

CAPÍTULO IV

DEFINICIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS

4.1 El temple y revenido en los aceros para herramientas.

El templado es una operación mediante la cual los aceros elevan su dureza; éste consiste en calentar el material a temperatura de la región de austenización (Véase Anexo 1), para posteriormente enfriar el acero en algún medio que permita el temple (agua, aceite, salmuera, sales o aire), por otro lado el revenido produce una estructura óptima en el material, mediante ciclos de calentamiento del material.[8].

Las temperaturas usadas para tratamientos térmicos de aceros para herramientas están dentro del rango más amplio para cualquier producto metalúrgico, ya que pueden variar desde temperaturas bajo cero las cuales se usan en tratamientos muy especiales, hasta temperaturas de 1315 °C; lo cual indica que el temple aplicado a aceros para herramientas esta lleno de particularidades dependiendo de la composición del material.[2]

4.1.1 Austenización.

Las bases de los tratamientos térmicos para todos los aceros para herramientas radica en el hecho que cuando son calentados, ocurre un cambio estructural. La mezcla de fierro y carbono que existe en el acero a bajas temperaturas se transforma a austenita cuando se supera la temperatura crítica del material durante el calentamiento.[2] La austenización es la operación de calentamiento más crítica ejecutada en los aceros para herramientas. Las excesivas temperaturas de austenización o el tiempo prolongado de calentamiento en ocasiones puede resultar en una distorsión excesiva, crecimiento anormal del grano, pérdida de ductilidad y baja resistencia. Esta premisa se cumple principalmente para aceros

rápidos, los cuales con frecuencia son austenizados a temperaturas cercanas al punto de fusión del material. Sin embargo calentar el material por debajo de su temperatura crítica se traduce en una baja dureza y baja resistencia al uso del material. Al momento de enfriar la pieza, de modo de templearla, si el centro de la herramienta es más frío que el exterior puede ocurrir una fractura en las esquinas, particularmente con los aceros endurecidos en agua.[2] Previo al tratamiento térmico, todas las superficies del material deben estar libres de descarburización.

La austenización es el proceso en el cual se da la partición final del elemento aleado entre la matriz austenítica, (la cual se transformará a martensita) y el carbono retenido. Esta partición compone la química, las fracciones de volumen y la dispersión del carburo retenido. Estos carburos no sólo contribuyen a la resistencia al uso del material, sino que controlan el tamaño del grano austenítico. De esta manera, si la austenización es ejecutada a muy altas temperaturas, es que se puede producir un crecimiento en el grano el cual es indeseable, así como el carbono aleado incrementa su grosor o se disuelva en la austenita.

Los elementos aleados no interrumpidos en el carbono retenido se encuentran en solución en la austenita, y así el carbono provee un mecanismo importante por el cual la composición de la austenita se estabiliza. De modo que la composición de la austenita establece la habilidad del material a endurecer, la temperatura M_s (que es la temperatura a la que la martensita se comienza a formar cuando el material se enfría), el contenido de austenita retenida, y el potencial secundario de endurecimiento del acero para herramientas[2].

4.1.2 Enfriamiento.

El enfriamiento del material cuando éste se encuentra a temperatura de austenización, se puede realizar en agua, salmuera, aceite, sal, gas inerte o aire, todo esto dependiendo de la composición y la sección transversal o grosor de la pieza. Es importante precisar que el medio enfriador, debe enfriar la pieza lo suficientemente rápido de manera que se obtenga una dureza total. Sin embargo es poco común usar un medio enfriador con una capacidad de enfriar que exceda los requerimientos, porque puede producirse una fractura o distorsión en la pieza[2].

Los aceros para herramientas deben ser enfriados durante un lapso de tiempo suficiente para que la descomposición de la austenita comience; el tiempo de enfriado juega un papel importante ya que minimiza la distorsión de la pieza sin afectar la dureza. [2]

4.1.3 Revenido.

Este tratamiento modifica las propiedades de los aceros templados para producir una combinación de resistencia y dureza más deseable. La estructura de los aceros para herramientas templados, es una mezcla heterogénea de austenita retenida, martensita no revenida y carburos. Por lo regular más de un ciclo de revenido es necesario para producir una estructura óptima; normalmente es deseable transformar toda la austenita retenida, para así asegurar una dureza completa, mejorar la resistencia y minimizar la distorsión durante el servicio de la pieza. [2]

Los cambios que ocurren en la micro estructura de aceros endurecidos durante este proceso depende en gran parte del tiempo y la temperatura; el tiempo no debe ser menor a una hora para cualquier ciclo. [2]

Es así que, en el revenido el tiempo debe ser el suficiente para que la temperatura sea distribuida uniformemente, esto es especialmente cierto para temperaturas bajas de revenido y para herramientas que cuentan con secciones grandes. Un revenido adecuado depende en determinar la correcta temperatura así como la carga y el espacio adecuado dentro de la carga, para así obtener un calentamiento uniforme. [2]

4.2 Descripción del temple y revenido para los aceros para herramientas seleccionados.

En este apartado de la investigación, se presentan los distintos procedimientos para el temple de los aceros para herramientas seleccionados, ya que los tratamientos varían con respecto a los elementos aleados que contenga el acero para herramientas. Los aceros a describir son:

- AISI S1
- AISI S2
- AISI A2
- AISI D2
- AISI H13
- AISI T1
- AISI M2
- AISI P4
- AISI L6

4.2.1 Proceso del templado para aceros resistentes al impacto (S1,S2).

Las temperaturas de austenización para este tipo de aceros varía desde los 850 a los 955°C; en este tipo de material no es obligatorio realizar un precalentamiento; sin embargo en ocasiones es deseable para piezas largas de modo que se minimice la distorsión, se acorte

el tiempo de la temperatura de austenización y se acorten tiempos de producción [2], en el caso en el que se realiza el precalentado es recomendable realizarlo a 650°C en ambos aceros. [4]

En lo que refiere de manera particular al acero S2, éste debe permanecer en el horno durante cinco minutos por cada pulgada de grosor, una vez que el horno haya llegado a la temperatura requerida de austenización; el enfriado debe realizarse en salmuera. Las piezas pequeñas (por debajo de 12.7 mm de diámetro) pueden ser calentadas a 871°C y enfriadas en aceite, esto disminuye la distorsión y cambio dimensional pero solo es aplicable en herramientas pequeñas.[4]

Con respecto al acero S1, éste debe ser expuesto a temperatura de austenización durante un lapso de 15 a 45 minutos antes de que éste sea enfriado (templado). [2]

A continuación se presentan la tabla 4.1, la cual nos da los parámetros a seguir en el tratamiento térmico para el acero S1 y S2.

Tabla 4.1 Parámetros recomendables para el temple del acero S1 y S2. [2]

Acero	Temperatura °C		Tiempo de Austenización (min)	Temple al	Dureza al temple
	Precalentamiento	Austenización			HRC
S1	---	900-955	15-45	Aceite	57-59
S2	650 (a)	845-900	5-20	Salmuera, agua	60-62

(a) Preferible para piezas grandes, para minimizar la descarburización.

En la figura 4.2 se presenta el diagrama de transformación isotérmica para el acero AISI S1, para el cual se ocupó una temperatura de austenización de 925°C, la cual está dentro del rango estándar de este acero. Por otro lado en la figura 4.3 se puede apreciar un gráfico en el que describe el cambio en la dureza con respecto a la temperatura de austenización de 4 aceros S1 con distinta composición química.

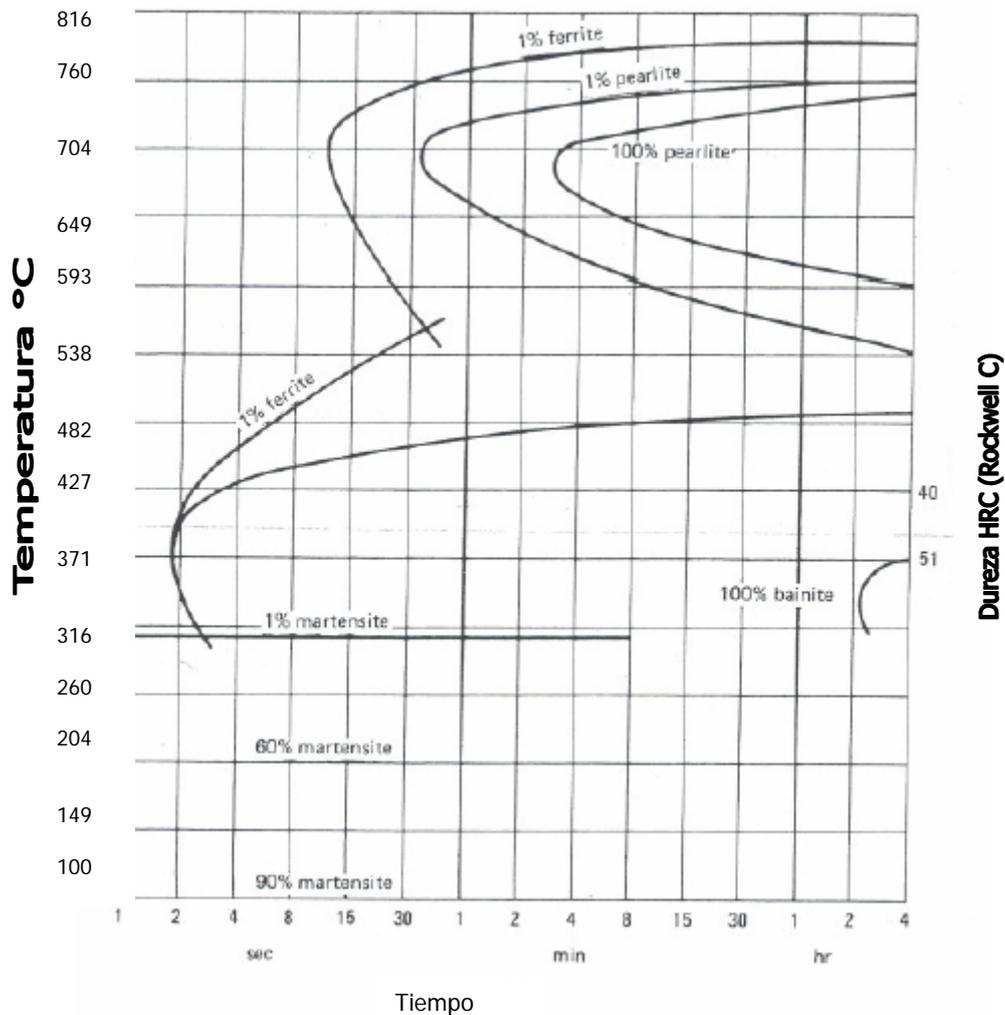


Figura 4.2 Diagrama de transformación isotérmica AISI S1. Austenizado a 925°C. [4]

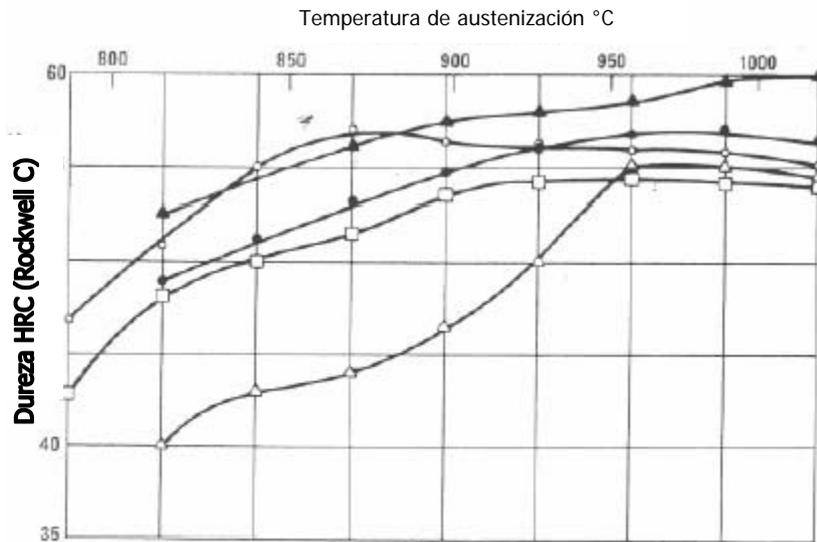


Figura 4.3 Dureza contra temperatura de austenización del AISI S1. ○: 0.45 C, 2.41 W, 1.50 Cr, temple al agua; espécimen 25 mm diámetro por 127 mm ●: 0.55 C, 2.00 W, 1.35 Cr, 0.25 V, temple en aceite.◇: 0.43 C, 2.00 W, 1.30 Cr, 0.25 V; temple en aceite, espécimen 22.2 mm de diámetro por 76 mm. ▲: 0.52 C, 0.85 Si, 2.25 W, 1.30 Cr, 0.25 V; temple en aceite, 22.2 mm de diámetro por 76 mm. □: 0.45 C, 2.41 W, 1.50 Cr; temple en aceite, espécimen 25 mm diámetro por 127 mm. (Fuentes: Allegheny Ludlum, Bethlehem Steel, Latrobe Steel). [4]

En la figura 4.4 se puede observar el diagrama isotérmico para el AISI S2

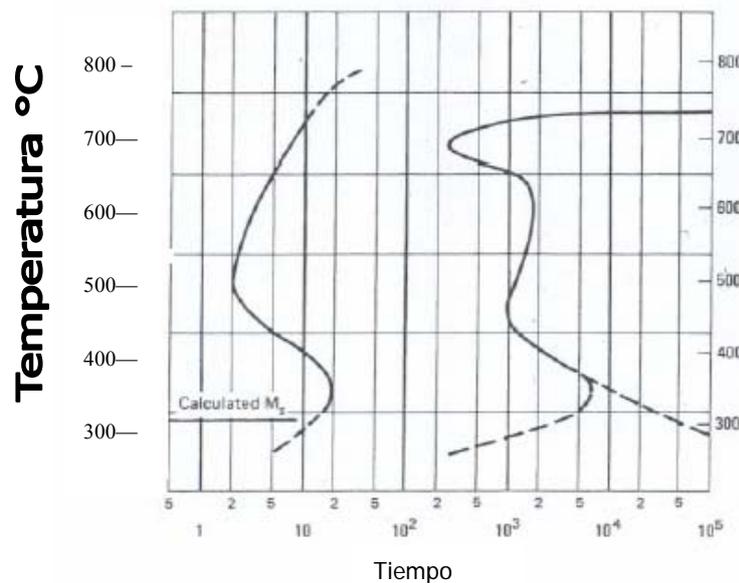


Figura 4.4 Diagrama de transformación isotérmica AISI S2. Austenizado a 845°C. [4]

El revenido para este tipo de aceros basados en silicio, resisten el decremento de dureza que le da este proceso en mayor grado que un acero basado en carbono. Un endurecimiento secundario no es necesario en este tipo de aceros. El efecto de la temperatura de revenido en la dureza de estos aceros se muestra en la figura 4.5. [2]

Las herramientas hechas de este tipo de material deben ser revenidas inmediatamente después del temple, especialmente las que han sido templadas en aceite o salmuera, ya que pueden ser expuestas a una fractura.[2] Para prevenir la fractura, se recomienda el revenido durante 30 minutos, si el material ha sido templado a 900°C, y 15 minutos si se templó a 955°C; el tiempo varía dependiendo de la forma y el tamaño del herramental. El rango de temperaturas de revenido es de 205° a 650°C. [4]

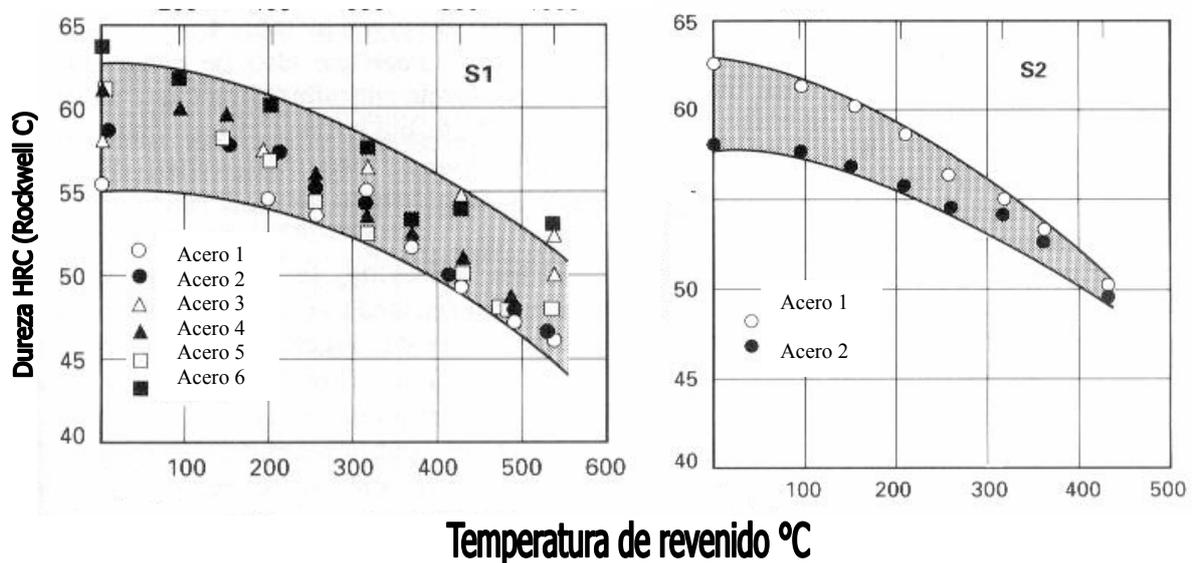


Figura 4.5 Efecto del revenido en la dureza de de los aceros S1 y S2. [2]

4.2.2 Proceso de templado para aceros para herramientas para trabajar en frío. (AISI A2 y AISI D2)

En este apartado de la investigación, se definirá el proceso del tratamiento térmico para dos aceros para herramientas para trabajo en frío; el A2 que se clasifica como un material que se endurece al aire y el D2 que es un acero al alto carbono y al alto cromo.

El acero A2 es un material que es usado para aplicaciones en herramientas donde la dureza es más importante que la resistencia al uso. La solución que los elementos aleados como el cromo, molibdeno, y vanadio hacen en la austenita permiten que este acero pueda llegar a ser altamente duro; en cambio el D2 es un material que brinda una excelente resistencia al uso, esto como resultado de su alto contenido de cromo (12%), así como de carbono (1.5%).[9]

En lo referente al tratamiento térmico, este tipo de aceros usualmente son precalentados antes de que éstos sean austenizados; este proceso ayuda a reducir distorsión en las piezas endurecidas, mediante la reducción de cambios dimensionales no uniformes que se presentan durante la austenización. Las temperaturas de precalentamiento para estos dos materiales llega a oscilar de 790° a 815°C y el tiempo que éstos deben permanecer en el horno es usualmente de 1 hora por cada 25 milímetros de la máxima sección transversal de la pieza. Los aceros de esta categoría pueden ser austenizados en baño de sales o en hornos que usan una atmósfera gaseosa; sin embargo es recomendable usar un horno de alto de vacío ya que al ser estos aceros endurecidos al aire, este equipo permite tasas de enfriamiento lentas. Es importante tener en cuenta que estos materiales deben de permanecer a temperatura de austenización el suficiente tiempo (20 minutos para piezas pequeñas a 45 minutos en herramientas grandes) de modo que se obtenga la solución

requerida de carburo para obtener así la máxima dureza; sin embargo se debe de tener cuidado con la temperatura, ya que un incremento pequeño en ésta ocasionará austenita retenida en la pieza. [2]

El medio a través del cual estos aceros obtienen su máxima dureza es el aire, el cual se le puede proveer a la pieza mediante corrientes de aire, ventiladores o por descargas de aire desde una línea de alta presión.[2] En la tabla 4.2 se presentan los parámetros recomendables a seguir para el tratamiento térmico de estos aceros.

Tabla 4.2 Parámetros recomendables para el temple del acero A2 y D2.[2]

Acero	Temperatura °C		Tiempo de Austenización (min)	Temple al	Dureza al temple
	Precalentamiento	Austenización			HRC
A2	790	925-980	20	Aire	62-65(b)
D2	815	970-1010	15	Aire	64

(b) La dureza puede variar con respecto a la temperatura de austenización.

La figura 4.6 se encuentra el diagrama IT para el acero A2, austenizado a 954°C

En la figura 4.7 se puede observar el diagrama de transformación de fase para el acero AISI D2, en la cual se aprecia que la martensita se comienza a formar alrededor de los 220°C.

En la figura 4.8 se observa la gráfica de dureza contra temperatura de austenización; en la 4.9 es posible ver los estragos que puede ocasionar el elevar la temperatura de austenización en el AISI S2, con respecto al porcentaje de austenita retenida.

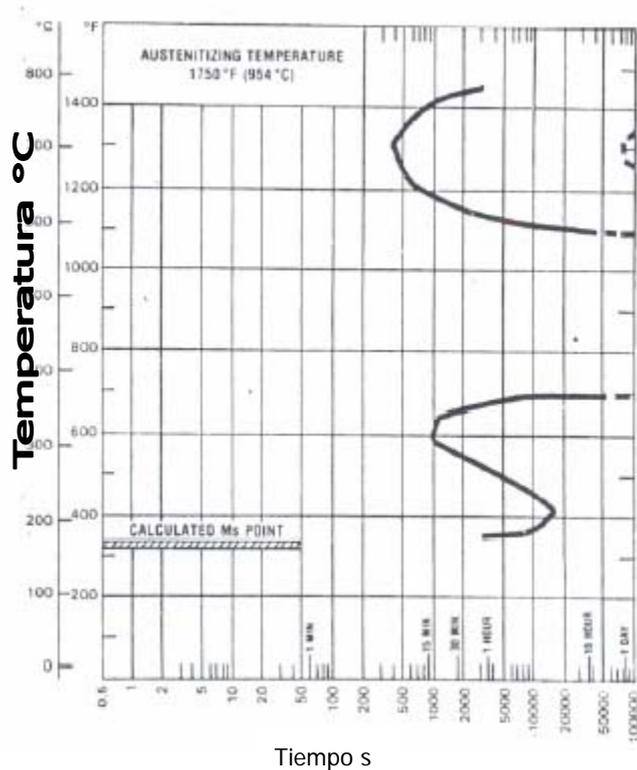


Figura 4.6 Diagrama isotérmico del acero AISI A2 austenizado a 954°C.[6]

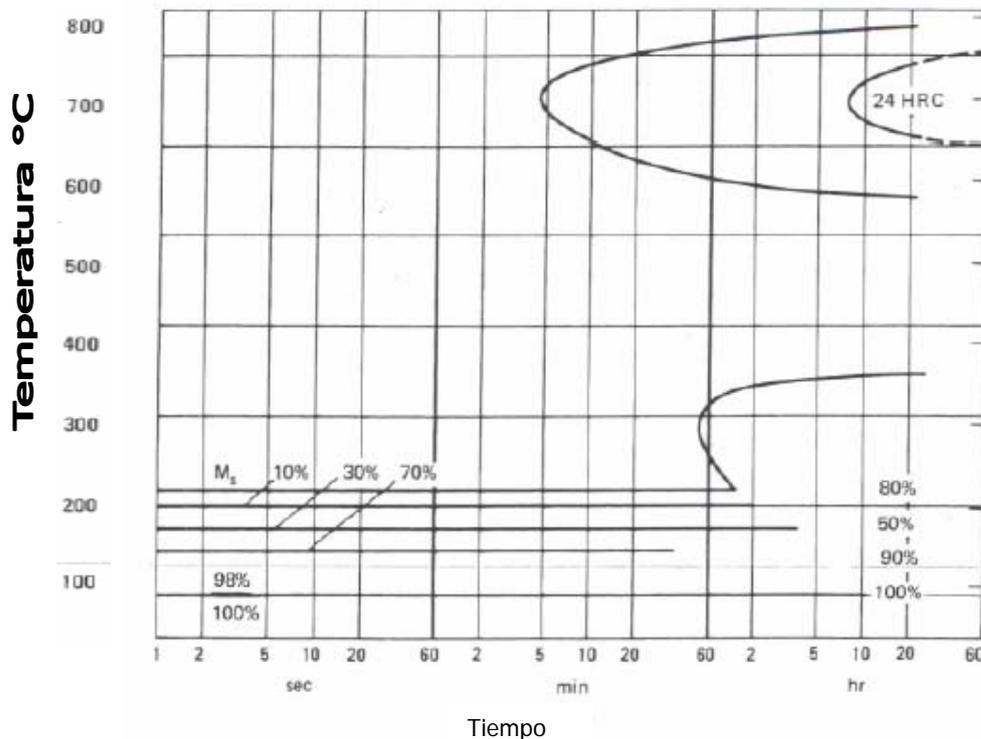


Figura 4.7 Diagrama isotérmico del acero AISI D2 austenizado a 980°C (Fuente:Crucible Steel). [4]

Temperatura de Austenización °C

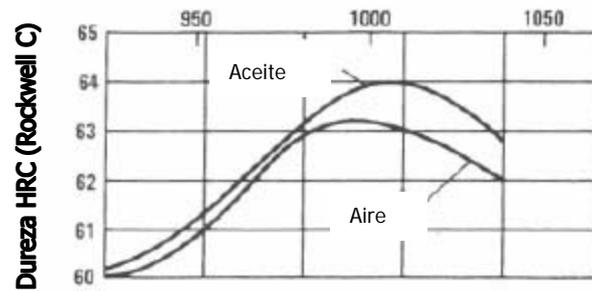


Figura 4.8 Dureza contra temperatura de Austenización en acero D2 que contiene 1.5% C (Fuente: American Society for Metals). [4]

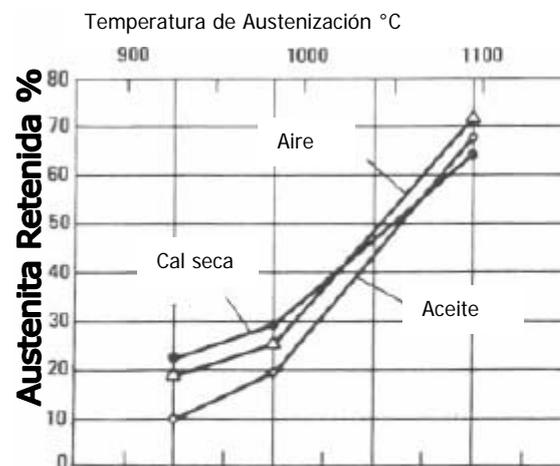


Figura 4.9 D2: Austenita retenida contra temperatura de Austenización 1.60 C, 0.33 Mn, 0.32 Si, 11.95 Cr, 0.25 V, 0.79 Mo, 0.010 S, 0.018 P. (Fuente: American Society for Metals). [4]

El revenido en estos aceros inicia cuando el horno alcanza de 55° a 65 °C, sin embargo estos aceros retienen austenita a este rango de temperatura. Para maximizar la transformación de austenita a martensita, un enfriamiento a temperatura ambiente o bajo cero es aplicado algunas veces, aunque este último incrementa la probabilidad de que la pieza se fracture durante el ciclo de enfriamiento. [2]

De modo que la práctica más usual es la de comenzar el revenido cuando las piezas han alcanzado de 50° a 60 °C para después realizar un doble o triple revenido. El múltiple revenido reduce la cantidad de austenita retenida en estos aceros. La temperatura mínima de requerida para los aceros A2 y D2 es de 205 °C; temperaturas mayores a 550 °C son frecuentemente usadas para aplicaciones especiales.

De modo particular se sugiere que el A2 sea revenido inmediatamente después del temple a un rango de 175° a 540°C, temperaturas de 175° a 230°C son recomendables para obtener una máxima resistencia en la pieza, y entre 370°C a 400°C para una máxima resistencia al impacto. Para el acero D2 el revenido debe darse entre 205° a 540°C, después de que la pieza haya sido enfriada a un rango de 49° a 66°C. [4]

Como es posible ver en las figuras 4.10 y 4.11 los aceros A2 y D2 muestran una mayor dureza después que éstos fueron revenidos alrededor de los 540 °C , que al ser tratados a temperaturas de entre 55° a 110 °C más baja que ésta. Este fenómeno es conocido como endurecimiento secundario y es causado por la transformación de austenita retenida durante el revenido a temperaturas cercanas a los 540 °C. [2]

Cuando un acero puede ser revenido a la misma dureza, a más de una temperatura (como el D2 de 58 a 59 HRC), es común seleccionar la temperatura más alta, la cual que producirá la dureza más deseable.

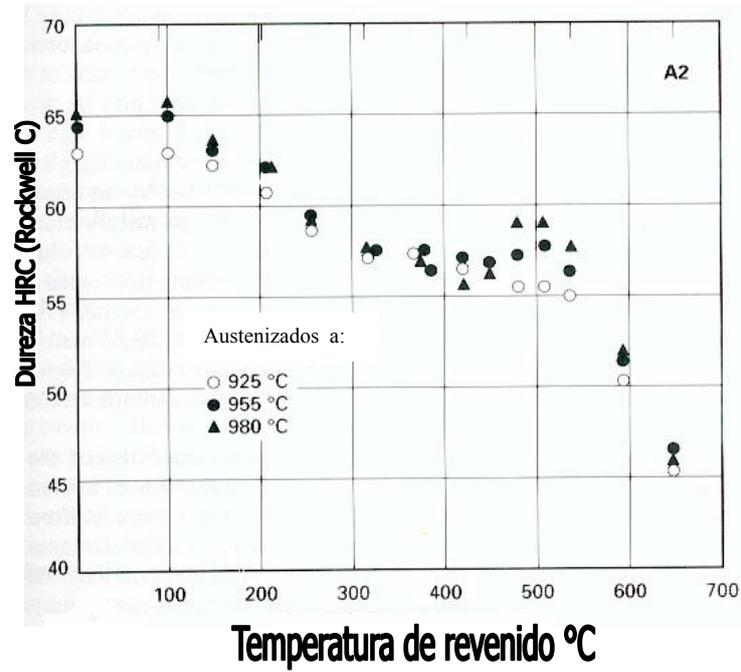


Figura 4.10 Efecto del revenido en el acero A2. [2]

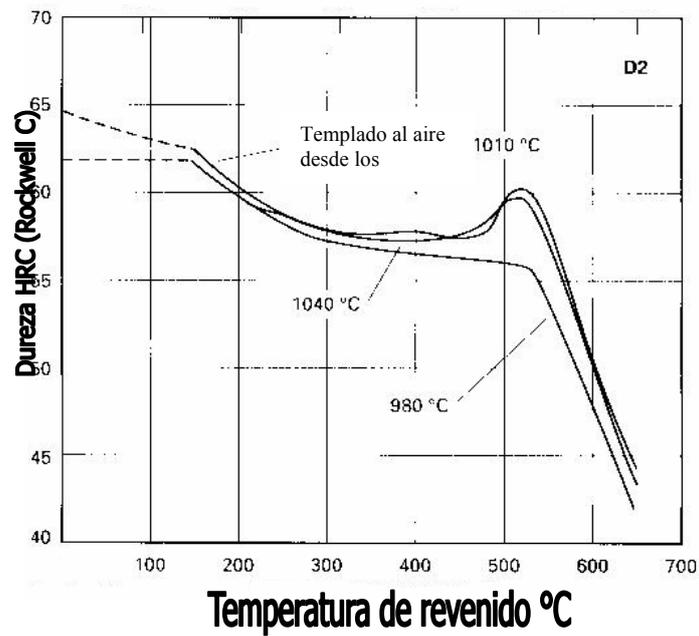


Figura 4.11 Efecto del revenido en tres tipos de aceros D2. [2]

4.2.3 Proceso de templado para aceros que trabajan en caliente (AISI H13).

Este tipo de acero tiene una alta capacidad de ser endurecido en piezas relativamente grandes, gracias a su contenido de cromo (5.1%), así como la cantidad de silicio que contiene (1%) mejora la resistencia a la oxidación cuando se encuentra a temperatura de austenización. [9]

Para el precalentamiento de herramientas hechas de este material, para tratamiento en horno abierto, la pieza debe ser introducida cuando el equipo se encuentra a una temperatura de 260°; las piezas que son puestas en contenedores para su tratamiento deben introducirse en el horno a temperaturas de entre 370° a 540°C. Una vez que las piezas han alcanzado la temperatura del horno, se deben calentar a una velocidad no superior a los 110°C/h hasta alcanzar los 815°C y deben de mantenerse a esta temperatura una hora por cada 25.4 milímetros de ancho que tenga la pieza o el contenedor. Se debe de austenizar la pieza a la temperatura recomendada en la tabla 4.3 durante un tiempo de 15 a 40 minutos, aunque este tiempo disminuye para piezas pequeñas y aumenta en herramientas grandes, sin embargo este H13 es un acero que se rige por muchas condiciones específicas y ciclos de tiempo al ser austenizado.[2]

El equipo y métodos empleados para la austenización de este acero son determinados en función del tamaño de la pieza, por ejemplo herramientas que llegan a pesar menos de 230 kg, pueden ser tratadas en baños de sales, sin embargo piezas de trabajo como troqueles deben ser tratados en hornos al vacío. [2]

Este tipo de acero debe ser protegido contra la carburización y descarburización (mediante el uso de un horno al vacío) cuando han sido elevados a temperatura de

austenización, ya que las superficies carburizadas son susceptibles a presentar marcas y la descarburización disminuye la resistencia, la cual da como resultado fallas por fatiga; aunque el mayor detrimento que puede ocasionar la descarburización es que no se obtiene la dureza requerida en la pieza. [4]

El endurecimiento de este acero es obtenido mediante un enfriamiento en aire; sin embargo piezas como troqueles pueden ser tan grandes que el endurecimiento es insuficiente. En este caso es recomendable aplicar aire mediante líneas presurizadas; aunque el procedimiento se cumple mejor cuando se lleva a la herramienta de la temperatura de austenización a un baño de sales que esté a una temperatura de 595° a 640°C, manteniendo la pieza en éste hasta que se obtenga la temperatura del baño para así retirarla y continuar el enfriamiento en aire.[4]

En la tabla 4.3 se muestran los parámetros recomendables para el acero H13.

Tabla 4.3 Parámetros recomendables para el temple del acero H13.[2]

Acero	Temperatura °C		Tiempo de Austenización (min)	Temple al	Dureza al temple
	Precalentamiento	Austenización			HRC
H13	815	995-1040	15	Aire	49-53

El acero H13 debe ser revenido inmediatamente después que ha sido templado cuando alcanza la temperatura de los 52°C, a un rango que oscila entre los 540° a 650°C; este tipo de aceros son usualmente revenidos en hornos donde la convección es forzada. Los baños de sales son usados exitosamente para partes pequeñas, pero no son recomendables para piezas grandes como troqueles. El tiempo de revenido debe ser de 1 hora por cada 25.4 mm de espesor de la pieza, es necesario realizar un segundo revenido de

1 hora y un tercero es beneficios para la herramienta; la dureza aproximada que arroja el proceso es de 53 a 38 HRC. En la figura 4.13 es posible observar el efecto de la temperatura de revenido en la dureza. [4]

Un revenido múltiple en este tipo de acero, asegura que cualquier porcentaje de austenita retenida sea transformada a martensita antes que la herramienta sea puesta en servicio. Este proceso llevado a cabo de manera múltiple también minimiza la fractura que puede ser ocasionada por los esfuerzos internos producidos por el endurecimiento; este procedimiento ha probado ventajas en dados grandes con filos pronunciados en sus esquinas, ya que éstos no pueden llegar a alcanzar la temperatura ambiente antes del primer revenido.

De manera que, al ser el acero H13 un material que se rige por condiciones muy particulares al momento de ser tratado térmicamente, es que se presentan ejemplos 1 y 2 que se refieren al temple y revenido de herramientas de distintos tamaños hechas de este acero.

Ejemplo 1: Tratamiento térmico para dados hechos de acero H13 que pesan menos de 23 kg. [2]

1. Insertar un perno con barrenado, para facilitar el manejo.
2. Envolver la pieza en papel encerado y colocarla en un contenedor resistente al calor en una cama de carbón de alrededor de 75 a 100 milímetros de altura.
3. Se debe sellar la cubierta del contenedor con pasta de asbesto.
4. Colocar el contenedor en el horno, se debe llevar el horno a 760°C y mantener las piezas durante 4 h .

5. Se debe incrementar la temperatura del horno a una tasa de $30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ hasta alcanzar los 1010°C ; se debe mantener las herramientas por 6 h a esta temperatura.
6. Se debe remover las piezas tratadas del horno.
7. Enfriar en aire hasta los 345°C , para después introducir las piezas nuevamente en el horno operando a 345°C y enfriar dentro del horno a una tasa de $30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ hasta llegar a los 95°C .
8. Se remueven las piezas del horno y se enfrían al aire hasta alcanzar los 40°C .
9. Se colocan las piezas en el horno de revenido, operando a 565°C , las piezas se mantienen ahí por 8 horas, se enfría mediante aire hasta temperatura ambiente y se checa su dureza.
10. Repetir paso 9, ya que tal vez sea necesario incrementar la temperatura de revenido para que la dureza final alcance los 49 HRC.

Ejemplo 2: Tratamiento térmico de un troquel hecho de acero H13 que pesa 1590 kg.

[2]

1. Se coloca la herramienta en el horno cuando la temperatura de éste llega a los 95°C .
2. Se eleva la temperatura del horno a una velocidad de $30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ hasta alcanzar los 370°C .
3. Se introduce una atmósfera de nitrógeno en el horno y se incrementa la velocidad de calentamiento a $55^{\circ}\text{C}/\text{h}$, hasta alcanzar los 790°C . Se mantiene a esta temperatura por una hora y se deja de introducir nitrógeno al horno para posteriormente introducir una atmósfera endotérmica con un punto de condensación de 3° a 4°C durante 5 horas.
4. Se incrementa la temperatura del horno a una velocidad de $55^{\circ}\text{C}/\text{h}$ hasta llegar a los 1040°C y se mantiene así por 6 horas.

5. Se saca la herramienta y se enfría en aire a una temperatura de 65°C.
6. Se coloca el troquel en el horno de revenido operando a 205 °C y se mantiene por 7 horas a esa temperatura.
7. Se incrementa la temperatura del horno a una velocidad de 40 °C/h hasta alcanzar los 565 °C y se mantiene por 16 horas.
8. Se enfría mediante aire hasta temperatura ambiente. La dureza se encuentra entre 46 y 48 HRC.
9. Se aplica el revenido por segunda vez, repitiendo los pasos 6,7 y 8, pero se incrementa la temperatura final a 580°C, para obtener uan dureza final de entre 42 a 43 HRC.
10. Se reviene una tercera vez, repitiendo pasos 6, 7 y 8 sin modificaciones.

En la figura 4.12 se presenta el diagrama de transformación de fase para el acero AISI H13.

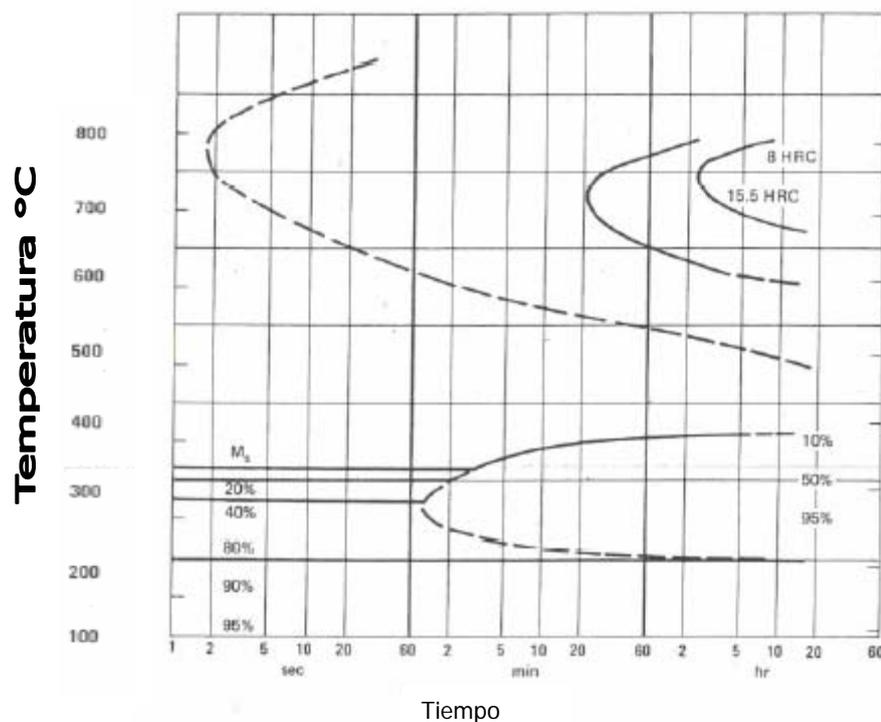


Fig 4.12 Diagrama isotérmico del acero AISI H13, austenizado a 1010°C (Fuente: Crucible Steel). [4]

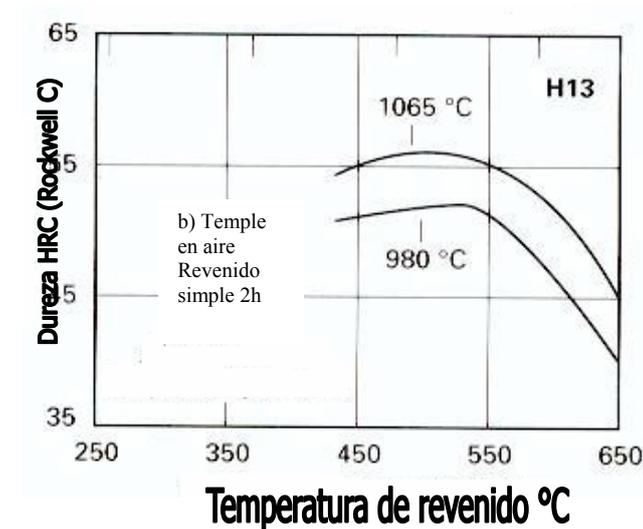
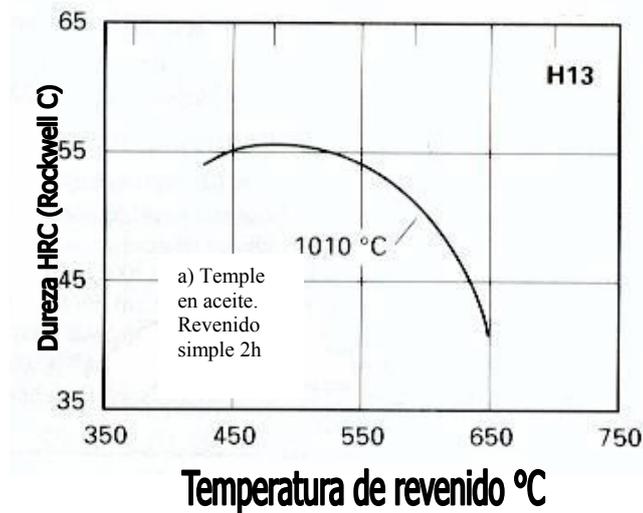


Fig 4.13 a) Efectos del revenido en el H13 templado en aceite.
b) Efectos del revenido en el H13 templado en aire. [2]

4.2.4 Proceso del templado y revenido para aceros rápidos (AISI T1 y AISI M2).

Los aceros rápidos son usados principalmente para aplicaciones en las que hay que cortar metales muy duros; y éstos se pueden clasificar como basados en wolframio (T1) y los basados en molibdeno (M2). Se caracterizan por la resistencia a la abrasión que reciben del vanadio así como la reducción a la oxidación que les brinda el cromo; estos elementos en conjunto con el cobalto, wolframio y molibdeno son factores que contribuyen a determinar el tiempo requerido de austenización. [9] Este tipo de material es muy común encontrarlo

en herramientas de corte para tornos y fresadoras, así como en herramientas para troquelar.

Es así que, en estos aceros la austenita se comienza a formar alrededor de los 760°C, y realizar un precalentado de la pieza a una temperatura ligeramente por encima de ésta, minimiza los esfuerzos que pueden crearse en la herramienta debido a la transformación. Si la prevención de una descarburización parcial es importante, se usa una temperatura de precalentamiento de entre 705° a 790°C; si esto no es un problema, la temperatura satisfactoria de precalentamiento debe estar en un rango de 815° a 900°C. Un doble precalentamiento (en un horno a 540°-650°C y en otro a 845°-870°C) es a menudo recomendado para minimizar el choque térmico y para incrementar la productividad del equipo a ocupar; si se realiza un precalentamiento simple, el acero T1 es preferible calentarlo dentro de un rango de 815° a 870°C y el M2 es recomendable de 730° a 845°C. Es común para los aceros rápidos, que el tiempo de precalentamiento sea el doble al de austenización. [2]

Los aceros rápidos dependen de la solución de varios carburos aleados durante la austenización para que desarrollen sus cualidades de resistencia al calentamiento y su habilidad a cortar. Estos carburos no se disuelven apreciablemente si el acero no es calentado a temperaturas cercanas al punto de fusión.[2]

Las herramientas, en las que su aplicación se basa en el corte, son austenizadas de manera efectiva de 8° a 17°C por encima de su temperatura nominal de austenización. Para prevenir el desgaste rápido de herramientas que cuentan con filos, la temperatura de austenización oscila entre 1040° y 1080°C. Para herramientas de perforado y dados que no requieren una máxima dureza se recomienda austenizarlos a una temperatura de entre 55° a

100°C por debajo de la temperatura nominal.[2] Los parámetros recomendables para el temple de los aceros rápidos T1 y M2 pueden verse en la tabla 4.4.

El temple de estos aceros rápidos puede hacerse en aceite, baño de sales o aire; cuando el tratamiento tiene lugar en un horno convencional, se acostumbra templar en aceite y cuando se realiza en un baño de sales, se templea con sales. Después de ser templados por estos métodos, este tipo de aceros usualmente poseen esfuerzos residuales, para prevenir alguna fractura es necesario revenir el material.[2] Cuando se templea la herramienta en aceite, ésta debe ser enfriada por debajo de los 93°C; al trabajar con piezas pequeñas (por debajo de 25.4 milímetros en su diámetro), éstas pueden ser enfriadas en aire. Otro método aceptable de enfriar este tipo de aceros es en sales derretidas a temperaturas de entre 538° a 593°C, seguido de un enfriado en aire.

Los hornos al vacío que actualmente se producen pueden tratar piezas de 75 milímetros de grosor en adelante, lo cual resulta en un mejoramiento de las propiedades mecánicas de las piezas, en comparación con las tratadas en hornos convencionales. El endurecimiento de materiales al vacío es superior al endurecimiento en sales, en términos de seguridad ambiental y costos energéticos. [2]

Tabla 4.4 Parámetros recomendables para el temple del acero T1 y M2.[2]

Acero	Temperatura °C		Tiempo de Austenización (min)	Temple al	Dureza al temple
	Precalentamiento	Austenización			HRC
T1	815-870	1260-1300	2-5	Aceite, aire, sales	63-65
M2	730-845	1190-1230	2-5	Aceite, aire, sales	65-66

(b) La dureza puede variar con respecto a la temperatura de austenización.

La temperatura de austenización, va ligada con la dureza que puede alcanzar el acero cuando éste es templado, es por esto que se presenta la figura 4.14 la cual corresponde al acero M2 y en la cual se puede apreciar el efecto de la austenización contra la dureza al temple. Por debajo de los 1175°C, este acero no desarrolla toda la dureza que podría, debido a que a esta temperatura no hay la suficiente solución de carburos; en cambio se puede apreciar que a temperaturas por encima de los 1230°C la dureza del temple comienza a disminuir, esto es debido al exceso de solución de carburos y elementos aleados y el exceso de la austenita retenida que se forma en el acero templado. En la figura 4.15 se encuentra el diagrama TTT para el acero rápido T1.

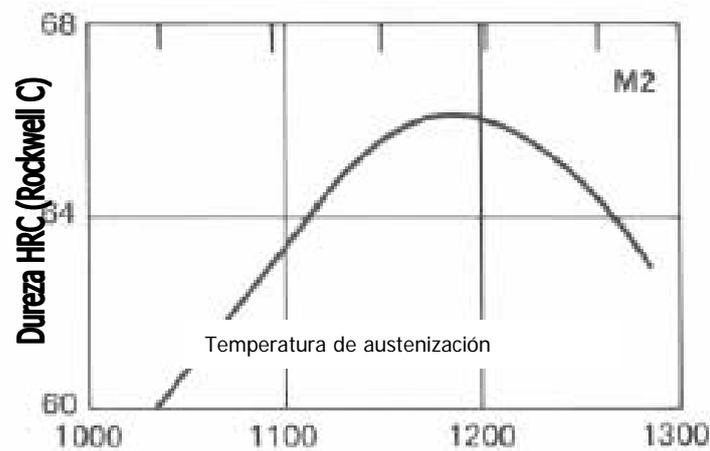


Figura 4.14. Efecto austenización contra dureza del temple del acero M2.[2]

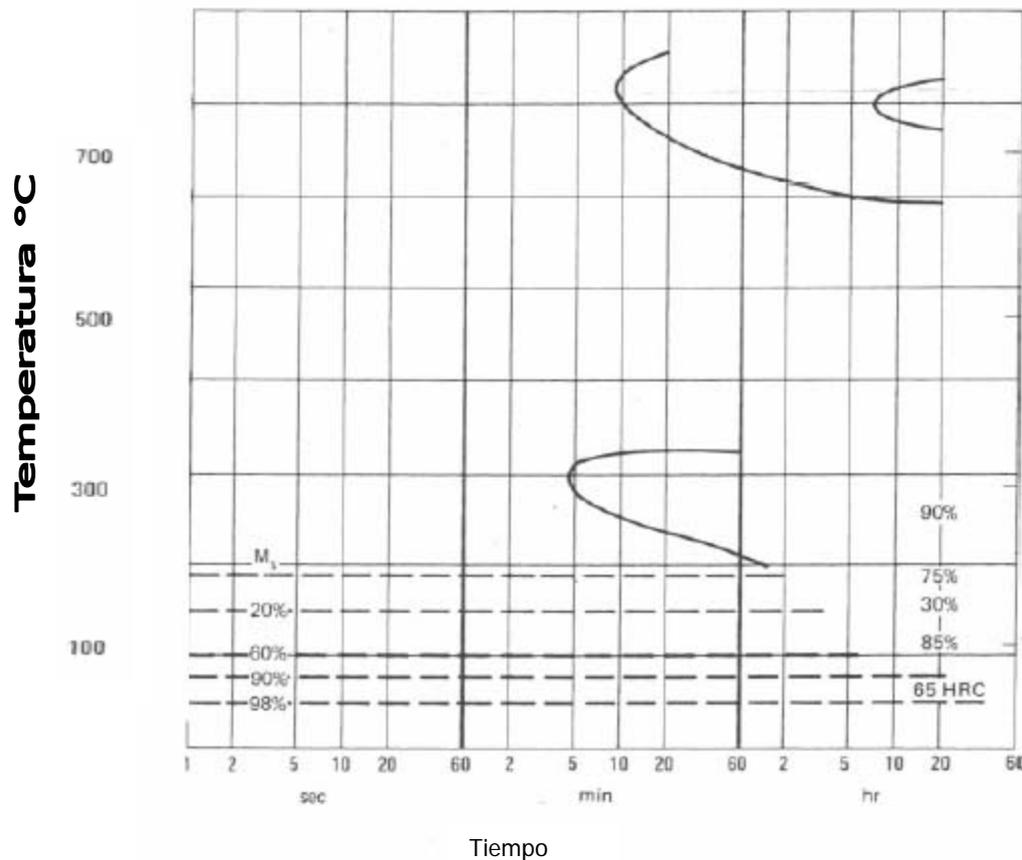


Fig 4.15 Diagrama isotérmico del acero AISI T1, austenizado a 1290°C (fuente: P. Payson and J. L. Klein, *The Hardening of Tool Steels*, Trans. ASM). [4]

La figura 4.16 permite apreciar los porcentajes de martensita, dependiendo de la temperatura a la que se va enfriando la pieza y de la rapidez con la que se hace.

En la figura 4.17 se puede ver que para un acero M2 austenizado a 1220 °C, la dureza de éste es directamente afectada por el tiempo y temperatura del revenido. En las pendientes de las curvas de esta figura, es posible ver que este acero experimenta un endurecimiento secundario a temperaturas por encima de los 370 °C, y éste continúa a temperaturas mayores las cuales rebasan los 595 °C dependiendo o del tiempo en la temperatura. Estas temperaturas se aproximan a los límites prácticos del revenido; temperaturas más bajas no permiten que se de un endurecimiento secundario y temperatura más altas producen una dureza considerablemente baja a lo que usualmente se espera.

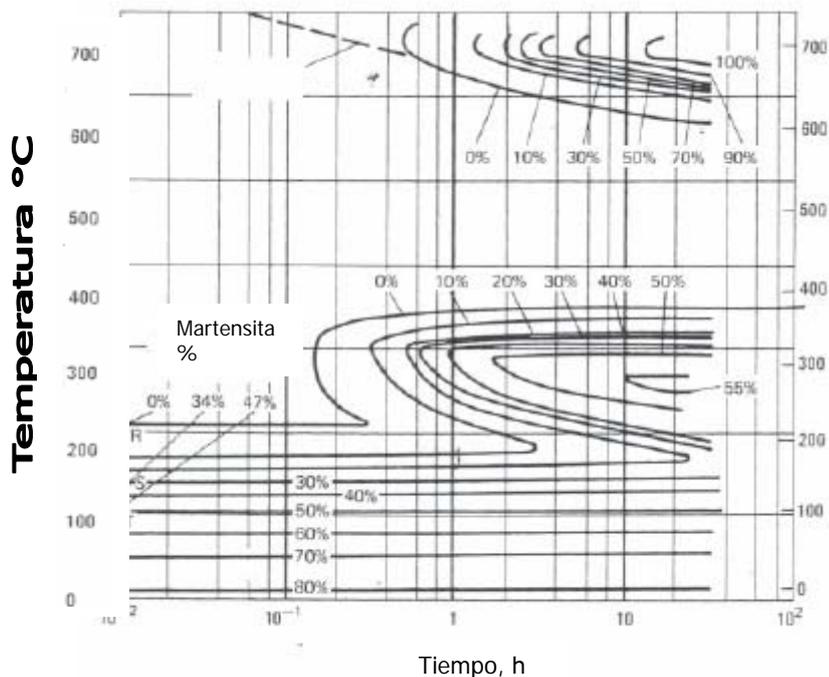


Fig 4.16 Diagrama isotérmico del acero AISI M2(Fuente: "The Kinetics of Austenite Decomposition in High-Speed Steel", by Paul Gordon, Morris Cohen, and Robert S. Rose: Transactions of the American Society for Metals).[4]

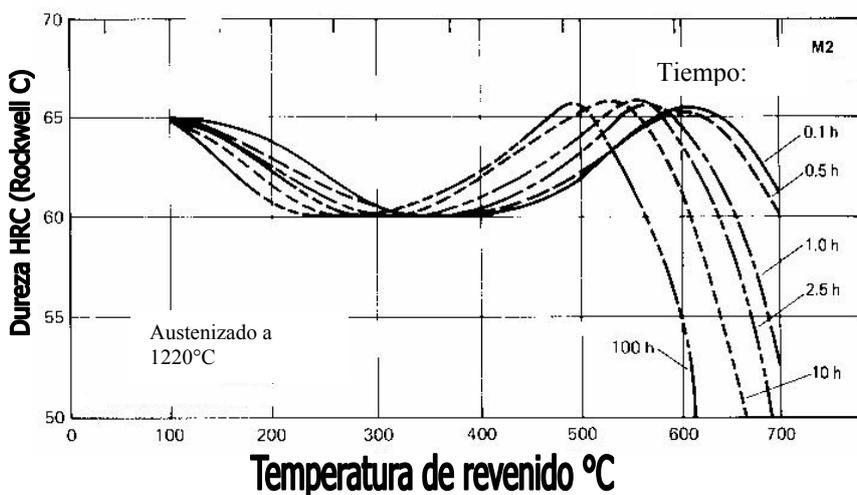


Fig 4.17 Efectos de la dureza al revenir el acero M2 a distintos lapsos de tiempo.[4]

Los rangos de temperaturas de revenido para aceros rápidos oscilan de 425 a 705 °C, para periodos de tiempo de 30 minutos hasta 10 horas. En la figura 4.18 es posible ver los efectos de la temperatura de austenización en las características del revenido para el acero T1. [2]

Los aceros rápidos normalmente son sujetos como mínimo a dos tratamientos de revenido dentro del rango de los 540 a 595 °C, la duración de estas operaciones debe ser de 2 horas o más a la temperatura requerida. Este tipo de proceso asegura estructuras de martensita consistentes, debido a que la cantidad de austenita retenida en las condiciones de temple varía significativamente en la temperatura de endurecimiento y las condiciones de temple. [2]

Es esencial que la combinación de tiempo y temperatura de la primera operación de revenido sea adecuada a la condición de la austenita retenida; por eso es que el primer revenido es ligeramente más largo y a mayor temperatura que el segundo. Además el revenido múltiple es más probable que contribuya a una estructura aceptable si los tiempos de revenido son cortos. [2]

El revenido a temperaturas demasiado bajas y/o por lapsos cortos de tiempo, no es una condición adecuada para 20 o 30 % de austenita retenida presente después del temple, y el acero posiblemente retenga cantidades grandes de austenita después del enfriamiento del revenido inicial. Esta austenita no se transforma hasta que el acero es enfriado en el segundo revenido, y una tercera operación es requerida para revenir la martensita formada. Los efectos benéficos del revenido múltiple en las propiedades del acero T1 se muestran en la tabla 4.5.[2].

Tabla 4.5 Beneficios del revenido múltiple en el T1.[2]

Tiempo a temperatura de revenido	Dureza HRC
<i>Revenido simple a 565 °C.</i>	

6 min	65.1
1 h	65.7
2 ½ h	65
5 h	64.5
<i>Revenido doble a 565°C</i>	
2 ½ h + 2 ½ h	64.5

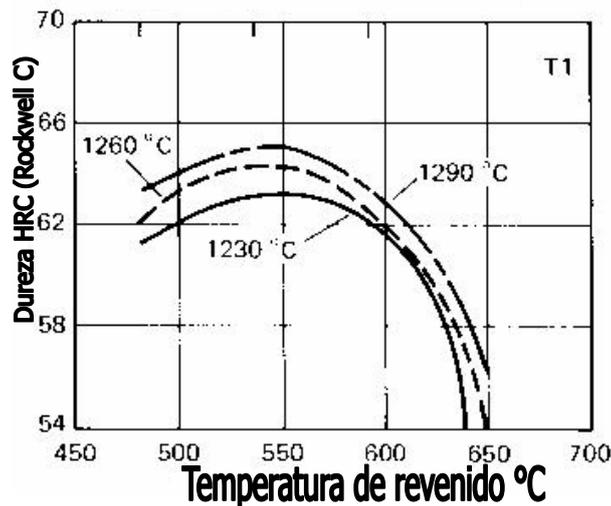


Fig 4.18 Efectos de la austenización y temperatura de revenido en la dureza del T1.[2]

4.2.5 Descripción del temple y revenido para acero que trabaja en caliente (AISI L6)

En aceros que corresponden a esta familia (L), es poco usual realizar un precalentamiento del material, las temperaturas de austenización se pueden ver en la tabla 4.6. Para el endurecimiento de este acero, un baño de sales, un horno de atmósfera controlada o un horno al vacío dan un resultado satisfactorio en el tratamiento térmico, esto es debido a que este acero no tiende a la descarburización.[1] Es recomendable utilizar un horno al vacío para prevenir la carburización o descarburización de la pieza.[5]

Para la austenización de este material, es necesario colocar la herramienta a tratar en el horno y permitir que se caliente de manera “natural” hasta que de manera uniforme alcance la temperatura de austenización en el horno. Es necesario que la pieza permanezca

en el horno a la temperatura requerida de austenización 5 minutos por cada 25.4 milímetros de sección transversal de ésta, para después templearla en aceite. [6]

Al momento de introducir la herramienta en el aceite, es necesario que éste se encuentre a temperatura ambiente y este baño de aceite no debe superar los 50°C, el material puede permanecer en este baño hasta que otro tratamiento sea requerido por la pieza como puede ser el revenido. El control para la descarburización puede obtenerse usando un horno diseñado para este propósito; y si es usada una atmósfera endotérmica el punto de condensación entre 10° y 15.6 °C es sugerido.

En la tabla 4.6 se presentan los valores recomendados de templeado para el acero L6.

Tabla 4.6 Parámetros recomendables para el temple del acero L6.[2]

Acero	Temperatura °C		Tiempo de Austenización (min)	Temple al	Dureza al
	Precalentamiento	Austenización			temple
					HRC
L6	---	790-845	10-30	Aceite	62

En la figura 4.19 esta el diagrama de isotérmico para el acero AISI L6.

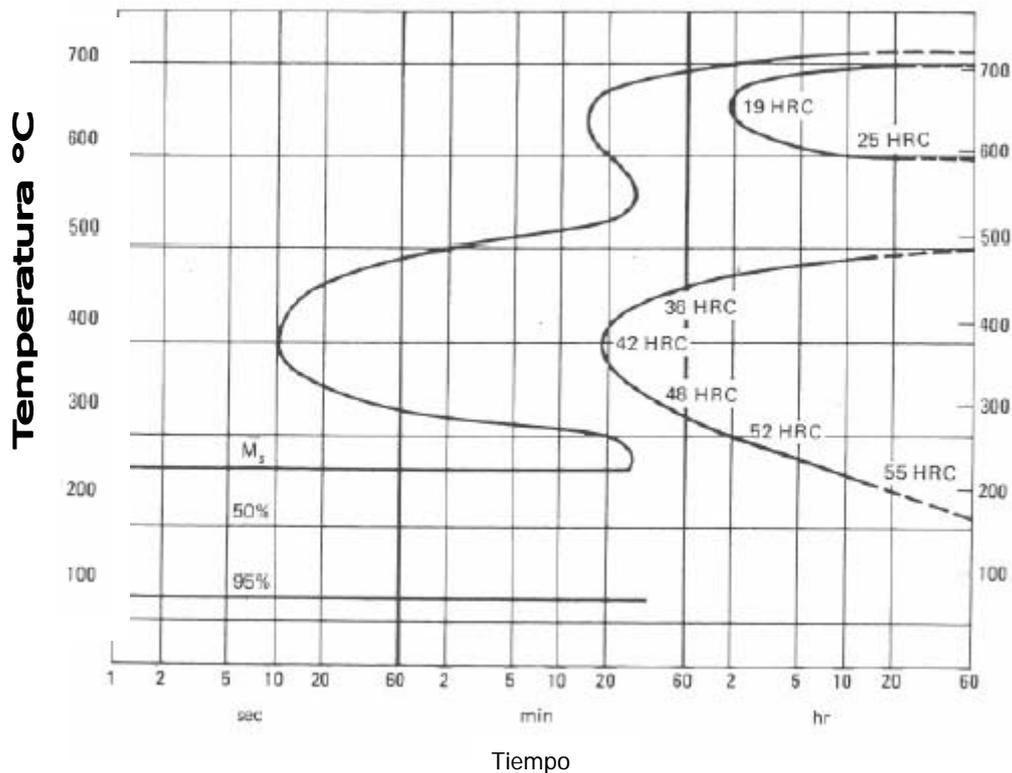


Fig 4.19 Diagrama isotérmico del acero AISI L6, austenizado a 845°C(Fuente:Crucible Steels).[5]

En la figura 4.20 es posible ver como la dureza en el AISI L6 mejora cuando éste es templado en aceite y desde la temperatura recomendada de austenización.

Este tipo de aceros deben ser templados a temperaturas, en las cuales los materiales puedan ser manejados por las manos del operador, cerca de 50 °C y deben ser revenidos inmediatamente después del temple; de otra manera la fractura de la herramienta ocurre. Las características de revenido del acero L6 se encuentran en la figura 4.21. Es recomendable que las herramientas hechas de este tipo de acero sean revenidas a una temperatura mínima de 120 °C aunque la máxima dureza sea requerida. El doble revenido es recomendable en este acero.

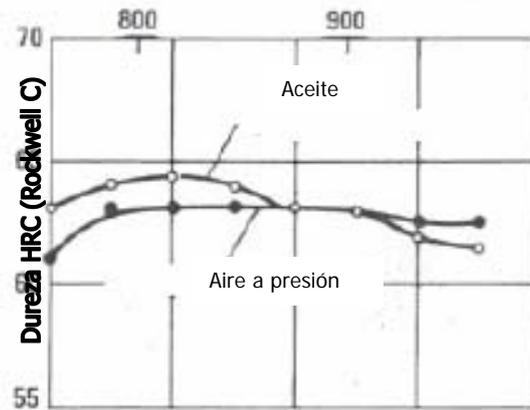


Fig 4.20 Efecto de la temperatura de austenización y el medio templador en la dureza de un espécimen hecho de L6 de 25 mm de diámetro por 127 mm. Composición 0.75 C, 0.75 Mn, 0.90 Cr, 1.75 Ni, 0.35 Mo. (Fuente: Bethlehem Steel). [4]

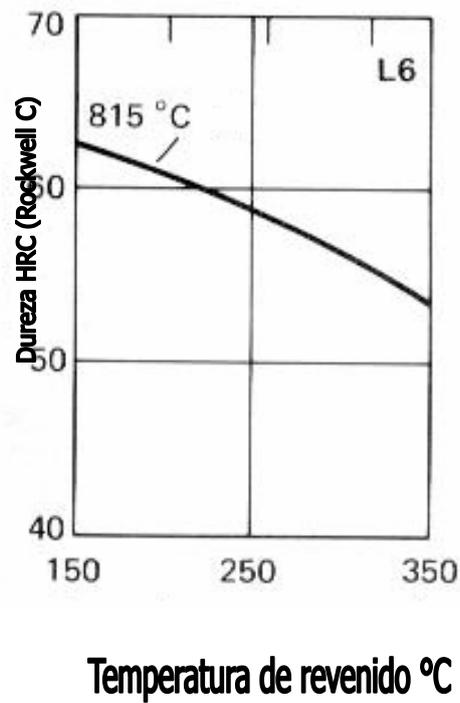


Fig 4.21 Dureza del acero L6 después del revenido. [2]

4.2.6 Descripción del templado y revenido para el acero para moldeo de plásticos (AISI P4).

Este material, debido a su resistencia a la deformación en frío, es a menudo usado en dados o en moldes maquinados. El P4, es el acero más resistente al uso y a la pérdida de dureza debido al revenido, dentro de su grupo. Una práctica común al momento de endurecer este material es el de carburizarlo (970° a 995°C) en hojuelas de hierro colado, de modo que se obtenga un ligero incremento en el contenido de carbono en la superficie.[2]

Este acero es recomendable que se mantenga en el horno por 15 minutos una vez que la temperatura de austenización sea uniforme en toda la pieza, cuando esto haya ocurrido se debe enfriar la pieza en aire lo más rápido posible. Sin embargo en ocasiones es templado en aceite.[4]

Es así que, para el uso del P4 en moldes para plástico, el rango más común de dureza oscila entre 56 a 60 HRC . En la tabla 4.7 se encuentran los valores recomendados de tratamiento térmico para el P4.

Tabla 4.7 Parámetros recomendables para el temple del acero P4.[2]

	Temperatura °C		Tiempo de Austenización (min)	Temple al	Dureza al temple
	Pre calentamiento	Austenización			HRC
P4	---	970-995	15	Aire	62-65

La temperatura a la cual se comienza a formar la martensita en este acero es relativamente alta en comparación con los otros aceros que se presentan en esta investigación como se puede apreciar en la figura 4.22

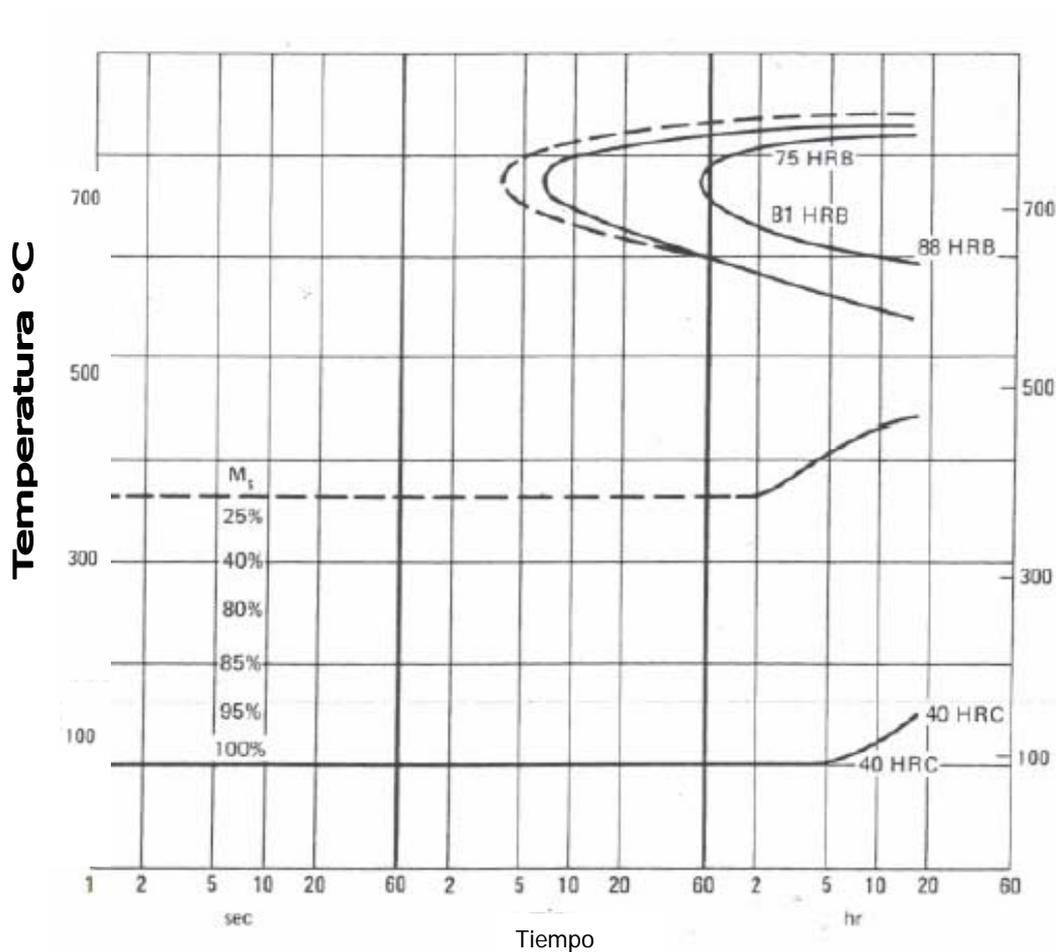


Fig 4.22 Diagrama isotérmico del acero AISI P4, austenizado a 900°C con una dureza de máxima de 41 HRC (Fuente: F. Bowne, Jr, *The Use of Direct Transformation Data in Determining Preheat and Postheat Requirements for Arc Welding Deep Hardening Steels and Weld Deposits.*).[4]

Este acero se reviene entre 175° a 480°C; la dureza de superficie que se obtiene oscila entre 64 a 58 HRC.[5] En la figura 4.23 se presenta el comportamiento del material cuando es revenido.

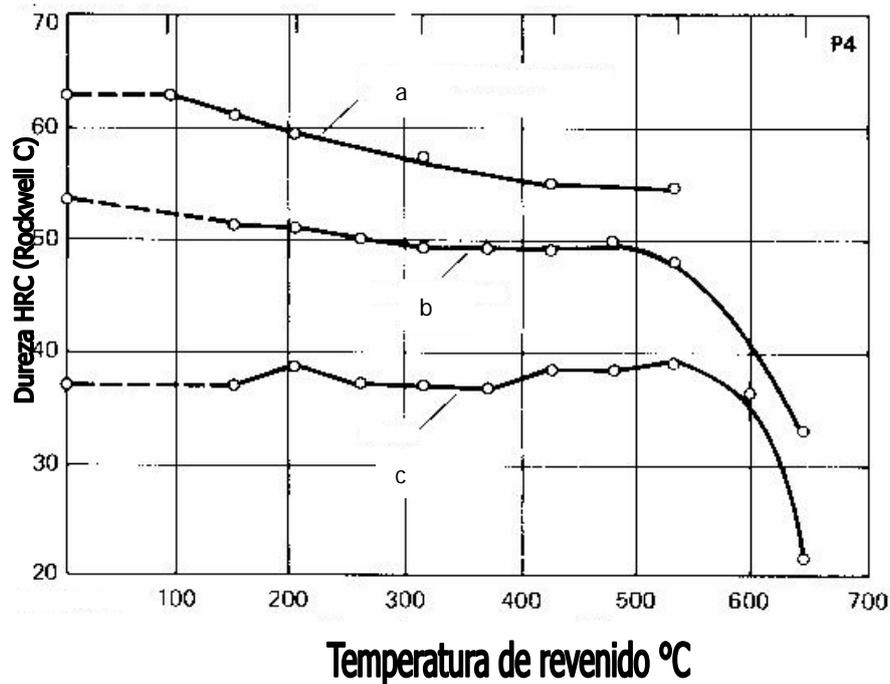


Fig 4.23 Características de revenido en el P4.a) La curva que se encuentra arriba, se refiere a el acero carburizado en carbón (915° a 925°C) b) En la curva de en medio el acero se carburizó en hojuelas de acero colado (940° a 955°C) c) Acero endurecido en un compuesto carburizante por 2h, templado en aceite.[2]

4.3 Control de la distorsión en aceros para herramientas.

En los aceros para herramientas, los cambios dimensionales que puede sufrir una pieza a causa de un tratamiento térmico, son particularmente importantes en la manufactura, diseño apropiado y en el uso de la propia herramienta. De manera que en esta parte de la investigación, se abordarán los casos en los que alguna pieza sufre cambios irreversibles, así como reversibles en lo que refiere a dimensiones y formas.[2]

4.3.1 Naturaleza y causas de la distorsión.

La distorsión es un término general que rodea a todos los cambios dimensionales. Hay dos tipos principales: la distorsión por tamaño, la cual involucra la expansión o contracción en volumen o dimensiones lineales, sin cambios en la forma geométrica, que es producido por un cambio en la estructura del material durante el tratamiento térmico; y la distorsión de

forma, la cual implica cambios en la curvatura o en relaciones angulares, así como torcimiento, flexión y cambios no simétricos en dimensiones. [2]

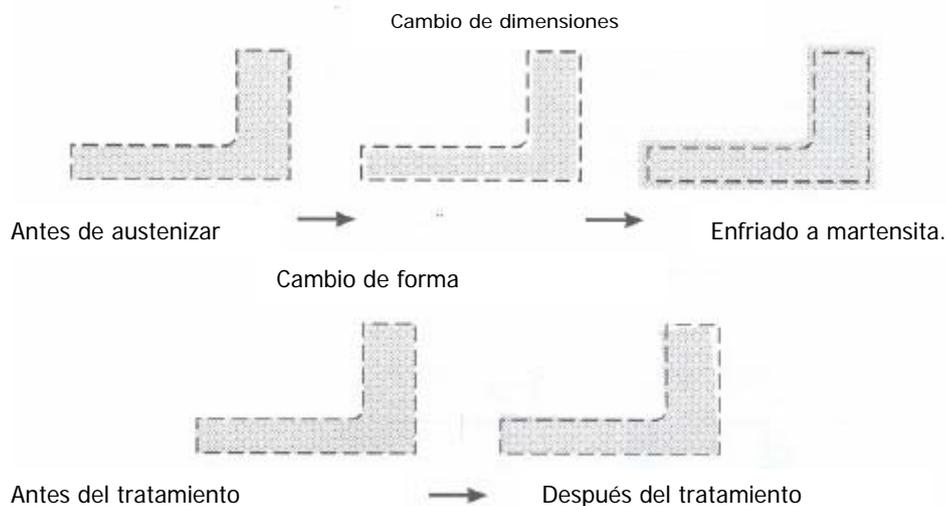


Figura 4.24 Distorsión de forma y tamaño.[2]

4.3.2 Efecto de la austenización.

La austenización comúnmente hace que los aceros de bajo contenido de carbón se contraigan en lo que refiere a su volumen (ver figura 4.24). El incremento de la contracción en el volumen disminuye, cuando las cantidades de carbono que se presentan en el contenido del acero aumentan; este volumen se puede aproximar mediante la siguiente ecuación [2]:

$$V_{SA} = -4.64 + 2.21 \times \%C \quad (\text{Eq 1})$$

donde V_{SA} es el cambio en el porcentaje de volumen que ocurre cuando la ferrita y los carburos esferoidales se transforman a austenita. Al usar esta ecuación, es posible estimar por ejemplo el cambio en el volumen de un acero para herramientas con un contenido de carbón de 0.50%, el cual presentaría un cambio en su volumen de -3.53%, es decir que contraería su volumen en esta cifra; es importante mencionar que estos cambios de

volumen se presentarían siempre y cuando el material haya sido calentado a una temperatura suficiente en la que se disuelva todo el carbono en la austenita.[2]

4.3.3 Efecto del temple.

Cuando un acero ha sido austenizado, éste debe ser enfriado lo suficientemente rápido de modo que la austenita se transforme a martensita. Es así que el acero se expande durante esta transformación (fig 4.24), por lo que la expansión está en proporción inversa de la cantidad de carbono que esta disuelto en la austenita:

$$V_{AM} = 4.64 - 0.53 \times \%C \quad (\text{Eq 2})$$

donde V_{AM} es el porcentaje en el cambio del volumen que ocurre cuando la austenita se transforma en martensita. De la misma manera en la que se calculó el cambio de volumen con la ecuación (1) para un acero para herramientas con un contenido de 0.50% de carbón, para el caso de la ecuación (2) al aplicarla, éste acero se expandiría en un 4.37%; es así que podemos calcular el cambio neto en el volumen de una herramienta mediante:

$$V_N = V_{AM} + V_{SA} \quad (\text{Eq 3})$$

donde V_N es el cambio neto en el volumen de la pieza, que para el acero de nuestro ejemplo se traduciría en un cambio de 0.84% en el volumen.[2]

4.3.4 Efecto del revenido.

El revenido produce varios cambios en la estructura metalúrgica dependiendo de la temperatura y tiempo a la temperatura.

Después de tiempos prolongados a temperatura ambiente o cortos tiempos a temperaturas por encima de los 200 °C, la martensita de alto carbono en los aceros para herramientas de baja aleación se vuelve martensita de bajo carbono (cerca del 0.25% de carbono), esto se puede apreciar en la figura 2. A temperaturas de revenido mayores, 200 a 400 °C, la martensita se vuelve ferrita + cementita. [2]

4.3.5 Efecto de la austenita retenida.

La transformación de la máxima cantidad de austenita a martensita cuando el material se enfría para el temple requiere de un enfriado continuo hasta llegar a la temperatura final de transformación de la martensita (M_f), la cual para un acero para herramientas eutéctico, es alrededor de -50°C. Por lo que para prevenir la fractura de piezas muy grandes o intrincadas, es muy común sacar la pieza del medio de temple y comenzar el revenido en ésta, bajo estas condiciones, una proporción considerable de la estructura (10% o más) posiblemente será austenita.[2]

Por consecuencia, más austenita es retenida a temperatura ambiente en los aceros para herramientas con mayor cantidad de aleados. En el revenido a temperaturas crecientes que se encuentran en el rango de 120 a 260 °C, cierta cantidad de austenita retenida se transforma a bainita lo que trae una expansión en el volumen.

La cantidad de austenita retenida depende en gran medida de la cantidad de carbono disuelto y en la temperatura a la cual la transformación de la martensita comienza. Se puede ver en la figura 4.25, que estos dos factores afectan el porcentaje de austenita retenida.[2]

En la figura 4.25 es presentado un acero para herramientas que contiene 1.1% C y 2.8% Cr el cual es enfriado desde una temperatura de 1040°C, la transformación a martensita comienza alrededor de los 105°C y la cantidad de austenita a temperatura ambiente es de alrededor del 50%. Por otro lado, es posible observar que sólo el 2% de austenita es retenida cuando este acero es austenizado a 845°C, esto debido a que la transformación de la martensita comienza a una temperatura más alta que es de alrededor de los 230°C.

4.4 Distorsión de forma en los aceros para herramientas.

La resistencia de un material, disminuye de manera considerable por encima de los 600°C; cuando el material alcanza la temperatura de austenización, la carga de cedencia es tan baja que una deformación plástica ocurre a menudo, simplemente por los esfuerzos inducidos en la pieza debido a la gravedad. Sin embargo herramientas largas, anchas y de formas complejas deben ser sostenidas apropiadamente de modo que se prevenga el pandeo. El calentamiento rápido incrementa la distorsión de forma, especialmente en herramientas con longitudes grandes y en piezas complejas las cuales contienen secciones ligeras y pesadas, de modo que si la velocidad de calentamiento es alta, las secciones ligeras incrementarán la temperatura mucho más rápido que las secciones gruesas o pesadas. Asimismo, las superficies en secciones pesadas incrementarán su temperatura más rápido que al interior; todos estos factores son suficientes para que el material presente esfuerzos internos. De

manera eventual, las porciones más calientes llegarán a alcanzar la temperatura del horno, mientras que las partes que están más frías continúan elevando su temperatura. [2]

El calentar la pieza de manera lenta se minimiza la distorsión, de esta manera los diferenciales de temperatura que se crean en la pieza se mantienen bajos y los esfuerzos térmicos se mantienen dentro del rango elástico del material. Lo más ideal para todo tratamiento térmico de acero para herramientas es que éstos inicien desde que el horno se encuentra frío ya que se provee mayor libertad de la distorsión de forma durante el calentamiento de la herramienta. Sin embargo comenzar el tratamiento cuando el horno se encuentra frío no es muy práctico ni eficiente en lo que refiere al gasto de energía, a menos que el tratamiento térmico sea hecho en un horno al vacío.[2]

Cuando la pieza se coloca en el medio enfriador, puede ocurrir una gran distorsión de forma debido a las diferencias tan grandes de temperatura que existen entre las superficies y el interior, así como entre las secciones ligeras y pesadas de la herramienta, esto debido a los esfuerzos térmicos y mecánicos producidos mediante la transformación martensítica. Este problema se incrementa si la capacidad para endurecer del material es tan baja que es requerido un enfriamiento rápido para obtener la máxima dureza, esto pasa cuando el material con el que se trabaja se debe temprar en agua o salmuera. [2]

Cuando se trabaja con herramientas simétricas y grandes, es recomendable que éstas se introduzcan al medio de temple de manera vertical, con una agitación vertical de ésta en el medio en el que se temple. [2]

En la Tabla 4.8 se presentan los cambios dimensionales típicos que presentan algunos aceros para herramientas.

Tabla 4.8 Cambios dimensionales que se presentan en algunos aceros para herramientas.[2]

Acero	Temperatura del tratamiento térmico (°C)	Temple en	Cambio total en dimensiones lineales después del temple, (%)
A2	815	Aire	0.09
D2	1010	Aire	0.06
H13	1010	Aire	-0.01
M2	1210	Aceite	-0.02

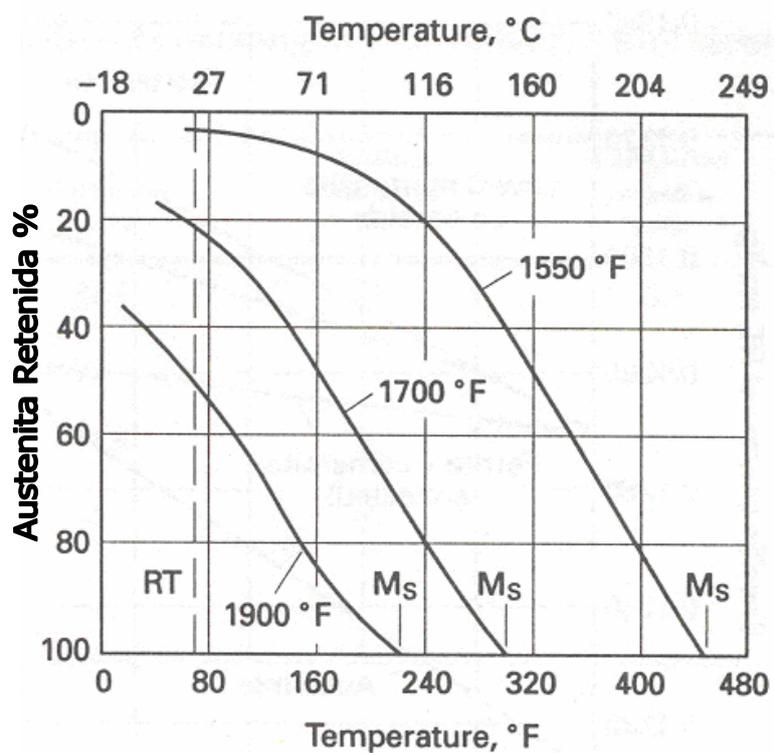


Figura 4.25. Efecto de austenización en la austenita retenida.[2]