



---

---

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA, DUREZA Y TENSIÓN DE  
UN ACERO 4140 CON TEMPLE Y REVENIDO.

TESIS  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTA  
MARTÍNEZ MÉNDEZ GERARDO ALDO.

ASESOR DE TESIS  
DR. HÉCTOR ENRIQUE CURIEL REYNA.

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO 2013.



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES-CUAUTITLÁN

**ASUNTO: VOTO APROBATORIO**

**DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO  
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE**

**ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ  
Jefa del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos a comunicar a usted que revisamos LA TESIS:

**Caracterización de la estructura, dureza y tensión de un acero 4140 con temple y revenido.**

Que presenta el pasante: **GERARDO ALDO MARTINEZ MENDEZ**  
Con número de cuenta: **40800195-5** para obtener el Título de: **Ingeniero Mecánico Electricista**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"**  
Cuautitlán, Izcalli, Méx. a 2 de Mayo de 2013.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

|                     | NOMBRE                                   | FIRMA |
|---------------------|--|-------|
| <b>PRESIDENTE</b>   | <u>Dr. Héctor Enrique Curiel Reyna</u>   |       |
| <b>VOCAL</b>        | <u>Ing. José Manuel Medina Moñroy</u>    |       |
| <b>SECRETARIO</b>   | <u>Ing. José Luz Hernández Castillo</u>  |       |
| <b>1er SUPLENTE</b> | <u>Ing. Jorge Adolfo Peláez Salinas</u>  |       |
| <b>2do SUPLENTE</b> | <u>Lic. Erika de la Luz Téllez Mejía</u> |       |

## **DEDICATORIAS**

A Dios por permitirme llegar a este momento y concluir esta etapa con gran satisfacción.

A mis padres Roberto Martínez Calzada y Rebeca Méndez Barrera, porque gracias a ellos he podido llegar hasta aquí, por su apoyo incondicional y por ser mi ejemplo a seguir.

A mi familia porque nunca dudo de mis metas y estuvo a mi lado ayudándome a cumplir cada una de ellas.

A Ariana Karen Herrera Mejía por el apoyo que me ha brindado para terminar satisfactoriamente esta meta.

A mis amigos que siempre estaban atentos a mis pasos y por su apoyo a lo largo de mi estancia en la facultad.

## **RECONOCIMENTOS**

Al maestro en ingeniería Noé Alberto Cortez Guerrero por su asesoría brindada durante la realización de las pruebas mecánicas.

Al maestro en ingeniería Juan José García Ruiz por su apoyo durante la realización de las experimentales.

Al maestro en ciencias Tomas Rangel Ortiz por el apoyo brindado durante la realización de las pruebas experimentales hechas en el centro de asimilación tecnológica CAT.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi casa de estudios la FES Cuautitlán que alberga a la Ingeniería Mecánica Eléctrica en donde en sus aulas y laboratorios pude adquirir conocimientos que me ayudaran a desarrollarme como profesionista en mi vida laboral.

Al centro de asimilación tecnológica en el cual pude realizar las pruebas mecánicas que fueron parte fundamental en la realización de este trabajo de tesis.

## Tabla de contenido

|   |    |
|---|----|
| .....   | 1  |
| 1. MARCO TEÓRICO .....  | 8  |
| 1.1 Introducción.....   | 8  |
| 1.2 Efecto de Aleantes .....  | 9  |
| 1.2.1 Generalidades .....   | 9  |
| 1.2.2 Clasificación de los elementos de aleación. ....  | 10 |
| 1.2.3 Influencia de los aleantes sobre el diagrama Fe-Fe <sub>3</sub> C.....                          | 10 |
| <b>1.2.4 Efecto de los aleantes sobre las propiedades mecánicas en condiciones de recocido.</b> ..... | 12 |
| <b>1.2.5 Efecto de los aleantes en la respuesta al calentamiento para endurecimiento.</b> ..          | 13 |
| 1.2.6 Formación de Austenita.....   | 14 |
| 1.2.7 Transformación isotérmica .....   | 15 |
| 1.2.8 Ms y Austenita retenida.....  | 18 |
| 1.3 Tratamiento térmico .....   | 19 |
| 1.3.1 Transformaciones durante el calentamiento .....   | 21 |
| 1.3.2 Transformaciones durante el enfriamiento. ....  | 23 |
| 1.3.3 Endurecimiento.....   | 26 |
| 1.3.4 Temple .....  | 28 |
| 1.3.5 Revenido.....   | 29 |
| 1.3.6 Austempering .....  | 30 |
| 2. PARTE EXPERIMENTAL .....   | 32 |
| 2.1 Planteamiento del problema. ....  | 32 |
| <b>2.2 Objetivo.</b> .....  | 32 |
| 2.3. Hipótesis .....  | 32 |
| 2.4 Material Utilizado.....   | 33 |
| 2.5 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA, PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....                                       | 33 |
| 2.5.1 Dureza.....   | 34 |
| 2.5.2 Metalografía.....   | 35 |
| 2.5.3 Tensión Cuasi-Estática .....  | 37 |
| 2.6. RESULTADOS OBTENIDOS. ....   | 42 |
| 2.6.1 Ensayo de Dureza. ....  | 42 |
| 2.6.2 Metalografía.....   | 53 |
| 2.6.3 Ensayo de Tensión.....  | 56 |
| 3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ....  | 57 |

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 3.1 Ensayo de dureza .....  | 57 |
| 3.2 Metalografía.....       | 58 |
| 3.3 Ensayo de tensión. .... | 58 |
| 4. CONCLUSIONES.....        | 59 |
| 5. BIBLIOGRAFIA .....       | 60 |



# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 Introducción

Los aceros inoxidable de la familia de los de bajo Cromo, son materiales que se usan principalmente donde se necesita resistencia mecánica. Son materiales que contienen Cromo entre 0.5 a 2.0%, Carbono de 0.06 a 0.40% y Molibdeno de 0 a 1.0%. Su sensibilidad al efecto térmico los hace que sean manejados con cuidado principalmente en los procesos donde existe calor por su tendencia a la fisuración, sin embargo, cuando son sometidos a tratamientos térmicos, las estructuras finales que se obtienen pueden dar una misma medida física como es la dureza, pero otra característica como la metalografía nos da variaciones en las estructuras.

Los aceros con bajo contenido de Cromo, forman un grupo de materiales que se usan generalmente donde se necesita resistencia mecánica, sin embargo el elemento fundamental que es el Cromo, se hace presente en ambas propiedades desde aproximadamente el 0.5%.

El acero 4140 tiene propiedades mecánicas y metalúrgicas que se obtienen por medio de los Tratamientos Térmicos, que satisfacen las necesidades de resistencia mecánica. Los tratamientos térmicos de este acero por su variedad de estructuras, deben ser compatibles con el servicio al que está destinado, por consiguiente las propiedades que se obtienen en el metal deben ser iguales en todas direcciones.

La presente investigación consiste en que a través de la aplicación de los tratamientos térmicos se obtenga la mayor igualdad en propiedades mecánicas y estructurales del material base, que será comprobada por medio de las metodologías desarrolladas en esta investigación, las cuales son la toma de dureza, la metalografía y el ensayo de tensión.

## **1.2 Efecto de Aleantes**

### **1.2.1 Generalidades**

La mayoría de las limitaciones de los aceros pueden superarse mediante el uso de elementos de aleación. Un acero aleado es aquel cuyas propiedades características se deben a algún elemento diferente al carbono.

Los elementos de aleación se añaden a los aceros para diversos propósitos, entre los cuales, los más importantes son:

- a) Aumentar la resistencia a la corrosión.
- b) Aumentar la resistencia al desgaste.
- c) Aumentar la templabilidad.
- d) Disminuir la distorsión durante el proceso de endurecimiento.
- e) Mejorar la resistencia a temperaturas comunes.
- f) Mejorar las propiedades mecánicas tanto a altas como a bajas temperaturas
- g) Mejorar la tenacidad a cualquier dureza o resistencia mínima. Estas mejoras se logran principalmente por:
  - 1) Alteración de las características de revenido de los aceros
  - 2) Alteración de las características de endurecimiento de los aceros
  - 3) Alteración de la naturaleza y cantidad de carburos formados en los aceros.

### **1.2.2 Clasificación de los elementos de aleación.**

Los elementos aleantes pueden clasificarse de acuerdo con la forma en que se distribuyen en los dos constituyentes principales de los aceros:

GRUPO 1 Elementos que se disuelven en la ferrita (Ni, Si, Al, Cu, Co, Mn).

GRUPO 2 Elementos que forman carburos simples ó complejos (Cr, Mo, V, W, Ti, Si, Zr, Ta).

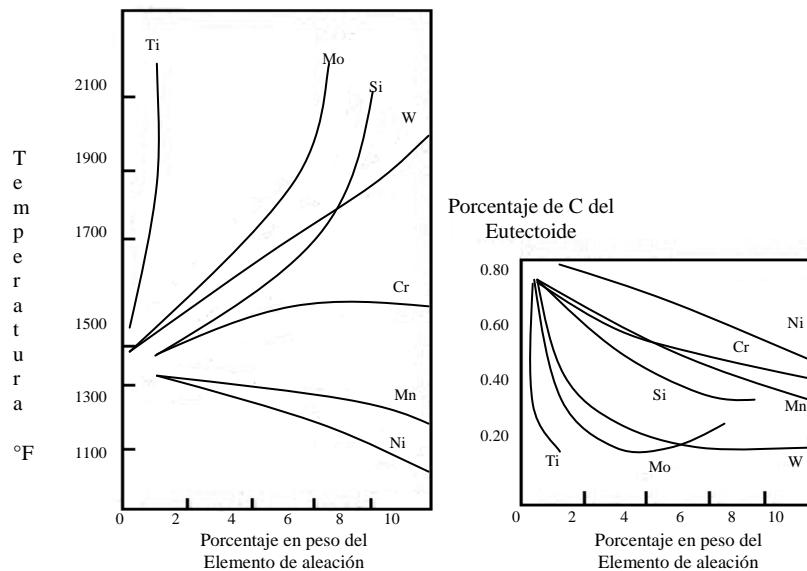
Es probable que se presente alguna solubilidad de todos los elementos en la ferrita, pero algunos no se encuentran extensivamente en la fase carburo. De esta manera, el níquel, silicio, aluminio, cobre, cobalto y manganeso se hallan ampliamente disueltos en la ferrita. En ausencia de carbono, se encontrarán disueltas en ferrita grandes proporciones de elementos del grupo 2, por lo tanto, la tendencia a formar carburos es obvia sólo cuando hay gran cantidad de carbono.

### **1.2.3 Influencia de los aleantes sobre el diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C.**

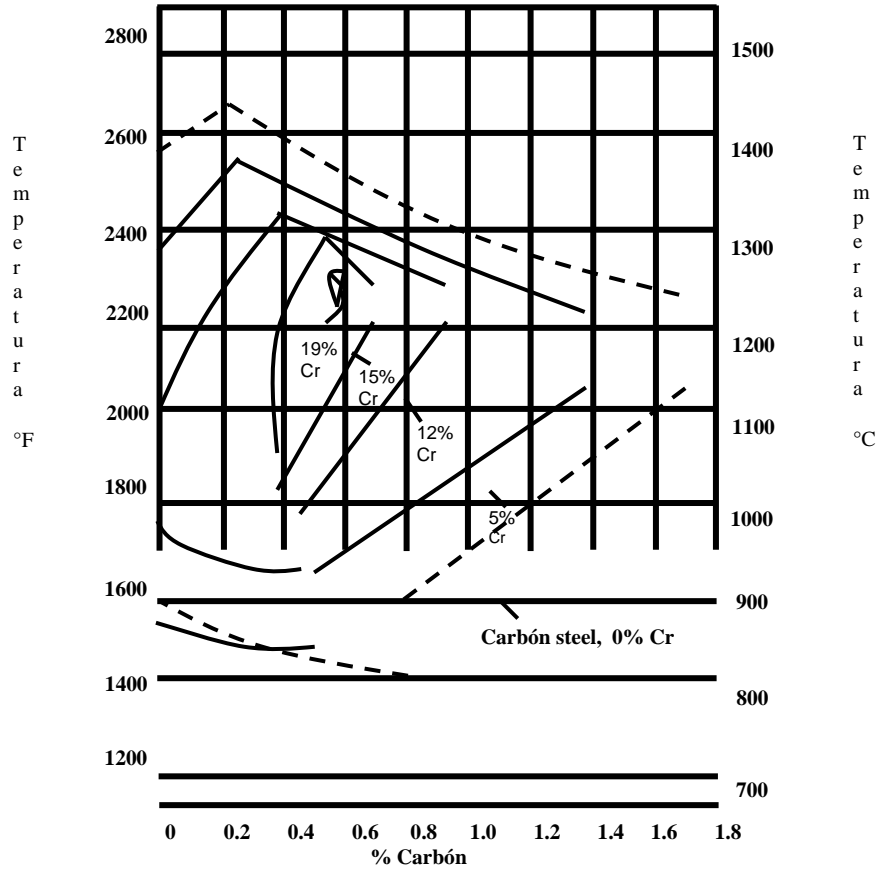
Es difícil entender la función exacta de cada elemento o predecir los resultados finales en un sistema de múltiples componentes. Los elementos de aleación tendrán diferentes y severos efectos sobre el diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C. Cuando un tercer elemento se añade al acero, el diagrama binario hierro-carburo de hierro ya no es una representación de condiciones de equilibrio, ya que las temperaturas críticas, la posición del eutectoide, el intervalo crítico y la localización y tamaño de los campos de ferrita y Austenita se verán modificados, lo que obliga a utilizar los diagramas de fase ternarios, con los que se puede determinar la condición estructural de los aceros con diferentes aleantes, así como sus efectos.

El cambio en la temperatura crítica producido por la presencia de elementos de aleación es importante en el tratamiento térmico de aceros aleados, ya que aumentará ó disminuirá la temperatura crítica de endurecimiento al ser comparada con la correspondiente a un acero al carbono. El níquel y el manganeso por ejemplo, tienden a disminuir la temperatura crítica en calentamiento, en tanto que el molibdeno, cromo, silicio, tungsteno y vanadio tienden a aumentarla.

Al aumentar las cantidades de níquel y manganeso se puede disminuir lo suficiente la temperatura crítica para evitar la transformación de la Austenita durante el enfriamiento lento, por lo que se les conoce como elementos estabilizadores de la Austenita, la cual se retendrá a temperatura ambiente. Todos los elementos de aleación tienden a reducir el contenido de carbono del eutectoide, pero sólo el níquel y el manganeso reducen la temperatura eutectoide Fig. 1. El molibdeno, cromo, silicio y titanio, en grandes cantidades, tienden a contraer la región de Austenita y aumentar el campo de la ferrita Fig. 2.



**Fig. 1. Composición y temperatura eutectoide influidas por diversos elementos de aleación.**

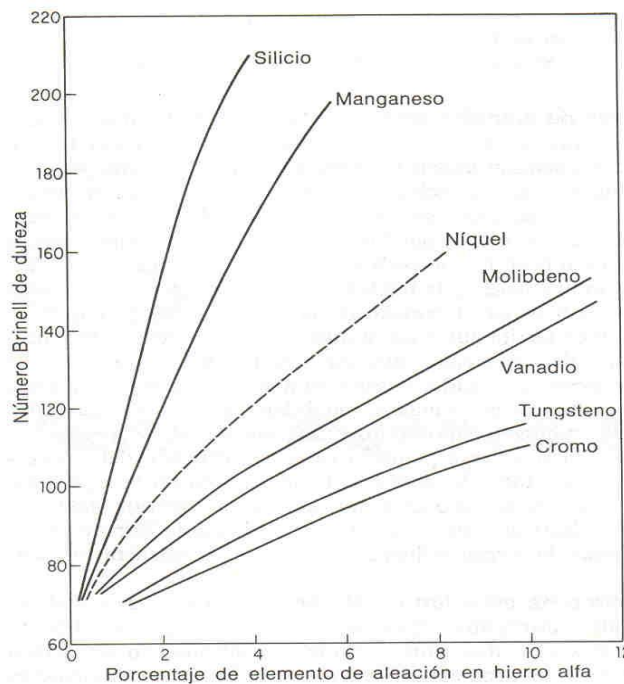


**Fig. 2. Efecto del cromo en la formación de Austenita.**

#### **1.2.4 Efecto de los aleantes sobre las propiedades mecánicas en condiciones de recocido.**

Los aceros usualmente tienen una estructura de ferrita y finos carburos esferoidizados en la condición de recocido, la cual representa el mayor acercamiento a un estado de equilibrio. Las propiedades mecánicas de los aceros en esta condición son de interés para los consumidores por su influencia sobre la maquinabilidad.

Los elementos de aleación afectan la resistencia y dureza de los aceros recocidos al promover el endurecimiento por solución sólida de la ferrita, al incrementar la cantidad de finas partículas de carburos en la estructura que producen una ferrita de menor tamaño de grano y cambiando la naturaleza de la fase carburo a carburos aleados más abrasivos. El efecto de varios elementos de aleación en el endurecimiento por solución sólida de la ferrita sin considerar la presencia de carbono se muestra en la Fig. 3.



**Fig. 3. Probable efecto de endurecimiento de varios elementos disueltos en hierro alfa**

### 1.2.5 Efecto de los aleantes en la respuesta al calentamiento para endurecimiento.

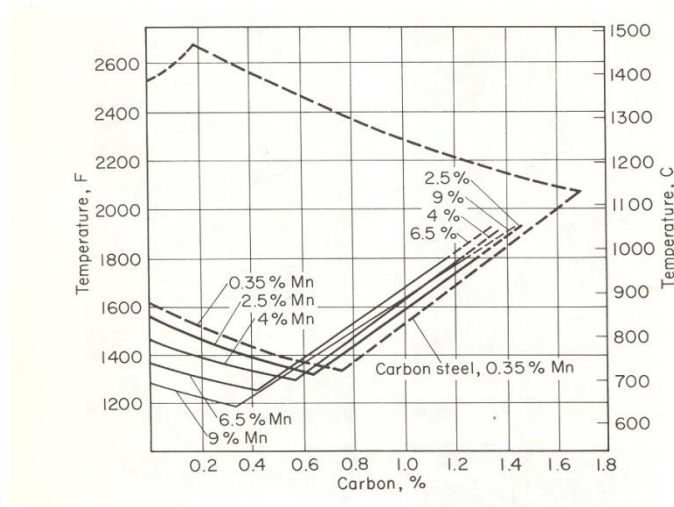
Lo primero que se debe hacer en el tratamiento térmico de los aceros es de austenitización completa, calentando por arriba del rango de la temperatura crítica en cada caso. En el proceso de calentamiento, la ferrita y carburo de la estructura recocida reaccionan formando cristales de Austenita, que crecen hasta encontrarse unos con otros estableciendo así el tamaño de grano austenítico inicial.

Al continuar el calentamiento, crecen estos cristales de Austenita y se disuelve el exceso de carburos. Los elementos de aleación pueden afectar los siguientes parámetros durante el calentamiento del acero en el ciclo de endurecimiento del mismo:

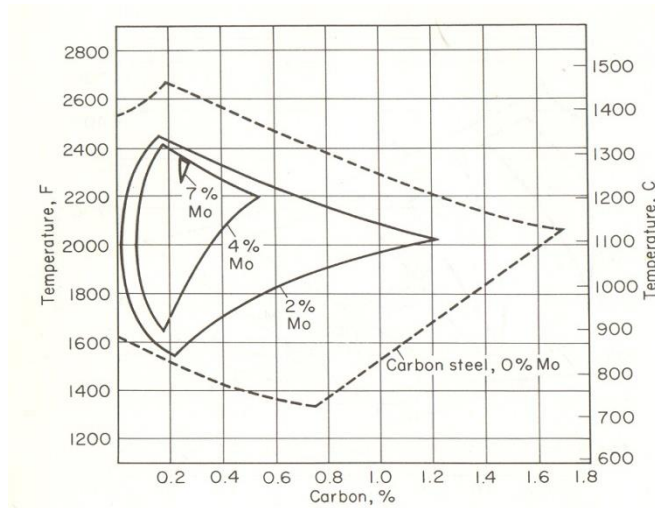
- 1) Las características del crecimiento de grano.
- 2) La temperatura crítica y alterar el intervalo de temperatura en la cual la Austenita es estable.
- 3) La cantidad de carburos sin disolver ó exceso de carburos en la estructura endurecida.
- 4) El intervalo de disolución de carburos.

#### **1.2.6 Formación de Austenita**

Se puede definir el eutectoide como la composición que tiene la mínima temperatura para la formación de la Austenita pura, todos los elementos de aleación cambian el contenido de carbono del eutectoide a valores inferiores. Las Figuras 2, 4 Y 5 muestran gráficamente el efecto del cromo, manganeso y molibdeno sobre la temperatura y rangos de composición para la formación de Austenita. Se puede observar que los elementos de aleación desplazan la temperatura y composición del eutectoide y alteran la posición del campo de la Austenita. Estos cambios son de considerable importancia práctica porque no solo afectan las temperaturas apropiadas de tratamiento térmico sino que también afectan la cantidad de carburo sin disolver a la temperatura seleccionada. Todos los elementos de aleación cambian el contenido de carbono del eutectoide a valores inferiores. El efecto comparativo de varios elementos de aleación sobre la composición y temperatura eutectoide se muestran en la Fig. 1.



**Fig. 4. Efecto del Manganeso en la formación de Austenita.**



**Fig. 5. Efecto del molibdeno en la formación de Austenita.**

### 1.2.7 Transformación isotérmica

A excepción del cobalto, todos los elementos de aleación que se agregan a los aceros, incluyendo el carbono, tienden a mover la curva de transformación isotérmica a tiempos mayores para aumentar la templabilidad con medios de temple de menor severidad. Debido a que el cobalto se agrega usualmente sólo en composiciones de alta aleación para aumentar su dureza.



Existe un factor de considerable importancia que debe tomarse en cuenta y que es el efecto de los carburos no disueltos. Los fuertes formadores de carburo como vanadio y tungsteno pueden resistir su disolución en la Austenita durante el calentamiento para el endurecimiento. En tales casos, la Austenita tiene un bajo contenido de carbono y la curva de transformación isotérmica se mueve a tiempos más cortos en vez de más largos. Por lo tanto, cuando se considera el efecto de los aleantes en las curvas de transformación isotérmica de los aceros, la temperatura de endurecimiento y la presencia ó ausencia de carburos sin disolver debe siempre tomarse en cuenta. Adiciones individuales de manganeso, níquel ó silicio a un acero, en cantidades normalmente encontradas en los aceros, mueve la totalidad de la curva de transformación isotérmica a tiempos más largos Figs. 6 y 7.

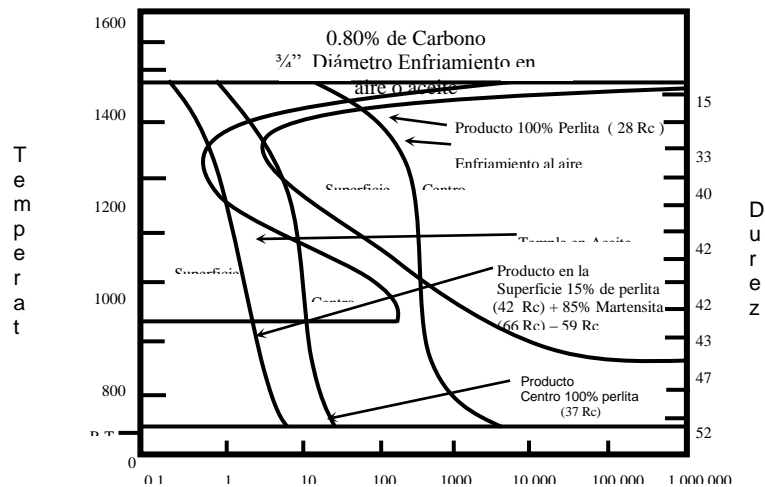


Fig. 6. Diagrama TTT de un acero con 0.8% C sin efecto de otros aleantes.

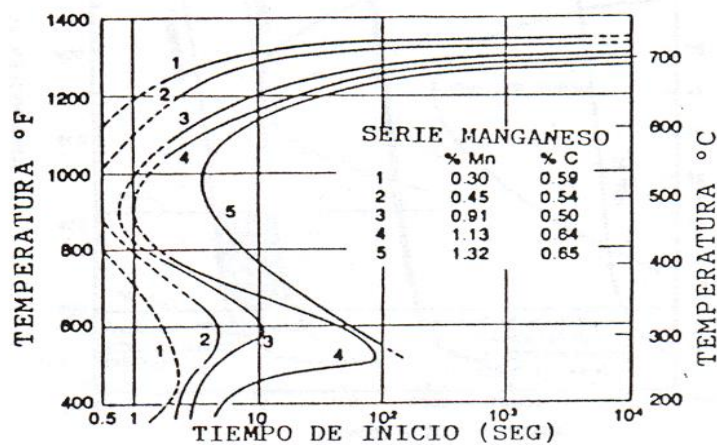
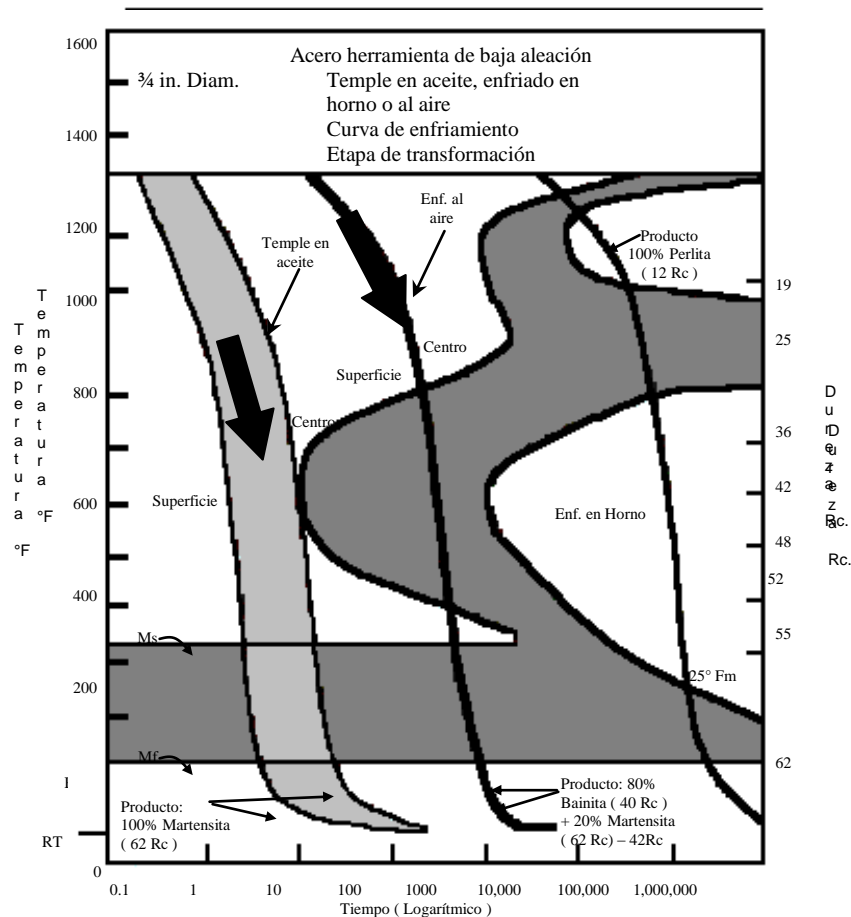


Fig. 7. Efecto del manganeso sobre el diagrama TTT.

El cromo, molibdeno, tungsteno y vanadio son elementos formadores de carburos y tienden a alterar la forma de la curva de transformación isotérmica además de moverla a tiempos más largos. La Fig. 8 ejemplifica este efecto en un acero de baja aleación que contiene cromo y molibdeno. Si se compara esta figura con la Fig. 7, se observa una separación diferente de los rangos de perlita y Bainita en dos "narices", con la nariz de perlita desplazada más drásticamente a la derecha. En este acero, un enfriamiento muy lento puede resultar en una mezcla de estructuras de perlita, Bainita y Martensita. La Bainita es un producto más duro que la perlita y no es tan perjudicial para las propiedades mecánicas de un acero endurecido como lo es la perlita.

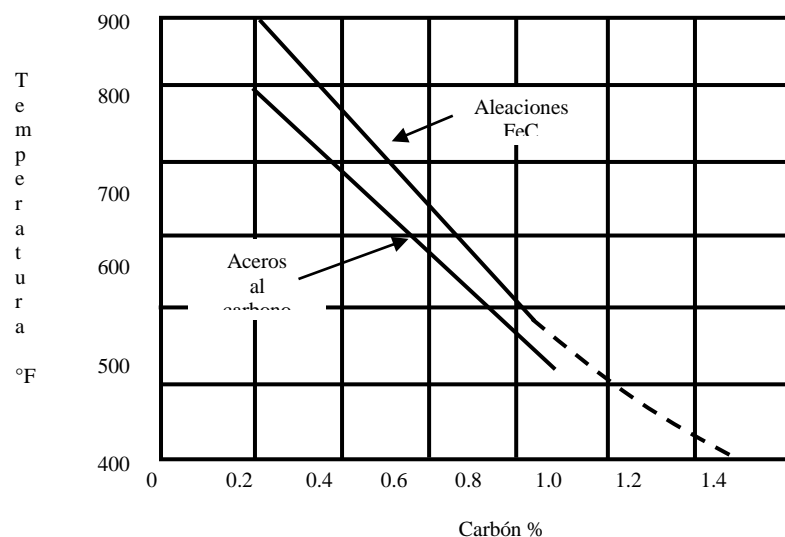


**Fig. 8. Efecto de la adición de cromo y molibdeno sobre el diagrama TTT de un acero con 0.80% C.**

### 1.2.8 Ms y Austenita retenida

Ms (Martensita inicial) es la temperatura a la cual la Austenita empieza a transformarse en Martensita con el enfriamiento. Por abajo de esta temperatura en el enfriamiento, la formación de la Martensita continúa hasta temperatura ambiente o hasta temperatura Mf (Martensita final) la cual es el fin de la transformación de la Austenita a Martensita.

El cobalto y aluminio, a excepción de todos los elementos disminuyen la temperatura Ms e incrementan la tendencia de la Austenita a ser retenida en la estructura endurecida final Fig. 9. Es difícil predecir el efecto de cada elemento porque en gran medida depende de las condiciones de austenitización. A mayor contenido de carbono de la Austenita, la temperatura Ms disminuye y aumenta el porcentaje de Austenita retenida. Contrariamente, a mayor cantidad de carburo, la temperatura Ms aumenta y disminuye el porcentaje de Austenita retenida. Las velocidades de enfriamiento lentas, particularmente entre el rango de temperaturas Ms y Mf, tienden a favorecer la retención de Austenita. Mientras más alta es la temperatura de austenitización, la temperatura Ms disminuye y aumenta el porcentaje de Austenita retenida. Si la Austenita retenida se presenta en cantidades excesivas, puede disminuir notablemente la dureza de temple, y puede también afectar la estabilidad dimensional, la resistencia y la tenacidad de la estructura.



**Fig. 9. Efecto del porcentaje de carbono sobre la temperatura Ms.**

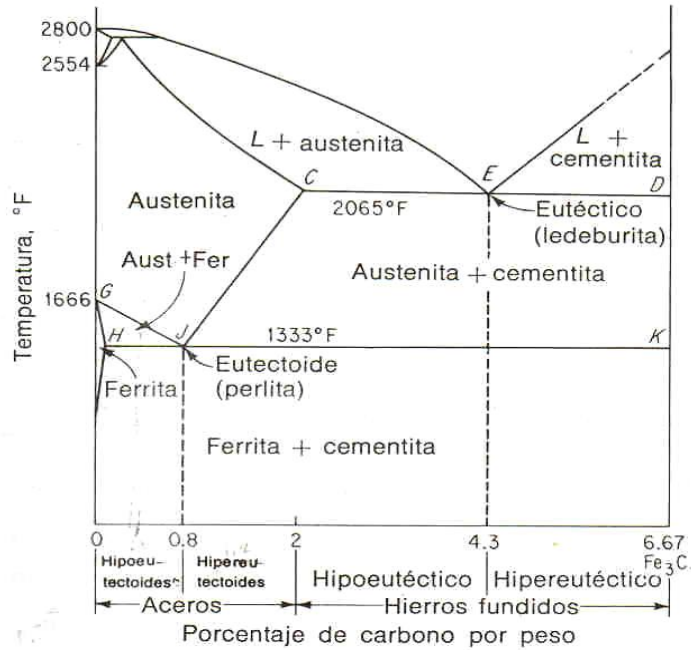
Como los aleantes son fuertes formadores de carburos, la respuesta de la temperatura  $M_s$  se complica debido a la tendencia de estos a formar carburos complejos que no se disuelven a la temperatura de endurecimiento. Por tanto, un aleante formador de carburo puede aumentar la temperatura  $M_s$  por disminuir la cantidad de carbono disuelto en el calentamiento a una temperatura dada de endurecimiento. Sin embargo, este mismo carburo puede disminuir la temperatura  $M_s$  cuando la temperatura de endurecimiento ó austenitización alcanza una disolución y homogenización completa del carburo.

### **1.3 Tratamiento térmico**

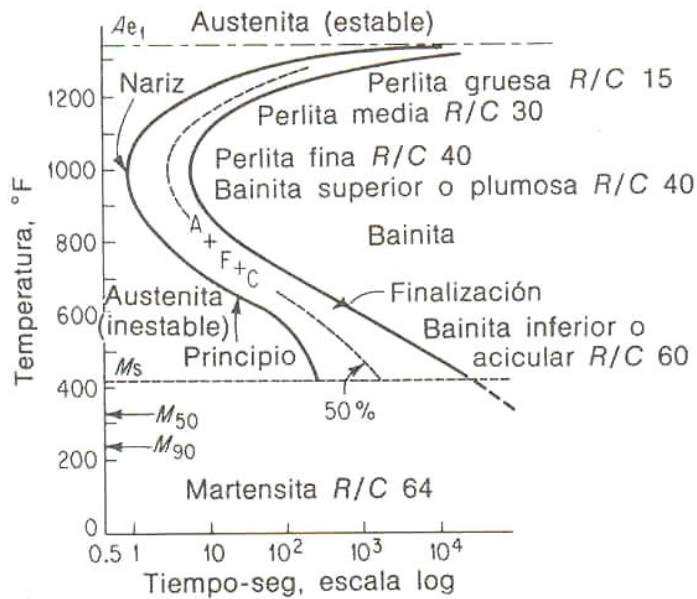
En todos los aceros cuando se calientan, se produce un cambio estructural. La mezcla de ferrita y carburo que existe en el acero a bajas temperaturas, se transforma en Austenita al pasar la temperatura crítica durante el calentamiento. La Austenita disuelve mayor cantidad de carbono que la ferrita y, durante el enfriamiento desde la temperatura del tratamiento térmico, el tamaño y distribución del agregado de ferrita-carburo se puede controlar a través del procedimiento de enfriamiento. Al controlar la distribución de ferrita y carburos, se puede obtener la mayor variación posible de propiedades mecánicas en los aceros.

La formación de Austenita en el calentamiento, así como la formación consecutiva de un agregado controlado de ferrita y cementita durante el enfriamiento, se representan básicamente por dos diagramas:

- a) El diagrama Fierro-Carburo de Fierro ( $Fe-Fe_3C$ ), mostrado en la Fig. 10.
- b) La curva TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación), mostrada en la Fig. 11.



**Fig. 10. Diagrama de equilibrio Fierro-Carburo de Fierro marcado con los nombres comunes para las estructuras.**

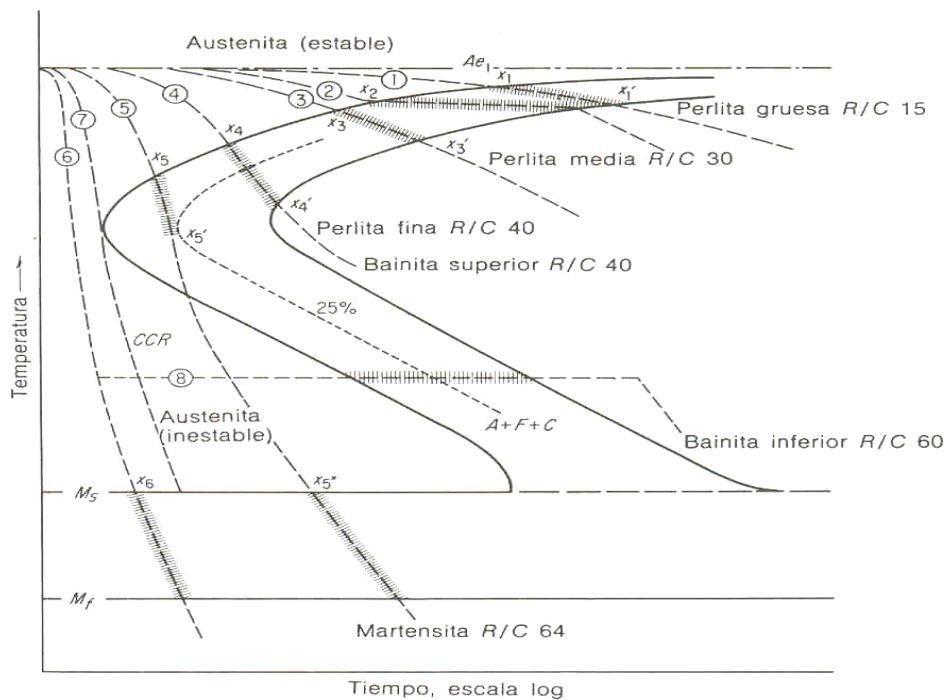


**Fig. 11. Diagrama de Transformación Isotérmica de un acero eutectoide.**

Los dos diagramas se utilizan para predecir las estructuras que se obtienen a través de una combinación de ciclos de calentamiento y enfriamiento.

### 1.3.1 Transformaciones durante el calentamiento

Al aplicar altas temperaturas a aceros con diferentes porcentajes de carbón, se obtienen temperaturas de transformación que, combinadas con los resultados de investigaciones dilatométricas y metalográficas, producen el diagrama Fierro-Carbono. Este diagrama establece las fases o estructuras estables a cualquier combinación de temperatura y porcentaje de las aleaciones Fierro-Carbono. Por ejemplo, con base a la Fig. 12, se observa que un acero con 0.8% de carbono y a 870 °C tendrá una estructura de 100% Austenita, en tanto que a la misma temperatura un acero con 1.30% de carbono está compuesto de Austenita más una cierta cantidad de cementita ó carburo



**Fig. 12. Curvas de enfriamiento sobrepuestas en un diagrama hipotético TTT para un acero eutectoide. La porción de achurado en la curva de enfriamiento indica la transformación.**

En los aceros que contienen entre 0.90% a 1.1% de carbono, la Austenita empieza a formarse aproximadamente a 725 °C y cuando el contenido de carbono aumenta sobre el rango indicado, es necesario usar temperaturas más elevadas en los tratamientos térmicos para disolver los carburos y lograr una Austenita más homogénea.

El diagrama Fierro-Carbono es la base para el conocimiento de las transformaciones que ocurren tanto en aceros al carbono como en otros aceros. Así mismo, el diagrama debe considerarse inadecuado cuando se estudian aceros aleados.

Cuando la temperatura es más alta de la línea Acm, el diagrama Fierro-Carbono muestra que la Austenita pura debe ser la única fase presente en el acero. Sin embargo, esto no ocurre al momento exacto del calentamiento sobre la línea Acm, y en algunos casos es necesario mantener el acero a temperaturas arriba de los 925°C para poder alcanzar una homogeneización total de la Austenita con respecto a las partículas de carburo. Esto implica que el diagrama se puede aplicar sólo cuando se alcanza el estado de equilibrio. En la mayoría de los procesos metalúrgicos que involucran calentamiento de metales sólidos, nunca se alcanza instantáneamente el equilibrio, por lo tanto, se utilizan tiempos largos de temperatura así como calentamientos y enfriamientos lentos para acercarnos lo suficiente al equilibrio.

Los procesos de calentamiento no se llevan a cabo a velocidades lentas y, por tanto, cuando se alcanza una temperatura de 725 °C puede no existir Austenita aunque así lo indique el diagrama, es decir, con el aumento en la velocidad de calentamiento la temperatura a la que la transformación a Austenita ocurre se eleva. La temperatura mínima a la que se puede iniciar la transformación a Austenita en el calentamiento es a los 725 °C, que se considera la temperatura crítica de equilibrio.

### 1.3.2 Transformaciones durante el enfriamiento.

Similarmente las transformaciones durante el calentamiento, se pueden aplicar a problemas de enfriamiento del acero desde el rango de temperaturas de Austenita ó Austenita más carburo. El diagrama de equilibrio Fierro-Carbono muestra que al enfriar un acero que contenga de 0.8% a 0.9% de carbono, la Austenita debe descomponerse para formar ferrita y carburo a una temperatura de 725 °C. Si se ha formado una Austenita homogénea por calentamiento a una temperatura sobre la línea Acm y se ha disuelto una gran cantidad de carburo, la precipitación de cementita en el enfriamiento tendrá una gran tendencia a producirse en los límites de grano de la Austenita. En caso de que no se hubiera disuelto el carburo completamente y quedaran cantidades considerables en forma de partículas esféricas en toda la matriz, la precipitación del carburo se producirá en estos puntos preestablecidos y la red de cementita no se formará alrededor de los límites de grano de Austenita.

La transformación estructural de Austenita a ferrita y carburo en el enfriamiento no se produce a los 725 °C como lo indica el diagrama de equilibrio porque se presenta un "retraso" similar al que se discutió en la formación de Austenita durante el calentamiento. Si se enfriara un acero a la velocidad más baja posible, la transformación de Austenita a ferrita y carburo se produciría, probablemente, entre 710 °C y 720 °C. Entonces, bajo cualquier condición normal de enfriamiento la transformación se llevará a cabo por debajo de los 705 °C. Al incrementarse la velocidad de enfriamiento, la temperatura a la que la transformación se produce es mucho menor a la que indica el diagrama de equilibrio Fierro-Carbono. La cantidad del "retraso" en el enfriamiento es más grande que el que ocurre en el calentamiento.



La forma de comprender este fenómeno es a través del estudio de los diagramas Tiempo-Temperatura-Transformación (TTT) de los aceros Fig. 11. El lado izquierdo de la curva indica el tiempo al cual la Austenita se empieza a transformar a cualquier temperatura y el lado derecho de la curva indica el tiempo al cual la transformación se completó, así como la estructura formada.

Si el acero está formado de Austenita homogénea antes del enfriamiento es decir Austenita sin ningún carburo o exceso de carbono presente, en todo el rango de temperaturas entre 725 °C y 540 °C se obtendrá perlita laminar como producto de la transformación. A temperaturas cercanas a la crítica, la distancia entre las placas del carburo en la perlita, comúnmente llamado espacio de la perlita, es relativamente grande y, el producto obtenido es relativamente suave, teniendo una dureza que varía aproximadamente entre 10 a 15 Rc. Así cuando se reduce la temperatura de transformación, el espacio interlaminar de la perlita disminuye y ahora el producto obtenido se vuelve más duro, subiendo la dureza a un valor de 40 a 45 Rc a una temperatura cuya velocidad de transformación es más rápida. A esta parte de la curva, en la cual se indica el rango más rápido de transformación, se le conoce como "nariz" de la curva. En este punto se encuentra la velocidad crítica de transformación.

Si se tienen temperaturas inferiores a la de la "nariz", la perlita laminar no se forma pero en su lugar se forma un producto acicular que es una mezcla fina de ferrita y carburo, conocido como Bainita, esta tiene una dureza que aumenta conforme la temperatura de transformación disminuye y varía de 45 a 60 Rc. La formación de perlita ocurre en tiempos cortos y a la temperatura de la "nariz" de la curva, por lo que, si se desea la formación de Bainita, el acero debe enfriarse a una velocidad extremadamente rápida, por abajo de esta temperatura crítica y al rebasarla deberá detenerse o retardarse el enfriamiento. Si esto procede, es posible suprimir completamente la formación de perlita y retener la Austenita a bajas temperaturas, la cual se transformará a Bainita o Martensita.

En caso de que el enfriamiento continuara, la Austenita empezará a transformarse en Martensita a aproximadamente 205 °C para un acero con 1.0% de carbono. Esta Martensita, que es el principal constituyente de un acero totalmente endurecido, consta de numerosas placas microscópicas, cada una de las cuales está formada a partir de la Austenita original por un proceso de cizallamiento rápido en menos de un millonésimo de segundo, La Martensita tiene una celda unitaria tetragonal de cuerpo centrado en contraste a la celda cúbica de cuerpo centrado de la ferrita y tiene la misma composición química de la Austenita original. La Martensita sólo se forma cuando la temperatura del acero disminuye y, si el enfriamiento se detiene, la transformación se detendrá. Se requiere de un nuevo enfriamiento para que la transformación a Martensita se reinicie.

Como se sabe, la temperatura a la cual la Austenita empieza a transformarse en Martensita con el enfriamiento es conocida como Ms. Por abajo de esta temperatura del enfriamiento, la formación de la Martensita continúa hasta temperatura ambiente o hasta temperaturas abajo de 0 °C; eventualmente, se consume toda la Austenita remanente hasta llegar a una segunda temperatura designada como punto Mf. El resultado de la dureza en el temple es una función del contenido de carbono en la Martensita la cual es heredada de la Austenita y la cantidad de ésta Austenita suave retenida durante la realización del enfriamiento.

La Austenita retenida es inestable y puede transformarse a Martensita bajo la influencia del trabajo en frío o deformación, durante las operaciones de revenido o simplemente durante un tratamiento de envejecimiento a temperatura ambiente, causando un cambio dimensional inesperado, fragilidad o agrietamiento. En otros casos con porcentajes elevados de Austenita retenida se puede lograr que la dureza final del acero sea más baja por la transformación de la Austenita retenida a un producto más blando que la Martensita durante operaciones subsecuentes de revenido. La cantidad de Austenita retenida depende, principalmente, de la temperatura Ms y la temperatura del baño de temple.

Entre más alto es  $M_s$ , es más baja la cantidad de Austenita retenida para una temperatura dada del baño de temple. La temperatura  $M_s$  es entonces función de la composición del acero (principalmente del contenido de carbono, que al aumentar disminuye  $M_s$ ) y de la temperatura de austenitización.

Hay varias mezclas de estructuras que se pueden obtener por un enfriamiento a ciertas velocidades específicas o por el uso de combinaciones de tiempos y temperaturas de permanencia, seguidas por diferentes velocidades de enfriamiento, como se observa en la Fig. 12.

### 1.3.3 Endurecimiento

El endurecimiento consiste en calentar el acero a una temperatura dentro de la región de Austenita ó Austenita más carburo y enfriar bruscamente, es decir templar a una velocidad que prevenga la formación de perlita, esferoidita o Bainita y permita la formación de Martensita. Es muy importante considerar los siguientes aspectos cuando se calienta un acero para endurecerlo:

- 1) Solución de carburos. Para obtener una dureza total, es necesario que haya una suficiente solución de carburos. Sin embargo, se debe evitar una solución de carburos excesiva o se retendrán grandes cantidades de Austenita. La cantidad de carburos que se pueden disolver en Austenita es proporcional a la temperatura de austenitización. Cada acero tiene un rango de temperaturas en el cual la cantidad de carburos disueltos es óptima.
- 2) Tamaño de grano. El tamaño de grano se debe mantener al mínimo para asegurar suficiente tenacidad. El tamaño de grano del acero crece al aumentar la temperatura por arriba de la temperatura crítica superior. El tamaño de grano también varía en función del tiempo en que se mantiene el acero a la temperatura de austenitización.

- 3) Composición química superficial. La composición química en la superficie del acero se debe controlar estrechamente, ya que ésta es directamente responsable de las características y propiedades del mismo. Este control no implica solamente prevenir la pérdida de carbono o decarburización, sino el introducir otros elementos perjudiciales como el oxígeno. Los medios más utilizados para controlar la composición química superficial son los baños líquidos y los materiales para "empacar" el acero y prevenir el contacto del aire con el mismo, así como el uso de atmósferas controladas o vacío.
- 4) Tiempo de endurecimiento. Es muy importante que el acero se mantenga el tiempo necesario a la temperatura de austenitización para asegurar un endurecimiento total del mismo. Para fines prácticos, el tiempo de permanencia a temperatura de austenitización se inicia cuando la pieza alcanzó la temperatura del horno.

Las características más importantes de la transformación de Austenita a Martensita, son las siguientes:

- a) La transformación es sin difusión de Carbono y no hay cambios en la composición química.
- b) La transformación se lleva a cabo sólo durante el enfriamiento y cesa si éste se interrumpe, es decir, la transformación sólo depende de la disminución de la temperatura y es independiente del tiempo a lo cual se le conoce como transformación atérmica.
- c) La transformación a Martensita de un acero no puede eliminarse, ni la temperatura  $M_s$  modificarse al cambiar la rapidez de enfriamiento.
- d) La Martensita probablemente nunca esté en condiciones de equilibrio real, aunque puede existir de modo indefinido a temperatura ambiente.

Esta estructura puede considerarse como una transición entre la fase inestable de Austenita y la condición final de equilibrio de una mezcla de ferrita y cementita.

e) La propiedad más significativa de la Martensita es su elevada dureza.

El propósito básico del endurecimiento es producir una estructura totalmente martensítica, y a la mínima rapidez de enfriamiento, que evitará la formación de cualquiera de los productos más suaves de transformación, se le conoce como rapidez crítica de enfriamiento, la cual es función de la composición química del acero y el tamaño de grano austenítico, e indica que tan rápido debe enfriarse un acero para formar sólo Martensita.

#### **1.3.4 Temple**

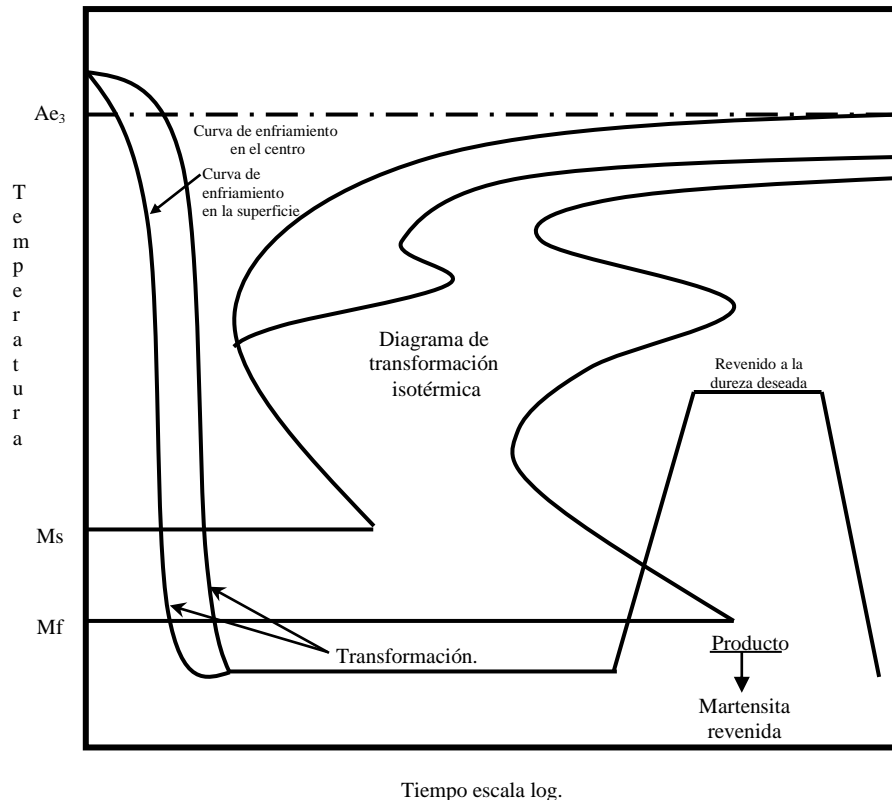
El temple tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia del acero. Para que se logre lo antes descrito, se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y se enfría rápidamente en un medio conveniente, agua y aceite entre otros líquidos. La transformación que ocurre a continuación generará la formación de tensiones elevadas, por lo que se deben tomar precauciones para prevenir que éstas alcancen una magnitud superior a la resistencia mecánica del acero y se fisure. Los factores más importantes que contribuyen a la fisuración durante el temple son los siguientes:

- 1) La carburización ó decarburización de la superficie del acero, pueden producir agrietamiento durante el temple.
- 2) Sobre calentamiento durante el Endurecimiento.- El gran tamaño de grano de Austenita como resultado del sobrecalentamiento, frecuentemente causa agrietamiento durante el temple.

- 3) Esquinas afiladas sin filetes, secciones gruesas adyacentes a secciones delgadas y falta de simetría, ejercen un efecto de concentración de esfuerzos que daría por resultado agrietamiento durante el temple. En caso de que no se pueda modificar el diseño para reducir concentraciones de esfuerzos, será necesario seleccionar un acero que requiera un temple menos severo. Estos aspectos se consideran en el diseño de herramientas.
  
- 4) Las marcas afiladas, que son introducidas deliberadamente ó sin intención durante el maquinado, actúan como concentradores de esfuerzos y pueden causar agrietamiento durante el temple.

### **1.3.5 Revenido**

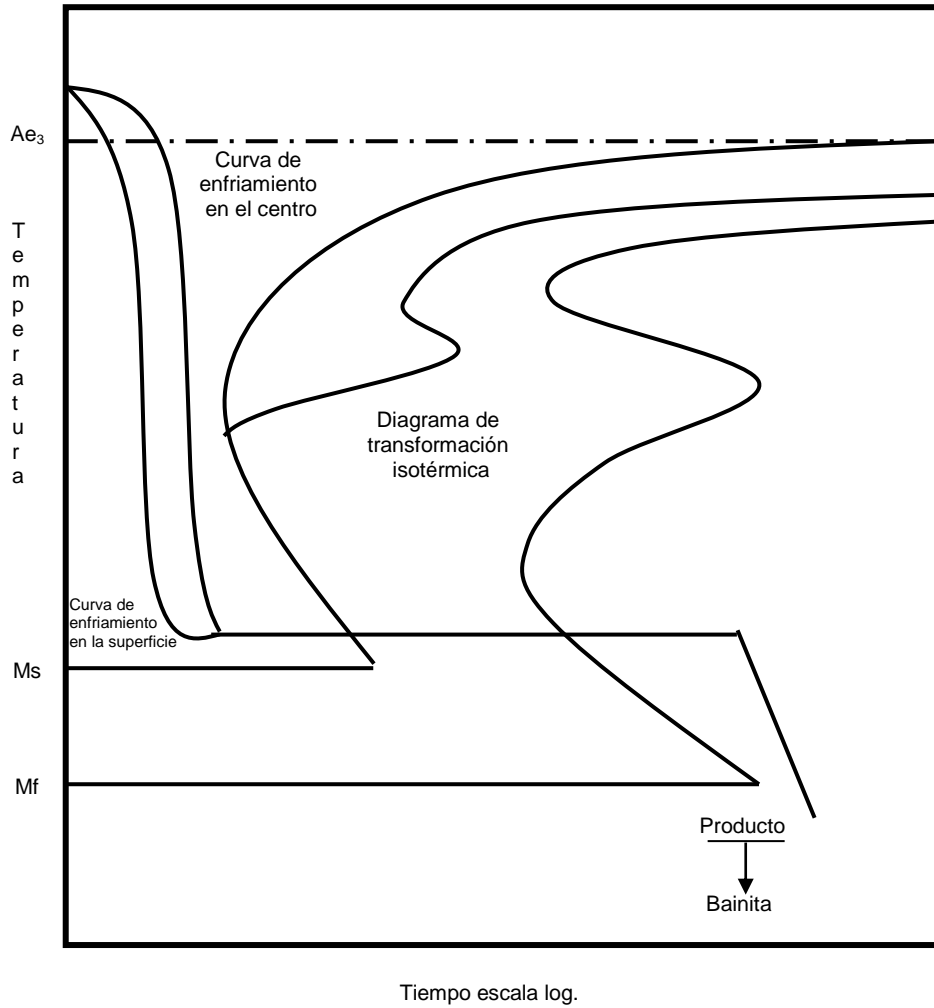
El revenido consiste en calentar al acero a una temperatura por abajo de la temperatura crítica inferior y mantenerlo por un período de tiempo suficiente para alcanzar los cambios deseados en tensiones y estructura. En general, los tiempos de revenido varían de 0.5 a 2.5 horas, pero es práctica general controlar el proceso de revenido por variaciones en la temperatura y no en el tiempo Fig. 13. Después del temple se lleva a cabo la operación de revenido, la cual es prácticamente una necesidad en el tratamiento térmico de la mayoría de los aceros. Los propósitos del revenido son relevar las tensiones que se generan durante la transformación de Austenita a Martensita y durante el enfriamiento no uniforme del acero hasta temperatura ambiente, transformar la Austenita retenida, mejorar la ductilidad y la tenacidad, provocar endurecimiento secundario y, en ocasiones, para reducir el endurecimiento. Esto último no siempre se desea, pero se debe aceptar si se releven las tensiones generadas.



**Fig. 13. Diagrama esquemático del tratamiento térmico de temple + revenido**

### 1.3.6 Austempering

El austempering es un tratamiento térmico para obtener una estructura de 100% Bainita. Consiste en calentar el acero a la temperatura de austenitización, seguido de un enfriamiento rápido hasta una temperatura por arriba de la temperatura  $M_s$  del acero, manteniéndose así hasta completar la transformación a Bainita, como se muestra en la Fig. 14. Las ventajas de este tratamiento sobre el temple y revenido convencional son: mayor ductilidad, mayor tenacidad, alta dureza, menor distorsión y menor peligro de agrietamiento durante el temple en virtud de no ser tan drástico como en el método convencional. Su principal limitante son los largos tiempos requeridos para completar la transformación a Bainita.



**Fig. 14. Diagrama esquemático de tratamiento térmico de austemper.**



## **2. PARTE EXPERIMENTAL**

### ***2.1 Planteamiento del problema.***

Siendo el acero 4140 el material que se usa en varias industrias, tales como la industria petrolera, metal mecánica, cementera, minera, entre otras más. Este acero sufre de calentamientos y enfriamientos, así como de los fenómenos agresivos de los ataques de diferentes medios y de fenómenos mecánicos. Lo que ocasiona en el material de manera general grietas por lo que es necesario cambiar o reparar el material que provoca condiciones propensas a la falla. En esta investigación se propone presentar las condiciones a las cuales el acero 4140 con una cierta estructura generada por los tratamientos térmicos de temple y revenido, para impartir las propiedades de resistencia y dureza característica del acero y esto se obtuvo con la aplicación de los tratamientos térmicos.

### **2.2 Objetivo.**

Determinar las características de dureza, resistencia a la tensión y estructura metalográfica del acero AISI 4140, con un tratamiento térmico de Temple y Revenido.

### ***2.3. Hipótesis***

Debido a la aplicación de los tratamientos térmicos las estructuras que se obtienen pueden contener las mismas propiedades mecánicas y por consiguiente el mismo comportamiento a los esfuerzos externos, aunque sean de diferentes muestras.

## 2.4 Material Utilizado

El material que se usó para el desarrollo de esta investigación corresponde a un acero 4140 en ASTM, su composición química es la siguiente:

Según la clasificación de los aceros de ASTM.

| Tipo | %C   | %Mn  | %Si  | %Cr  | %Mo  | %P   | %S   |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 4140 | 0.38 | 0.75 | 0.20 | 0.80 | 0.15 | 0.04 | 0.03 |
|      | a    | a    | a    | a    | a    | Máx. | Máx. |
|      | 0.43 | 1.00 | 0.35 | 1.00 | 0.25 |      |      |

Análisis químico realizado en las muestras tratadas en la investigación.

| Tipo | %C   | %Mn  | %Si  | %Cr  | %Mo  | %P   | %S    |
|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 4140 | 0.39 | 0.96 | 0.18 | 1.05 | 0.20 | 0.03 | 0.04. |

## 2.5 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA, PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Se usaron 10 muestras para pruebas de impacto de una acero 4140, a las cuales se les realizó un tratamiento térmico de Temple a 850 °C, por un lapso de 45 minutos y posteriormente enfriadas en aceite a temperatura ambiente, y posteriormente se realizó un tratamiento térmico de revenido a 600 °C durante 45 min., con un tratamiento final al aire tranquilo.

Posteriormente, se prepararon los especímenes para llevar a cabo la caracterización correspondiente a pruebas de: Dureza, Tensión Cuasi-Estática y Metalografía.

### **2.5.1 Dureza**

La prueba de dureza determina la habilidad de un material para resistir la penetración, existen varios métodos para determinar la dureza de un material, uno de los más comúnmente empleados es la prueba de dureza Vickers.

Normalmente, la dureza y la resistencia a la tensión se relacionan directamente; esto es, la dureza se incrementa con la resistencia y viceversa, por lo tanto, si se conoce la dureza de un material, se puede estimar su resistencia a la tensión. Esta es una gran ventaja, ya que se puede conocer la resistencia aproximada de un material sin necesidad de preparar y probar especímenes de tensión.

La dureza con frecuencia es relacionada con las condiciones de servicio del material; por esta razón, en algunos casos se debe especificar el límite máximo de dureza para una parte. Esto es particularmente importante para componentes expuestos a ambientes productores de hidrógeno, tales como líneas de tubería para gas amargo, en donde las altas durezas asociadas con el hidrógeno inducido en el material, pueden causar severos agrietamientos.

La prueba de dureza se llevó a cabo con un durómetro marca Amsler Otto Wolper modelo D-6700, fabricado en Alemania, maneja durezas en las escalas Vickers, Brinell y Rockwell. Está Calibrado bajo normas ASTM E-18 DIML-39. Dicho equipo se usó para medir la dureza en la escala Vickers-2, por medio de un penetrador con punta de diamante aplicando una carga de 2 Kg, en cada una de las probetas, las medidas se tomaron en la soldadura o material de aporte, ZAC y material base; una vez habiendo preparado la probetas según técnica metalográfica.

La fórmula usada para la dureza Vickers, está dada por:  $HV = \frac{1.854L}{d^2}$ , de la cual:

$L$  = Carga aplicada, expresada en *Kg*.

$d^2$  = Longitud de la diagonal del cuadrado de la huella de la impresión, dada en *mm*.

## 2.5.2 Metalografía

El análisis metalográfico es de gran ayuda cuando se requiere determinar la sanidad del acero y lo más importante determinar el tipo de estructura del material. Normalmente, los especímenes para análisis metalográfico se obtienen a partir de una muestra. Esto se logra seccionando dichas partes, ya sea por corte mecánico, oxicorte, o corte con arco plasma. Sin embargo, si el espécimen es removido por oxicorte, se debe esmerilar o maquinar al menos 1/8 pulg. a partir de la cara seccionada; esto con la finalidad de remover cualquier superficie dura generada durante el corte.

Existen dos formas para realizar un análisis metalográfico, las cuales son:

- a) Por macro-ataque. En esta prueba el espécimen es preparado, pulido y atacado químicamente, a fin de que muestre su estructura burda. Posteriormente, es examinado sin la ayuda de un lente amplificado, o bien a amplificaciones menores a 10 aumentos (10X).
- b) Por micro-ataque. En este análisis el espécimen es montado en resinas termo fijas o termoplásticas, como son la baquelita y la lucite, respectivamente, posteriormente, es pulido a espejo y atacado químicamente, para ser examinado a amplificaciones mayores a los 10 aumentos.

Un micro-ataque define en detalle la estructura metalográfica de la unión soldada y permite detectar pequeñas discontinuidades en el metal base o en la soldadura.

La realización de esta prueba, se llevó a cabo en un microscopio marca Olympus, y con una cámara fotográfica marca Canon SX100.

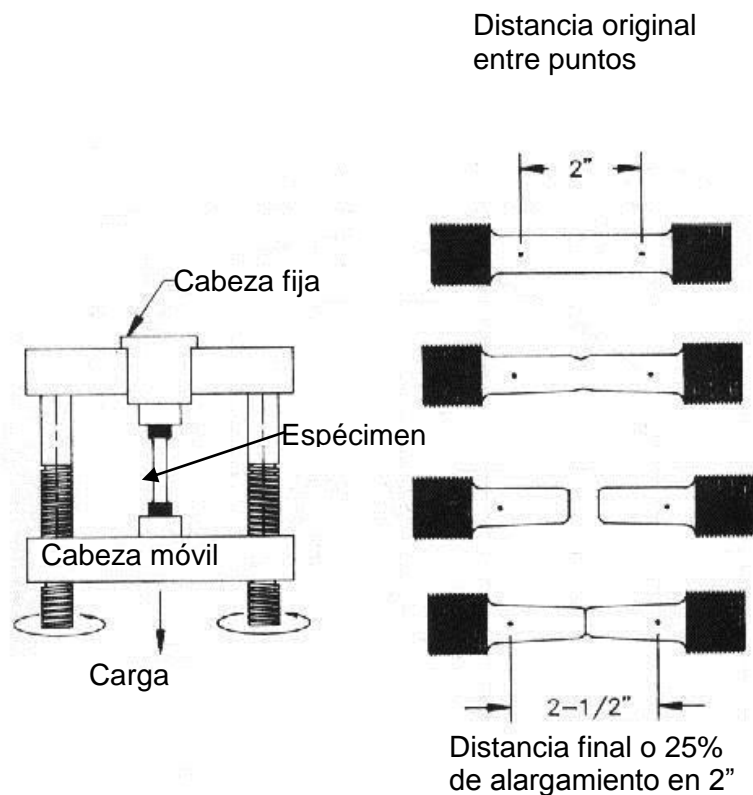
Las probetas se prepararon de acuerdo a la técnica metalográfica para seleccionar y preparar adecuadamente la muestra, que consiste en los siguientes pasos:

- a). Seleccionar la muestra que contenga las características del objetivo que se busca en la experimentación.
- b). El corte de la muestra se llevó a cabo por medio de un disco de carburo de silicio, enfriando continuamente la muestra.
- c). Desbaste burdo de la superficie de la muestra, por medio de una pulidora de banda rotatoria y utilizando lijas de los números 100,200,500 y 1000.
- d). Pulido fino de la superficie de la muestra, usando una pulidora de banda rotatoria, colocando una superficie de paño húmedo y agregando alúmina de grano fino (0.3  $\mu\text{m}$ .).
- e). El ataque químico se realizó usando una solución de nital al 3% en la que se mezclaron 3 ml de ácido nítrico concentrado en 97 ml. de alcohol etílico puro.

### 2.5.3 Tensión Cuasi-Estática

La prueba de tensión se usa para determinar el comportamiento de un metal bajo la acción de una carga de alargamiento.

En la prueba de tensión estándar, la sección reducida llamada “cuello” de un espécimen o probeta, es marcada con un punzón en dos puntos, separados a 2 pulg. ó 5.08 cm. uno del otro como se muestra en la Fig. 21, el espécimen se coloca en las mordazas de una máquina para prueba de tensión, y se le aplica una carga axial por medio de un sistema de palanca mecánico o hidráulico, lo cual origina que la mordaza inferior baje a una velocidad lenta y constante, mientras que la mordaza superior permanece fija.

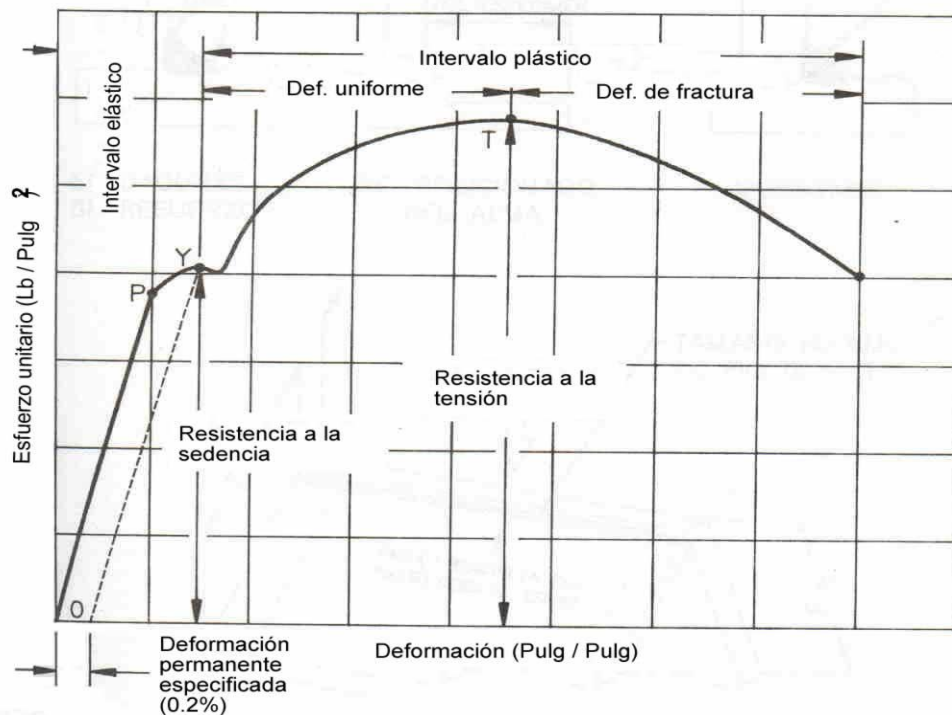


**Fig. 15. Principios de la prueba de tensión.**

A medida que la carga aumenta, el espécimen se alarga a una velocidad uniforme, que es proporcional a la carga aplicada a cualquier tiempo. Esta carga, dividida entre el área de la sección transversal del espécimen al inicio de la prueba, representa el esfuerzo unitario o la resistencia del material a una fuerza de tensión. El esfuerzo se expresa en libras por pulgada cuadrada (lbs/pulg<sup>2</sup>, psi).

La cantidad de alargamiento en una longitud dada, representa la deformación inducida en el material, la cual se expresa en milímetros por milímetros (mm/mm) o bien en pulgadas por pulgada (pulg/pulg). Esta propiedad se mide a partir de la longitud calibrada de 2 pulg., mediante un dispositivo llamado extensómetro.

El esfuerzo y la deformación se representan en un diagrama como el mostrado en la Fig. 16.



**Fig. 16. Diagrama esfuerzo-deformación para un acero dúctil.**

En este diagrama se definen las siguientes propiedades más comunes de los materiales:

- a) Límite proporcional (Punto P). Es el esfuerzo máximo en el que el esfuerzo y la deformación permanecen directamente proporcionales. El límite proporcional representa la primera desviación que tiene la curva de su linealidad.
  
- b) Resistencia a la cedencia (Punto Y). Es el esfuerzo en el que el material exhibe una pequeña cantidad de deformación plástica. En este punto se presenta una desviación de la proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación.

La resistencia a la cedencia se determina por el método de la deformación permanente especificada (OFFSET), que consiste en trazar una línea paralela a la porción recta de la curva. El trazo se desplaza del origen de la curva, en una cantidad igual a la deformación permanente especificada, la cual frecuentemente corresponde al 0.2% de la longitud original calibrada del espécimen de prueba.

La carga correspondiente al punto donde la línea recta corta la curva, dividida entre el área original del espécimen, representa la resistencia a la cedencia del material, la cual se expresa en libras por pulgada cuadrada (lbs/pulg<sup>2</sup>).

- c) Resistencia a la tensión (Punto T). Es el esfuerzo máximo que soporta el material antes de llegar a la ruptura. Esta propiedad resulta de dividir la carga máxima, entre el área original del espécimen. La resistencia a la tensión se expresa en libras por pulgada cuadrada (lbs/pulg<sup>2</sup>).
  
- d) Ductilidad. Es otra propiedad de los metales que se determina mediante la prueba de tensión. Esta se define como la cantidad de deformación que soporta el material hasta el momento de la fractura. La ductilidad se determina mediante dos mediciones, que son:



1) Alargamiento. Este se determina acoplado tan cerca como sea posible las dos mitades del espécimen fracturado, y midiendo la distancia entre los dos puntos marcados originalmente. El incremento en longitud proporciona el alargamiento del espécimen en 2 pulg., el cual es expresado en porcentaje; esto es:

$$\text{Alargamiento \%} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$$

Donde:  $L_f$  = Longitud de la medida final (pulg)

$L_o$  = Longitud de la medida original, generalmente 2 pulg.

2) Reducción de área. Determinada a partir de las dos mitades fracturadas, midiendo para ello el diámetro del espécimen en el punto de ruptura y calculando su área respectiva. De aquí, se calcula la reducción de área con respecto al área original del espécimen. Esta propiedad también se expresa en porcentaje; esto es:

$$\text{Reducción de área \%} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100$$

Donde:  $A_o$  = Área transversal original (pulg<sup>2</sup>).

$A_f$  = Área transversal más pequeña después, de la fractura (pulg<sup>2</sup>).

Normalmente, las mejores propiedades de tensión se presentan en la dirección de rolado del material. Esto es debido a que en este sentido la operación de rolado desarrolla y retiene una estructura de grano mucho más alargada que en la dirección transversal. Usualmente esta estructura es parecida a la fibra del material.

La prueba se llevó a cabo con la máquina universal de tensión marca Instron Corporation, serie IX, sistema automático de pruebas versión 1.04, con una interfase integrada del tipo serie 4200.

El tipo de las probetas es de geometría rectangular y sus dimensiones están de acuerdo a las normas de los estándares americanos para prueba de materiales (ASTM).

Con la información obtenida de la prueba, se calculan tanto las deformaciones ingenieril y verdadera como los esfuerzos ingenieril y verdadero correspondientes a cada uno de los puntos proporcionados por la máquina.

Las fórmulas utilizadas son:

$$\varepsilon_{ing} = \frac{l_f - l_i}{l_i} \dots \text{Deformación ingenieril.}$$

$$\varepsilon_v = \ln(\varepsilon_{ing} + 1) \dots \text{Deformación verdadera.}$$

$$\sigma_{ing} = \frac{P}{A_0} \dots \text{Esfuerzo ingenieril expresado en MPa.}$$

$$\sigma_v = \frac{P}{A_i} \dots \text{Esfuerzo verdadero expresado en Mpa.}$$

$P$  = Carga expresada en Newtons.

$A_0$  = Área de la sección transversal inicial expresada en  $m^2$

$l_f$  = Longitud final.

$l_i$  = Longitud inicial expresadas en mm.

$A_i$  = Área de la sección transversal instantánea en  $m^2$

## 2.6. RESULTADOS OBTENIDOS.

### 2.6.1 Ensayo de Dureza.

Para la determinación de los ensayos de dureza se utilizaron 10 probetas de impacto y se le realizaron 10 ensayos de dureza en cada una de las muestras.

La toma de las durezas se hizo con la escala de Vickers-2, cuyos resultados fueron los siguientes:

Las siguientes tablas de 1 a la 10 se muestran las durezas medidas, la varianza y desviación estándar de los 100 ensayos realizados. Así como la grafica de la figura 17 del número de ensayo contra la dureza obtenida.

| NÚMERO DE PRUEBA | DUREZA VICKERS | MEDIA ARITMÉTICA | VARIANZA | DESVIACIÓN ESTÁNDAR |
|------------------|----------------|------------------|----------|---------------------|
| 1                | 603            | 588              | 2.25     | 1.50                |
| 2                | 574            | 588              | 1.96     | 1.40                |
| 3                | 603            | 588              | 2.25     | 1.50                |
| 4                | 603            | 588              | 2.25     | 1.50                |
| 5                | 603            | 588              | 2.25     | 1.50                |
| 6                | 574            | 588              | 1.96     | 1.40                |
| 7                | 603            | 588              | 2.25     | 1.50                |
| 8                | 574            | 588              | 1.96     | 1.40                |
| 9                | 574            | 588              | 1.96     | 1.40                |
| 10               | 574            | 588              | 1.96     | 1.40                |

Tabla 1 muestra los resultados de la dureza de 10 ensayos de probeta 1.

| <b>NÚMERO<br/>DE<br/>PRUEBA</b> | <b>DUREZA<br/>VICKERS</b> | <b>MEDIA<br/>ARITMÉTICA</b> | <b>VARIANZA</b> | <b>DESVIACIÓN<br/>ESTÁNDAR</b> |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 11                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 12                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 13                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 14                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 15                              | 603                       | 588                         | 2.25            | 1.50                           |
| 16                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 17                              | 603                       | 588                         | 2.25            | 1.50                           |
| 18                              | 523                       | 588                         | 42.25           | 6.50                           |
| 19                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 20                              | 749                       | 588                         | 259.21          | 16.10                          |

Tabla 2 muestra los resultados de la dureza de 10 ensayos de probeta 2.

| <b>NÚMERO<br/>DE<br/>PRUEBA</b> | <b>DUREZA<br/>VICKERS</b> | <b>MEDIA<br/>ARITMÉTICA</b> | <b>VARIANZA</b> | <b>DESVIACIÓN<br/>ESTÁNDAR</b> |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 21                              | 638                       | 588                         | 25.00           | 5.00                           |
| 22                              | 638                       | 588                         | 25.00           | 5.00                           |
| 23                              | 590                       | 588                         | 0.04            | 0.20                           |
| 24                              | 638                       | 588                         | 25.00           | 5.00                           |
| 25                              | 590                       | 588                         | 0.04            | 0.20                           |
| 26                              | 796                       | 588                         | 432.64          | 20.80                          |
| 27                              | 590                       | 588                         | 0.04            | 0.20                           |
| 28                              | 590                       | 588                         | 0.04            | 0.20                           |
| 29                              | 638                       | 588                         | 25.00           | 5.00                           |
| 30                              | 638                       | 588                         | 25.00           | 5.00                           |

Tabla 3 muestra los resultados de la dureza de 10 ensayos de probeta 3.

| <b>NÚMERO<br/>DE<br/>PRUEBA</b> | <b>DUREZA<br/>VICKERS</b> | <b>MEDIA<br/>ARITMÉTICA</b> | <b>VARIANZA</b> | <b>DESVIACIÓN<br/>ESTÁNDAR</b> |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 31                              | 638                       | 588                         | 25.00           | 5.00                           |
| 32                              | 590                       | 588                         | 0.04            | 0.20                           |
| 33                              | 638                       | 588                         | 25.00           | 5.00                           |
| 34                              | 590                       | 588                         | 0.04            | 0.20                           |
| 35                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 36                              | 590                       | 588                         | 0.04            | 0.20                           |
| 37                              | 749                       | 588                         | 259.21          | 16.10                          |
| 38                              | 749                       | 588                         | 259.21          | 16.10                          |
| 39                              | 590                       | 588                         | 0.04            | 0.20                           |
| 40                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |

Tabla 4 muestra los resultados de la dureza de 10 ensayos de probeta 4.

| <b>NÚMERO<br/>DE<br/>PRUEBA</b> | <b>DUREZA<br/>VICKERS</b> | <b>MEDIA<br/>ARITMÉTICA</b> | <b>VARIANZA</b> | <b>DESVIACIÓN<br/>ESTÁNDAR</b> |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 41                              | 603                       | 588                         | 2.25            | 1.50                           |
| 42                              | 603                       | 588                         | 2.25            | 1.50                           |
| 43                              | 603                       | 588                         | 2.25            | 1.50                           |
| 44                              | 603                       | 588                         | 2.25            | 1.50                           |
| 45                              | 603                       | 588                         | 2.25            | 1.50                           |
| 46                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 47                              | 603                       | 588                         | 2.25            | 1.50                           |
| 48                              | 461                       | 588                         | 161.29          | 12.70                          |
| 49                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 50                              | 590                       | 588                         | 0.04            | 0.20                           |

Tabla 5 muestra los resultados de la dureza de 10 ensayos de probeta 5.

| <b>NÚMERO<br/>DE<br/>PRUEBA</b> | <b>DUREZA<br/>VICKERS</b> | <b>MEDIA<br/>ARITMÉTICA</b> | <b>VARIANZA</b> | <b>DESVIACIÓN<br/>ESTÁNDAR</b> |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 51                              | 590                       | 588                         | 0.04            | 0.20                           |
| 52                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 53                              | 603                       | 588                         | 2.25            | 1.50                           |
| 54                              | 603                       | 588                         | 2.25            | 1.50                           |
| 55                              | 603                       | 588                         | 2.25            | 1.50                           |
| 56                              | 481                       | 588                         | 114.49          | 10.70                          |
| 57                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 58                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 59                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 60                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |

Tabla 6 muestra los resultados de la dureza de 10 ensayos de probeta 6.

| <b>NÚMERO<br/>DE<br/>PRUEBA</b> | <b>DUREZA<br/>VICKERS</b> | <b>MEDIA<br/>ARITMÉTICA</b> | <b>VARIANZA</b> | <b>DESVIACIÓN<br/>ESTÁNDAR</b> |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 61                              | 603                       | 588                         | 2.25            | 1.50                           |
| 62                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 63                              | 603                       | 588                         | 2.25            | 1.50                           |
| 64                              | 603                       | 588                         | 2.25            | 1.50                           |
| 65                              | 603                       | 588                         | 2.25            | 1.50                           |
| 66                              | 590                       | 588                         | 0.04            | 0.20                           |
| 67                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 68                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 69                              | 523                       | 588                         | 42.25           | 6.50                           |
| 70                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |

Tabla 7 muestra los resultados de la dureza de 10 ensayos de probeta 7.

| <b>NÚMERO<br/>DE<br/>PRUEBA</b> | <b>DUREZA<br/>VICKERS</b> | <b>MEDIA<br/>ARITMÉTICA</b> | <b>VARIANZA</b> | <b>DESVIACIÓN<br/>ESTÁNDAR</b> |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 71                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 72                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 73                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 74                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 75                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 76                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 77                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 78                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 79                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 80                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |

Tabla 8 muestra los resultados de la dureza de 10 ensayos de probeta 8.

| <b>NÚMERO<br/>DE<br/>PRUEBA</b> | <b>DUREZA<br/>VICKERS</b> | <b>MEDIA<br/>ARITMÉTICA</b> | <b>VARIANZA</b> | <b>DESVIACIÓN<br/>ESTÁNDAR</b> |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 81                              | 603                       | 588                         | 2.25            | 1.50                           |
| 82                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 83                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 84                              | 523                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 85                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 86                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 87                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 88                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 89                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 90                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |

Tabla 9 muestra los resultados de la dureza de 10 ensayos de probeta 9.

| <b>NÚMERO<br/>DE<br/>PRUEBA</b> | <b>DUREZA<br/>VICKERS</b> | <b>MEDIA<br/>ARITMÉTICA</b> | <b>VARIANZA</b> | <b>DESVIACIÓN<br/>ESTÁNDAR</b> |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 91                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 92                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 93                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 94                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 95                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 96                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 97                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 98                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 99                              | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |
| 100                             | 574                       | 588                         | 1.96            | 1.40                           |

**Tabla 10 muestra los resultados de la dureza de 10 ensayos de probeta 10.**



También se graficó la dureza promedio de 588.00 HV-2 de todas las durezas tomadas en las 10 probetas de impacto que se usaron en este estudio.

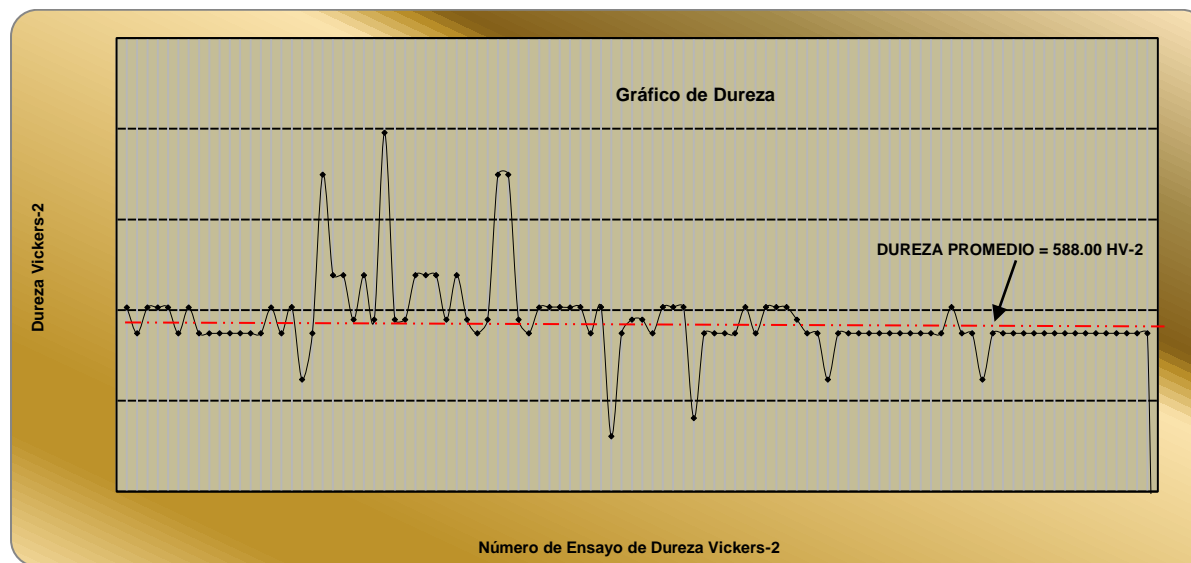


Figura 17. Gráfica de los 100 ensayos de dureza Vickers de las 10 probetas de impacto.

Las tablas muestran los resultados de la desviación estándar y varianza de cada una de las lecturas de dureza con respecto a la media, y posteriormente se presentan las figuras 18 y 19 de las gráficas de la desviación estándar y varianza del sistema de muestras.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{x=1}^n \frac{(x-X)^2}{n-1}} \qquad S^2 = \sum_{X=1}^n \frac{(x-x)^2}{n-1}$$

**Fórmulas para el cálculo de la varianza y desviación estándar.**

En el análisis estadístico de la varianza y desviación estándar se calculó que la  $\sigma$  máxima fue 728.0 HV-2 y la  $\sigma$  mínima fue de 448.0 HV-2. La varianza máxima fue de 137.85.



Figura 19. Gráfica de la máxima y mínima de la Desviación Estándar

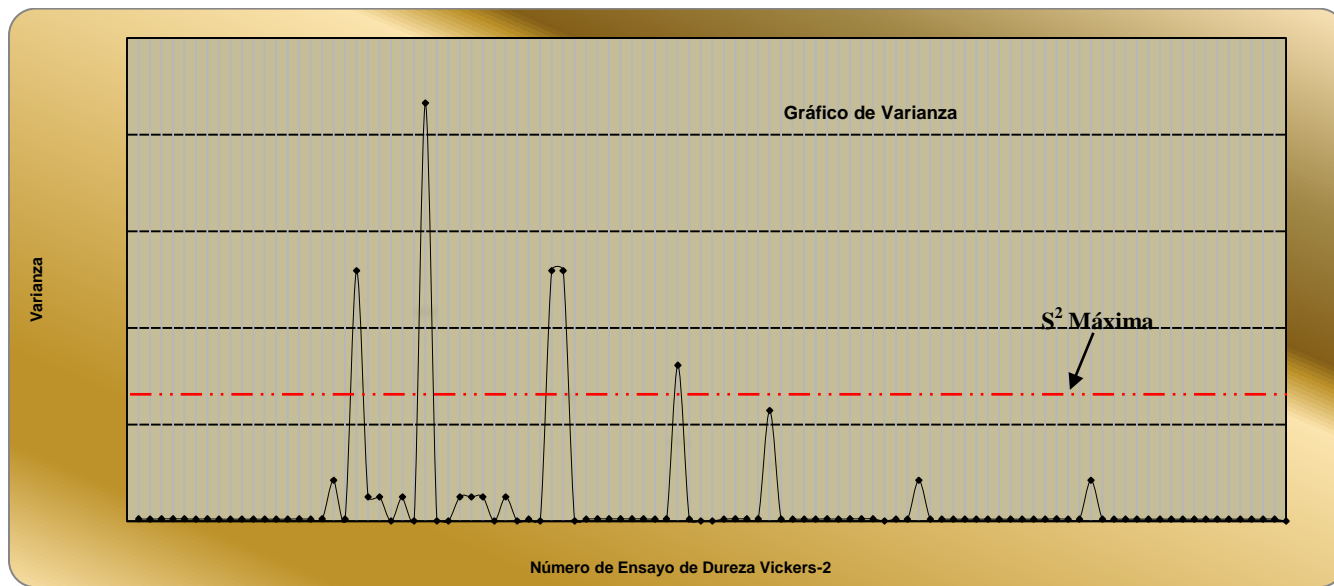


Figura 20. Gráfica de la Varianza de las lecturas de dureza del 4140 con tratamiento de Temple y Revenido.

Los 100 resultados de dureza se muestran en la siguiente tabla según su repetición:

| Dureza HV-2              | Número de veces |
|--------------------------|-----------------|
| 461                      | 1               |
| 481                      | 1               |
| 523                      | 3               |
| 574                      | 52              |
| 590                      | 11              |
| 603                      | 21              |
| 638                      | 7               |
| 749                      | 3               |
| 796                      | 1               |
| <b>Total de lecturas</b> | <b>100</b>      |

La figura 25 muestra la gráfica en la distribución de las durezas, según las veces que se presentaron en los ensayos.

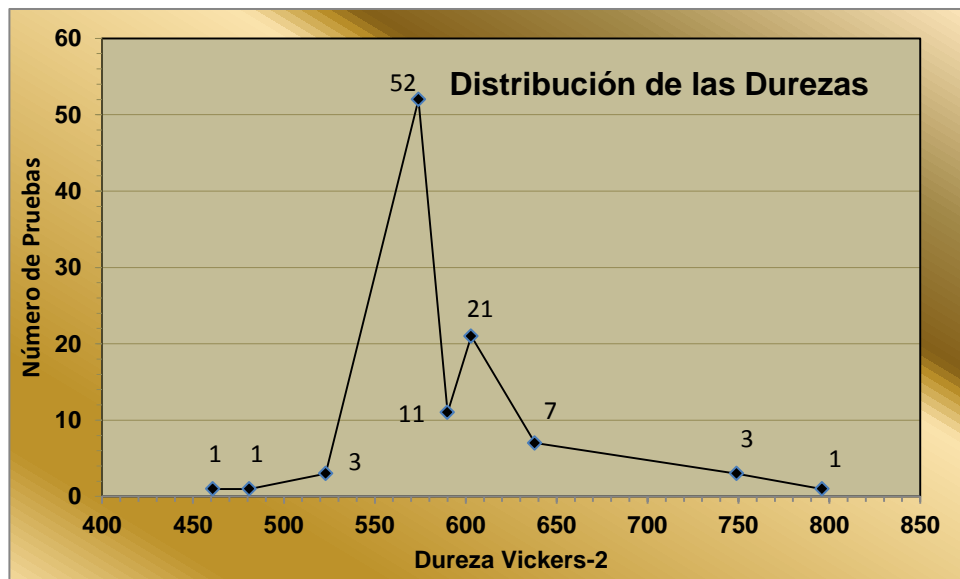
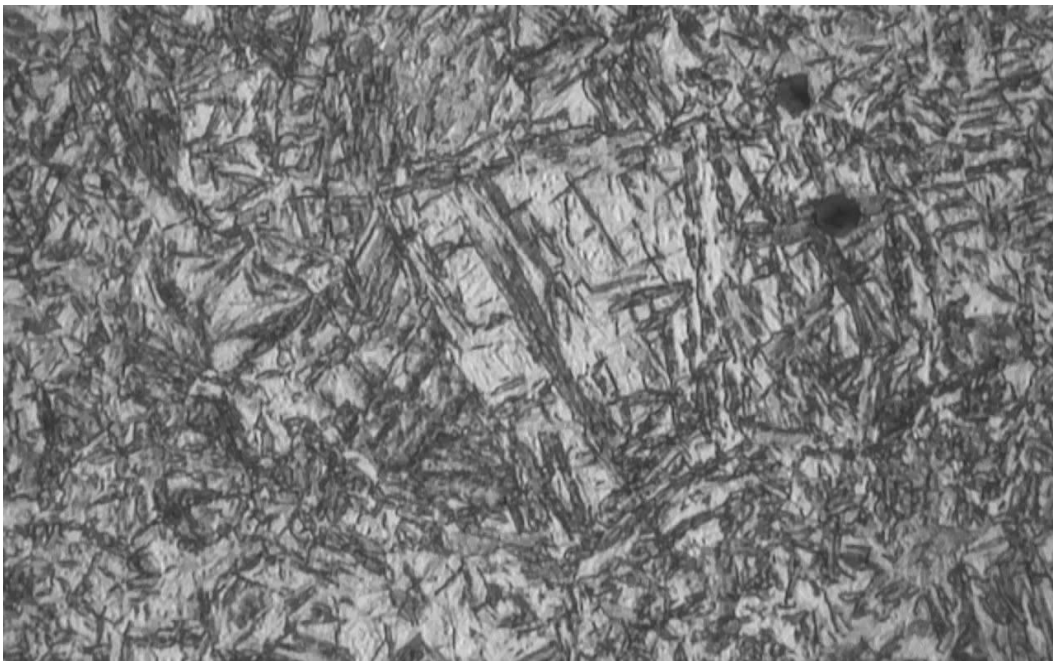


Figura 18.- distribución de las pruebas de dureza.

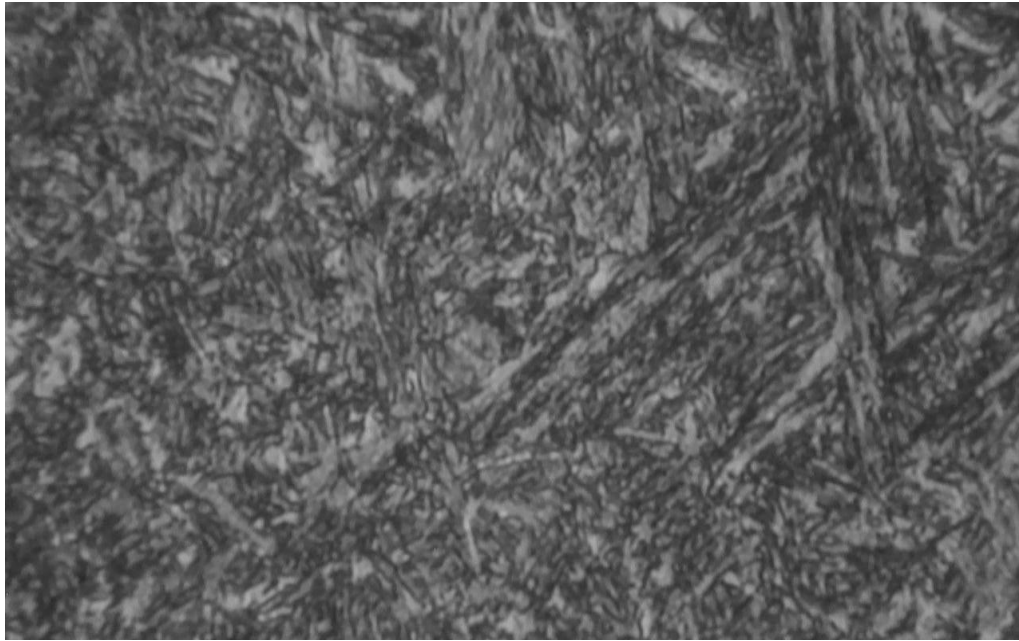
### 2.6.2 Metalografía.

La estructura que se observaron en las probetas de impacto tomas al azar; las cuales fueron las que se marcaron con los números 3 y 7.

Una vez pulidas y atacadas con el reactivo químico de nital al 3%, ser observaron a 600X y 800X, en el microscopio metalográfico y en ambas muestra la estructura que se observo fue de una Martensita revenida. La cual está formada por una morfología de Martensita de Cromo, con carburos de Cromo en forma de nódulos.



**Figura 21.- Micrografía de la estructura de la probeta 3 de impacto, donde se puede observar la presencia de Martensita revenida con la presencia de carburos de Cromo en su interior. Tomada a 600X.**



**Figura 22.-** Micrografía de la estructura de la probeta 3 de impacto, donde se puede observar con mayor claridad la presencia de Martensita revenida y los carburos formado en el interior de la Martensita. Tomada a 800X.



**Figura 23.-** Micrografía de la estructura de la probeta 7 de impacto, donde se puede observar la presencia de Martensita revenida donde se aprecia la presencia de Austenita retenida y pequeños carburos de cromo. Tomada a 600X.



**Figura 24.- Micrografía de la estructura de la probeta 7 de impacto, donde se puede observar con mayor claridad la presencia de Martensita revenida blanca y oscura con la presencia de pequeños carburos de cromo en el interior de la Martensita. Tomada a 800X.**



### 2.6.3 Ensayo de Tensión

La realización del ensayo de tensión al acero 4140 tratado térmicamente con Temple y Revenido, que consistió en una carga de 1000 gr/seg, con una distancia de extensómetro de 50.8 mm, en una maquina Instron de 50 ton., el tiempo de realización del ensayo fue de 2hr.y 20 min.

La figura 24 muestra la gráfica de Esfuerzo-deformación que se obtuvo del ensayo, también se muestra la resistencia máxima de 1768.4 MPa y un límite elástico de 1686.85 MPa, calculado al 0.02% de la deformación.

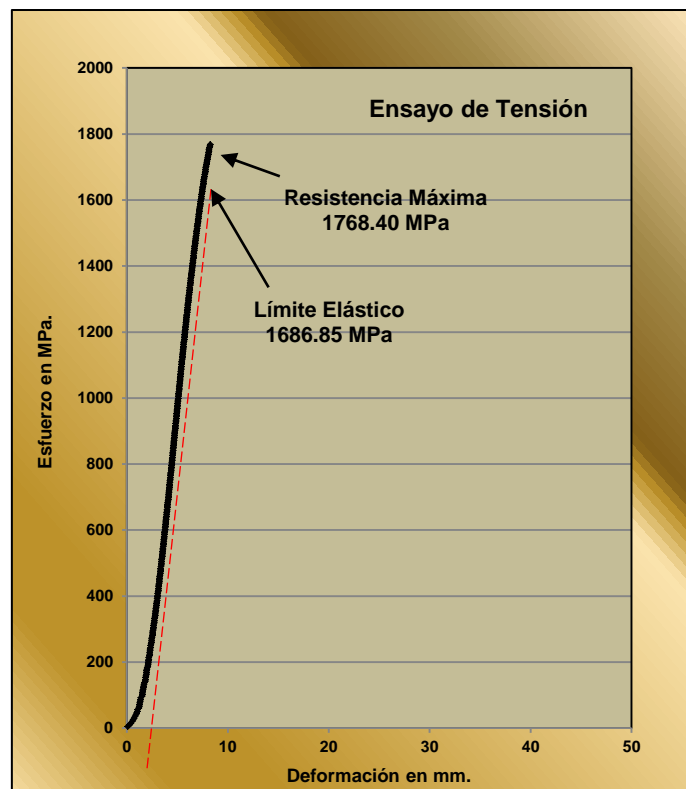


Figura 25.- Gráfica del ensayo de tensión cuasiestático de la muestra con tratamiento de Temple y Revenido del acero 4140.

### 3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

#### 3.1 Ensayo de dureza.

La prueba de dureza fue el ensayo principal para poder determinar si las 10 probetas de impacto estaban bien tratadas térmicamente, con Temple y revenido a 600°C, la determinación simple y comparación de los resultados no bastaban para corroborar si el tratamiento estuvo bien realizado; para comprobar los resultados se procedió hacer un análisis estadístico y con esta herramienta poder asegurar el principio de la hipótesis.

De las graficas de dureza y número de presencia de las durezas, se pudo pensar que existen 9 lecturas que estaban fuera de la dureza que tuvo más repeticiones, que fue la de 574 HV-2.

Sin embargo, al usar el análisis estadístico se pudo constatar, que al usar la determinación de la desviación estándar y varianzas estadísticas, se comprueba que solo 5 lecturas que se pueden considerar fuera de la determinación de la media aritmética que fue de 588 HV, difieren con esa premisa. Por lo tanto las lecturas de 461, 3 lecturas de 749 y 796 HV-2 se pueden considerar fuera del media de de 588 HV, y por consiguiente, solo 5 lecturas están fuera de las lecturas que se pueden considerar como correctas; en las que hubo un error en la toma de la lectura de dureza, ya que para considerarlas como lecturas correctas del material que se obtuvo por medio del tratamiento térmico de Temple y Revenido, deberían de fluctuar entre 728 HV y 448 HV, por consiguiente deben tener otra explicación su presencia.

### **3.2 Metalografía.**

El análisis metalográfico muestra la presencia de una estructura de Martensita revenida, por la presencia de una morfología de Martensita de cromo, que en su interior posee nódulos de carburos con una alta probabilidad de cromo, la cual es característica de las Martensitas transformadas, las cuales se presentan después de los tratamientos de Bonificado. Hay que hacer notar que existen cantidades de impurezas de sulfuro de manganeso, esto se identifica en el microscopio metalográfico por su color gris claro, esto, permite entender que sí se toma un ensayo de dureza en estas regiones la dureza será baja. Hay que hacer notar que en una de las muestra 7 existe una mayor concentración de Martensita fina.

La presencia de zonas en donde se concentran cantidades de Martensita fina y carburos de cromo, los cuales son compuestos de alta dureza, esto permitiría explicar porque existen durezas de alto valor.

### **3.3 Ensayo de tensión.**

El ensayo de tensión demuestra que la estructura del tipo Martensita Revenida, es de baja tenacidad y de una alta resistencia máxima a la tensión (1768.40 MPa), y cuyo límite elástico es también de alta resistencia (1686.85 MPa), lo que demuestra la baja tenacidad, ya que la diferencia entre la resistencia máxima y el límite elástico es pequeña, sin embargo, esta prueba de caracterización permite ver que esta estructura nos da un comportamiento lineal en el ensayo de tensión ya que el límite elástico representa aproximadamente el 95.4 % de la resistencia máxima, por lo cual se acerca con bastante exactitud a la realidad de los ensayos de tensión.

#### **4. CONCLUSIONES.**

- 1.- El ensayo de dureza se puede considerar como una base para considerar que el tratamiento térmico estuvo correcto y que fue homo genio en todas las probetas para el ensayo de impacto.
- 2.- Este ensayo se toma como fuente de control en los tratamientos térmicos de este acero y de otros más aceros.
- 3.- La estructura que se obtuvo fue la característica que plantean el diagrama de Temperatura-Tiempo-Transformación de este acero.
- 4.- El ensayo de tensión confirma el comportamiento del acero 4140 con un tratamiento térmico de Temple y Revenido, el cual adquiere una alta resistencia con una baja tenacidad.

## 5. BIBLIOGRAFIA

A.G. GUY "Fundamentos de ciencia de materiales" Mac Graw Hill 1980.

Richard A. Flinn y Paul K. Trojan "Materiales de ingeniería y sus aplicaciones" tercera edición 1989.

J.C. Anderson, J.M. Alexander, K.D. Leaver, R.D. Rawlings "Ciencia de los materiales" editorial Limusa 1978.

Lawrence H. Van Vlack "Materiales para ingeniería" Compañía editorial continental S.A de C.V. 1980

Donald R. Askeland "Ciencia e Ingeniería de los Materiales" tercera edición Internatinal Thomson Editores.

James F. Shackelford "ciencia de materiales para ingenieros" tercera edición Prentice Hall Hispanoamérica, S.A.

William D. Callister "introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales" Editorial Reverte,S.A.

Segundo Barroso Herrero, Jose Ramon Gil Bercero, Ana Maria Camacho Lopez "introducción al conocimiento de los materiales y sus aplicaciones" UNED editorial.

Carlos Ferrer Giménez, Vicente Amigo Borrás "Tecnología de Materiales" Alfaomega.

James newell "ciencia de materiales aplicaiones en ingeniería" Alfaomega.