



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA

**ESTUDIO DILATOMETRICO DE LA AUSTENITA RETENIDA
EN UN ACERO DE HERRAMIENTA**

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P r e s e n t a :

CIRILO NOGUERA SILVA

México, D. F.

1980

M-17999



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE SEGUN EL TEMA

PRESIDENTE: MANUEL GAVIÑO RIVERA

V O C A L : KURT NADLER GUNDESHIMER

SECRETARIO: FRANCISCO A. HERRERA CASTAÑEDA

1er. SUPLENTE: ENRIQUE CURIEL REYNA

2do. SUPLENTE: TERESITA ROBERT NUÑEZ

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

LABORATORIOS DE METALURGA
FACULTAD DE QUIMICA - U.N.A.M.

SUSTENTANTE:

CIRILO NOGUERA SILVA

ASESOR:

FRANCISCO A. HERRERA CASTAÑEDA

A MIS PADRES :

IGNACIA Y APOLINAR, POR EL GRAN
CARIÑO QUE NOS UNE.

A MIS HERMANOS :

ARTURO, ROBERTO, ISRAEL Y WILLIAMS
POR TODO LO QUE HEMOS COMPARTIDO
JUNTOS .

A MI MAESTRO:

FRANCISCO A. HERRERA CASTAÑEDA
COMO TRIBUTO A SU AMISTAD Y AYUDA.

A LA SRA. TERESA Y A ERNESTO
CON TODO MI AGRADECIMIENTO.

A MIS AMIGOS.

P R E F A C I O

En todos los tratamientos de endurecimiento de aceros de herramienta que se practican industrialmente, siempre ha presentado un problema la retención de austenita. Por ello, en este estudio se ha tratado de obtener un método diferente a los ya existentes para su cuantificación, dicho método hace uso de la dilatometría como medio para lograrlo. En el presente trabajo se ha considerado adecuado dividir el estudio en cinco capítulos.

En el primero de ellos se exponen las propiedades y aspectos fundamentales de la austenita retenida.

En el segundo capítulo son expuestos y discutidos los estudios preliminares, necesarios para producir las mejores propiedades del material objeto de estudio.

En el tercero y cuarto capítulos, se presentan y discuten los resultados experimentales, producto de los ensayos dilatométricos es esta la parte medular del estudio y en ella se ha tratado de exponer las implicaciones que tienen las curvas dilatométricas lo más claramente posible.

Por último, en el capítulo cinco, se enumeran los puntos preponderantes resultantes de este trabajo.

Se espera, que este estudio aporte algo interesante y de utilidad práctica para quienes se interesen en este tema, así como en esta parte del saber humano.

CIRILO NOGUERA SILVA

I N D I C E

CAPITULO . . I ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA AUSTENITA RETENIDA

- I.1 Formación de la austenita retenida
- I.2 Estabilización de la austenita retenida
- I.3 Transformación de la austenita retenida
 - I.3.1 Revenido
 - I.3.2 Tratamiento zub-cero
- I.4 Cambios dimensionales

CAPITULO II TECNICA EXPERIMENTAL

- II.1 Equipo utilizado en el desarrollo de este trabajo
- II.2 Especímenes
- II.3 Dimensiones
- II.4 Estudios preliminares
 - II.4.1 Determinación de la temperatura correcta de austenización
 - II.4.2 Revenidos
 - II.4.3 Cuantificación de la austenida retenida
- II.5 Resultados de las pruebas preliminares en las cuales se basaron los ensayos dilatométricos.
 - II.5.1 Resultados de dureza tomadas para diferentes temperaturas de austenización después del temple.
 - II.5.2 Resultados de las durezas para revenidos
 - II.5.3 Resultados de la cuantificación metalográfica
- II.6 Pruebas dilatométricas
 - II.6.1 Bases de la dilatometría
 - II.6.2 Prueba dilatométrica de llegada
 - II.6.3 Técnica de templado
 - II.6.4 Condiciones de trabajo para las curvas dilatométricas

CAPITULO III RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DILATOMETRICAS

III.1 Preambulo

III.2 Curvas dilatométricas

III.2.1 Curva dilatométrica del acero templado en agua

III.2.2 Curva dilatométrica del acero templado en salmuera

III.2.3 Curva dilatométrica del acero templado en aceite

CAPITULO IV DISCUSION DE RESULTADOS

IV.1 Discusión de resultados

IV.2 Diferencias y sus causas

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES PARA PROXIMOS TRABAJOS

BIBLIOGRAFIA

I. ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA AUSTENITA RETENIDA

I.1 Formación de la austenita retenida

Antes de entrar en lo que es el estudio dilatométrico objetivo del presente trabajo, nos surge la pregunta, ¿Que es la austenita retenida? para contestarla empezaremos hablando de lo que es la austenita propiamente dicha.

La austenita es una solución sólida de carbón en hierro gamma (hierro cúbico centrado en las caras), el carbono en este caso ocupa los lugares intersticiales. El hierro gamma puede disolver otros elementos de aleación tales como manganeso, cromo, tungsteno, molibdeno, vanadio cuyos átomos son muy grandes como para introducirse en los hoyos intersticiales y entonces simplemente sustituyen átomos de hierro en el retículo.

Esta solución se presenta en el diagrama de equilibrio hierro - carbono en una basta extensión que es mostrada en la figura 1 como zona austenítica, a los 1153°C. puede disolver un máximo de carbono de 2.03%, esta fase es no magnética, buena conductora del calor y la electricidad (ref. 1).

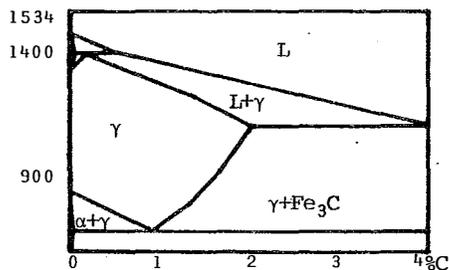


Fig. 1.1. Diagrama hierro carbono

Si bien es cierto, que en los aceros al carbón, la austenita no existe a temperatura ambiente bajo condiciones de equilibrio, una cantidad considerable de ella puede ser retenida mediante un enfriamiento rápido, en aceros de alto contenido de carbón o de muy alta aleación. En algunos aceros de alta aleación, como los inoxidables y los de alto contenido en manganeso, aparece por simple enfriamiento al aire.

Si se templem secciones muy delgadas de aceros de elevado contenido en carbono, desde alta temperatura en agua muy fría, aparecen grandes lagunas blancas de austenida mezcladas con agujas de martensita.

Cuando un acero se temple se tiene una reacción austenita-martensita, esta reacción se distingue de otras del estado sólido porque no envuelve a la nucleación y crecimiento y no requiere difusión atómica sino que es simplemente una transposición cristalina o sea una deformación del retículo acompañada de un cambio volumétrico positivo. En el momento en que se ha formado martensita, cierta cantidad de austenita queda atrapada y no es capaz de incrementar su volumen para transformarse a martensita a esta austenita atrapada entre la martensita se le llama austenita retenida.

La austenita retenida presente un aspecto de lagunas blancas entre las agujas de martensita, el color de aquella después de un ataque es blanco amarillento.

Puesto que no hay difusión, debe esperarse que la austenita retenida tenga la morfología y composición original de alta temperatura (ref. 2).

La cantidad de austenita retenida que aparece en los aceros templados, depende de diferentes factores como: Composición, temperatura de austenización, medio de enfriamiento y tamaño de grano. Esta cantidad de austenita retenida en un acero templado varía generalmente entre 2 y 10% aunque puede ser tan bajo como 1% y tan alto como 50%, dependiendo de los factores mencionados. Por ejemplo, se ha determinado la cantidad de austenita retenida usando la técnica de rayos X en diferentes aceros templados, el porcentaje suele variar entre los siguientes límites:

Aceros de 1% C. y 5% Cr	25 - 35%
Aceros de 1.5% C y 12% Cr	15 - 30%
Aceros rápidos	15 - 25%
Aceros de herramienta de baja aleación	3 - 15%
Aceros al carbono	5 - 10%

Ahora bien, todos los elementos con excepción del cobalto y aluminio, bajan M_s y por tanto hacen aumentar la tendencia de la austenita a ser retenida en la estructura final después de un temple. Un alto contenido de carbón en la austenita, produce un decremento en M_s y un gran porcentaje de austenita retenida. Contrariamente, un alto contenido de carburos libres, elevan M_s y bajan el porcentaje de austenita retenida. Una baja velocidad de enfriamiento, particularmente en el rango $M_s - M_f$, tiende a favorecer la

retención de austenita, así como su estabilización. (ref 1)

I.2 Estabilización de la austenita

Supongamos que estamos en la región de austenización completa en el diagrama TTT que corresponde a nuestro acero, ahora, repentinamente bajamos la temperatura hasta un punto intermedio entre Ms y Mf tal que quede una parte de la austenita sin transformar a martensita. Si nos mantenemos en dicho punto por un espacio prolongado de tiempo, la austenita restante ya no se transformará a martensita cuando lleguemos a la temperatura Mf, excepto una pequeña cantidad se dice entonces, que la austenita se ha estabilizado.

Lo anterior tiene su origen en el hecho de que la fuerza impulsora de la reacción austenita - martensita es el choque térmico producido en el temple, puesto que estamos hablando de una reacción atérmica. Cuando propiciamos una situación como la mencionada, la fuerza impulsora ha sido cesada y obviamente no habrá transformación dando lugar a la estabilización. Si deseamos que la reacción austenita-martensita prosiga, se hace necesario un nuevo enfriamiento a temperaturas por abajo de los cero grados centígrados

I.3 Transformación de la austenita retenida

Como resultado del tratamiento de endurecimiento, se tiene una mezcla de martensita sin revenir, carburos, y austenita retenida, esta estructura no es muy adecuada para una pieza terminada.

La austenita retenida esta en pequeñas cantidades en aceros bajo carbono y baja aleación, no así en aceros más aleados.

Así pues, como tales, tanto la martensita no revenida como la austenita retenida son indeseables. La primera porque tiene una estructura sumamente tensionada que ante cualquier impacto provoca agrietamiento en las piezas de trabajo, además en tales condiciones un calentamiento entre los 100°C. y los 200°C. produce contracciones que en piezas de trabajo no son adecuadas. Por otro lado la presencia de austenita retenida produce un marcado decremento en la dureza máxima obtenible en condiciones de temple, lo cual es ta en contraposición con los fines que se siguen en un tratamiento de endurecimiento.

Para solucionar este problema, se presentan dos alternativas, en los cuales se transforma la austenita retenida en diferentes componentes que estan en función del tratamiento que se escoja. Los tratamientos en cuestión son el revenido y el tratamiento sub-cero, de los cuales se hablará en breve, haciendo incapie en las diferentes estructuras resultantes.

- I.3.1 Revenido.- Posterior al tratamiento de temple, en donde hay un incremento en volumen, la única excepción a esto se presenta si se retiene un exceso de austenita. Durante el revenido ocurren nuevos cambios en volumen. El revenido se puede separar en las siguientes etapas:

Primera etapa: Para aceros de baja y media aleación abajo de los 200°C., las pequeñas reducciones en volumen resultan del cambio de la estructura martensítica. En esta etapa se forma el carburo épsilon.

Segunda etapa: Sucede en esta etapa que la austenita retenida en el temple tiende a transformarse a bainita inferior isotermicamente. La bainita en la estructura junto con la martensita provoca una caída en la tenacidad y conforme la temperatura se incrementa el porcentaje de bainita aumenta. También en esta etapa la martensita se altera debido a la aparición del carburo épsilon que ha necesitado carbón y finalmente cuando aparece la cementita se producirá una nueva contracción. Ahora bien, debido a la reacción austenita retenida - bainita inferior se produce una dilatación en sentido positivo puesto que la bainita tiene un mayor volumen reticular. Al final de esta etapa es posible que queden pequeños porcentajes de austenita retenida que ya no pueden detectarse metalograficamente y que no tienen un gran efecto en la estructura final (ref 1)

Tercera etapa: En esta tercera y última etapa del revenido se disuelve el carburo épsilon y la martensita bajo carbón, el cual encuentra acomodo en las partículas de cementita que se nuclean y desarrollan. Esto provoca una nueva reducción en el volumen.

I.3.2 Tratamientos Zub-cero.- Examinando los diagramas TTT para la mayoría de los aceros de alta aleación se observa que M_f está abajo de los cero grados centígrados, después de la austenización y temple queda un porcentaje de austenita retenida, y para producir un balance adecuado de dureza, tenacidad y resistencia la austenita retenida debe ser transformada.

Para continuar con la transformación austenita martensita se hace necesario propiciar la distorsión del retículo de austenita, la fuerza impulsora será dada por un nuevo choque térmico que va desde la temperatura ambiente hasta muy por abajo de los cero grados centígrados, como es el caso de la inmersión del acero en nitrógeno líquido.

Ha sido encontrado, que el método más adecuado para la transformación de austenita en todos los aceros de media y alta aleación es un tratamiento zub-cero, previo al tratamiento de alivio de tensiones, este tratamiento ayuda al acero a cruzar la temperatura M_f y por lo tanto a transformar la austenita retenida. Esto refuerza el efecto de endurecimiento y se alcanza la máxima dureza y estabilidad dimensional (ref. 1).

I.4 Cambios dimensionales

Cuando un acero ha sido endurecido, hay algún incremento en volumen. Posteriormente cuando es revenido, la estructura de temple se transforma y los cambios volumétricos pueden ser seguidos por aparatos de precisión.

Durante el revenido la martensita se descompone para formar ferrita y cementita, lo cual implica que hay un continuo decremento en el volumen. Como resultado del revenido a altas temperaturas, el volumen recupera su valor original previo al endurecimiento. En vista de que no podemos tener un valor inicial de 100% martensita antes del revenido, la curva continua de la figura 1.2 no es representativa de los cambios en volumen que ocurren en los grados de aceros empleados en ingeniería.

Las curvas interrumpidas graficadas en la figura 1.2 que representan incrementos en volumen durante las distintas etapas del revenido, son solo esquemáticos, por tanto el diagrama entero es una representación del comportamiento de los diferentes aceros.

La austenita retenida, la cual en los aceros bajo carbono y aceros baja aleación es transformada a bainita resultando un incremento en volumen. Debido a la relación que las transformaciones tanto de la martensita como la austenita tienen con la temperatura de revenido, toman lugar en el revenido aumentos o contracciones en volumen.

Cuando revenimos aceros de herramienta de alta aleación en el rango 500°C. a 600°C. precipitan carburos finamente distribuidos, esto eleva la condición de tensión lo cual resulta en un incremento de dureza y volumen. Simultaneamente con la precipitación de carburos el contenido de aleantes en la matriz es reducido, lo cual implica que M_s es

elevada. Durante un tratamiento sub-cero la austenita retenida es transformada a martensita, esto implica un incremento en volumen (ref. 3)

Incremento en volumen

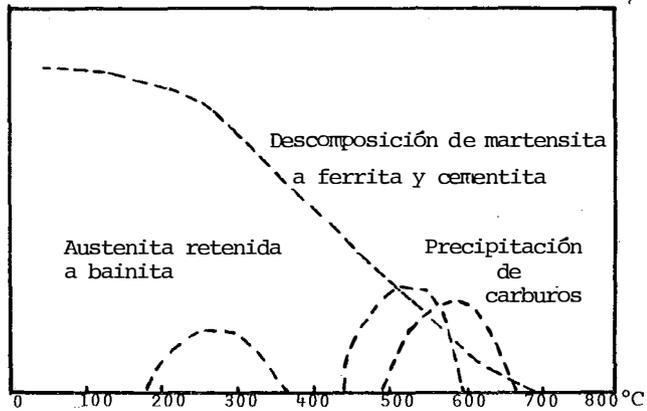


Fig. 1.2 Representación esquemática del efecto de los cambios en volumen de la estructura de un acero durante el revenido.

II. TECNICA EXPERIMENTAL

II.1 Equipo utilizado en el desarrollo del presente trabajo

Durante el desarrollo de esta tesis ha sido necesario hacer una serie de tratamientos con el fin de preparar la probetas dilatométricas, así como también, correr las pruebas dilatométricas propiamente dichas. Además de una serie de revenidos.

Para efectuar esto, se ha utilizado el siguiente equipo:

Dilatómetro Universal UBD marca Leitz y sus accesorios que son: Galvanómetro de espejo, termopar platino, platino rodio, fuente de poder.

Durométero marca Gnehm con accesorios para dureza Rc.

Muflas thermoline 1500 cuyo rango de temperatura va desde 0°C. hasta los 1200°C.

Microscopio triocular olimpus.

Por otro lado se hace necesario establecer ciertas condiciones de trabajo, así pues, para correr las curvas dilatométricas es necesario calibrar el dilatómetro universal UBD de acuerdo con las exigencias del método absoluto, en dicho método hacemos uso del galvanómetro de espejo (ref. 4).

II.2 Especímenes

Los especímenes utilizados son de acero W1 con un porcentaje de carbono de 1.95%.

II.3 Dimensiones

Las probetas con las cuales se obtuvieron las gráficas de dureza vs. temperatura de austenización, así como también las gráficas de dureza vs. temperatura de revenido son cilíndricas, de 1 cm. de diámetro por 1 cm. de largo. Las probetas para el examen dilatométrico, son de forma cilíndrica, de 8 mm. de diámetro y 5 cm. de largo. Estas dimensiones son las requeridas para poder ser utilizadas en el dilatómetro universal UBD.

II.4 Estudios preliminares

II.4.1 Determinación de la temperatura correcta de austenización.

Para no guiarnos únicamente con el análisis químico del acero, que puede darnos de gráficas directamente la temperatura correcta de austenización, se hace necesario determinarla por otro procedimiento, con el objeto de obtener una temperatura de austenización lo más exacta posible.

Es necesario hacer notar que dicha temperatura se apega a la temperatura más baja posible, puesto que, si se sube demasiado se propiciaría el agrietamiento.

Trateremos de explicar esto en función del tamaño de grano austenítico. Si bien es cierto que un acero de grano fino tiene una templabilidad más baja, el uso

de un tamaño de grano austenítico grueso esta acompañado por cambios indeseables en otras propiedades, tales como aumento en la fragilidad y pérdida de ductilidad. Las grietas de temple o agrietamiento del acero debido al choque térmico y las tensiones inherentes al templado son comunes en probetas de grano grande.

La técnica empleada consistió en lo siguiente:

Se austenizaron las probetas a temperaturas que van desde los 700°C. hasta los 1000°C., con intervalos de 50°C. el tiempo de permanencia fue de 20 min., los medios usados para templar las probetas fueron:

Agua a 20°C.

Salmuera 20% (20 g. de sal en un litro de agua).

Aceite SAE 30.

Procurando que el temple fuese con una agitación moderada y además que el tiempo de paso de la probeta, desde la mufla hasta el medio de temple, no fuese mayor de 2 seg.

Una vez hecho el temple las probetas se desbastan con papeles abrasivos para quitar la zona descarburada, procurando que quede una superficie lisa, para tomar posteriormente la dureza, que en todos los casos fue dureza Rc.

Para tomar la dureza promedio se han tomado durezas en cinco puntos de la probeta, marcados en el diagrama.

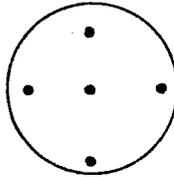


Fig. 2.1 Puntos en que fueron tomadas las durezas.

Para poder establecer al final del estudio, las diferencias entre los distintos medios de temple, se debe elegir una sola temperatura de austenización, en la cual, las 3 probetas tengan el máximo de dureza posible, bajo las mismas condiciones, además de no sufrir agrietamiento.

II.4.2 Revenidos.- Como complemento a lo anterior, se desarrollaron revenidos de las probetas templadas desde la temperatura correcta de austenización, a temperaturas que van desde los 100°C. hasta los 400°C., con intervalos de 100°C. Para esto se tomaron 18 probetas para ser austenizadas, 6 de las cuales se templaron en agua, otras 6 en salmuera, y por último 6 en aceite; posteriormente fueron revenidas hasta alcanzar la temperatura deseada.

Se tomó la dureza de tres probetas directas de temple

cada una de las cuales corresponde a un medio en particular. Después se hacen los revenidos a 100°C., 200°C., 250°C., 300°C., y 400°C; para tomarles su dureza.

II.4.3 Cuantificación de la austenita retenida.- En capítulos sucesivos, se discutirán las curvas dilatométricas de los distintos medios de temple, con el fin de poder establecer una correlación entre dichas curvas puesto que estos medios bajo las mismas condiciones, dan diferentes cantidades de austenita retenida, se hace necesaria una cuantificación por medios metalográficos.

Las probetas en las cuales se ha cuantificado austenita retenida son las probetas en las cuales se ha practicado un revenido de 180°C., así como aquellas en las cuales se ha hecho un revenido a 250°C., estas últimas temperaturas se escogieron por que de acuerdo a nuestras curvas dilatométricas, el principio y el fin de la austenita retenida está en el rango de 180°C., a 265°C. respectivamente. Por lo tanto suponemos que con esta temperatura de revenido (180°C.), aún no empieza la transformación de la austenita retenida y no se altera apreciablemente el porcentaje.

Para ello se ha seguido una técnica muy específica desarrollada por Edmund J. Klimek (ref. 5), basada en el siguiente principio.

La identificación de austenita retenida por métodos convencionales (nital, cloruro férrico, persulfato de amonio) es afectada por la orientación cristalográfica de la austenita individual y partículas de martensita que dan lugar a especulación en cuanto a su identificación particular.

La delineación metalográfica de constituyentes en una microestructura dada, es dependiente de la utilización, de las diferencias mecánicas, físicas y químicas entre los constituyentes.

En el presente problema, la composición de austenita y martensita son esencialmente las mismas. El ataque químico por reactivos, no es suficientemente selectivo, especialmente cuando el acero no está revenido. En aceros revenidos hay un oscurecimiento de la martensita debido al ataque del límite de grano del material, entre la martensita y el carbono. El grado de ataque por reactivos es dependiente de la cantidad y tamaño del precipitado y también de la orientación de las agujas de martensita con respecto al plano de pulido.

Aunque diferentes, las estructuras cristalográficas de martensita y austenita, no permiten la diferenciación a través del ataque químico. Los efectos de orientación y metaestabilidad de la martensita tetragonal, especialmente en aceros revenidos a varias

temperaturas, excluye la posibilidad de un ataque que prediga el comportamiento de la martensita. Los estados mecánicos de la austenita y martensita fueron explorados como posibles fuentes de discernimiento entre las dos. La martensita, siempre y cuando no sea revenida está en un alto grado de esfuerzos, como se puede ver en su dureza y en su resistencia a la tensión. Existe un constituyente inestable en estos aceros a temperatura ambiente llamado austenita, debido a su inhabilidad para lograr la expansión de volumen requerida para la transformación a martensita. Esta restricción de volumen por la fuerza de la martensita endurecida, obviamente causa tensión en la austenita. Se tiene la hipótesis de que la concentración de esfuerzos en la austenita son hidrostáticos, afectando esencialmente la condición de triaxial de esfuerzos, la cual resulta en un estado balanceado o bajo de esfuerzos en la austenita comparado con la martensita. Basados en esta teoría se hizo una búsqueda para encontrar una reacción química, cuya actividad debe ser sensible a los estados de tensión de los dos constituyentes.

Una reacción de destitución, en donde los iones metálicos en solución sean depositados selectivamente en la martensita más tensionada fue estudiada. De los elementos abajo del hierro en la serie electromotriz, el cobre fue el más apropiado de los iones para ser

destituido por lo adecuado de los componentes solubles de agua, su costo y color apropiados. Una baja concentración de iones cobre adicionados provee para una depositación selectiva en la martensita de más alta tensión.

Como puede ser visualizado, la depositación de cobre ocurre en una microescala, y requiere que la martensita y la austenita estén preparadas como para eliminar alguna tensión residual causada por la preparación de la probeta. Aunque el pulido mecánico sea hecho cuidadosamente se producirán esfuerzos en la cara de la probeta.

Pulido mecánico: En este trabajo es evidente que la probeta debe estar completamente libre de deformación y metal adherido. El pulido electrolítico fue ocupado como un medio para obtener una superficie libre de defectos.

Las probetas montadas fueron cuidadosamente pulidas en papeles abrasivos con un lubricante adecuado para prevenir el daño mecánico y el sobrecalentamiento.

Las muestras fueron sucesivamente pulidas usando pasta de diamante de 6 y 1 micrón respectivamente y posteriormente abrasivo de 0.05 micrones de óxido de aluminio.

Pulido electrolítico: El equipo consiste de una fuente de poder de corriente directa (rectificador y bate

ría) con capacidades de poder de 0 a 10 volts. y 0 a 5 amp. El electrólito está contenido en un recipiente de 250 ml., el cátodo es una placa de acero inoxidable y el contacto con la probeta es hecho de alambre inoxidable aislado con un tuvo de plástico. De varias pruebas electrolíticas una solución al 10% de ácido crómico en agua dió los mejores resultados en un tiempo mínimo.

Las condiciones de la celda para el pulido electrolítico de una probeta bien pulida mecánicamente son las siguientes:

- a) Aproximadamente 150 ml. de solución conteniendo 10 g. de trióxido de cromo en 100 ml. de agua destilada.
- b) Para una probeta de aproximadamente 1/2 pulgada cuadrada a una distancia de 1 pulgada del cátodo, las siguientes condiciones producirán electropulidos satisfactorios: 4 volts, 1.6 amp/in. cuadrada. y de 15 a 30 seg.

Después del electropulido, la probeta muestra una visible claridad entre la austenita y la martensita, además cuando es vista a través de un microscopio abierto al máximo, no debe haber rasgaduras o inclusión de no metálicos o partes no atacadas de martensita.

Deposición de cobre: Una deposición selectiva de cobre sobre la martensita, es una etapa crítica del procedimiento y esta etapa requiere de una buena observación. Debe ser recordado que la deposición del cobre es sobre una microescala y la selectividad de la deposición es dependiente de la diferencia de la actividad química de las superficies microscópicas adyacentes. La martensita es entonces completamente cubierta con cobre, la diferencia de potencial entre martensita y austenita es eliminada y el cobre será reemplazado de la solución por el hierro de la austenita.

La solución de cobre para el recubrimiento se prepara con 955 ml. de agua destilada, 14.2 g. de CuSO_4 y 7.4 ml. de H_2SO_4 .

Sobre una probeta bien pulida, un recubrimiento adecuado de cobre puede ser hecho en 5 o 10 seg. El cobre es aplicado por inmersión con agitación a temperatura ambiente o bien por un manchado suave con un trapo de algodón mojado. Cuando aplicamos la solución con un trapo se debe tener cuidado, frotando la superficie suavemente, esto producirá una línea delgada de cobre.

En muchos casos, especialmente en aceros revenidos el color de contraste entre la martensita y la austenita será suficiente, como para permitir medir cuando las

probetas sean examinadas a través de filtros de vidrio verde.

Coloración del cobre: Es práctico realzar el color de contraste entre la martensita y la austenita para facilitar la observación. El contraste es incrementado por la coloración del cobre depositado a través de la formación de óxidos y sulfatos.

Como la coloración envuelve la formación de compuestos por medio de una reacción con el cobre depositado las mismas precauciones en cuanto a las mínimas cantidades de cobre deben ser observadas.

Las siguientes soluciones, estables y fáciles de preparar, proveen la más consistente coloración del cobre depositado con la mayor libertad en su aplicación

- a) Solución colorante de cobre: un gramo de sulfuro de sodio (Na_2S), 100 ml. de agua destilada, 1 ml. de HNO_3 requerida para acidificar la solución a pH 5.

La solución acuosa de Na_2S es fuertemente básica, y tiene una vida de un mes antes de que ocurra la precipitación. Después de la acidificación en la cual se forma H_2S la solución es estable por más o menos 6 horas. Un procedimiento satisfactorio ha sido el de acidificar solo una pequeña cantidad (25 ml.) de la solución de Na_2S , usando papel pH como indicación bastante segura de la acidificación.

La solución colorante de cobre puede ser aplicada con un gotero o mediante una mancha suave aplicada con un trapo de algodón mojado. El tiempo de aplicación puede variar entre 5 y 20 seg. y una o dos gotas de solución son suficientes. El color producido sobre el cobre variará con el tiempo, fluctuando desde un café claro hasta azul o negro.

II.5 Resultados de las pruebas preliminares, en las cuales se basaron los ensayos dilatométricos.

II.5.1 Resultados de dureza tomadas para diferentes temperaturas de austenización después del temple.

Los resultados de dureza vs. temperatura de austenización se muestran en la Tabla 2.1

TEMPERATURA	AGUA	SALMUERA	ACEITE
700°C.	10 Rc	56 Rc	10 Rc
750°C.	55 Rc	56 Rc	33 Rc
800°C.	61 Rc	63 Rc	48 Rc
850°C.	52 Rc	52 Rc	40 Rc
900°C.	51 Rc	51 Rc	39 Rc
950°C.	50 Rc	51 Rc	37 Rc
1000°C.	47 Rc	48 Rc	33 Rc

Tabla 2.1 Datos de dureza promedio obtenidas en función de la temperatura de austenización para 3 medios de temple.

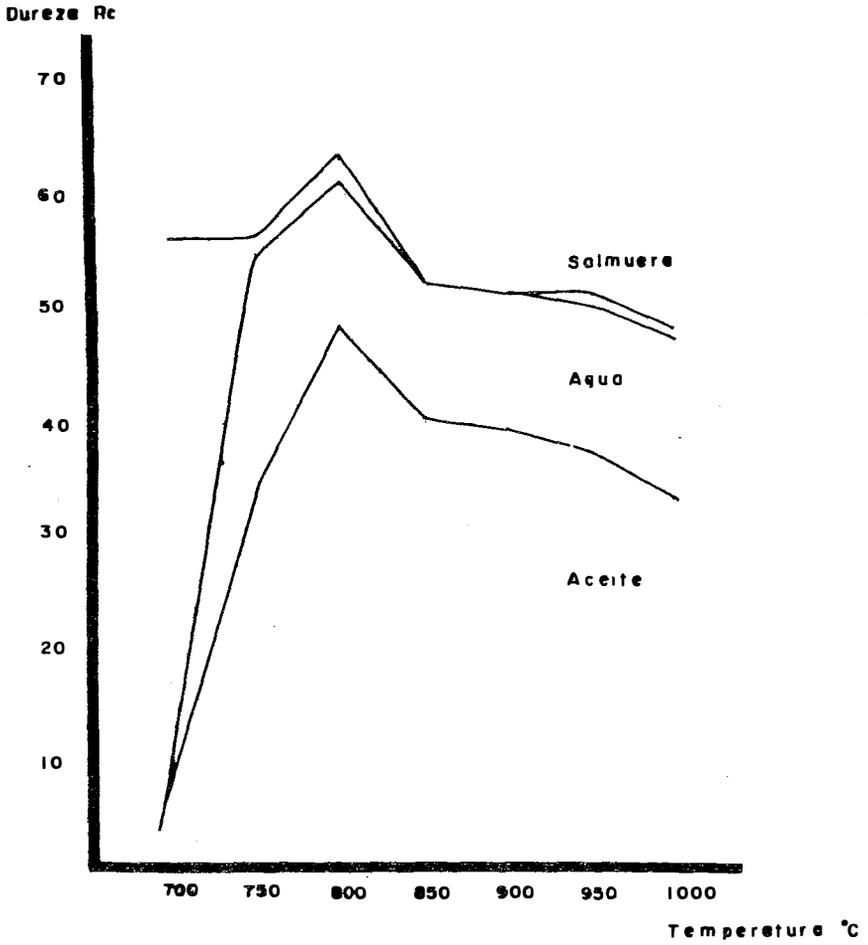


Fig. 2.2 Dureza vs Temperatura de Austenización

De los datos de la tabla 2.1 podemos observar que la temperatura de austenización a la cual obtenemos la mayor dureza es de 800°C. Esto puede verse más facilmente en las gráficas de dureza vs. temperatura de austenización, correspondientes a la fig. 2.2.

De acuerdo al análisis, tenemos un porcentaje de carbono de 1.91%, si vemos en la figura 1.1, a la temperatura de 800°C. no se ha austenizado totalmente el acero y tenemos una mezcla de austenita y cementita, por tanto, después del temple, deben observarse tanto la cementita una gran porción de martensita, así como austenita retenida, esto puede verse en la figura 2.3.

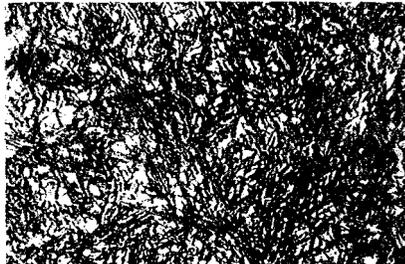


Fig. 2.3 Acero 1.91% C., templado en salmuera, temperatura de austenización 800°C.

En la figura 2.3 puede observarse el carburo como pequeños puntos blancos en la matriz martensítica, así como lagunas blancas de austenita retenida.

El hecho de que nos haya dado una temperatura correcta de austenización de 800°C. obedece a la explicación de

la sección II.4.1.

II.5.2 Resultados de las durezas para los revenidos

Los resultados son indicados en la tabla 2.2

	AGUA	SALMUERA	ACEITE
TEMPLE INICIAL	61 Rc	63 Rc	48 Rc
REVENIDO 100°C.	65 Rc	65 Rc	54 Rc
REVENIDO 200°C.	59 Rc	58 Rc	49 Rc
REVENIDO 250°C.	60 Rc	60 Rc	52 Rc
REVENIDO 300°C.	56 Rc	55 Rc	50 Rc
REVENIDO 400°C.	48 Rc	44 Rc	47 Rc

Tabla 2.2 Resultado de las durezas tomadas después del temple y después de ser revenidos a las distintas temperaturas. Taustenización 800°C.

En la figura 2.4 se observa el comportamiento de la dureza en función de la temperatura de revenido.

De estas gráficas podemos hacer varias observaciones concernientes a las distintas etapas del revenido. En la primera etapa, hasta una temperatura de aproximadamente 180°C., hay un incremento de dureza, de acuerdo con Wilson (ref. 1) este incremento es propiciado por la aparición del carburo épsilon, cosa que no podemos ver metalográficamente y aunque en esta etapa la mar-

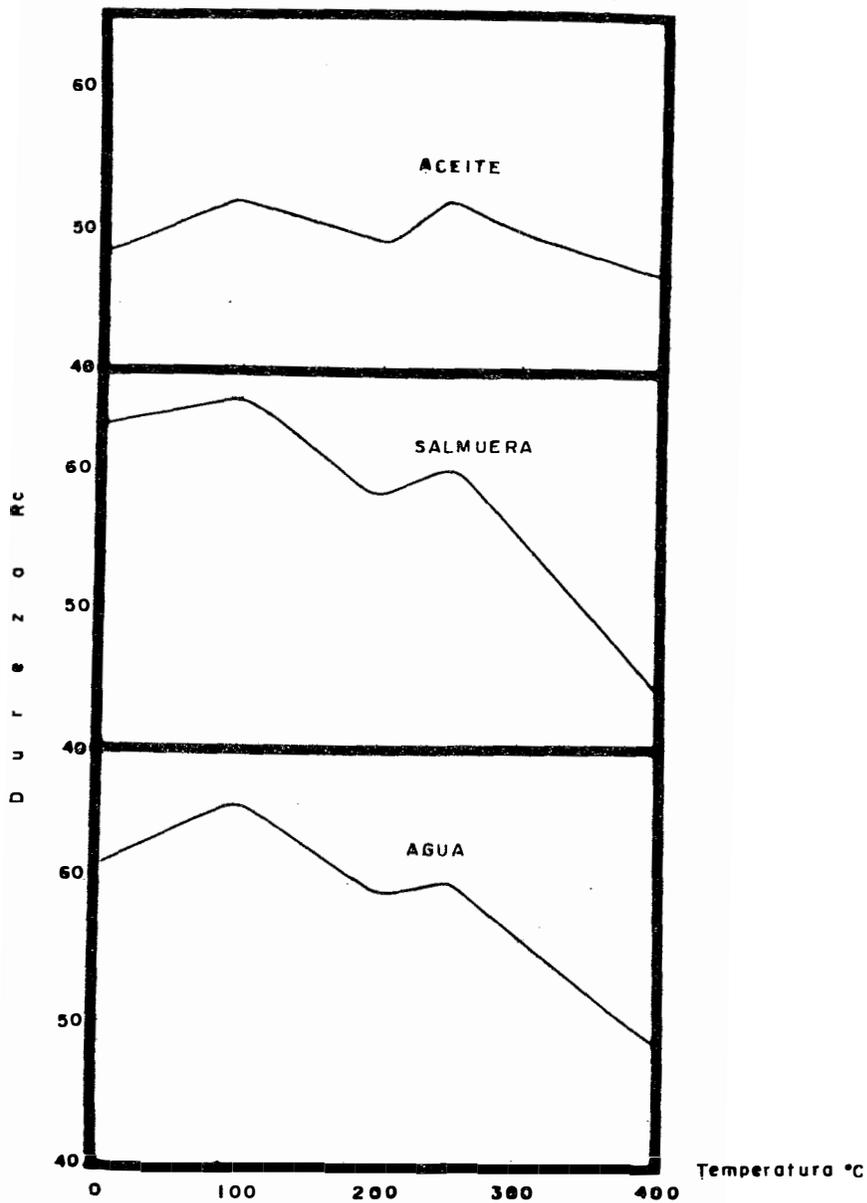


FIG. 2.4 Dureza vs. Temperatura de Revenido

tensita pierde carbono, esta pérdida se ve compensada por la aparición de dicho carburo, dando como resultado final un incremento en la dureza.

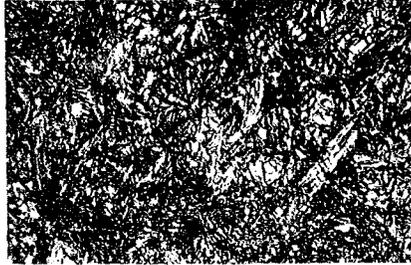
Posteriormente viene la transformación de austenita retenida a bainita inferior, esto es, entre los 180°C y los 300°C., lo cual propicia una nueva caída de dureza. Apartir de los 300°C. se advierte una caída muy pronunciada, esto se debe a que ha desaparecido el carburo épsilon dando origen a la cementita, existe ya bainita inferior producto de la transformación de la austenita además de que la martensita ha perdido casi todo su carbono. En el sentido estricto, en esta etapa, tanto la bainita como la cementita han empezado a transformarse a cementita (ref. 1)

II.5.3 Resultados de la cuantificación metalográfica

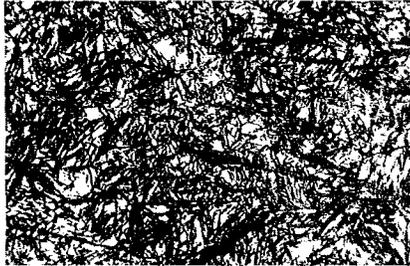
Los resultados que se obtuvieron por el método descrito en la sección II.4.3 son los siguientes:

		AGUA	SALMUERA	ACEITE
REVENIDO	170°C.	10% YRET.	16% YRET.	22% YRET.
REVENIDO	250°C.	---	---	5% YRET.

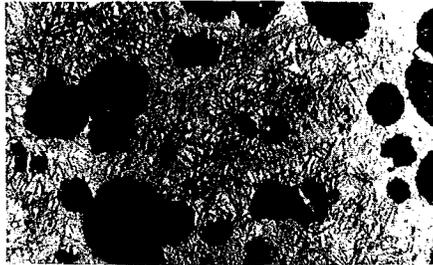
Tabla 2.3 Resultados de la cuantificación hechas a 450 aumentos.



A) TEMPLE EN AGUA Y REVENIDO A 170°C.



B) TEMPLE EN SALMUERA Y REVENIDO A 180°C.



C) TEMPLE EN ACEITE Y REVENIDO A 170°C.

FIG. 2.5 SECUENCIA DE FOTOGRAFIAS DE LA TABLA 2.3.

En base a estos resultados es evidente que, en las pruebas dilatométricas posteriores a esta determinación, las curvas que muestran la transformación de la austenita retenida presentarán diferencias en su longitud.

En las fotografías que a continuación se muestran, se observan las estructuras de las probetas enumeradas en la tabla 2.3; exceptuando los revenidos a 250°C.

II.6 Pruebas dilatométricas

II.6.1 Bases de la dilatometría.- Debemos guardar en mente que cualquier cambio en la estructura cristalina envuelve una variación en el volumen atómico específico lo cual es la razón para que sean observadas las anomalías dimensionales.

Las transformaciones estructurales previstas por los diagramas pueden ser seguidas hasta cierto punto, por un dilatómetro, así, el cruce de una curva o línea de solubilidad que separa una fase simple de dos fases, se presta, para ciertas observaciones interesantes, para poner esto de manifiesto, se discutirán los cambios volumétricos asociados al calentamiento de aceros hipoeutectoides e hipereutectoides y su relación con las curvas dilatométricas.

Estamos en un punto situado en la región hipoeutectoide del diagrama de equilibrio fierro - carbono de la

figura 1.1. El calentamiento provocará la reacción del hierro alfa + perlita para dar austenita y posteriormente hierro alfa + austenita para dar austenita; en la primera reacción el cambio de estructura cristalina de la fase alfa a la fase gamma producirá una contracción en el volumen, esta contracción se observará a lo largo del intervalo de temperatura en el cual se verifique esta reacción, el carburo solo se disuelve conforme va perdiendo su carbono y este rango de temperatura será cada vez menor conforme nos acercamos a la composición eutectoide, a partir de la cual el rango de temperatura de la contracción en volumen tiende a ser constante de acuerdo con las curvas dilatométricas. Esto es debido a que en los aceros hipereutectoides se lleva a cabo la reacción de la perlita + cementita para dar austenita, en este caso el comienzo de la contracción es a los 723°C. y el final observado no corresponde al punto en el cual de acuerdo al diagrama hierro - carbono termina la reacción de austenita + cementita Para dar austenita unicamente, esto se debe a que conforme vamos a aumentado la temperatura se lleva a cabo la transformación de perlita a austenita y como tal es la única que tiene efectos en la contracción y el rango de temperatura aunque en esta etapa también se disuelve la cementita, esto no puede ser detectado por el dilatómetro (ver ref. 6).

II.6.2 Prueba dilatométrica de llegada.- De acuerdo al diagrama fierro - carbono de la figura 1.1 vemos que el acero objeto de estudio en nuestro caso atraviesa varias transformaciones conforme se va calentando. Es tamos situados en el diagrama en un punto que corresponde al 1.91% C. a temperatura ambiente, haciendo notar que hasta la fecha nuestro acero no ha sufrido ningún tratamiento térmico, si empezamos a subir la temperatura no sucederá nada sino hasta los 723°C. punto en el cual se formarán los primeros retículos de austenita, en este punto la estructura del acero ha sufrido su primera transformación al pasar de un sistema cristalino cúbico centrado en el cuerpo a uno cúbico centrado en las caras. Esto va acompañado por un cambio volumétrico negativo, que puede apreciarse perfectamente en la curva dilatométrica del material de llegada.

Más aún, el final de la contracción se aprecia a los 780°C., esto indica que a dicha temperatura han terminado de transformarse toda la perlita para formar austenita arriba de los 780°C., ya solo existen austenita y cementita que aún no se ha disuelto.

Es obvio que después de un tratamiento térmico de temple las curvas dilatométricas serán diferentes puesto que existen otras estructuras a temperatura ambiente, la finalidad de la fig. 2.6 es solo comparativa.

AL mm.

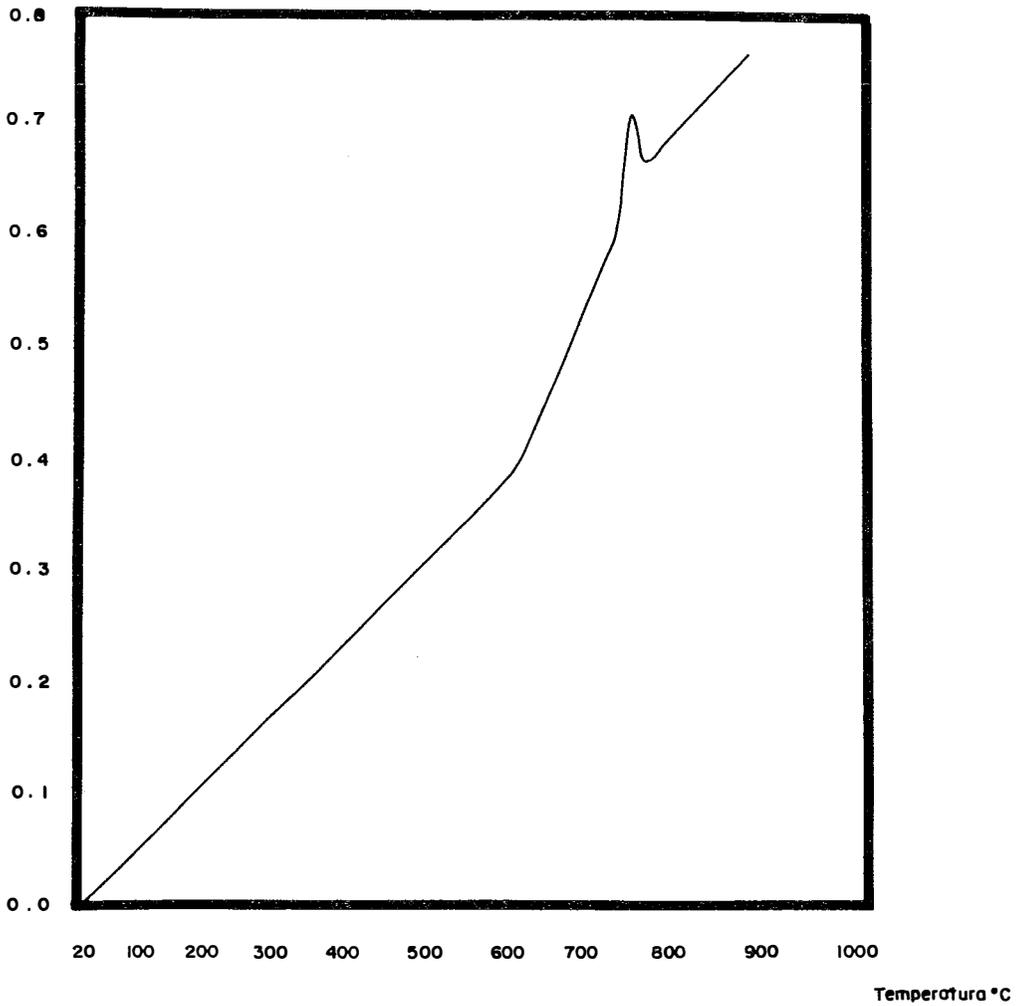


Fig.2.5 Curva dilatométrica del material de llegada.

II.6.3 Técnica de templado .- Las probetas se han cementado en una solución de sulfato de cobre para impedir la descarburización, posteriormente se empaquetaron con una pequeña cantidad de carbón y se austenizaron hasta 800°C., después de lo cual se hicieron los respectivos temple.

Como ya se ha explicado en otras secciones, la austenita retenida en estos temple se transforma isotermicamente aunque en muy pequeñas cantidades, por lo cual, es necesario correr la curva dilatométrica en seguida.

II.6.4 Condiciones de trabajo para las curvas dilatométricas

Las curvas fueron hechas en el dilatómetro universal bajo las siguientes condiciones: En el eje de temperatura (eje dado por el galvanómetro de espejo) se han utilizado 200 aumentos, no así en el eje de las dilataciones, en donde se ocuparon 400 aumentos con el fin de observar mejor las contracciones, para el grabado de las curvas se utilizó papel kodabromide F-1 por su alta sensibilidad y por último se calentó el horno con una velocidad de 3°C./minuto.

III RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DILATOMETRICAS

III.1 PREAMBULO

Con fines a establecer patrones dilatométricos para la cuantificación de la austenita retenida, se han templado probetas en tres medios de diferentes severidad. Puesto que la velocidad de enfriamiento tiene cierta influencia en la cantidad de austenita retenida, el templado en aceite, por ejemplo, retiene más austenita que el templado en agua y el enfriamiento al aire retiene más austenita que el templado en aceite (ref.1).

Los elementos de aleación disueltos en la austenita también tienen un marcado efecto en la cantidad de austenita que se espera sea retenida a la temperatura ambiente después del temple. La cantidad es marcadamente dependiente del contenido de carbón disuelto. El cromo, molibdeno y tungsteno tienen también un marcado efecto si están en solución en la austenita. Es bien conocido que la temperatura de austenización tiene un gran efecto en la temperatura Ms y por tanto en la retención de austenita. Si nosotros consideramos solo al carbón, la alta temperatura de austenización, y el alto carbón en solución dan un alto contenido de austenita retenida. Si por otro lado nosotros adicionamos cromo a un acero al carbón al 1%, a las más bajas temperaturas de austenización la austenita retenida disminuye con el incremento en cromo, debido a que este último reduce

la solubilidad de los carburos.

Sin embargo una vez disueltos sustancialmente los carburos alrededor de 1040°C. la austenita retenida aumenta con el incremento en cromo, como sería esperado. Lo mismo se aplica a otros carburos formados como son los de molibdeno y tungsteno.

Los tres medios escogidos en nuestro caso son:

- a) Temple en agua a 20°C.
- b) Temple en salmuera al 20%
- c) Temple en aceite SAE 30.

Como ya se explicó en el capítulo anterior se ha determinado la temperatura correcta de austenización como 800°C., temperatura desde la cual se templaron las probetas en los diferentes medios. Se espera que los diferentes medios retengan distintas cantidades de austenita.

La forma en que seguiremos dilatométricamente la transformación de austenita es aprovechando el hecho de que durante el revenido la probeta sufrirá los cambios volumétricos inherentes al tratamiento, esto es, el recalentamiento de la martensita templada produce modificaciones de la estructura metaestable obteniendo al final ferrita y carburos. Al principio del revenido, aparecen placas extremadamente finas de un carburo llamado carburo épsilon, visible solo por medio de un microscopio electrónico de gran poder. Como la temperatura de revenido aumenta, las placas de carburo engrosan y a temperaturas de revenido de 100°C. puede

ser identificado como un carburo hexagonal, con una composición aproximada de $Fe_{2.4}C$.

Más aún, el incremento en la temperatura de revenido resulta en una transformación de la austenita retenida y en la conversión del carburo a Fe_3C . Debe ser notado que la conversión de austenita a martensita ocurre en el enfriamiento y no es isotérmica. Los cambios, particularmente a bajas temperaturas de revenido son solo visibles empleando microscopio electrónico.

La fases pueden ser identificadas también por difracción de rayos X puesto que la metalografía óptica solo revela el oscurecimiento de la martensita atacada (ref. 5).

Revenido hasta los $200^{\circ}C$. El revenido en este rango es usado en la mayoría de los aceros aleados y al carbono cuando se desea retener el máximo de dureza. En este rango de revenido, la martensita tetragonal pasa a ser cúbica de revenido ocurre la precipitación del carburo épsilon, conforme la temperatura se incrementa, la tenacidad del acero se incrementa. Las aleaciones que llevan una gran cantidad de austenita retenida pueden conducirnos a un incremento en la tenacidad en aceros ligeramente revenidos (ref. 1), la austenita persiste a temperaturas de más de $200^{\circ}C$.

Esto se muestra objetivamente en la figura 3.1, que corresponde a una estructura después de temple en agua se observa la matriz martensítica en forma de agujas oscuras, en

las cuales queda retenida la austenita en forma de lagunas blancas.

Así mismo, se muestra una fotografía de una probeta templada en agua y revenida a 250°C ., puede verse claramente una estructura igual a la de la fotografía anterior, es decir, la austenita persiste aunque ya una gran porción haya sido transformada a bainita inferior, esto es en la figura 3.2.

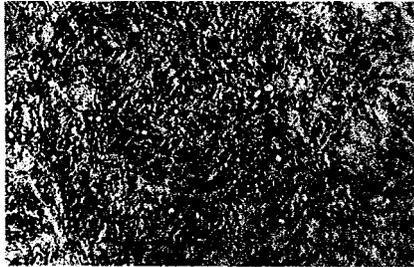


Fig. 3.1 Estructura directa de temple en agua, tomada a 450 aumentos.

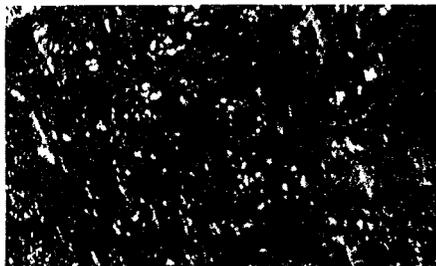


Fig. 3.2 Estructura de un acero templado en agua y revenido a 250°C . 450 aumentos.

Revenido en el rango $200^{\circ}\text{C}.$ - $300^{\circ}\text{C}.$ Sucede que la austenita retenida en el temple tiende a transformarse en este rango de temperatura a bainita inferior isotermicamente (ref. 1,2,3).

Para profundizar más en este punto describiremos lo que es la reacción austenita retenida - bainita, refiriendonos al diagrama TTT de nuestro acero, cuando la austenita es llevada a un punto exacto para transformarse arriba de M_s pero abajo de la nariz de la curva (en la cual se forma perlita laminar), resulta un producto de transformación llamado bainita. A altas temperaturas la bainita tiene una apariencia de plumas y cuando se forma a temperaturas cerca de M_s viene siendo más acicular, aunque más dura (ref. 1, 9,10). La bainita se forma por nucleación y crecimiento a diferencia de la martensita, la cual se forma solo por una caída brusca de temperatura.

En lo que respecta a su composición la bainita, producto de la austenita, es un agregado de perlita y cementita. Una estructura bainítica se observa en la figura 3.3, esta fotografía ha sido tomada de un acero templado en agua, la temperatura de austenización fue de $800^{\circ}\text{C}.$, atacada por el método descrito, revenido hasta los $300^{\circ}\text{C}.$ y a 450 aumentos Revenido en el rango $300^{\circ}\text{C}.$ - $600^{\circ}\text{C}.$ En este rango de revenido el acero sufre una caída muy pronunciada en su dureza de acuerdo con la grafica 2.4. Los cambios en la microestructura pueden observarse en la figura 3.4; se observa

que toda la austenita se ha transformado a bainita y que se han formado carburos, vistos como puntos blancos.

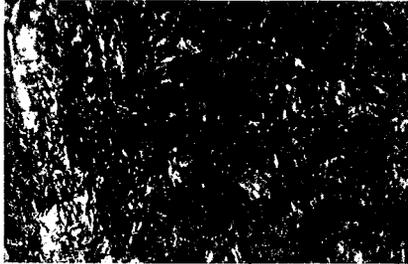


Fig. 3.3 Bainita inferior en una probeta templada en agua y revenida a 300°C. 450 aumentos.

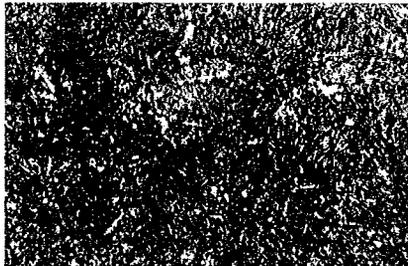


Fig. 3.4 Probeta templada en salmuera revenida a 300°C. 450 aumentos.

III.2 CURVAS DILATOMETRICAS

Los resultados obtenidos en las curvas dilatométricas se muestran en las figuras 3.5; 3.6; 3.8

III.2.1 La figura 3.5 muestra la curva dilatométrica para un acero templado en agua. Como se mencionó en el primer capítulo, cuando la austenita se transforma a martensita hay un cambio en volumen que puede ser calculado considerando la distorsión de Bain (ref. 2) y los parámetros reticulares de la austenita y la martensita, tomando en cuenta que los parámetros reticulares son:

Parámetros martensíticos (angstroms)

$$C \quad 2.861 + 0.116 (X)$$

$$A \quad 2.861 - 0.013 (X)$$

Parámetros de la austenita (angstroms)

$$A^\circ = 3.548 + 0.044 (X)$$

Donde X es el porcentaje de carbono

Así pues en la martensita tenemos que:

$$C \quad 2.861 + 0.116 (1.91) \quad 3.0825 \text{ angstroms}$$

$$A \quad 2.861 - 0.013 (1.91) \quad 2.8361 \text{ angstroms}$$

En la austenita los parámetros reticulares son:

$$A^\circ = 3.548 + 0.044 (1.91) = 3.6320 \text{ angstroms}$$

El volumen por celda unitaria de martensita será de:

$$V_m = C \times A \times A = 3.0825 \times 2.861 \times 2.8361$$

$$V_m = 24.7944 \text{ angstroms cúbicos.}$$

El volumen por celda unitaria de austenita será de:

$$V_a = A^\circ \times A^\circ / 2 \times A^\circ / 2 = A^3 / 2$$

$$V_a = 23.9556 \text{ anstroms cúbicos.}$$

Por tanto el cambio volumétricos será:

$$V_m - V_a = 24.7944 - 23.9556 = 0.8338 \text{ angstroms cúbicos}$$

El cambio volumétrico en porcentaje será:

$$\frac{\Delta V}{V_a} = \frac{0.8338 \text{ A}^\circ}{23.9556 \text{ A}^\circ} = 3.5\%$$

En consecuencia durante el temple se origina un incremento en volumen de 3.5%.

En la figura 3.5 se observa que hasta los 114°C. solo ocurre una dilatación, producto del calentamiento de la martensita, en esta etapa del revenido es donde ha de formarse el carburo épsilon que no puede observarse metalográficamente pero puede seguirse por medio de la dureza de las probetas revenidas, tal es el caso de la figura 2.4.

Posteriormente se observa una ligera contracción en el rango de los 114°C. a los 182°C. lo cual es esperado puesto que en esta etapa la martensita sufre un cambio volumétrico en el paso de una estruc

tura tetragonal a cúbica, esto se pone de manifiesto en los siguientes cálculos:

$$V_m \text{ tetragonal} = C \times A \times A = 24.7944 \text{ angstroms cúbicos}$$

$$V_m \text{ cúbica} = A \times A \times A = 22.8120 \text{ angstroms cúbicos}$$

Así que el cambio volumétrico será de:

$$V_m \text{ cúbica} - V_m \text{ tetragonal} = 22.8120 - 24.7944$$

$$\Delta V = -1.9824 \text{ angstroms cúbicos}$$

El porcentaje de cambio volumétrico será:

$$-1.9824/24.7944 = 7.99\%$$

Dando una contracción del 0.0199% (en longitud)

A partir de los 182°C. se observa un marcado incremento en la dilatación, en este punto entramos en los que llamamos la segunda etapa del revenido caracterizado por la transformación de austenita retenida a bainita inferior este paso es de especial importancia para las conclusiones posteriores, de acuerdo a la figura 3.5 se observa una dilatación de 0.11 mm. de acuerdo a los parámetros del eje Y llamado eje de dilataciones, esto es, con respecto a la longitud inicial de la probeta (50 mm), se puede suponer que la magnitud de este segmento es proporcional a la cantidad de austenita retenida existente en el acero después del temple en agua, la magnitud del segmento no es muy pronunciada y en

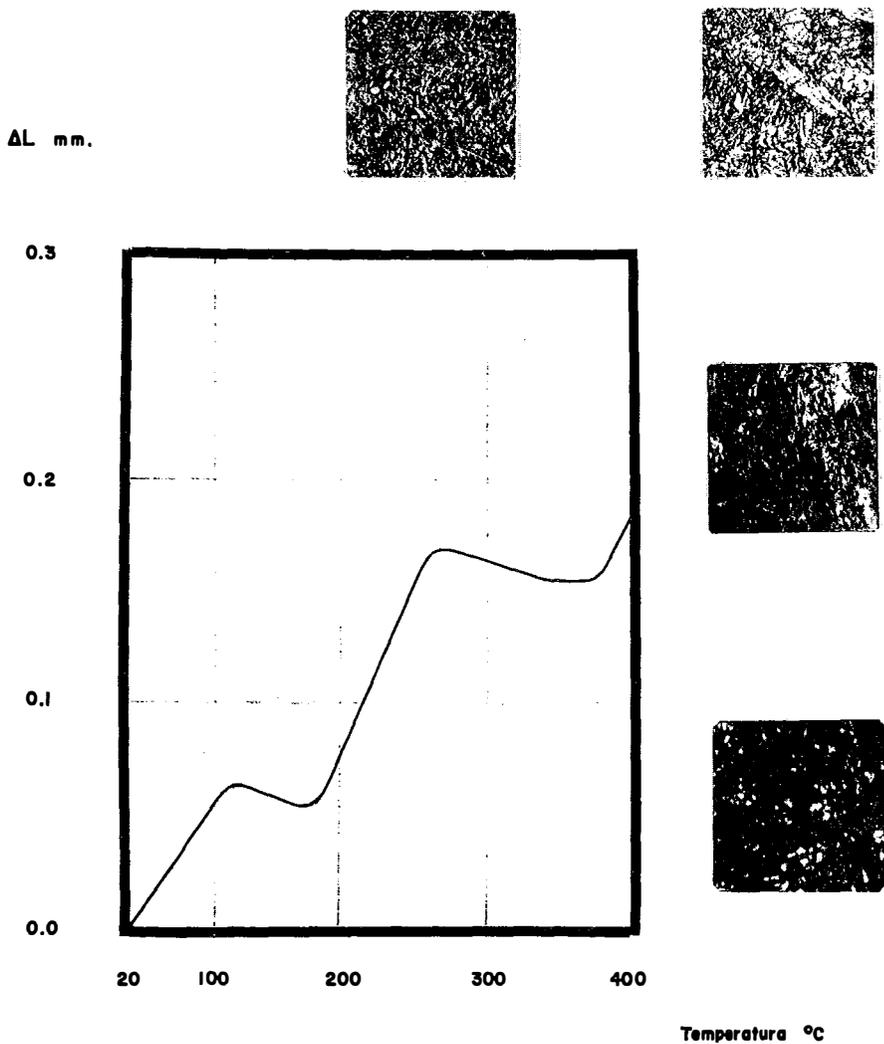


FIG. 3.5 Curva dilatométrica de una muestra templada en agua.

concordancia con los resultados obtenidos en la sección II.5.3 se obtuvo un segmento de pequeña longitud, el final de la transformación lo marca la nueva contracción que será explicada en breve.

Ahora bien, si observamos metalograficamente el curso de la transformación austenita retenida - bainita inferior veremos que conforme la dilatación aumenta la cantidad de austenita retenida disminuye aumentando así la de bainita inferior.

Esto se ha puesto de manifiesto en las fotografías expuestas en la figura 3.5. Si observamos en ellas, la fotografía correspondiente a la temperatura de 182°C., hay una gran cantidad de austenita retenida vista como lagunas blancas en la martensita, la fotografía correspondiente a la temperatura de 250°C. muestra la misma zona, pero en este caso la cantidad de austenita retenida ha disminuido considerablemente.

No olvidando el objetivo del presente trabajo, es conveniente calcular en este punto el coeficiente de dilatación del acero para este segmento de curva, así en el método de medición dilatométrica absoluta es posible determinar dicho coeficiente de acuerdo con la ecuación:

$$\beta_{\text{muestra}} = \frac{\Delta L}{K L_0 \Delta T} + \beta_{\text{cuarzo}}$$

En donde:

se toman de la figura 3.5

$$\beta_c = 0.55 \times 10^{-6}$$

K = número de aumentos en la ordenada. (400)

L_0 = longitud inicial de la probeta

De acuerdo a lo anterior:

$$\beta_m = 0.62 \times 10^{-6}$$

Observemos ahora el rango entre 265°C. y 375°C., vemos en este punto una nueva contracción, en este rango se forman por nucleación y crecimiento las primeras porciones de cementita, además de que a los 265°C. la martensita pierde aún más carbono, acompañada por la disolución del carburo épsilon. Esta etapa será acompañada por un cambio dimensional que se produce en igual sentido que el efectuado en el rango 114°C. - 182°C. Por el proceso de transformación de las estructuras presentes a cementita se puede apreciar en la figura 3.5 una contracción y se puede decir que el final de dicha transformación se verifica a los 375°C. Después de los 375°C. ya no se observa contracción, alguna sino pura dilatación esto implica, que la estructura ha sufrido todos los cambios posibles.

La curva dilatométrica para una probeta templada en salmuera se muestra en la figura 3.6, en dicha

curva, a los 117°C. en este caso se observa el principio de la transformación de martensita tetragonal a cúbica, la magnitud de la contracción es igual que la de la figura 3.5, la sección de la curva correspondiente a la transformación austenita retenida - bainita inferior es más grande, por ello debe esperarse que la cantidad de austenita retenida sea mayor, esto concuerda bastante bien con los resultados obtenidos de las metalografías cuantitativas, que nos indica que para un temple en salmuera se retiene un 16% de austenita. Obtengamos ahora el coeficiente de dilatación térmica para el acero templado en estas condiciones:

$$\beta_c = 0.55 \times 10^{-6}$$

$$K = 400 \text{ aumentos}$$

$$L_o = 50 \text{ mm.}$$

$$\Delta L = 0.17 \text{ mm.}$$

$$\Delta T = 80^\circ\text{C.}$$

$$\beta_m = 0.65 \times 10^{-6}$$

Nuevamente en la figura 3.6 se observan las fotografías correspondientes al temple directo, revenido a 178°C. y revenido a 250°C., así como el revenido a 276°C. en esta secuencia de 4 fotografías se aprecia de una manera muy clara las transformaciones que sufre la estructura, en las dos primeras se ve la matriz martensítica donde quedó rete-

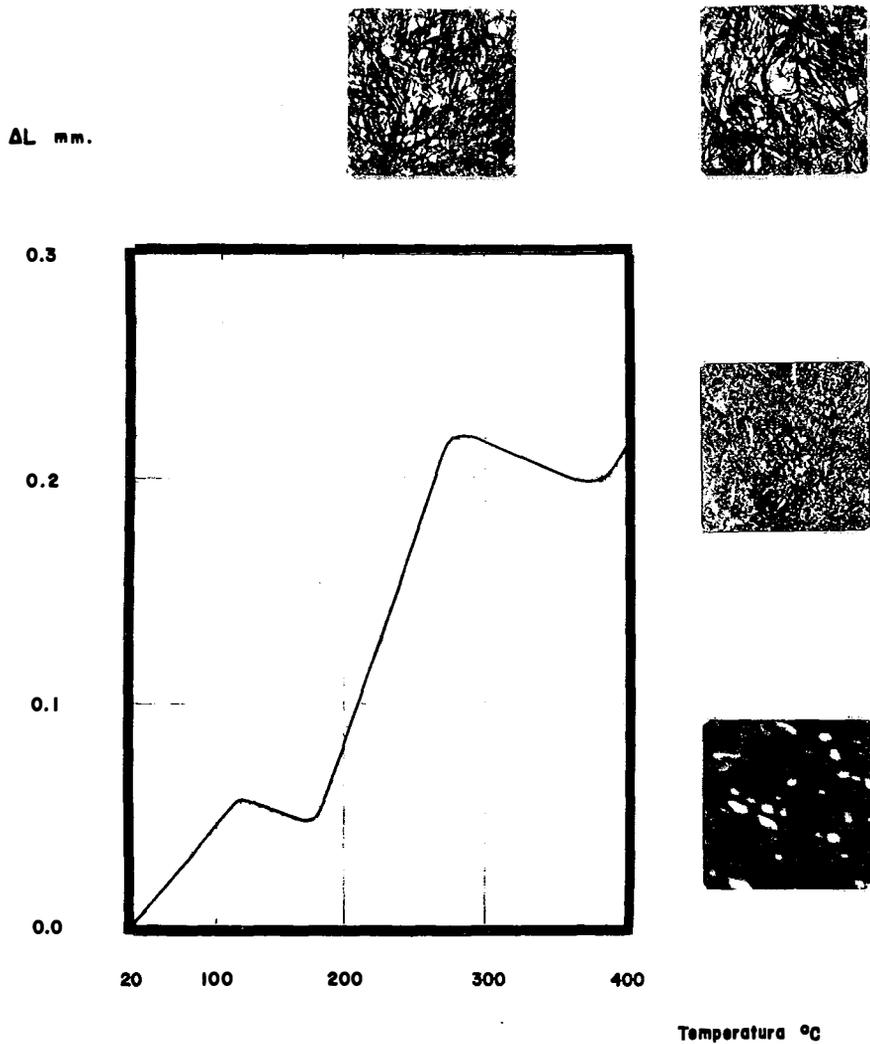


FIG. 3.6 Curva dilatométrica de una muestra templada en salmuera.

nida la austenita, a 250°C. es de esperarse que se haya transformado gran cantidad de austenita retenida a bainita inferior, como puede observarse en la fotografía correspondiente. A los 276°C. la estructura ha cambiado totalmente se pueden observar bainita inferior y martensita revenida, así como los carburos vistos como puntos blancos. En la figura 3.7 se observa una fotografía correspondiente a una probeta templada en salmuera y revenida a 250°C., se puede ver que la cantidad de austenita retenida ha disminuido y que se ha formado bainita inferior.

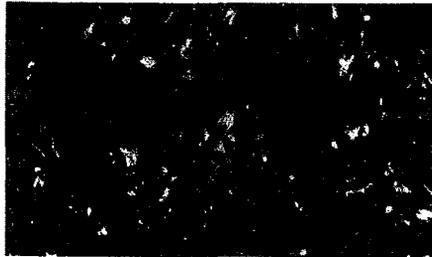


Fig. 3.7 Temple en salmuera y revenido a 250°C., a 1140 aumentos.

Por último tenemos la curva dilatométrica del mismo acero templado en aceite, ello corresponde a la figura 3.8, en dicha curva se observa el principio

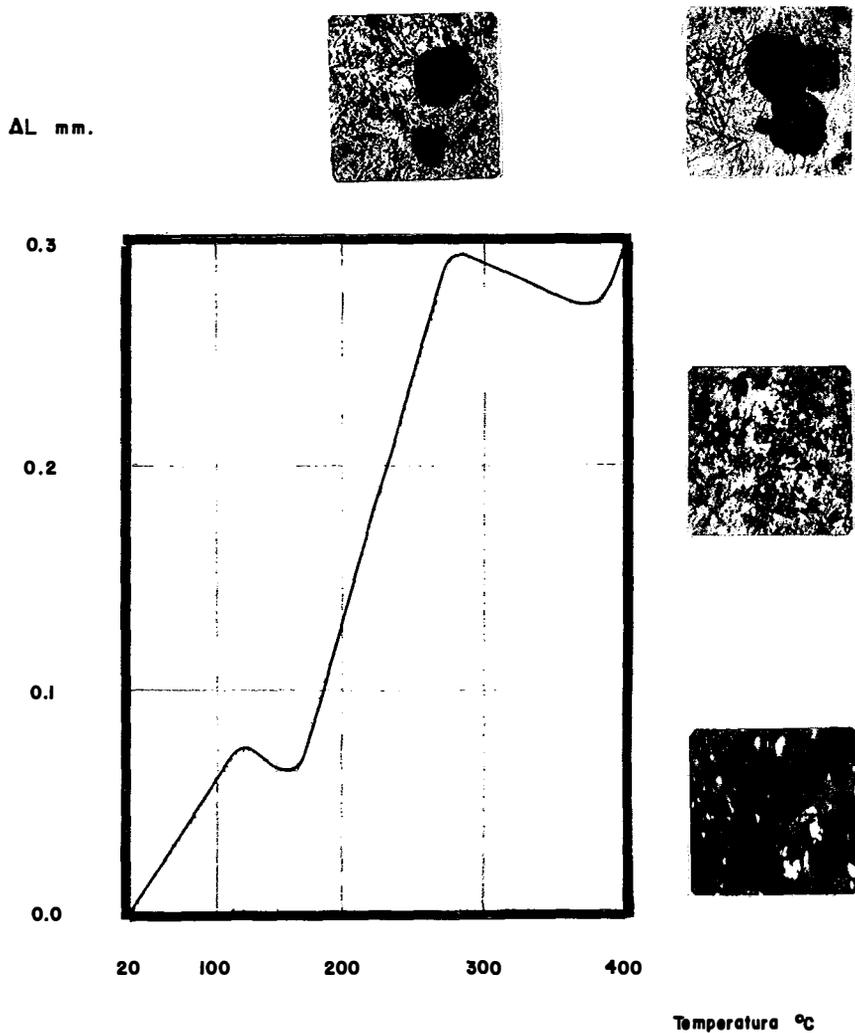


FIG. 3.8 Curva dilatamétrica de una muestra templada en aceite.

de la transformación de martensita tetragonal a cúbica a los 123°C. y termina a los 168°C., la magnitud de la contracción es igual, en cambio se observa una gran cantidad de austenita retenida de acuerdo a la gran longitud del segundo segmento de la curva, en concordancia con los resultados de la tabla 2.3. Para un temple en aceite se obtiene un 22% de austenita retenida.

En la secuencia de fotografías se muestran las estructuras de temple directo, y revenidos a 168°C., 250°C., y 280 grados centígrados, se observa el cambio que experimenta la estructura, en este caso se observa una nueva fase en forma de manchas negras llamada trostita.

El coeficiente de dilatación es:

$$\beta_c = 0.55 \times 10^{-6}$$

$$K = 400 \text{ aumentos}$$

$$L_o = 50 \text{ mm.}$$

$$\Delta L = 0.23 \text{ mm.}$$

$$\Delta T = 112^\circ\text{C.}$$

$$\beta_m = 0.65 \times 10^{-6}$$

IV. DISCUSION DE RESULTADOSIV.1 Diferencias y sus causas

Basicamente, el fin que seguimos, es la intepretación de las contracciones y dilataciones que suceden en el revenido, detectadas por medio del dilatómetro. En las tablas 4.1, 4.2 y 4.3, se pueden ver los puntos más interesantes de las tres curvas de revenido.

	Δl mm.	Temp. °C.	Δl %
1a. Inflexión	--	123°C.	--
2a. Inflexión	--	168°C.	--
Δl mm.	0.01 mm.	--	0.0199 %
3a. Inflexión	--	280°C.	--
Δl mm.	0.23 mm.	--	0.4587 %
4a. Inflexión	--	384°C.	--
Δl mm.	0.0225 mm.	--	0.0447 %

Tabla 4.1. Datos de contracción y dilatación de la curva dilatométrica para una probeta templada en agua.

	Δl mm.	Temp. °C.	Δl %
1a. Inflexión	--	117°C.	--
2a. Inflexión	--	178°C.	--
Δl mm.	0.01 mm.	--	0.0199 %
3a. Inflexión	--	276°C.	--
Δl mm.	0.17 mm.	--	0.3385 %
4a. Inflexión	--	383°C.	--
Δl mm.	0.02 mm.	--	0.0398 %

Tabla 4.2. Datos de contracción y dilatación de la curva dilatométrica para una probeta templada en salmuera.

	Δl mm.	Temp. °C.	Δl %
1a. Inflexión	--	123°C.	--
2a. Inflexión	--	168°C.	--
Δl mm.	0.01 mm.	--	0.0199 %
3a. Inflexión	--	280°C.	--
Δl mm.	0.23 mm.	--	0.4587 %
4a. Inflexión	--	384°C.	--
Δl mm.	0.0225 mm	--	0.0447 %

Tabla 4.3. Datos de contracción y dilatación de la curva dilatométrica para una probeta templada en aceite

Como ya se dijo, la magnitud de las contracciones y dilataciones, es posiblemente un buen indicativo de los porcentajes de los componentes que se transforman durante el revenido de un acero previamente templado, tal como el utilizado en este trabajo.

Así, la primera contracción es exactamente igual para los tres temples realizados, por otro lado, sabemos que el porcentaje de martensita es muy parecido para los temples hechos en agua y en salmuera, pero, en aceite es considerablemente menor, de acuerdo con esto, se esperaría una contracción menor para el temple en aceite, cosa que no se observa y quizá la explicación este en el tiempo que tarda la reacción en verificarse, por tanto, para dar una explicación acertada del porque del resultado obtenido en esta primera etapa, sería necesario seguir la cinética de la reacción, cosa que no fue posible realizar en este trabajo por la falta del equipo adecuado.

En la parte de la curva dilatométrica correspondiente a la transformación austenita retenida - bainita inferior se observa una dilatación, aquí se notan perfectamente las diferentes magnitudes del segmento, siendo este proporcional a la cantidad de austenita retenida, posiblemente.

De lo anterior, podemos decir, que para las condiciones de temple establecidas, se retiene más austenita en el temple en aceite, después en el temple en salmuera y por último en el temple en agua, lo cual concuerda con los resultados de la sección II.4.3.

La finalidad de este trabajo es precisamente, establecer un método de cuantificación de austenita retenida por otro medio diferente al de rayos X y al método metalográfico. De este modo, dilatometricamente, podemos saber de una forma bastante acertada la cantidad de dicho componente en una muestra en particular.

	Δl mm.	% γ Ret.
AGUA	0.11 mm.	10 %
SALMUERA	0.17 mm.	16 %
ACEITE	0.23 mm.	22 %

Tabla 4.4. Comparación de la dilatación en la segunda etapa del revenido con la cantidad de austenita retenida para los tres medios de temple.

Por último, nos queda comparar la magnitud de la última contracción, que de acuerdo con las tablas 4.1, 4.2 y 4.3, la contracción es más grande para un temple en aceite seguida por el temple en salmuera y la contracción más pequeña se observa en el temple en agua. Esta contracción corresponde a la descomposición tanto de martensita como de bainita para dar ferrita y cementita.

Durante el transcurso del revenido, la martensita va perdiendo carbono, lo cual baja considerablemente su volumen (ref. 3), no así la bainita, por tanto, en esta etapa la

bainita tiene un papel preponderante. El porcentaje de bainita formada es mayor para el temple en aceite, posteriormente para el temple en salmuera y el menor porcentaje se observa en el temple en agua, esto implica que la contracción será mayor para un temple en aceite, seguida del temple en salmuera y la contracción menor se observará en un temple en agua.

V. CONCLUSIONES

En base al estudio realizado y a las evidencias de las curvas dilatométricas, se llegó a las siguientes conclusiones

- 1.- El temple en aceite para el acero utilizado en este trabajo, produce un mayor porcentaje de austenita retenida que el temple en salmuera y que el temple en agua. (Tablas 4.4, y fig. 3.5, 3.6 y 3.8).
- 2.- De las curvas dilatométricas obtenidas se deduce que el segmento que señala la transformación austenita retenida - bainita inferior es diferente en longitud para los tres medios utilizados, siendo este segmento mayor para el caso de muestras templadas en aceite, seguida del temple en salmuera y por último del temple en agua
- 3.- La magnitud del segmento de las curvas dilatométricas presentadas podría ser considerado como proporcional a la cantidad de austenita retenida que se transforma durante el revenido (fig. 3.5, 3.6 y 3.8).
- 4.- El coeficiente de dilatación calculado para este segmento es similar para los tres casos, siendo el valor 0.65×10^{-6} , lo que hace suponer que no se produce ninguna transformación adicional.
- 5.- El principio y el fin de la transformación austenita retenida - bainita inferior, se presenta en el rango de temperatura comprendido entre 168°C. y 280°C. para

los tres medios de enfriamiento utilizados. Para el caso de temple en aceite el principio y el fin de la transformación de austenita retenida se detectó entre 168°C. y 280°C., respectivamente, para el caso de las muestras templadas en salmuera se detectó entre 178°C. y 276°C. y en las muestras templadas en agua esta comprendido entre 182°C. y 265°C. (Figs. 4.1, 4.2, y 4.3)

- 6.- Considerando el punto tres es evidente que las curvas dilatómétricas pueden ser utilizadas como un medio comparativo del porcentaje de transformación de austenita retenida a bainita, siempre y cuando se hagan ensayos previos que se apoyen en metalografías cuantitativas.

RECOMENDACIONES PARA PROXIMOS TRABAJOS:

Para complementar este estudio se recomienda elaborar otras tablas comparativas en donde se muestre la transformación de austenita retenida a bainita, fundamentalmente en aceros de herramienta dada la importancia práctica que tienen.

Otra alternativa, para eliminar la austenita retenida en el temple de un acero es el tratamiento sub-cero, a este respecto no existe un estudio comparativo de las ventajas que presenta este tratamiento sobre la estabilidad dimensional y las propiedades mecánicas, por tanto, recomendamos un estudio por técnicas dilatométricas para seguir la transformación de austenita retenida a martensita.

Es factible seguir la cinética de transformación de austenita retenida por medios dilatométricos, aunque se considera difícil cuando no se cuenta con un equipo suficientemente sensible, sin embargo, sería provechoso hacerlo porque esto proporcionaría información complementaria a los estudios propuestos.

BIBLIOGRAFIA

- Wilson R. "Metallurgy and heat treatment of tool steels"
Mac Graw Hill, 1975.
- Reed Hill E. Robert "Principios de metalurgia física"
C.E.C.S.A., 1976.
- Thelning K. E. "Steels and its heat treatment"
Butterworths London, 1975.
- Morgado Dorbecker Genaro "Funcionamiento y calibración del
dilatómetro universal UBD y pruebas dilatométricas en dife-
rentes materiales". Tesis profesional-UNAM, 1977.
- Klimek Edmund J. "A metallographic method for measuring of
retained austenite" *Metalls engineering quarterly*, February,
1976.
- Cizeron Georges "Dilatometric analysis of the thermal beha-
vior of the metallic materials" Isa Adamel Lhomargy.
- Law N. C., Howell P.R., Edmonds D. V. "Structure of lath
martensite and ocurrence of retained austenite in as-quenched
Fe-V-C low alloy steels" *Metal science* september, 1979.
- White G. and Brook R. "The kinetics of the thermal stabiliza-
tion of austenite at zub-cero temperatures" *Metal science*,
May, 1977.
- Lajtin M. Yu "Metalografía y tratamiento térmico de los meta
les" Editorial Mir Moscú, 1973.
- Apraiz B. J. "Tratamientos térmico de los aceros" Editorial
Dossat Madrid, 1971.