

45



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

"TRATAMIENTOS TERMICOS DE RECOCIDO, TEMPLE Y
REVENIDO, APLICADOS AL ACERO INOXIDABLE
MARTENSITICO NOM 416"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

GUILLERMO JIMENEZ MARTINEZ

ASESOR: M. en I. FELIPE DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO

2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.

ESTA TESIS NO SALE
DE LAS BIBLIOTECAS

Presento a la Dirección General de Bibliotecas de la
Unidad a través de su formato electrónico e impreso el
contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Juárez Martínez
Guillermo

FECHA: 4 Noviembre 2002

FIRMA: 



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES**

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

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

"Tratamiento térmico de recocido, temple y revenido,
aplicado al acero inoxidable martensítico NOM 416".

que presenta el pasante: Guillermo Jiménez Martínez
con número de cuenta: 09850452-9 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.

A T E N T A M E N T E

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 24 de octubre de 2002

PRESIDENTE	<u>Ing. José Luis Rivera López</u>	
VOCAL	<u>M.I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez</u>	
SECRETARIO	<u>Ing. Juan Manuel Torres Merino</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>L.I. Guillermo Ortega García</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Ana María Terreros de la Rosa</u>	

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	3

CAPITULO 1

ACEROS INOXIDABLE

1.1 Diagramas de fase.....	4
1.1.1 Información que se puede obtener de los diagramas de fase.....	4
1.2 Diagrama de fase hierro-carburo de hierro.....	4
1.2.1 Fases presentes en el diagrama hierro-carburo de hierro.....	5
1.3 Diagrama de fases hierro-cromo.....	6
1.3.1 Formación de la fase sigma (σ).....	10
1.4 Clasificación de los aceros inoxidable.....	11
1.4.1 Aceros inoxidable austeníticos.....	11
1.4.2 Aceros inoxidable ferríticos.....	13
1.4.3 Aceros inoxidable martensíticos.....	15
1.4.4 Aceros inoxidable PH.....	17
1.4.5 Aceros inoxidable dúplex.....	17
1.5 Acero inoxidable martensítico NOM 416.....	18
1.6 Influencia de los distintos elementos de aleación en los aceros inoxidable.....	20

CAPITULO 2
TRATAMIENTOS TÉRMICOS.

2.1 Definición.....	24
2.2 Características de los tratamientos térmicos.....	24
2.2.1 Calentamiento.....	25
2.2.2 Permanencia a temperatura máxima.....	25
2.2.3 Enfriamiento hasta temperatura ambiente.....	26
2.3 Consideraciones para la aplicación de los tratamientos térmicos.....	26
2.4 Principales tratamientos térmicos.....	27
2.4.1 Recocido.....	27
2.4.1.1 Recocido completo.....	27
2.4.1.2 Recocido subcrítico.....	28
2.4.2 Normalizado.....	29
2.4.3 Temple.....	29
2.4.3.1 Proceso de temple.....	29
2.4.4 Revenido.....	32
2.4.5 Austemplado.....	32
2.4.6 Martenplado.....	33
2.5 Diagrama TTT del acero inoxidable martensítico NOM 416.....	33

CAPITULO 3
DESARROLLO EXPERIMENTAL.

3.1 Introducción.....	36
3.2 Obtención de las probetas.....	36
3.3 Desbaste de las probetas.....	37
3.4 Aplicación del tratamiento térmico de recocido.....	37
3.5 Aplicación del tratamiento térmico de temple.....	38
3.6 Pulido.....	39
3.7 Ataque químico.....	40
3.8 Análisis metalográfico.....	40
3.9 Medidas de dureza.....	41
3.10 Aplicación del revenido.....	43
3.11 Pulido.....	43
3.12 Ataque químico.....	43
3.13 Análisis metalográfico.....	44
3.14 Pruebas de dureza.....	44

CAPITULO 4
RESULTADOS.

4.1 Resultados del análisis metalográfico.....	45
4.1.1 Probetas sin tratamiento térmico.....	45
4.1.2 Probetas sometidas a tratamiento térmico de recocido.....	47

4.1.3 Probetas sometidas a tratamiento térmico de temple en aire.....	49
4.1.4 Probetas sometidas a tratamiento térmico de temple en aceite.....	51
4.1.5 Probetas sometidas a tratamiento térmico de revenido, posterior al temple en aire.....	53
4.1.6 Probetas sometidas a tratamiento térmico de revenido, posterior al temple en aceite.....	55
4.2 Resultados de las pruebas de dureza.....	57
4.2.1 Dureza obtenida en probetas sin tratamiento térmico.....	57
4.2.2 Dureza obtenida en probetas sometidas a tratamiento térmico de recocido.....	58
4.2.3 Dureza obtenida en probetas sometidas a tratamiento térmico de temple en aire.....	59
4.2.4 Dureza obtenida en probetas sometidas a tratamiento térmico de temple en aceite.....	60
4.2.5 Dureza obtenida en probetas sometidas a tratamiento térmico de revenido, posterior al temple en aire.....	61
4.2.6 Dureza obtenida en probetas sometidas a tratamiento térmico de revenido, posterior al temple en aceite.....	62
4.2.7 Dureza promedio de las probetas de acero inoxidable NOM 416.....	63
CONCLUSIONES.....	64
BIBLIOGRAFÍA.....	66

INTRODUCCIÓN.

A lo largo de la historia de la humanidad, el uso de materiales ha estado ligado al avance de cada civilización, hace diez mil años, se utilizó la piedra, hace tres milenios, el bronce y hace dos mil años el hierro.

No se puede hablar de una edad arqueológica basada en el acero, pues solo hace 150 años que se fabrica en grandes cantidades, pero este se ha convertido en una parte vital de la civilización actual.

Hay muchas variedades de aceros, pero se pueden agrupar en:

- Aceros simples al carbono.
- Aceros aleados.
- Aceros de alta aleación.

Los aceros simples son aleaciones de hierro y carbono, con un contenido de carbono entre 0.025 y 2%.

Los aceros aleados, son aceros simples a los que se les ha agregado otros elementos que no deben sobrepasar el 5% del total.

Los aceros de alta aleación, son materiales con alto contenido de elementos tales como cromo, molibdeno, vanadio, níquel y tungsteno, entre otros. Dentro de este grupo se encuentran los aceros inoxidable, de los cuales se habla en esta tesis.

En el primer capítulo, se explica el uso y contenido de los diagramas de fase. se habla de los aceros inoxidable, de los tipos existentes en el mercado, su clasificación según la Norma Oficial Mexicana y se mencionan sus propiedades, usos y características. Se habla también de los elementos aleantes de los aceros inoxidable, sus propiedades y

características, se hace una mención especial a las características, propiedades y usos del acero inoxidable martensítico NOM 416.

En el segundo capítulo, se estudian los tratamientos térmicos, los tipos que existen, su finalidad, y cuales son sus características. Principalmente los que aplican en este trabajo, analizando también el diagrama de transformación-tiempo-temperatura del acero inoxidable NOM 416.

En el tercer capítulo, llamado desarrollo experimental, se incluyen todos los aspectos del trabajo práctico en el laboratorio, tales como la preparación de las probetas, el análisis metalográfico, la aplicación de los tratamientos térmicos y la aplicación de las medidas de dureza.

En el último capítulo, se resumen los datos obtenidos a partir del trabajo detallado en el capítulo 3.

OBJETIVOS:

- Conocer los distintos tipos de aceros inoxidables, así como sus propiedades y características principales.
- Estudiar y aplicar los tratamientos térmicos de recocido, temple y revenido al acero inoxidable martensítico NOM 416.
- Estudiar los cambios en la estructura microscópica del acero inoxidable martensítico NOM 416.
- Analizar los cambios en la dureza del acero inoxidable martensítico NOM 416.

CAPITULO 1.

ACEROS INOXIDABLES.

1.1 Diagrama de fase.

Son representaciones gráficas de las fases que están presentes en un sistema de aleación a varias temperaturas, presiones y composiciones. La mayoría de los diagramas de fase han sido contruidos según condiciones de equilibrio (condiciones de enfriamiento lento), siendo utilizadas por ingenieros y científicos para entender y predecir muchos aspectos del comportamiento de los materiales. Los diagramas de fases más comunes involucran a la temperatura contra la composición.

1.1.1 Información que podemos obtener de los diagramas de fase:

- Se puede determinar que fases están presentes a diferentes composiciones y temperaturas bajo condiciones de enfriamiento lento (equilibrio).
- Se puede conocer la solubilidad, en el estado sólido y en el equilibrio, de un elemento (o compuesto) en otro.
- Se puede determinar la temperatura a la cual una aleación enfriada bajo condiciones de equilibrio comienza a solidificarse y la temperatura a la cual ocurre la solidificación.
- Puede determinarse la temperatura a la cual comienzan a fundirse diferentes fases.

1.2 Diagrama de fases hierro-carburo de hierro.

Este diagrama, que se muestra en la figura 1.1, es la base de todos los aceros y se usará para explicar la interpretación de un diagrama de fases, así como también se describirán las fases presentes.

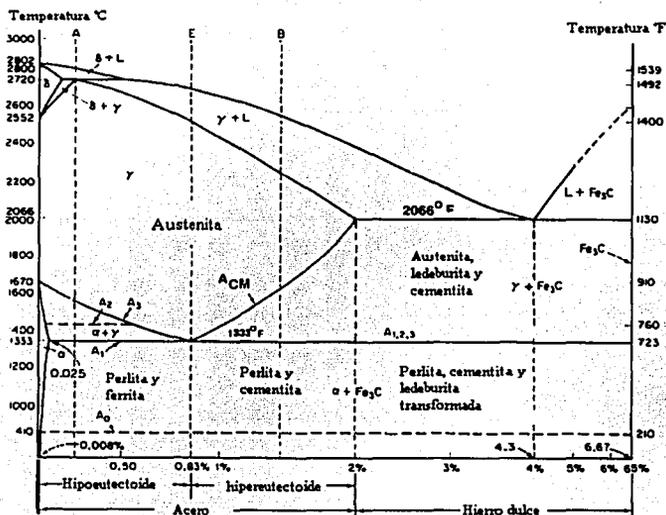


Figura 1.1 Diagrama Fe-Fe₃C

1.2.1 Fases presentes en el diagrama hierro-carburo de hierro.

Ferrita (α).- Solución sólida de carbono en hierro, tiene una estructura cúbica de cuerpo centrado (BCC), con una solubilidad máxima de 0.025% a una temperatura de 727 °C. La ferrita es dúctil, pero poco resistente.

Austenita (γ).- Es una solución sólida de carbono en hierro, con una estructura cúbica de caras centradas (FCC), con una solubilidad máxima de 2% a una temperatura de 1148 °C. Es dúctil, resistente y poco estable a temperatura ambiente.

Ferrita delta (δ).- Solución sólida de carbono en hierro con una estructura BCC y una solubilidad máxima de 0.08% a una temperatura de 1495 °C. Esta fase es de poca importancia para la ingeniería.

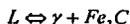
Carburo de hierro (cementita, Fe_3C).- es un compuesto intermetálico que posee una estructura ortorrómbica. Es duro y frágil.

Del análisis del diagrama hierro carburo de hierro, se puede determinar la presencia de las reacciones siguientes:

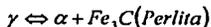
- A una temperatura de 1495 °C, se presenta una reacción llamada peritectica, en la cual se forma austenita (γ) a partir de la fase δ (hierro delta) y líquido, esto es:



- A una temperatura de 1148 °C, se presenta una reacción eutéctica, donde se forma una mezcla de austenita (γ) y cementita, llamada ledeburita ($\gamma + Fe_3C$) a partir del líquido, esto es:



- A una temperatura de 727 °C se lleva a cabo una reacción eutécticoide, donde, a partir de la fase γ (austenita) se forma una mezcla de ferrita y cementita conocida como perlita ($\alpha + Fe_3C$), esto es:



1.3 Diagrama de fases hierro-cromo.

Hay ciertas aleaciones de hierro y cromo que poseen alta resistencia a la corrosión y a la oxidación a temperaturas elevadas manteniendo una resistencia mecánica considerable a esas temperaturas, dichas aleaciones a veces contienen níquel y pequeños porcentajes de otros elementos, a este grupo de aleaciones se le conoce como aceros inoxidable.

Como ya se mencionó, los principales elementos de estas aleaciones son el hierro y el cromo, por lo cual se estudiará la relación entre estos dos elementos por medio del diagrama de fases hierro-cromo que se muestra en la figura 1.2.

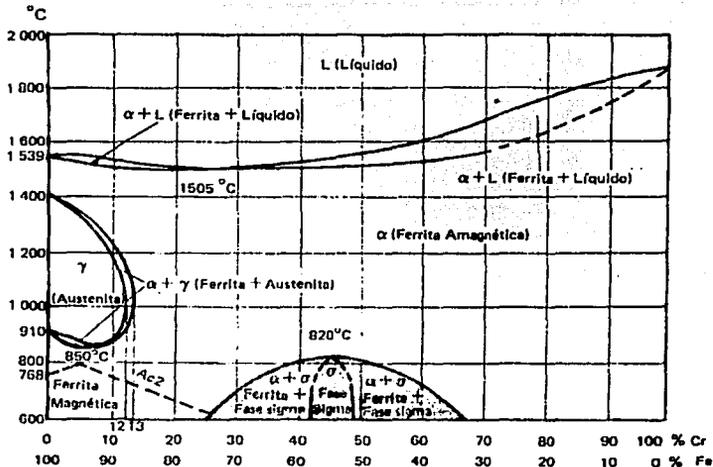


Figura 1.2. Diagrama de fases Fe-Cr.

De la observación de dicho diagrama se deduce lo siguiente:

- Para el hierro puro el punto Ac3 se localiza a una temperatura de 910 °C.
- Conforme aumenta el contenido de cromo, el punto Ac3 disminuye hasta llegar a una temperatura de 850 °C para un contenido de cromo aproximado del 8%.
- Si se continúa aumentando la concentración de cromo, para contenidos de 8 a 13% el punto Ac3 sube de una temperatura de 850 a 1000 °C.
- El punto Ac4 se encuentra a una temperatura de 1400 °C para el hierro puro.
- Si se aumenta el contenido de cromo el punto Ac4 disminuye.
- La ferrita de todas las aleaciones hierro-cromo cuyo contenido de cromo oscila entre 0 y 12% se transforma, por calentamiento, en austenita o fase gamma. Por

enfriamiento rápido hasta la temperatura ambiente se consigue transformar la austenita en martensita.

- Como el límite de la curva gama corresponde al 13% de cromo aproximadamente, todas las aleaciones hierro-cromo con contenido de cromo superior al 13% serán aleaciones ferríticas.
- Las aleaciones hierro-cromo con contenidos de cromo entre 12 y 13% forman a elevadas temperaturas estructuras bifásicas alfa + gama, que enfriadas rápidamente a temperatura ambiente, presentarán una estructura formada por ferrita y martensita (aceros martensítico-ferríticos).
- Para el hierro puro, el punto Ac2 se encuentra a una temperatura de 768 °C
- En las aleaciones hierro-cromo con contenidos de cromo entre 25 y 42% y de 48 a 65% a temperaturas comprendidas entre 600 y 820 °C aparece una fase intermetálica llamada fase sigma.
- Cuando el contenido de cromo esta entre 42 y 48% toda la ferrita puede transformarse en fase sigma.

En las características de los aceros inoxidable, no solo influye el cromo. También el contenido de carbono es de gran importancia.

A continuación se estudian los diagramas de fase hierro-cromo para distintos contenidos de carbono.

En la figura 1.3 y la figura 1.4, se muestran los diagramas de fase hierro-cromo para contenidos de carbono de 0.05, 0.20% respectivamente.

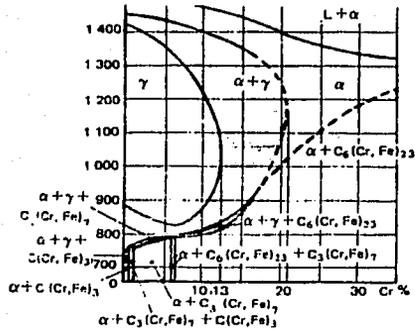


Figura 1.3. Diagrama de fase Fe-Cr. (C = 0.05%)

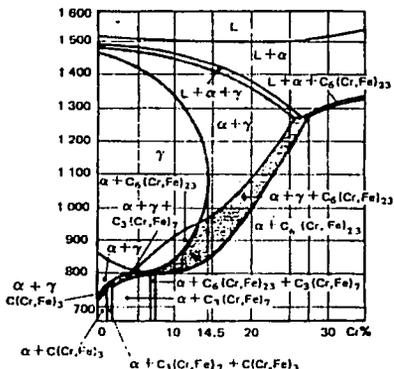


Figura 1.4. Diagrama de fase Fe-Cr. (C = 0.20%)

De la observación de estos diagramas se puede deducir lo siguiente:

- El limite de la curva gama se amplia al aumentar el contenido de carbono.

- La fase alfa pura, desaparece en las aleaciones hierro cromo con contenidos de carbono superiores al 0.1%.
- A partir del límite de la curva gama y hasta contenidos de cromo entre 26 y 27%, las estructuras son bifásicas a elevadas temperaturas.
- Las aleaciones de hierro-cromo con contenidos de cromo superiores al 27% son ferríticas.
- Se pueden conseguir aleaciones hierro-cromo-carbono de hasta 17% de cromo que sean martensíticas a temperatura ambiente.

1.3.1 Formación de la fase Sigma (σ).

Una de las razones de la formación de la fase sigma en los aceros inoxidable, puede ser la presencia de ferrita. Cuando a los aceros inoxidable se le mantiene durante largo tiempo a temperaturas comprendidas entre los 600 y 820 °C, la ferrita se transforma en un compuesto intermetálico de hierro y cromo.

Las características principales de la fase sigma son las siguientes:

- Poca ductilidad.
- Dureza superior a 900 Vickers.
- Gran fragilidad, lo que ocasiona grietas muy finas en el acero.

La fase sigma no solo se forma en los aceros con altos contenidos de cromo, ya que también puede presentarse en los aceros ferríticos con contenidos de cromo desde 14%.

También existe la posibilidad que se presente en los aceros austeníticos, principalmente en los que tienen un contenido de cromo de 20 y 25%.

Los elementos silicio, molibdeno, niobio y titanio, favorecen la formación de la fase sigma.

La fase sigma se presenta también cuando el acero ha sido sometido a deformaciones en frío.

La fase sigma es perjudicial en la mayoría de los casos. Pero con un tratamiento térmico, puede ser disuelta en la austenita.

1.4 Clasificación de los aceros inoxidables.

Comercialmente, los aceros inoxidables se clasifican en cinco grupos principales, que se encuentran en el mercado en formas moldeadas y forjadas.

Estos grupos son:

- Aceros inoxidables austeníticos.
- Aceros inoxidables ferríticos.
- Aceros inoxidables martensíticos.
- Aceros inoxidables PH (endurecibles por precipitación).
- Aceros inoxidables duplex.

1.4.1 Aceros inoxidables austeníticos:

Representan el grupo de aceros inoxidables más utilizados, debido a su gran resistencia a la corrosión y al calor, sus altas propiedades mecánicas, y su buena soldabilidad cuando se estabilizan con titanio o niobio. Contienen cromo entre un 15 y 25%, níquel entre 7 y 15% y algunos otros elementos en cantidades menores. Su contenido de carbono debe ser menor al 0.08%. Se pueden endurecer por trabajo en frío, pero no son tratables térmicamente.

En la tabla 1.1 se muestra la variedad de aceros inoxidables austeníticos, que se pueden encontrar.

Tabla 1.1 Tipos de aceros inoxidables austeníticos.

TIPO	Composición %						
	Carbono	Manganeso	Silicio	Cromo	Níquel	Fósforo	Azufre
201	0.15	5.5-7.5	1.00	16.0-18.0	3.5-5.5	0.06	0.03
202	0.15	7.5-10.0	1.00	17.0-19.0	4.0-6.0	0.06	0.03
205	0.12-0.25	14.0-15.5	1.00	16.5-18.0	1.0-1.75	0.06	0.03
301	0.15	2.00	1.00	16.0-18.0	6.0-8.0	0.045	0.03
302	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.045	0.03
302B	0.15	2.00	2.0-3.0	17.0-19.0	8.0-10.0	0.045	0.03
303	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.2	0.03
303Se	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.2	0.03
304	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.0	0.045	0.03
304H	0.04-0.01	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.0	0.045	0.03
304L	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.0	0.045	0.03
304LN	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.0	0.045	0.03
S30430	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.045	0.03
304N	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.0	0.045	0.03
305	0.12	2.00	1.00	17.0-19.0	10.5-13.0	0.045	0.03
308	0.08	2.00	1.00	19.0-21.0	10.0-12.0	0.045	0.03
309	0.2	2.00	1.00	22.0-24.0	12.0-15.0	0.045	0.03
309S	0.08	2.00	1.00	22.0-24.0	19.0-22.0	0.045	0.03
310	0.25	2.00	1.50	24.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03
310S	0.08	2.00	1.50	24.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03
314	0.025	2.00	1.5-3.0	23.0-26.0	10.0-14.0	0.045	0.03
316	0.08	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03
316F	0.08	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.2	0.03
316H	0.04-0.10	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03
316L	0.03	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03
316LN	0.03	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03
316N	0.08	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03
317	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	11.0-15.0	0.045	0.03
317L	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	11.0-15.0	0.045	0.03
321	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-12.0	0.045	0.03
321H	0.04-0.10	2.00	1.00	17.0-19.0	3.0-6.0	0.045	0.03
329	0.1	2.00	1.00	25.0-30.0	34.0-37.0	0.045	0.03
330	0.08	2.00	0.75-1.5	17.0-20.0	9.0-13.0	0.045	0.03
347	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03
347H	0.04-0.10	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03
348	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03
348H	0.04-0.10	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03
384	0.08	2.00	1.00	15.0-17.0	17.0-19.0	0.045	0.03

Los aceros NOM 301, NOM 302, NOM 302B, NOM 304, NOM 305, NOM 308, NOM 384, se diferencian entre sí por el contenido de níquel. A medida que este aumenta, se presenta en estos aceros una menor acritud (capacidad de generar defectos en la red

metálica, aumentando la dureza y disminuyendo la resistencia a la corrosión) durante su conformación por deformación plástica.

El acero NOM 304, por su resistencia a la corrosión atmosférica, es muy utilizado en la arquitectura.

Los aceros NOM 316 y NOM 317, contienen molibdeno, lo que les confiere una mayor resistencia a la corrosión por picadura, se utiliza en la fabricación de reactores destinados a la industria química, a la industria papelera y a la industria alimentaria.

1.4.2 Aceros inoxidables ferríticos.

Los aceros inoxidables ferríticos contienen entre 15 y 25% de cromo, no deben contener níquel y el contenido de carbono deber ser menor al 0.10%, pueden llegar a contener otros elementos tales como aluminio y hasta un 4.00% de molibdeno.

Las propiedades mecánicas de estos aceros, no pueden aumentarse mediante el uso de tratamientos térmicos, pero si pueden aumentarse ligeramente por trabajo en frío.

Presentan una gran resistencia a la corrosión, son magnéticos y tienen una buena ductilidad.

Los diferentes tipos de acero inoxidable ferrítico, disponibles en el mercado, se mencionan en la tabla 1.2

Tabla 1.2 Aceros inoxidables ferríticos.

TIPO	Composición %						
	Carbono	Manganeso	Silicio	Cromo	Níquel	Fósforo	Azufre
405	0.08	1.00	1.00	11,5-14,5	0.00	0.04	0.03
409	0.08	1.00	1.00	10.5-11.75	0.00	0.045	0.045
429	0.12	1.00	1.00	14.0-16.0	0.00	0.04	0.03
430	0.12	1.00	1.00	16.0-18.0	0.00	0.04	0.03
430F	0.12	1.25	1.00	16.0-18.0	0.00	0.06	0.15
430FSe	0.12	1.25	1.00	16.0-18.0	0.00	0.06	0.06
434	0.12	1.00	1.00	16.0-18.0	0.00	0.04	0.03
436	0.12	1.00	1.00	16.0-18.0	0.00	0.04	0.03
442	0.2	1.00	1.00	18.0-23.0	0.00	0.04	0.03
446	0.2	1.50	1.00	23.0-27.0	0.00	0.04	0.03

El acero NOM 405, que contiene entre 0.10 y 0.30% de aluminio, permite la obtención de buenas características de tenacidad en estructuras soldadas, que también pueden utilizarse a altas temperaturas, como por ejemplo en la fabricación de cestas para tratamientos térmicos, tubos para intercambiadores de calor, platos y campanas para torres de destilación.

El acero NOM 409, también conocido como “para tubo de escape” se utiliza en la fabricación de silenciadores para automóviles, y tiene una excelente respuesta a los procesos de soldadura.

El acero NOM 430, el acero inoxidable ferrítico más utilizado, es fácilmente conformable en frío y presenta una baja acritud. Tiene buena resistencia a la corrosión a distintas temperaturas. Se emplea en la industria automovilística, en electrodomésticos, en la industria química, en cámaras de combustión, en vajillas metálicas, jaulas de protección para ventiladores, etc.

Los aceros NOM 430F y NOM 430Fse, son variaciones del NOM 430, con altos contenidos de azufre y selenio, lo que les confiere una mayor maquinabilidad con máquinas-herramientas automáticas con arranque de viruta.

El acero NOM 434, es otra variedad del NOM 430, con un mayor contenido de molibdeno, lo que mejora la resistencia a la corrosión atmosférica, incluso salina. Se emplea en la industria automovilística.

El acero NOM 436 es otro derivado del NOM 430, con adición, además del molibdeno, de niobio, que incrementa la resistencia a la corrosión y al calor.

El acero NOM 442, es un acero con alto contenido de carbono, lo que representa una gran resistencia a la oxidación, por lo que se emplea mayormente en piezas de hornos y cámaras de combustión.

El acero NOM 444, tiene una gran resistencia a la corrosión en muchos medios moderadamente agresivos, resiste principalmente a los ácidos orgánicos, por lo que se aplica mucho en la industria alimentaria.

El acero NOM 446, es el acero inoxidable ferrítico con el mayor contenido de cromo, por lo cual resiste muy bien a la oxidación hasta los 1200°C. Pero su resistencia mecánica a las altas temperaturas es deficiente. Se utiliza en moldes para vidrio, recuperadores de calor, piezas de hornos y cestas para tratamientos térmicos.

1.4.3 Aceros inoxidables martensíticos.

Los aceros inoxidables martensíticos, contienen cromo entre 11 y 18%, no contienen níquel (a excepción de tres variedades) y su contenido de carbono varía entre 0.08 y 1.20%.

Son magnéticos y resistentes a la corrosión en medios moderadamente agresivos.

Este grupo de aceros inoxidables puede tratarse térmicamente.

En la tabla 1.3 se muestran los aceros inoxidables martensíticos disponibles.

Tabla 1.3 Aceros inoxidables martensíticos.

TIPO	Composición %						
	Carbono	Manganeso	Silicio	Cromo	Níquel	Fósforo	Azufre
403	0.15	1.00	0.50	11.5-13.0	0.00	0.04	0.03
410	0.15	1.00	1.00	11.5-13.0	0.00	0.04	0.03
414	0.15	1.00	1.00	11.5-13.5	1.25-2.50	0.04	0.03
416	0.15	1.25	1.00	12.0-14.0	0.00	0.04	0.03
416Se	0.15	1.25	1.00	12.0-14.0	0.00	0.06	0.06
420	0.15	1.00	1.00	12.0-14.0	0.00	0.04	0.03
420F	0.15	1.25	1.00	12.0-14.0	0.00	0.04	0.15
422	0.20-0.25	1.00	0.75	11.0-13.0	0.5-1.0	0.025	0.025
431	0.2	1.00	1.00	15.0-17.0	1.25-2.50	0.04	0.03
440A	0.60-0.75	1.00	1.00	16.0-18.0	0.00	0.04	0.03
440B	0.75-0.95	1.00	1.00	16.0-18.0	0.00	0.04	0.03
440C	0.95-1.20	1.00	1.00	16.0-18.0	0.00	0.04	0.03
501	0.1	1.00	1.00	4.0-6.0	0.00	0.03	0.03
501A	0.15	0.30-0.60	0.50-1.00	6.0-8.0	0.00	0.03	0.03
502B	0.15	0.30-0.60	0.50-1.00	8.0-10.0	0.00	0.04	0.03
502	0.15	1.00	1.00	4.0-6.0	0.00	0.04	0.03

TIPO	Composición %						
	Carbono	Manganeso	Silicio	Cromo	Níquel	Fósforo	Azufre
503	0.15	1.00	1.00	6.0-8.0	0.00	0.04	0.04
504	0.15	1.00	1.00	8.0-10.0	0.00	0.04	0.04

El acero NOM 410 es el acero más representativo de la serie y el más utilizado, después de un tratamiento de recocido, presenta buenas posibilidades de trabajado en frío y una discreta maquinabilidad.

Se utiliza para fabricar cuchillos monobloques, tornillos auto roscantes, tijeras, metros rígidos y de cinta, partes de micrómetros o instrumentos de medición, radios de bicicletas, paletas de turbinas de vapor, cilindros para laminación de cobre, bases para planchas, tamices para carbón, cuchillas para maquinas desfibradoras de la madera, etc.

El acero NOM 416, contiene azufre, lo que mejora ampliamente la capacidad de maquinado, sin deteriorar en forma excesiva su resistencia a la corrosión.

Con el temple adquiere buenas características mecánicas, con excepción de su resistencia, que es menor que la correspondiente al mismo acero sin contenido de azufre.

Los aceros NOM 420, pueden alcanzar altas durezas por tratamiento térmico, junto con buenas características de tenacidad, se emplean para hacer hojas de corte, engranajes, instrumentos quirúrgicos, llaves fijas para tuercas, ejes de bombas, etc.

Los aceros NOM 414 y 431, contienen níquel y mayores cantidades de cromo. Son los aceros de este grupo con mayor resistencia a la corrosión. con una elevada resistencia mecánica y dureza. Se utilizan para fabricar hélices, tornillos, pernos prisioneros de elevada resistencia, turbinas de maquinas descremadoras de leche y maquinaria para la industria papelera.

Los aceros NOM 440A y 440B, son los aceros de este grupo con el mayor contenido de cromo, y elevadas concentraciones de carbono, lo que aumenta considerablemente su dureza y su resistencia al desgaste. Se aplican generalmente para instrumentos quirúrgicos y odontológicos, cuchillería especial, cojinetes de bola, bancos de prueba, etc.

Los aceros NOM 418Se y 420F contienen azufre y selenio, lo que hace a estos aceros de fácil trabajo con máquinas-herramientas automáticas.

Estos aceros son modificaciones de los tipos NOM 410 y 420, que como ya se mencionó son de fácil mecanización, pero no son aptos para resistir deformación plástica en caliente o en frío.

Los aceros inoxidables martensíticos se utilizan en la fabricación de tornillos, tuercas, pequeñas piezas metálicas torneadas y fresadas, ejes con geometrías complejas, etc.

1.4.4. Aceros inoxidables PH (de endurecimiento por envejecimiento o precipitación)

Los aceros inoxidables PH son modificaciones de los aceros inoxidables austeníticos, pero contienen menos níquel que estos, y cantidades variables de aluminio, molibdeno y cobre. Estos aceros pueden endurecerse mediante el tratamiento térmico de envejecimiento o precipitación.

En la tabla 1.4 se muestran los aceros inoxidables PH.

Tabla 1.4 Aceros inoxidables PH.

TIPO	Composición %							
	Carbono	Manganeso	Silicio	Cromo	Níquel	Fósforo	Azufre	Molibdeno
329, No. 7Mo	0.1	2.00	1.00	25.00-30.00	3.00-6.00	0.045	0.03	1.0-2.0
3RE60	0.03	1.50	1.70	18.5	4.90	0.03	0.03	2.7
SAF2205	0.03	2.00	0.80	22	5.50	0.03	0.02	3.00
Ferralum 255	0.03	2.00	1.00	26	5.00	0.03	0.02	3.00
DP-3	0.03	2.00	1.00	25	6.50	0.03	0.02	3.00

1.4.5 Aceros inoxidables dúplex.

Los aceros inoxidables dúplex, son una combinación de los ferríticos y los austeníticos, los principales elementos de aleación son el cromo y el níquel, pero también se les añade nitrógeno, molibdeno, cobre, silicio y tungsteno, con el objeto de proporcionarles mayor resistencia a la corrosión y controlar su microestructura.

La resistencia a la corrosión de los aceros dúplex, es comparable a la de los aceros inoxidables austeníticos, pero poseen un punto de fluencia y una resistencia máxima a la tensión mucho más elevados.

Tienen un contenido de cromo entre 18 y 26.5%, níquel de 4 a 6%, un máximo de 4.5% de molibdeno y cobre y tungsteno en un 0.7%, también se le adiciona nitrógeno en cantidades que van de 0.08 hasta 0.35%.

En la tabla 1.5, se presentan los aceros inoxidables dúplex.

Tabla 1.5. Aceros inoxidables Dúplex.

TIPO	Composición %				
	Cromo	Níquel	Molibdeno	Cobre	Nitrógeno
3RE60	18.5	4.7	2.7	0	0
Tipo 329	26	4.5	1.5	0	0
CD-4MCu	25	5	2	3	0
44LN	25	6	1.7	0	0.15
DP-3	25	7	3	0.5	0.15
Aleación 2205	22	5	3	0	0.15
Ferralium 255	25	6	3	2	0.2
7-Mo PLUS	26.5	4.8	1.5	0	0.2
Atlas 958	25	1	4.5	0	0.25

1.5 Acero inoxidable martensítico NOM 416

El acero inoxidable martensítico NOM 416, que es el utilizado en esta tesis, contiene azufre, lo que mejora ampliamente su capacidad de maquinado, sin deteriorar excesivamente la resistencia a la corrosión y al igual que el resto de aceros pertenecientes a este grupo, es tratable térmicamente.

Fue el primer acero inoxidable de maquinado libre y es magnético en cualquier condición.

Es capaz de resistir la corrosión provocada por agua, vapor, distintos derivados del petróleo, materiales orgánicos y algunos ácidos diluidos.

No se recomienda para trabajos de soldadura debido a que el alto contenido de azufre provoca porosidades.

Puede trabajarse en caliente, pero se recomienda calentarlo uniformemente hasta un rango de temperaturas comprendido entre los 1150 y 1250 °C, el practicar trabajo en caliente a una temperatura menor a los 927 °C puede provocar fisuras.

Esta aleación solo puede someterse a trabajo en frío que provoque muy poca deformación, ya que si se somete a un fuerte trabajo en frío, se pueden presentar fisuras.

El acero inoxidable martensítico NOM 416 tiene la siguiente composición química:

- Un contenido de carbono máximo de 0.15%.
- Un contenido de cromo que varía entre 12 y 14%.
- Un contenido máximo de 1.25% de manganeso.
- Un contenido máximo de 0.6% de molibdeno
- Un contenido máximo de 0.06% de fósforo
- Hasta 1% de silicio
- Un contenido de azufre, de al menos mínimo de 0.15%.

Para la aplicación del tratamiento térmico de recocido, se recomiendan temperaturas comprendidas entre 770 y 780 °C, y un enfriamiento en el horno hasta los 400°C, con lo cual se consigue una dureza baja.

Para la aplicación del tratamiento térmico de templado, se consideran temperaturas entre 950 y 1000 °C, con enfriamiento en aceite.

Para la aplicación del revenido, la temperatura deberá ser superior a los 400 °C, y dependerá de las características mecánicas que se pretendan obtener, el enfriamiento se llevara a cabo al aire.

El acero inoxidable martensítico NOM 416 tiene una gran gama de aplicaciones en piezas para maquinaria tales como; tuercas, pernos, tornillos, pasadores, engranes y piñones,

válvulas, es ampliamente usado en la fabricación de ejes de geometrías diversas para distintos propósitos y principalmente para los ejes utilizados en las bombas de pozo profundo.

La figura 1.5, muestra una válvula de globo “Boney forge” y una válvula de compuerta “Boney forge” modelo 800LB, en las cuales, la camisa del yugo “Yoke sleeve”, esta fabricada con acero inoxidable NOM 416.

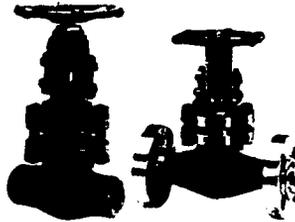


Figura 1.5 Válvula de globo y válvula de compuerta

La figura 1.6, muestra una bomba centrífuga doble modelo GL1, en la cual, el eje, el resorte de cápsula y la arandela cónica de cápsula, están fabricadas con el acero inoxidable martensítico NOM 416.

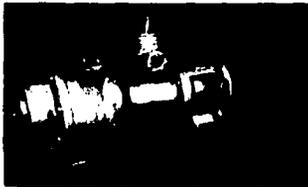


Figura 1.6 Bomba centrífuga doble.

1.6 Influencia de los distintos elementos de aleación en los aceros inoxidables.

Como ya se explicó, los aceros inoxidables son principalmente aleaciones de hierro y cromo, pero también contienen algunos otros elementos tales como: níquel, manganeso,

silicio, azufre, selenio, fósforo, molibdeno, tungsteno, aluminio, nitrógeno, titanio, niobio, vanadio, boro y cobalto.

A continuación se explica brevemente como influyen estos elementos en los aceros inoxidables.

Níquel.- En los aceros al carbono aumenta la templeabilidad, porque reduce la velocidad crítica de enfriamiento. En los aceros inoxidables, amplía el campo de formación de la austenita y aumenta su estabilidad. En las aleaciones al cromo que poseen estructuras mixtas martensítico-ferríticas a temperatura ambiente, al calentarlas disminuye la cantidad de ferrita y aumenta la de austenita, facilitando con enfriamiento la transformación de esta última en martensita. También aumenta la capacidad de temple de las aleaciones de cromo al añadirse en pequeñas cantidades. Ocasiona, cuando esta presente en grandes cantidades, que las aleaciones de cromo se transformen en austeníticas a temperatura ambiente.

Manganeso.- Este elemento, aumenta la estabilidad de la austenita, favorece la formación de la fase sigma en los aceros ferríticos con contenidos de cromo entre 25 y 30%, cuando el contenido de manganeso es superior al 10% se consiguen aceros austeníticos e inhibe la fragilidad en caliente al formar sulfuro de manganeso.

Silicio.- Favorece la formación de ferrita y por consiguiente la formación de la fase sigma en los aceros ferríticos con un 25 a 30% de cromo, y en los austeníticos con un contenido de cromo superior al 19%. Aumenta la resistencia en caliente, y aumenta considerablemente la temperatura de transformación A_{c1} y reduce la capacidad de temple en el aire. También reduce la temperatura del punto crítico A_{c3}.

Azufre.- selenio y fósforo; Aunque estos elementos son nocivos en los aceros, se emplean en cantidades superiores al 0.1% en los aceros de gran maquinabilidad. Dificultan los trabajos de soldadura. En general, disminuyen la resistencia a la corrosión.

Molibdeno.- Aumenta la resistencia mecánica en caliente de los aceros austeníticos. Favorece la pasividad y resistencia química en presencia de ácidos reductores. Aumenta la resistencia de los aceros ferríticos a los ácidos orgánicos.

Tungsteno.- favorece la formación de ferrita. Mejora las características mecánicas en frío y en caliente y tiene poca influencia en la resistencia a la corrosión.

Aluminio.- Mejora sensiblemente la resistencia a la corrosión en ambientes salinos. Favorece la formación de estructuras bifásicas. En un acero al níquel, el aluminio puede precipitar compuestos que den lugar a endurecimientos estructurales.

Nitrógeno.- Reduce ligeramente la tendencia a la corrosión por picaduras. Facilita la deformación en frío y en caliente de los aceros ferríticos y austeníticos.

Cobre.- Aunque no influye sensiblemente sobre la dureza de la martensita, si favorece el endurecimiento secundario. En general mejora la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable. Los aceros martensíticos con 1.2% de cobre, se forjan muy bien y se consiguen buenas resiliencias después de un tratamiento térmico. En los aceros ferríticos, no es conveniente un contenido mayor al 1.0%, ya que disminuye la facilidad para la deformación en caliente.

Titanio y niobio.- Favorecen la formación de ferrita, forman carburos de titanio y niobio, evitando la formación de carburos de cromo, que harían perder inoxidable al acero. Los dos elementos se pueden utilizar para controlar el tamaño de grano en los aceros. Disminuyen el efecto de sensibilización posterior a los procesos de soldadura.

Vanadio.- No se recomienda su aplicación a los aceros martensíticos, salvo en los que contienen 12% de cromo, ya que estabiliza los carburos precipitados durante el endurecimiento secundario. Aumenta la templeabilidad y puede emplearse como controlador del tamaño de grano.

Boro.- Adiciones de este elemento hacen que los aceros austeníticos con contenido de níquel inferior al 10% dejen de serlo. Si se aumenta el contenido de boro disminuye sensiblemente la resiliencia.

Cobalto.- Aunque este elemento no influye sensiblemente en la estructura, tiene aplicación en algunos tipos de aceros endurecibles por precipitación al favorecer la maduración de los mismos.

CAPITULO 2

TRATAMIENTOS TERMICOS.

2.1 Definición.

Según la Norma Oficial Mexicana: "Los tratamientos térmicos consisten en una serie de calentamientos y enfriamientos del metal, a diversas temperaturas durante determinados tiempos y a determinadas velocidades de calentamiento y enfriamiento."

2.2 Características de los tratamientos térmicos.

Una de las características más importantes de los aceros, es la capacidad que se tiene para poder cambiar sus propiedades, mediante las variaciones controladas de su temperatura. Esto permite dotar a cada pieza utilizada de las características mecánicas ideales para su fabricación y luego cambiarlas para que tengan las propiedades mecánicas necesarias para el trabajo que deben realizar.

Es posible también, hacer variar las propiedades en distintas zonas de una misma pieza, mediante tratamientos especiales, por ejemplo, es posible endurecer la superficie de elementos que han de estar sometidos a fuertes rozamientos como ejes, engranes y piñones, mientras que el núcleo de la pieza permanece mas blando y tenaz.

Los tratamientos térmicos, tienen como finalidad, mejorar las propiedades y características de los materiales a los que se aplican, modificando su estructura microscópica, ocasionando cambios físicos y en algunos casos, cambios en la composición química.

Los tratamientos térmicos se basan en las transformaciones de los metales en estado sólido y la posibilidad de obtener unos u otros constituyentes si dichas transformaciones se realizan en condiciones determinadas.

Gran parte de los tratamientos térmicos de los aceros, son posibles gracias a la transformación del hierro α (ferrita) en hierro γ (austenita) y viceversa, es decir, la austenita y sus transformaciones.

Distintas velocidades de enfriamiento desde el estado austenítico, originan transformaciones en constituyentes distintos, y por lo tanto diferentes propiedades del metal.

El proceso de todo tratamiento térmico es:

- Calentamiento hasta determinada temperatura.
- Permanencia a dicha temperatura.
- Enfriamiento hasta la temperatura ambiente.

2.2.1 Calentamiento.

El calentamiento suele realizarse introduciendo la pieza en un horno. Deben evitarse las variaciones de temperatura en los distintos puntos de la masa metálica ya que ocasionarían dilataciones distintas en cada zona, produciendo grietas o deformaciones. Por eso es recomendable que la temperatura del horno sea baja al introducir las piezas y elevar la temperatura lentamente.

2.2.2 Permanencia a temperatura máxima.

El tamaño de grano aumenta con la temperatura máxima, y también con la permanencia a temperatura máxima, por lo tanto, la temperatura máxima deberá ser solamente ligeramente superior a la temperatura de austenitización total, conocida como temperatura crítica.

Es importante determinar la temperatura crítica del material que se a tratar térmicamente, ya que a temperaturas excesivamente superiores a la temperatura crítica, se oxidan las impurezas que rodean a los granos y los mismos limites de grano, ocasionando lo que se conoce como acero quemado, lo que estropea la pieza sin posibilidad de regeneración.

2.2.3 Enfriamiento hasta temperatura ambiente.

Es la parte decisiva del tratamiento térmico. De la velocidad de enfriamiento depende el tipo de constituyentes finales y por lo tanto las propiedades.

Un enfriamiento lento permite la transformación normal de los constituyentes, mientras que el enfriamiento rápido da lugar a constituyentes de características más especiales. En el caso de los aceros, las transformaciones serán las siguientes:

Para enfriamiento lento:

Austenita → Enfriamiento lento → Perlita, ferrita, cementita.

La fase presente en los aceros sometidos a enfriamiento lento se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Composición de los aceros de enfriamiento lento.

Acero	Constituyentes a temperatura ambiente
Hasta 0.8% de C	Perlita y ferrita.
Con 0.8% de C	Perlita
Con mas de 0.8% de C	Perlita y cementita.

Para enfriamiento rápido:

Austenita → Enfriamiento rápido → Martensita

2.3 Consideraciones para la aplicación de los tratamientos térmicos.

Al tratarse térmicamente una pieza de acero, se deben tomar ciertas precauciones para desarrollar las propiedades mecánicas óptimas de dicho material. Los siguientes son algunos factores que deben considerarse al efectuar los tratamientos:

- Debe cuidarse la temperatura máxima a la que se somete el material, porque produce una decarburización de la superficie y favorece la formación de escamas.
- Debe tenerse cuidado al diseñar una pieza de máquina para prevenir su agrietamiento o deformación durante el tratamiento térmico. Con un diseño

adecuado se puede calentar o enfriar toda la pieza prácticamente a la misma velocidad.

- Deben evitarse los ángulos muy agudos. Las aristas vivas y los filetes inadecuados, ya que producen concentraciones de esfuerzos considerables.

2.4 Principales tratamientos térmicos.

2.4.1 Recocido:

Con este nombre se conocen varios tratamientos cuyo objetivo principal es ablandar el acero; otras veces se desea, además, regenerar la estructura o eliminar tensiones internas. Consisten en calentamientos a temperaturas adecuadas, seguidos generalmente de enfriamientos lentos. Los principales tipos de recocidos que se emplean son:

- Recocido completo.
- Recocido subcrítico:

2.4.1.1 Recocido completo.

El recocido completo o súper crítico, es similar al temple, solo varía la velocidad de enfriamiento que es mucho menor.

El calentamiento se hace a una temperatura 20 a 30 °C superior a la temperatura crítica superior, y la pieza a recocer, deberá permanecer a esa temperatura aproximadamente una hora por cada 2.5 cm de diámetro.

El enfriamiento se llevara a cabo dentro del mismo horno.

El proceso de recocido completo se muestra en la figura 2.1.

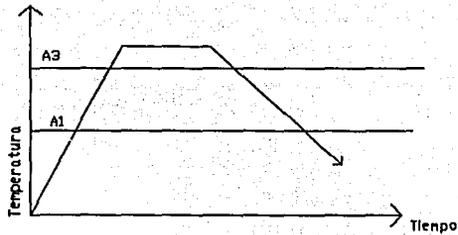


Figura 2.1 Recocido completo.

2.4.1.1 Recocido subcrítico.

Por medio de este recocido, se eliminan las tensiones del material y se aumenta su ductilidad.

Se aplica principalmente a piezas de acero que han sufrido fuertes operaciones de maquinado, trabajo en frío o que se han sometido a procesos de soldadura.

El calentamiento se hace a una temperatura ligeramente inferior a la temperatura crítica, y no importa el medio de enfriamiento, pudiendo incluso enfriarse al aire.

En la figura 2.2 se muestra el proceso de recocido subcrítico.

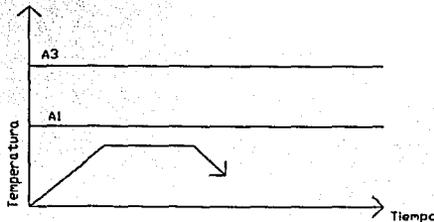


Figura 2.2 Recocido subcrítico.

2.4.2 Normalizado:

Este tratamiento consiste en un calentamiento a temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior, seguido de un enfriamiento en aire tranquilo. De esta forma se deja al acero con una estructura y propiedades consideradas como normales. Se suele utilizar para piezas que han sufrido trabajos en caliente, trabajos en frío, enfriamientos irregulares o sobrecalentamientos, y también sirve para destruir los efectos de un tratamiento anterior defectuoso. Por medio del normalizado, se eliminan las tensiones internas y se uniformiza el tamaño de grano del acero. Se emplea casi exclusivamente para aceros simples o de baja aleación, en la figura 2.3 se muestra el proceso de normalizado.

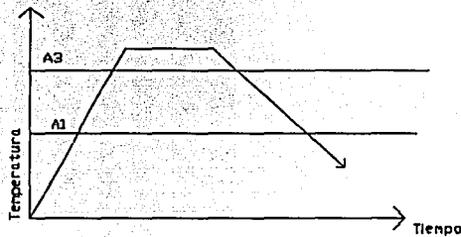


Figura 2.3 Normalizado.

2.4.3 Temple.

El temple tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente por arriba de la temperatura crítica superior y se enfría rápidamente (según la composición y el tamaño de la pieza) en un medio conveniente, que puede ser agua, aire, aceite o sales fundidas.

2.4.3.1 Proceso de temple.

Este tratamiento térmico consiste en las etapas siguientes:

Calentamiento:

El acero debe calentarse a una temperatura de 30 a 50 °C por arriba de la línea A3, en los aceros hipoeutectoides y por encima de la línea A1 para los aceros hipereutectoides, como se muestra en la figura 2.4

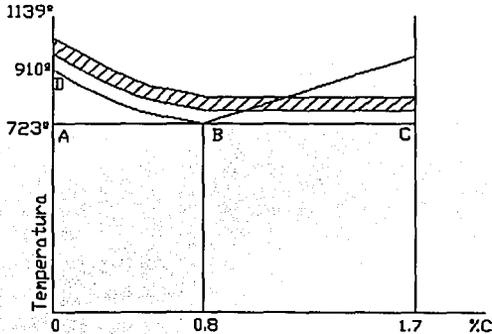


Figura 2.5 Zona de temperatura de temple

Permanencia a temperatura máxima:

El tiempo que la pieza deberá permanecer a la temperatura máxima dentro del horno, es de aproximadamente 1 hora por cada 2.5 cm de espesor, esto con el fin de conseguir una completa transformación en austenita de toda la masa de material.

Enfriamiento:

Debe ser lo suficientemente rápido, para lograr que toda la austenita se transforme en martensita, pero, por otra parte, lo más lento posible para evitar fracturas y deformaciones debidas a las distintas contracciones entre la superficie y el centro, esto se conoce como velocidad crítica de enfriamiento.

Existen diversos medios de enfriamiento, dependiendo del material que se quiere templear, los medios más frecuentes, así como el material al que suelen aplicarse, se muestran en la tabla 2.2

Tabla 2.2 Medios de temple y materiales a los que se aplican.

Medios de temple	Temperatura y consideraciones	Aplicaciones.
Agua	Temperatura ambiente.	Aceros simples.
Aceite	El punto de inflamación debe ser superior a los 180 °C y ser poco volátiles.	Aceros aleados.
Plomo fundido	400 a 600 °C.	Aceros especiales para muelles, alambre cuerda de piano y herramientas.
Mercurio	Temperatura ambiente.	Instrumentos quirúrgicos.
Sales fundidas	150 a 1300 °C, son baños que se forman mezclando cloruros, nitratos y carbonatos.	Aceros de alta velocidad y de herramientas en general. Tratamientos especiales.
Aire	Temperatura ambiente	Aceros para herramienta (grupos A, D, M, T)

La figura 2.4, muestra un diagrama del proceso de temple.

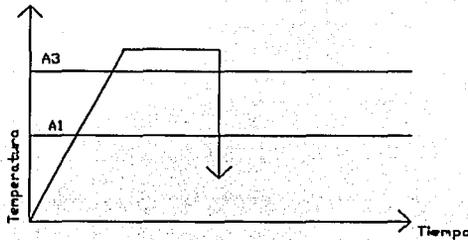


Figura 2.4. Proceso de temple.

2.4.4 Revenido:

Es un tratamiento térmico que se aplica a las piezas de acero que previamente han sido templadas, consiste en un calentamiento de la pieza a una temperatura por debajo de la temperatura crítica inferior, para los aceros simples, se recomienda temperaturas entre 200 y 350 °C. Para aceros aleados, temperaturas entre 300 y 450 °C. Para aceros de alta aleación temperaturas comprendidas entre los 400 y 600 °C, mientras que el tiempo de revenido varía entre 10 minutos y 2 horas.

El enfriamiento final se realiza al aire.

Algunos aceros, aceros para herramienta, requieren de un doble revenido para lograr la transformación total de la austenita retenida.

Este tratamiento disminuye la dureza y la resistencia de los aceros templados, eliminando las tensiones creadas por el temple y mejorando la tenacidad y ductilidad del acero, esto es; se logra un equilibrio de las propiedades del acero.

En la figura 2.6 se muestra el proceso de revenido.

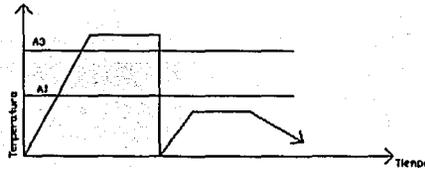


Figura 2.6 Proceso de revenido.

2.4.5 Austemplado:

Este tratamiento consiste en calentar el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y luego enfriarlo rápidamente en plomo o en sales fundidas, a temperaturas comprendidas entre 250 y 600 °C, permaneciendo el acero en el baño a esta

temperatura durante el tiempo suficiente para que se verifique la transformación completa de la austenita a temperatura constante, obteniéndose una fase conocida como bainita. El enfriamiento final se hace al aire.

Se utiliza en el tratamiento de los alambres conocidos como alambre cuerda de piano y en piezas delgadas. Se obtiene una dureza comparable con la obtenida mediante el tratamiento térmico de temple y revenido, pero con una ductilidad y tenacidad mucho mayores.

2.4.6 Martemplado:

Este tratamiento es un temple escalonado en el que el material caliente, a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior, se enfría en un baño de sales, también caliente, a temperaturas comprendidas entre 200 y 400 °C, permaneciendo las piezas en el durante un tiempo que debe controlarse cuidadosamente y que debe ser suficiente para que iguale la temperatura de toda la masa, antes de que en ninguna parte de ella se inicie la transformación de la austenita en bainita, y luego se enfría al aire. De esta forma se consigue que la transformación de toda la masa del acero se verifique casi al mismo tiempo, evitándose dilataciones desiguales y peligrosas que ocurren en los temple ordinarios, en los que las transformaciones de las distintas zonas del material se presentan en momentos diferentes, solo puede ser aplicado a piezas pequeñas.

2.5 Diagrama TTT del acero inoxidable martensítico NOM 416.

Los diagramas TTT, tiempo – temperatura – transformación, también conocidos como curvas de Bain o curvas S, son representaciones gráficas del comportamiento de las estructuras metálicas. En ellos, se puede observar la estructura presente en el acero, a distintas temperaturas y velocidades de enfriamiento.

Los elementos mencionados en el tema 1.6 de esta tesis, también afectan la forma de los diagramas TTT, de la siguiente forma:

El carbono, tungsteno, molibdeno, vanadio, cromo y níquel, desplazan a la derecha las curvas de los diagramas TTT, permitiendo un mayor lapso de tiempo para obtener la completa transformación de la estructura interna.

Por otra parte, la adición de cobalto, tiene el efecto contrario, es decir, disminuye el tiempo en el que se debe efectuar el enfriamiento del metal.

La figura 2.7 muestra el diagrama tiempo-temperatura-transformación del acero inoxidable martensítico NOM 416.

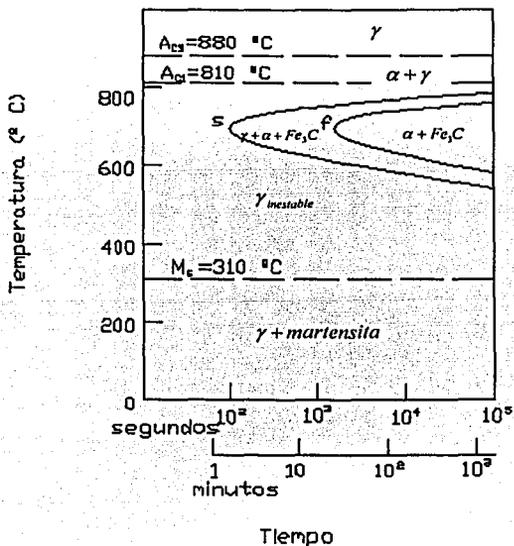


Figura 2.6 Diagrama TTT del acero NOM 416

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

De la observación del diagrama TTT del acero inoxidable NOM 416, se puede concluir lo siguiente:

- La temperatura crítica superior, o de austenitización total, es de 880 °C
- A una temperatura superior a los 810 °C, y menor de la temperatura crítica superior, se tiene una mezcla de austenita + ferrita.
- A temperaturas comprendidas entre 310 y 810 °C, se presenta una fase llamada austenita inestable.
- A temperaturas menores a 310 °C, se tiene una mezcla de austenita y martensita.

CAPITULO 3.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Introducción.

En este capítulo, se explica el proceso seguido para la realización de las pruebas de laboratorio en el acero inoxidable martensítico NOM 416, partiendo de la obtención de las probetas de dicho material, explicando los pasos seguidos durante la aplicación de los tratamientos térmicos, el análisis metalográfico y las medidas de dureza.

Se partió de una barra de acero inoxidable martensítico NOM 416 con un espesor de 5/8 de pulgada y una longitud de 80 centímetros, obtenida directamente del fabricante "Aceros Fortuna" que denomina a dicho acero como F13A.

El trabajo se llevo de la forma siguiente:

3.2 Obtención de las probetas.

Se cortaron 12 probetas de 3 centímetros de largo, utilizando para ello una cortadora de disco marca Buehler LTD, en presencia de una mezcla de agua y aceite soluble para evitar el calentamiento excesivo del material.

Las probetas se dividieron, para su estudio, de la siguiente forma:

- 3 probetas para recocido.
- 3 probetas para temple en aire y revenido.
- 3 probetas para temple en aceite y revenido.
- 3 probetas como se recibieron del fabricante.

3.3 Desbaste de las probetas.

Se utilizaron cuatro tamaños distintos de abrasivo, del número 220, del número 320, del número 400, y del número 600

La finalidad del uso de distintos tamaños de abrasivo es la de ir desbastando las probetas progresivamente, siendo necesario solo preparar una sección transversal, o cara, de la probeta.

Las lijas se colocaron sobre un vidrio, con la finalidad de tener una superficie totalmente lisa y plana, evitando así posibles daños a la probeta.

La probeta se giró noventa grados al hacer el cambio de lija, es decir, se empezó a lijar perpendicularmente al rayado de la superficie de la probeta.

Periódicamente se lavó la superficie de la lija para eliminar los residuos de material desbastado, también se debe tener en consideración que el lijado debe hacerse con lubricación, utilizándose para este fin agua corriente.

La lija del número 220, se utilizó inmediatamente después de cortada la probeta, al ser una lija de grano grueso, elimina las rayas profundas dejadas por el disco de corte.

Las lijas del número 320 y 400, son de grano intermedio, y van preparando la superficie de la probeta para el lijado final.

La lija del número 600, se utilizó para el desbaste final, al ser una lija de grano fino, las huellas dejadas por la misma son de poca profundidad, quedando la superficie lista para el pulido final.

3.4 Aplicación del tratamiento térmico de recocido.

Para la aplicación del recocido se utilizó un horno eléctrico Lindberg tipo 51848 CTD de industrias SOLA BASIC, el cual se ajustó a una temperatura de 780 °C.

La temperatura para la aplicación del tratamiento térmico de recocido, se determinó comparando las proporcionadas por el proveedor del acero, "Aceros Fortuna", con las encontradas en la bibliografía, al coincidir estas simplemente se sacó un promedio entre la temperatura superior y la temperatura inferior recomendadas.

Las probetas se dejaron dentro del horno a una temperatura de 780 °C durante un tiempo de 45 minutos, después se apagó el horno y con las probetas dentro, se esperó hasta que lentamente llegaron a una temperatura de 400 °C, después de lo cual, las probetas se sacaron del horno y se enfriaron al aire.

3.5 Aplicación del tratamiento térmico de temple.

Para el tratamiento térmico de templado, se utilizó un horno eléctrico marca Sybron, modelo Thermolyne 2000 Furnace, que se ajustó a una temperatura de 975 °C.

La temperatura para la aplicación del tratamiento térmico de temple, se determinó comparando las proporcionadas por el proveedor del acero, "Aceros Fortuna", con las encontradas en la bibliografía, al coincidir estas simplemente se obtuvo un promedio entre la temperatura superior y la temperatura inferior recomendadas.

Alcanzada la temperatura antes mencionada, las probetas se dejaron dentro del horno durante 45 minutos y por último, una por una se fueron sacando utilizando para esto pinzas de sujeción y un guante de asbesto.

Las probetas de temple en aire se colocaron sobre una plancha metálica y se dejaron ahí aproximadamente una hora.

Las probetas de temple en aceite, se introdujeron, inmediatamente después de sacadas del horno eléctrico en un recipiente lleno de aceite, donde se agitaron durante aproximadamente un minuto cada una, la finalidad de agitarlas dentro del aceite, es la de lograr un enfriamiento uniforme.

Finalmente, fueron limpiadas con papel para eliminar el aceite residual.

3.6 Pulido.

Después de aplicados los tratamientos térmicos, se escogió una probeta proveniente del tratamiento térmico de temple en aceite, una proveniente de tratamiento térmico de temple en aire, una proveniente de tratamiento térmico de recocido y una probeta sin ningún tratamiento para realizar en ellas un pulido, dejándolas preparadas para el ataque químico.

El pulido, se realizó con ayuda de una pulidora mecánica “Estándar Buehler pulisher” y en presencia de alumina (Al_2O_3) con un tamaño de partícula de 1 micra, también en presencia de agua que sirve como lubricante.

Sobre el disco giratorio de la pulidora mecánica, se colocó un pedazo de paño húmedo, previamente enjuagado, y sobre el paño, se colocó la alumina, esparciéndola uniformemente en toda la superficie del disco. Se encendió la pulidora mecánica e inmediatamente después se inició con el suministro de agua en forma de goteo, para la lubricación del proceso.

La probeta se colocó totalmente perpendicular a la superficie de pulido y se movió en forma radial sobre el disco giratorio.

Gradualmente se repitió el proceso de enjuague del paño y esparcido de la alúmina, para limpiar de impurezas la superficie de pulido, esto se realizó en presencia de agua.

Después de cada enjuague, la probeta se giró 90° para continuar con el proceso.

Las acciones anteriormente descritas se repitieron hasta conseguir un pulido total de toda la sección transversal de las probetas. Esto tomo aproximadamente una hora y treinta minutos para las probetas provenientes del tratamiento térmico de recocido y una hora para las probetas provenientes de los tratamientos térmicos de temple en aire y en aceite.

3.7 Ataque químico.

Una vez pulidas las probetas se seleccionó el reactivo a utilizar para el revelado de la microestructura, escogiéndose los siguientes reactivos:

- Reactivo de Vilella, para la probeta a la que no se le aplicó ningún tratamiento térmico y para la probeta proveniente del tratamiento térmico de recocido.
- Una variación del reactivo de Kalling número 1 para el las probetas provenientes del tratamiento térmico de temple en aire y en aceite.

El reactivo de Vilella, es una mezcla de 1 g de ácido pícrico, 5 ml de ácido clorhídrico (HCl) y 100 ml de etanol. Se utilizó a temperatura ambiente, sumergiendo y agitando las probetas durante 30 segundos.

El reactivo de Kalling número 1, es una mezcla de 1.5 g de cloruro de cobre (CuCl_2), 33 ml de etanol, 33 ml de agua y 33 ml de ácido clorhídrico (HCl). Pero, debido a la falta del cloruro de cobre (CuCl_2), este se reemplazó con cloruro cuprico (CuCl). Este reactivo se utilizó a temperatura ambiente, sumergiendo y agitando las probetas durante 20 segundos.

En ambos casos, después de transcurrido el tiempo de inmersión, se lavaron las probetas con un chorro de agua y con alcohol, para eliminar el reactivo de la superficie y retirar todo resto de impurezas, ya que si las probetas no se lavaran, no se detendría el proceso de corrosión.

3.8 Análisis metalográfico.

Después de realizado el ataque químico, se procedió a observar la superficie de las probetas, utilizando para esto un microscopio metalográfico.

Primero se utilizó un objetivo de 10 aumentos, con un ocular de 10 aumentos, para enfocar la superficie, después se cambió el objetivo a uno de 40 aumentos, con el cual se pudo apreciar claramente la microestructura de las probetas.

Finalmente, con ayuda de una cámara fotográfica, acoplada al microscopio metalografico, y con un objetivo de 60 aumentos, se procedió a tomar las fotomicrografias correspondientes, de la siguiente forma:

- 2 fotomicrografias de las probetas a las que no le fue aplicado ningún tratamiento térmico.
- 3 fotomicrografias de las probetas provenientes del tratamiento térmico de recocido.
- 3 fotomicrografias de las probetas provenientes del tratamiento térmico de temple en aire.
- 3 fotomicrografias de las probetas provenientes del tratamiento térmico de temple en aceite.

3.9 Medidas de dureza.

Después del análisis metalografico, se procedió a realizar las pruebas de dureza en todas las probetas provenientes de los tratamientos térmicos de recocido y temple en aire y en aceite, así como en las probetas a las que no se les aplico ningún tratamiento térmico.

Existen diversos tipos de medidas de dureza, tales como:

- Prueba Vickers.
- Prueba Brinnell.
- Prueba Rockwell.
- Prueba Knoop.

Para este trabajo se escogió la prueba de dureza Rockwell, siendo tres sus escalas principales, las cuales se muestran en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Prueba de dureza Rockwell.

Escala	Penetrador	Carga (kg)
R _A	Diamante	60
R _B	Bola 1/16"	100
R _C	Diamante	150

Para las pruebas de esta tesis, se utilizó una maquina Wilson "Rockwell Hardness Tester serie 500".

El proceso fue el siguiente:

- Se determinó el penetrador a utilizar, dependiendo de la escala en la que se iba a trabajar.
- Se colocó la probeta sobre un yunque plano, acoplado a la base de la maquina.
- Se acercó el penetrador, hasta que este hizo contacto con la superficie de la probeta y la aguja secundaria llego a su marca, que es el equivalente a una precarga de 10 kg.
- Se calibró la maquina, girando la carátula, hasta que la aguja principal, quedó en cero (set).
- Se aplicó la carga principal, de 100 kg para la escala R_B y 150 kg para la escala R_C.
- En la carátula se leyó el valor obtenido.
- Se retiró el penetrador.
- Se cambió de probeta, repitiendo el mismo procedimiento.

Se realizaron 5 pruebas en cada probeta, en distintas partes de la cara, para así, poder obtener un promedio de la dureza de cada probeta, y un promedio de la dureza de todas las probetas.

3.10 Aplicación del revenido.

El revenido se aplicó a las probetas previamente templadas en aire y en aceite. La temperatura de revenido, depende de las propiedades mecánicas que se quieran obtener, en cuanto mayor sean la temperatura y el tiempo de revenido, menor será la dureza.

Para este trabajo se eligió una temperatura de 400 °C, y se utilizó un horno eléctrico marca Sybron, modelo Thermolyne 2000 Furnace,

La temperatura para la aplicación del tratamiento térmico de revenido, se determinó esperando obtener con ella la mayor dureza posible.

Las probetas permanecieron dentro del horno eléctrico a 400 °C durante 60 minutos, después se sacaron del horno utilizando pinzas de sujeción y guantes de asbesto, y se enfriaron al aire durante aproximadamente 40 minutos.

3.11 Pulido.

Se escogieron dos probetas provenientes del tratamiento térmico de revenido, una templada en aire y una templada en aceite, que fueron nuevamente pulidas, siguiendo para ello el proceso mencionado en el tema 3.4 de esta tesis.

3.12 Ataque químico.

Para el ataque químico de las probetas provenientes del tratamiento térmico de revenido, se utilizó una variación del reactivo de Kalling número uno, que es una mezcla de 1.5 g de cloruro cuprico (CuCl), 33 ml de etanol, 33 mL de agua y 33 ml de ácido clorhídrico (HCL). Este reactivo se utilizó a temperatura ambiente, sumergiendo y agitando las probetas durante 20 segundos.

Después de transcurrido el tiempo de inmersión, se lavaron las probetas con un chorro de agua y con alcohol, para eliminar el reactivo de la superficie y retirar todo resto de impurezas.

3.13 Análisis metalográfico.

Después de realizado el ataque químico, se procedió a observar la superficie de las probetas, utilizando para esto un microscopio metalográfico.

Primero se utilizó un objetivo de 10 aumentos, con un ocular de 10 aumentos, después se cambió el objetivo a uno de 40 aumentos, con el cual se pudo apreciar claramente la microestructura de las probetas.

Finalmente, con ayuda de una cámara fotográfica, acoplada al microscopio metalográfico, y con un objetivo de 60 aumentos, se procedió a tomar las fotomicrografías correspondientes:

- 3 fotomicrografías de las probetas procedentes del tratamiento térmico de revenido, templadas en aceite.
- 3 fotomicrografías de las probetas procedentes del tratamiento térmico de revenido, templadas en aire.

3.14 Pruebas de dureza.

Después de tomadas las fotomicrografías, se procedió a realizar las pruebas de dureza en todas las probetas provenientes del tratamiento térmico de revenido.

Se realizaron 5 pruebas en cada probeta, en distintos puntos de la cara, para así, poder determinar un promedio de dureza de cada probeta, y un promedio de dureza de todas las probetas.

CAPITULO 4

RESULTADOS

Después de realizados los análisis micrográficos y las medidas de dureza de las probetas de acero inoxidable martensítico NOM 416, se obtuvieron los siguientes resultados.

4.1 Resultados del análisis micrográfico.

4.1.1 Probetas sin tratamiento térmico (como se recibieron del fabricante).

Las figura 4.1 y 4.2 muestran las fotomicrografías obtenidas de las probetas de acero inoxidable NOM 416 que no fueron sometidas a ningún tratamiento térmico.



Figura 4.1 Fotomicrografía del acero NOM 416, sin aplicación de tratamiento térmico. 600X

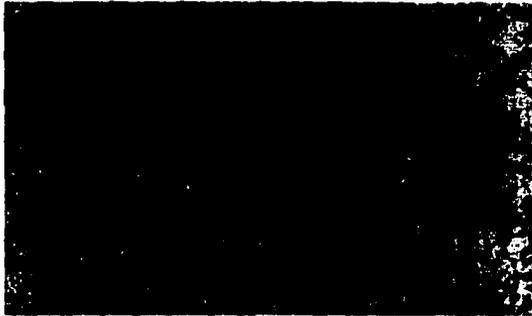


Figura 4.2 Fotomicrografía del acero NOM 416 sin aplicación de tratamiento térmico. 600X

Las zonas claras observadas en las figuras 4.1 y 4.2, representan la matriz ferrítica del acero NOM 416.

Las zonas oscuras observadas en las figuras 4.1 y 4.2, representan carburo de cromo.

Se observa un tamaño de grano menor al de las probetas sometidas al tratamiento térmico de recocido.

4.1.2 Probetas sometidas a tratamiento térmico de recocido.

Las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 muestran las fotomicrografías obtenidas de las probetas de acero inoxidable NOM 416 sometidas al tratamiento térmico de recocido.



Figura 4.3 Fotomicrografía del acero NOM 416 recocido a 780 °C. 600X



Figura 4.4 Fotomicrografía del acero NOM 416 recocido a 780 °C. 600X

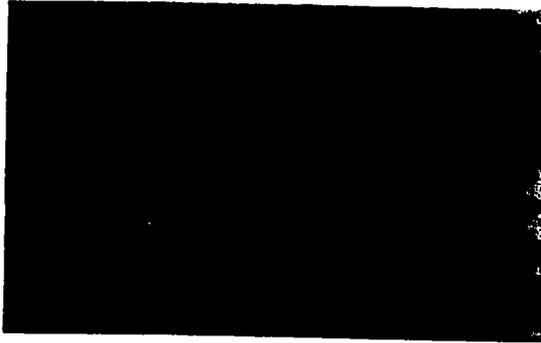


Figura 4.5 Fotomicrografía del acero NOM 416 recocido a 780 °C. 600X

Las zonas claras observadas en las figuras 4.3, 4.4 y 4.5. muestran la matriz ferrítica del acero NOM 416.

Las zonas oscuras, representan al carburo de cromo.

Se tiene un tamaño de grano mayor al observado en las probetas a las que no se les aplico ningún tratamiento térmico.

4.1.3 Probetas sometidas a tratamiento térmico de temple en aire.

Las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 muestran las fotomicrografías obtenidas de las probetas de acero inoxidable NOM 416, sometidas al tratamiento térmico de temple en aire.

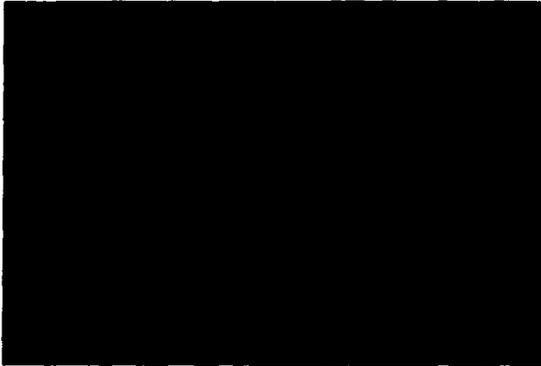


Figura 4.5 Fotomicrografia del acero NOM 416 Templado en aire. 600X

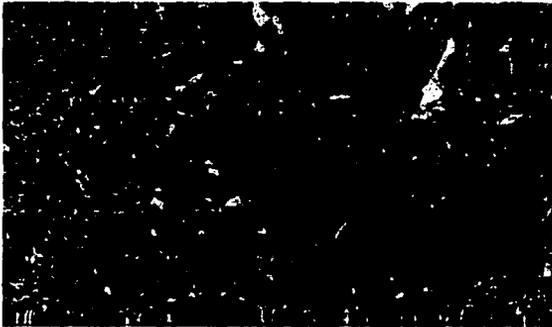


Figura 4.6 Fotomicrografia del acero NOM 416 templado en aire. 600X



Figura 4.7 Fotomicrografía del acero NOM 416 templado en aire. 600X

Las zonas claras observadas en las fotomicrografías 4.5, 4.6 y 4.7, representan parte de la matriz ferrítica del acero NOM 416, que, debido al temple en aire, no se transformo en martensita, esto debido a que la velocidad de enfriamiento no fue lo suficientemente rápida.

El resto de la fotomicrografía representa la martensita característica del tratamiento térmico de temple, también se observa la presencia de algunos carburos y un tamaño de grano es pequeño.

4.1.4 Probetas sometidas a tratamiento térmico de temple en aceite.

Las figuras 4.8, 4.9 y 4.10, muestran las fotomicrografías obtenidas de las probetas de acero inoxidable NOM 416, sometidas al tratamiento térmico de temple en aceite.



Figura 4.8 Fotomicrografía del acero NOM 416 templado en aceite. 600X

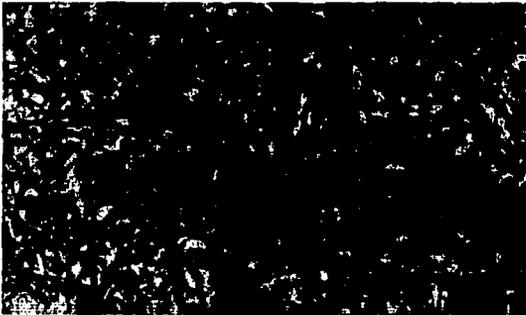


Figura 4.9 Fotomicrografía del acero NOM 416 templado en aceite. 600X



Figura 4.10 Fotomicrografía del acero NOM 416 templado en aceite. 600X

En las fotomicrografías de las probetas de acero inoxidable NOM 416, sometidas a tratamiento térmico de temple en aceite, se logra una mejor transformación de la matriz ferrítica en martensita.

En la figura 4.9, se observa en la parte central una inclusión, o impureza, probablemente resultado del proceso de fundición y vaciado del acero.

Se observa un tamaño de grano similar al de las probetas sometidas a temple en aire.

4.1.5 Probetas sometidas a tratamiento térmico de revenido, posterior a temple en aire.

Las figuras 4.11 y 4.12, muestran las fotomicrografías obtenidas de las probetas de acero inoxidable NOM 416, sometidas al tratamiento térmico de revenido, posterior al tratamiento térmico de temple en aire.



Figura 4.11 Fotomicrografía del acero NOM 416, templado en aire y revenido a 400 °C. 600X



Figura 4.12 Fotomicrografía del acero NOM 416 templado en aire y revenido a 400 °C. 600X

En las fotomicrografías de las probetas de acero inoxidable NOM 416 sometidas a tratamiento térmico de revenido, posterior a temple en aire, se observa una completa transformación en la llamada martensita revenida, así mismo, no se observaron cambios en el tamaño de grano después del revenido.

4.1.6 Probetas sometidas a tratamiento térmico de revenido, posterior a temple en aceite.

Las figuras 4.13 y 4.14, muestran las fotomicrográficas obtenidas de las probetas de acero inoxidable NOM 416, sometidas al tratamiento térmico de revenido, posterior al tratamiento térmico de temple en aire.



**Figura 4.13 Fotomicrografía del acero inoxidable NOM 416 templado en aceite y revenido a 400 °C.
600X**



**Figura 4.14 Fotomicrografía del acero inoxidable NOM 416 templado en aceite y revenido a 400 °C.
600X**

En las fotomicrografías de las probetas de acero inoxidable NOM 416 sometidas a tratamiento térmico de revenido, posterior a temple en aceite, se observa una completa transformación en la llamada martensita revenida, así mismo, no se observaron cambios en el tamaño de grano después del revenido.

Se puede apreciar la presencia de algunos carburos en la figura 4.14.

4.2 Resultados de las pruebas de dureza.

4.2.1 Dureza obtenida en probetas sin tratamiento térmico.

La tabla 4.1 muestra los resultados observados de la aplicación de la prueba de dureza Rockwell a las probetas de acero inoxidable martensítico NOM 416, que no fueron sometidas a ningún tratamiento térmico.

Tabla 4.1. Dureza obtenida en las probetas sin tratamiento térmico.

Probeta	DUREZA Rb					
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Promedio
Probeta 1	82	81	81	81	82	81.4
Probeta 2	77	76	80	82	79.5	78.9
Probeta 3	80.5	80	81	81.5	81	80.8

La grafica de la figura 4.15 muestra el promedio de las pruebas de dureza aplicadas a las tres probetas que no fueron sometidas a ningún tratamiento térmico.

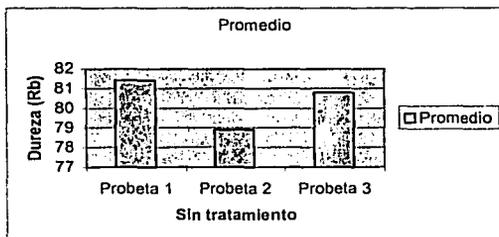


Figura 4.14. Dureza promedio de las probetas sin tratamiento térmico

4.2.2 Dureza obtenida en probetas sometidas a tratamiento térmico de recocido.

La tabla 4.2 muestra los resultados observados de la aplicación de la prueba de dureza Rockwell a las probetas de acero inoxidable martensítico NOM 416, sometidas al tratamiento térmico de recocido.

Tabla 4.2. Dureza obtenida en las probetas sometidas a tratamiento térmico de recocido.

	DUREZA Rb					Promedio
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	
Probeta 1	91	91	92	90	92.5	91.3
Probeta 2	90	86	87	89.5	90	88.5
Probeta 3	94	95	91	92.5	93.5	93.2

La grafica de la figura 4.15 muestra el promedio de las pruebas de dureza aplicadas a las tres probetas sometidas a recocido.

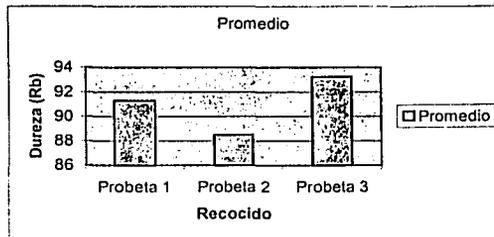


Figura 4.15. Dureza promedio de las probetas recocidas

4.2.3 Dureza obtenida en probetas sometidas a tratamiento térmico de temple en aire.

La tabla 4.3 muestra los resultados observados de la aplicación de la prueba de dureza Rockwell a las probetas de acero inoxidable martensítico NOM 416, sometidas al tratamiento térmico de temple en aire.

Tabla 4.3. Dureza obtenida en las probetas sometidas a tratamiento térmico de temple en aire.

DUREZA Rc						
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Promedio
Probeta 1	31	33	34	37	36	34.2
Probeta 2	29	31	31	31	34	31.2
Probeta 3	32	34	35	37	36	34.8

La grafica de la figura 4.16 muestra el promedio de las pruebas de dureza aplicadas a las tres probetas sometidas a temple en aire.

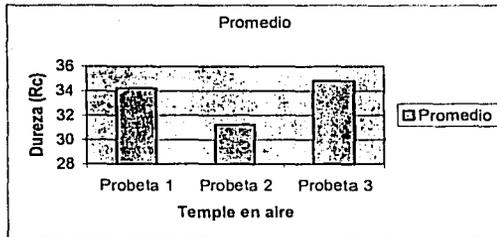


Figura 4.16. Dureza promedio de las probetas templadas en aire.

4.2.4 Dureza obtenida en probetas sometidas a tratamiento térmico de temple en aceite.

La tabla 4.4 muestra los resultados observados de la aplicación de la prueba de dureza Rockwell a las probetas de acero inoxidable martensítico NOM 416, sometidas al tratamiento térmico de temple en aceite

Tabla 4.4. Dureza obtenida en las probetas sometidas a tratamiento térmico de temple en aceite.

	DUREZA Rc					
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Promedio
Probeta 1	39	39	39	37	38	38.4
Probeta 2	34	37	37	38	38	36.8
Probeta 3	31	36	36	37	36	35.2

La gráfica de la figura 4.17 muestra el promedio de las pruebas de dureza aplicadas a las tres probetas sometidas a temple en aceite.

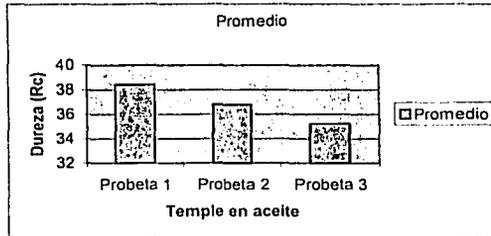


Figura 4.17. Dureza promedio de las probetas templadas en aceite.

4.2.5 Dureza obtenida en probetas sometidas a tratamiento térmico de revenido, posterior al temple en aire.

La tabla 4.5 muestra los resultados observados de la aplicación de la prueba de dureza Rockwell a las probetas de acero inoxidable martensítico NOM 416, sometidas al tratamiento térmico de revenido, aplicado después del tratamiento térmico de temple en aire.

Tabla 4.5. Dureza obtenida en las probetas sometidas a tratamiento térmico de revenido, posterior al temple en aire.

	DUREZA Rc					
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Promedio
Probeta 1	37	38	35	37	36	36.6
Probeta 2	36	36	33	36	33	34.8
Probeta 3	32	32	31	34	34	32.6

La grafica de la figura 4.18 muestra el promedio de las pruebas de dureza aplicadas a las tres probetas sometidas a revenido, posterior al temple en aire.

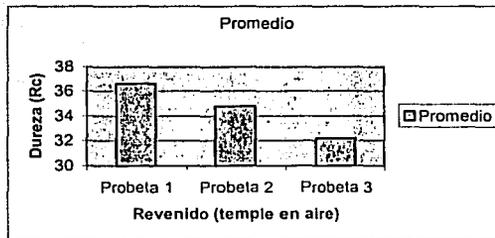


Figura 4.18. Dureza promedio de las probetas sometidas a revenido (temple en aire).

4.2.6 Dureza obtenida en probetas sometidas a tratamiento térmico de revenido, posterior al temple en aceite.

La tabla 4.6 muestra los resultados observados de la aplicación de la prueba de dureza Rockwell a las probetas de acero inoxidable martensítico NOM 416, sometidas al tratamiento térmico de revenido, aplicado después del tratamiento térmico de temple en aceite.

Tabla 4.6 Dureza obtenida en las probetas sometidas a tratamiento térmico de revenido, posterior al temple en aceite

DUREZA Rc						
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Promedio
Probeta 1	38	38	39	38	35	37.6
Probeta 2	35	35	36	34	35	35
Probeta 3	37	36	35.5	34	36	35.7

La grafica de la figura 4.19 muestra el promedio de las pruebas de dureza aplicadas a las tres probetas sometidas a revenido, posterior al temple en aceite.

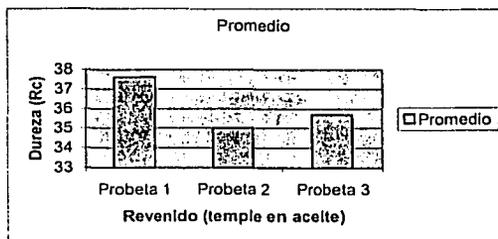


Figura 4.19. Dureza promedio de las probetas sometidas a revenido (templadas en aceite).

4.2.7 Dureza promedio de las probetas de acero inoxidable NOM 416.

La grafica de la figura 4.20, muestra una comparativa de la dureza promedio obtenida en las probetas sometidas al tratamiento térmico de recocido y las probetas a las cuales no se les aplico ningún tratamiento térmico.

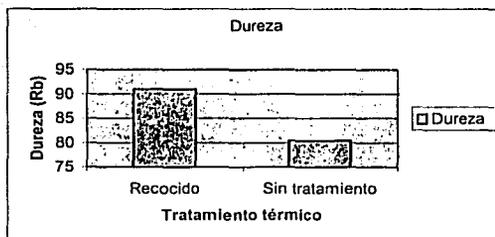


Figura 4.20. Dureza promedio.

La grafica de la figura 4.21, muestra una comparativa de la dureza promedio obtenida por la aplicación de los tratamientos térmicos de temple en aire, temple en aceite, revenido posterior al temple en aire y revenido posterior al temple en aceite.

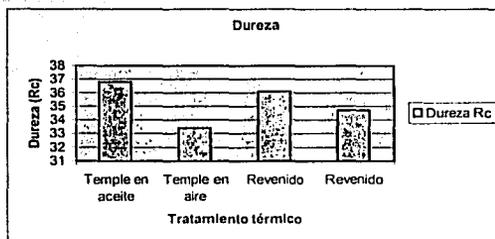


Figura 4.21. Dureza promedio.

CONCLUSIONES.

Después del trabajo experimental realizado (análisis metalográfico, tratamiento térmico y medición de dureza), se pueden establecer las conclusiones siguientes:

- El acero inoxidable martensítico NOM 416, es proporcionado por el fabricante con una dureza muy baja, resultado, posiblemente, de un globalizado, lo que permite su fácil maquinado.
- Algunas de las probetas de acero inoxidable martensítico NOM 416 estudiadas, mostraron la presencia de inclusiones en su microestructura, dichas inclusiones afectan las propiedades mecánicas del acero.
- El acero inoxidable martensítico NOM 416, presentó una buena respuesta a los tratamientos térmicos a los que fue sometido, mostrando una alta dureza
- La aplicación del tratamiento térmico de recocido a las probetas de acero inoxidable NOM 416, ocasiono un ligero aumento en la dureza del material con respecto a la dureza mostrada por las probetas sin aplicación de tratamiento térmico.
- Se determinó que el medio de temple mas adecuado para el acero inoxidable martensítico NOM 416, es el aceite, ya que en las probetas sometidas a temple en aire, no se logro la transformación de toda la austenita en martensita.
- No se perdió dureza después de aplicar el tratamiento térmico de revenido.
- Debido a la presencia de ferrita en las probetas templadas en aire, estas presentaron una dureza inferior a la mostrada por las probetas templadas en

aceite, sin embargo, aplicar el tratamiento térmico de revenido, disminuyo la diferencia en la dureza de las probetas.

- Debido a su buena dureza después de la aplicación de los tratamientos térmicos de temple y revenido, el acero inoxidable martensítico NOM 416, puede utilizarse para la fabricación de elementos de máquina, tales como engranes, ejes y tornillos, sometidos a trabajo ligero y medio, en un ambiente no severo.
- Debido a su bajo costo (\$25 por Kg) y buenas propiedades mecánicas después de aplicados los tratamientos térmicos de temple y revenido, el acero inoxidable martensítico NOM 416 podría utilizarse como sustituto de otros aceros, por ejemplo el W1 y W2 para la fabricación de elementos de máquinas, debido al elevado costo de estos (aproximadamente \$100 por Kg) y a la similitud en cuanto a las propiedades mecánicas.

BIBLIOGRAFÍA

1.- Aceros inoxidables y aceros resistentes al calor; propiedades, transformaciones y normas.

Inchaura Zabala, Adrián. México limusa, 1981.

2.- Materiales resistentes a la corrosión.

Pere Molera Solá. España, MARCOMBO, 1990.

3.- Handbook of stainless steels.

Donald Peckner and Irvin Bernstein. New York Mc Graw Hill, 1977.

4.- Manual del Ingeniero volumen XII: Tratamientos térmicos de los aceros.

Hans Stüdeman. España URMO S.A. de ediciones, 1980.

5.- Tratamientos térmicos de los aceros.

Apraiz Barrero, José. España editorial DOSSAT, S.A., 1985.

6.- Metalografía microscópica básica.

Richard Henry Graves, Harold Wright. España URMO S.A. de ediciones, 1979.

7.- Metalografía tomo I.

A. P. Guliaev. URSS Editorial Mir, 1977

8.- Metalografía tomo II.

A. P. Guliaev. URSS Editorial Mir, 1977

9.- Endurecimiento, revenido y tratamiento térmico.

Tubal Cain. México Editorial Gustavo Gili, 1997.

10.- Tratamiento térmico de los metales.

Perce Molera Solá. Marcombo Baxareu Editores, 1991.

11.- Marks manual del Ingeniero Mecánico.

Theodore Baumeister. México Mc Graw Hill, 1984.