



**Universidad Nacional Autónoma de México**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**AUSTEMPERING Y MARTEMPERING EN ACEROS PARA  
CONSTRUCCION DE MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**INGENIERO QUIMICO METALURGICO**  
**p r e s e n t a**  
**FELIPE DE JESUS RODRIGUEZ TAPIA**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

CLAS TESIS 1979 FACULTAD DE QUIMICA  
ADA M.T. ~~301~~  
FECHA 301  
PAGS \_\_\_\_\_  
• \_\_\_\_\_

EXPERIMENTOS Y MANTENIMIENTO EN LABORATORIO PARA  
ANÁLISIS QUÍMICO Y MICROSCOPÍA



LIBRO DE REGISTRO DE LA BIBLIOTECA DE LA  
FACULTAD DE QUIMICA DE LA UNAM  
CALLE DE LA QUIMICA S/N  
MEXICO D.F. 06700

*Jurado Asignado Originalmente*

*Presidente: M. en C. Alejandro Espriú Manrique de Lar*

*Vocal: M. en C. María Eugenia Noguez Amaya*

*Secretario: Ing. Humberto Malagón Romero*

*Primer Suplente: Ing. Enrique Curiel Reyna*

*Segundo Suplente: Ing. Marco Antonio Chamorro Díaz*

*Sitio donde se desarrolla el Tema:*

*Laboratorio de Metalurgia,*

*Facultad de Química, UNAM*

*Nombre completo y firma del sustentante:*

*Felipe de Jesús Rodríguez Tapia*

*Rúbrica*

*Nombre completo y firma del asesor del Tema:*

*Ing. Humberto Malagón Romero*

*Rúbrica*

*Con mi agradecimiento sincero*

*a los ingenieros del Laboratorio de Metalurgia*

*en especial al*

*Ing. Humberto Malagón Romero*

*por su valiosa colaboración para el desarrollo de  
esta Tesis.*

*El sustentante*

*Con cariño*

*y respeto*

*a mis padres*

*Felipe*

*INDICE*

-----

<i>INTRODUCCION</i>	<i>1</i>
<i>CAPITULO I</i>	
<u><i>Austempering</i></u>	
<i>Generalidades</i>	<i>3</i>
<i>Descripción del proceso</i>	<i>6</i>
<i>Factores que intervienen en este tratamiento</i>	<i>11</i>
<i>Aceros para este tratamiento</i>	<i>43</i>
<i>Aplicaciones</i>	<i>46</i>
<i>CAPITULO II</i>	
<u><i>Martempering</i></u>	
<i>Generalidades</i>	<i>50</i>
<i>Descripción del proceso</i>	<i>52</i>
<i>Factores que intervienen en este tratamiento</i>	<i>56</i>
<i>Aceros para este tratamiento</i>	<i>71</i>
<i>Aplicaciones</i>	<i>73</i>

CAPÍTULO III Parte experimental

<i>Austempering</i>	76
<i>Martempering</i>	85
<i>Resultados</i>	87
<i>Discusión</i>	95
<i>Conclusiones</i>	97
<i>Bibliografía</i>	102

## INTRODUCCION

En la época presente se requiere cada día de una gran cantidad de maquinaria y herramientas especializadas, mismas que deben tener determinados niveles de resistencia, dureza y tenacidad, para el desarrollo tecnológico.

Con el conocimiento de los diagramas (T-T-T) temperatura-tiempo-transformación, denominadas también curvas de la "S", dio comienzo el estudio, y también el desarrollo de los tratamientos isotérmicos.

Este tipo de diagramas se presenta mediante curvas, indicando las distintas fases de transformación en función de la temperatura y logaritmo del tiempo.

Los tratamientos isotérmicos dependen de la transformación estructural que tiene lugar a una sola temperatura determinada durante un período dado de tiempo. Estos tratamientos encuentran cada vez mayor aplicación en la industria, debido a las ventajas que tienen sobre los tratamientos convencionales.

*El austempering y el martempering como tratamientos isotérmicos han tenido, desde el inicio de su aplicación, una aceptación extraordinaria cuando se desea conseguir resultados similares a los que se obtienen con los temple y revenidos convencionales. Pero con la ventaja sobre éstos de que, en el caso del austempering, al no llegar el acero a la zona de transformación martensítica, se eliminan casi totalmente los riesgos de grietas y deformaciones, quedando los aceros con estructuras bainíticas, sin necesidad del revenido. Se logra una tenacidad superior con idénticas durezas, y en el caso del martempering, el acero, antes de que se inicie la transformación martensítica, es mantenido en el baño el tiempo necesario para igualar las temperaturas pieza (centro y superficie)-baño, siendo después enfriado al aire, logrando una transformación casi simultánea en el centro y superficie.*

*De tal forma se obtiene una estructura martensítica con muy pocas tensiones residuales, reduciendo también los riesgos de grietas y de deformaciones en durezas elevadas.*

*En función del desarrollo y gran aceptación de estos tratamientos se realiza el presente trabajo, con el fin de estudiar las dificultades experimentales y transmitir una experiencia sobre las restricciones de los mismos.*

*CAPITULO I*

*AUSTEMPERING*

## AUSTEMPERING

### - Generalidades

*Este tratamiento ha tenido bastante desarrollo en Norteamérica y en algunos países de Europa, sobre todo en tratándose de la fabricación de piezas y herramientas de secciones no muy grandes, que deban quedar con estructuras bainíticas, durezas de 40 a 55 Rockwell-C y características mecánicas superiores a las logradas mediante el temple-revenido convencional.*

*Al mismo tiempo que se consiguen estos resultados tan satisfactorios, en muchos tratamientos puede prescindirse del revenido, reduciendo por consiguiente el ciclo del tratamiento térmico.*

*En el tratamiento de los resortes con este procedimiento se consigue que en los ensayos de flexión y plegado sean alcanzados coeficientes superiores en un 150% a los que se obtienen cuando las piezas han sido sometidas a temple-revenido convencional. Tal es la mejora que se alcanza con la transformación isotérmica, que en la mayoría de las fábricas de*

*automóviles del mundo entero han desechado las piezas de estas características, tratadas por procedimientos normales.*

*Uno de los factores primordiales que hacen elevar las características mecánicas de una manera tan destacada, es el de que, al no pasar, como ya se indicó, el acero por la zona de dominio martensítico, se eliminan casi totalmente las microgrietas intercrystalinas, origen de uno de los grandes defectos del temple común.*

*Con el austempering se consiguen características igualmente impresionantes en los ensayos de alargamiento, estricción y resiliencia, cuando a éstos se les compara con los obtenidas tratando una probeta de acero al carbón con el mismo grado de dureza.*

*Aplicando este tratamiento se puede reducir, en un buen número de casos, el ciclo, hasta en un 50%, con los mejores resultados.*

*La influencia de la microestructura sobre las propiedades mecánicas de un acero en frío o en caliente es bien conocida.*

En lo que concierne a las propiedades de un acero en frío, la martensita revenida es la estructura más interesante en la mayoría de los casos, obteniéndose los mejores resultados cuando el acero es enteramente martensítico y está exento de ferrita o de bainita.

En ciertos casos, no obstante, la bainita inferior es preferible a la martensita revenida, proporcionando un aumento de la resiliencia, con una dureza exactamente igual.

Este tratamiento da excelentes resultados en los aceros rápidos. Las propiedades en caliente de la martensita revenida son, por lo general, bastante débiles. La bainita es superior, en este caso, a cualquier estructura mixta, sea ferrita-bainita o ferrita-perlita, a partir de cierta temperatura y composición química del acero.

- *Descripción del proceso*

El austempering consiste en calentar el acero a una temperatura ligeramente superior a la crítica y enfriarlo luego en un baño caliente, que es mantenido a temperatura constante durante un lapso que resultará suficiente para que se verifique la transformación de la austenita en bainita, en forma total.

La temperatura del baño, que debe ser superior a la del punto Ms, suele variar de 250° a 550 o c.

Para que el tratamiento sea correcto y la estructura sea totalmente bainítica, el enfriamiento en la primera fase debe ser suficientemente rápido como para evitar la formación de perlitas (figura 1)

Como el acero tratado en esta forma no está sujeto a las severas tensiones internas propias de las transformaciones martensíticas, no sólo está libre de las pequeñas grietas microscópicas que nacen en los temple ordinarios. También posee otras notables cualidades.

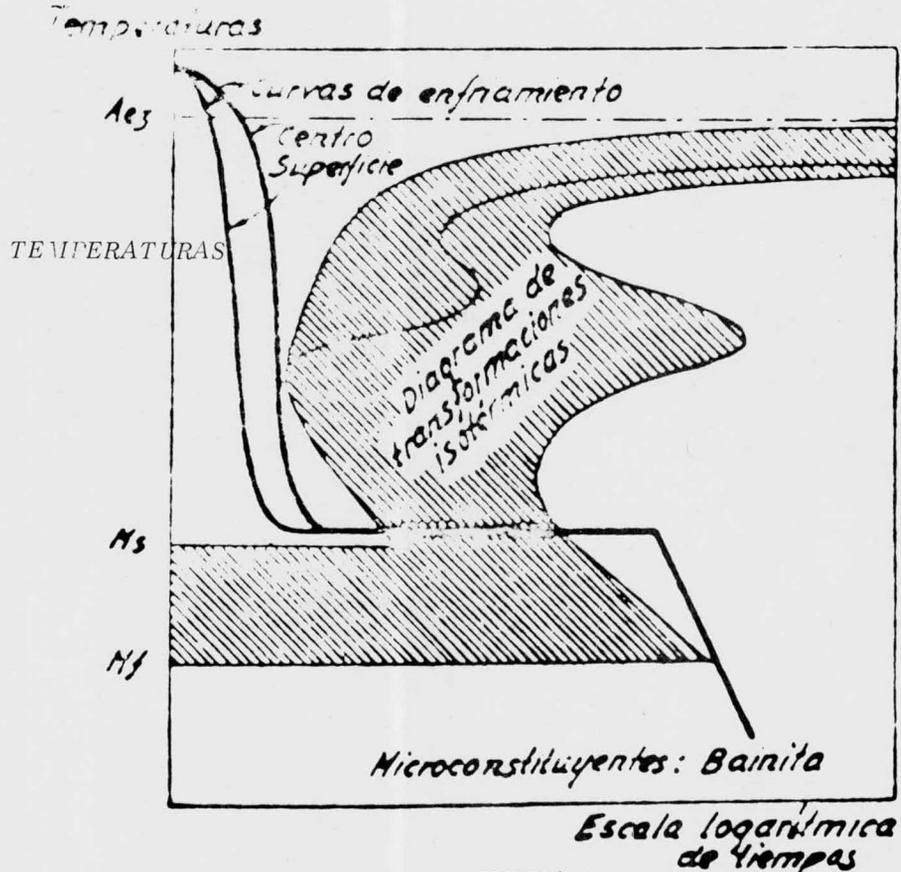


FIGURA 1

Representación esquemática del austempering

*La aplicación de este tratamiento para piezas pequeñas no requiere, por añadidura, instalaciones costosas. En cualquier tipo de hornos pueden lograrse las temperaturas necesarias y a continuación se pasan a un baño de metal o sales fundidas, a temperatura adecuada, manteniendo las piezas en esa temperatura el tiempo necesario para conseguir la estructura deseada.*

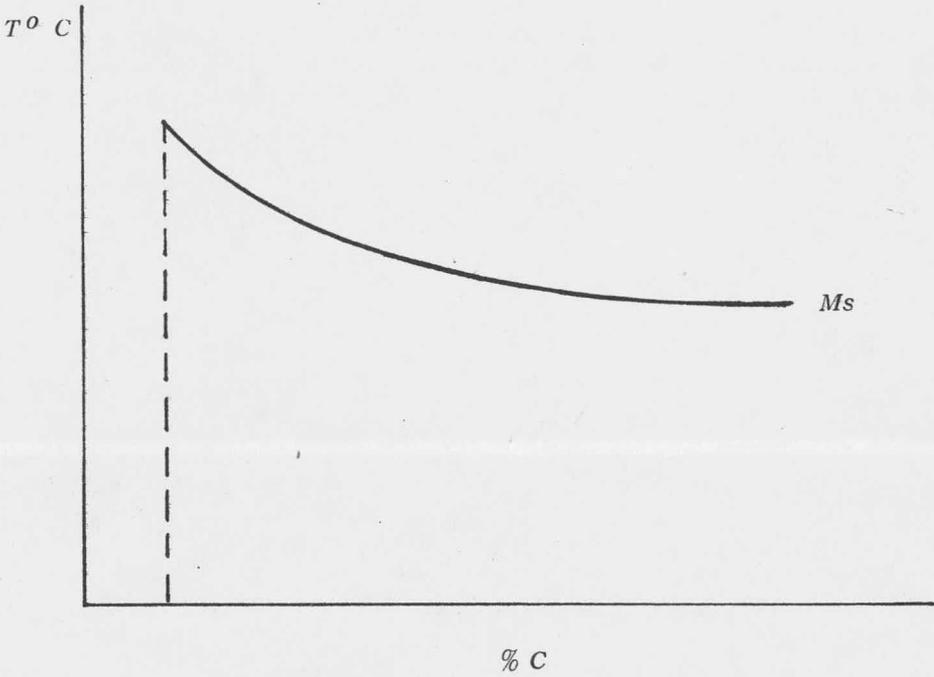
*La limitación de este tratamiento estriba, en ocasiones, en que no se consigue la velocidad de enfriamiento necesaria para evitar la transformación de la austenita en la zona de la nariz de la "S", correspondiendo a la formación de estructuras perlíticas o sorbiticas blandas. Bien porque el acero tiene una velocidad crítica bastante elevada, o porque las piezas son de un espesor mayor que el conveniente.*

*La utilización de este tratamiento es posible aun tratándose de piezas relativamente grandes cuando se recurre al empleo de aceros aleados y empleando métodos mecánicos para agitar el baño, que favorecen el rápido enfriamiento de las piezas.*

Debe considerarse que la temperatura del baño se aproxime y sea superior a la línea Ms (inicio de transformación mar-tensítica), ya que si fuera inferior, parte de la austenita de la periferia se transformaría en martensita, anulando así la finalidad y objetivos del proceso.

La aplicación del austempering a piezas de un acero determinado requiere del conocimiento previo del diagrama Temperatura-Tiempo-Transformación (T-T-T) del acero en cuestión, y, especialmente, la velocidad crítica de temple (curva tangente a la zona de reacción de menor tiempo de incubación), la posición de su nariz o sus narices, la temperatura correspondiente a la línea Ms, y el tiempo necesario para que se inicie y finalice la transformación a una temperatura superior a la correspondiente a la línea Ms, que se fijará tomando como base la dureza y demás propiedades que deseen obtenerse.

La posición de la línea Ms suele variar bastante en algunos casos con la temperatura de austenización, porcentaje de carbono y elementos de aleación, como es posible ver enseguida:



*Variación de la línea Ms en función de  
temperaturas de austenización y por-  
centaje de carbono*

- Factores que intervienen en este tratamiento  
Diagramas Temperatura-Tiempo-Transformación (T-T-T),  
composición química, tamaño de grano, sección de la pieza, me-  
dio de enfriamiento, temperatura del baño, tiempo de inmersión,  
agitación del baño.

a). Diagramas (T - T - T)

Existen algunos métodos para la determinación de este tipo de diagramas, siendo empleados principalmente dos de esos métodos: el metalográfico y el dilatométrico.

El método metalográfico consiste en calentar pequeñas probetas del acero a estudiar a una temperatura ligeramente superior a la crítica  $Ac_3$ , siendo correctamente austenizadas y rápidamente introducidas en el baño caliente (sales o metales fundidos) a temperaturas variables desde los  $7200c$ , hasta temperaturas ambiente.

Estas probetas son mantenidas en el baño caliente a temperatura constante, siendo retiradas una a una a intervalos sucesivos de tiempo, y procediendo a enfriarlas luego, rápidamente, en agua. A continuación se procede a examinar las

*estructuras con ayuda del microscopio. Puede así conocerse el porcentaje de austenita transformada y la clase de estructura obtenida en la transformación, de acuerdo con cada temperatura y permanencia (tiempo) que se hayan ensayado. (figura 2).*

*Por efecto del rápido enfriamiento de la probeta, la austenita, que aún no había sido transformada, se convierte en martensita, y los constituyentes formados a temperatura elevada por transformación isotérmica de un cierto porcentaje de austenita, se conservan después del rápido enfriamiento en el mismo estado que tenían cuando fueron retirados del baño caliente.*

*Los puntos correspondiente a cada temperatura, tiempo y transformación son llevados sobre un diagrama marcando las distintas fases de la transformación.*

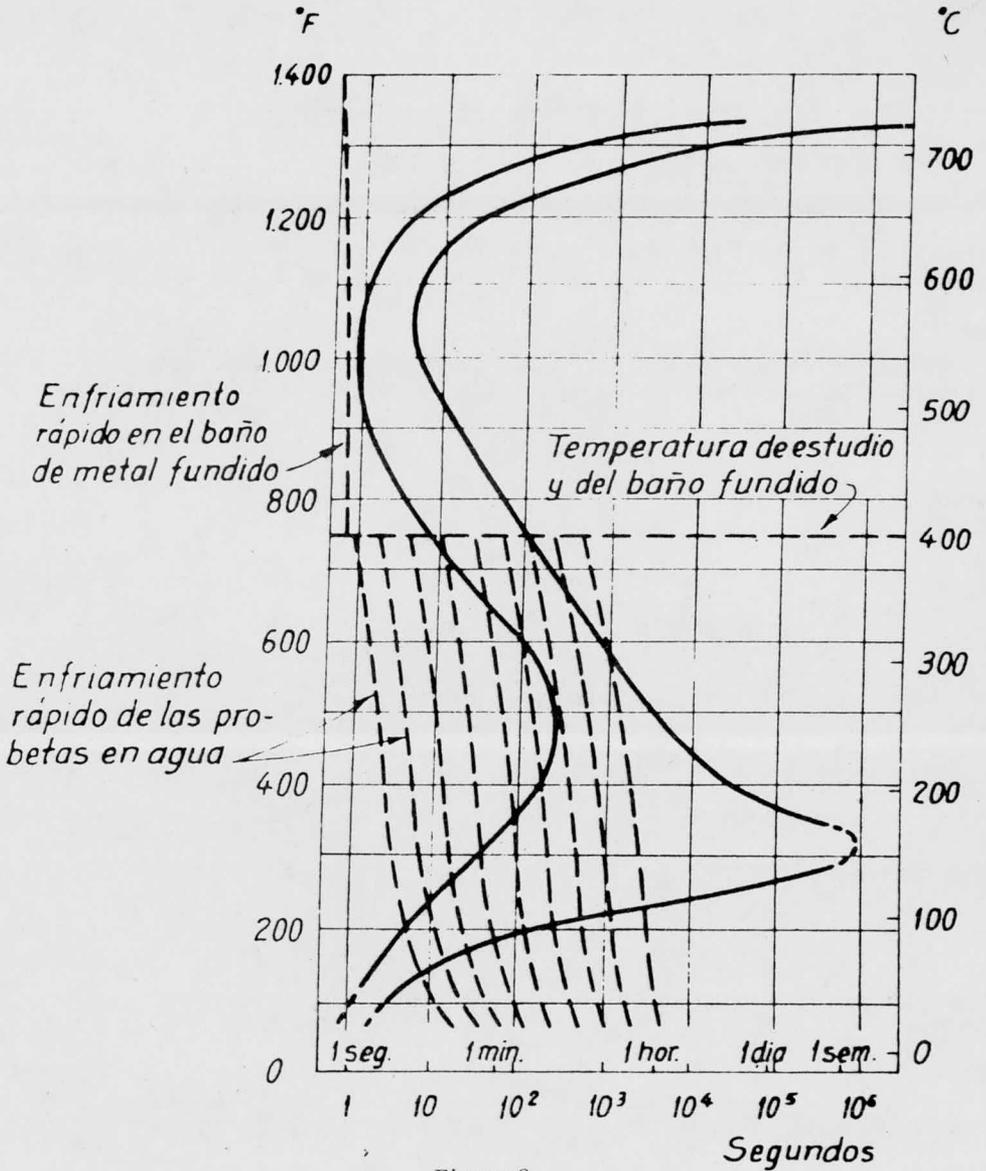


Figura 2

Esquema del proceso que se utiliza para determinar la curva de la "S" de los aceros

- *El método dilatométrico para la determinación de la curva de la "S".*

*Explicación.*

*En la figura 3 se ve una instalación simple y muy empleada para estas determinaciones.*

*El ensayo se comienza colocando la probeta del acero que se va a ensayar en el fondo de un tubo de curazo provisto de una abertura lateral, para que la transmisión del calor a la probeta de acero se haga rápidamente. Todo el conjunto se introduce luego en un horno vertical donde el acero se calienta a una temperatura ligeramente superior a la de austenización.*

*Las variaciones de longitud de la probeta se transmiten a un reloj micrométrico por medio de una varilla de cuarzo; para evitar que el calor llegue al micrómetro, se coloca sobre la tapa del horno un anillo refrigerado interiormente por agua en circulación. Después de igualada la temperatura en la probeta de acero, se saca todo el contenido y se introduce rápidamente en otro horno, también vertical, en el que hay un baño de sales*

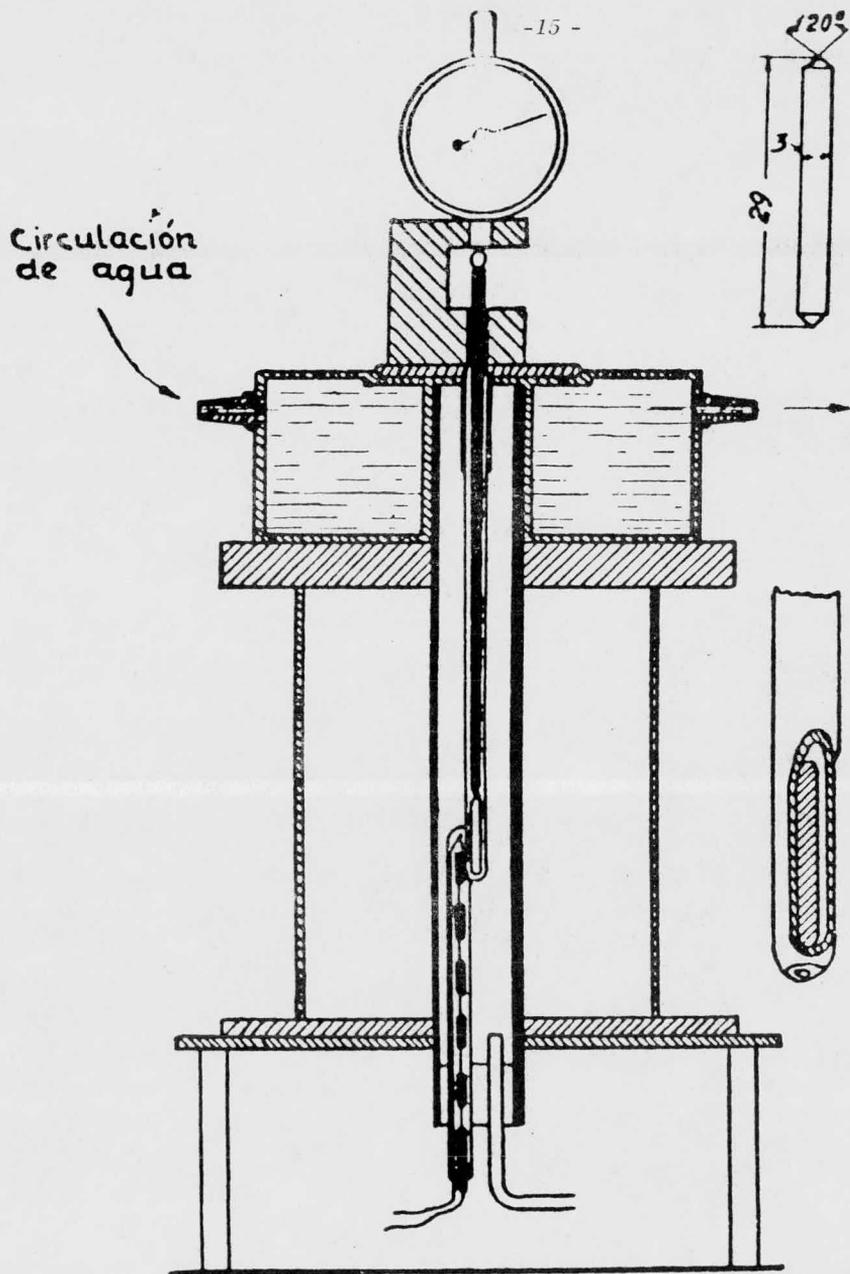


FIGURA 3

Montaje del dilatómetro para estudiar la transformación  
isotérmica de la austenita

*o plomo fundido, cuya temperatura es precisamente la que se ha fijado para estudiar la transformación de la austenita.*

*Al descender la temperatura, el acero, de acuerdo con las leyes de dilatación y contracción térmica, se contrae. Luego, al cabo de un cierto tiempo, se inicia la dilatación de la probeta, que señala el principio de la transformación de la austenita. La transformación cesa cuando cesa la dilatación.*

*Registrando el ensayo en una gráfica en la que se señalan dilataciones y tiempos, se obtienen curvas parecidas a la de la figura 4, que sirven para conocer, para cada temperatura de ensayo, el tiempo necesario para el principio y fin de la transformación.*

*Preparando otras curvas análogas para diversas temperaturas, se conocerán en cada una de ellas los puntos de comienzo y fin de las transformaciones, que servirán para determinar la curva de la "S" de las diferentes clases de aceros.*

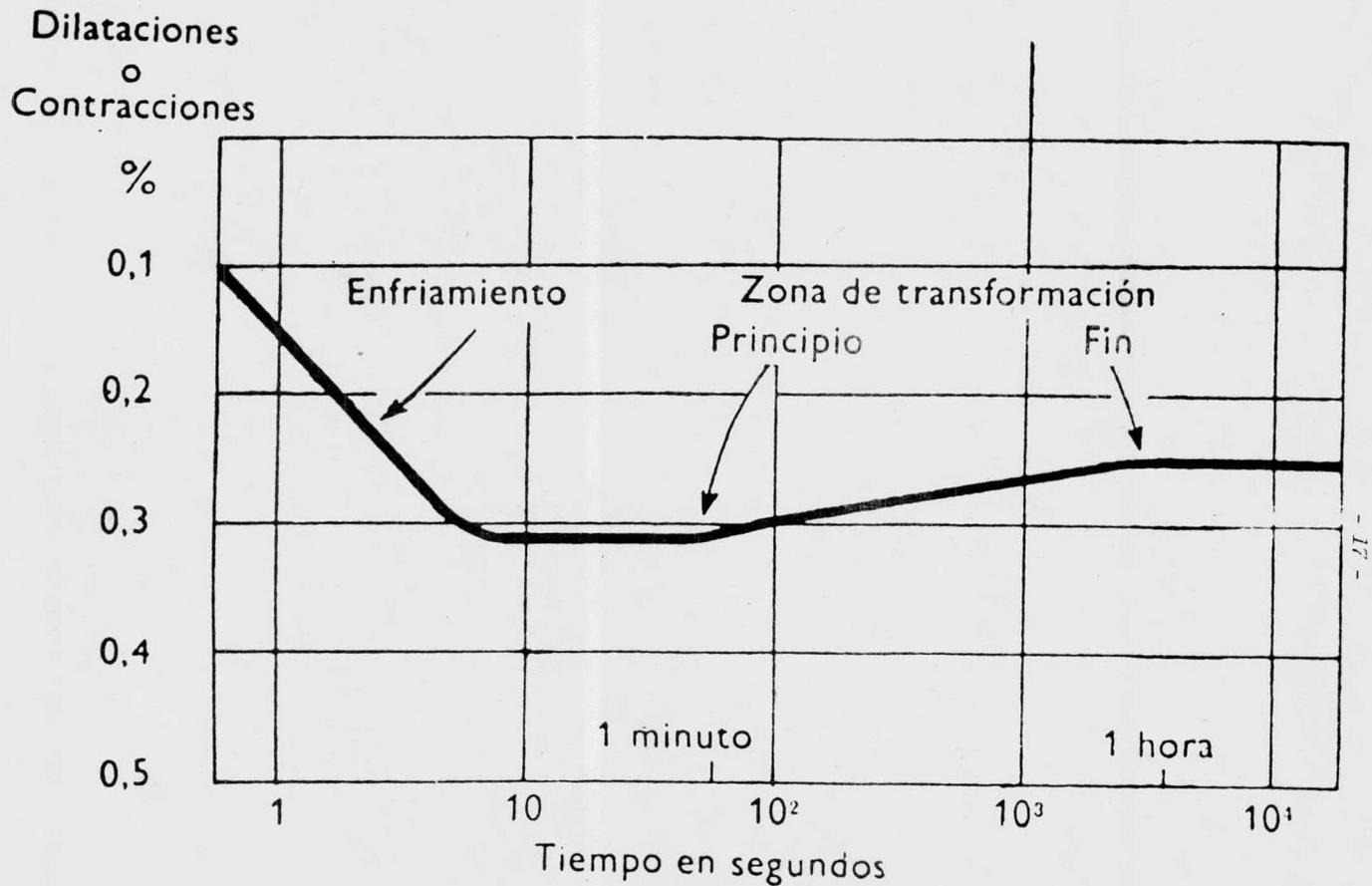


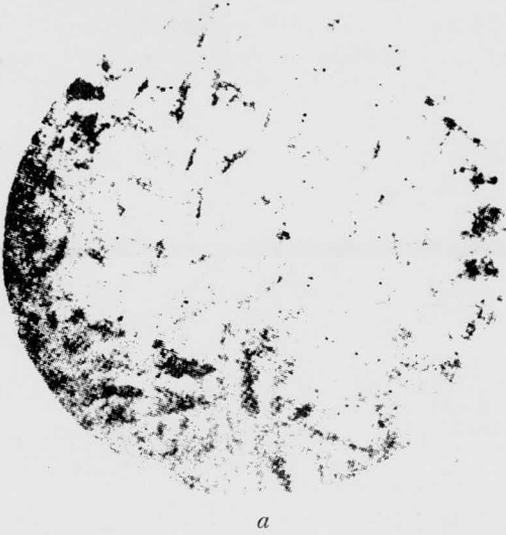
FIGURA 4

Diagrama dilataciones tiempos empleados para la determinación de las curvas de la "S".  
 El enfriamiento de la probeta se hizo en baño de sales a 500 ° C

*En la figura 5 se muestran microestructuras correspondientes a un acero de 0.90% de carbono, que ha servido para estudiar la transformación isotérmica de la austenita.*

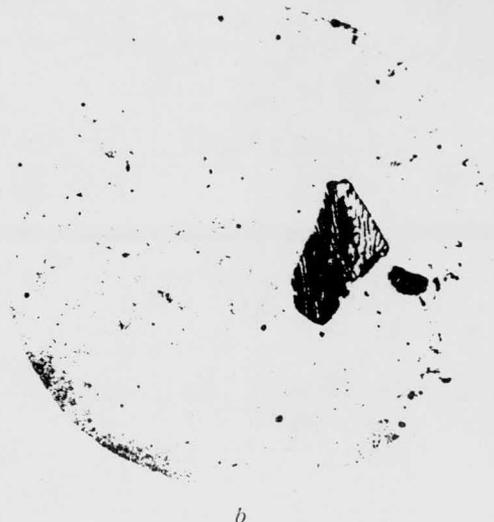
*En la parte (a) de la figura aún no comienza la transformación. La parte (b) corresponde al comienzo de la formación de los primeros cristales de perlita, que es el producto obtenido al transformarse la austenita a - - - 705°c. En la parte (c) puede apreciarse que, al cabo de 19 minutos y 10 segundos, existe ya un 25% de perlita. El fondo blanco sobre el que destaca la perlita es martensita, que se ha obtenido al enfriarse rápidamente la parte de austenita que aún no se había transformado, después de permanecer el acero a 705°c durante 19 minutos y 10 segundos. El avance de la transformación se observa en las partes (d) y (e). Finalmente, en la parte (f), es posible ver que toda la austenita se ha transformado en perlita, al cabo de 66 minutos y 40 segundos.*

*Si se hubiera empleado otra temperatura de ensayo, el proceso sería parecido. Pero la duración sería distinta y también diferente la microestructura obtenida al final de la transformación.*



a

A los diez segundos no ha comenzado la transformación de la austenita. Por efecto del rápido enfriamiento de la probeta en agua, aparece una estructura martensítica.



b

Comienza la transformación de austenita en perlita a los cinco minutos y cincuenta segundos.

FIGURA 5.



c

El 25% de austenita se ha transformado en perlita a los diecinueve minutos y diez segundos.



d

Se ha efectuado la transformación de un 50% de austenita a los veintidós minutos.



e

FIGURA 5

*Se ha transformado un 75% de austenita, a los veinticuatro minutos y diez segundos.*



f

*La transformación de la austenita en perlita es completa, a los sesenta y seis minutos y cuarenta segundos.*

*Empleando los procedimientos citados anteriormente, se puede determinar para cada temperatura el período de incubación, o sea, el tiempo necesario para que comience a efectuarse la transformación de la austenita y el tiempo que transcurre hasta que la transformación es completa.*

*Los resultados obtenidos en los ensayos se llevan sobre un diagrama en el que en ordenadas se señalan temperaturas, y en abcisas los tiempos en escala logarítmica.*

*De esta forma se obtienen dos curvas en forma de "S" (figura 6), de las cuales, la de la izquierda señala para cada temperatura el tiempo que tarda en comenzar la transformación, y la de la derecha, el tiempo necesario para que toda la austenita quede transformada en otros constituyentes más estables.*

°F

°C

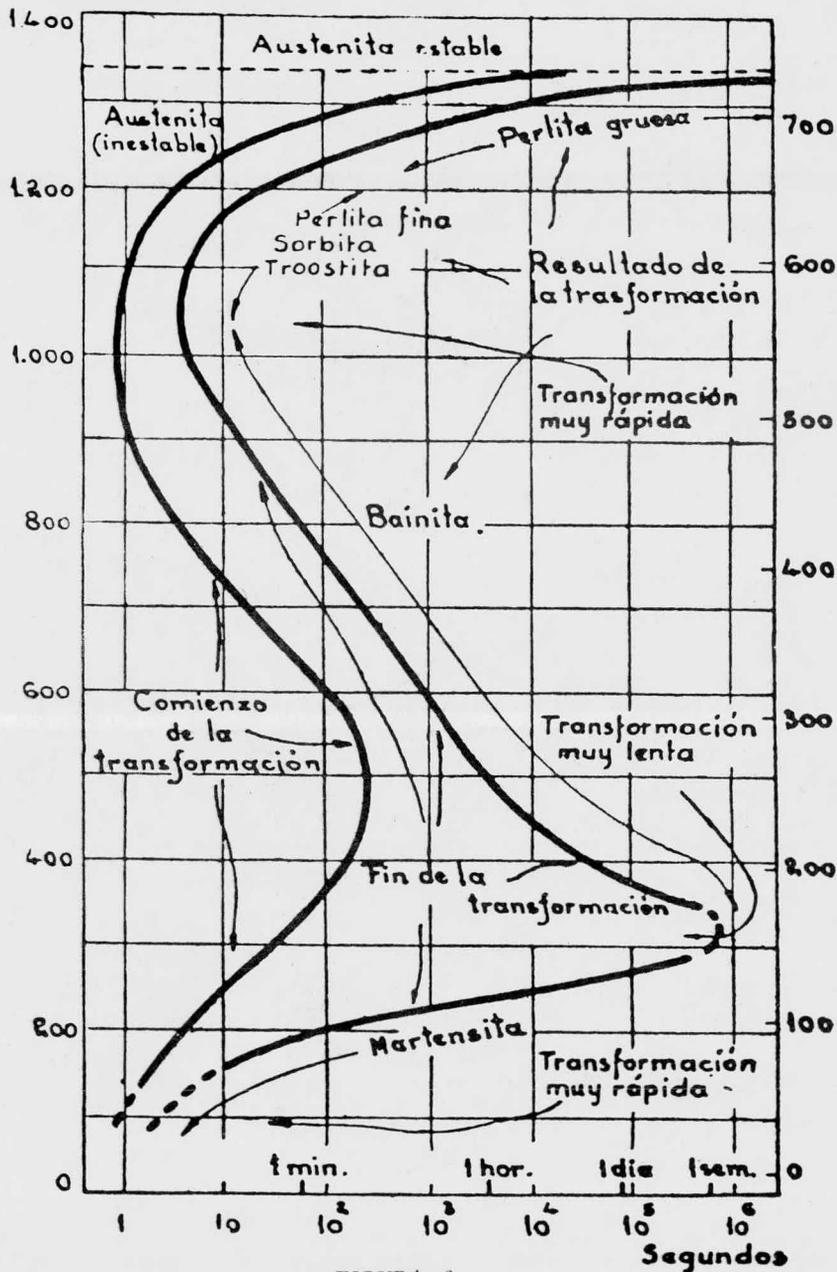


FIGURA 6

Curva de la "S" y constituyentes microscópicas resultantes en la transformación isotérmica de la austenita

Los constituyentes microscópicos que aparecen en las transformaciones isotérmicas de la austenita, de acuerdo con la teoría de H. Jolivet, se dividen en tres zonas principales: la superior, la intermedia y la inferior, caracterizadas, cada una de ellas, por la forma de efectuarse la transformación.

La primera zona se halla en los diagramas, justamente debajo de la línea  $Ac_1$ ; la inferior corresponde a la zona de formación de martensita, y la intermedia se localiza en el intervalo comprendido entre las dos citadas anteriormente.

En el austempering se obtienen constituyentes microscópicos situados en la zona intermedia.

### *Zona Intermedia*

El constituyente característico de esta zona es la bainita. Al principio, esta denominación se hizo extensiva a cualquier constituyente formado a temperaturas comprendidas entre  $600^{\circ}$  y  $250^{\circ}$  C; pero en la actualidad se agrupa a todos los constituyentes que aparecen en esa zona bajo la denominación de estructuras intermedias.

*Constituyente X.*

*Es un constituyente muy poco importante, que a veces se observa en la zona de temperaturas de formación de bainita.*

*Davenport le dio ese nombre, y está formado por agujas de ferrita. Se presenta en algunos aceros en los que la transformación de la austenita en la zona de la nariz de la bainita se inicia con la precipitación de cristales de ferrita, que presentan un aspecto marcadamente acicular (figura 7)*

*Bainita superior.*

*Se forma de 600° a 450°c, aproximadamente. Está constituida por una serie de agujas de ferrita y cementita paralelas, de contorno más o menos arborescente (figuras 8 y 10).*

*Las agujas de ferrita actúan como centros de cristalización desarrollándose junto a ellas y paralelamente otra serie de agujas separadas entre sí por un borde de cementita.*

*Bainita inferior.*

*Al descender la temperatura de transformación de la austenita, se inicia en el contorno de la bainita una evolución desde el tipo arborescente al acicular. La estructura también*



FIGURA 7

x 1,500

Constituyente X, en un acero de: C = 0.16%; Ni = 3.36%;  
Mn = 0.52%; y Mo = 0.20%

*se modifica gradualmente y llega a ser tan fina que puede apreciarse sólo que se hagan grandes ampliaciones. El aspecto acicular de las agujas se acentúa, decrece su tamaño, y tiende a desarrollarse únicamente en determinadas direcciones.*

*Se forma entre 450 ° a 250 ° C , aproximadamente (figuras 9 y 11).*

*b). Composición química*

*La composición química de un acero, y en especial el contenido de elementos aleados, tiene gran influencia en el austempering, ya que modifican la situación y forma de la curva en los diagramas "T-T-T", variando así las condiciones que deben existir para que se realice.*

*En las figura 12 y 13 puede observarse el efecto del manganeso sobre la forma y posición de la curva de la "S". La figura 12 corresponde a un acero de 0.35% de carbono y 0.37% de manganeso, y la figura 13, a otro acero con el mismo porcentaje de carbono y mayor contenido de manganeso.*

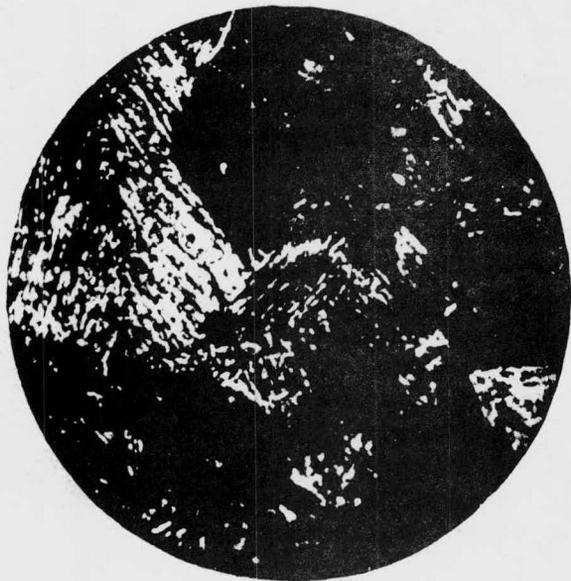


FIGURA 8  
x 2,500

*Bainita superior obtenida en la transformación  
isotérmica a 550° de un acero de 0.80 % de  
carbono*



FIGURA 9  
x 2,500

*Bainita inferior acicular muy fina obtenida en  
la transformación isotérmica a 350° de un  
acero de 0.80% de carbono*

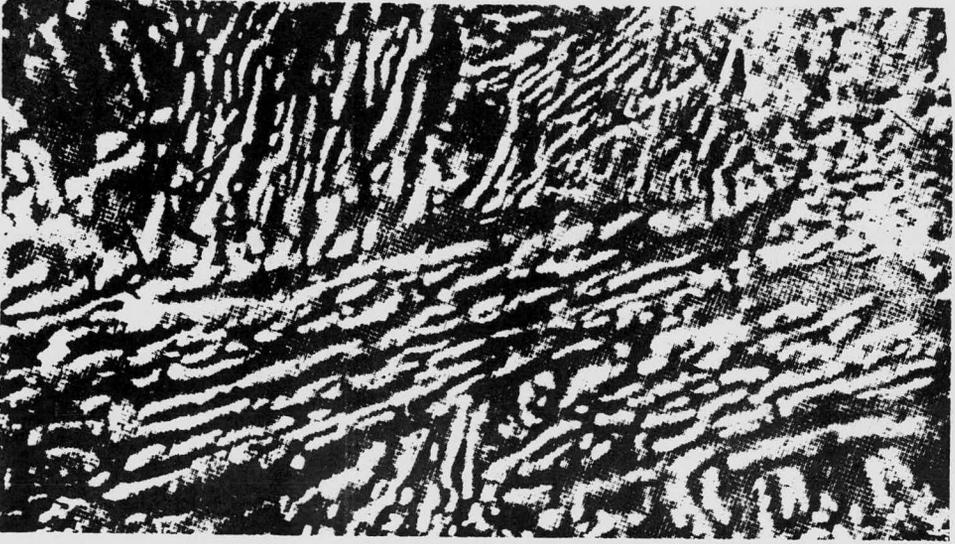


FIGURA 10

x 12,000 (con microscopio electrónico)

Bainita de un acero eutectoide obtenida por transformación isotérmica a 520 ° C

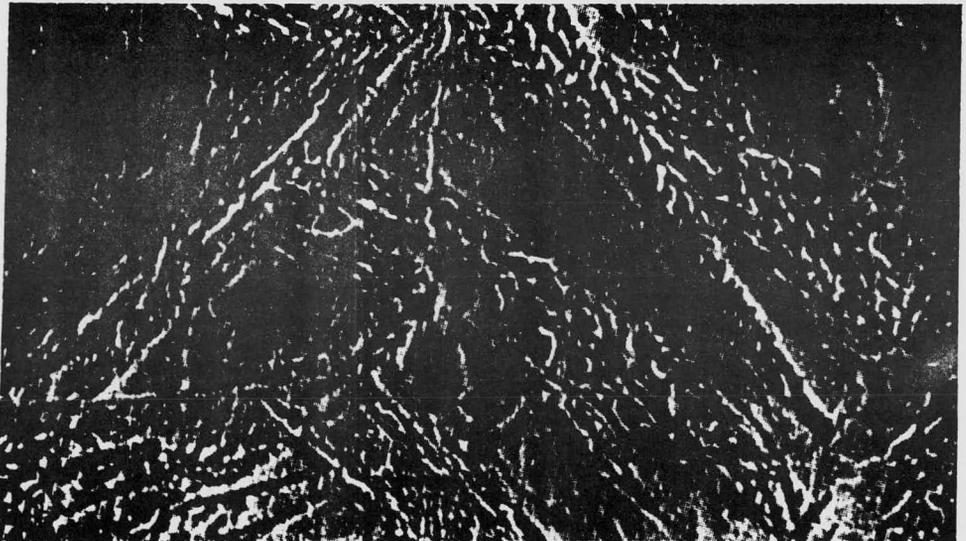


FIGURA 11

x 12,000 (Con microscopio electrónico)

Bainita inferior de un acero eutectoide obtenida por transformación isotérmica a 275 ° C

Temperatura de austenización 850°  
Grano mixto [N.º 2-3 (75%), N.º 7-8 (25%)]

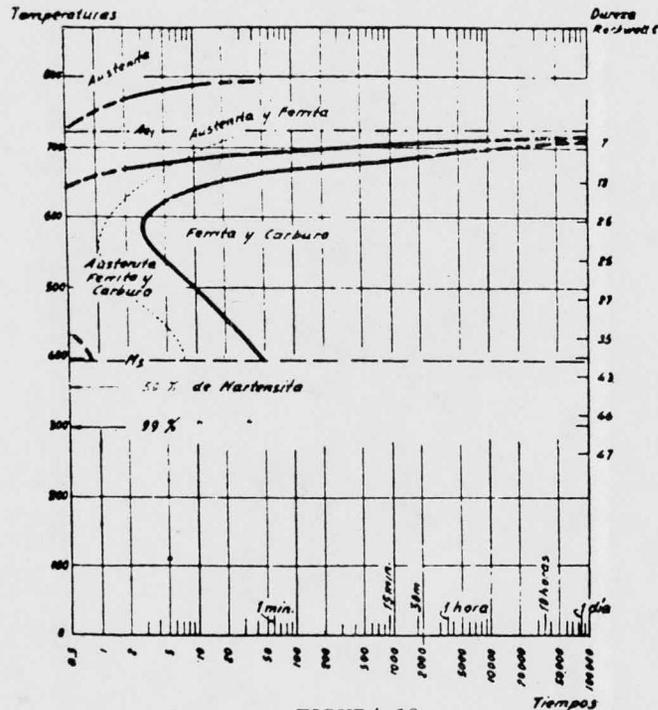


FIGURA 12

Cuerva de la "S" de un acero de 0.35% de carbono y 0.37% de manganeso

Temperatura de austenización 850°  
Grano mixto [N.º 7 (70%) y N.º 2 (30%)]

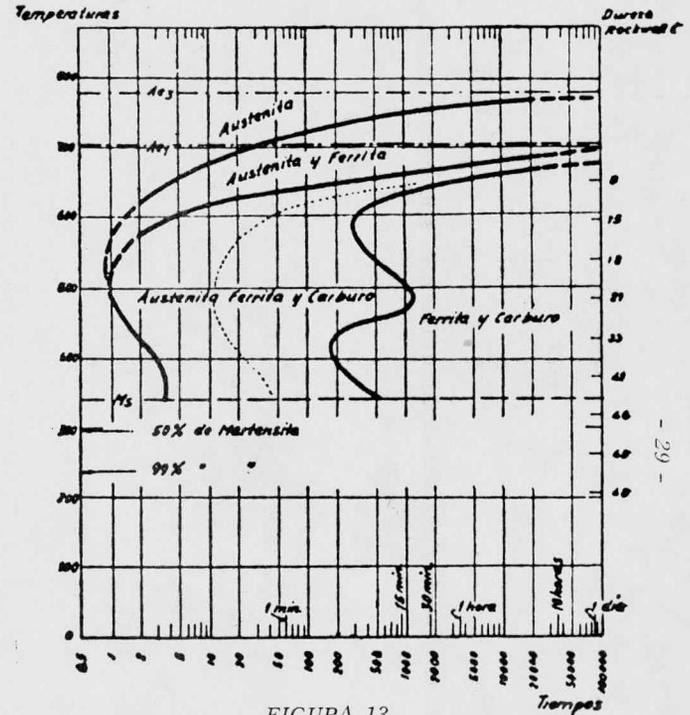


FIGURA 13

Cuerva de la "S" de un acero de 0.35% de carbono y 1.85% de manganeso

*Se ve que la curva ha sido desplazada hacia la derecha y que el nivel de todas las transformaciones se ha retrasado y descendido.*

*Este desplazamiento es característico de los metales que, como el manganeso, forman solución sólida con la austenita. En general, al aumentar el contenido de la aleación, se retrasa el comienzo de las transformaciones, y es también mayor el tiempo necesario para que se completen.*

*Aunque todas las adiciones de elementos de aleación tienden, en general, a retardar el comienzo de las transformaciones, y a aumentar la duración de las mismas, el efecto y la magnitud de la influencia de los diversos elementos es diferente en unos casos, en relación con otros.*

*Los elementos que forman carburos, tales como el cromo y el molibdeno, aun en pequeños porcentajes, son causa de que en algunos diagramas aparezcan dos narices: una correspondiente a la transformación perlítica, y otra a la bainítica (figura 14).*

Temperatura de austenización, 850°  
Grano fino (N.º 7-8)

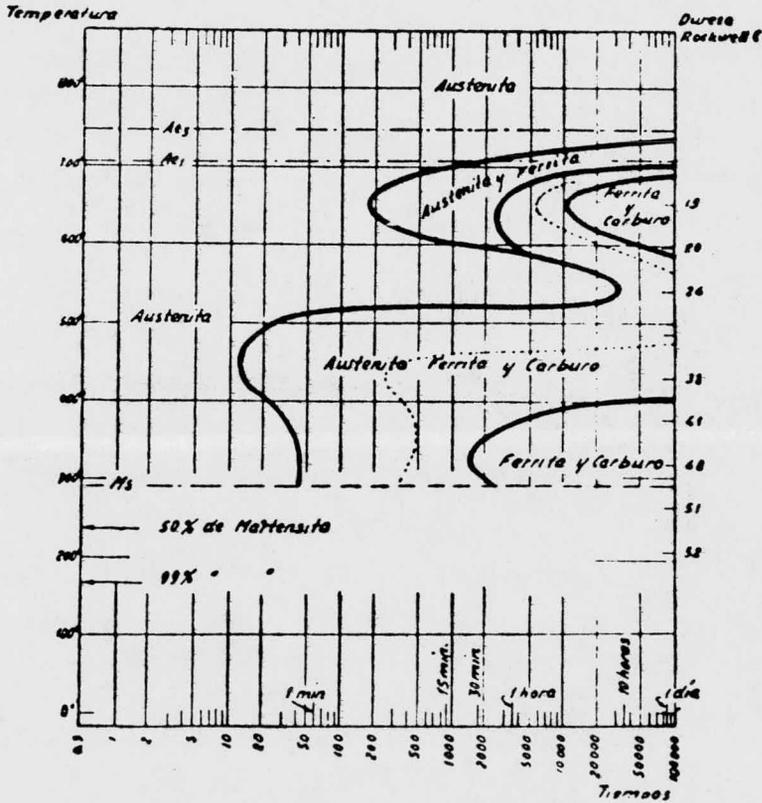


FIGURA 14

Curva de la "S" de un acero de: C = 0.41%;  
Mn = 0.61 %; Cr = 0.68 %; Ni = 1.80%;  
Mo = 0.25%

*En estos aceros hay que considerar dos zonas de templeabilidad: la perlítica y la bainítica, pudiendo ser una u otra la que señale la velocidad crítica de temple, que, en definitiva, dependerá de la situación relativa de las narices de las curvas correspondientes a esas estructuras.*

*El estado de la estructura microscópica en el momento anterior al tratamiento y el grado de heterogeneidad de la austenita, ejercen también cierta influencia en los procesos del austempering.*

*c). Tamaño de grano*

*El tamaño de grano también tiene influencia en el austempering, semejante a la de la composición química, que afecta la situación de la curva de la "S". Al aumentar el tamaño de los cristales, se retrasan el comienzo y el fin de la transformación, desplazándose la curva de la "S" hacia la derecha, modificándose, por tanto, como es natural, la velocidad crítica del temple.*

*En aceros de la misma composición, las velocidades críticas de temple de los aceros de grano grueso son menores que las velocidades críticas de temple de los aceros de grano fino.*

*En las figuras números 15 y 16 se pueden ver las curvas de la "S" de los aceros al cromo-vanadio, de la misma composición, y de diferente tamaño de grano.*

*En la figura 15 se puede observar también la influencia que tiene el tamaño de grano en un acero de 0.63% de carbono. En este caso, la diferencia del tamaño de grano es debida a las muestras, que fueron calentadas a temperaturas variables, desde 842° a 1093° c.*

*Las probetas calentadas a baja temperatura (842° y - 898° c), quedaron con grano fino (número 9 y número 7); y las calentadas a alta temperatura con grano grueso (número 2 y número 4).*

*Las curvas de la "S" correspondiente a cada muestra también son distintas y, como consecuencia, también lo serán*

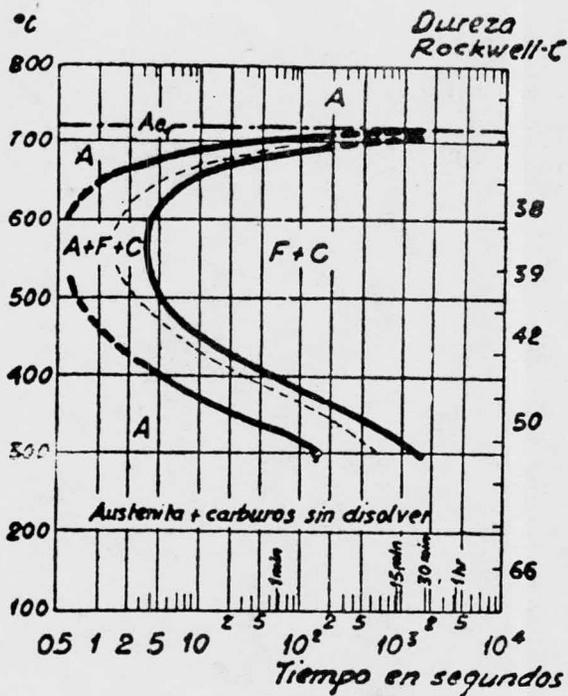


FIGURA 15

Curva de la "S" de un acero de grano fino de la siguiente composición: C = 0.87 %; Mn = 0.30 %; Va = 0.30 %

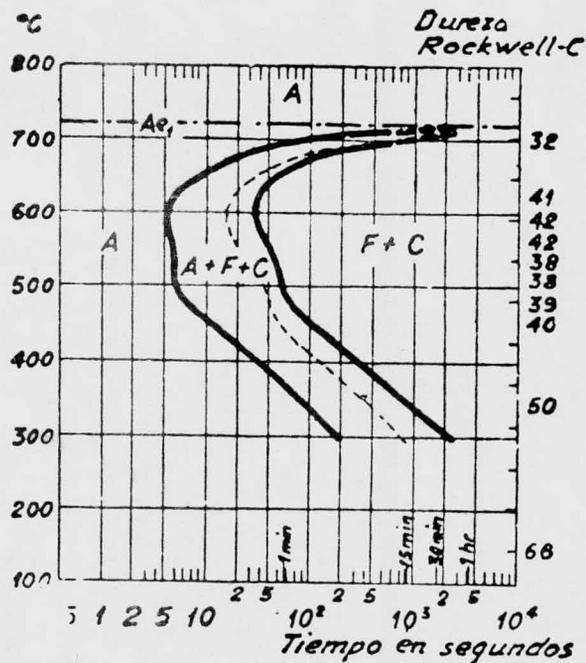


FIGURA 16

Curva de la "S" de un acero de grano grueso de la misma composición que el de la figura 15.

las velocidades críticas de temple de cada uno de ellos. Las curvas de la "S" de la figura 17 corresponden a la transformación del 50% de austenita.

d). Sección de la pieza

La sección de las piezas tiene gran importancia en este tratamiento, ya que las capas interiores del material experimentarán una velocidad de enfriamiento cada vez menor en cuanto más separadas estén de la superficie. Cuando la velocidad de enfriamiento de alguna parte de la pieza sea mayor que la velocidad crítica de temple para ese acero, se cortará la nariz de la curva en el diagrama "T-T-T" de dicho acero, obteniendo así la formación de estructuras perlíticas o sorbíticas blandas.

En consecuencia, no logrará el austempering correcto. En cuanto mayor sea la sección de la pieza a tratar, mayor grado de dificultad presenta obtener este tratamiento.

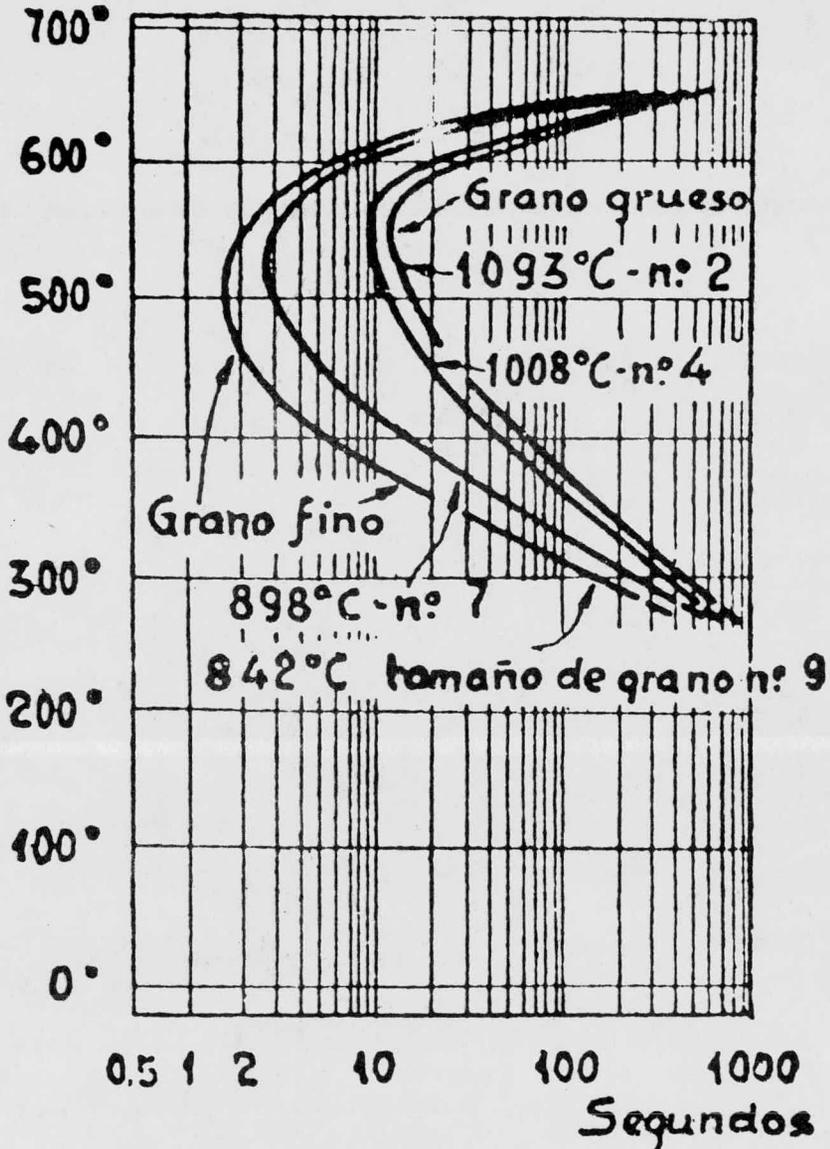


FIGURA 17

Curvas de la "S" correspondientes a la transformación de 50% de austenita, de un acero de 0.63% de C, austemizado a diferentes temperaturas

*e). Medio de enfriamiento*

*El medio de enfriamiento, junto con el tamaño y forma de las piezas, son diversos factores que deciden la velocidad del enfriamiento de las piezas de acero en los tratamientos térmicos.*

*Con el enfriamiento en agua salada muy agitada, se consiguen mayores velocidades, y enfriando las piezas dentro del horno, se obtienen las menores.*

*Con enfriamiento en aceite, al aire, en sales, en plomo fundido, etcétera, se consiguen velocidades intermedias, pudiendo elegirse entre todos ellos el medio que mejor cumple las condiciones de enfriamiento deseadas en cada caso.*

*Sales fundidas son el principal medio de enfriamiento comunmente usado en el austempering, por las siguientes razones:*

- 1. -Tiene una transferencia de calor rápida;* ✓
- 2. -Virtualmente se elimina el problema de la fase de vapor llevada a cabo durante el estado inicial de enfriamiento.* ✓

- 3.- *La viscosidad es uniforme en un amplio rango de temperaturas.*
- 4.- *La viscosidad es baja en las temperaturas de austempering (cerca de las del agua en la temperatura ambiente).*
- 5.- *Permanece estable a la temperatura de operación, y es completamente soluble en agua, facilitando la subsecuente operación de limpieza.*

*Composición y características de dos sales usadas para el austempering:*

<i>Nitrato de sodio</i>	<i>45-55%</i>	<i>0-10%</i>
<i>Nitrato de potasio</i>	<i>45-55%</i>	<i>50-60%</i>
<i>Nitrito de sodio</i>	<i>- - - -</i>	<i>37-50%</i>
<i>Punto de fusión - -</i>		
<i>aproximado</i>	<i>220 ° C.</i>	<i>138 ° C</i>
<i>Rango de temperatura de trabajo</i>	<i>260-595 ° C</i>	<i>160 -524 ° C</i>

*Las sales pueden tener adiciones de agua para incrementar el enfriamiento en los baños para austempering. Esto puede hacerse por diversos métodos completamente seguros.*

- 1.- *El agua puede ser mezclada a un grado regulado, dentro de un área agitada vigorosamente en el baño fundido.*
  
- 2.- *En instalaciones en las cuales la sal se hace circular por bombeo, regresando la sal en cascada dentro de la zona de temple. Un chorro fino de agua, controlado, puede ser inyectado en la cascada de la sal de retorno.*
  
- 3.- *El baño de austempering puede ser conservado saturado de humedad, introduciendo vapor directamente dentro del baño. La línea de vapor sería controlada y equipada con una descarga para evitar el vacío condensado directamente dentro del baño.*

*El agua nunca deberá ser agregada al baño de sal directamente en un recipiente.*

*También es posible usar plomo fundido como medio de enfriamiento para el austempering, aunque su uso está restringido por el elevado costo inicial, y por los problemas que su alta densidad presenta, además de que después de cierto tiempo*

requiere protección contra la oxidación.

f) *La temperatura del baño .*

*El control de la temperatura del baño es importante en el tratamiento de austempering, ya que de ella depende situarse en la zona de transformación deseada, y deberá ser un poco más alta que la correspondiente al punto Ms (iniciación de transformación martensítica). Pues la característica principal de este tratamiento es precisamente no cruzar a la zona de transformación martensítica. Además de elegir dentro de la zona de transformación bainítica una temperatura específica con el fin de obtener ciertas propiedades requeridas en las piezas a tratar. Por lo anteriormente dicho se verá que en cuanto se tengan rango de variación más pequeños en el control de la temperatura del baño, mejores serán los resultados obtenidos.*

*La temperatura del baño determina las durezas obtenidas en las piezas.*

*Normalmente se permite una variación en la temperatura del baño de  $\pm 10^{\circ}$  F.* Sin embargo, cuando la variación

es mayor que  $\pm 10^{\circ} F$ , es causa de variaciones inaceptables en la dureza de las piezas sometidas a este tratamiento.

g). *Tiempo de inmersión*

*El tiempo de inmersión en el baño caliente es importante en el austempering, puede y debe ser suficiente para que la transformación de la austenita en el nuevo constituyente microscópico sea completa.*

*Si el tiempo de permanencia en el baño caliente es menor que el necesario, la transformación del constituyente deseado no sería completa y podría anular el objeto de todo el proceso.*

*Una permanencia muy prolongada en el baño no afecta mucho las propiedades mecánicas; pero sí incrementa los costos de operación.*

*Este tiempo suficiente para la completa transformación estructural será diferente para cada tipo de acero. Y dependerá de la sección de la pieza sometida al tratamiento, de la temperatura del baño y del grado de agitación.*

*h). Agitación del baño*

*Puede ser una variable significativa en este tratamiento del austempering, porque afecta la velocidad de enfriamiento. Removiendo mecánicamente, bombeando y con agitación de aire, se están poniendo en práctica operaciones específicas para lograr aumentar la velocidad de enfriamiento.*

*De esta manera se requiere de instalaciones más costosas. Pero se puede tratar en ocasiones alguna pieza relativamente grandes, ya que se favorece el rápido enfriamiento de este tipo de piezas.*

*- Aceros para este tratamiento*

*En general la mayor parte de los aceros puede ser sometida a este tratamiento. A continuación se mencionan algunos de ellos:*

- . Aceros al carbón conteniendo de 0.4 a 1.06% C y un mínimo de 0.6% de Mn.*
- . Aceros de alto carbón conteniendo más de 0.9% de C y un poco menos que 0.6% de Mn.*
- . Ciertos aceros al carbón (semejantes al 1041) con un contenido de carbón menor al 0.5%; pero con un contenido de manganeso entre 1.0 y 1.65%.*
- . Ciertos aceros de baja aleación (semejantes a los aceros de la serie 51XX) conteniendo más de 0.3% de C.*
- . Aceros de la serie 13XX a 40XX conteniendo porcentajes de carbón de 0.4 o mayores.*

*Algunos aceros que tienen suficiente carbón o contenido de aleación para ser endurecidos, resultan imprácticos para el austempering porque:*

- a) El tiempo disponible para salvar el principio de la nariz de la curva del diagrama "T-T-T" es menor de un segundo. En consecuencia, es imposible que parte de la sección en el baño caliente no contenga formación de perlita;*
  
- b) Porque requiere de largos períodos de tiempo para su transformación, ocasionando con ello un aumento excesivo en costos y disminución de productividad.*

- *Aplicaciones*

*El austempering sustituye en muchas ocasiones al temple-revenido, principalmente por las siguientes razones:*

- a) Por obtener mejores propiedades mecánicas (particularmente mayor ductilidad con dureza media).*
- b) Disminuye bastante el nivel de riesgos por rotura, grietas y distorsión.*

*Se aplica generalmente en piezas de secciones pequeñas o partes fabricadas de barras de pequeños diámetros.*

*En la Tabla 1 se pueden ver los resultados obtenidos con un acero de 0.74% de carbono enfriado en un baño a 300°C y mantenido en él durante quince minutos, en comparación con los resultados obtenidos con el mismo acero templado directamente y luego revenido. En la figura 18 se observa que cuando la dureza es de 50 Rockwell-C, la tenacidad de este acero tratado isotéricamente (38 Ft. Lbs.) es notablemente superior a la obtenida con el tratamiento normal de temple y revenido (4.8 Ft. Lbs.).*

<i>AUSTEMPERING</i>	<i>TEMPLE-REVENIDO</i>
<i>Calentar cinco minutos a 790° c.</i> <i>Enfriar en plomo a 300°c.</i> <i>Dejar la probeta quince minutos en el baño</i> <i>Enfriar en agua</i>	<i>Calentar cinco minutos a 790°c.</i> <i>Templar enfriando en agua a 21° c.</i> <i>Revenir 30 minutos en plomo a - - 315° c.</i> <i>Enfriar en agua</i>
<i>Dureza Rockwell-C 50.4</i> <i>Resistencia 198 Kg./mm<sup>2</sup></i> <i>Límite de elasticidad 90</i> <i>Alargamiento 1.9%</i> <i>Estricción 34.5%</i> <i>Resiliencia 9.5 KGM/cm<sup>2</sup></i>	<i>Dureza Rockwell-C 50.2</i> <i>Resistencia 170 Kg/mm<sup>2</sup></i> <i>Límite de elasticidad 107</i> <i>Alargamiento 0.3%</i> <i>Estricción 0.7%</i> <i>Resiliencia 1.25 KGM/cm<sup>2</sup></i>

Resistencia al choque Ft-lbs <sup>- 47 -</sup>

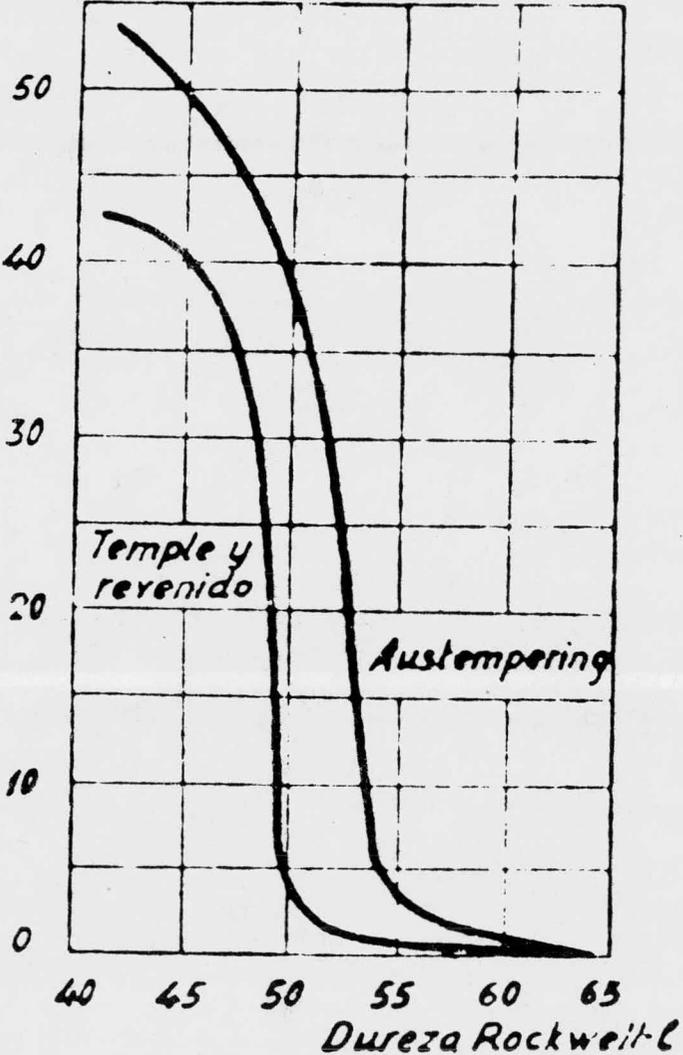


FIGURA 18

Resistencia al choque de redondos de 5 mm. de acero de 0.71% de C, después del temple y revenido o después de un tratamiento isotérmico en el que han quedado con durezas de 40 a 65 Rockwell-C.

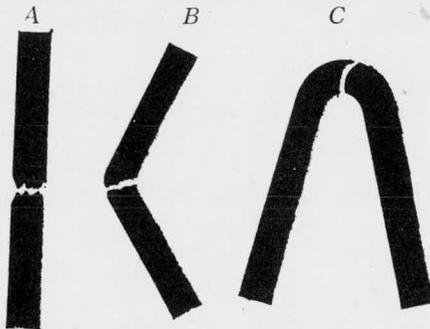
*En la figura 19 se puede ver lo que sucede al romper tres redondos de 8 mm. de acero con 0.90% de carbono, que después del austempering han quedado con una dureza de 50 Rockwell-C.*

*Por tracción se obtiene una estricción notable para el grado de dureza del acero. Por choque dobla antes de romper y tiene bastante tenacidad, y en el ensayo de plegado dobla 160° antes de romper, mientras que un acero templado de la misma dureza se rompe en los tres ensayos como el cristal.*

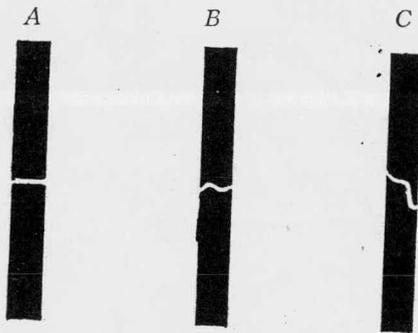
A. - Ensayo a la tracción

B. - Ensayo al choque

C. - Ensayo de doblado



*Austempering 50 Rc*



*Temple y revenido convencional 50 Rc*

FIGURA 19

*Probetas de acero al carbono (0.90%), sección de  
8 mm. de diámetro con el mismo grado de dureza*

*50 Rc*

*CAPITULO II*

*MARTEMPERING*

## MARTEMPERING

### - Generalidades

*Este tratamiento al igual que el austempering ha tenido bastante desarrollo en la elaboración de piezas y herramientas de secciones no muy grandes, las cuales debían quedar con estructura de martensita revenida, durezas elevadas, y características mecánicas superiores a las obtenidas mediante el temple-revenido convencional.*

*El martempering no debe confundirse con el austempering. En este último, el acero se mantiene en el baño caliente un tiempo suficientemente largo como para que la austenita se descomponga y se convierta en otro componente estructural determinado, según sea la temperatura de transformación que se fije. En el martempering, en cambio, el acero debe permanecer en el baño caliente el tiempo suficiente para conseguir que toda la masa del acero (superficie-núcleo), alcance e iguale la temperatura del baño antes de que se efectúe la transformación estructural.*

*El martempering o temple discontinuo es el clásico temple que se interrumpe antes de que la curva de enfria-*

*miento rebase el punto Ms (iniciación de la transformación martensítica), para posteriormente ser enfriado al aire.*

*Como la fase final del enfriamiento es relativamente lenta, y es en ésta en la que se realiza la transformación martensítica, la formación de martensita ocurre uniformemente, casi al mismo tiempo en el centro y superficie de la pieza, durante el lapso que dura el enfriamiento, y a temperatura ambiente.*

*En esta forma se logra reducir las tensiones residuales, porque las mayores variaciones térmicas ocurren cuando el acero se encuentra en condición de relativa plasticidad austenítica. Se logra, asimismo, minimizar las deformaciones, y proveer un control dimensional, porque las variaciones dimensionales son más uniformes.*

- *Descripción del proceso*

*Este tratamiento consiste en calentar el acero a una temperatura superior a la crítica (Ac3) y mantenerlo el tiempo suficiente para que se efectúe la completa austenización. Luego se enfría en un baño caliente, esto es, en sales o plomo fundido cuya temperatura suele y debe oscilar entre 200<sup>o</sup> y 300<sup>o</sup>c. Esa temperatura debe ser superior al punto Ms con el que comienza la formación de la martensita.*

*El material debe permanecer en el baño caliente tanto tiempo como sea suficiente para conseguir que toda la masa del acero, incluido el centro de la pieza, alcance e iguale la temperatura del baño. No se prolonga demasiado la permanencia con objeto de evitar que se inicie la transformación en ningún punto. Luego la pieza se enfría al aire, con lo que se obtiene una estructura martensítica con muy pocas tensiones residuales.*

*La martensita primaria obtenida en el curso de la transformación deberá ser revenida, para transformarse luego en martensita secundaria, siempre más estable y tenaz.*

*Es necesario que el primer enfriamiento en el martempering sea suficientemente rápido como para que la curva de enfriamiento no sea cortada en la nariz de la "S" en ningún punto, pues si lo hiciera, parte de la austenita se transformaría en otros constituyentes, y al llegar a la zona de formación de la martensita tendríamos como resultado que parte de la masa no sería realmente ya austenita y no podría transformarse (figura 20).*

*Es muy importante que la temperatura del baño sea próxima y superior a la de la línea Ms, que, de ser inferior, parte de la austenita de la periferia se transformará en martensita antes que el resto de la austenita del centro, con lo cual el proceso no es correcto.*

*Para efectuar el martempering en piezas de un acero determinado, debe conocerse previamente la curva de la "S" del acero. Especialmente la posición de su nariz o de sus narices, así como la temperatura correspondiente a la línea Ms y el tiempo necesario para que se inicie la transformación a una temperatura ligeramente superior a la correspondiente a la línea Ms y debe corresponder, asimismo, a la que va a*

utilizarse en el baño de sales.

La situación de la línea Ms, como se mencionó en el capítulo anterior, varía bastante en algunos casos con la temperatura de austenización.

Como puede observarse en la tabla número 2, que se refiere a un acero con 1.10% de carbono y 1.80% de cromo, al elevarse la temperatura de austenización desciende la temperatura correspondiente a la línea Ms.

Temperatura de austenización	Temperatura Ms
850 <sup>o</sup> c.	229 <sup>o</sup> c.
925 <sup>o</sup> c.	151 <sup>o</sup> c.
1,035 <sup>o</sup> c.	107 <sup>o</sup> c.

Tabla 2

Influencia de la temperatura empleada para la austenización de un acero de 1.10% c y 1.80 Cr sobre la temperatura correspondiente a la línea Ms

Temperaturas

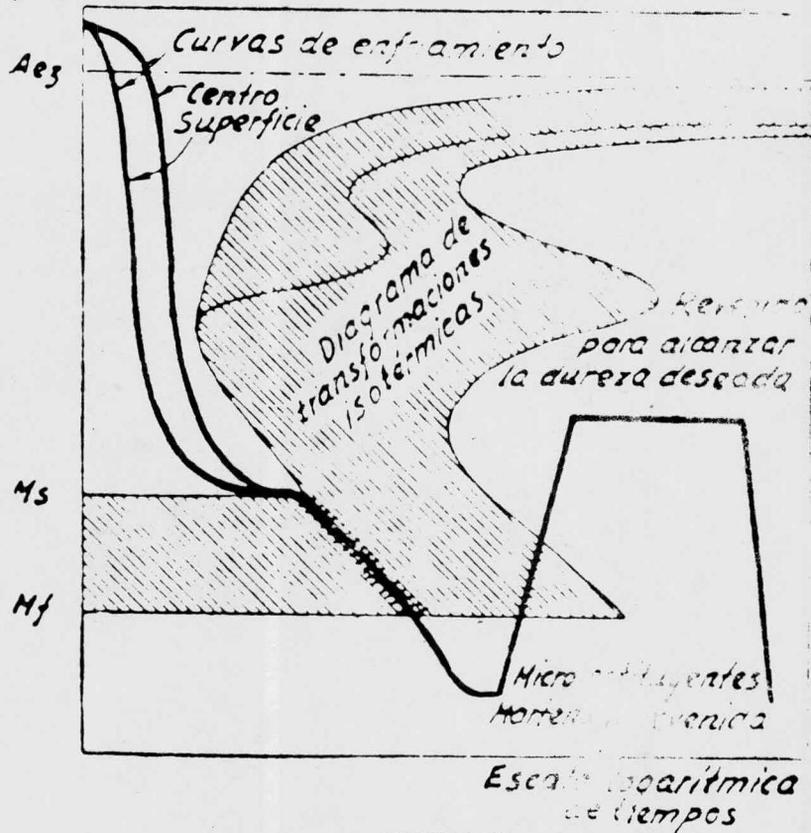


FIGURA 20

Representación esquemática del Martempering

- *Factores que intervienen en el martempering*

- a). *Diagramas T-T-T*
- b). *Composición química*
- c). *Tamaño de grano*
- d). *Sección de la pieza*
- e). *Medio de enfriamiento*
- f). *Temperatura del baño*
- g). *Tiempo de inmersión*
- h). *Agitación del baño*

a). *Diagramas T-T-T*

*Como se dijo en el capítulo anterior, existen varios métodos para la determinación de estos diagramas o curvas de la "S". Se hizo mención de dos de los más importantes: el método metalográfico, y el método dilatométrico.*

*Este tipo de diagramas es una guía para la correcta aplicación y dominio de este tratamiento.*

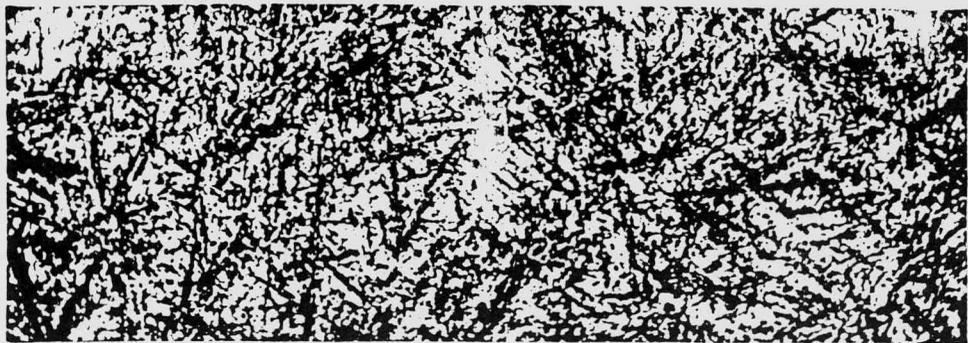
*Sin estos diagramas, sería más complejo el buen desarrollo del tratamiento.*

*Como se vio también anteriormente, los constituyentes microscópicos que aparecen en las transformaciones isotérmicas - de la austenita de acuerdo con la teoría de H. Jolivet, se dividen en tres zonas principales. El constituyente microscópico que debe aparecer en este tratamiento corresponde al situado en la zona inferior de los diagramas de transformaciones isotérmicas de la austenita.*

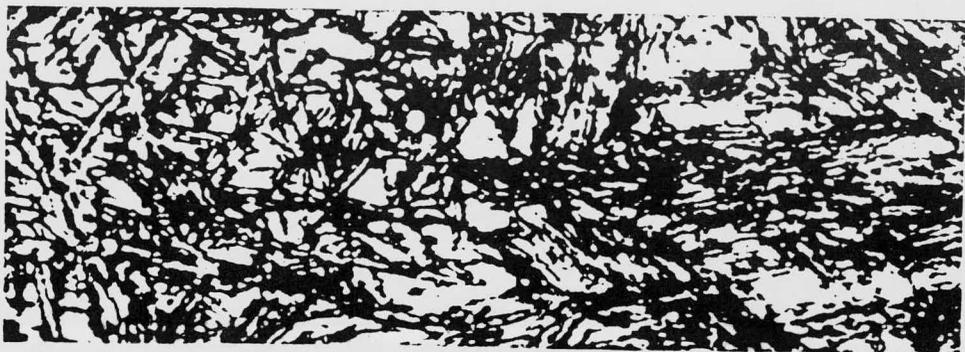
### *Zona Inferior*

*Cuando la austenita, durante el enfriamiento, llega a cierta temperatura que depende de la composición del acero, y que generalmente se encuentra en la zona de 350<sup>o</sup> a 50<sup>o</sup> c., se inicia la transformación en martensita. El proceso de formación de las agujas de martensita es completamente distinto a los citados anteriormente. Es casi instantáneo, y no existen períodos de nucleación y crecimiento. Hay un rapidísimo cambio de disposición de los planos atómicos de la austenita, transformándose la retícula cúbica de caras centradas del hierro gamma, en martensita de retícula tetragonal, de cuerpo centrado, el que contiene pequeñas cantidades de carbono en los espacios intersticiales (figura 21)*

*Después de los carburos y de la cementita, es el constituyente más duro de los aceros. Tiene una dureza de 50 a 65*



X 100



X 500



X 1,000

Figura 21

*Agujas de martensita sobre un fondo blanco de austenita*

*Rocwell-C. Presenta un aspecto marcadamente acicular, formando agujas en zigzag, con ángulos de  $60^{\circ}$ .*

*La martensita, al ser ligeramente calentada o revenida, se oscurece más y presenta muy destacadas las formas y detalles de sus agujas.*

*b). Composición química*

*En este tratamiento, al igual que en el austempering, la composición química de los aceros tiene gran influencia, pues modifica la situación y forma de la curva en los diagramas - - "T-T-T", haciendo variar las condiciones de realización del tratamiento. Modifica los tiempos de iniciación y de permanencia en la transformación, así como las temperaturas de autenización y la correspondiente a la línea Ms.*

*Por lo expuesto, deberá considerarse la composición química para elegir la temperatura de austenización, y la correspondiente a la línea Ms.*

Como se ha afirmado anteriormente, en general, al aumentar el contenido de aleación, se retrasa el comienzo de las transformaciones y es mayor el tiempo necesario para que se completen. Por consiguiente, varía la velocidad crítica de temple.

c). *Tamaño de grano*

Afecta la situación de la curva de la "S", como se vio anteriormente. Su efecto es semejante al de la composición química. Al aumentar el tamaño de grano de los cristales, se retrasa el comienzo y se retrasa el fin de la transformación, desplazándose la curva de la "S" hacia la derecha. Con esto varía la velocidad crítica de temple.

En el martempering debe tomarse en cuenta el tamaño del grano del acero. De esta manera se tiene situada la curva de la "S" y por ello se conoce la velocidad crítica del temple. Para lograr un buen desarrollo de este tratamiento debe hacerse lo anterior.

Existe cierta relación entre la tenacidad de los aceros y el tamaño de grano. Siempre han sido preferibles los aceros de grano fino porque las herramientas y piezas fabricadas con esos aceros tienen mayor tenacidad que las fabricadas con acero de

*grano grueso.*

*Los resultados comparativos que se obtienen con aceros de la misma composición y diferente tamaño de grano se dan en la siguiente tabla.*

<i>Resultados</i>	<i>Grano Fino</i>	<i>Grano Grueso</i>
<i>Templabilidad</i>	<i>Profundidad pequeña</i>	<i>Mayor profundidad</i>
<i>Tenacidad para la misma dureza</i>	<i>Mayor</i>	<i>Menor</i>
<i>Deformaciones en el temple</i>	<i>Pocas</i>	<i>Muchas</i>
<i>Grietas</i>	<i>Pocas</i>	<i>Bastantes</i>
<i>Tensiones residuales</i>	<i>Pocas</i>	<i>Bastantes</i>
<i>Maquinabilidad en estado recocido</i>	<i>Baja</i>	<i>Alta</i>

*Tabla 3*

*Influencia del tamaño de grano en las características de los aceros*

*El tamaño de grano auténtico de los aceros se modifica al elevarse la temperatura y prolongarse el tiempo de permanencia. En la figura 22 se ve cómo en los aceros 3 y 4, a partir de 800 ° C, al aumentar la temperatura, crece progresivamente el tamaño de grano.*

x 100 granos por pulgada cuadrada - 62 -

Tamaño de grano

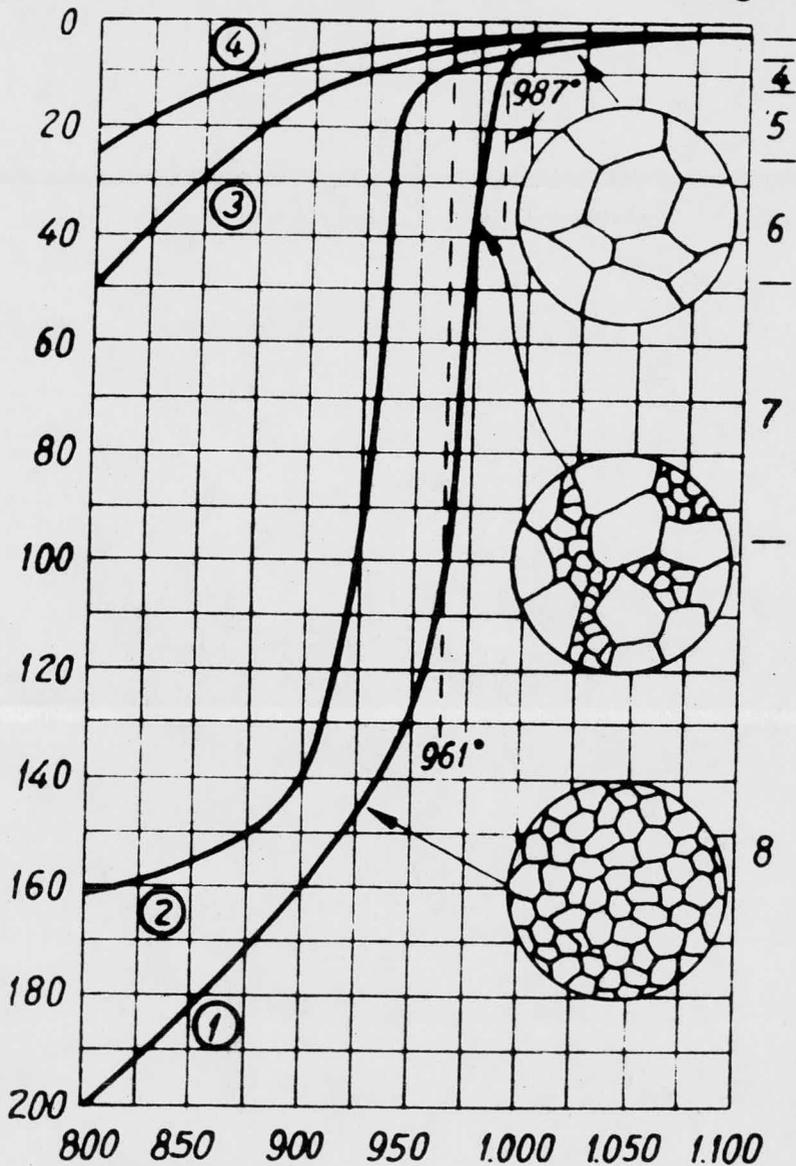


Figura 22  
Crecimiento del tamaño de grano en dos aceros de grano grueso y en dos de grano fino, al ser calentados a diversas temperaturas durante 1 Hr.

Temperatura de normalización

*En la figura 22 se ve que cuando el acero 1 alcanza - - 961 ° C aproximadamente, se inicia un rápido crecimiento del tamaño de los cristales. A 975 ° C aparecen ya cierto número de cristales gruesos que crecen y se desarrollan a expensas de los granos finos.*

*Cuando se llega finalmente a 987 ° C, todos los cristales del acero son ya gruesos.*

*Por tanto, en el acero 1, el grano austenítico es fino a temperaturas inferiores a 961 ° C. Hay mezcla de granos finos y gruesos entre 961 ° y 987 ° C, y el grano es grueso a temperaturas superiores a 987 ° C.*

*d). Sección de la pieza*

*El tamaño de la pieza es un factor por considerar en el martempering, pues al ir aumentando la sección, se tienen velocidades de enfriamiento cada vez menores en el - centro de la pieza.*

*En el momento en que la velocidad de enfriamiento de algún punto de la pieza es menor que la velocidad crítica de*

*temple para ese acero, se cortará la nariz de la curva en algún punto del diagrama "T-T-T" correspondiente a ese acero. En consecuencia tendremos la formación de estructuras blandas en los puntos o parte de la pieza que no superó la velocidad crítica de temple.*

*Una de las condiciones más importantes que deben cumplirse en el martempering es que, durante el primer enfriamiento de la temperatura de austenización a la temperatura del baño no debe cortarse la nariz de la curva de la "S" del acero en cuestión. Cuando esta condición no se cumple, el tratamiento no se realiza satisfactoriamente.*

*e) . Medio de enfriamiento*

*Como se vio anteriormente, el medio de enfriamiento puede variar la velocidad de enfriamiento de las piezas de acero en los tratamientos térmicos.*

*Las sales fundidas y aceite caliente son ampliamente usados como medio de enfriamiento en el martempering. Algunos factores deberán ser considerados como importantes entre sales*

y aceite caliente. La temperatura de operación es un factor decisivo.

Los aceites para martemperint son usados a 200° C., y algunas veces hasta 232° C, mientras que las sales fundidas son utilizadas generalmente en un rango de 200° a 400° C.

La sal más comúnmente usada para el martempering tiene la siguiente composición:

Nitrato de potasio	50-60%
Nitrito de sodio	37-50%
Nirato de sodio	0-10%

Tiene un punto de fusión aproximado de 138° C. Puede ser usada en un rango de trabajo de 160° C, a 540° C. Generalmente esta sal no es usada para temperaturas de operación abajo de 175° C, en este tipo de tratamientos.

La fuerza de enfriamiento de la sal, agitada a 205° C., es semejante a la del aceite agitado, convencional, de temple.

*Cuando se agrega agua a la sal se logra un incremento en la fuerza de enfriamiento.*

*Ventaja de la sal al comparársele con el aceite para mar-tempering:*

- 1.- La viscosidad de la sal cambia solamente un poco en un rango muy amplio de temperatura.*
- 2.- La sal retiene la estabilidad química. Así que la única necesidad que se presenta y obliga a reemplazarla es la pérdida por arrastre.*
- 3.- La sal tiene un amplio rango de temperatura de operación.*
- 4.- La sal es fácilmente lavada de las piezas con agua natural.*
- 5.- Requiere de menor tiempo para piezas de trabajo que alcanzan la temperatura de equalización de la sal.*

*Desventajas de la sal, si se le compara con el aceite.*

- 1.- La sal tiene peligro de explosión.*
- 2.- Costo inicial, manejo, y equipo para su uso.*

*Los aceites usados para el martempering son mejores que el aceite convencional de temple, pues tienen mayor capacidad de enfriamiento en la etapa inicial de templado.*

*El aceite de temple requiere de manejo especial cuando es usado en un rango de 95<sup>0</sup> a 232<sup>0</sup> C. Debe filtrarse y aproximadamente cada seis meses debe analizarse.*

*Ventajas del aceite comparado con la sal, para el martempering.*

- 1.- El aceite se maneja más fácilmente a la temperatura ambiente.*
- 2.- Sufre menor pérdida por arrastre.*
- 3.- Es compatible con todas las sales de austenización.*

*Desventajas que presenta el aceite frente a la sal.*

- 1.- El aceite es limitado a una temperatura máxima de operación de 450<sup>0</sup> C.*
- 2.- El aceite se deteriora con el uso requiriendo un control más riguroso.*
- 3.- El aceite caliente o frío es un peligro junto al fuego.*

f). *Temperatura del baño*

*Es importante controlar la temperatura del baño en este tratamiento porque no debe permitirse que la temperatura del baño sea menor a la correspondiente a la línea Ms. Esto, para evitar que algunas partes de la pieza sufran transformación martensítica. Recuérdese que el objetivo principal de este -- tratamiento es igualar la temperatura del centro y la de la superficie de la pieza con la del baño, sin que se lleve a cabo - ninguna transformación, hasta que se retiren del baño las piezas al aire. Entonces se iniciará la transformación martensítica.*

*Como se mencionó anteriormente, en cuanto se logren - rangos de variación más pequeños en el control de temperatura, mejores serán los resultados obtenidos en las piezas tratadas de esta manera.*

g). *Tiempo de inmersión*

*Es importante controlar el tiempo en el baño caliente, - pues puede ser suficiente para conseguir que toda la masa del acero, incluido el corazón de la pieza, iguale la temperatura del baño.*

*Si el tiempo de permanencia en el baño es menor del necesario para igualar las temperaturas pieza (centro y superficie)-baño, se tendrá una transformación no uniforme. Aclarando: la superficie de la pieza se transforma antes que el centro, con lo que se ocasionan mayores tensiones en la pieza y, por tanto, un tratamiento deficiente.*

*Cuando se prolonga demasiado la permanencia en el baño, se inicia la transformación en la zona superior a la de transformación martensítica, con lo que se provoca un tratamiento incorrecto, ya que la transformación en el mantempering debe efectuarse en la zona de transformación martensítica.*

*El tiempo de inmersión será diferente para cada tipo de acero, sección de la pieza, temperatura y grado de agitación del medio de enfriamiento.*

#### *h). Agitación del baño*

*Debe considerarse la agitación del baño caliente en el martempering, pues al igual que en el austempering, modifica la velocidad de enfriamiento.*

*Como ya se explicó, mediante agitación mecánica, por bombeo y por agitación con aire se logra aumentar la velocidad de enfriamiento del baño.*

*El incremento en costo que causa este equipo es, justificado por el tratamiento de piezas relativamente grandes.*

*Además, se tiene una temperatura más uniforme en el baño caliente.*

- Aceros para este tratamiento

Generalmente en el martempering se aplica más el sistema a aceros aleados que a aceros al carbón. La mayoría de los aceros que son normalmente templados en aceite, puede ser sometida a este tratamiento.

Algunos aceros al carbón que son normalmente templados en agua pueden ser tratados de esta manera en secciones pequeñas, usando agitación vigorosa en el baño caliente.

Aceros que son normalmente usados para el martempering con buenos resultados:

1090	5140
4130	6150
4140	8630
4150	8640
4340	8740
4640	8745

*También se usan para el martempering después de carburizados algunos aceros como:*

3312

5120

4620

8620

9310.

- *Aplicaciones*

*Este tratamiento es aplicado a una gran variedad de piezas de diversos acabados, pesos, dimensiones y composiciones de acero.*

*Se aplica mucho en aceros de cementación (particularmente para flechas delgadas, placas o flejes, piezas pequeñas), porque esas partes, generalmente, son más difíciles de rectificar, y más costosa su fabricación, y son elaboradas con tolerancias dimensionales pequeñas.*

*A continuación se mencionan varios ejemplos en los que es muy recomendable el martempering:*

- 1.- Para la fabricación de los engranajes del mecanismo diferencial de automóviles, se utilizaba en un taller el procedimiento clásico de cementación con temple en aceite. Las piezas eran fabricadas con acero cromo-molibdeno de: C = 10%; Cr = 1.05% y - - Mo = 0.20%. Eran cementadas a 900<sup>o</sup> C, y después templadas primero a 850<sup>o</sup> y luego a 780<sup>o</sup> c, enfriando*

do en ambos casos en aceite. Se utilizaba además una herramienta especial para evitar las deformaciones. Sin embargo, éstas producían en un 75% de las piezas las no deseadas variaciones, apareciendo esas variaciones de 0.2 a 0.6 mm., que hacían necesario enderezar las piezas a un alto costo, y muchas de ellas se inutilizaban por agrietamiento.

En cambio, con el uso del martempering con baños de sales calientes a 200<sup>o</sup> C, en lugar de aceite, para el enfriamiento, se obtuvieron resultados muy notables. Las deformaciones medias no pasaron de 0.1 mm. El proceso para enderezar ha sido suprimido. Se han reducido los excesos para el rectificado, y se obtienen durezas De 63 a 65 Rockwell-C, iguales o ligeramente superiores a las obtenidas mediante el temple en aceite.

- 2.- En la fabricación de troqueles de forma complicada, con partes delgadas y de gran longitud, fabricadas con acero cromo-manganeso, se presentaban deformaciones muy importantes, que llegaron a ser, en bastantes casos, superiores a lo permitido. En cambio, con el

*martempering, usando los baños de sales para el enfriamiento, se resolvió el problema, pues las deformaciones eran casi inapreciables.*

*Ensayando diferentes medios de enfriamiento con durezas casi similares, se obtuvieron, partiendo del martempering, las siguientes deformaciones medias:*

<i>Agua salada</i>	<i>- 0.3 mm.</i>
<i>Aceite a 20<sup>o</sup> C</i>	<i>- 0.06 mm.</i>
<i>Aceite a 200<sup>o</sup>C</i>	<i>- 0.05 mm.</i>
<i>Baño de sales a</i>	
<i>200.<sup>o</sup> C</i>	<i>- 0.015 mm.</i>

*Estas cifras revelan la gran ventaja que ofrece el enfriamiento en baño de sales sobre los otros medios de enfriamiento.*

*CAPITULO III*

*PARTE EXPERIMENTAL*

PARTE EXPERIMENTAL

Las pruebas de austempering y martempering se desarrollaron en 4 tipos de aceros (4140, 9840, W1 y W2), cuyo análisis químico se da a continuación:

		ACERO			
A	(%)	4140	9840	W1	W2
n	C	0.42	0.40	0.90	1.0
ā	Mn	0.7	0.7	0.3	0.3
l	Si	0.25	0.25	0.2	0.25
s	P	0.04	0.04	0.04	0.04
i	S	0.04	0.04	0.05	0.05
s	Cr	1.0	1.0	-	-
Q	Ni	-	1.0	-	-
u	Mo	0.20	0.20	-	-
ī	V	-	-	-	0.1
m					
i					
c					
o					

Se partió de redondos de 1"Ø (Diámetro), de los cuales se prepararon probetas para cada acero, de 7/8" Ø (diámetro) con longitudes de 1/8 a 7/8", con diferencia entre cada una de 1/8".

*Las probetas así preparadas fueron sometidas a un cobrizado electrolítico, como protección para la descarburación durante el tratamiento.*

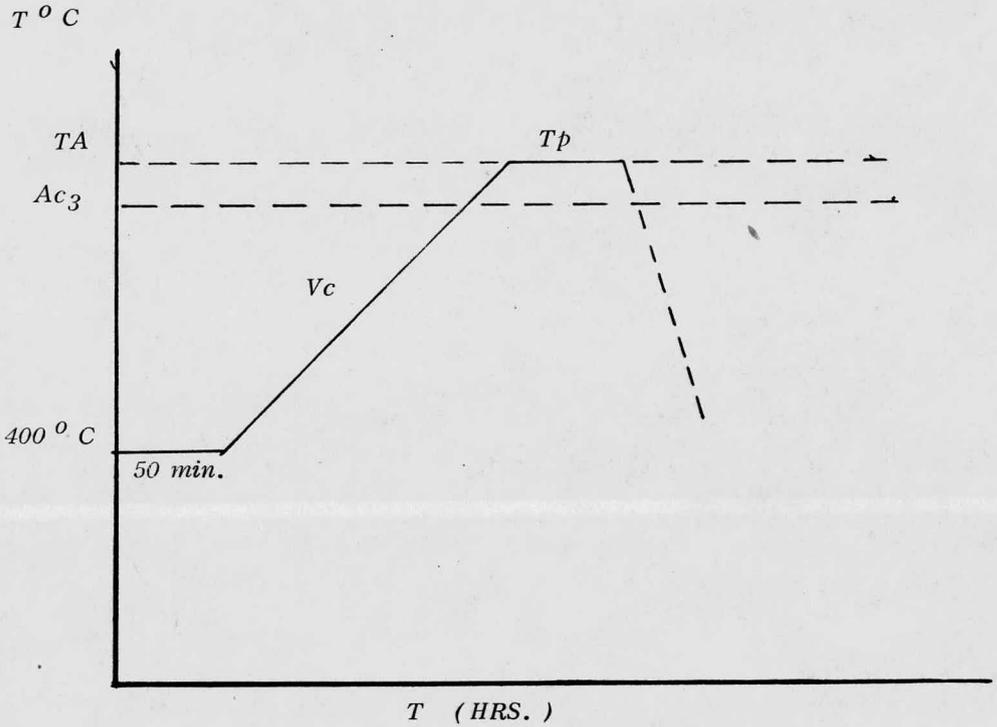
*El material a tratar se encontraba en estado recocido con segregaciones e inclusiones.*

*Por tanto, se procedió a dar dos recocidos de la siguiente manera:*

*Primer recocido, de homogenización química, con enfriamiento lento (25° C/Hr).*

*Segundo recocido, a temperatura adecuada a su composición, para afinar el tamaño de grano con enfriamiento lento (25° C/Hr).*

A continuación se da el ciclo térmico para los aceros durante el calentamiento



$T_a$  : Temperatura de austenización

$A_{c3}$  : Punto crítico final durante el calentamiento

$V_c$  : Velocidad de calentamiento

$T_p$  : Tiempo de permanencia

Se calculó el punto crítico final durante el calentamiento ( $Ac_3$ ) y la temperatura de austenización ( $T_a$ ), para cada acero:



(Según ecuaciones de Andrews)

$$Ac_3 = 910 - 203 (\sqrt{\%C}) - 15.2 (\%Ni) + 44.7 (\%Si) \\ + 104 (\%V) + 31.5 (\%Mo) + 13.1 (\%W) \\ - 30 (\%Mn) - 11 (\%Cr) = ^\circ C.$$

$$Ac_3 (4140) = 910 - 203 (\sqrt{0.42}) + 44.7 (0.25) + 31.5 (0.20) - \\ 30 (0.7) - 11 (1) = 764 ^\circ C$$

$$Ac_3 (9840) = 910 - 203 (\sqrt{0.40}) - 15.2 (1) + 44.7 (0.25) \\ + 31.5 (0.20) - 30 (0.7) - 11 (1) = 751 ^\circ C$$

$$Ac_3 (W1) = 910 - 203 (\sqrt{0.90}) + 44.7 (0.20) - 30 (0.3) \\ = 717 ^\circ C$$

$$Ac_3 (W2) = 910 - 203 (\sqrt{1.0}) + 44.7 (0.25) + 104 (0.1) \\ - 30 (0.3) = 720 ^\circ C$$

$$T_a = Tac_3 + 40 ^\circ C$$

$$Ta (4140) = 764 + 40 = 804^{\circ} C$$

$$Ta (9840) = 751 + 40 = 791^{\circ} C$$

$$Ta (W1) = 717 + 40 = 757^{\circ} C$$

$$Ta (W2) = 720 + 40 = 760^{\circ} C$$

*Las temperaturas de austenización, de acuerdo con los diagramas Temperatura-Tiempo-Transformación (T-T-T) para cada acero, son las siguientes:*

$$Ta (4140) = 830^{\circ} C$$

$$Ta (9840) = 840^{\circ} C$$

$$Ta (W1) = 790^{\circ} C$$

*Temperatura de austenización (Ta), Velocidad de calentamiento (Vc), y Tiempo de permanencia (Tp), para los tratamientos:*

$$Ta (4140) = 830^{\circ} C$$

$$Ta (9840) = 830^{\circ} C$$

$$Ta (W1) = 780^{\circ} C$$

$$Ta (W2) = 790^{\circ} C$$

*La velocidad de calentamiento (Vc) para aceros al carbono o de baja aleación es de 100<sup>o</sup> C/Hr. En este caso, por tratarse de piezas pequeñas, se utilizó: Vc = 150 C/Hr (para los 4 aceros)*

*El tiempo de permanencia a la temperatura de austenización (Tp) normalmente es de 1 Hr/In. de sección. En este tratamiento se dio el mismo tiempo Tp 1 Hr/In. de sección en los 4 aceros.*

- *Temperatura de transformación en el austempering*

*Para el austempering, en el enfriamiento debe conocerse la temperatura del baño o de transformación, y el tiempo de permanencia a esta temperatura, para la completa transformación.*

*La temperatura de transformación se obtuvo en función de las propiedades físicas y mecánicas deseadas.*

*En este caso, las temperaturas se fijaron en función de las durezas deseadas, con ayuda de los diagramas T-T-T para cada acero:*

<u>Acero</u>	<u>Dureza Deseada</u>	<u>Temperatura de Transformación</u>
4140	43 - 45 Rc	350 ° C
9840	40- 42 Rc	340 ° C
W1	56 - 57 Rc	240 ° C
W2	56 - 57 Rc	240 ° C

*En el caso del W2 se estimó muy semejante al W1,*

*A partir del rango de temperatura de transformación (240 ° - 350 ° C), se utilizó una sal cuya composición le permite*

*trabajar en ese rango.*

*Composición de la sal usada:*

*Na NO<sub>3</sub> - 5%*

*K NO<sub>3</sub> - 55%*

*Na NO<sub>2</sub> - 40%*

*En el diagrama T-T-T para cada acero se estima el siguiente tiempo de transformación en el baño:*

<u>Acero</u>	<u>Tiempo de Transformación</u>
4140	20 minutos
9840	25 minutos
W1	1.5 Horas
W2	1.5 Horas

*Se estimó 1 Kg. de sal suficiente para esta operación, con base en la experiencia.*

## AUSTEMPERING

AISI: 4140, 9840, W1 y W2

- *Procedimiento:*

*Las probetas preparadas, como se mencionó anteriormente, se introdujeron en una mufla (Termolyne 1500), la cual se encontraba a 400 ° C. A tal temperatura se hizo que permanecieran las probetas durante un tiempo de estabilización de 50 minutos.*

*Poco a poco se incrementó la temperatura con una velocidad de 150 ° C/Hr., hasta alcanzar la temperatura de austenización del acero en cuestión. Permanecen a esta temperatura 50 minutos para su completa austenización.*

*Este ciclo de calentamiento es común para los cuatro aceros, a saber, 4140, 9840, W1 y W2. Solamente varían las temperaturas de austenización.*

*Una vez austenizadas, las probetas se retiraron rápidamente de la mufla, se enfriaron por dos segundos agitando en el aire. Esto cuando se trata de los aceros 4140 y 9840. Por sólo un segundo en el caso de los aceros W1 y W2.*

*Los aceros se pasaron al baño de sal fundida, que se encontraba a temperatura de transformación. Permanecieron en el baño el tiempo necesario para su transformación bainítica (tiempo calculado anteriormente para cada acero). Enseguida se retiraron las probetas del baño para ser enfriadas al aire.*

*Para hacer práctico el manejo de las probetas durante el tratamiento, se sujetaron con un alambre en un barrenador que previamente se les taladró.*

### MARTEMPERING

*Para el martempering se utilizó el mismo ciclo térmico durante el calentamiento que el usado en el austempering.*

*Las temperaturas del baño de sal fundida para este tratamiento fueron iguales que las empleadas para el austempering, ya que se encontraban próximas y superiores a las de la línea Ms para cada acero.*

*El tiempo de permanencia a la temperatura del baño, por el cual se buscaba igualar las temperaturas del conjunto de la pieza (centro y superficie)-baño, se calculó a partir del diagrama T-T-T para cada acero. En la experiencia se estimaron los siguientes tiempos:*

<u>Acero</u>	<u>Permanencia en el baño</u>
4140	10 segundos
9840	10 segundos
W1	3 minutos
W2	3 minutos

*En cuanto a la composición y cantidad de la sal utilizada en el martempering, resultó igual que la que se empleó en el austempering, ya que el rango de temperaturas en ambos - - tratamientos fue el mismo. También las dimensiones de las probetas.*

### MARTEMPERING

AISI: 4140, 9840, W1 y W2

#### *- Procedimiento:*

*Las probetas se introdujeron en la mufla (Termolyne - 1500), se austenizaron en la misma forma que en el austempering, ya que se trató de los mismos aceros. Luego se pasaron al baño de sal también en forma similar y a las temperaturas que se utilizaron en el austempering, variando solamente los tiempos de permanencia en el baño, ya que en este tratamiento la permanencia en el baño tiene por objeto igualar las temperaturas del centro y de la superficie de la pieza, y del baño, y se transforma hasta que es retirado del baño, al aire.*

*Los tiempos de permanencia usados fueron los estimados anteriormente.*

*R E S U L T A D O S*

RESULTADOS OBTENIDOS EN EL AUSTEMPERING  
ANTES DEL TRATAMIENTO

<u>Acero</u>	<u>Estado</u>	<u>Fases presentes</u>
4140	Recocido	Ferrita y perlita
9840	Recocido	Ferrita y perlita
W1	Recocido	Perlita y cementita
W2	Recocido	Perlita y cementita

<u>Acero</u>	<u>Dureza</u>
4140	210 Brinel
9840	210 Brinel
W1	200 Brinel
W2	200 Brinel

DESPUES DEL TRATAMIENTO

<u>Acero</u>	<u>Estado</u>
4140	Tratado isotérmicamente (austempering)
9840	Tratado isotérmicamente (austempering)
W1	Tratado isotérmicamente (austempering)
W2	Tratado isotérmicamente (austempering)

<u>Acero</u>	<u>Estructura</u>	<u>%</u>
4140	Bainita	75-85
9840	Bainita	75-85
W1	Bainita	70-80
W2	Bainita	70-80

<u>Acero</u>	<u>Dureza</u>	<u>Foto No.</u>
4140	43 Rc	1
9840	41 Rc	2
W1	55 Rc	3
W2	54 Rc	4



FOTO 1

Acero 4140

Tratamiento: austempering

Austenizado a  $830^{\circ}\text{C}$

Temperatura del baño:  $350^{\circ}\text{C}$

Tiempo en el baño: 20 minutos

Estructura: bainita

Dureza: 43 Rc

Ataque: nital-picral x 450



FOTO 2

Acero 9840

Tratamiento: austempering

Austenizado a  $830^{\circ}\text{C}$

Temperatura en el baño:  $340^{\circ}\text{C}$

Tiempo en el baño: 25 minutos

Estructura: bainita

Dureza: 41 Rc

Ataque: nital-picral x 450

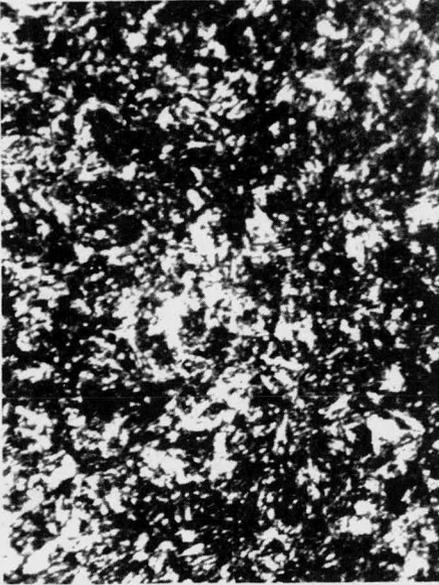


FOTO 3

Acero W1

*Tratamiento: austempering*

*Austenizado a 780 ° C*

*Temperatura del baño: 240 ° C*

*Tiempo en el baño: 1.5 Hrs.*

*Estructura: bainita*

*Dureza: 55 Rc*

*Ataque: nital-picral x 450*



FOTO 4

Acero W2

*Tratamiento: austempering*

*Austenizado a 790 ° C*

*Temperatura del baño: 240 ° C*

*Tiempo en el baño: 1.5 Hrs.*

*Estructura: bainita*

*Dureza: 54 Rc*

*Ataque: nital-picral x 450*

RESULTADOS OBTENIDOS EN EL MARTEMPERING

ANTES DEL TRATAMIENTO:

<u>Acero</u>	<u>Estado</u>	<u>Fases presentes</u>
4140	Recocido	Ferrita y perlita
9840	Recocido	Ferrita y perlita
W1	Recocido	Perlita y cementita
W2	Recocido	Perlita y cementita

<u>Acero</u>	<u>Dureza</u>
4140	210 Brinel
9840	210 Brinel
W1	200 Brinel
W2	200 Brinel

DESPUES DEL TRATAMIENTO

<u>Acero</u>	<u>Estado</u>
4140	Tratado isotérmicamente (martempering)
9840	Tratado isotérmicamente (martempering)
W1	Tratado isotérmicamente (martempering)
W2	Tratado isotérmicamente (martempering)

<u>Acero</u>	<u>Estructura</u>	<u>%</u>
4140	<i>Martensita</i>	75-85
9840	<i>Martensita</i>	75-85
W1	<i>Martensita</i>	70-80
W2	<i>Martensita</i>	70-80

<u>Acero</u>	<u>Dureza</u>	<u>Foto No.</u>
4140	54 Rc	5
9840	52 Rc	6
W1	63 Rc	7
W2	62 Rc	8

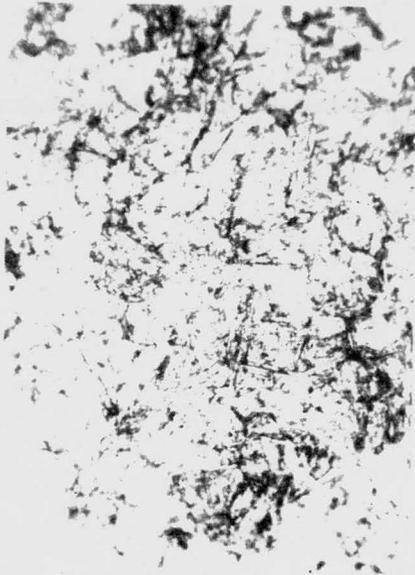


FOTO 5

Acero 4140

*Tratamiento: martempering*

*Austenizado a 830 ° C*

*Temperatura del baño: 350 ° C*

*Tiempo en el baño: 10 segundos*

*Estructura: martensita*

*Dureza: 54 Rc*

*Ataque: nital-picral x 450*

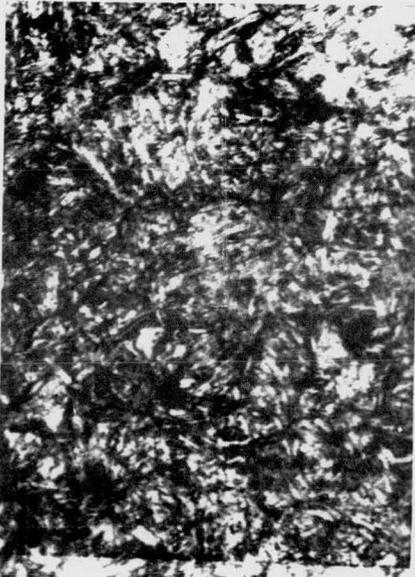


FOTO 6

Acero 9840

*Tratamiento: martempering*

*Austenizado a 830 ° C*

*Temperatura del baño: 340 ° C*

*Tiempo en el baño: 10 segundos*

*Estructura: martensita*

*Dureza: 52 Rc*

*Ataque: nital-picral x 450*



FOTO 7

Acero W1

*Tratamiento: martempering*

*Austenizado a 780 ° C*

*Temperatura del baño: 240 ° C*

*Tiempo en el baño: 3 minutos*

*Estructura: martensita*

*Dureza: 63 Rc*

*Ataque: nital-picral x 450*

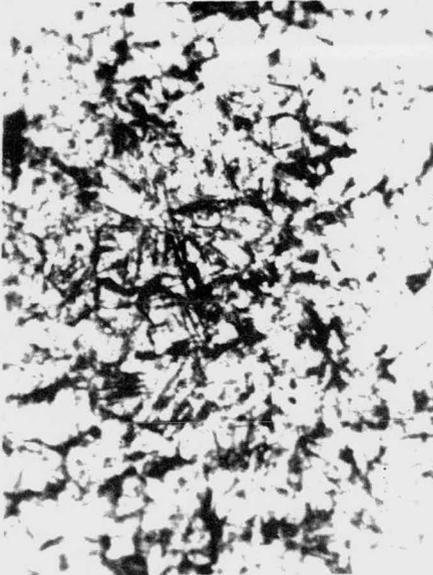


FOTO 8

Acero W2

*Tratamiento: martempering*

*Austenizado a 790 ° C*

*Temperatura del baño: 240 ° C*

*Tiempo en el baño: 3 minutos*

*Estructura: martensita*

*Dureza: 62 Rc*

*Ataque: nital-picral x 450*

## DISCUSION

*El método escogido para proteger las probetas de la decarburación (cobrizado electrolítico) fue efectivo. Esto es: se obtuvo una estructura homogénea de la superficie al centro.*

*En los tratamientos:*

*De un 15 a 30% de la estructura no se logró que se transformara en la deseada, debido a varias razones. Principalmente por no superar la velocidad crítica de temple en el diagrama T-T-T, correspondiente. Por no controlar adecuadamente la temperatura del baño, debido al equipo de trabajo. Tampoco el tiempo de permanencia en el baño, y lo tardado en el manejo de las probetas durante los tratamientos.*

*En el caso de las probetas tratadas por austempering, la razón principal de la falta de transformación de la estructura deseada, fue no enfriar lo suficiente para superar la velocidad crítica de temple en el diagrama T-T-T correspondiente. Por lo que se obtuvo de 15 a 30% de perlita más o menos distribuida.*

*En las probetas tratadas por mantempering, la razón de la falta de transformación de la estructura deseada, fue también falta de enfriamiento para superar la velocidad crítica de temple correspondiente, además de una permanencia excesiva en el baño, por lo que se obtuvo de 15 a 30% de perlita y bainita (perlita en mayor proporción) más o menos distribuidas.*

*De acuerdo con la literatura sobre el porcentaje de estructura deseada, transformada, se sabe que:*

*Generalmente en este tipo de tratamientos se obtienen pequeños porcentajes de estructuras no deseadas. La transformación no se logra al 100%; pero en cuanto más completa es, mejores son los resultados obtenidos.*

## CONCLUSIONES

*Se aplicó el austempering y martempering en las probetas de los siguientes aceros: AISI 4140, 9840, W1 y W2, obteniéndose la estructura deseada en un 80% aproximadamente.*

*El cobrizado electrolítico resultó efectivo como protección para la descarburación.*

*Los puntos críticos en el austempering fueron:*

- . Superar la velocidad crítica del temple en el diagrama T-T-T correspondiente.*
- . Controlar la temperatura del baño homogénea y - - constante.*

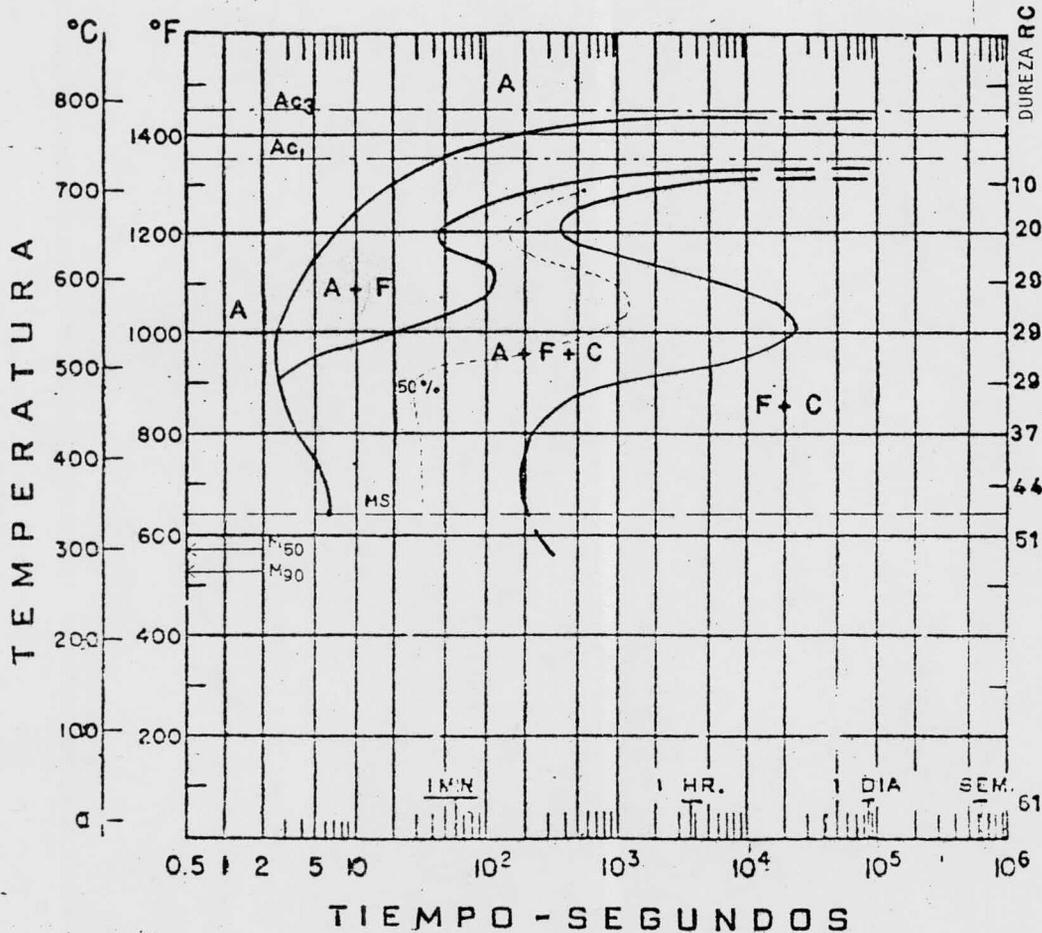
*Los puntos críticos del martempering fueron:*

- . Superar la velocidad crítica de temple en el diagrama T-T-T correspondiente.*
- . Controlar el tiempo de permanencia en el baño.*

*Por lo anterior, es muy importante contar con un equipo adecuado para controlar al máximo los puntos críticos, así como con habilidad práctica para el buen desarrollo de estos tratamientos.*

*DIAGRAMAS "T-T-T"*

*( 4140 - 9840 - W1 )*



4 1 4 0

AUSTENIZADO A 845°C

T.G. 7-8

COMPOSICION

C\_ 0.38-0.43

Mn\_ 0.75-1.00

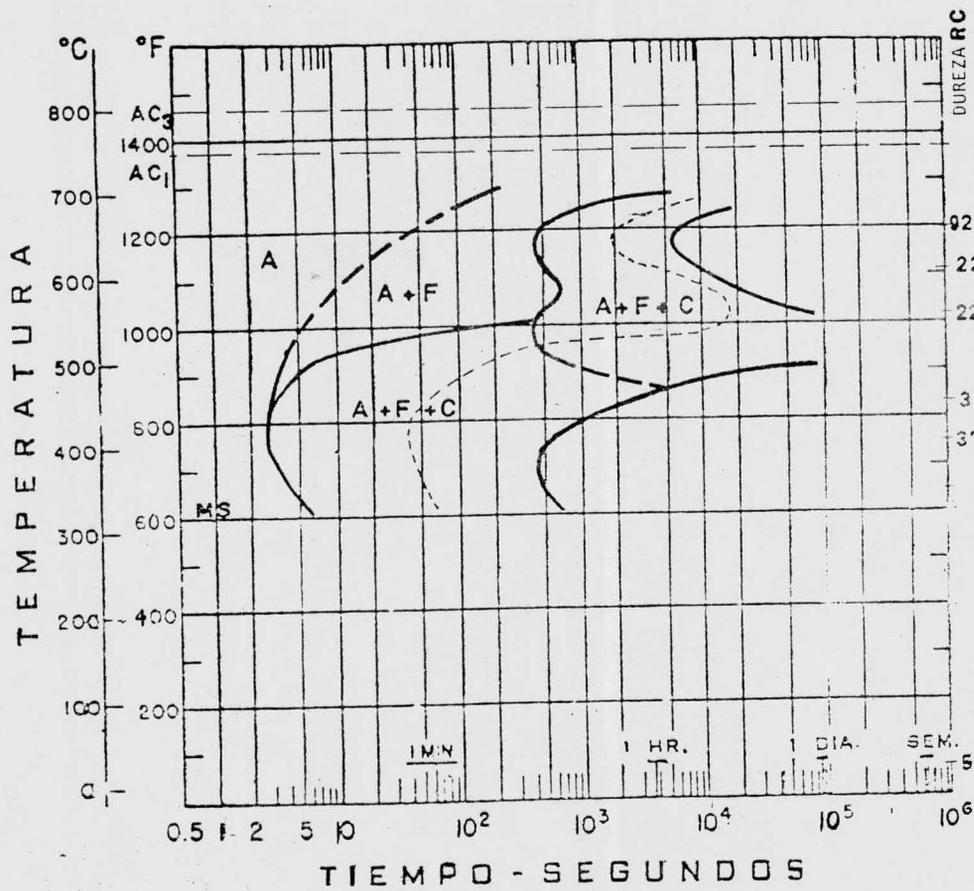
P. Max. 0.035

S. Max. 0.040

Si\_ 0.20-0.35

Cr\_ 0.80-1.10

Mo\_ 0.15-0.25



9840  
 AUSTENIZADO A 850°C  
 T.G. 8.

COMPOSICION  
 C - 0.36 - 0.43  
 Mn - 0.70 - 0.90  
 P. Max. 0.040  
 S. Max. 0.040  
 Si - 0.20 - 0.35  
 Ni - 0.95 - 1.15  
 Cr - 0.70 - 0.80  
 57.5 Mo - 0.20 - 0.30



BIBLIOGRAFIA

*Tratamientos térmicos de los aceros*

*José Apraiz Barreiro*

*Octava edición*

*Metals Handbook Heat Treating, Cleaning  
and Finishing*

*Volumen 2. Octava edición*

*The making, Shaping and Treating of Steel*

*United States Steel*

*Novena edición*

*Heat Treatment of Steels*

*Republic Alloy Steels*

*Tratamientos térmicos de Herramientas de  
Acero*

*Aceros de Llodio, S. A.*

*(Ediciones Urmo, Bilbao, España)*

*Ingeniería Metalúrgica*

*Tomo I 3a. impresión*

*Raymond A. Higgins*

*Cecsa*

*Técnica y Práctica del Tratamiento Térmico  
de los Metales Férreos*

*J. Pascual*

*Editorial Blume*