, a temperaturas por debajo de M_s por lo que hay alteración adicional a la cantidad de austenita retenida después del templeado.

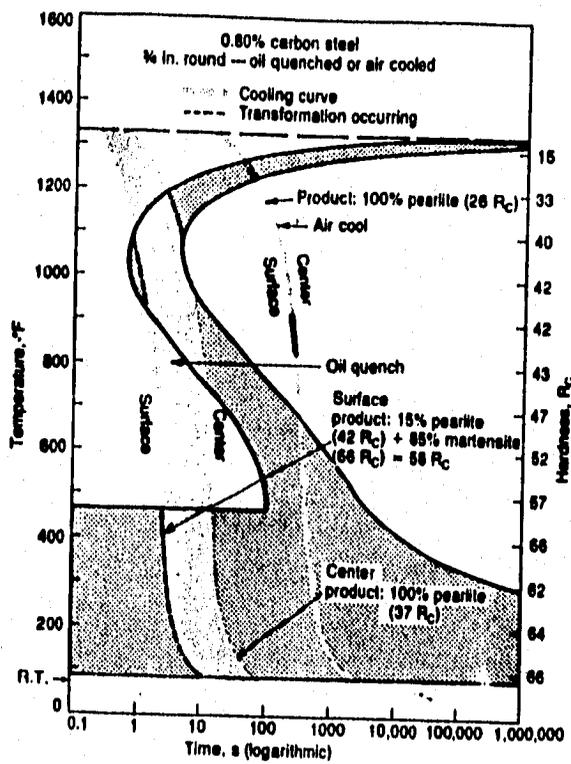


FIG. 3.10 DIAGRAMA DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA PARA UN ACERO AL 0.80% C, MOSTRANDO LAS ESTRUCTURAS OBTENIDAS, CON DIFERENTES MEDIOS DE TEMPLE.

Los elementos formadores de carburos como el cromo, molibdeno, tungsteno y vanadio tienden a alterar la forma de la curva de transformación isotérmica desplazándola a tiempos mayores. La figura 3.11 ejemplifica este efecto en un acero de baja aleación conteniendo cromo y molibdeno.

Comparándola con la figura 3.10 se nota una separación de las zonas de perlita y de bainita, desplazando la nariz perlítica drásticamente a la derecha. Con esto observamos que al enfriar muy lentamente obtenemos martensita y una estructura mixta conteniendo bainita en lugar de perlita. La bainita es un producto más duro que la perlita y no es perjudicial a las propiedades mecánicas de los aceros.

Los aceros para herramienta templados en aire contienen en gran proporción elementos formadores de carburos, no solo tienen una gran templabilidad, sino que en grandes piezas donde no es posible obtener productos martensíticos en el centro, el resultado es una estructura bainítica.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

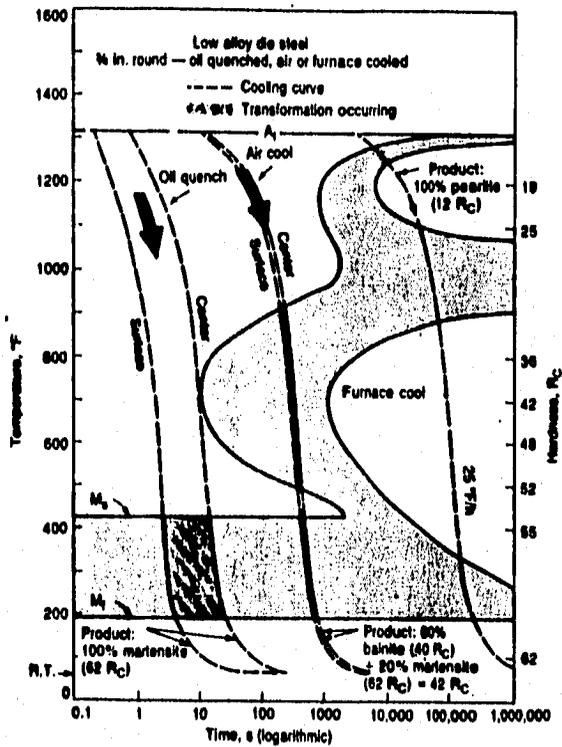


FIG. 3.11 CAMBIO EN LA FORMA DEL DIAGRAMA DE TRANSFORMACIÓN ISOTÉRMICA CAUSADA POR UNA COMPOSICIÓN DE BAJA ALEACIÓN.

Cuando aplicamos un enfriamiento rápido a muy bajas temperaturas, los productos de transformación intermedios no se logran formar por completo en la estructura, y parte de la estructura no se forma en martensita sino austenita retenida. Si la austenita retenida se presenta en cantidades excesivas puede bajar la dureza esperada de las herramientas. La estabilidad dimensional, los esfuerzos en la estructura y la tenacidad pueden ser afectados por esta presencia.

En la ausencia de exceso de carburos, el efecto de varios elementos de aleación, sobre M_s , y su influencia sobre la cantidad de austenita retenida puede ser aproximada por los factores dados en la Tabla 3.2. Note que aquellos elementos que bajan la curva M_s , incrementan la cantidad de austenita retenida, mientras que los elementos que elevan M_s , como el cobalto y el aluminio, disminuyen la cantidad de austenita retenida.

Tabla 3.2. EFECTO DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN SOBRE LA TEMPERATURA M_s Y LA AUSTENITA RETENIDA EN UN ACERO DE BAJA ALEACIÓN AL 1% C.

ELEMENTO	CAMBIO DE M_s POR 1% DEL ELEMENTO	CAMBIO DE AUSTENITA RETENIDA POR 1% DEL ELEMENTO
CARBONO	-540 °F	+50%
MANGANESO	-60	+20
CROMO	-40	+11
NÍQUEL	-30	+10
MOLIBDENO	-20	+9
TUNGSTENO	-20	+8
SILICIO	-20	+6
COBALTO	+10	-3
ALUMINIO	+30	-4

III.4.2 EN EL REVENIDO:

El revenido de los aceros al carbono, produce cambios estructurales dentro de la martensita y austenita retenida que se reflejan como cambios en las características de dureza de un acero sin aleación. Cuando se agregan elementos de aleación al acero al carbono, los cambios de estructura y dureza en el revenido son alterados. La figura 3.12 muestra 4 curvas de revenido encontradas en los aceros grado herramienta.

La Clase 1 es típica de herramientas de acero para herramienta de baja aleación, en el cual ocurre un ablandamiento con aumento de la temperatura, debido a la precipitación, y crecimiento de hierro o carburos de baja aleación. La Clase 2 representa un acero para trabajo en frío con mediana aleación, en el cual la precipitación de carburo, acompañado de un ablandamiento, ha sido retardado por las adiciones de aleación. Un amplio rango de curvas intermedias entre las clases 1 y 2 se obtienen con aceros de baja a mediana aleación entre esos extremos.

La Clase 3 es representativa de aceros de alta velocidad, en la cual ciertos elementos de aleación producen un fenómeno llamado "endurecimiento secundario". En lugar de un mero ablandamiento retardado, esos elementos son capaces de reendurecer el acero a altas temperaturas de revenido, a una dureza igual, o excediendo aquellos en una condición sin templado.

La Clase 4 representa a los aceros para herramienta para trabajo en caliente, exhibe una reacción de endurecimiento secundario similar a la Clase 3. Aquí, sin embargo, un contenido menor de carbono produce una dureza relativamente baja, por enfriamiento de inmersión, que es reproducida por el pico del endurecimiento secundario.

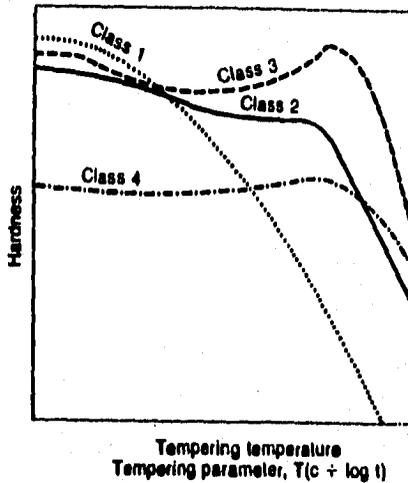


FIG. 3.12 CUATRO TIPOS PRINCIPALES DE DUREZA VS. CURVAS DE REVENIDO ENCONTRADAS EN LOS ACEROS HERRAMIENTAS.

El endurecimiento secundario es producido por una combinación de dos procesos:

1. Acondicionamiento de austenita retenida y su transformación a martensita en el enfriamiento a partir de la temperatura de revenido.
2. Precipitación de una dispersión extremadamente fina de carburos aleados.

Todos los aceros en la condición de templado, contienen un porcentaje de austenita retenida. En aceros de baja a mediana aleación esta austenita se transforma a bainita o es parcialmente estabilizada a bajas temperaturas de revenido. En aceros de alta aleación con endurecimiento secundario, la austenita retenida permanece sin transformación hasta 800° a 1000°F (426.3° a 537.3°C), donde ocurre una reacción de acondicionamiento. La austenita se transforma a martensita en un

enfriamiento subsecuente desde la temperatura de revenido. El progreso de esta reacción de acondicionamiento en el revenido se refleja como un incremento en M_s .

La martensita que se forma de la austenita retenida en el enfriamiento desde la temperatura de revenido, es por supuesto sin templado. Frecuentemente un segundo revenido se emplea para endurecer esta martensita recién formada.

Quizás el mejor ejemplo de contribución hecha por la austenita retenida para el endurecimiento secundario se encuentra en los aceros de alto carbono, alto cromo. Austenizando un acero de alto-carbono, alto-cromo cerca de 200°F (93.3°C) por arriba de su rango normal de endurecimiento, pueden ser retenidas grandes cantidades de austenita que resultan en una baja dureza por el enfriamiento. Templando de 1000° a 1100°F (537.3° a 592.7°C) ocurre el acondicionamiento formando grandes cantidades de nueva martensita, y la dureza aumenta bruscamente.

El tipo de endurecimiento secundario, tiene un uso práctico limitado porque las grandes cantidades de austenita requeridas pueden producir grandes e impredecibles movimientos, y hay un peligro adicional de no lograr la dureza de trabajo deseada en estos aceros. Conforme a ésto, son normalmente endurecidos desde 1800°F (981.2°C) y templados desde 300° a 600°F (148.7°C a 315.2°C) de aquí que, se siga la curva de Clase 2 más convencional para estos análisis.

El otro factor que contribuye a un endurecimiento secundario, la precipitación de carburos aleados submicroscópicos ocurre en el rango de temperatura de 900° a 1200° F (481.7° a 648.2°C). A la fecha, los resultados de la investigación indican que sólo tres carburos aleados son capaces de producir este efecto: W_3C , Mo_2C ó VC . Suficientes cantidades de los elementos de tungsteno,

molibdeno o vanadio deben estar presentes para que estos carburos puedan precipitarse para obtener el efecto de reendurecimiento. La figura 3.13 muestra una curva de revenido para un acero al tungsteno para trabajo en caliente, conteniendo 0.36%C, 8.8%W, 3.04%Cr, 0.20%V y 3.20% Co. A temperaturas por debajo del pico del endurecimiento secundario solo se encuentra el Fe_3C , mientras que arriba de este pico solo se encuentra W_2C . La apariencia final del carburo en equilibrio $(Fe,W)_6C$ se acompaña de un rápido ablandamiento.

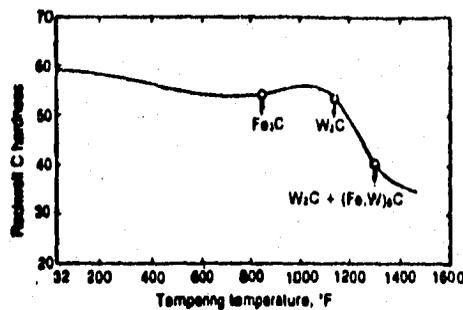


FIG. 3.13 CURVA DE DUREZA VS. TEMPERATURA DE REVENIDO PARA UN ACERO PARA TRABAJO EN CALIENTE AL TUNGSTENO, MOSTRANDO VARIOS CARBUROS QUE FUERON DETECTADOS POR RAYOS X.

La figura 3.14 ilustra un pronunciado endurecimiento secundario debido, a la precipitación de carburos aleados, que se producen por el aumento de aleaciones de vanadio, molibdeno, tungsteno y cromo. Los aceros involucrados en este estudio fueron templados en oxígeno líquido $-300^{\circ}F$ ($-184.2^{\circ}C$) para minimizar la austenita retenida y aislar el efecto de la precipitación de la aleación de carburos. Note que en ausencia de grandes cantidades de austenita retenida, el cromo retarda bruscamente el rango de ablandamiento pero no produce un verdadero pico de endurecimiento secundario.

En vista de su efecto en el endurecimiento secundario, podría esperarse que el vanadio, molibdeno o tungsteno podrían ser esenciales para la retención de alta dureza a elevadas temperaturas en tales aceros, como los aceros de alta velocidad, o aceros para trabajo en caliente. Actualmente uno o más de estos elementos se incorporan en porcentajes apreciables en cada acero para herramienta utilizados para este propósito. El endurecimiento secundario de la fuente primeramente mencionada, con austenita retenida, es de poco valor para la dureza en caliente.

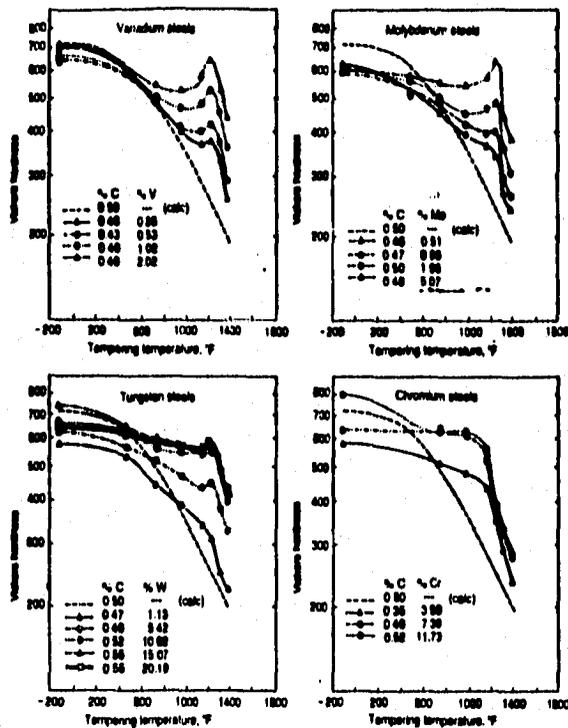


FIG. 3.14 ENDURECIMIENTO SECUNDARIO DEBIDO A LA PRECIPITACIÓN DE ALEACIONES DE CARBUROS, PRODUCIDOS POR ADICIONES DE VANADIO, MOLIBDENO, TUNGSTENO Y CROMO A UN ACERO AL 0.50% C.

Resumiendo, podemos decir que las adiciones de aleaciones a los aceros para herramientas pueden cambiar la curva de dureza vs temperaturas de revenido de un acero al carbono similar a uno que tenga un pico de endurecimiento secundario marcada en 1000° y 1100°F (537.24° y 592.74°C) con alta dureza en caliente.

El efecto de los elementos a este respecto se relaciona principalmente por la precipitación de aleación de carburos especiales, y secundariamente al acondicionamiento y subsecuente transformación de la austenita retenida. Los elementos de aleación producen endurecimiento secundario o ablandamiento retardado, o ambos en más o menos el siguiente orden de disminución de efectividad: vanadio, molibdeno, cromo, tungsteno, silicio con poco o ningún efecto del níquel o manganeso.

Estos efectos dependen mucho del carbono y de las aleaciones disueltas en la austenita durante el endurecimiento previo, y se reduce por el carburo excedente que permanece en la estructura.

IV. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS GRADO HERRAMIENTA.

IV.1 GENERALIDADES.

El desarrollo industrial de estos últimos años ha multiplicado la necesidad de herramientas, creándose tipos especiales para cada trabajo, con características de dureza, tenacidad, indeformabilidad, etc., cada vez más elevadas. Actualmente se fabrican aceros adecuados para toda clase de herramientas, desde las más sencillas, como son las herramientas agrícolas o las de carpintería, hasta las cuchillas de acero rápido para máquinas herramientas. El mejor conocimiento de los tipos de aceros para herramientas que se fabrican actualmente y de sus características, es absolutamente indispensable para lograr mejores tiempos de fabricación, mayores rendimientos en la producción y una más alta productividad en la industria.

Los aceros de herramientas sirven para trabajar otros materiales con o sin arranque de viruta. Se clasifican según su composición en aceros sin alea, débilmente aleados o fuertemente aleados; según el procedimiento empleado para su enfriamiento brusco, o temple, en aceros templados al agua, al aceite o al aire y según su aplicación (temperatura de trabajo) en aceros para trabajo en frío o para trabajo en caliente. El contenido de carbono de los aceros de herramientas sin alea y de los de baja aleación está comprendido entre 0.5 y 1.5%, los aceros de herramientas de alta aleación pueden llegar a contener hasta un 2.2% de carbono.

Al final del capítulo, se mostrará una tabla que incluye la clasificación general de los aceros grado herramienta. (TABLA 4.3)

IV.2 ACEROS PARA HERRAMIENTA AL CARBONO.

En los aceros de herramientas sin alear el contenido de carbono (0.5 a 1.5% C) es decisivo para el empleo. Cuanto más elevado sea el contenido de carbono, mayor será la dureza alcanzable. Estos aceros se emplean bastante, debido a su bajo costo, buena tenacidad, y excelente facilidad de maquinado. Son aceros con temple poco profundo, inadecuados para aplicaciones en que no debe haber deformación, debido a la facilidad de combadura y tienen una resistencia deficiente contra el reblandecimiento a temperaturas elevadas.

Los aceros al carbono se temple desde 760° hasta 850°C y según el empleo que hayan de tener se revienen a 200° hasta 300°C. Estos aceros se hacen más duros que los aceros de alta aleación pero pierden su dureza a una temperatura de trabajo que sobrepase los 200°C. La temperatura de forja de los aceros para herramientas al carbono está comprendida entre los 800° y 1000°C.

IV.3 ACEROS PARA HERRAMIENTA DE BAJA ALEACIÓN.

Los aceros de herramientas de baja aleación van aleados con Cr, W, Ni, Mo, y V, hasta un total de 5%. Su temperatura de temple se halla comprendida entre los 780° y los 850°C y la temperatura de forja entre 900° y 1100°C. Sin embargo, hay que tener en cuenta, las prescripciones de tratamiento de las casas suministradoras. Admiten en el arranque de viruta velocidades de corte más elevadas que los aceros para herramientas al carbono. Pierden su dureza y su consistencia del corte sólo cuando se llega a temperaturas de trabajo de los 400°C.

Además estos aceros tienen mejor resistencia a la corrosión, con lo cual se logra la misma o mayor duración útil en secciones delgadas que con cualquier otro acero para herramientas al carbono. Otras características de estos aceros para herramientas de baja aleación son: la resistencia a las cargas repetidas y a la abrasión durante el servicio.

Los aceros de baja aleación son también adecuados para herramientas de cizallamiento y estampación, troqueles, moldes para colada a presión por inyección y para prensado, así como para instrumentos de medición.

IV.4 ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA PROPÓSITOS ESPECIALES.

Los aceros de herramientas para propósitos especiales pertenecen al grupo L, de la clasificación de los aceros herramientas, contienen pequeñas cantidades de Cr, V, Ni, Mo. Anteriormente, 7 aceros formaban parte de este grupo, pero por la disminución de la demanda sólo los tipos L2 y L6 permanecen. El acero L2 contiene de 0.5 a 1.1% C, sus principales elementos de aleación son el Cr y el V. Es un acero templeable en aceite. El acero L6 contiene pequeñas cantidades de Cr y Mo más 1.5% Ni para incrementar la dureza, también es un acero templeable en aceite. Ambos aceros tienen una tenacidad elevada, por ende baja resistencia al desgaste, más sin embargo, se obtiene un temple seguro y preciso. Estos aceros se emplean para calderas de vapor, recalentadores, árboles de turbinas de vapor y de gas, así como también en las válvulas de escape de los motores de combustión interna. Estos aceros conservan sus propiedades de resistencia hasta los 600°C y resisten la oxidación hasta los 800°C.

IV.5 ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN FRÍO.

Los aceros para herramientas para trabajo en frío se dividen en tres grupos: templados en aceite (grupo O), endurecidos al aire con mediana aleación (grupo A) y de alto carbono y alto cromo (grupo D). En general, esta clase de acero posee elevada resistencia al desgaste, gran facilidad para templearlos y sufre poca deformación; pero, en el mejor de los casos, es sólo mediano en cuanto a la tenacidad y resistencia al reblandecimiento por el calor. La facilidad de maquinado puede ser desde

buena en el grado templado en aceite, hasta deficiente en los aceros de alto carbono y alto cromo.

ACEROS ENDURECIDOS AL AIRE CON MEDIANA ALEACIÓN: (grupo A), están compuestos por elementos de aleación, los cuales proporcionan una gran dureza en secciones de hasta 100 mm (4 pulg) de diámetro, en enfriamientos al aire desde la temperatura de austenitización. Estos aceros tienen un mínimo de distorsión, buena resistencia al desgaste y máxima precisión y seguridad en el temple.

El acero tipo A6 contiene como elementos principales de aleación al Mn, Cr, Mo, mientras que los otros aceros del mismo grupo; tales como, el A2, A3, A7, A8 y A9 contienen un alto porcentaje de Cr, (5%), el cual les proporciona una resistencia moderada al reblandecimiento a elevadas temperaturas. Los tipos de aceros A4, A6 y A10 tienen un contenido menor de Cr (1%) y un contenido elevado de Mn (2%). Pueden ser endurecidos a una temperatura de 100°C menos que aquellos que requieren los aceros de alto carbono y alto cromo.

ACEROS DE ALTO CARBONO Y ALTO CROMO: (grupo D) contienen de 1.5 a 2.35% de Carbono y 12% de Cromo, con la excepción del tipo D3, también contienen 1% de Mo. Todos los aceros para herramientas del grupo D son endurecidos al aire, excepto el acero D3 el cual es templado en aceite así las herramientas hechas de un acero D3 son más susceptibles a la distorsión y fractura durante el endurecimiento.

Los aceros del grupo D poseen una elevada resistencia al reblandecimiento a elevadas temperaturas, así como también una buena resistencia al desgaste especialmente el D7, el cual tiene altos contenidos de C y V. Todos los aceros del grupo D, particularmente los de alto carbono tipos D3, D4 y D7 contienen muchos carburos, los cuales los hacen frágiles y quebradizos.

ACEROS TEMPLADOS EN ACEITE: (grupo O) tienen un elevado contenido de carbono, más otros elementos de aleación, los cuales les proporcionan una dureza moderada cuando se templen en aceite desde la temperatura de austenitización. El acero tipo O1 contiene Mn, Cr y W. El acero tipo O2 está básicamente aleado con manganeso. El acero O6 contiene Si, Mn y Mo. El acero tipo O7 contiene Mn, Cr y un contenido más elevado de W que el acero del tipo O1.

Estos aceros poseen una gran resistencia al desgaste a temperaturas normales, como resultado de su elevado contenido de carbono. Por otro lado, tienen una baja resistencia al reblandecimiento a elevadas temperaturas. Las herramientas fabricadas con este tipo de aceros pueden ser fácilmente reparadas o renovadas con soldadura, de acuerdo con ciertos procedimientos.

Con los aceros para trabajo en frío pueden trabajarse materiales con y sin arranque de viruta. Partiendo de ellos se fabrican cuchillas para torno, cepilladoras, brocas, fresas, herramientas para tallado de roscas así como también herramientas para cizallar y estampar.

IV.6 ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN CALIENTE.

Los aceros para herramientas para trabajo en caliente están fabricados con aleaciones de cromo, tungsteno y molibdeno, que poseen grandes cualidades contra la deformación, para templeado, tenacidad y resistencia al reblandecimiento por el calor. Puede emplearse temple al agua o al aceite.

Los aceros para herramientas para trabajo en caliente (grupo H) han sido desarrollados, para resistir las combinaciones de calor, presión y abrasión asociadas con tales operaciones. La tabla 4.1 muestra la resistencia de cuatro aceros para herramientas para trabajo en caliente, al reblandecimiento después de 100 hr. a temperaturas desde 480° a 760°C

Tabla 4.1

Resistencia de cuatro aceros para herramienta para trabajo en caliente al reblandecimiento a elevadas temperaturas.

ACERO TIPO	DUREZA ORIGINAL (Rc)	DUREZA Rc después de 100 hr a:					
		480°C	540°C	600°C	650°C	700°C	760°C
H13	50.2	48.7	45.3	29.0	22.7	20.1	13.9
	41.7	36.8	36.3	27.7	23.7	20.2	13.2
H21	49.2	48.7	47.6	37.2	27.4	19.8	15.2
	36.7	34.8	34.9	32.6	27.1	19.8	14.9
H23	40.8	40.0	40.6	40.8	38.6	33.2	25.8
	38.9	38.9	38.0	38.0	37.1	32.5	25.6
H26	51.0	50.6	50.3	47.1	38.4	26.9	21.3
	42.9	42.4	42.3	41.3	34.9	26.4	21.1

Generalmente estos aceros tienen un contenido medio de carbono, es decir, de 0.35 a 0.45%, y el contenido de Cr, W, Mo y V varía de 6 a 25%. Los aceros para herramientas para trabajo en caliente se dividen en tres subgrupos como se mencionó al inicio:

- ACEROS PARA TRABAJO EN CALIENTE AL CROMO** (tipos H10 al H19)
- ACEROS PARA TRABAJO EN CALIENTE AL TUNGSTENO** (tipos H21 al H26)
- ACEROS PARA TRABAJO EN CALIENTE AL MOLIBDENO** (tipo H42)

Aceros para trabajo en caliente al cromo: (tipos H10 al H19) tienen buena resistencia al reblandecimiento a altas temperaturas gracias a su contenido medio de Cr y de los elementos formadores de carburos como son el Mo, W y V un incremento de Si, mejora la resistencia a la oxidación a temperaturas superiores de 800°C. Los aceros más empleados de este grupo son los tipos H11, H12, H13 y en menor cantidad el H19. Estos aceros son endurecidos al aire y el acero tipo H11 es empleado para la tecnología espacial.

Aceros para trabajo en caliente al tungsteno: (tipos H21 al H26) los elementos principales de aleación para estos aceros son el C, W, Cr y V, estos elementos de aleación los hacen más resistentes al reblandecimiento y al desgaste a altas temperaturas en comparación con los aceros H11 y H13, pero son más quebradizos en relación a los aceros al cromo. Estos aceros al tungsteno pueden ser endurecidos al aire, pero normalmente son templados en aceite o en sales para reducir la formación de escamas.

Aceros para trabajo en caliente al molibdeno: (tipo H42) es el único acero para trabajo en caliente al molibdeno, el cual contiene: Mo, Cr, V y C, con pequeñas cantidades de W, es similar a los aceros para trabajo en caliente al tungsteno en características y usos, pero una de sus ventajas es su bajo costo. Este acero es más resistente a altas temperaturas que los aceros al tungsteno, pero requiere de gran cuidado en el tratamiento térmico, particularmente en la descarburización y en el control de la temperatura de austenitización.

IV.7 ACEROS PARA HERRAMIENTA DE ALTA VELOCIDAD.

Existen dos clasificaciones para los aceros para herramienta de alta velocidad: aceros de alta velocidad al molibdeno (grupo M), y los aceros de alta velocidad al tungsteno (grupo T). Son los mejores aceros para herramienta y poseen la mejor combinación de todas las propiedades, excepto la tenacidad, que no es crítica para operaciones de corte a alta velocidad. En algunos casos se agrega cobalto para mejorar las cualidades cortantes en operaciones de desbastado. Al calentarse al rojo, mantienen una dureza considerable, como se puede apreciar en la gráfica 4.2, en comparación con otros aceros herramienta.

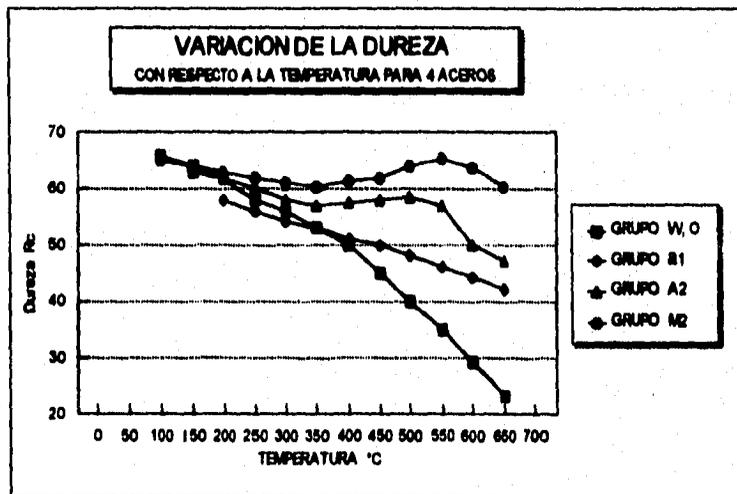


Fig. 4.2

Se requieren temperaturas muy elevadas para tratarlos térmicamente y, por lo general, los aceros para alta velocidad al tungsteno cobalto requieren temperaturas más altas para el enfriamiento por inmersión que los aceros al molibdeno. Los aceros para alta velocidad se deben templar a unos 595°C, para aumentar la tenacidad; debido a un efecto secundario, la dureza de los aceros templados

puede ser mayor que la que poseen después del enfriamiento por inmersión.

La ventaja de los aceros para alta velocidad del grupo M en relación a los del grupo T es su bajo costo.

ACEROS PARA HERRAMIENTA DE ALTA VELOCIDAD AL MOLIBDENO:

Contienen como elementos de aleación: Mo, W, Cr, V, Co y C. Estos aceros tienen una dureza ligeramente mayor que los aceros del tipo T, asimismo, las propiedades mecánicas son similares para ambos tipos de aceros. Incrementando el contenido de C y V en los aceros del grupo M, se aumenta la resistencia al desgaste, agregando cobalto se mejora la dureza al rojo. El acero tipo M2 como se vio en la gráfica anterior, es un acero que normalmente tiene una alta resistencia al reblandecimiento a altas temperaturas, como resultado del alto contenido de aleantes que contiene. Los aceros del grupo M se descarburizan con gran facilidad y son dañados debido a sobrecalentamientos bajo ambientes adversos de austenitización, son más sensibles que los aceros del grupo T. La máxima dureza que se puede obtener con los aceros del grupo M varía de acuerdo a su composición, para los aceros del tipo M1, M2, M10 (que tienen una baja composición de carbono), M30, M33, M34 y M36 la máxima dureza que se puede obtener es de 65 RC. Mientras que para los aceros con alto contenido de carbono del tipo M3, M4 y M7 la máxima dureza es 66 RC y, para los aceros que contienen cobalto del tipo M41, M42, M43, M44 y M46 la dureza es de 69 a 70 RC.

ACEROS PARA HERRAMIENTAS DE ALTA VELOCIDAD AL TUNGSTENO:

Tienen como elementos principales de aleación al W, Cr, V, Co y C. Los aceros del grupo T se caracterizan por su elevada dureza al rojo y su resistencia al desgaste. Se templean en aceite o bien en

sales fundidas. El tipo T15 es el acero más resistente al desgaste de este grupo.

La combinación de buena resistencia al desgaste y elevada dureza al rojo hacen de los aceros del grupo T, los más adecuados para trabajos en caliente con estampas, matrices de prensa, así como también para herramientas para torneado, cepillar, fresar, taladrar, etc.

Los aceros para herramientas de alta velocidad, pertenecen al tipo de aceros de herramientas de alta aleación, también llamados aceros rápidos, para arranque de viruta. Como la temperatura de temple está comprendida según su composición y empleo que hayan de tener entre los 920° y los 1320°C, y las temperaturas de revenido oscilan entre los 100° y 670°C, hay que mantener las prescripciones que para los tratamientos térmicos dan las acerías.

Trabajando con aceros para herramientas de alta velocidad, la velocidad de corte puede ser notablemente más elevada que con los aceros de baja aleación. Admiten temperaturas de trabajo hasta aproximadamente los 550°C. Su temperatura de temple es de 1180° a 1320°C y su temperatura de revenido de 530°C a 590°C. Mediante el revenido a estas temperaturas se produce un aumento de la dureza.

A continuación se muestra la tabla 4.3 que muestra todos los tipos de aceros para herramientas.

TABLA 4.3 LIMITES DE COMPOSICIÓN DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE ACEROS PARA HERRAMIENTAS:

Designaciones: (%) DE COMPOSICIÓN:
 AISI SAE UNS C Mn Si Cr Ni Mo W V Co

ACEROS PARA HERRAMIENTAS DE ALTA VELOCIDAD AL MOLIBDENO:

M1	M1	T11301	0.78-0.88	0.15-0.40	0.20-0.50	3.50-4.00	0.30 max	8.20-9.20	1.40-2.10	1.00-1.35	-
M2	M2	T11302	0.78-0.88	0.15-0.40	0.20-0.45	3.75-4.50	0.30 max	4.50-5.50	5.50-6.75	1.75-2.20	-
										0.95-1.05	
M3, c1	M3	T11313	1.00-1.10	0.15-0.40	0.20-0.45	3.75-4.50	0.30 max	4.75-6.50	5.00-6.75	2.25-2.75	-
M3, c2	M3	T11323	1.15-1.25	0.15-0.40	0.20-0.45	3.75-4.50	0.30 max	4.75-6.50	5.00-6.75	2.75-3.75	-
M4	M4	T11304	1.25-1.40	0.15-0.40	0.20-0.45	3.75-4.75	0.30 max	4.25-5.50	5.25-6.50	3.75-4.50	-
M6	..	T11306	0.75-0.85	0.15-0.40	0.20-0.45	3.50-4.50	0.30 max	4.50-5.50	3.75-4.75	1.30-1.70	11.00-13.00
M7	..	T11307	0.97-1.05	0.15-0.40	0.20-0.55	3.50-4.00	0.30 max	8.20-9.20	1.40-2.10	1.75-2.25	-
M10	..	T11310	0.84-0.94	0.10-0.40	0.20-0.45	3.75-4.50	0.30 max	7.75-8.50	-	1.80-2.20	-
										0.95-1.05	
M30	..	T11330	0.75-0.85	0.15-0.40	0.20-0.45	3.50-4.25	0.30 max	7.75-9.00	1.30-2.30	1.00-1.40	4.50-5.50
M33	..	T11333	0.85-0.92	0.15-0.40	0.15-0.50	3.50-4.00	0.30 max	9.00-10.00	-	1.30-2.10	1.00-1.35 7.75-8.75
M34	..	T11334	0.85-0.92	0.15-0.40	0.20-0.45	3.50-4.00	0.30 max	7.75-9.20	1.40-2.10	1.90-2.30	7.75-8.75
M36	..	T11336	0.80-0.90	0.15-0.40	0.20-0.45	3.75-4.50	0.30 max	4.50-5.50	3.50-6.50	1.75-2.25	7.75-8.75
M41	..	T11341	1.05-1.15	0.20-0.60	0.15-0.50	3.75-4.50	0.30 max	3.25-4.25	6.25-7.00	1.75-2.25	4.75-5.75
M42	..	T11342	1.05-1.15	0.15-0.40	0.15-0.65	3.50-4.25	0.30 max	9.00-10.00	-	1.15-1.85	0.95-1.35 7.75-8.75
M43	..	T11343	1.15-1.25	0.20-0.40	0.15-0.65	3.50-4.25	0.30 max	7.50-8.50	2.25-3.00	1.50-1.75	7.75-8.75
M44	..	T11344	1.10-1.20	0.20-0.40	0.30-0.55	4.00-4.75	0.30 max	6.00-7.00	5.00-5.75	1.85-2.30	11.00-12.25
M46	..	T11346	1.22-1.30	0.20-0.40	0.40-0.65	3.70-4.20	0.30 max	8.00-8.50	1.90-2.20	3.00-3.30	7.80-8.80
M47	..	T11347	1.05-1.15	0.15-0.40	0.20-0.45	3.50-4.00	0.30 max	9.25-10.00	-	1.30-1.80	1.15-1.35 4.75-5.75

ACEROS PARA HERRAMIENTA DE ALTA VELOCIDAD AL TUNOSTENO:

T1	T1	T12001	0.65-0.80	0.10-0.40	0.20-0.40	3.75-4.00	0.30 max	-	17.25-18.75	0.90-1.30	-
T2	T2	T12002	0.80-0.90	0.20-0.40	0.20-0.40	3.75-4.50	0.30 max	1.00 max	17.50-19.00	1.80-2.40	-
T4	T4	T12004	0.70-0.80	0.10-0.40	0.20-0.40	3.75-4.50	0.30 max	0.40-1.00	17.50-19.00	0.80-1.20	4.25-5.75
T5	T5	T12005	0.75-0.85	0.20-0.40	0.20-0.40	3.75-3.00	0.30 max	0.50-1.25	17.50-19.00	1.80-2.40	7.00-9.50
T6	..	T12006	0.75-0.85	0.20-0.40	0.20-0.40	4.00-4.75	0.30 max	0.40-1.00	18.50-21.00	1.50-2.10	11.00-13.00
T8	T8	T12008	0.75-0.85	0.20-0.40	0.20-0.40	3.75-4.50	0.30 max	0.40-1.00	13.25-14.75	1.80-2.40	4.25-5.75
T13	..	T12013	1.50-1.60	0.15-0.40	0.15-0.40	3.75-3.00	0.30 max	1.00 max	11.75-13.00	4.50-5.25	4.75-5.25

TABLA 4.3 LIMITES DE COMPOSICIÓN DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE ACEROS PARA HERRAMIENTAS

(cont)

Designaciones: (%) DE COMPOSICIÓN:
 AISI SAE UNS C Mn Si Cr Ni Mo W V Co

ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN CALIENTE AL CROMO:

H10	..	T20810	0.35-0.45	0.25-0.70	0.80-1.20	3.00-3.75	0.30 max	2.00-3.00	-	0.25-0.75	-
H11	H11	T20811	0.33-0.43	0.20-0.50	0.80-1.20	4.75-5.50	0.30 max	1.10-1.60	-	0.30-0.60	-
H12	H12	T20812	0.30-0.40	0.20-0.50	0.80-1.20	4.75-5.50	0.30 max	1.25-1.75	1.00-1.70	0.50 max	-
H13	H13	T20813	0.32-0.45	0.20-0.50	0.80-1.20	4.75-5.50	0.30 max	1.10-1.75	-	0.80-1.20	-
H14	..	T20814	0.35-0.45	0.20-0.50	0.80-1.20	4.75-5.50	0.30 max	-	4.00-5.25	-	-
H19	..	T20819	0.32-0.45	0.20-0.50	0.20-0.50	4.00-4.75	0.30 max	0.30-0.55	3.75-4.50	1.75-2.20	4.00-4.50

ACEROS PARA HERRAMIENTAS PARA TRABAJO EN CALIENTE AL TUNGSTENO:

H21	H21	T20821	0.26-0.36	0.15-0.40	0.15-0.50	3.00-3.75	0.30 max	-	8.50-10.00	0.30-0.60	-
H22	..	T20822	0.30-0.40	0.15-0.40	0.15-0.40	1.75-3.75	0.30 max	-	10.00-11.75	0.25-0.50	-
H23	..	T20823	0.25-0.35	0.15-0.40	0.15-0.60	11.0-12.75	0.30 max	-	11.0-12.75	0.75-1.25	-
H24	..	T20824	0.42-0.53	0.15-0.40	0.15-0.40	2.50-3.50	0.30 max	-	14.0-16.00	0.40-0.60	-
H25	..	T20825	0.22-0.32	0.15-0.40	0.15-0.40	3.75-4.50	0.30 max	-	14.0-16.00	0.40-0.60	-
H26	..	T20826	0.45-0.55	0.15-0.40	0.15-0.40	3.75-4.50	0.30 max	-	17.25-19.0	0.75-1.25	-

ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN CALIENTE AL MOLIBDENO:

H42	..	T20842	0.55-0.70	0.15-0.40	-	3.75-4.50	0.30 max	4.50-5.50	5.50-6.75	1.75-2.20	-
-----	----	--------	-----------	-----------	---	-----------	----------	-----------	-----------	-----------	---

ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN FRÍO ENDURECIDOS AL AIRE CON MEDIANA ALEACIÓN:

A2	A2	T30102	0.95-1.05	1.00 max	0.50 max	4.75-5.50	0.30 max	0.90-1.40	-	0.15-0.50	-
A3	..	T30103	1.20-1.30	0.40-0.60	0.50 max	4.75-5.50	0.30 max	0.90-1.40	-	0.80-1.40	-
A4	..	T30104	0.95-1.05	1.80-2.20	0.50 max	0.90-2.20	0.30 max	0.90-1.40	-	-	-
A6	..	T30106	0.65-0.75	1.80-2.50	0.50 max	0.90-1.20	0.30 max	0.90-1.40	-	-	-
A7	..	T30107	2.00-2.85	0.80 max	0.50 max	5.00-5.75	0.30 max	0.90-1.40	0.50-1.50	3.90-5.15	-
A8	..	T30108	0.50-0.60	0.50 max	0.75-1.10	4.75-5.50	0.30 max	1.15-1.65	1.00-1.50	-	-
A9	..	T30109	0.45-0.55	0.50 max	0.95-1.15	4.75-5.50	1.25-1.75	1.30-1.80	-	0.80-1.40	-
A10	..	T30110	1.25-1.50	1.60-2.10	1.00-1.50	-	1.55-2.05	1.25-1.75	-	-	-

TABLA 4.3 LIMITES DE COMPOSICIÓN DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE ACEROS PARA HERRAMIENTAS (cont)

Designaciones: (%) DE COMPOSICIÓN:
 AISI SAE UNS C Mn Si Cr Ni Mo W V Co

ACEROS PARA HERRAMIENTAS PARA TRABAJO EN FRÍO AL ALTO CARBONO Y ALTO CROMO:

D2	D2	T30402	1.40-1.60	0.60 max	0.60 max	11.0-13.00	0.30 max	0.70-1.20	-	1.10 max	1.0 max
D3	D3	T30403	2.00-2.35	0.60 max	0.60 max	11.0-13.50	0.30 max	-	1.00 max	1.00 max	-
D4	..	T30404	2.05-2.40	0.60 max	0.60 max	11.0-13.00	0.30 max	0.70-1.20	-	1.00 max	-
D5	D5	T30405	1.40-1.60	0.60 max	0.60 max	11.0-13.00	0.30 max	0.70-1.20	-	1.00 max	2.50-3.50
D7	D7	T30407	2.15-2.50	0.60 max	0.60 max	11.0-13.50	0.30 max	0.70-1.20	-	3.80-4.40	-

ACEROS PARA HERRAMIENTAS PARA TRABAJO EN FRÍO TEMPLABLES EN ACEITE:

O1	O1	T31501	0.85-1.00	1.00-1.40	0.30 max	0.40-0.60	0.30 max	-	0.40-0.60	0.30 max	-
O2	O2	T31502	0.85-0.95	1.40-1.80	0.50 max	0.35 max	0.30 max	0.30 max	-	0.30 max	-
O6	O6	T31506	1.25-1.55	0.30-1.10	0.55-1.50	0.30 max	0.30 max	0.20-0.30	-	-	-
O7	..	T31307	1.10-1.30	1.00 max	0.60 max	0.35-0.85	0.30 max	0.30 max	1.00-2.00	0.40 max	-

ACEROS PARA HERRAMIENTAS PARA PROPÓSITOS ESPECIALES:

L2	..	T61202	0.45-1.00	0.10-0.90	0.50 max	0.70-1.20	-	0.25 max	-	0.10-0.30	-
L6	L6	T61206	0.65-0.75	0.25-0.80	0.30 max	0.60-1.20	1.25-2.00	0.30 max	-	0.20-0.30	-

ACEROS PARA HERRAMIENTAS TEMPLABLES EN AGUA:

W1	W108 W109 W110 W112	T72301	0.70-1.50	0.10-0.40	0.10-0.40	0.15 max	0.20 max	0.10 max	0.15 max	0.10 max	-
W2	W209 W210	T72302	0.85-1.50	0.10-0.40	0.10-0.40	0.15 max	0.20 max	0.10 max	0.15 max	0.15-0.35	-
W5	..	T72303	1.05-1.15	0.10-0.40	0.10-0.40	0.40-0.60	0.20 max	0.10 max	0.15 max	0.10 max	-

ACEROS PARA HERRAMIENTAS RESISTENTES AL IMPACTO:

S1	S1	T41901	0.40-0.55	0.10-0.40	0.15-1.20	1.00-1.80	0.30 max	0.30 max	1.50-3.00	0.15-0.30	-
S2	S2	T41902	0.40-0.55	0.30-0.50	0.90-1.20	-	0.30 max	0.30-0.60	-	0.50 max	-
S3	S3	T41903	0.50-0.55	0.60-1.00	1.75-2.25	0.35 max	-	0.20-1.35	-	0.35 max	-
S6		T41906	0.40-0.50	1.20-1.50	2.00-2.50	1.20-1.50	-	0.30-0.50	-	0.20-0.40	-
S7		T41907	0.40-0.55	0.20-0.80	0.20-1.00	3.00-3.50	-	1.30-1.80	-	0.20-0.30	-

TABLA 4.3 LÍMITES DE COMPOSICIÓN DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE ACEROS PARA HERRAMIENTAS (cont)

Designaciones:			(% DE COMPOSICIÓN:									
AISI	SAE	UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co	
ACEROS PARA HERRAMIENTAS PARA MOLDES DE BAJO CARBONO:												
P2	..	T51602	0.10 max	0.10-0.40	0.10-0.40	0.75-1.25	0.10-0.30	0.15-0.40	.	.	.	
P3	..	T51603	0.10 max	0.20-0.60	0.40 max	0.40-0.75	1.00-1.50	.	.	.	.
P4	..	T51604	0.12 max	0.20-0.60	0.10-0.40	4.00-5.25	.	0.40-1.00	.	.	.	
P5	..	T51605	0.10 max	0.20-0.60	0.40 max	2.00-2.50	0.35 max	.	.	.	.
P6	..	T51606	0.05-0.15	0.35-0.70	0.10-0.40	1.25-2.75	3.25-3.75	.	.	.	.
P20	..	T51620	0.28-0.40	0.60-1.00	0.20-0.80	1.40-2.00	.	0.30-0.55	.	.	.	
P21	..	T51621	0.18-0.22	0.20-0.40	0.20-0.40	0.20-0.30	3.90-4.25	.	.	0.15-0.25	1.05-1.25Al	

* Nota: Todos los aceros excepto los del grupo W, contienen:

0.25% max de Cu, 0.03% max de P, y 0.03% max de S.

El grupo W contiene: 0.20% max de Cu, 0.025% max de P, y 0.025 max de S.

c1= clase 1, c2= clase 2

Tomado del Metals Handbook. 9ª Edición Vol.3

V. SELECCIÓN DE LOS ACEROS GRADO HERRAMIENTA

V.1 GENERALIDADES.

El uso correcto de un acero origina al fabricante de herramientas la mayor dificultad y requiere la mayor atención de simplificación.

Este capítulo se dedica a describir un método simplificado y accesible para la selección de un acero para la fabricación de herramientas. Se conoce con el nombre de método del conjunto coordinado. Es simple porque se refiere enteramente a las herramientas y su uso, hechos que conoce el fabricante de herramientas y no requiere prácticamente de ningún conocimiento de los aceros para herramientas. Es adecuado porque da buenos resultados. En este momento el método del conjunto coordinado ha sido usado comercialmente por más de 40 años. En dicho periodo se ha probado muchas veces que cuando un fabricante de herramientas confronta un problema en su fabricación, con este método puede seleccionar un acero para herramientas que nunca haya usado con anterioridad y encontrar los resultados que haya propuesto.

CONJUNTO COORDINADO TEMPLADO O ENDURECIDO EN AGUA:

Si el acero para herramientas al carbono fuera satisfactorio para todos los problemas de fabricación de herramientas, no habría necesidad de usar aceros aleados. Los aceros aleados permiten realizar trabajos que con un acero normal al carbono no se pueden hacer. En forma demás peculiar, estos requerimientos adicionales pueden clasificarse en cuatro partes:

1. Obtener mayor resistencia al desgaste para operaciones de corte o abrasión.
2. Obtener mayor tenacidad o consistencia.
3. Obtener precisión y seguridad en el endurecimiento, mejorar la capacidad de endurecimiento o templabilidad.

4. Dar al acero "dureza al rojo", o sea, la capacidad de llevar su trabajo cuando el acero se caliente tanto, que un acero natural al carbono se ablandaría.

Por el contrario, si una herramienta no requiere ninguna de las cuatro características anteriores, no hay razón alguna por la cual no deba ser fabricada de acero templado en agua (acero al carbono). Lo anteriormente dicho sugiere una respuesta a la pregunta: ¿Qué clase de herramienta debe ser fabricada de acero al carbono templado en agua?

La respuesta es la primera regla del método de comparación de muestras.

Regla 1: Todas las herramientas deben hacerse de acero al carbono templado en agua, salvo que exista una buena razón para fabricarle de algún material diferente.

Un fabricante de herramientas debe preguntarse lo siguiente: ¿Hay alguna razón por la cual la herramienta no deba de ser fabricada de acero al carbono? Si no se encuentra una buena razón, entonces este es el acero que debe de usar.

Si la herramienta no debe de ser de acero al carbono, entonces, esto hace posible dibujar un diagrama y asignarle a cada respuesta uno de los cuatro puntos cardinales. El rombo en el centro del diagrama (fig. 5-1) representa el campo de los aceros templados en agua. Si por cualquier razón este acero no realiza el trabajo en forma satisfactoria, hay cuatro direcciones posibles para el fabricante de herramientas de obtener las propiedades adicionales que requiere. Estas constituyen las 4 siguientes reglas del método.

Regla 2: Para obtener mayor resistencia al desgaste ir hacia el norte.

Regla 3: Para obtener mayor tenacidad, ir hacia el sur.

Regla 4: Para obtener mayor precisión o seguridad en el templado ir hacia el oeste.

Regla 5: Para obtener dureza al rojo, ir hacia el este.

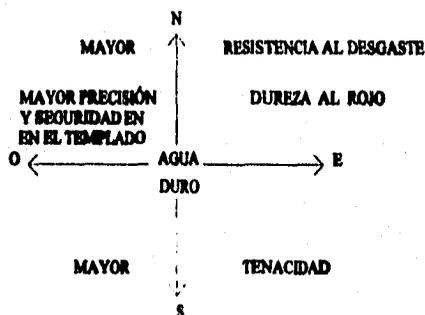


FIG. 5-1

La experiencia práctica demuestra que, al alejar un acero para obtener resistencia al desgaste, se pierde un cierto porcentaje de tenacidad, y viceversa. Esto es exactamente lo que se esperaría al ver la figura 5-1. Cuando el fabricante va hacia el norte buscando resistencia al desgaste, se aleja de la tenacidad y viceversa. El acero con sus aleaciones ha hecho un grupo de tres aceros a los cuales nos referimos como Conjunto Coordinado o muestras comparadas. Todos se obtienen al templarse en agua y son casi idénticos en todo sentido, excepto en su resistencia al desgaste y tenacidad. Se supone que cada acero comienza a trabajar donde los otros dejan de hacerlo, por lo que el fabricante puede ir de uno a otro y saber que va a esperar de cada uno.

El conjunto coordinado templado en agua.

Se ilustra en la fig. 5-2. Por conveniencia el acero super resistente al desgaste, se llamará agua-desgaste y el tenaz se llamará agua-tenaz las flechas indican en que sentido hay que ir para obtener las propiedades deseadas. De alguno de los tres se supone que fabrica algún tipo de herramienta que pueda ser hecha de acero templado en agua. Anteriormente existían docenas de aceros templados en agua para cubrir este territorio, ahora solamente tres aceros lo ocupan. Esto

es un avance extraordinario y, hasta hace poco, no existían aceros con esta propiedad.

CONJUNTO COORDINADO TEMPLADO EN AGUA

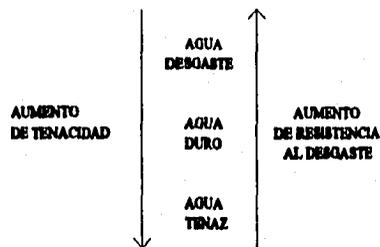


FIG. 5-2

Los fabricantes de herramientas necesitaron poco tiempo para recordar la época en que de repente las herramientas se agrietaban después de haber trabajado normalmente o se rompían. Al investigar la falla con los medios que se tenían, el análisis del acero mostraba que éste era el mismo que se usaba siempre, pero el problema de la falla permanecía en un misterio. La solución recomendada pudiera haber sido el cambiar a un acero con menos carbono. Si no funcionaba, se buscaba otra fuente de aceros para herramientas o se utilizaba algún acero aleado. El acero al carbono-vanadio se desarrolló en esta época para este tipo de problema en particular. El problema real era el timbre y, con este factor fuera de control, la solución se parecía a operar del apéndice a un paciente con cálculos en la vesícula. Gradualmente se recurrió a aceros aleados o prácticas de calentamiento, que sacrificaban la eficiencia de las herramientas de aceros al carbono.

Hoy día existen aceros que pueden llenar los tres rombos de aceros templados en agua satisfactoriamente. No se puede suponer que representan la perfección. La industria de los aceros para herramientas sabrá descubrir nuevos y mejores aceros. Los tres rombos permanecerán, con sus necesidades respectivas, quizás durante muchos años y a medida que se desarrollen aceros que llenen sus requerimientos, nuevos rombos suplirán a los viejos. Las necesidades del fabricante de herramientas, de aceros resistentes al desgaste y tenaces, se han analizado y resuelto mediante el uso de los aceros aleados llamados agua-desgaste y agua-tenaz. Algunas veces los problemas de los fabricantes no son de dureza o tenacidad. Supóngase que estuviera fabricando un aditamento para la fijación de un taladro, si se hiciera de acero duro, tendría resistencia al desgaste y tenacidad. Sin embargo, se da cuenta de que al endurecerlo y templarlo, se ha contraído y ya no es posible utilizarlo. Lo que desea ahora es un acero muy parecido al templarlo en agua, pero que conserve su tamaño con precisión al templarse. Temple con precisión y temple con seguridad son inseparables en la fig. 5-3 al ir hacia el oeste.

CONJUNTO COORDINADO TEMPLADO EN AGUA

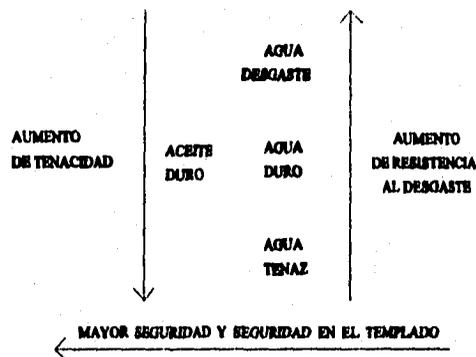


FIG. 5-3

El conjunto coordinado templado en aceite.

El fabricante puede proporcionar al acero otras aleaciones que tendrán muy poco efecto sobre la resistencia al desgaste o la tenacidad, pero que hacen que el acero se pueda templar en aceite y le dé propiedades adicionales de conservar con precisión su tamaño y seguridad al templar. Este acero se llamará aceite duro.

Se puede apreciar que hay cientos de herramientas que requieren precisión o seguridad al templarse, o ambas. Después de todo, estos requisitos no afectan la manera en que trabaja la herramienta. Las herramientas mismas se encontrarán sujetas a los mismos requisitos que tenía el conjunto coordinado templado en aceite. Esto es, un fabricante puede hacer una herramienta sin templarla en aceite, y cuando es puesta en servicio encuentra que no tiene tenacidad y se romperá muy pronto. En otro caso, la herramienta puede ser un dado para troquelado donde se producen millones de piezas y el tratamiento al aceite puede carecer de la resistencia al desgaste deseada y sea necesario agregarle esta propiedad extra. Así, será conveniente colocar al norte del acero templado en aceite un acero que mantenga la precisión y seguridad al templar, pero que sea super resistente al desgaste. Este acero se llama aceite desgaste. Del mismo modo, deberá existir un acero al sur del acero duro que sea super tenaz y se llamará aceite tenaz.

Como se ilustra en la fig. 5-4, estos tres aceros templados en aceite forman un conjunto coordinado en sí mismos, llamado conjunto coordinado templado en aceite. Tienen la misma utilidad y relación que el conjunto templado en agua.

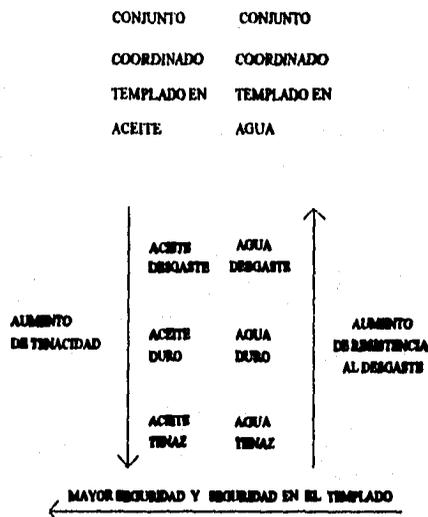


FIG.5-4

Al referirnos al conjunto templado en aceite se habló de seguridad y precisión en el templado con las razones principales para desplazarnos hacia el oeste de los aceros templados en agua. No se ha hecho mención de la posible ventaja de la mayor penetración al temple, que es una propiedad en este tipo de aceros. Esta penetración más profunda es una característica deseable, y tiene ventajas en ciertos tipos de herramientas, como en algunos dados en los que es posible hacer mayor número de rectificaciones, que si estuvieran hechos de un acero templado, con menos profundidad. Algunas veces el fabricante se encuentra con el problema de una herramienta muy compleja o de gran tamaño en la cual ni un acero templado en aceite sirve. A medida que la ciencia de las herramientas avanza, se hacen posibles más y más trabajos imposibles con herramientas. El resultado natural es que los diseñadores de herramientas, necesitan más amplitud tanto en el diseño como en el tamaño de sus secciones. Hay una tendencia en la fabricación de piezas más complejas con el énfasis en precisión

en el templado y un mínimo de esmerilado final, rectificado y ajuste. Bajo estas circunstancias, existen casos en los que un acero templado en aceite no es apropiado. También hay una tendencia a usar secciones mayores y existirán casos en los cuales por el tamaño de la herramienta, un acero templado en aceite no tenga el temple adecuado.

El conjunto coordinado templado en aire.

Debido a problemas como éste, es evidente que el fabricante, en algunos casos, necesita todavía mayor precisión y seguridad en el templado que el que se obtiene al templar en aceite. Así como una mayor penetración de la dureza. Las encuentra yendo hacia el oeste del diagrama de la fig. 5-5. El fabricante ya ha aleado su acero para obtener un mejor templado mediante el enfriamiento en aire, esto le permite obtener la ventaja de templar grandes secciones, lo que le permite templar piezas de un tamaño más conveniente. Este acero se llamará aire duro.

Como en el caso de los dos aceros que se han mencionado, las herramientas hechas de un acero templado al aire tendrán otros requisitos, aparte del retener un tamaño adecuado o poder templarse grandes secciones. Al igual que en casos previos, deben adaptarse al servicio particular que desempeñan, por lo que yendo hacia el norte, tendrán características de resistencia al desgaste.

Este acero se llama aire desgaste. Similarmente yendo al sur, tendrán tenacidad extrema, por lo que se llamarán aire tenaz. Fig 5-5.

CONJUNTO	CONJUNTO	CONJUNTO
COORDINADO	COORDINADO	COORDINADO
TEMPLADO EN	TEMPLADO EN	TEMPLADO EN
AIRE	ACEITE	AGUA

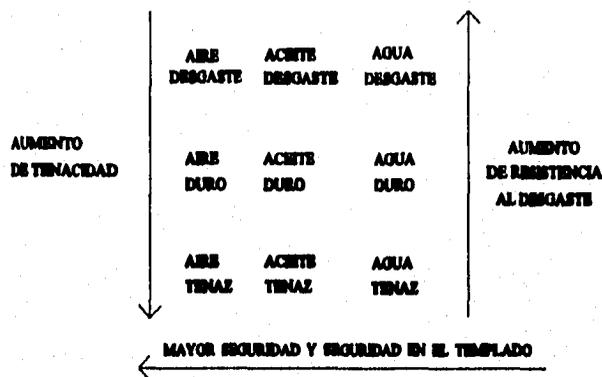


FIG.5-5

Es interesante analizar este grupo de nueve aceros desde otro punto de vista. Arriba encontraremos 3 aceros super resistentes al desgaste, aire desgaste, aceite desgaste y agua desgaste. Estos aceros son compañeros y la única diferencia entre ellos es que teóricamente los aire desgaste, poseen cualidades adicionales de precisión y seguridad en el templeado y una penetración profunda del temple. Así, los tres se emplearían para fabricar las mismas herramientas y la producción sería similar, excepto por la característica de penetración de temple, que permitiría mayor o menor esmerilado. El fabricante escogería de entre ellos, no tanto por razones de producción, si no de

empleo. Del mismo modo los tres tipos de aceros duros son compañeros y sus aplicaciones y procesos son iguales. La ventaja de uno sobre otro depende de la profundidad de dureza o temple deseado.

El templado en agua sería el que se seleccionaría, a menos de que se desearan propiedades adicionales de precisión y seguridad en el templado en cuyo caso se utilizaría uno de los otros dos, dependiendo de los requisitos. Los tres aceros tenaces también son compañeros y se usan para el mismo propósito. El fabricante escoge el aceite tenaz cuando desea que el diseño de la herramienta conserve el tamaño exacto al templarse, o siempre que la forma de la herramienta haga inseguro el enfriamiento al agua. O bien elige aire tenaz, si es necesario que la herramienta mantenga dimensiones extremadamente precisas durante el temple, o si su tamaño es tan grande que hace falta el temple al aire para obtener la dureza general deseada. En cualquier otro caso escogería un acero agua tenaz.

El conjunto coordinado dureza al rojo.

Sólo resta considerar una dirección: hacia el este, la cuarta razón por la cual un acero agua duro no sería satisfactorio, es que algunas herramientas se calientan al trabajar. Una herramienta de corte, por ejemplo, se calienta por fricción hasta el punto azul o rojo. Bajo estas circunstancias, un acero agua duro perdería su temple y se volvería blando e inservible. Muchas herramientas de forja tienen estos requisitos. Esta propiedad extra se llama dureza al rojo. Las aleaciones como tungsteno, molibdeno, cromo y vanadio tienen la capacidad de darle a un acero común la propiedad de dureza al rojo cuando se combinan apropiadamente. Esto es, la herramienta puede calentarse durante el servicio, a veces hasta 1000°F (542°C), y cuando se enfria será tan dura como cuando comenzó. Además, estos aceros son razonablemente duros mientras están a altas temperaturas. Por ejemplo,

un acero al tungsteno-molibdeno, permanecerá lo suficientemente duro como para cortar metales continuamente, mientras su superficie de corte esté a 1000°F (542°C).

Cuando la propiedad deseada es dureza al rojo, el fabricante procede hacia el este, como se indica en la figura 5-6, y allí encuentra un acero denominado rojo duro.

Al norte esta un acero super resistente al desgaste, y dureza al rojo llamado rojo desgaste, y hacia abajo uno super tenaz, llamado rojo tenaz. Estos tres aceros forman un último conjunto coordinado.

Con dificultad podemos llamar a estos aceros, compañeros correspondientes de los aceros templados en agua, ya que con frecuencia son utilizados para propósitos enteramente diferentes.

CONJUNTO	CONJUNTO	CONJUNTO	CONJUNTO
COORDINADO	COORDINADO	COORDINADO	COORDINADO
TEMPLADO EN	TEMPLADO EN	TEMPLADO EN	DUREZA AL
AIRE	ACEITE	AGUA	ROJO

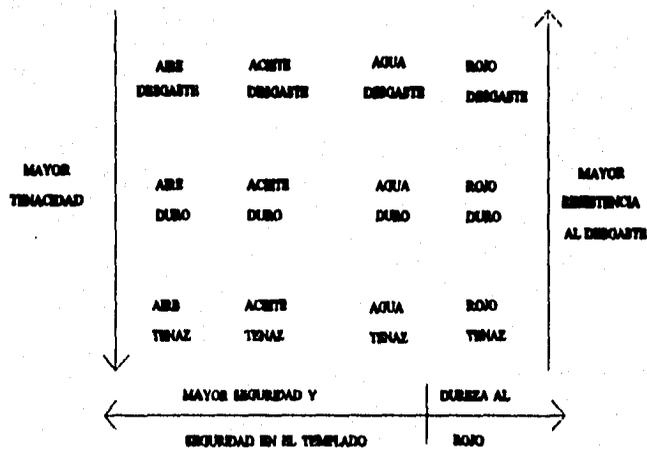


FIG. 5-6 DIAGRAMA DEL CONJUNTO COORDINADO

Debemos reconocer una diferencia básica entre el conjunto dureza al rojo y el conjunto de los nueve aceros anteriores. Los últimos se utilizan en herramientas que no se calientan, mientras que los aceros con dureza al rojo han sido específicamente diseñados para operar a temperaturas elevadas, y sus aplicaciones son especializadas.

Las aleaciones empleadas para producir aceros con dureza al rojo son caras y deben usarse en cantidades relativamente grandes. Por lo tanto, estos aceros tendrán un costo promedio mayor que los demás aceros duros. Así mismo, debido a su aleación, son más difíciles y costosos de maquinarse, así como de tratar térmicamente. Por esto, solamente se utilizan en casos donde sería imposible, por el uso, utilizar algún otro acero.

Los 12 aceros descritos comprenden el conjunto completo del conjunto coordinado. Con ellos, un fabricante puede resolver casi cualquier problema de herramienta. No se reclama perfección en esto y hay un amplio margen para que el fabricante desarrolle aceros más perfectos para asignar a estos rangos. En realidad, algunos de los aceros que llenan los rangos, han sido modificados desde que se publicó la idea de los conjuntos coordinados. Estos cambios se han hecho para que los aceros mejorados llenen los presentes espacios y los nuevos aceros que se fabriquen justifiquen nuevos espacios. Esto es el testimonio del hecho que el método en vez de interferir con improvisaciones, las sugiere. La idea básica es que se preste a flexibilidad considerable y se esperan mejoras adicionales en el futuro.

A pesar de sus imperfecciones menores, la ventaja del método de conjuntos coordinados, son mucho mayores que las desventajas. Este fue el primer método definido de selección de aceros para herramientas y sus resultados continuamente hablan por sí mismos en todo el mundo. Vea a dos fabricantes de herramientas con igual habilidad y pídale que fabriquen exactamente la misma herramienta. Déle a uno de ellos un catálogo anticuado de acero para herramienta y al otro un

diagrama de conjuntos coordinados. El que tenga el diagrama, tendrá su respuesta en unos cuantos minutos y hay probabilidad de 10 a 1 que su herramienta cause menos problemas y más producción que la del otro. Es muy posible que en algún catálogo exista un acero que exceda las ventajas del conjunto coordinado, pero las posibilidades de encontrar este acero en el primer intento son tan remotas, se prefiere el método de conjuntos coordinados. Multiplíquese esto por cientos de herramientas de toda variedad y se verá por que el método de conjuntos coordinados trabajan también a pesar de sus pequeñas deficiencias. El método de conjuntos suena tan fácil, que el lector supone que nunca va a cometer un error. Esto no es cierto. Se cometerán errores y se seleccionarán aceros del diagrama erróneamente. Pero cada error apunta hacia el rumbo correcto con más claridad y rara vez se equivocará uno dos veces. Más aún, se cometerán errores en el tratamiento térmico, y estos harán que el fabricante comience en la dirección incorrecta. Por ejemplo, supóngase que una herramienta esta hecha de un acero agua-tenaz y que debido a un tratamiento térmico incorrecto se descarbura mucho su superficie. Si esto no se nota (y se corrige), la herramienta entra en servicio y parece muy blanda y sin resistencia. El fabricante supondrá que lo que hace falta es viajar al norte para buscar resistencia al desgaste y haría la herramienta con acero-duro. Si la herramienta trabaja bajo condiciones severas, entonces se romperá o despostillará y el fabricante supondrá erróneamente que ningún acero fue el adecuado de hecho el agua-tenaz fue el correcto y adecuado, pero el tratamiento térmico nos engaña. Mientras seamos humanos cometeremos errores en la práctica y en nuestros juicios. Ningún método de selección de aceros evitará esto, y este capítulo trata de cómo mantener estos errores en un mínimo.

V.2 SELECCIÓN DE ACUERDO A SU APLICACIÓN.

El propósito de este capítulo es proporcionar ejemplos que ilustren la aplicación del método del conjunto coordinado. Primero citaremos un número de herramientas reales, examinándolas desde un punto de vista teórico. Pongámonos en el lugar de un fabricante que necesita hacer estas herramientas y "pensaremos en voz alta" respecto a la selección adecuada del acero para herramientas del conjunto coordinado fig. 5-6

Nótese que para cada caso nos haremos la pregunta clave: ¿Por qué no usar el acero agua-duro? Esta pregunta todavía se hace aunque parezca innecesaria, ya que respondiendo por que debemos usar o no agua-duro, nos pondremos en la dirección apropiada para el acero de que debemos utilizar.

Punzón de extrusión en frío. Este punzón en realidad no presenta ningún peligro al sumergirse en agua para su templado, y el diámetro del trabajo puede ser controlado, de manera que un cambio en tamaño no es problema. ¿Por qué no usar el acero agua-duro? En este caso en particular se deseaba una muy alta producción, así es que el fabricante de herramientas se decidió por el acero agua-desgaste. El resultado fue que la vida del punzón tuvo un exceso de 200 000 piezas. La figura 5-7 ilustra el punzón y su producto.

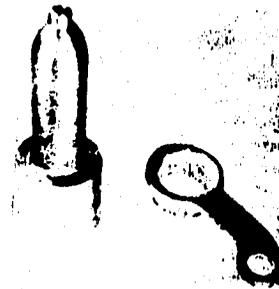


FIG. 5-7 PUNZÓN DE EXTRUSIÓN Y SU PRODUCTO.

Troquel de punzonar y punzón. En la figura 5-8 se muestra una matriz de punzonar y un punzón para trabajar en acero calibre 26. Para la matriz: ¿Por qué no usar el acero agua-duro? Porque no se puede asegurar el tamaño exacto después del templado. ¿Cuál es la tolerancia para este troquelado? Si el contorno y las perforaciones han de conservarse a una o dos milésimas, un temple en aceite será mejor para evitar deformaciones. El acero aceite-duro es el compañero equivalente en temple del acero agua-duro. ¿Por qué no usar el acero aceite-duro? Si no se necesita gran tenacidad, entonces el acero aceite-tenaz, no es recomendable.

Entonces la opción estriba entre los aceros aceite-duro y aceite-desgaste, dependiendo de la producción que se necesita cubrir. La matriz hecha con acero aceite-desgaste tiene un costo ligeramente mayor que los aceros aceite-duro. ¿Pagará la producción el costo extra? El punzón: para obtener herramientas de ajuste perfecto con orificios precisos libres de grietas o rayaduras conviene usar aceros aceite duro o aceite desgaste, tal y como se hizo para la matriz.

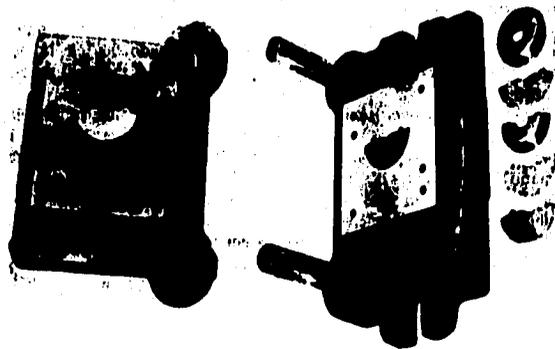


FIG. 5-8 TROQUEL DE PUNZONAR Y PUNZÓN.

Espiga conformadora de alambre. Esta pequeña espiga requiere soportar una gran presión (1800 lb ó 816,5 kg) cuando el alambre se esta doblando en ella. Entonces lo que principalmente se requiere es la tenacidad. ¿Por que no usar acero agua-tenaz ya que no hay problemas en el templado? Casualmente la espiga es de unos 3/16 plg. (4.75 mm) de espesor y se puede sumergir en aceite. Usando acero agua-tenaz se obtiene un rendimiento óptimo de 150 000 piezas en la producción, mientras que los resultados obtenidos con otros aceros de herramienta, no superaron las 25 000.

Matriz para estampar en forma de disco. Esta matriz figura 5-9 estampa discos de tantalio puro en franjas de 1/4 plg.(6.35 mm) de ancho y 0.010 plg. (0.25 mm) de grueso. Las paredes tan delgadas entre las perforaciones provocan que el enfriamiento en agua presente mucho riesgo, de manera que nos trasladamos del oeste, hacia los aceros aceite-duro. Casualmente los aceros pueden fabricarse de barras de brocas con aceros agua-duro y enfriado en aceite, debido a su pequeño diámetro.

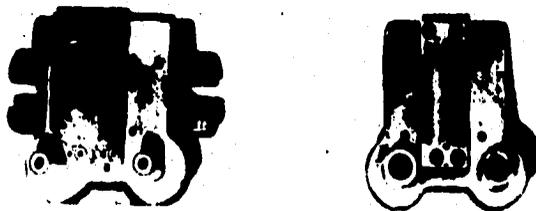


FIG. 5-9 TROQUEL DE DISCO

Dados para roscar por rotación. (Figura 5-10) El trabajo consiste en hacer cuerdas en frío en aceros dulces o suaves, haciendo rotar la pieza entre matrices planas. Lo que se necesita es extrema precisión en el templado, ya que un terminado de esmerilado no es permisible en los dientes y, segundo, una buena resistencia al desgaste que permita grandes lotes de producción. ¿Por qué no usar el acero agua-duro? En este caso se necesita que se conserve una gran precisión en el templado, y aún más, la inmersión en agua podría ser peligrosa para los bordes afilados en la base de los dientes. Entonces iremos hacia el oeste podría haberse usado acero aceite-duro, pero no resiste el desgaste. Tenemos, esta vez, dos direcciones posibles, hacia el norte para ganar resistencia al desgaste, o bien hacia el oeste para obtener mayor seguridad y precisión junto con mayor resistencia al desgaste. En este caso, deseamos las dos opciones, oeste y norte, en cualquier orden, siempre y cuando se emplee el acero aceite-desgaste.



FIG. 5-10 DADOS PARA ROSCAR

Troquel para formar tenedores. Históricamente, el tipo de troques mostrados en la figura 5-11 siempre se elaboraron con algún tipo de acero agua-duro ya que los aceros de herramientas de temple profundo, resultaban demasiado frágiles para soportar los golpes al estampar sin romperse. Sin embargo, en los últimos años, como resultado de una mejor estructura interna, obtenida por la refundición eléctrica con escoria, se puede usar el acero aire-desgaste para fabricar una matriz con una duración superior al medio millón de piezas. El material que en este caso se utilizó fue acero inoxidable.

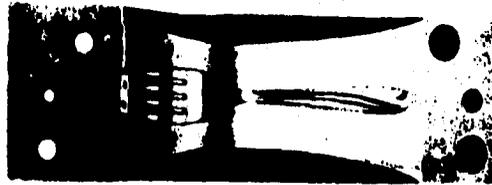
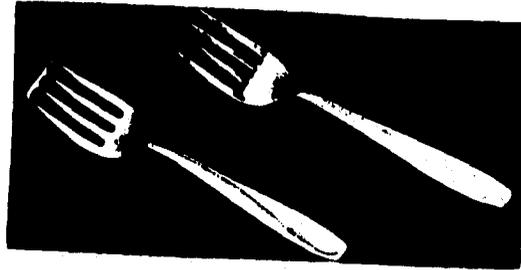


FIG. 5-11 TROQUEL PARA FORMAR TENEDORES

Mandriles extrusores en caliente. (Fig. 5-12) El trabajo consiste en extruir tubos de aluminio. Se necesitan aceros del tipo rojo-duro para operar a altas temperaturas, buena tenacidad y capacidad para soportar un enfriamiento en agua si es necesario.

¿Por qué no emplear el acero agua-duro? Estas herramientas se calentarán en el servicio y, como consecuencia, un acero al carbono se reblandecerá pronto. Moviéndose hacia el este en el diagrama a partir del acero agua-duro, el primer rombo que se encuentra es el rojo-duro; ¿Por qué no usar éste? El acero rojo-duro tiene la suficiente resistencia y dureza a elevadas temperaturas, pero no tiene la tenacidad deseada. Ni permaneciendo en agua para enfriarlo al estar en servicio, se obtendrán superficies de buena calidad, ya que tiende a dejar marcas en estas condiciones. Entonces la dirección lógica que hay que seguir es hacia el sur o sea, el acero rojo-tenaz.



FIG. 5-12 MANDRIL DE EXTRUSIÓN

Herramientas para cortar metal. (Fig. 5-13) Aquí se muestra un grupo de herramientas. ¿Por qué no empleamos aceros agua-duro?

No hay una sola herramienta en este bloque que no pueda fabricarse con acero agua-duro. De hecho las herramientas como los machos manuales, que se manejan a muy bajas velocidades, se hacen con aceros agua-duro.



FIG. 5-13 HERRAMIENTAS PARA CORTAR METAL

Pero actualmente se trabaja a velocidades tan altas que las herramientas de corte se calientan demasiado, y el acero agua-duro se reblandece. Aquí es donde necesitamos un acero de dureza al rojo y una máxima resistencia al desgaste; así pues, nos dirigimos hacia el este buscando dureza al rojo y al norte para resistencia al desgaste, encontrando de esta manera al acero rojo-desgaste. Es un acero de herramientas para trabajar a altas velocidades y la respuesta natural para la mayoría de las máquinas que manejan herramientas para cortar metal.

Se habrá notado que en los ejemplos anteriores hay muchos "si".

Si la producción es grande...

Si el tratamiento térmico apropiado es factible...

Si el diseño no puede ser cambiado, etc.

Estos son los "si" que nunca conoce el que produce el acero, pero el que fabrica la herramienta si. El propósito del diagrama del conjunto coordinado es poner en las manos del fabricante de

herramientas, todos los conocimientos y datos, del fabricante de aceros. Cuando tales conocimientos se agreguen a los adquiridos por la experiencia en los propios problemas con herramientas, la solución no se verá ya tan difícil.

Problemas reales que han sido resueltos.

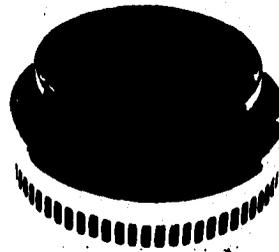
Hasta este momento el método del conjunto coordinado ha sido empleado comercialmente por más de 45 años, desde entonces se ha reconocido y establecido como método para seleccionar aceros para herramientas. Durante este período, los fabricantes de herramientas comerciales han suministrado historias interesantes, de cómo han resuelto sus problemas mediante el método del conjunto coordinado. En muchos casos emplearon aceros que jamás habían usado, trataron térmicamente las herramientas con los métodos simplificados descritos en el capítulo VI y alcanzaron resultados que, en otros tiempos, sólo se hubieran esperado mediante la asistencia de expertos en aceros para herramientas.

El estilo es de los autores, presentando cada una de ellas en la forma más instructiva posible, sin cambiar un solo hecho original.

Dados circulares para perforar papel. Estos dados, uno de los cuales se ilustra en la figura 5-14, requieren lo mejor en estabilidad dimensional y resistencia al desgaste. La parte que ha de trabajar es el anillo exterior, el cual embona suavemente en un núcleo de acero dulce antes del tratamiento térmico, para el maquinado final de la cara exterior. Después se quita para el templeado, tras lo cual se calienta y el núcleo para un buen ajuste. Después de pasar por un esmerilado, son girados en ejes a velocidades tan altas como 1000 r.p.m. Otros punzones de acero semisuave giran en un segundo eje, haciéndolos coincidir con las ranuras de la matriz.

Los requisitos estrictos de un cambio mínimo en las dimensiones sugieren acero templado en aire. Las propiedades abrasivas del papel que se perforan obligan a que la herramienta deba ser de gran resistencia al desgaste. La decisión tomada fue la de emplear acero aire-desgaste y los resultados fueron excelentes. Inclusive fue posible fabricar punzones de tamaño mayor del necesario y el emplear el troquel terminado para quitar excedentes, asegurando un terminado perfecto sin perjuicio alguno para el troquel.

FIG. 5-14
DADO CIRCULAR PARA
PERFORAR PAPEL.



Resolviendo un problema de tenacidad y distorsión. Siempre habrá la posibilidad de toparse con una herramienta o un troquel que tenga el problema mencionado, al menos en potencia. Un ejemplo típico es el punzón que se ilustra en la figura 5-15, se emplea para troquelar partes de automotores de unos 0.062 plg. (1.57 mm) de espesor. el punzón no está balanceado en los filos ni en sus partes delgadas, de manera que es necesario un temple seguro. Además el punzón está ajustado con mucha precisión a la sección del troquel, por este motivo es necesario un buen templado para que no haya deformaciones y evitar así costosos ajustes posteriores. La ruptura en servicio es otro problema constante cambiando a un acero aire-tenaz se solucionan tanto las rupturas, como el cambio de tamaño, sin mermar la producción por reafilados.

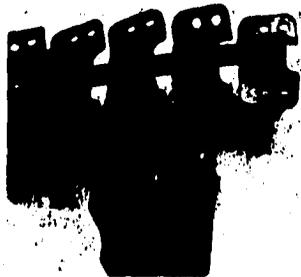


FIG. 5-15 PUNZÓN PARA TROQUELAR ESTAMPADOS AUTOMOTRICES

¿Cuál acero del diagrama dará la máxima producción?

Todo fabricante de herramientas desea la máxima producción, aunque a veces esto se confunde con máxima resistencia al desgaste. Ambos no son necesariamente lo mismo; de serlo, se aseguraría la producción seleccionando los aceros de la parte superior del diagrama del conjunto coordinado y la baja producción con aceros de la parte inferior.

En realidad la alta producción existe en cada rombo y en todo conjunto de aceros, y ahí está esperando como un premio para el ajustador que lo selecciona en la ocasión adecuada y le da el tratamiento térmico correcto. A veces la alta producción se encuentra en el norte, pero con la misma frecuencia que en el sur, este u oeste. Los requisitos del trabajo determinan en que rombo se encontrará la alta producción.

V.3 EJEMPLOS DE SELECCIÓN DE ACEROS PARA HERRAMIENTAS.

En el subtema anterior se dieron varios ejemplos para enseñar cómo se aplica el sistema del conjunto coordinado en la práctica. En todos los casos la pregunta fue "¿Por qué no usar acero agua-duro?" Con esa pregunta como punto de partida, se halló la dirección apropiada en el diagrama que nos guió al metal apropiado. Los fabricantes de herramientas nos dicen que una vez que se sitúan en el diagrama del conjunto coordinado, este método funcionará satisfactoriamente. Pueden cambiar con seguridad de un acero a otro y saber de antemano que resultados se obtendrán. Sin embargo el fabricante de herramientas no se apoya siempre en el diagrama y en algunos casos se requiere una buena y segura guía para obtener mejor acero en una primera elección. El selector de aceros para herramientas fue diseñado como el medio más conveniente para hacer esa elección, ya que pone directamente en práctica la idea del conjunto coordinado.

Se nota que es particularmente valioso debido al hecho de quienes trabajan en el taller han contribuido materialmente a determinar la forma y el contenido de los diagramas.

Cómo usar el selector:

1. Localice el nombre de la herramienta que Ud. desea hacer.
2. Verifique el propósito y necesidades de la herramienta.
3. Localice el acero para herramienta adecuado con que se va a emplear.

Precauciones en el uso del selector. Puede surgir el caso en el cual se esté haciendo una cierta herramienta en que el sistema del conjunto coordinado dé resultados enteramente satisfactorios. Si se busca el nombre de esa herramienta y encuentra que la gráfica de selección recomienda algún otro acero como punto de partida, no abandone la posición que tiene en ese momento y continúe usando el acero con el que está trabajando satisfactoriamente. Llegará a esto por experiencia, si inicia con

el acero que le fue recomendado en la gráfica, las oportunidades que tendrá más tarde, será moverse desde su acero original como mejor se acomode a su taller en particular.

Cuando tenga un nuevo tipo de herramienta que hacer, entonces use la gráfica como guía. Esto representa el mejor juicio para calificar a muchos ingenieros en la fabricación de herramientas y como tal proporcionaremos un criterio para dirigirse en la dirección correcta.

Para simplificar, no se proporcionará el selector de aceros para herramientas completo, sin embargo se darán ejemplos de los aceros del conjunto coordinado, para ilustrar la forma en que se puede utilizar el selector de aceros para herramienta.*

Carta de selección que se aplica al diagrama del conjunto coordinado como una guía en los aceros para herramientas.

ACERO TEMPLADO EN AIRE:

Úsese si la herramienta necesita extrema precisión y seguridad en el temple, o si el temple profundo es necesario para secciones largas.

(D2) Para máxima resistencia al desgaste, baja tenacidad y máxima precisión y seguridad en el temple.

(A2) Para buena resistencia al desgaste, buena tenacidad y máxima precisión y seguridad en el temple.

(A6) Para máxima tenacidad, poca resistencia al desgaste y máxima precisión y seguridad en el temple.

NOTA: En caso de duda, empiece siempre con la tenacidad de los aceros en cuestión.

* Para mayor información acerca del selector de aceros para herramientas consultar:

Aceros para herramienta de Frank R. Palmer.

ACERO TEMPLADO EN ACEITE:

Úsese si la herramienta corre el peligro de quebrarse al sumergirse en agua o bien si necesita conservar su tamaño preciso durante el templado.

(D3) Para máxima resistencia al desgaste, baja tenacidad y temple seguro y preciso.

(O2) Para buena resistencia al desgaste, buena tenacidad y temple seguro y preciso.

(L6) Para máxima tenacidad, baja resistencia al desgaste, buena tenacidad y temple seguro y preciso.

NOTA: En caso de duda, empiece siempre con la tenacidad de los aceros en cuestión.

ACERO TEMPLADO EN AGUA:

Úsese si hay probabilidad de ruptura en el temple o si un cambio de tamaño o forma no afectan en realidad.

(F2) Para máxima resistencia al desgaste y baja tenacidad.

(W1) Para máxima tenacidad y baja resistencia al desgaste.

(S2) Para buena resistencia al desgaste y buena tenacidad.

NOTA: En caso de duda, empiece siempre con la tenacidad de los aceros en cuestión.

ACERO DUREZA AL ROJO:

Úsese solamente para herramientas que se calentarán en el servicio a más de 300°F. De otra manera úsese cualesquiera de los otros templados, en agua, aceite, o aire endurecidos del conjunto coordinado.

(M2) Para herramientas que cortarán metales a altas velocidades que necesitan dureza al rojo y cualidades de un corte limpio y tenacidad de grano fino.

(H21) Para troqueles de trabajo en caliente que necesitan de una buena resistencia al desgaste y buena tenacidad.

(H13) Para troqueles de trabajo en caliente que necesitan de una máxima tenacidad y baja resistencia al desgaste.

HERRAMIENTA	PROPIEDADES	ACERO A EMPLEAR
-------------	-------------	-----------------

ABOCARDADORES	Requieren la propiedad de mantener su agudeza en los filos cortantes bajo todas las condiciones: buena tenacidad y de fácil tratamiento térmico.	M2 (ROJO DESGASTE)
ÁRBOLES	Requiere tenacidad más una buena combinación de resistencia mecánica y resistencia al desgaste preferible mínima deformación en el templeado.	L6 (ACEITE TENAZ)
BLOQUES DE RESPALDO	Requieren máxima capacidad para resistir el recalado a la temperatura del rojo apagado.	H13 (ROJO TENAZ)
BOQUILLAS	Buena resistencia al desgaste y tenacidad con alta tenacidad y seguridad en el templeado.	02 (ACEITE DURO)

HERRAMIENTA	PROPIEDADES	ACERO A EMPLEAR
-------------	-------------	-----------------

DADOS PARA RASPAR RASQUETAS	Deben conservar agudeza en los filos, resistir la abrasión, conservar su tamaño al templarse.	D2 (AIRE DESGASTE)
--	---	-------------------------------

DADOS PARA FORJA DE LATÓN	Deben tener dureza al rojo con buena tenacidad para resistir deformaciones y roturas, también resistencia al marcado en caliente.	H21 (ROJO DURO)
--	---	----------------------------

DADOS PARA SUAJADO	Deben tener buena dureza superficial soportada por un núcleo tenaz, para resistir el agrietamiento y conservar la resistencia a la fatiga.	Para dados grandes de forma sencilla. W1 (AGUA DURO)
-------------------------------	--	--

MOLDES PARA PLÁSTICOS	Requieren mucha limpieza y acero estable y resistente con precisión al templarse, deben tener buen acabado	A6 (AIRE TENAZ)
----------------------------------	--	----------------------------

PUNZÓN PARA CLAVOS	Requiere dureza para resistir el recalcado, capacidad para resistir la flexión y tenacidad para resistir el astillado.	S2 (AGUA TENAZ)
-------------------------------	--	----------------------------

HERRAMIENTA	PROPIEDADES	ACERO A EMPLEAR
-------------	-------------	-----------------

PUNZONES PARA MATRICES	Deben tener alta resistencia a la compresión y la correcta resistencia transversal para soportar el agrietamiento, deben conservar el tamaño al templearse	Para los punzones que tienen ligera cara cóncava esfuerzos medios de hendido. A2 (AIRE DURO)
RODILLOS PARA TRABAJO EN FRÍO	Para formas sencillas seguras para enfriar en aceite, o que realmente pueden ser esmeriladas.	Para máxima dureza y resistencia al desgaste rodillos para aros. D3 (ACEITE DESGASTE)

VI. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS PARA HERRAMIENTA.

VI.1 GENERALIDADES.

Estrictamente hablando, todas las operaciones de calentamiento y enfriamiento constituyen el tratamiento térmico, cualquiera que sea su propósito. Algunas veces esa expresión se usa en un sentido más restrictivo para señalar al temple y revenido.

Normalizado: El normalizado, consiste en calentar el acero a una temperatura mayor que la usual para el temple, con el objeto de eliminar cualquier condición indeseable en la estructura. Es una especie de tratamiento correctivo usado después de la forja o después de un temple defectuoso, con objeto de devolver al acero una condición más "normal". En la mayoría de los casos, el acero se enfría al aire desde la temperatura de normalizado. Este tratamiento no se recomienda para aceros de temple en aire de alta velocidad, o aceros para herramientas para trabajo en caliente al tungsteno.

Recocido: El recocido puede efectuarse por muchas razones, de las cuales sólo dos son de interés para el fabricante de herramientas.

Recocido de suavizado: Un acero para herramientas forjado o en barra, tal como viene del forjado o laminado, es muy duro para maquinarlo y debe ser recocido; o posiblemente un acero que ha sido ya templado deba ser recocido para cierto maquinado adicional. Para este tipo de recocido se acostumbra calentar el acero ligeramente por encima de su intervalo crítico y entonces enfriarlo muy lentamente. El fabricante de herramientas siempre suministra temperaturas de recocido para el manejo de su acero.

Recocido para suavizar tensiones: No importa qué tan cuidadosamente haya sido recocido un acero para herramientas en la primera ocasión ya que debido a ciertas operaciones en el trabajo del acero pueden originarse tensiones internas considerables. Antes de temple la herramienta es conveniente eliminar esas tensiones. Si se va a eliminar una gran cantidad de metal por maquinado, las tensiones resultantes son suficientes para provocar que la herramienta se deforme durante el temple, aunque se esté usando un acero templado en aceite o uno indeformable templado en aire. Cuando se necesita un maquinado extenso, en una herramienta en que se requiera exactitud extrema, es una buena práctica, para desbastar, darle a la pieza un recocido para eliminar tensiones y después terminar el maquinado con un corte ligero. El recocido para eliminar tensiones se obtiene calentando el acero a temperaturas por debajo de su punto crítico y enfriándolo después. El enfriamiento en el horno es el mejor; el enfriamiento en cenizas secas es bastante bueno. Si el fabricante de acero no proporciona la temperatura de este recocido, puede usarse el intervalo de 691° a 718°C para casi todos los aceros para herramientas, a reserva de que se hagan algunos análisis.

Temple o endurecimiento: Las herramientas se templen para aumentar su tenacidad y resistencia al desgaste. La operación consiste en calentar el acero a cierta temperatura por encima del punto crítico y entonces enfriarlo rápidamente para provocar el endurecimiento. Debe aplicarse la temperatura de temple que proveen los fabricantes del acero, a menos que el usuario desee experimentar para encontrar una temperatura que se amolde mejor a sus necesidades.

Algunos aceros deben ser templados en agua (o salmuera), otros deberán enfriarse en aceite y otros son templados por enfriamiento al aire. Las razones para la diferencia del temple en agua, en aceite y al aire durante el enfriamiento de los aceros se expusieron en los capítulos 4 y 5, y se indicó que el temple en realidad se lleva a cabo en dos pasos separados y distintos. El primer paso es enfriar

de una temperatura de aproximadamente 593°C con una rapidez mayor que la crítica de enfriamiento del acero, para asegurar el temple. El segundo es el templado o endurecimiento propiamente dicho, el cual en un acero al carbono comienza aproximadamente a los 260°C y se completa aproximadamente cuando el acero se enfría por debajo del punto de ebullición del agua o alrededor de los 93°C. Por esto es importante, en el enfriamiento, asegurarse de que toda la sección de la herramienta, desde el centro hasta la superficie se enfríe por debajo de los 93°C si va a endurecerse completamente. No es necesario, y en muchos casos no es deseable, enfriar una herramienta "a frío de piedra" aunque ésta deba estar lo suficientemente fría como para que no hierva una gota de agua antes de que se considere segura para llevarla al horno de revenido.

Ya que el templado real ocurre en el intervalo de aproximadamente 260°C a la temperatura ambiente, se deduce que los llamados esfuerzos de enfriamiento, que a veces provocan fracturas, también deben desarrollarse en este intervalo. Hay métodos de templado especiales que han sido concebidos para minimizar estas tensiones y, por lo tanto, reducir el peligro de fractura por medio de enfriamiento retardado a través del intervalo de bajas temperaturas. Estos métodos se conocen por varios nombres, tales como: revenido diferido (martempering) y enfriamiento de tiempo, y enfriamiento isotérmico. Estos fueron desarrollados principalmente para tratamiento térmico de piezas, más que de herramientas, y, puesto que es esencial el tiempo exacto, se usan más en el temple de producción que para herramientas o piezas ocasionales.

Por lo tanto, dichos tratamientos sólo se han utilizado en un sector reducido del temple para herramientas.

Temple en paquete: Este es un procedimiento de temple modificado y algunas veces recomendado para ciertos tipos de acero para herramientas, cuando no se dispone de hornos de temple de atmósfera controlada. Esto implica empaquetar las herramientas en un recipiente con un

material carbonáceo adecuado, preferiblemente rebabas limpias de hierro colado, y después calentar todo el paquete a la temperatura de temple. Obviamente, el calentamiento procede más lentamente, y el tiempo necesario para el remojo aumenta. Cuando se ha cumplido el tiempo adecuado, la herramienta se saca del paquete y se enfría. Aparte de los efectos de calentamiento lento y largo remojo, el cual en ocasiones es deseable, este procedimiento mantiene la superficie de la herramienta libre de marcas y ayuda a prevenir la descarburización de la superficie. Se recomiendan las rebabas de hierro colado porque, mientras protegen la superficie, agregan poco o ningún carbono. Es conveniente envolver la herramienta en papel de estraza, esto evita que las rebabas se adhieran a la superficie.

Revenido: Esta operación consiste en un recalentamiento de la pieza templada, con el objeto de eliminar las tensiones del temple y aumentar la tenacidad. Generalmente provoca que la herramienta pierda algo de su dureza, aunque este no sea el propósito del revenido.

El revenido se realiza usualmente a temperatura relativamente baja, si se compara con la temperatura del temple. El tiempo que la herramienta permanece a la temperatura de revenido es importante. Los resultados deseados se aseguran por una combinación de tiempo y temperatura. Ninguna herramienta deberá ser sacada de la temperatura de revenido antes de una hora. El tiempo necesario para que la herramienta se caliente a la temperatura de revenido depende de la sección, la temperatura de revenido y el medio de calentamiento. Mientras mayor sea la herramienta y menor la temperatura de revenido el tiempo requerido será mayor. Los baños líquidos y los hornos de aire circulante calientan más rápido que los hornos de revenido ordinarios. Como las herramientas templadas son revenidas a baja temperatura, que el ojo humano no puede apreciar, es importante tener una guía que permita estimar el tiempo probable para alcanzar la temperatura, tal como se

resumirá al final de este tema en una tabla que proporciona tiempos de permanencia en hornos, temperaturas, medios de temple, etc., para todos los aceros para herramientas. Tablas 6-1, 6-2. El tiempo necesario después de que la herramienta ha alcanzado la temperatura, depende del tamaño y características de la herramienta. Las herramientas grandes o complicadas deben revenirse por más de una hora, por ejemplo: las matrices de forja mostradas en el capítulo 5, figura 5-11 son de aproximadamente 12 plg. de largo. Si están hechas de una pieza, cuatro horas no serían suficientes para revenirlas. En general, los aceros para herramientas altamente aleados deben ser revenidos durante más tiempo que aquéllos que tienen muy poca o ninguna aleación.

Tratamiento en frío (congelado profundo): Desde el principio de este capítulo se estableció que el temple del acero para herramientas se completa "por debajo del punto de ebullición del agua"; en otras palabras, cerca de la temperatura ambiente. Por muchos años se ha sabido que con el enfriamiento a la temperatura ambiente casi queda completo el temple, aunque a veces una parte de la estructura del acero hace la promesa de templarse y se enfría cruzando la temperatura crítica de enfriamiento pero no lo cumple a la temperatura ambiente. Se cumpliría la promesa, sin embargo, si se enfría por debajo de dicha temperatura.

En años recientes se han venido desarrollando equipos y materiales para eliminar los últimos rastros de estructura no templada, enfriando a bajas temperaturas. Estos métodos se conocen como tratamiento en frío, congelamiento profundo, etc., y se consiguen enfriando las herramientas en hielo seco o en equipo especial de refrigeración. Con objeto de disminuir el peligro de fractura, la herramienta debe revenirse antes del tratamiento en frío, y éste debe ser seguido por un segundo revenido. El tratamiento en frío se usa algunas veces para corregir los efectos de un sobrecalentamiento en ciertos aceros, tales como al alto carbono, tipos de alto cromo, los cuales

desarrollan "austenita retenida" cuando se templen desde muy altas temperaturas.

Estabilizado: Mientras que el propósito primario del tratamiento en frío es completar cualquier templeado que no haya tenido lugar a la temperatura del baño de enfriamiento, tiene otro resultado importante la estabilización del acero templeado. Ciertos calibradores o herramientas muy exactas deben rectificarse hasta medidas muy precisas y deben mantener esta medida indefinidamente. Al transcurrir el tiempo ocurre que una herramienta templeada puede cambiar su medida o forma desde unas diezmilésimas hasta fracciones mayores. Esto sucede por un proceso natural de "envejecimiento" en que la austenita retenida se convierte en martensita. Obviamente, los fabricantes de herramientas no pueden esperar años para que una herramienta sea estable. Muchos años de envejecimiento pueden acumularse en pocas horas al aplicar un tratamiento en frío modificado, como el siguiente:

Después de que la herramienta ha salido convenientemente templeada y revenida, se lleva al punto de pulido. Entonces se calienta durante una o dos horas a la temperatura de ebullición del agua y se enfría a la temperatura ambiente. A continuación se enfría en hielo seco o por un equipo refrigerante adecuado durante un lapso similar, y después se le permite alcanzar la temperatura ambiente. Se somete al mismo ciclo de calentamiento y enfriamiento cuatro o cinco veces más, lo que proporciona al acero una condición estable, después de la cual se completa la operación de pulido.

Nitrurado: El término "nitrurado", como más comúnmente se usa, se refiere al temple de la superficie de ciertos aceros tenaces aleados, por la adición de nitrógeno en la superficie. Esto se hace por tratamiento térmico y terminado de las partes en un gas adecuado, comúnmente amoníaco, a una

temperatura alrededor de 538°C, la cual está por debajo de la temperatura usual de estirado de estos aceros. Los únicos aceros para herramientas para los cuales esto es lo indicado, son los que tienen temperaturas de revenido mayores de 538°C y principalmente los aceros de alta velocidad. Un método adecuado de nitrurar herramientas, conocido como baño de sales nitrurantes, es calentar las herramientas terminadas, o casi, en un baño de sales que contenga altos porcentajes de sales de cianuro, por ejemplo, una mezcla de 45% de cianuro de sodio y 55% de cianuro de potasio. Para el acero de alta velocidad, la temperatura más recomendable es de 538° a 566°C y el tiempo de inmersión de 20 min. a una hora, dependiendo de los resultados deseados. El propósito es reducir una costra extremadamente dura en la superficie, aunque sólo se obtiene algunas veces con la pérdida de algo de tenacidad.

Cianurado: Aunque el temple con cianuro se aplica usualmente a piezas de acero suave para obtener superficies resistentes al desgaste en ocasiones se aplica a aceros para herramientas, para obtener ciertas condiciones finales de superficie. Brevemente el proceso consiste en calentar la herramienta a la temperatura de temple en un baño con un porcentaje apreciable de cianuro de sodio. Una mezcla de sales usada comúnmente para este propósito es de 45% de cianuro de sodio, 37% de carbonato de sodio y 18% de cloruro de sodio. Dicha mezcla proporcionará algún carbono y nitrógeno a la superficie de la herramienta. Para el funcionamiento apropiado de los baños de cianuro es necesario verificarlos diariamente, ya que las sales de cianuro se pueden descomponer rápidamente.

*Los cianuros son venenos activos y se debe tener extremo cuidado para evitar el contacto con heridas abiertas. No debe ser tomado por vía oral. Cuando se emplean los baños de cianuro deben tomarse precauciones efectivas para expulsar todos los gases tóxicos.

VI.2 PRINCIPIOS GENERALES QUE CONTROLAN EL CALENTAMIENTO.

Probablemente el 95% de toda la literatura impresa en la materia del calentamiento del acero para herramientas se refiere a la pregunta: ¿Cuánto calor?. Hay muy pocos datos disponibles sobre ¿Qué tan rápido? o ¿Cuánto tiempo?. Muchas de las instrucciones respecto al tiempo de calentamiento no dicen más que "Caliente lenta y uniformemente a la temperatura de..." Acerca de la única figura real en circulación general está "Una hora por pulgada de grueso". Por lo tanto, es altamente deseable para la guía del operador que alguien publicará datos específicos sobre cómo se calienta el acero para herramientas. Este es el propósito del presente tema.

Obviamente uno debe conocer los hechos reales acerca de cómo se calienta el acero para herramientas antes de que pueda tomar cualquier decisión sobre la materia. Por ejemplo, generalmente se cree que la superficie de una herramienta alcanza la temperatura del horno antes de que el interior esté completamente caliente. Ahora esto puede o no ser hecho. Si es cierto, entonces el operario debe saber cuánto tiempo le toma al centro calentarse de acuerdo a los diferentes tamaños y temperaturas, de manera que él pueda decidir cuánto tiempo más dejar a la pieza después de que se vea bien en la superficie. Si la creencia sobre los centros fríos no es cierta (y, de hecho no lo es) entonces él querrá saberlo, para que no deje la pieza innecesariamente por mucho tiempo "remoándose".

Cabe señalar un hecho que después será obvio, en virtud de que nuestra discusión no tiene una aplicación práctica en aceros tales como el de alta velocidad, los cuales debido a que las temperaturas empleadas, son extremadamente altas, deben ser precalentados. específicamente se aplican en aceros que normalmente se templean a temperaturas inferiores a 1038°C.

¿Cómo se calienta el acero para herramientas?

Será más fácil responder a esta pregunta si seleccionamos un ejemplo específico. Suponga que estamos calentando una pieza de acero tipo W1 de 3 plg (7.62 cm) de diámetro por 6 plg (15.2 cm) de largo en un horno eléctrico de mufla a 788°C. En la figura 6-3, T1 es el termopar del horno, T2 es el termopar incrustado en la superficie del acero y fijo en un lugar, y T3 es un termopar incrustado en el centro del acero.

La superficie exterior absorbe continuamente calor de los gases del horno hasta que finalmente alcanza la misma temperatura de éstos (entonces deja de absorber). El centro de la pieza se puede calentar sólo de una manera, por conducción desde la superficie.

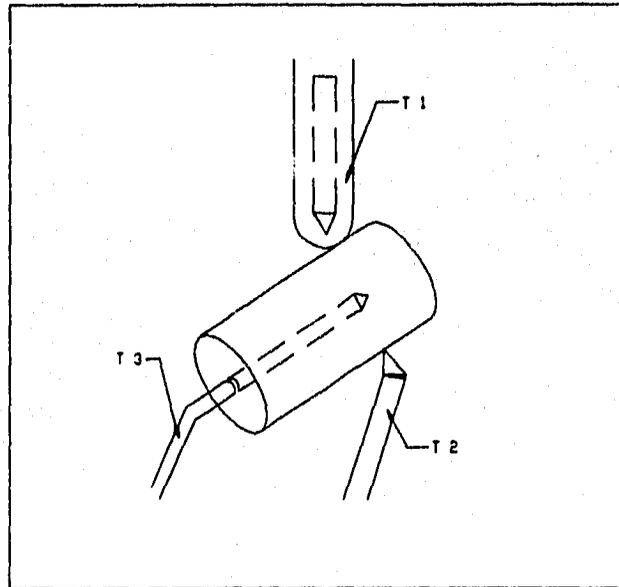


FIG. 6-3 Perfil del espécimen y colocación de los termopares para la medición de la velocidad de calentamiento.

Mientras el centro esté más frío que la superficie, se continuará transmitiendo calor desde la superficie, esto es, enfriándose la superficie y calentándose el interior.

La superficie exterior del acero, por un lado, absorbe calor de los gases del horno, y por el otro lo cede al interior del metal. Sería imposible para la superficie estar tan caliente como el horno (en tal caso no absorbería calor) y aún tener interior frío (para estar enfriando la superficie por conducción). La única manera que la superficie llegue a alcanzar la temperatura del horno es que el centro deje de enfriarse desde adentro, y esto sólo sucede cuando la pieza está uniformemente calentada. Este es el por qué el centro y la superficie deben alcanzar simultáneamente la temperatura del horno. En las primeras etapas del calentamiento tenemos una imagen diferente. Suponga que el horno está a 788°C , y la superficie está a sólo 538°C , ¿entonces qué pasa?. El centro de la pieza debe estar más frío que los 538°C , y aquí está el por qué. ¿Qué es eso que la mantiene por debajo? Es el "arrastre" del metal en el interior conduciendo calor lejos de su superficie. Si el centro y la superficie estuvieran a la misma temperatura, el calor no podría pasar hacia dentro y la superficie no estaría perdiendo calor. Por lo tanto, el centro debe estar todas las veces más frío que la superficie hasta que toda la masa alcance la temperatura del horno. En realidad, dentro de los límites de lectura de los pirómetros comerciales, el centro y la superficie parecen llegar a la misma temperatura 14°C o aún 28°C por debajo del calor del horno, después de lo cual ellos parecen aumentar juntos.

Pongamos una pieza de 3 plg (7.62 cm) de diámetro por 6 plg (15.2 cm) de largo de un acero W1, dentro de un horno. Mantendremos constante la temperatura del horno a 788°C y conectaremos el termopar de la superficie T2 y el termopar del centro T3 a un registro de dos puntos y los observaremos calentarse, la gráfica se verá como la de la figura 6-4

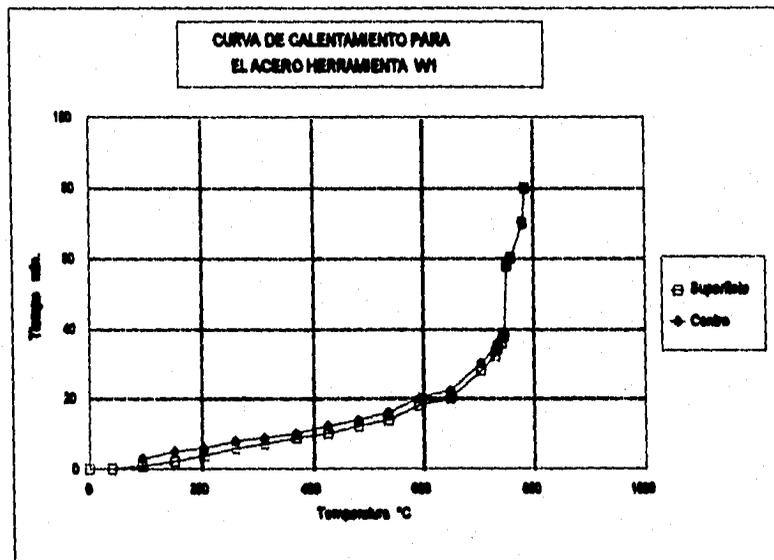


fig. 6-4 Curva de calentamiento para el acero W1 de 3 pulg. de diámetro por 6 pulg. de largo. El horno eléctrico de mufla se mantiene a 788°C

Observe de la gráfica que el acero se calienta rápidamente al principio cuando el "jalón" de la temperatura es mayor, pero muy lento a medida que se acerca a la temperatura del horno. Los sitios planos alrededor de 732°C marcan el punto crítico del acero. Es necesario tanto calor para que el acero W1 fuerce su punto crítico como el que se necesita para calentarlo 83°C. Por lo tanto, cuando se alcanza este punto, el acero detiene su calentamiento hasta que ha absorbido suficiente calor para completar la transformación crítica. En la figura 6-4 la curva sólida sigue al calentamiento de la superficie, y la curva punteada sigue al centro de la pieza. A primera vista ellas parecen estar muy juntas, pero en un examen más cuidadoso se verá que la diferencia real en temperatura entre el centro y la superficie está representada por el largo de las líneas horizontales que unen a las dos curvas. Así,

la diferencia de temperatura es de alrededor de 56°C únicamente, durante las primeras etapas de calentamiento y mucho menor a medida que el acero se aproxima al punto crítico. Es muy importante notar que las curvas corren juntas durante los últimos 14° o 17°C de calentamiento. Esto es cierto para todas las medidas probadas así como para todas las temperaturas, lo que prueba que cuando la superficie ha alcanzado la máxima temperatura, el centro lo ha hecho también.

Podría ser benéfico hacer una pausa por el momento y pensar acerca de la importancia de este hecho en relación con el calentamiento real de las herramientas. Esto quiere decir que muchas de las precauciones de calentar lentamente no son necesarias. La única razón posible para el calentamiento lento es el de prevenir una gran diferencia de temperaturas entre el centro y el exterior, lo cual podría provocar tensiones destructivas. Pero hemos mostrado que con el calentamiento normal esta diferencia, con el horno a cierta temperatura antes de introducir el acero, probablemente nunca es superior a los 56°C, lo cual no es suficiente para dañar el timbre tenaz del acero para herramientas. Esto quiere decir entonces que las herramientas hechas con aceros modernos pueden ser puestas directamente en el horno caliente y permitirles alcanzar las temperaturas tan rápido como el acero pueda absorber el calor. Sin embargo, como mencionamos anteriormente, aceros para herramientas de alta aleación que requieren temperaturas de endurecimiento superiores a los 897°C se manejan más seguramente por precalentamiento, a menos que sean endurecidos en paquete. Esto se debe en parte al mayor tiempo requerido para la solución adecuada de sus constituyentes, y al peligro de choque térmico.

¿Cómo puede uno decir cuándo el centro de una herramienta ha llegado al tope de temperatura en cualquier tipo de hornos de cámara? Para contestar esta pregunta tomaremos un acero específico W1. Ni el tamaño de la pieza ni el diseño del horno afectan al método que va a ser descrito. El procedimiento es como sigue:

1. Coloque el termopar del horno detrás de la sección más pesada de la pieza que está siendo calentada de manera que la herramienta y el termopar puedan ser vistos de un solo "vistazo".

2. Cuando el acero se aproxime a la temperatura, levante la puerta ocasionalmente y compare el color del acero y el del termopar. Mirando a través de la mirilla puede engañarle, el acero a veces parece más frío cuando se ve por la mirilla. Si al levantar la puerta ocurre una corriente de aire frío, cubra parcialmente las puertas del horno con un ladrillo con lo que se elimina el "efecto de chimenea".

3. Cuando la parte más pesada de la herramienta se ve casi exactamente del mismo color que el tubo del termopar, y la línea divisoria entre ellos desaparece, empiece a contar el tiempo.

4. Para una temperatura de 788°C, conceda cinco minutos adicionales por cada pulgada de espesor en la sección más pesada de la herramienta, entonces la pieza alcanzará la temperatura máxima deseada en toda su extensión.

Deben observarse que mientras los cuatro pasos en el procedimiento descrito se aplican específicamente al acero para herramientas tipo W1, se puede usar con la misma eficiencia en los aceros para herramientas de baja aleación, por supuesto, que las temperaturas de endurecimiento difieren. En lo que respecta al comportamiento lento de los aceros altamente aleados, ellos deberán ser "remojados" a la temperatura durante 20 minutos, más cinco minutos por cada pulgada de espesor, con objeto de asegurar la completa solución de los carburos en la operación de calentamiento. El precalentamiento, como hemos discutido anteriormente, también es recomendable, especialmente en el caso de secciones desbalanceadas.

VI.3 PRINCIPIOS GENERALES QUE CONTROLAN EL ENFRIAMIENTO.

El enfriamiento puede realizarse en varios medios o "enfriadores" siendo los más comunes el aire, aceite y agua, dependiendo la selección del medio del análisis y de la templabilidad del acero. El agua puede ser dulce o puede contener porcentajes de sal común ó sosa cáustica, generalmente la segunda.

La estructura, dureza y resistencia resultantes de una operación de tratamiento térmico se determinan por la rapidez de enfriamiento real obtenida del proceso de temple. Si la rapidez de enfriamiento real excede a la rapidez crítica de enfriamiento, sólo se obtendrá martensita, si la rapidez real de enfriamiento es menor que la rapidez crítica de enfriamiento, la pieza no endurecerá completamente. A mayor diferencia entre las dos rapidezces de enfriamiento, los productos de transformación serán más blandos y la dureza menor. En este punto, es necesario entender el mecanismo de eliminación de calor durante el temple.

Como ejemplo, la figura 6-5 muestra una curva típica de enfriamiento para una barra de acero para herramientas tipo W1 de 3/8 de pulg. (0.95 cm) de diámetro por 1 pulg. (2.54 cm) de largo, templado en agua tibia. En vez de mostrar una rapidez de enfriamiento constante durante todo el temple, la curva de enfriamiento muestra tres etapas. Debe tenerse en cuenta la diferencia entre una curva de enfriamiento y una rapidez de enfriamiento. Una curva de enfriamiento muestra la variación de la temperatura con el tiempo durante el temple; sin embargo, una rapidez de enfriamiento muestra la rapidez de cambio de la temperatura con el tiempo. La rapidez de enfriamiento a cualquier temperatura puede obtenerse de la curva de enfriamiento mediante el trazado de una tangente a la curva a esa temperatura y determinando la pendiente de la tangente. Cuanto más próxima a la horizontal sea

la tangente, menor será la rapidez de enfriamiento. Al observar las tangentes trazadas en varios puntos de la curva de enfriamiento de la figura 6-5, resulta obvio que la rapidez de enfriamiento cambia en forma constante durante el enfriamiento.

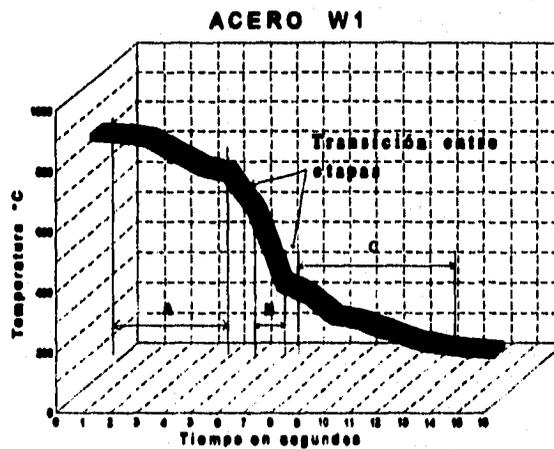


FIG 6-5 Curva típica de enfriamiento para un acero tipo W1

Etapa A: estado de enfriamiento por medio de una capa de vapor: En esta etapa, la temperatura del metal es tan alta que el medio de temple se vaporiza en la superficie del metal y una delgada y estable película de vapor rodea al metal caliente. El enfriamiento se efectúa por conducción y radiación a través de la película gaseosa y, como las películas de vapor son pobres conductoras del calor, las rapidez de enfriamiento es relativamente lenta a través de esta etapa.

Etapa B: de enfriamiento por transporte de vapor: Esta etapa empieza cuando el metal se ha enfriado a una temperatura tal que la película de vapor ya no es estable. Lo mojado de la superficie del metal

por el medio del temple produce una violenta ebullición. El calor se elimina del metal muy rápidamente como calor latente de vaporización. Esta etapa es la más rápida del enfriamiento.

Etapa C: de enfriamiento por medio del líquido: Esta etapa empieza cuando la temperatura de la superficie del metal alcanza el punto de ebullición del líquido en temple. Ya no se forma más vapor, de modo que el enfriamiento se efectúa por conducción y por convección a través del líquido. La rapidez de enfriamiento es la más lenta en esta etapa.

El enfriamiento produce esfuerzos internos en una pieza de acero, fuerzas que son, en ocasiones, lo suficientemente fuertes como para destrozar una pieza de acero endurecido cuya resistencia puede ser de cerca de 400 000 lb/pulg. Si se pueden generar fuerzas de esta magnitud en el temple. ¿Porqué no dedicar algún esfuerzo para hacerlas útiles en lugar de destructivas?

Prácticamente el control de los esfuerzos internos en un acero para herramientas se logra de 2 maneras, primero dirigiendo el refrigerante a "dónde y cuándo" se necesita, por medios tales como soportes de temple y segundo, por la regulación de la velocidad de enfriamiento en las etapas posteriores del temple.

VI.4 EQUIPO Y PROCEDIMIENTOS.

INSTRUMENTOS DEL TALLER DE TEMPLE:

El templador de herramientas necesita pocos instrumentos, pero estos deben ser de calidad y exactos. Un pirómetro que esté mal calibrado puede producir muchas horas de trabajo inútil en el taller. En realidad muchas herramientas van a parar a la basura, o tienen un pobre rendimiento, sólo porque los instrumentos de medición en el tratamiento térmico son inexactos o inadecuados.

Durante un tiempo los únicos instrumentos usados por el templador fueron pirómetros, termómetros, y relojes. A estos se han añadido recientemente aparatos para pruebas y control de la atmósfera del horno de temple. El templador moderno es actualmente capaz de controlar las tres variables importantes: temperatura, tiempo y atmósfera.

Pirómetros: Durante muchos años los templadores tuvieron que estimar la temperatura de su trabajo sin la ayuda de ningún instrumento. Afortunadamente, en ese tiempo, sólo trabajaban con aceros al carbono para herramientas y como dicho acero se temple a una temperatura ligeramente superior que su punto crítico, hombres con experiencia podían hacer un excelente trabajo. Un diagrama de colores de temperaturas incandescentes puede ser útil en la ausencia de un pirómetro, pero únicamente se aproxima a lo mejor posible. Los buenos "templadores a ojo" realmente pueden ver cuando el acero para herramientas al carbono pasa por su intervalo crítico por las luces y sombras que aparecen en él. Con la llegada de los aceros para herramientas aleados, muchos de los cuales templen a varios grados por encima de su punto crítico y que, por lo tanto, los cambios graduales son tan lentos que no pueden ser vistos, los pirómetros se convierten en absolutamente necesarios.

Entre los varios tipos de pirómetros, basados en diferentes principios, el pirómetro termo-eléctrico es el más usado en el taller de temple. El principio de éste es muy sencillo. Si se unen dos metales diferentes y se calienta la unión, se generará un pequeño voltaje eléctrico entre las partes frías de los metales. Esto se conoce como termopar y se muestra en la figura 6-6. Para ser más específicos,

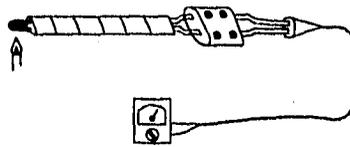


FIG. 6-6 PIRÓMETRO MILIVOLTÍMETRO SENCILLO.

supongamos que uno de los metales es hierro puro y el otro es una aleación de níquel y cobre llamada Constantan y ambos están en forma de alambre, trenzados por un extremo y soldados para asegurar un contacto perfecto cuando la unión soldada se calienta, un voltímetro sensible medirá un voltaje a través de los extremos fríos de los dos alambres.

Ahora sólo se han mencionado termopares de hierro-Constantan. Esos son útiles para temperaturas superiores a 982°C, pero para temperaturas mayores, éstos se queman rápidamente. El Cromel-Alumel es otra combinación usual para llegar hasta los 1204°C. Para temperaturas hasta 1538°C se usa el platino puro para un alambre y en el otro se usa una aleación de platino y sodio. Todas estas combinaciones de termopares desarrollan diferentes voltajes y, por lo tanto, cada pirómetro debe ser calibrado sólo para un par en particular y no se puede usar otro.

Los pirómetros están disponibles en tres tipos generales: Indicadores, registradores y de control. Los pirómetros indicadores, son aquellos que muestran la temperatura en su carátula en la misma forma que un reloj. Los pirómetros registradores tienen una gráfica accionada mecánicamente en la que la temperatura se registra continuamente. Los controladores no sólo indican o registran, sino que también regulan automáticamente la temperatura del horno, de manera que permanezca dentro de un intervalo predeterminado. Un tipo modificado de control semiautomático opera con luces en el frente del horno. Así, una luz roja puede decir al templador que el horno está muy caliente, una luz verde que está muy frío y una luz blanca que está en su punto. Con este sistema, el templador debe

ajustar sus válvulas para mantener la temperatura en la luz blanca.

Hay muchos otros dispositivos para medir la temperatura, por ejemplo, el pirómetro óptico o el pirómetro de radiación. Sin embargo, estos carecen relativamente de importancia en el tratamiento térmico del acero para herramientas.

Termómetros: Se necesita decir poco acerca de estos conocidos y valiosos instrumentos. Los termómetros de cristal son útiles en hornos de templado en aire o líquido, para medir temperaturas de hasta 316°C.

Relojes: Un reloj ordinario puede servir en muchas operaciones para el tratamiento térmico, uno de alarma es frecuentemente útil. Para el sobrecalentamiento del acero para herramientas de alta velocidad o el calentamiento de herramientas en baños de sales, puede usarse un reloj con segundero. Hay un tipo especial de reloj, el cual se adelanta hasta el intervalo de tiempo deseado; entonces el reloj camina hacia atrás hasta que las manecillas llegan a cero, indicando que el tiempo ha terminado. En cada taller de temple se debe tener algún dispositivo para medir exactamente el tiempo.

Aparatos para control de la atmósfera: La función del equipo de control de la atmósfera es analizar y controlar la atmósfera en el horno de temple, a la temperatura de trabajo. En la mayoría de los hornos alimentados por combustible la herramienta está rodeada por los mismos gases de combustión que calientan el horno. En los hornos de atmósfera controlada se genera el gas necesario para la propia combustión fuera del horno y se introduce continuamente a la cámara de calentamiento.

El más viejo y convencional tipo de equipo para análisis de gas y determinación de CO, CO₂ y O₂ es el aparato de Orsat.

Hornos de Templado: Los hornos de tratamiento deberán ser juzgados por su tamaño, forma y método de calentamiento, control atmosférico y su capacidad para procesar trabajos. Su aislante térmico para comodidad en el departamento de tratamientos, su economía y la mejor forma de operación, son aspectos que se deben considerar.

Todo el equipo de calentamiento para el tratamiento de herramientas puede ser agrupado de acuerdo con las siguientes clasificaciones:

I. Hornos de control manual:

Mufla de gas.

Mufla eléctrica (usualmente hornos de cortina de gas)

Semimufla (usualmente operado con gas)

Hogar abierto.

Estos hornos son capaces de producir ya sea atmósfera oxidante o reductora por medio del control de la relación aire-combustible, en los hornos que emplean combustible, o por cortinas de gas en los hornos eléctricos. Las atmósferas son controladas manualmente por el operador. El contenido de humedad en estos hornos de las atmósferas reductoras, no puede ser controlado. Figuras 6-7, 6-8, 6-9.

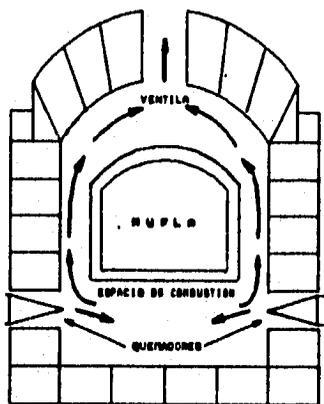


FIG 6-7 EL PRINCIPIO DEL HORNO DE MUFLA

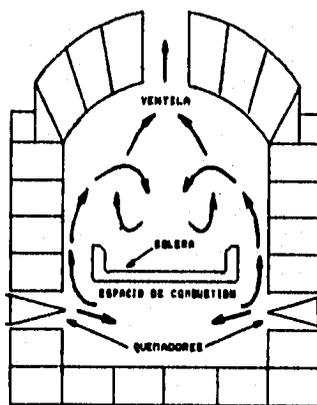


FIG 6-8 EL PRINCIPIO DEL HORNO DE SEMIMUFLA

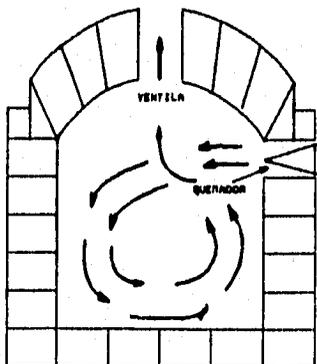


FIG 6-9 EL PRINCIPIO DEL HOGAR ABIERTO

2. Hornos de atmósfera controlada:

Mufla de gas.

Eléctrico de mufla.

Tubo radiante.

En estos hornos se genera una atmósfera reductora protectora fuera del horno, y se introduce en la mufla. La composición de la atmósfera, incluyendo el contenido de humedad, se controla por instrumentos, algunos de los cuales son automáticos.

3. Atmósfera de aceite-gas eléctricos.

Este horno utiliza un aceite obtenido por cracking para producir una atmósfera reducida.

4. Hornos de bloque de carbono.

Estos hornos usan una mufla de carbono para obtener una atmósfera alta en CO.

5. Hornos de baño líquido.

Baños de sal.

Neutral.

Carburizante.

Baño de plomo.

6. Calentadores de inducción.

Hornos controlados manualmente: En el horno de mufla fig. 6-7 la herramienta se coloca en una cámara cerrada, que se calienta desde el exterior. Los gases de combustión no deben entrar en la

cámara, por lo que la herramienta esta rodeada por aire ambiente a menos que se modifique la atmósfera, como en el caso de la cortina de gas. Prácticamente todos los hornos calentados por electricidad tienen las características de un horno de mufla.

En un horno semimufla fig. 6-8 hay una solera, o teja refractaria soportada por pilares algunas pulgadas por encima del fondo sólido del horno. Esta solera une las paredes delantera y trasera, pero no toca las paredes laterales. El combustible (usualmente gas) se quema bajo la solera, saliendo los productos de la combustión por el espacio entre la solera y las paredes laterales y ventilándose por medio de agujeros en el techo. En este horno, la atmósfera que rodea a las herramientas consiste en productos de la combustión, pero las herramientas no están directamente en el camino de la llama.

Horno de hogar abierto: fig. 6-9, es el diseño menos adecuado para tratar herramientas. Consiste esencialmente en un horno cubierto con material refractario que contiene sólo un compartimiento en el que operan los quemadores. Tanto la temperatura como la atmósfera, pueden variar tremendamente dentro del horno, dependiendo de si la herramienta está en el paso de la llama o a un lado de ella.

Hornos de atmósfera controlada: Todos estos hornos son de mufla, y pueden ser operados por gas, eléctricos o de tubo radiante. El horno de mufla operado por gas ya ha sido descrito. Los hornos eléctricos de mufla son de dos tipos. En el primero, la mufla se calienta por medio de una resistencia fuera de ella. Estos hornos no se recomiendan para el tratamiento de los aceros de alta velocidad. En el segundo tipo, la mufla se calienta con unas barras incandescentes, esto es, resistores de carbono en forma de barras rectas dentro de la mufla. Este tipo se adapta a temperaturas más altas.

Los hornos de tubo radiante: se calientan por medio de una construcción de alta aleación de tubos resistentes al calor de la mufla, que son calentados por gas dentro del tubo. De esta forma los tubos generan calor en la mufla, sin que el gas entre en ella.

En el horno eléctrico de atmósfera aceite-gas, se obtiene una atmósfera apropiada reductora al dejar caer aceite de un tipo específico dentro del horno, con una rapidez determinada. El método se adapta para hornos eléctricos verticales.

Los bloques de carbono, pueden usarse ya sea en hornos especiales o en uno de los tipos tradicionales de hornos de tratamiento. La oxidación parcial del material de la mufla produce automáticamente una atmósfera de alto contenido de monóxido de carbono, algunas veces cerca de 30% de CO.

No existe ninguna fórmula general que pueda ser aplicada para determinar el tipo de horno, o qué método de control de atmósfera es mejor. Sin embargo, el comprador de equipo de tratamiento térmico deberá buscar los factores temperatura, tiempo y atmósfera. El tipo de horno que le pueda servir más económica y convenientemente, en estas situaciones, es la mejor elección.

EQUIPO DE TEMPLADO:

El templado es una etapa muy importante en la operación de endurecido y puede dividirse en "templado de baño en reposo" (líquido en reposo) y "templado agitado" (corriente líquida). En el baño en reposo la herramienta se sumerge y cualquier movimiento lo hace el operador moviendo la herramienta con unas tenazas. Por regla general un movimiento lento de arriba hacia abajo es lo mejor, y no es recomendable un movimiento violento.

Baños en reposo: Estos baños pueden contener agua potable, salmuera o una solución de sosa cáustica, o varios tipos de aceite. El baño en reposo con agua potable no es un medio ideal para el templado del acero para herramientas. El agua potable es satisfactoria cuando se utiliza en forma de corriente líquida, pero no es tan buena como la salmuera cuando se utiliza para un templado de baño en reposo.

Los baños de templado en aceite: son necesarios en el taller de tratamientos para templar aceros de alta velocidad y otros aceros para herramientas que se templan en aceite. Estos dan una rapidez de templado más lenta que el agua y mayor que el aire. Los tipos de aceite que se han usado son numerosos, e incluyen prácticamente todos los tipos de aceites: de pescado, animales, vegetales y minerales; puros y combinados. La temperatura del aceite es de importancia. Si el aceite está extremadamente frío o extremadamente caliente, el templado será más lento; en el primer caso debido a la viscosidad y en el segundo a la menor capacidad de absorber calor. El mejor intervalo de temperaturas para un templado eficiente y uniforme es de alrededor de 38° a 54°C.

Los baños de sal fundida, se utilizan en varios métodos de templado interrumpido. Su propósito es el de enfriar el acero rápidamente a una temperatura predeterminada para luego interrumpir el templado en este punto, y entonces permitir el enfriado a una rapidez prescrita hasta la temperatura ambiente, y así minimizar los esfuerzos de endurecimiento.

Templado en corriente líquida: Algunas veces es deseable templar rápidamente ciertas superficies de una herramienta y quizá retardar el templado sobre otras superficies. Por ejemplo, puede ser que en un anillo de estirado sea necesario templar la superficie interior tan rápidamente como sea posible,

y la parte exterior dejarla suave para tenacidad y soporte. Obviamente, este resultado no se podría obtener templando el anillo completo en un baño en reposo. Los sujetadores de chorro son usualmente utilizados para el templado en agua, el agua potable es tan buena como la salmuera para este propósito, puesto que el movimiento rápido del agua evita la formación de burbujas de gas.

Templado en aire, se usa para ciertos tipos de herramientas de acero de alta aleación. Para un templado en aire tranquilo, la mejor práctica es colocar la herramienta calentada sobre una pantalla, para que el aire pueda circular libremente alrededor de ella. Puede inducir se un enfriamiento acelerado por aire, por medio de un ventilador eléctrico común, pero tal dispositivo debe utilizarse con cuidado para evitar combamientos.

Un arreglo conveniente para templado se ilustra en la fig. 6-10. El tanque grande se llena con agua potable, que sirve para enfriar la salmuera y el aceite. El agua penetra por un tubo vertical, algunas veces llamado "surtidor". Con el agua fluyendo, ciertos tipos de herramientas pueden templarse en la corriente superior del surtidor con poco peligro de burbujas de gas.

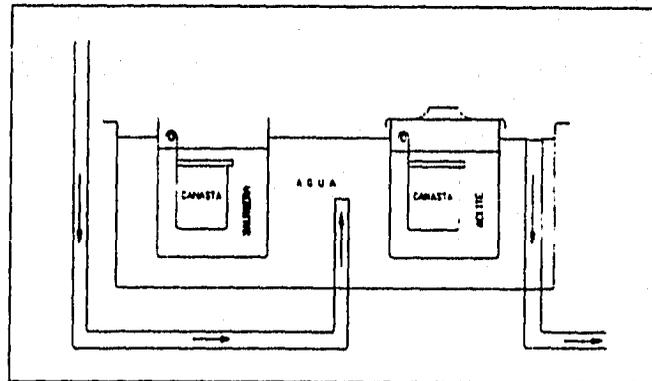


FIG. 6-10 Una distribución conveniente de un baño de templado para un taller de herramientas.

EQUIPO DE REVENIDO:

Como ya se ha señalado, las herramientas se revienen para eliminar esfuerzos causados por el endurecimiento y hacerlas más resistentes. Los requisitos para un buen equipo de revenido son simples:

Incluyen sólo un aparato para mantener una temperatura constante y uniforme, en un intervalo relativamente bajo. En el pasado, los baños de aceite se usaron ampliamente para el revenido de acero para herramientas. Ahora se utilizan sólo en raras ocasiones y han sido sustituidos por hornos eléctricos de revenido, que se prestan para control automático y suprimen la limpieza final de la herramienta, que es necesaria cuando se utiliza el aceite.

En la actualidad se dispone de hornos de revenido modernos, que utilizan ventiladores eléctricos para hacer circular el aire y llevarlo a todas las partes de la carga. Esto constituye una ventaja muy grande sobre todos los tipos antiguos de equipo para revenido. No sólo producen herramientas uniformes que no requieran una limpieza final, sino también son rápidos en operación y muy confiables.

Tenazas: Para concluir este capítulo mencionaremos las tenazas. Hay tenazas eficientes y útiles con que se toma el trabajo y lo sostiene con seguridad, y también las hay burdas o mal adaptadas que cubren grandes áreas de la herramienta que deberían ser templadas, causando manchas suaves, que dejan caer el trabajo en momentos críticos. Este es sólo otro de los pequeños detalles que establecen una gran diferencia.

TABLA 6-1**TEMPERATURAS DE NORMALIZADO Y RECOCIDO PARA ACEROS HERRAMIENTAS.**

	NORMALIZADO	RECOCIDO	RANGO DE EN-
	TEMPERATURA	TEMPERATURA	FRIAMIENTO
TIPO:	DE NORMALIZADO	°C	TEMP. °C/hr

ACEROS PARA HERRAMIENTA DE ALTA VELOCIDAD AL MOLIBDENO:

M1, M10	No normalizar	815 a 870	22
M2	No normalizar	870 a 900	22
M3, M4	No normalizar	870 a 900	22
M6	No normalizar	870	22
M7	No normalizar	815 a 870	22
M30, M33, M34, M36, M41, M42,			
M46, M47	No normalizar	870 a 900	22
M43	No normalizar	870 a 900	22
M44	No normalizar	870 a 900	22

ACEROS PARA HERRAMIENTA DE ALTA VELOCIDAD AL TUNGSTENO:

T1	No normalizar	870 a 900	22
T2	No normalizar	870 a 900	22
T4	No normalizar	870 a 900	22
T5	No normalizar	870 a 900	22
T6	No normalizar	870 a 900	22
T8	No normalizar	870 a 900	22
T15	No normalizar	870 a 900	22

TABLA 6-1		cont.	
TEMPERATURAS DE NORMALIZADO Y RECOCIDO PARA ACEROS HERRAMIENTAS.			
	NORMALIZADO	RECOCIDO	RANGO DE EN-
	TEMPERATURA	TEMPERATURA	FRIAMIENTO
TIPO:	DE NORMALIZADO	°C	TEMP. °C/hr

ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN CALIENTE AL CROMO:

H10, H11,			
H12, H13	No normalizar	845 a 900	22
H14	No normalizar	870 a 900	22
H19	No normalizar	870 a 900	22

ACEROS PARA HERRAMIENTAS PARA TRABAJO EN CALIENTE AL TUNGSTENO:

H21, H22,			
H25	No normalizar	870 a 900	22
H23	No normalizar	870 a 900	22
H24, H26	No normalizar	870 a 900	22

ACEROS PARA HERRAMIENTAS PARA TRABAJO EN CALIENTE AL MOLIBDENO:

H41, H43	No normalizar	815 a 870	22
H42	No normalizar	845 a 900	22

ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN FRIO AL ALTO CARBONO ALTO CROMO:

D2, D3,			
D4	No normalizar	870 a 900	22
D5	No normalizar	870 a 900	22
D7	No normalizar	870 a 900	22

TABLA 6-1		cont.	
TEMPERATURAS DE NORMALIZADO Y RECOCIDO PARA ACEROS HERRAMIENTAS.			
	NORMALIZADO	RECOCIDO	RANGO DE EN-
	TEMPERATURA	TEMPERATURA	FRIAMIENTO
TIPO:	DE NORMALIZADO	°C	TEMP. °C/hr

ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN FRIO ENDURECIDOS AL AIRE CON MEDIANA ALEACION:

A2	No normalizar	845 a 870	22
A3	No normalizar	845 a 870	22
A4	No normalizar	740 a 760	14
A6	No normalizar	730 a 745	14
A7	No normalizar	870 a 900	14
A8	No normalizar	845 a 870	22
A9	No normalizar	845 a 870	14
A10	790	765 a 795	8

ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN FRIO TEMPLADOS EN ACEITE:

O1	870	760 a 790	22
O2	845	745 a 775	22
O6	870	765 a 790	11
O7	900	790 a 815	22

ACEROS PARA HERRAMIENTAS RESISTENTES AL IMPACTO:

S1	No normalizar	790 a 815	22
S2	No normalizar	760 a 790	22
S5	No normalizar	775 a 800	14
S7	No normalizar	815 a 845	14

TABLA 6-1		cont.	
TEMPERATURAS DE NORMALIZADO Y RECOCIDO PARA ACEROS HERRAMIENTAS.			
	NORMALIZADO	RECOCIDO	RANGO DE EN-
	TEMPERATURA	TEMPERATURA	FRIAMIENTO
TIPO:	DE NORMALIZADO	°C	TEMP. °C/hr

ACEROS PARA HERRAMIENTAS PARA MOLDES:

P2	No se requiere	730 a 815	22
P3	No se requiere	730 a 815	22
P4	No normalizar	870 a 900	14
P5	No se requiere	845 a 870	22
P6	No se requiere	845	8
P20	900	760 a 790	22
P21	900	No recocer	-

ACEROS PARA HERRAMIENTAS PARA PROPOSITOS ESPECIALES:

L2	871 a 900	760 a 790	22
L3	900	790 a 815	22
L6	870	760 a 790	22

ACEROS PARA HERRAMIENTAS TEMPLADOS EN AGUA:

W1, W2	790 a 925	740 a 790	22
W5	870 a 925	760 a 790	22

TABLA 6-2

TEMPERATURAS DE TEMPLE DE LOS ACEROS PARA HERRAMIENTAS

ENDURECIMIENTO

TIPO	RANGO DE CALENTA- MIENTO	TEMP. DE PRECALEN- TAMIENTO °C	TEMP. DE ENDURECI- MIENTO. °C	TIEMPO A ESA TEMP. MIN.	MEDIO DE TEMPLE*	TEMP. DE REVENIDO °C
------	--------------------------------	---	--	-------------------------------	------------------------	-------------------------------

ACEROS PARA HERRAMIENTA DE ALTA VELOCIDAD AL MOLIBDENO:

M1, M7,

M10	RAPIDO	730 a 845	1177 a 1219	2 a 5	O,A, ó S	540 a 595
M2	RAPIDO	730 a 845	1190 A 1230	2 a 5	O,A, ó S	540 a 595

ACEROS PARA HERRAMIENTA DE ALTA VELOCIDAD AL MOLIBDENO:

M3, M4,

M30, M33,

M34	RAPIDO	730 a 845	1200 a 1230	2 a 5	O,A, ó S	540 a 595
M6	"	790	1180 a 1200	2 a 5	O,A, ó S	540 a 595
M36	"	730 a 845	1220 a 1250	2 a 5	O,A, ó S	540 a 595
M41	"	730 a 845	1190 a 1220	2 a 5	O,A, ó S	540 a 595
M42	"	730 a 845	1190 a 1210	2 a 5	O,A, ó S	510 a 595
M43	"	730 a 845	1190 a 1220	2 a 5	O,A, ó S	510 a 595

ACEROS PARA HERRAMIENTA DE ALTA VELOCIDAD AL MOLIBDENO:

M44	RAPIDO	730 a 845	1200 a 1230	2 a 5	O,A, ó S	540 a 625
M46	RAPIDO	730 a 845	1190 a 1220	2 a 5	O,A, ó S	525 a 565
M47	RAPIDO	730 a 845	1180 a 1200	2 a 5	O,A, ó S	525 a 595

* Medio de temple: O = Aceite, A = Aire, S = Baños de sales, W = Agua, B = Salmuera

TABLA 6-2

cont.

TEMPERATURAS DE TEMPLE DE LOS ACEROS PARA HERRAMIENTAS

ENDURECIMIENTO

TIPO	RANGO DE CALENTA- MIENTO	TEMP. DE PRECALEN- TAMIENTO °C	TEMP. DE ENDURECI- MIENTO. °C	TIEMPO A ESA TEMP. MIN.	MEDIO DE TEMPLE *	TEMP. DE REVENIDO °C
------	--------------------------------	---	--	-------------------------------	-------------------------	-------------------------------

ACEROS PARA HERRAMIENTA DE ALTA VELOCIDAD AL TUNGSTENO:

T1, T2,

T4, T8	RAPIDO	815 a 870	1260 a 1300	2 a 5	O, A, ó S	540 a 595
T5, T6	RAPIDO	815 a 870	1270 a 1300	2 a 5	O, A, ó S	540 a 595
T15	RAPIDO	815 a 870	1200 a 1260	2 a 5	O, A, ó S	540 a 650

ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN CALIENTE AL CROMO:

H10	MODERADO	815	1010 a 1040	15 a 40	A	540 a 650
H11, H12	MODERADO	815	995 a 1020	15 a 40	A	540 a 650
H13	MODERADO	815	995 a 1040	15 a 40	A	540 a 650
H14	MODERADO	815	1010 a 1070	15 a 40	A	540 a 650
H19	MODERADO	815	1090 a 1200	2 a 5	A ó O	540 a 705

ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN CALIENTE AL TUNGSTENO:

H21, H22	RAPIDO	815	1090 a 1200	2 a 5	A ó O	595 a 675
H23	RAPIDO	845	1204 a 1260	2 a 5	O	650 a 815
H24	RAPIDO	815	1090 a 1230	2 a 5	O	565 a 650
H25	"	815	1150 a 1260	2 a 5	A ó O	565 a 675
H26	"	870	1180 a 1260	2 a 5	O, A ó S	565 a 675

ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN CALIENTE AL MOLIBDENO:

H41, H43	RAPIDO	730 a 845	1090 a 1190	2 a 5	O, A, ó S	565 a 650
H42	RAPIDO	730 a 845	1120 a 1220	2 a 5	O, A, ó S	565 a 650

* Medio de temple: O = Aceite, A = Aire, S = Baños de sales, W = Agua, B = Salmuera

TABLA 6-2

cont.

TEMPERATURAS DE TEMPLE DE LOS ACEROS PARA HERRAMIENTAS

ENDURECIMIENTO

TIPO	RANGO DE CALENTA- MIENTO	TEMP. DE PRECALEN- TAMIENTO °C	TEMP. DE ENDURECI- MIENTO. °C	TIEMPO A ESA TEMP. MIN.	MEDIO DE TEMPLE *	TEMP. DE REVENIDO °C
------	--------------------------------	---	--	-------------------------------	-------------------------	-------------------------------

ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN FRIO ALTO CARBONO ALTO CROMO:

D1, D5	MUY LENTO	815	980 a 1020	15 a 45	A	205 a 540
D3	MUY LENTO	815	925 a 980	15 a 45	O	205 a 540
D4	"	815	970 a 1010	15 a 45	A	205 a 540
D7	"	815	1010 a 1070	30 a 60	A	150 a 540

**ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN FRIO ENDURECIDOS AL AIRE CON
MEDIANA ALEACION:**

A2	LENTO	790	925 a 980	20 a 45	A	175 a 540
A3	LENTO	790	955 a 980	25 a 60	A	175 a 540
A4	"	675	815 a 870	20 a 45	A	175 a 425
A6	"	650	830 a 870	20 a 45	A	150 a 425
A7	MUY LENTO	815	955 a 980	30 a 60	A	150 a 540
A8	LENTO	790	980 a 1010	20 a 45	A	175 a 595
A9	LENTO	790	980 a 1020	20 a 45	A	510 a 620
A10	"	650	790 a 815	30 a 60	A	175 a 425

ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN FRIO TEMPLADOS EN ACEITE:

O1	LENTO	650	790 a 815	10 a 30	O	175 a 260
O2	LENTO	650	760 a 800	5 a 20	O	175 a 260
O6	"	-	790 a 815	10 a 30	O	175 a 315
O7	"	650	845 a 885	10 a 30	O	175 a 290

* Medio de temple: O = Aceite, A = Aire, S = Baños de sales, W = Agua, B = Salmuera

TABLA 6-2						cont.
TEMPERATURAS DE TEMPLE DE LOS ACEROS PARA HERRAMIENTAS						
ENDURECIMIENTO						
TIPO	RANGO DE CALENTA- MIENTO	TEMP. DE PRECALEN- TAMIENTO	TEMP. DE ENDURECI- MIENTO.	TIEMPO A ESA TEMP.	MEDIO DE TEMPLE *	TEMP. DE REVENIDO
		°C	°C	MIN.		°C

ACEROS PARA HERRAMIENTA RESISTENTES AL IMPACTO:

S1	LENTO	-	900 a 955	15 a 45	O	205 a 650
S2	LENTO	650	845 a 900	5 a 20	B ó W	175 a 425
S5	"	760	870 a 925	5 a 20	O	175 a 425
S7	"	650 a 705	925 a 955	15 a 45	A ó O	205 a 620

ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA MOLDES:

P2	-	900 a 925	830 a 845	15	O	175 a 260
P3	-	900 a 925	800 a 830	15	O	175 a 260
P4	-	970 a 995	970 a 995	15	A	175 a 480
P5	-	900 a 925	845 a 870	15	O ó W	175 a 260
P6	-	900 a 925	790 a 815	15	A ó O	175 a 230
P20	-	870 a 900	815 a 870	15	O	480 a 595
P21	LENTO	-	705 a 730	60 a 180	A ó O	510 a 550

ACEROS PARA HERRAMIENTA PARA PROPOSITOS ESPECIALES:

L2	LENTO	-	W: 790 a 845 O: 845 a 925	10 a 30	O ó W	175 a 540
L3	LENTO	-	W: 775 a 815 O: 815 a 870	10 a 30	O ó W	175 a 315
L6	LENTO	-	790 a 845	10 a 30	O	175 a 540

* Medio de temple: O = Aceite, A = Aire, S = Baños de sales, W = Agua, B = Salmuera

TABLA 6-2						cont.
TEMPERATURAS DE TEMPLE DE LOS ACEROS PARA HERRAMIENTAS						
ENDURECIMIENTO						
TIPO	RANGO DE CALENTA- MIENTO	TEMP. DE PRECALEN- TAMIENTO	TEMP. DE ENDURECI- MIENTO.	TIEMPO A ESA TEMP. MIN.	MEDIO DE TEMPLE *	TEMP. DE REVENIDO °C

ACEROS PARA HERRAMIENTA TEMPLADOS EN AGUA:

W1, W2,						
W3,	LENTO	565 a 650	760 a 815	10 a 30	B ó W	175 a 345

* Medio de temple: O = Aceite, A = Aire, S = Baños de sales, W = Agua, B = Salmuera

**VII. MICROESTRUCTURA DE LOS ACEROS PARA HERRAMIENTA TIPO D2
DE FABRICACIÓN NACIONAL.**

VII.1 GENERALIDADES:

Los principales fabricantes nacionales de acero para herramientas tipo D2 y su respectiva denominación son los siguientes:

FABRICANTE	MARCA	CÓDIGO COLOR	ANÁLISIS TÍPICO						
			C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo
FORTUNA	CA1215	ROJO/AZUL	1.65	0.30	0.30	12	0.90	0.5	0.70
SOLAR	NAHOA IIC	ROJO/AMARILLO	1.50	0.50	0.30	12	0.90		0.75
ASSAB *	SVERKER 21	AMARILLO/BLANCO	1.55	0.40	0.30	11.8	0.80		0.80

* U.S. A

Para los fabricantes, el acero para herramientas tipo D2, es un acero de alto contenido de carbono y cromo, aleado con molibdeno y vanadio, caracterizado por: alta resistencia al desgaste, alta resistencia a la compresión, buenas propiedades de temple tanto en el núcleo como en la superficie, excelente estabilidad en el temple y buena resistencia al revenido.

Propiedades:

TEMPERATURA	UNIDAD	20°C	200°C	400°C
DENSIDAD	g/cm ³	7.7	7.65	7.6
MODULO DE ELASTICIDAD	N/mm ²	193,000	188,000	173,000
CALOR ESPECÍFICO	J/Kg°C	460	-	-
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	W/m°C	20	21	22
DILATACIÓN TÉRMICA POR °C A PARTIR DE 20°C	°C	-	12.4x10 ⁻⁶	13.4x10 ⁻⁶

Características Mecánicas:

Resistencia a la compresión. Las cifras deben considerarse como aproximadas:

DUREZA HRC	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN
	RC0.2 MPa
62	2200
60	2150
55	1900
50	1650

La tabla 7.1 muestra los tipos de carburos, red cristalina, y algunas características de varios carburos encontrados en los aceros para herramientas.

Tabla 7.1

Tipo de Carburo	Tipo de Red	Observaciones
M_3C	Ortorrónica	Este es un carburo del tipo cementita Fe_3C , de Fe, Mn, Cr, con un poco de W, Mo, y V.
M_7C_3	Hexagonal	Frecuentemente encontrado en los aceros al Cr, resistencia a disolverse a altas temperaturas, encontrado como producto del revenido en los aceros de alta velocidad.
$M_{23}C_6$	Cúbica centrada en las caras	Presente en los aceros al alto cromo y en los de alta velocidad. El Cr, puede ser reemplazado con Fe, en las áreas de carburos con W, y Mo.
M_6C	Cúbica centrada en las caras	Es un carburo enriquecido con W ó Mo, puede contener cantidades moderadas de Cr, V, Co, presente en los aceros de alta velocidad, con una extrema resistencia a la abrasión.

Tipo de Carburo	Tipo de Red	Observaciones
M_3C	Hexagonal	Es un carburo de W_2C enriquecido de W ó Mo, aparece después del temple. Puede disolver una considerable cantidad de Cr.
MC	Cúbica centrada en las caras	Carburo enriquecido de V, una pequeña cantidad puede disolverse y precipitarse en un endurecimiento secundario.

Ejemplos de secciones isotérmicas y verticales de un sistema Fe-Cr-C se muestran en las figuras 7.1, y 7.2. Las secciones isotérmicas muestran varios carburos los cuales coexisten con la austenita a 870°C. El contenido de cromo incrementa la química del carburo y las redes cristalinas cambian de M_3C a M_7C_3 , a $M_{23}C_6$ para recomodar el incremento de las cantidades de los átomos de cromo.

Los aceros H-13, A-2 y D-2 todos ellos contienen carburos de M_3C , en equilibrio con austenita a 870°C y como el contenido de carbono de los aceros para herramienta se incrementa en los H-13 (0.4% de C) al D-2 (1.5% de C) la cantidad de carburo M_3C , se incrementa.

Las secciones verticales de la figura 7.2 son para aleaciones Fe-Cr-C conteniendo un 5% a un 13% en peso de cromo. Composiciones de las fases coexistentes normalmente se encuentran afuera de la sección vertical, pero las secciones muestran los rangos de temperatura arriba de los cuales varios carburos coexisten con la austenita y ferrita.

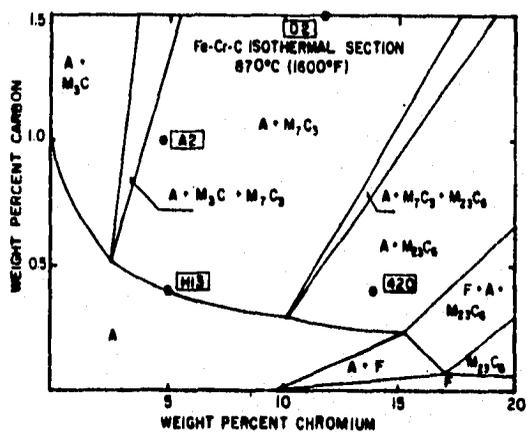


Fig. 7.1 Sección Isotérmica para un sistema Fe-Cr-C a 870°C, las composiciones de aleaciones indicadas están basadas únicamente en los contenidos de carbono y cromo, pero las aleaciones contienen otros elementos los cuales pueden introducir otras fases.

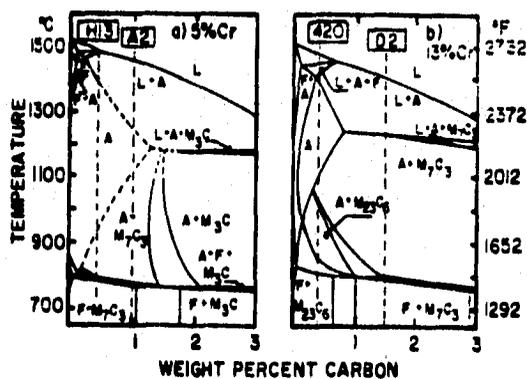


Fig. 7.2 Secciones verticales para (a) 5% y (b) 13% de Cromo. Las líneas punteadas verticales representan aleaciones basadas en el contenido de cromo y carbono. A, F y L son austenita, ferrita y líquido respectivamente.

VII.2 ACEROS PARA HERRAMIENTA TIPO D2 EN ESTADO RECOCIDO.

- **ACEROS FORTUNA:** suministra el acero con una dureza Brinell de 255 max, recomienda hacer el recocido entre 800° - 840°C, mínimo 4 horas, con enfriamiento lento en el horno.

- **ACEROS SOLAR:** suministra el acero con una dureza Brinell de 250 recomienda el recocido entre 800° a 850°C, mínimo 4 horas, enfriamiento lento en el horno.

- **ASSAB UDDEHOLM:** suministra el acero con una dureza Brinell de 210, recomienda proteger el acero y calentarlo en toda su masa a 850°C. Luego enfriarlo en el horno 10°C por hora hasta 650°C y por último libremente al aire.

VII.3 ACEROS PARA HERRAMIENTA TIPO D2 TEMPLADOS Y REVENIDOS.

TRATAMIENTO TÉRMICO: TEMPLE

- **ACEROS FORTUNA:** precalentar la pieza en el horno de 650° a 750°C, elevar la temperatura del horno de 980° a 1010°C. Para piezas complejas enfriar al aire, para herramientas simples se puede utilizar aire comprimido, aceite o un baño de sales. Dureza obtenida aproximada. 64 HRC.

- **ACEROS SOLAR:** recomienda un temple entre 1020° a 1040°C. Para herramientas de forma complicada, al aire; herramientas simples en aire comprimido, aceite o baño de sales, de 400° a 450°C ó de 220° a 250°C.

Tiempo de mantenimiento a temperatura de temple 15-30 minutos después de un calentamiento a fondo. Dureza obtenible 63-65 HRC.

- ASSAB UDDEHOLM: recomienda un precalentamiento de 650° a 750°C, una temperatura de austenitización de 990° a 1050°C, normalmente de 1000° a 1040°C. Tabla 7.2. Proteger la herramienta contra la descarburización y oxidación durante el proceso de temple.

Temperatura °C	Tiempo de mantenimiento minutos	Dureza antes del revenido HRC
990	60	aprox. 63 HRC
1010	45	aprox. 64 HRC
1030	30	aprox. 65 HRC

Tabla 7.2

Agentes de enfriamiento:

- Aceite: (sólo geometrías sencillas)**
- Vacío: (gas a alta velocidad)**
- Aire forzado/gas**
- Temple escalonado martensítico o lecho fluidizado de 180° a 500°C, después enfriar al aire.**

TRATAMIENTO TÉRMICO: REVENIDO

- **ACEROS FORTUNA:** sugiere este tratamiento una vez, que se halla efectuado cualquier temple, estableciendo un tiempo de permanencia mínimo de 2 hr. De esta forma:

a 200°C se obtendrá aprox. 61 HRC

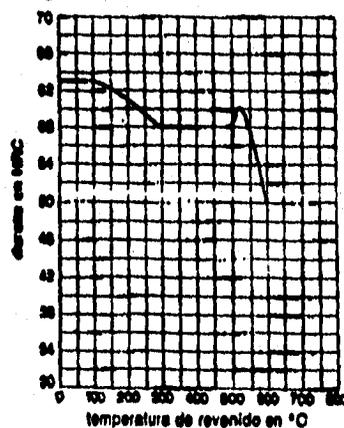
a 300°C se obtendrá aprox. 59 HRC

a 400°C se obtendrá aprox. 58 HRC

según tipo y exigencias de la herramienta.

Figura 7.3

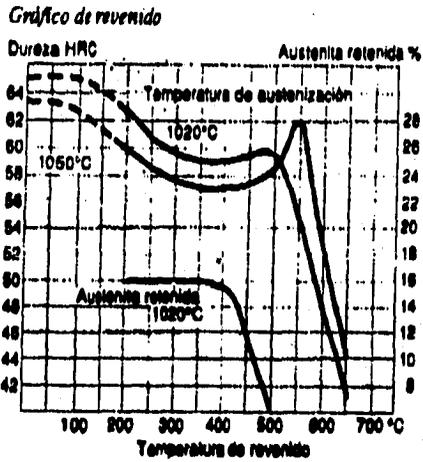
Diagrama de revenido



- **ACEROS SOLAR:** deberá llevarse a cabo inmediatamente después del temple. Tiempo de permanencia en el horno: 1 hora por cada 20 mm de espesor de la pieza, pero 2 horas como mínimo enfriamiento al aire.

En ciertos casos puede resultar conveniente reducir la temperatura de revenido, prolongando el tiempo de mantenimiento. Temperaturas recomendadas para efectuar el revenido de 200° a 290°C.

Figura 7.4



- ASSAB UDDEHOLM: elegir la temperatura de acuerdo con la dureza requerida según la figura 7.5. Revenir dos veces con enfriamiento intermedio a temperatura ambiente. Mínima temperatura de revenido 180°C. Tiempo mínimo de mantenimiento de temperatura 2 horas, dependiendo el espesor de la pieza. De la figura 7.5 la línea punteada es para una temperatura de temple de 1070°C, la línea continua es para una temperatura de temple de 1030°C.

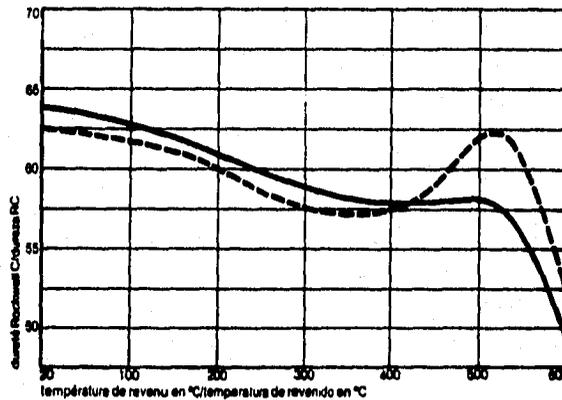


Fig. 7.5 DIAGRAMA DE REVENIDO

Esquema de tratamiento térmico

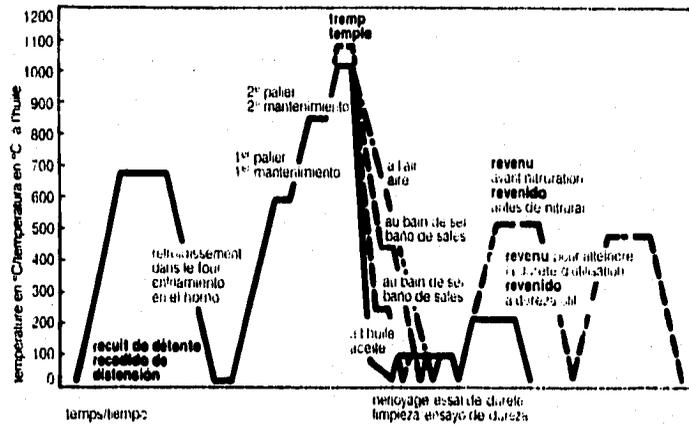


Fig. 7.5 a ESQUEMA DE TRATAMIENTO TERMICO

Température d'austénisation: 1080°C - Temps de maintien: 30 minutes
 Température de austenización: 1080°C - Tiempo de mantenimiento: 30 minutos

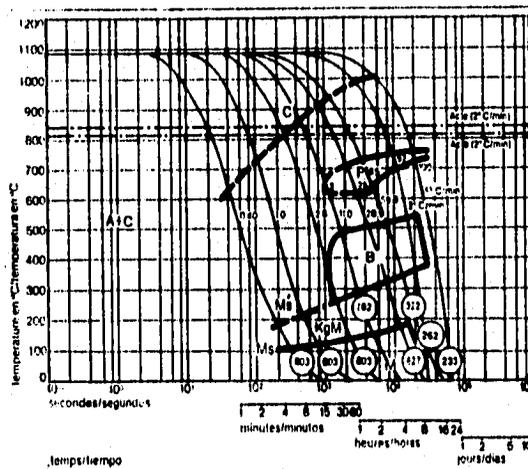


Fig. 7.5 b DIAGRAMA CCT 6 DE ENFRIAMIENTO CONTINUO

Temperatura d'austenització: 1020° C Temps de manten: 30 minuts
 Temperatura de austenitzación: 1020° C Tiempo de mantenimiento 30 minutos

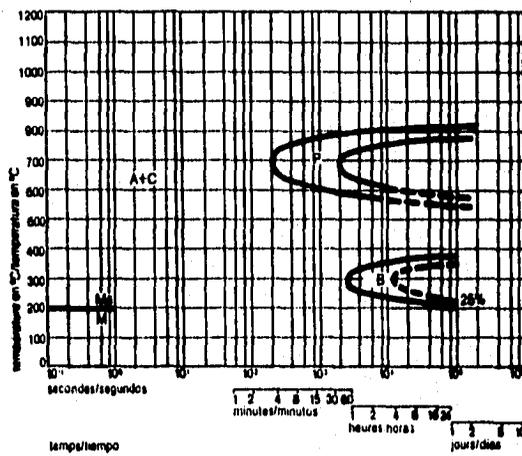


Fig. 7.5.c DIAGRAMA TTT

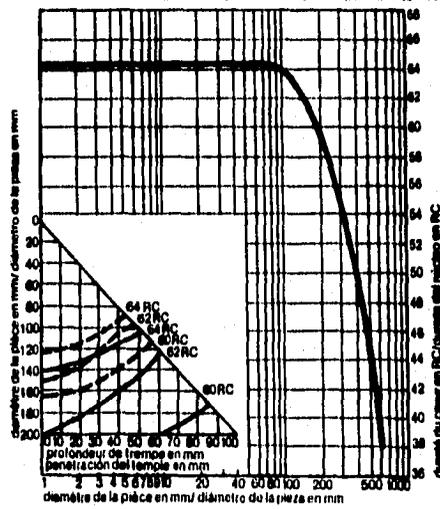


Fig. 7.5.d CURVA DE LA DUREZA DEL NÚCLEO Y DE LA PENETRACIÓN DEL TEMPLE EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO DE LA PIEZA.

VII.4 PRACTICA: TRATAMIENTO TÉRMICO DE UN ACERO TIPO D2

VII.4.1 Comparación de los medios de temple en relación a la dureza máxima obtenida.

Preparación de 6 probetas para temple en:

ACEITE:

- a) Una pulida a espejo y atacada después del temple, para observar la microestructura.
- b) Las dos restantes, pulidas hasta lija de 400 para medir la dureza.

AIRE:

- c) Una pulida a espejo y atacada después del temple, para observar la microestructura
- d) Las dos restantes, pulidas hasta lija de 400 para medir la dureza.

Material:

Acero empleado: Barra redonda de 3/4 de pulg. (19.05 mm)

Fabricante: Aceros Fortuna, Marca: CA1215, Código de Color: Rojo/Azul.

Estado de suministro: Recocido, Dureza inicial= 24.6 HRC.

Equipos e instrumentos utilizados:

Horno: Tipo Muffa, marca Thermolyne, modelo 2000

Guantes de Asbesto

Tenazas y pinzas de sujeción.

Aceite: Automotriz SAE-40 (degradado)

Lijas: Fandeli de carburo de silicio de 100, 200, 400, 600

Máquina para pulir:

Solución para pulir: Alúmina

Reactivos: a) Picral al 5% + Nital al 2%

b) Persulfato de Amonio al 10%

Cámara fotográfica: para rollo de 35 mm, en blanco y negro.

Durómetro: Wilson Rockell, con punta de diamante, 150 Kg de carga, escala empleada: C

Procedimiento:

Se prepararon las probetas y se introdujeron en el horno hasta alcanzar una temperatura de 1020°C (1875°F).

El tiempo de permanencia fue de 15 minutos.

A continuación se muestra la microestructura de una probeta en estado de recocido y en la siguiente página las probetas templadas respectivamente.



Fig 7.4.1 Microestructura de la probeta en estado de recocido

Microestructura de la proleta templada en aceites

7.4.1.a) ACEITE



7.4.1.c) AJRE



b) Dureza obtenida después del temple en incisos:

7.4.1.b) AIRE:

probeta AR1: 52,57,56,55 XT= 55

probeta AR2: 57,53,55,53 XT= 54.5

7.4.1.d) ACEITE:

probeta AC1: 55,55,57,57 XT= 56

probeta AC2: 58,59,58,59 XT= 58.5

VII.4.2 Obtención de las curvas de endurecimiento secundario para los medios de temple utilizados en el punto: VII.4.1.

Preparación de 20 probetas para temple en:

ACEITE:

a) 10 probetas templadas en aceite para revenirlas a temperaturas entre 300° y 1100°F, la preparación es hasta lija de 400 antes y después del temple.

AIRE:

b) 10 probetas templadas en aire para revenirlas a temperaturas entre 300° y 1100°F, la preparación es hasta lija de 400 antes y después del temple.

Mediciones de Dureza

c) Para cada probeta después del temple

d) Para cada probeta después del revenido a la temperatura seleccionada.

Resultados:

El material, equipo, instrumentos, reactivos y procedimiento, fueron los mismos que se emplearon en el punto VII.4.1.

Microestructura de la probeta revenida en incisos

7.4.2.a) ACEITE



7.4.2.b) AIRE



MEDICIONES DE DUREZA:

Incisos:

7.4.2.c) T E M P L E

AIRE:

Probeta:	ARR1	ARR2	ARR3	ARR4	ARR5	ARR6	ARR7	ARR8	ARR9	Prom
Dureza HRC	53.8	58	52	53	54	51.3	53	58	52	53.9

ACEITE:

Probeta:	ACC1	ACC2	ACC3	ACC4	ACC5	ACC6	ACC7	ACC8	ACC9	Prom
Dureza HRC	57.3	53.7	53.7	58.3	57.7	57	58.3	58.7	59	57.1

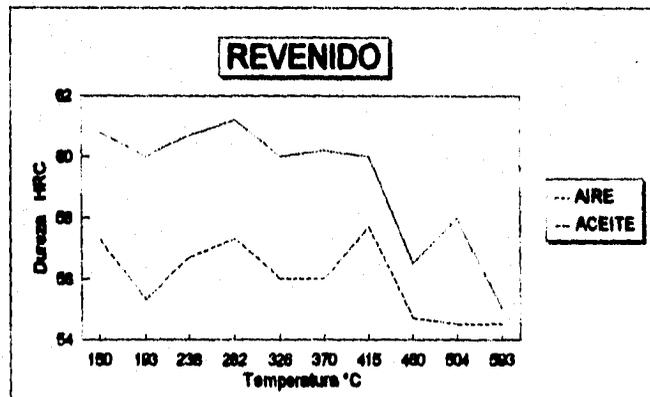
7.4.2.d) R E V E N I D O

AIRE:

Probeta:	ARR1	ARR2	ARR3	ARR4	ARR5	ARR6	ARR7	ARR8	ARR9	ARR10
Temp. °F	300	380	480	540	620	700	780	880	940	1100
Temp. °C	150	193	238	282	326	370	415	460	504	593
Dureza HRC	57.3	55.3	56.7	57.3	58	58	57.7	54.7	54.5	54.5

ACEITE:

Probeta:	ACC1	ACC2	ACC3	ACC4	ACC5	ACC6	ACC7	ACC8	ACC9	ACC10
Temp. °F	300	380	480	540	620	700	780	880	940	1100
Temp. °C	150	193	238	282	326	370	415	460	504	593
Dureza HRC	60.6	60	60.7	61.2	60	60.2	60	58.5	58	55



VII.4.3 Efecto de la temperatura de austenización sobre el endurecimiento después del temple y su efecto sobre el endurecimiento secundario.

a) Preparación de 6 probetas para austenización entre 1700° y 1900°F (926° y 1037°C) para temple en aceite. La preparación es hasta lija de 400.

b) Preparación de 6 probetas para austenización entre 1700° y 1900°F (926° y 1037°C) para temple en aire. La preparación es hasta lija de 400.

Mediciones de Dureza

c) Para cada probeta después del temple

Resultados:

El material, equipo, instrumentos, reactivos y procedimiento, fueron los mismos que se emplearon en el punto VII.4.1.

MEDICIONES DE DUREZA:

incluidos:

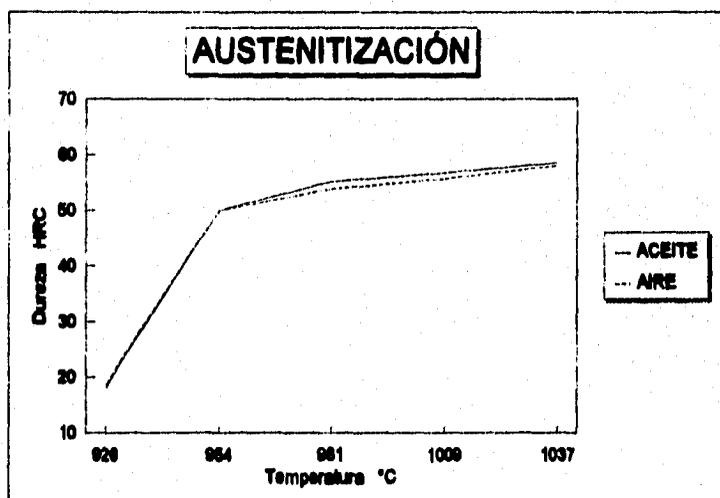
AUSTENITIZACIÓN

7.4.3.c) ACEITE:

Probeta:	ACCC1	ACCC2	ACCC3	ACCC4	ACCC5
Temp. °F	1700	1750	1800	1850	1900
Temp. °C	928	954	981	1008	1037
Dureza HRC	18.17	50	55.17	56.87	58.5

7.4.3.d) AIRE:

Probeta:	ARRR1	ARRR2	ARRR3	ARRR4	ARRR5
Temp. °F	1700	1750	1800	1850	1900
Temp. °C	928	954	981	1008	1037
Dureza HRC	18.87	50	53.83	55.87	58



CONCLUSIONES:

La realización de la práctica se llevó a cabo de acuerdo a los procedimientos recomendados por los fabricantes de aceros, en particular de Aceros Fortuna.

Cabe señalar, que los equipos e instrumentos utilizados para la realización de la práctica no son los normalmente utilizados en la industria. De esta forma tales condiciones se ven reflejadas en los resultados, que aunque menores no son del todo por debajo de los establecidos por los estándares.

El Acero Fortuna empleado, marca CA1215, código de color: Rojo/Azul difiere relativamente en su composición química en comparación a los Aceros Solar y Assab Uddeholm por incluir un 0,5% de W, de aquí que la cantidad y tipos de carburos puedan ser diferentes a los normalmente encontrados.

En la figura 7.4.1, la probeta en estado de recocido, muestra una dispersión de partículas de carburos y una pequeña cantidad de carburos esferoidales disueltos en una matriz de ferrita y perlita. En las figuras 7.4.1.a y 7.4.1.c, las probetas templadas en aceite y aire muestran la austenita retenida. En las figuras 7.4.2.a y 7.4.2.b, las probetas revenidas en aceite y aire muestran en su estructura básicamente partículas de carburos en una matriz de martensita revenida. La martensita aparece oscura debido a la alta temperatura (1100°F, 543°C) a la cual las probetas fueron revenidas.

Las fotografías obtenidas antes y después de los tratamientos térmicos son muy semejantes a las mostradas en el Metals Handbook: Atlas de Microestructuras de Aleaciones Industriales: páginas 112 y 113. Así mismo, las gráficas resultantes de las pruebas, figuras: 7.4.2 y 7.4.3, se aproximan con las mostradas en el Tool Steels: páginas 534 y 535.

Por otro lado, el objetivo fundamental de la realización de este trabajo, fue precisamente comprobar la calidad de los aceros para herramienta tipo D2 de fabricación nacional, y podemos concluir que, aunque la literatura indique valores establecidos, en la práctica común, se presenta cierta dificultad para obtener los mismos, debido a las condiciones de trabajo en las cuales se realizaron los tratamientos térmicos de los aceros y desde luego a la composición química empleada por cada fabricante, que varía de acuerdo al estándar sugerido por la AISI (American Iron and Steel Institute). De aquí la importancia de los elementos de aleación, en las propiedades mecánicas y sobre los tratamientos térmicos de los aceros para herramientas.

Finalmente, consideramos de valiosa ayuda, la información recopilada en este trabajo para todos aquellos interesados en los aceros para herramientas, puesto que en la actualidad sólo se encuentran temas específicos sobre los mismos y la intención misma del trabajo es de proporcionar una guía rápida para la selección, clasificación y una referencia de los tratamientos térmicos de los aceros para herramientas.

BIBLIOGRAFÍA:

**PROCESO DE MANUFACTURA Y MATERIALES PARA INGENIEROS
LAWRENCE E. DOYLE Y OTROS.
EDITORIAL DIANA, MÉXICO. 1988**

**TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS
STUDERMAN HANS
EDITORIAL URMO S.A. DE EDICIONES
1ª EDICIÓN**

**INTRODUCCIÓN A LA METALURGIA FÍSICA
SIDNEY H. AVNER
EDITORIAL Mc GRAW HILL
2ª EDICIÓN, 1979**

**METALURGIA FÍSICA PARA INGENIEROS
G. GUY ALBERT
EDITORIAL FONDO EDUCATIVO INTERAMERICANO, 1970**

**TECNOLOGÍA DEL ACERO
LASHERAS Y ESTEBAN JOSÉ MA.
EDITORIAL CEDEL, ESPAÑA 1978
3ª EDICIÓN.**

**TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS
APRAIZ BARREIRO JOSÉ
EDITORIAL DOSSAT S.A.
8ª EDICIÓN, 1974**

**TÉCNICA Y PRACTICA DEL TRATAMIENTO TÉRMICO
DE LOS METALES FERROSOS.
J. PASCUAL
EDITORIAL BLUME**

PRINCIPIOS DE METALURGIA FÍSICA
REED HILL E. ROBERT
EDITORIAL CONTINENTAL
2ª EDICIÓN, 1979

TOOL STEELS
ROBERTS A. GEORGE / CARY A. ROBERT
AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM)
4ª EDICIÓN, 1980.

ENGINEERING METALLURGY
A. HIGGINS RAYMOND
EDITORIAL Mc MILLAN INDIA LTD.
5ª EDICIÓN, 1983

METAL HANDBOOK, VOLUME 3: PROPERTIES AND SELECTION:
STAINLESS STEELS, TOOL MATERIALS AND SPECIAL PURPOSE METALS.
AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM)
NINTH EDITION

MECHANICAL PROPERTIES OF METALS
MCLEAN, DONALD
EDITORIAL NEW YORK.

THE PRINCIPLES OF PHYSICAL METALLURGY
GILBERT E. DOAN, ALBERT M. MAHLA
EDITORIAL MC GRAW HILL, 1987

HEAT TREATMENT AND PROCESSING PRINCIPLES
KRAUSS GEORGE
EDITORIAL OHIO, ASM INTERNATIONAL

METALS HANDBOOK, VOLUME 7:
ATLAS OF MICROSTRUCTURES OF INDUSTRIAL ALLOYS
AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM)
EIGHTH EDITION

