



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

“COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA
MECANICA DE LA ALEACION FERRALIUM
255 A LA TEMPERATURA”.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO MECANICO
ELECTRICISTA**

P R E S E N T A :

VICENTE VAZQUEZ SUAREZ

ASESOR: M.en I. HECTOR ENRIQUE CURIEL REYNA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MEXICO

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

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN
ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



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:

"Comportamiento de la resistencia mecánica
de la aleación Ferralium 255 a la temperatura".

que presenta el pasante: Vicente Vázquez Suárez
con número de cuenta: 09758895-1 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 ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 30 de Mayo de 2003

PRESIDENTE	<u>M.I. Héctor Enrique Guriel Reyna</u>	
VOCAL	<u>M.I. Gerardo Sosa</u>	
SECRETARIO	<u>Ing. José Antonio Barrera Rodríguez</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Héctor Hernández Guzmán</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Rafael Berrum Escalona</u>	

AGRADECIMIENTOS

A mis padres: Vicente y María de Jesús por apoyarme, al igual que lo han hecho con todos mis hermanos, siempre de forma unánime y de toda la vida; y por brindarnos una profesión, cuya misma debe tratar de proporcionarse en lo más posible; pues la "Vida Moderna" exige una preparación "Intelectual" siendo un gran crimen dejar a un hijo desamparado y sin armas para poder vivir en estos tiempos.



A mis hermanos: Angélica, Verónica y Miguel Ángel por la grata convivencia y armonía con la que hemos vivido, y a quienes les deseo cumplan con todas sus metas.



A Celeste: Mi alma gemela y gran amiga, quien llegó a mi vida en el momento preciso. Le agradezco alentarme y ayudarme en los grandes proyectos de la vida; pero sobre todo por brindarme incondicionalmente su amor, cariño y confianza. Gracias por ser una gran persona y por ser parte de mi vida, ten por seguro que tienes un lugar muy especial dentro de mí. *Gracias.*

Al profesor **M. en I. Héctor Enrique Curiel Reyna**, que siempre ha procurado la correcta formación de los nuevos Ingenieros; pero sobretodo por hacer posible la presentación de este trabajo y su gran apoyo, confianza y voluntad.



A mis amigos: Con quienes pase buenos ratos, y con quienes me divertí mucho; cada cual con su faceta característica y aportando diversidad, haciendo inolvidable esta fase de la vida.



Y por último y no menos importante, **a mi Abuela Paula** quién siempre me tuvo mucho cariño y anhelaba la prosperidad de sus nietos; que estés donde estés, siempre te iluminen y retribuya para bien todo lo que sembraste.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES EN LOS ACEROS INOXIDABLES	Pág
1.1 Los aceros inoxidables	2
1.2 Tipos de aceros inoxidables	4
1.2.1 Aceros inoxidables Ferríticos	5
1.2.2 Aceros inoxidables Martensíticos.....	7
1.2.3 Aceros inoxidables Austeníticos.....	9
1.2.4 Aceros inoxidables endurecibles por precipitación	11
1.3 Efecto de los elementos aleantes en los aceros inoxidables	13
Resumen (Cap.1)	17

CAPÍTULO 2. ACEROS INOXIDABLES DUPLEX

2.1 Desarrollo de los aceros inoxidables duplex.....	19
2.2 Composición y microestructura	22
2.3 Propiedades mecánicas	24
2.4 Aplicaciones	26
Resumen (Cap.2).....	29

CAPÍTULO 3. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

3.1 Generalidades de los tratamientos térmicos	31
3.2 Tipos de tratamientos térmicos	37
3.3 Los aceros inoxidables y los tratamientos térmicos	41
Resumen (Cap.3)	43

CAPÍTULO 4. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN

4.1 El ensayo de resistencia a la tensión	45
4.2 La deformación elástica y plástica	47
4.3 La curva esfuerzo-deformación.....	49
Resumen (Cap.4)	54

CAPÍTULO 5. METALOGRAFÍA

5.1 La metalografía	56
5.2 Preparación de las muestras	57
5.3 Ataque químico de las muestras.....	60
5.4 Evaluación de los resultados	62
Resumen (Cap.5)	65

CAPÍTULO 6. PARTE EXPERIMENTAL

6.1 Objetivo	67
6.2 Propiedades del Ferralium 255®	67
6.3 Metodología	71
6.4 Planteamiento de experimentos.....	73
6.5 Recopilación de resultados	74
6.6 Resultados de la cuantificación metalográfica	84
6.7 Análisis de resultados	86

CONCLUSIONES	88
---------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidable han sido de los aceros más útiles que el hombre haya podido fabricar, la utilización de los mismos es tan amplia, que prácticamente los encontramos en cualquier parte; desde utensilios de cocina, extensibles de reloj, hasta grandes transportadores de alimentos y equipos industriales. Mediante estos aceros, el hombre consigue extraer, procesar y transportar sustancias variadas; desde el manejo salubre de alimentos hasta productos altamente tóxicos como son ácidos y derivados del petróleo. A todos los beneficios otorgados, podemos decir que los aceros inoxidable han ayudado al progreso del hombre.

La industria requiere cada día más manipular sustancias extremadamente agresivas, aunque existen actualmente tipos de aceros inoxidable capaces de realizar estas labores de manera casi satisfactoria, es necesario buscar materiales que muestren el mejor desempeño. El agua salina y soluciones cloridas son algunos ejemplos de estos tipos de sustancias, donde aceros inoxidable clásicos sufren graves deterioros; aleaciones mejoradas, tal como es el material de estudio de esta tesis, denominado FERRALIUM 255[®], desempeñan su papel sin ningún problema bajo este tipo de atmósferas.

Debido a las características que presenta el FERRALIUM 255[®], se presenta un amplio panorama para ser utilizado. El excelente desempeño de este acero inoxidable superduplex en medios salinos lo hacen perfecto para ser utilizado en plataformas petroleras. Otras aplicaciones han tenido lugar en la industria de procesos y extractiva; como es en la fabricación de papel, donde es necesario usar una diversidad de ácidos. Su desempeño ha sido tan alto, que los pernos, tornillos y remaches de la Estatua de la Libertad han sido fabricados y cambiados por este tipo de material, símbolo de la gran confianza depositada en el FERRALIUM 255[®].

La falta de divulgación y por lo tanto escaso uso de esta aleación en nuestro país, han sido motivo para la presentación de este tipo de tesis experimental. Mediante este trabajo se pretende dar a conocer aspectos básicos sobre el material, tal como es su composición química, la microestructura que presenta, así como conocer el comportamiento que muestre al ser afectado por la temperatura, con relación a una de las pruebas mecánicas elementales básicas; es decir, el ensayo de resistencia a la tensión. Se espera que la información proporcionada por este trabajo sirva en un futuro no muy lejano, para disponer de nuevas alternativas de materiales, en este nuestro país, México.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES EN LOS
ACEROS INOXIDABLES.

1.1 LOS ACEROS INOXIDABLES.

Los aceros inoxidable son básicamente aleaciones ternarias constituidas de *Hierro-Carbono-Cromo* con presencia de algunos otros elementos tales como Aluminio, Silicio, Titanio, que otorgan mejoras a las características propias de estos aceros.

Los aceros inoxidable son llamados así, puesto que se protegen de forma adecuada ante los efectos de la corrosión, el efecto de la misma es reducida en comparación con los aceros al Carbono. Estos efectos casi nulos, son debidos a la formación de una película protectora en toda la superficie del acero, constituida de óxido de Cromo que actúa de forma pasiva en comparación con la capa de óxido de Hierro que siempre se presenta en los aceros al Carbono. Se requiere una cantidad mínima de 12% y máxima de 30% de Cromo en la aleación para que se forme dicha protección_(1,6,12,13). Es importante destacar el papel de la capa protectora de óxido de Cromo, esta capa presenta ciertas características que la hacen especial. Como se ha dicho, la protección en estos tipos de aceros es dada en toda su superficie, pero esto no quiere decir que si el acero es maquinado ya no cuente con dicha protección, ya que una de sus características es regenerarse momento a momento, además de ser impermeable, invisible y distribuirse de forma uniforme.

Adiciones de Azufre en cantidades extremadamente bajas mejoran considerablemente el maquinado y por consiguiente la protección contra la corrosión₍₂₎. Al igual que en los aceros convencionales, la presencia de Carbono es básica. Los porcentajes de Carbono en un inoxidable no llegan a más del 1.2%, cantidad muy grande, proporcionando la mayor dureza y resistencia al desgaste. Las cantidades de este elemento se varían, ya que en ocasiones es necesario tener por ejemplo ductilidad en vez de dureza. Por otro lado, pese a controlar el tenor de Carbono en los aceros inoxidables, la corrosión puede darse en los mismos.

La corrosión en un acero inoxidable puede darse por múltiples factores referidos generalmente a la exposición al calor prolongado y a un inadecuado enfriamiento del acero. La razón es debida a una disminución en el contenido de Cromo de la capa protectora; la aparición de carburos (soluciones sólidas saturadas de Carbono en Hierro) se combinan con el Cromo, formando carburos de Cromo, y bajando por consiguiente el contenido del mismo en la película protectora_(1,6). Formas prácticas de evitar estos efectos son: si es posible, la adquisición de aceros inoxidables con bajos porcentajes de Carbono, evitar trabajarlos continuamente a temperaturas altas, evitar soldarlos (si es que son soldables) y si es que van a ser soldados, enfriarlos rápidamente para evitar la formación de estos carburos que resultan ser siempre dañinos.

1.2 TIPOS DE ACEROS INOXIDABLES.

Los aceros inoxidables son los aceros usados en atmósferas corrosivas por excelencia. A estos aceros se les agregan cantidades mínimas de otros elementos que aportan mejoras en ciertos sentidos, como pudiera ser el aumento de la resistencia a la corrosión, mejorar la ductilidad, maquinabilidad, entre otras⁽²⁾. Ante estos tipos tan diversos de desempeños, existe la necesidad de disponer de una clasificación generalizada pero a la vez útil, que nos de un panorama más amplio acerca de las cualidades de los aceros inoxidables fabricados, y mediante información proveniente de nuestras necesidades, podamos realizar la mejor elección.

A continuación se presenta la clasificación otorgada a los aceros inoxidables, la cual está basada en aspectos tales como el tipo de elementos que forma la aleación, la composición de los mismos y sobre todo la microestructura que poseen o que llegan a desarrollar después de un tratamiento térmico^(1,8,12,13). Los aceros inoxidables son clasificados de la siguiente forma:

- * Aceros Inoxidables Ferríticos.
- * Aceros Inoxidables Martensíticos.
- * Aceros Inoxidables Austeníticos.
- * Aceros Inoxidables Endurecidos por Precipitación.

1.2.1 LOS ACEROS INOXIDABLES FERRITICOS.

Son aleaciones basadas principalmente en *Fierro-Carbono-Cromo*, los contenidos de Cromo se sitúan entre el 12 y 30% y el Carbono no excede el 0.2%. Son llamados Ferríticos ya que presentan Ferrita (bcc α) a temperatura ambiente_(1, 8, 12, 13).

Estos tipos de aceros presenta una resistencia muy buena contra la corrosión, mostrando similitudes con algunos aceros inoxidable Austeníticos, los cuales son más costosos por la adición de Níquel; esta buena resistencia a la corrosión se debe al alto porcentaje de Cromo. Sin embargo, su uso se ve restringido ya que son frágiles, no son dúctiles, y son escasamente soldables. Estos aceros por su bajo contenido de Carbono no pueden ser endurecidos del todo, llevándolos a altas temperaturas es posible generar algo de Austenita en su microestructura Ferrítica y al ser templados precipitan cantidades despreciables de Martensita, con lo cual, podemos decir que son prácticamente no endurecibles₍₁₎. Debido a que son quebradizos, es casi imposible realizar estampados sobre este tipo de aceros, es decir carecen de formabilidad. Algunos de estos aceros poseen Azufre en cantidades despreciables con lo cual se consigue maquinar piezas de formas no muy complejas; sin embargo son todavía difíciles de trabajar.

Propiedades básicas

- ✓ De moderada a buena resistencia a la corrosión dependiendo del porcentaje de Cromo.
- ✓ Menor formabilidad y soldabilidad.
- ✓ No son templables.
- ✓ Son magnéticos.
- ✓ Baja resistencia al impacto.

Usos más comunes

- ✓ Utensilios de cocina.
- ✓ Sistema de escape para automotores.
- ✓ Revestimientos de diferentes artefactos como heladeras, lavavajillas, secadoras de ropa.
- ✓ Artículos Ornamentales.

Grados más comunes

409 Es un acero resistente a altas temperaturas, con algo de formabilidad y soldabilidad. Principalmente utilizado para sistemas de escape de automotores.

430 Fabricación de utensilios de cocina, artículos ornamentales y revestimientos.

1.2.2 LOS ACEROS INOXIDABLES MARTENSITICOS.

Estos tipos de aceros son aleaciones *Fierro-Carbono-Cromo* con cantidades de 12 a 17% de Cromo y contenidos de 0.1 a 1.2 % en Carbono_(1,8,12,13). El Carbono se encuentra en una cantidad tal que se permite la transformación de Austenita a Martensita durante el temple o enfriamiento brusco, fase que le proporciona endurecimiento₍₁₎. Se pueden obtener aceros muy duros cuando el contenido de Carbono esta muy próximo al 1%; también se le adicionan otros elementos para mejorar sus propiedades.

De todos los aceros inoxidable, los aceros inoxidable Martensíticos tienen la más baja resistencia a la corrosión, pero poseen resistencia al desgaste y dureza. Este tipo de acero adquiere sus propiedades hasta que es templado. Es conveniente realizar un revenido al acero templado, para eliminar esfuerzos almacenados y para incrementar la tenacidad₍₁₎. La alta dureza y la consecuente resistencia al desgaste, determinan las aplicaciones para este acero. Los aceros inoxidable Martensíticos, por su contenido de Cromo, son capaces de ser templados en aceite. Los aceros inoxidable 410, 420 y 440 son los más utilizados, la diferencia que existe entre ellos es el porcentaje de Carbono, siendo así el 410 más bajo y el 440 el de mayor porcentaje.

Propiedades básicas

- ✓ Son templables por tratamiento térmico.
- ✓ Tienen moderada resistencia a la corrosión.
- ✓ Menor soldabilidad.
- ✓ Son magnéticos.

Usos más comunes

- ✓ Hojas para cuchillos.
- ✓ Instrumentos quirúrgicos.
- ✓ Resortes.
- ✓ Ejes.

Grados más comunes

410 Tiene aplicaciones generalizadas en ambientes moderadamente corrosivos.

420 Acero usado en la fabricación de herramientas de corte, instrumentos quirúrgicos, etc.

440 Es el acero más representativo de esta clasificación, de múltiples usos, destinado a la fabricación de hojas de corte en equipos industriales, ejes, turbinas, rodamientos, etc.

1.2.3 LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS.

Los aceros inoxidable Austeníticos son llamados así, puesto que conservan una microestructura Austenítica (fcc γ) a temperatura ambiente. La microestructura Austenítica es dada por la adición de Níquel en la aleación, con esto, podemos decir que los aceros inoxidable Austeníticos son aleaciones *Fierro-Carbono-Cromo-Níquel*, conteniendo porcentajes de 16 a 25% en Cromo, 6 a 22% de Níquel y Carbono en cantidades no mayores a 0.25%_(1,8,12,13). Los aceros inoxidable Austeníticos son de los más producidos, puesto que tienen buena resistencia a la corrosión, son dúctiles y son soldables; estas características los hacen ser muy demandados.

Debido a que estos aceros poseen una microestructura muy estable (Austenítica), no es posible endurecerlos mediante tratamientos térmicos, sin embargo es posible endurecerlos mediante trabajo en frío, cuando la cantidad de Níquel no es muy elevada, obteniendo algo de Martensita₍₁₎. En procesos de soldadura, los aceros inoxidable Austeníticos también están expuestos a la sensitización (formación de carburos) al ser enfriados lentamente, cuando esto ha sucedido, podremos remediar el problema calentando nuevamente la pieza a temperaturas de Austenitización, con objeto de disolver los carburos de Cromo formados y enfriar la pieza rápidamente para que esto no vuelva a ocurrir.

Otra forma de ayudar a evitarlo es seleccionando aceros inoxidables Austeníticos estabilizados, es decir que contienen Titanio o Niobio, que ayudan a estabilizar el Carbono₍₁₎. Ejemplo de aceros inoxidables Austeníticos estabilizados están el 321 y el 323. Cabe señalar que la selección de este tipo de aceros no es solo por su soldabilidad sino también hay que considerar si nuestro acero inoxidable va a ser expuesto a trabajar continuamente entre temperaturas de 450 y 850° C, lo que también contribuye a la sensitización.

Propiedades básicas

- ✓ Excelente resistencia a la corrosión.
- ✓ Excelente soldabilidad, formabilidad y ductilidad.
- ✓ Fácil limpieza y condiciones de higiene.
- ✓ Excelentes propiedades a altas y bajas temperaturas, en aceros estabilizados.
- ✓ Son no magnéticos.

Usos más comunes

- ✓ Equipos para la industria alimenticia.
- ✓ Equipos para la industria química.
- ✓ Aplicaciones en arquitectura.
- ✓ Partes para turbinas de aviones.

Grados más comunes

304 Son de uso generalizado, con buena resistencia a la corrosión para la mayoría de las aplicaciones.

310 Partes para equipos en la fabricación de alimentos.

316 Utilizado donde se requiere mayor resistencia a la corrosión, tales como contenedores de sustancias, tanques de combustible, etc.

321 Contiene Titanio, apto para soldaduras críticas, además de resistir temperaturas de hasta 800°C.

1.2.4 LOS ACEROS INOXIDABLES ENDURECIBLES POR PRECIPITACIÓN.

Presentan buena resistencia a la corrosión y tienen una adecuada ductilidad. Estos aceros son aleaciones Hierro-Carbono-Cromo-Níquel con cantidades de otros elementos, tales como Cobre, Cromo, Manganeso, Silicio, y en ocasiones Aluminio, Molibdeno. El Carbono se encuentra restringido al mínimo (cerca de 0.13%), el Cromo en un rango de 11.5 a 18%, seguidos de Níquel (entre 4 y 10%), los elementos tales como Cobre, Cromo, Manganeso y Silicio se encuentran en cantidades variables y tienen como objeto endurecer al material mediante la dispersión de los mismos, impidiendo de alguna forma el movimiento en el material. Se

clasifican de acuerdo a la microestructura que poseen al momento de ser adquiridos_(1,8,12,13). A continuación se presenta esta clasificación:

Aceros inoxidable endurecibles por precipitación Semiausteníticos

Estos aceros poseen una microestructura desequilibrada de Austenita-Ferrita, siendo mayor la fase Austenítica y por esta razón su nombre, mediante tratamiento térmico o por sometimiento termomecánico se da la oportunidad de precipitar los componentes y al mismo tiempo endurecer por dispersión_(1,12,13). Estos aceros son menos comercializados porque forzosamente para ser endurecidos hay que tratárseles, con un recocido entre 400 y 600 °C es suficiente.

Aceros inoxidable endurecibles por precipitación Martensíticos

Para este tipo de acero no se necesita la aplicación de tratamiento térmico, ya que al adquirirse, posee una microestructura Martensítica lo suficientemente adecuada para manipularse, producto del buen balance en su composición química al momento de realizarse la solución sólida_(1,12,13). Esto los hace ser más demandados y son adquiridos en formas de alambre, barras y planchas para darle un uso inmediato donde se necesitara resistencia tanto a la corrosión como mecánica.

1.3 EFECTO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN LOS ACEROS INOXIDABLES.

Como se sabe, los metales puros poseen por si solos propiedades que los hacen totalmente diferentes entre sí; sin embargo, estas propiedades no son suficientes o no satisfacen por completo nuestras expectativas y preferimos realizar mezclas entre ellos o con otros elementos no metálicos, en cantidades variadas y diversas para formar lo que conocemos como *Aleaciones*.

En los aceros inoxidable, los elementos Hierro, Carbono y Cromo son imprescindibles ya que sin ellos los aceros inoxidable no existirían; sin embargo, con la adición de algunos otros elementos, es posible realizar mejoras en las propiedades de estos aceros, que de por sí solos, tienen un notable desempeño en atmósferas corrosivas. Entre algunas propiedades que se mejoran están: la resistencia a la corrosión, la soldabilidad, la maquinabilidad, entre otras. En la tabla 1-1 se presenta el efecto que tiene cada uno de los elementos más comúnmente utilizados en la fabricación de los aceros inoxidable.

ELEMENTO	EFECTO EN LOS ACEROS INOXIDABLES
Aluminio	El Aluminio es adicionado en cantidades de 0.3 hasta un 14%, en cantidades de 3 % proporciona la formación de una película adicional protectora constituida de Alumina (Al_2O_3). Esta película le otorga resistencia al acero inoxidable cuando va a ser utilizado a altas temperaturas, protegiéndolo contra la denominada "Oxidación en caliente" ⁽²⁾ . Con cantidades cercanas al 14% conseguimos restringir el crecimiento de grano que ocurre al incrementar gradualmente la temperatura, además de disminuir la temperatura para alcanzar la <i>templabilidad</i> . Por último, cabe mencionar que es un excelente desoxidante, por lo que es muy usado en procesos de aceración.
Azufre y Selenio	La adición, ya sea de Azufre o Selenio al acero inoxidable es con el único propósito de mejorar el maquinado del mismo. Estos elementos son adicionados en cantidades discretas pues de lo contrario vuelven frágiles a los aceros.
Carbono	Es fundamental para la fabricación de aceros y fundiciones, en aceros inoxidables se presenta en contenidos semejantes a los aceros al Carbono. El contenido de Carbono debe ser muy controlado, ya que aunque le proporciona al acero resistencia al desgaste, propicia la formación de carburos que dan lugar a la corrosión por picadura.
Cobre	Se considera al Cobre como elemento de aleación, cuando se encuentra en porcentajes mayores al 0.3%. Este es un elemento que en cantidades mayores provoca dificultad en la transformación de fases en caliente y puede ocasionar fisuras por fatiga térmica ⁽²⁾ . Su uso únicamente es adecuado en aceros inoxidables con porcentajes medios de Cromo (como en los aceros inoxidables endurecidos por precipitación o en los Austeníticos), y se adiciona con el propósito de mejorar la resistencia ante soluciones corrosivas y para endurecer en conjunto con otros elementos.

Tabla 1-1. Efecto de los elementos aleantes en los aceros inoxidables.

ELEMENTO	EFECTO EN LOS ACEROS INOXIDABLES
Cromo	<p>El Cromo es el elemento que le da al acero la capacidad de protegerse de los efectos de la corrosión. La cantidad mínima de este elemento en un acero inoxidable es de 12%, llegándolo a encontrar hasta en cantidades de 30%. Ante ciertos ácidos, tales como el ácido clorhídrico esta capa protectora pierde lo que llamamos su pasividad; es decir, empieza a dejar de protegerlo, permitiendo el avance de la corrosión, aunque no de forma total, manifestándose en picaduras y siendo necesario la utilización de Molibdeno. Por último es conveniente <i>mencionar que la resistencia a la corrosión en un acero inoxidable siempre es directamente proporcional al porcentaje de Cromo en la aleación.</i></p>
Fósforo	<p>El Fósforo, generalmente no es adicionado en los aceros inoxidables, y cuando se adicionalmente es en conjunción con el Cobre, ya que entre ambos aumentan la resistencia a la oxidación⁽²⁾. Cuando se encuentra <i>solo, hace frágiles a los aceros inoxidables y las causas de su presencia son que en ocasiones acompaña al mineral de Fierro en el momento de la fundición como una impureza.</i></p>
Manganeso	<p>El Manganeso otorga resistencia mecánica al acero inoxidable, esa resistencia que otorga se debe a que tiende a disolverse en la matriz (fase dominante en la microestructura). Además es de mucha utilidad <i>cuando la aleación presenta cantidades de Azufre no deseado, en estas condiciones, el Manganeso tiende a combinarse con el Azufre formando Sulfuro de Manganeso (MnS), evitándose así la formación de Sulfuro de Fierro (FeS), el cual es dañino porque los hace frágiles⁽²⁾.</i> El Manganeso en ocasiones sustituye al Níquel en los aceros inoxidables Austeníticos, ya que también es buen formador de Austenita; estos tipos de aceros <i>son llamados aceros inoxidables al Manganeso (Serie 200)</i> y encontramos a este elemento en cantidades de 11 al 13%. Finalmente estos últimos aceros se caracterizan por ser difíciles de maquinar.</p>

Tabla 1-1 (continuación)

ELEMENTO	EFEECTO EN LOS ACEROS INOXIDABLES
Molibdeno	<p>Cuando el acero inoxidable va a ser expuesto a soluciones corrosivas tales como el ácido sulfúrico, soluciones cloridas o el agua salina, es conveniente la adición de este elemento₍₂₎. El Molibdeno ayuda de una manera significativa a la pasividad de la capa de óxido de Cromo, evitándose la corrosión por picadura, el buen desempeño a altas temperaturas es otra de sus cualidades.</p>
Niobio y Titanio	<p>La sensitización es un problema común en los aceros inoxidables, este puede ser causado principalmente por la exposición prolongada a altas temperaturas con contenidos altos de Carbono, por no usar aceros estabilizados en un proceso de soldadura y por no haberlos enfriado adecuadamente, etc₍₁₎. La solución a estos problemas es la adición de Niobio o de Titanio, cuando existen presentes estos elementos es común nombrar a estos aceros inoxidables como estabilizados.</p>
Nitrógeno	<p>Es posible mejorar la falta de ductilidad en algunos aceros inoxidables mediante la adición de pequeñas cantidades de Nitrógeno, en combinación con cantidades bajas de Carbono. Los porcentajes de este elemento en aleación son muy bajos siendo generalmente del orden del 0.01-0.4%. Otra cualidad que aportan es facilitar la soldadura.</p>
Silicio	<p>Este elemento es usado principalmente por tres factores, el primero, evita la oxidación en caliente cuando son trabajados a altas temperaturas; segundo, que en cantidades de 0.5 a 1% ayuda a mejorar la resistencia a la corrosión ante ciertos ácidos y; tercero, que en el colado de piezas complicadas, ayuda a dar fluidez a la fundición₍₂₎. En ocasiones suele usarse únicamente como desoxidante ya que es barato.</p>

Tabla 1-1 (continuación)

RESUMEN (CAP. 1)

Un acero es considerado como inoxidable cuando posee Cromo en cantidades de un 12 a 30% como máximo; a estos porcentajes, el Cromo tiene la capacidad de reaccionar con el medio ambiente y proteger al acero mediante una capa fina e impermeable formada por óxido, que a diferencia de los aceros al Carbono, es una película de óxido de Cromo (Cr_2O_3) y no de óxido de Hierro (Fe_2O_3), que dista de tener pasividad, impermeabilidad y consistencia.

Dentro de los aceros inoxidables encontramos 4 tipos, esta clasificación está basada principalmente en la microestructura que poseen o pueden llegar a desarrollar como es el caso de los aceros inoxidables Martensíticos; de entre esta clasificación, los aceros inoxidables Austeníticos son los aceros de mayor demanda pues son manipulables y presentan buena resistencia a la corrosión. Adiciones extras de elementos a los aceros inoxidables presentan mejoras en los mismos, y de igual forma elevan el costo; sin embargo una estimación equilibrada de vida del equipo y un estudio cuidadoso del medio justifican en la mayoría de los casos el uso de aceros inoxidables con ciertas características. De cualquier forma, el Cromo, Carbono, Hierro y en algunas ocasiones el Níquel serán imprescindibles en la obtención de un acero inoxidable.

CAPÍTULO 2

ACEROS INOXIDABLES
DUPLEX.

2.1 DESARROLLO DE LOS ACEROS INOXIDABLES DUPLEX

Los aceros inoxidables **duplex**, Austeno-Ferríticos o Ferrítico-Austeníticos son llamados así porque presentan una microestructura que posee básicamente dos fases, Ferrita y Austenita, de fracciones de volumen aproximadamente equivalentes luego del tratamiento térmico final con enfriamiento rápido_(1,10).

Estos tipos de aceros inoxidables fueron desarrollados durante la década de los 30's en Suecia y Francia, y su producción a nivel comercial prácticamente fue alrededor de los años 50's₍₁₎. En la tabla 2-1 se describe la composición básica de los aceros inoxidables duplex con el año de aparición en el mercado; así como la clasificación otorgada por la norma UNS (Unified Numbering System).

Norma UNS	Composición química y peso %					Año de producción
	C	Cr	Ni	Mo	N	
--	0.07	25.3	4.84	1.5	0.039	1953
329	0.10	26.6	4.76	1.57	0.049	1959
S31500	0.03	18.7	4.77	2.66	0.047	1974
S32304	0.02	22.2	4.8	0.34	0.098	1982
S31803 bajo N ₂	0.02	21.9	5.46	3.03	0.123	1989
S31803 alto N ₂	0.03	22.2	5.72	3.14	0.186	1989
S32750	0.02	24.9	6.95	3.72	0.285	1990

Tabla 2-1. Primeros aceros inoxidables duplex y año de aparición.

Inicialmente, su creación buscaba mejorar la sensitización que aparece en los aceros inoxidables Austeníticos; pues aunque estos últimos soportan la corrosión de forma adecuada, sufren graves deterioros en ambientes severos tales como el agua salina y ácidos de mayor concentración_(1,10). La composición original de los primeros aceros inoxidables duplex fue alrededor de 18 a 25% en Cromo, 4-7% de Níquel, Molibdeno no mayor al 4% y porcentajes muy bajos de Carbono y Nitrógeno.

Los productos iniciales fueron fundiciones y placa. La microestructura de los primeros aceros inoxidables duplex tenían un alto contenido de Ferrita que provocaba bajas propiedades mecánicas. La presencia de Nitrógeno y Molibdeno proporcionan estabilidad estructural, ductilidad, soldabilidad₍₁₎. La tabla 2-2 presenta los aceros inoxidables duplex de mayor demanda, en ella se indica el PREN (Número Equivalente de Resistencia al Picado), el cual entre mayor sea, evidentemente tendrán mayor resistencia ante este tipo de corrosión.

Norma UNS	Composición química y peso %						PREN
	C	Cr	Ni	Mo	N	Otros	
S32304	0.02	21.5-24.5	3.5-5	0.05-0.6	0.05-0.2	Cu 0.05-0.6	25
S31803	0.03	21-23	4.5-5	2.6-3.5	0.08-0.2	-	32-34
S32205	0.02	22-23	5.5-6.5	3.3-5	0.14-0.2	-	34-36
S32520	0.03	24-26	5-5.6	3.5	0.2-0.35	Cu 0.5-3	34-36
S32750	0.02	24-26	6-8	3-5	0.24-0.32	Cu 0.5 máx	40
S32760	0.02	24-26	6-8	3-4	0.2-0.3	-	42

Tabla 2-2. El PREN de algunos aceros inoxidables duplex de mayor demanda.

Durante la década de los 70's, los duplex que se utilizaban aún no eran lo suficientemente resistentes para ser expuestos al agua de mar. El desarrollo de los **superduplex** resuelve esta limitación; el secreto es que contienen no menos de 25% en Cromo y mayores porcentajes de Molibdeno y Nitrógeno⁽¹⁾. En la tabla 2-3 se muestra algunos aceros inoxidables superduplex.

UNS	Marca Comercial	Composición química y peso %					
		C	Cr	Ni	Mo	N	Otros
S31260	DP3 [®]	0.02	25	7	3	0.1	Cu 0.5 W 0.4
S32550	FERRALIUM 255 [®]	0.02	25.5	5.5	3.4	0.2	Si 0.7 Cu 2.0
S38100	ALLOY 381 [®]	0.023	24	6.5	3.9	0.25	Cu 2.5
S31200	UR 47N [®]	0.025	25.5	7	3	0.18	—
S32520	UR 52N [®]	0.03	25-27	7	3	0.18	Cu 1.5
S32760	ZERON 100 [®]	0.022	25	7	3.5	0.25	Cu 0.7
S32522	UR 52N+ [®]	0.02	25	6.5	3.4	0.24	Cu 1.5
S39274	DP3W [®]	0.03	25	7	3	0.3	W 2.0
S39277	DTS 25.7 [®] NWCu	0.03	25	7.5	3.9	0.28	Cu 1.7 W 1.0

Tabla 2-3. Aceros inoxidables superduplex.

Durante la década de los 90's, nuevos aceros inoxidables superduplex fueron incorporados, todos conteniendo 25-27% de Cromo, 3-4% de Molibdeno, 0.1-0.3% de Nitrógeno y algunos con adiciones de Cobre, Silicio y Tungsteno. Actualmente los aceros inoxidables superduplex compiten por su resistencia a la corrosión en agua de mar con respecto a las aleaciones de base Níquel; materiales de un significativo costo mayor y cuyos semielaborados son de obtención restringida en el mercado, como es el caso específico de tubería y accesorios.

El uso de los aceros inoxidables superduplex se ha incrementado notablemente durante los años 90's, y la demanda creciente de ellos se mantiene. Al finalizar ya este siglo, los aceros inoxidables Ferrítico-Austeníticos ya representan el tercero de los tipos de aceros inoxidables consumidos en el mercado. Estos aceros se adaptan perfectamente para ser utilizados en actividades relacionadas a la Industria química, el transporte de sustancias, extracción y manejo de gas y petróleo, y fabricación del papel. Su aceptación es debida a su alta resistencia a la corrosión y a sus buenas propiedades mecánicas. Aunque son aceros con mayor complejidad en su composición y fabricación; la reducción adicional de estos costos se produce por la disminución de espesores.

2.2 COMPOSICIÓN Y MICROESTRUCTURA

Los aceros inoxidables duplex y superduplex tienen composiciones químicas aproximadas de extrabajo Carbono 0.02-0.03%, 25-27% de Cromo, 3-8% Níquel, 3-4% de Molibdeno, 0.1-0.3% de Nitrógeno y algunos con adiciones de Cobre, Silicio y Tungsteno. La fundición para este tipo de aceros se lleva arriba de los 1500°C (aprox.1565°C) y la solidificación empieza a darse a los 1450°C teniéndose dos fases, un sólido recién formado constituido de Ferrita y una fase aún líquida₍₁₎; tal como se puede apreciar en el diagrama de fases Fe-Cr de un acero inoxidable (Fig. 2.1).

Continuándose con el enfriamiento, el líquido remanente se transforma separándose tanto en Ferrita (ya se aumentando la constitución del primer sólido o esparciéndose) así también como de Austenita; concibiéndose de esta forma dos fases: Ferrita distribuida en una matriz Austenítica. Posteriormente a una temperatura aproximada de 1275°C se procede a enfriar rápidamente para “capturar” esta microestructura; obteniéndose el tan mencionado acero duplex₍₁₎. La microestructura obtenida prácticamente posee partes iguales de Ferrita (α) y Austenita (γ), pero no es común encontrar perfectamente balanceada las fases. La velocidad de enfriamiento ejerce una influencia sobre la distribución de la Ferrita en la microestructura y se ha observado que enfriamientos en agua proporcionan el mejor balance₍₁₎.

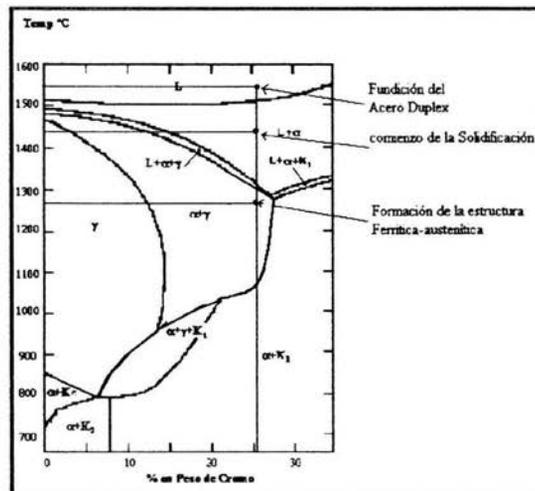


Fig 2.1 Diagrama parcial del Fe-Cr que muestra la obtención del acero inoxidable duplex.

Los aceros inoxidables duplex y superduplex, especialmente estos últimos, presentan mejores valores de resistencia a la tensión y de ruptura que la mayoría de los aceros inoxidables convencionales₍₁₎. El factor principal para que esto ocurra es que poseen un tamaño de grano fino ó medio, según el cuidado en su elaboración y sobretodo a que el tamaño de grano se mantiene al ser trabajado en caliente, la presencia de una segunda fase restringe y estabiliza el tamaño de grano. Un tamaño de grano preferentemente pequeño favorece la resistencia y tenacidad en los metales, y en algunos casos favorece la aparición de superplasticidad al ser trabajados en caliente, como es el caso para estos aceros, pudiéndose diseñar espesores claramente menores con respecto a los aceros inoxidables Austeníticos, implicando una drástica reducción de costos mediante el uso apropiado de factores de seguridad.

2.3 PROPIEDADES MECÁNICAS

Una de las principales características de los aceros inoxidables duplex es su compromiso entre moderada resistencia mecánica y buena resistencia a la corrosión localizada (generalmente exentos de desarrollar corrosión intergranular por picadura como efecto de la sensitización); pues la composición extrabaja de Carbono hace difícil esto₍₁₎.

Una microestructura de grano fino otorga las mejores propiedades mecánicas; en los aceros inoxidables duplex, la resistencia a la tensión aumenta pues para que se de la ruptura, el material cede ampliamente, mostrando buenos valores de ductilidad. La producción de aceros inoxidables duplex en escala comercial no es tan difícil como parece, pues se han obtenido lingotes, barras y placas a partir de una fundición de hasta 13 toneladas; de hecho, las estructuras de grano mas fino fueron conseguidas a escala comercial que en pruebas de pequeños laboratorios. La microestructura que se puede obtener hace posible fabricar piezas complejas mediante rolado, forjado o extruido de manera fácil y sin grandes potencias mecánicas tanto en trabajo en frío como en caliente, en comparación con los Austeníticos. La tabla 2-4 presenta algunos valores de propiedades físicas, químicas y mecánicas asociadas a estos tipos de aceros.

Espécimen	Limite de Fluencia		Resist. la Tensión		Elong. en 2 pg.	Red.de Area
	ksi	MN/m ²	ksi	MN/m ²	(%)	(%)
Redondo d=3/4"	100.2	690.9	114.5	789.5	10-26	57
Barra cuadrangular 3/4"	72	496.5	94.1	648.8	10-25	45
Lamina con e=0.062"	92.4	637.1	113.1	779.8	20	—
Lámina con e=0.02"	91	627.5	112	772.2	22	—

Fatiga observada en redondo d=3/4" = 66% de la resistencia a la tensión
 Modulo dinámico de elasticidad = 30.5×10^6 psi.
 Dureza Rockwell C entre 21 y 25.
 Reducción de espesores con respecto a aceros inox. Austeníticos aprox. 50%.

Densidad aproximada de 7.4 g/cm^3
 Punto de fusión aproximada= 1565°C
 Coeficiente de expansión térmica de 68 a 600°F = 6.5×10^{-6} in/in/ $^\circ\text{F}$
 Resistencia Eléctrica a $68^\circ\text{F}(20^\circ\text{C})$ = 0.015 ohms-ft
 Corrosión = 5-40 mpy

Tabla 2-4. Propiedades típicas asociadas a un acero inoxidable duplex.

La clásica microestructura procedente de un acero inoxidable superduplex se presenta en la figura 2.2, siendo las zonas más claras Ferrita (α), distribuida en una matriz Austenítica (γ), las pequeñas manchas (casi nulas) son algunos carburos dispersos e impurezas.

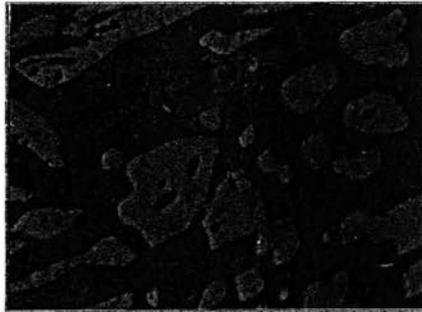


Fig 2.2 Microestructura representativa de un acero inoxidable superduplex.

2.4 APLICACIONES

Los aceros inoxidables duplex y superduplex fueron desarrollados sobretodo para resistir mucho mejor la corrosión; debido a las ventajas presentadas por estos aceros, son utilizados generalmente en lugares donde existen elevadas sollicitaciones de corrosión química y moderadamente mecánicas. Como ejemplo podríamos citamos la extracción y transporte de petróleo, agua y gas natural; así también como en aplicaciones especiales en la construcción de instalaciones químicas, tratamiento de aguas residuales y relacionadas al contacto con agua de mar.

A continuación se presenta un bosquejo más detallado acerca de sus aplicaciones.

INDUSTRIA QUÍMICA

El uso de los aceros inoxidables superduplex en la Industria de procesos químicos se ha expandido rápidamente durante los últimos años. Actualmente, no son solamente usados en medios con cloruros, donde presentan mejor resistencia a la corrosión que los aceros inoxidables Austeníticos, sino en otras muchas diferentes aplicaciones. Los aceros inoxidables duplex y superduplex han demostrado ser más resistentes a la corrosión que muchos materiales de alto costo como Titanio y aleaciones de base Níquel. En plantas de urea, en el sector de síntesis por alta presión, estos tipos de aceros son una excelente alternativa a los grados tradicionales de aceros inoxidables.

INDUSTRIA "OFF SHORE"

Durante los últimos 15 años los aceros inoxidables duplex y superduplex han ganado aceptación creciente en las industrias del gas y el petróleo. Sus propiedades mecánicas y su alta resistencia a la corrosión han promovido dicho uso. En los grandes yacimientos de petróleo y gas, comenzaron a utilizarse masivamente desplazando al Cobre-Níquel y a los aceros inoxidables Austeníticos. Algunas fallas por fatiga debida a

vibraciones en cañerías de bajo espesor para conducción de gas comprimido que se han registrado en plataformas durante la primera mitad de la década de los 90's han sido analizadas y superadas, debido al perfeccionamiento de los procesos de fabricación y especialmente los de soldadura.

INDUSTRIA DEL PAPEL Y CELULOSA

Los aceros inoxidables duplex fueron introducidos en la industria de la pasta celulósica y el papel en 1952, con algunos calentadores fabricados con un grado base de 25% de Cromo, hoy conocido como AISI 329, en una planta de sulfito en Suecia. Durante la década de los 70's, los modernos procesos de producción de duplex a gran escala de bajo Carbono y alto Nitrógeno permitieron la buena soldabilidad que anteriormente no poseían. A los beneficios que la reducción de espesores en las tuberías duplex proporcionan, y a los valores de esfuerzo de fluencia (aproximadamente el doble de los Austeníticos); se suma una uniforme resistencia a la corrosión en soluciones cáusticas calientes, levemente superior a la de AISI 304L y AISI 316L y francamente favorable con respecto a dichos aceros en lo que respecta al picado.

RESUMEN (CAP.2)

La necesidad de desarrollar aceros inoxidables de mayor resistencia a la corrosión hacen posible la aparición de los aceros inoxidables *duplex*; estos aceros constituyen mejoras de los aceros inoxidables Austeníticos. Los aceros inoxidables duplex poseen una microestructura constituida por dos fases en cantidades aproximadamente iguales de Ferrita y Austenita; por esta razón, algunas veces son conocidos como Austeno-Ferríticos o Ferrítico-Austeníticos.

Los aceros inoxidables duplex consiguen mejoras notables debido a la adición de Molibdeno, Nitrógeno y porcentajes extrabajos de Carbono. La producción de aceros inoxidables duplex requiere de cierta técnica consistente en "capturar" la microestructura mediante un enfriamiento, esto se realiza cuando se estima un porcentaje equitativo de las fases; el enfriamiento es generalmente realizado en agua pues se ha visto que se consigue una dispersión más homogénea que con algún otro medio de enfriamiento₍₁₎. Aunque los aceros inoxidables duplex superan a los aceros inoxidables Austeníticos en cuanto a resistencia a la corrosión, el agua salina y soluciones cloridas aún los deterioran, es cuando aparecen los aceros inoxidables *Superduplex*, su secreto, contener porcentajes de Cromo no menores al 25% y mayores cantidades de Molibdeno y Nitrógeno.

CAPÍTULO 3

TRATAMIENTOS
TÉRMICOS.

3.1 GENERALIDADES DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS

El acero es la aleación comercial que más se produce en el mundo, esto se debe a que otorga principalmente resistencia y duración de las piezas que se fabrican con él; sin embargo, no todos los aceros poseen las mismas características, ya que nuestras necesidades son diversas. Por ejemplo, algunas veces se requerirá un acero no tan duro y que resista el impacto como pudiera ser un martillo y en otras ocasiones podríamos necesitar un acero con mayor dureza tal como en una hoja de corte. Mediante los tratamientos térmicos ajustamos las propiedades de los aceros a nuestras necesidades, siendo las propiedades mecánicas más comunes: la dureza, tenacidad y ductilidad. Como su nombre lo dice, los tratamientos térmicos están relacionados con el sometimiento de los aceros adquiridos al calor.

Los tratamientos térmicos son en si un proceso metódico, puesto que para conseguir las propiedades mecánicas deseadas en el acero (si es que es posible), es necesario someterlo a calentamiento y posteriormente a un enfriamiento siguiendo patrones_(14,15). La presencia de elementos aleantes ayudan de manera significativa en el tratamiento térmico, siendo deseable tenerlos.

Los elementos aleantes nos proporcionan principalmente mayor tiempo durante los enfriamientos (modifican la templabilidad), traduciéndose esto en poder obtener casi cualquier propiedad mecánica deseada_(3,7,14); por ejemplo, realizando temple en aceites, y no bruscamente como es lo habitual en aceros convencionales, estos temple a baja velocidad evitan la deformación en piezas delgadas o bien la aparición de grietas. Es por eso, que los aceros de buena calidad, tales como los utilizados en herramientas poseen elementos aleantes; consiguiéndose así fabricar herramientas con buena durabilidad y dureza, aunque algunas veces no sean necesarios los elementos de aleación, la razón de estar o no presentes es como siempre el costo.

El Hierro es un elemento polimórfico, es decir cambia de estructura cristalina (arreglo geométrico de sus átomos) con el calor; al cambiar de estructura, los átomos de Carbono pueden combinarse más fácilmente con los de Hierro de forma intersticial_(7,10), esta facilidad de acomodamiento es diferente según la estructura que se tenga presente siendo la estructura cristalina de mejor acomodamiento la ccc (cúbica de cara centrada), también conocida como fcc (face cubic center), presentada en la fase Austenítica del acero_(3,10,14,15). Los cambios ocurridos en el sistema Hierro-Carbono son los siguientes:

TEMPERATURA	CAMBIO
<p data-bbox="256 279 510 331">Temperatura ambiente hasta 912 °C.</p> <p data-bbox="349 361 416 383">Ferrita</p>  <p data-bbox="296 586 465 609">Carburo de Hierro</p> 	<p data-bbox="534 279 1105 331">Si el acero no ha sido tratado anteriormente presenta 2 fases: Ferrita y Carburo de Hierro.</p> <p data-bbox="534 361 1105 548">Ferrita El ordenamiento de los átomos de Hierro presentan una estructura cristalina tipo bcc, la cual se caracteriza por ser magnética y disolver escasamente 0.025% de Carbono por su geometría_(10,15). Forma lo que conocemos la fase Ferrítica (α) y prácticamente es Hierro puro.</p> <p data-bbox="534 578 1105 765">Carburo de Hierro También conocido como <i>Cementita</i>, contiene 6,67% de C en peso y su fórmula química es $Fe_3C_{(10,15)}$. Es un compuesto típicamente duro y frágil de baja resistencia tensil, pero de alta resistencia compresiva. Es la estructura más dura que aparece en el diagrama. Su estructura cristalina es ortorrómbica.</p>
<p data-bbox="268 770 494 793">De 912 °C a 1394 °C</p> <p data-bbox="330 822 432 845">Austenita</p> 	<p data-bbox="534 770 921 793">El acero presenta la fase Austenítica.</p> <p data-bbox="534 822 1105 1010">Austenita La estructura cristalina del Hierro cambia a una estructura fcc, admitiendo el Carbono contenido por el carburo de Hierro y disolviendo esta misma, llegando a contener hasta un máximo de 2%_(10,15), carece de magnetismo (diamagnética) y forma lo que se llama la fase Austenítica (γ).</p>
<p data-bbox="256 1100 510 1152">De 1394°C hasta temp. de fusión (1538 °C)</p> <p data-bbox="312 1182 453 1204">Hierro sigma</p> 	<p data-bbox="534 1065 1105 1117">Aparece a porcentajes extrabajos de Carbono, por lo que no es de mucho interés_(3,14).</p> <p data-bbox="534 1147 1105 1383">Hierro Sigma La estructura vuelve a ser bcc, conocida como Hierro sigma (δ), vuelve a ser magnética, disuelve Carbono hasta en 0.08%, lo cual nos indica que solo se presenta hasta aceros con estos porcentajes de Carbono_(10,15), sin embargo, prácticamente la mayoría de los aceros contienen porcentajes superiores a esta cantidad por lo solo llegan a presentar Austenita hasta antes la fusión..</p>

Tabla 3-1. Cambios estructurales en el sistema Hierro-Carbono de acuerdo a la temperatura. Los átomos grandes representan Fe mientras los pequeños C.

Los siguientes diagramas son útiles para predecir las fases a través de una combinación de ciclos de enfriamiento y calentamiento.

El diagrama Fe-C muestra las fases presentes en base a un calentamiento y enfriamiento controlado, esta basado en la composición de Carbono en el acero o fundición, y la temperatura a la que es sometido^(3,7,15); en tratamientos térmicos nos es mas útil el diagrama TTT, pues nos muestra las transformaciones generadas por enfriamientos no necesariamente controlados.

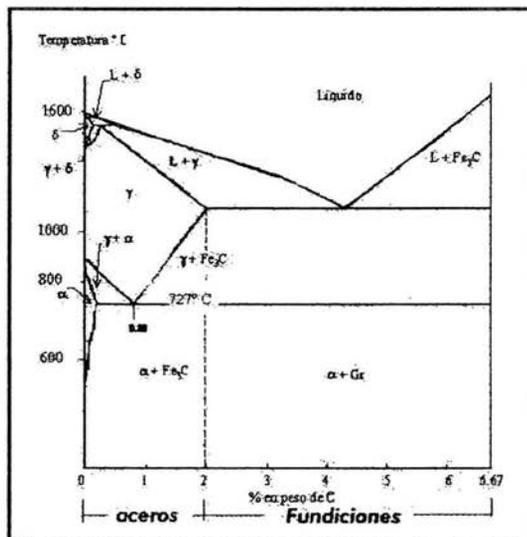


Fig. 3.1 Diagrama Fe-C en el que se muestran las fases del sistema.

El diagrama TTT (Tiempo, Temperatura, Transformación) es una gráfica que identifica la fase o fases obtenidas o que se puede conseguir durante determinado enfriamiento, se basa en el tiempo que dura este último y la temperatura alcanzada por el tratamiento térmico^(3,7,15), por lo tanto es una representación gráfica de 3 variables (tiempo, temperatura y fase obtenida o transformación).

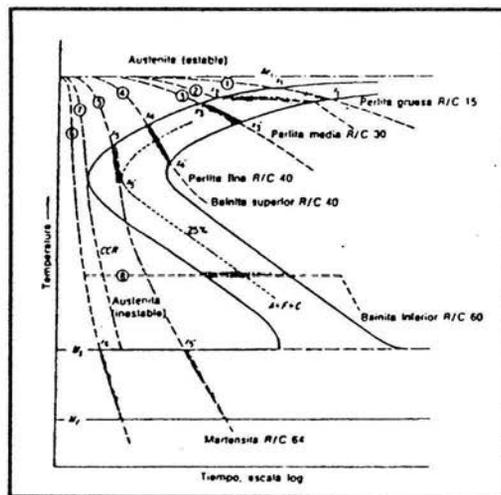


Fig 3.2. Diagrama hipotético TTT para un acero medio Carbono. El achurado corresponde a la transformación.

Los resultados obtenidos de un tratamiento térmico son el producto de la transformación de la Austenita, siendo los productos principales: Martensita, Perlita, Bainita, y Esferoidita, que se presentan de acuerdo al enfriamiento otorgado y a la cantidad de Carbono. En la tabla 3-2 se presentan una descripción de estos productos.

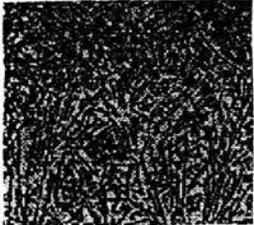
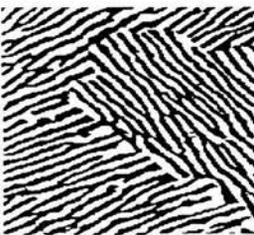
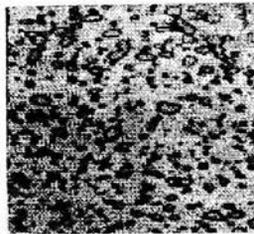
FASE	PROPIEDADES	METALOGRAFIA
Martensita (M)	<p>Posee átomos de Carbono capturados en su interior, producto de un enfriamiento brusco procedente de temperaturas de austenitización. Otorga una dureza espectacular pero resulta ser frágil. Para usos prácticos es necesario revenirla para suprimir algo de dureza por tenacidad y soportar así, impactos sin fracturar al acero.</p>	
Perlita($\alpha + Fe_3C$)	<p>Mezcla de Ferrita y carburo de Hierro en forma de capas alternas, es blanda, y esta presente en todos los aceros que se dejan enfriar lentamente, se presenta en mayor e menor medida según el contenido de Carbono. Se obtendrá 100% Perlita si el acero contiene 0.8% de C.</p>	
Bainita($\alpha + Fe_3C$)	<p>Exactamente parecida a la Perlita, con la diferencia de que la mezcla es mas fina, dando así una mayor dureza que la Perlita, pero no tan elevada como en la Martensita; sin embargo, es el producto ideal en un endurecimiento, pues mantiene propiedades equilibradas de dureza y tenacidad.</p>	
Esferoidita ($\alpha + Fe_3C$)	<p>Al igual que la Perlita y la Bainita, su constitución es parecida, la diferencia estriba en la forma del carburo que tiende a parecerse a una esfera, dando al material una ductilidad mayor, viene siendo una matriz Ferrítica con carburos esféricos dispersos. Es el producto más blando que se puede conseguir y es el ideal al maquinar aceros.</p>	

Tabla 3-2. Productos básicos en los tratamiento térmicos de los aceros.

3.2 TIPOS DE TRATAMIENTOS TERMICOS

Existen básicamente cinco tipos de tratamientos térmicos para los aceros que son los siguientes:

- 1) Recocido
- 2) Templado
- 3) Templado Interrumpido
- 4) Revenido
- 5) Revenido de Austenita

1) RECOCIDO

El recocido es el proceso de dejar enfriar un acero que ha sido producido o ha alcanzado temperaturas no mayores a la Austenitización hasta llegar a temperatura ambiente de forma lenta tal como un enfriamiento al aire_(3,15).

El resultado es la obtención de Ferrita y carburos de Fierro, que se transforman en menor o mayor medida a Perlita según el porcentaje de Carbono presentado. Posteriormente al tratamiento, el acero resulta ser dúctil y de carecer de significativa dureza, con lo cual se facilita el maquinado.

2) TEMPLADO

El temple se realiza con el objeto exclusivo de endurecer al acero, resulta ser el producto de atrapar átomos de Carbono en la estructura del Hierro, a temperatura de Austenitización de manera repentina, la estructura obtenida (una estructura tetragonal) posee una geometría distorsionada con lo cual se evita al máximo el movimiento_(3,15). La fase conseguida es denominada Martensita (M) y una de las formas de obtener esta fase en aceros medio Carbono es mediante un temple brusco en agua. Lo agresivo del proceso provoca distorsiones en piezas delgadas, y en piezas grandes existe una alta posibilidad de desarrollar grietas, complementándolo con otro tratamiento térmico denominado revenido, se consigue obtener aceros duros y con tenacidad moderada.

3) TEMPLADO INTERRUMPIDO O MARTEMPLE

El temple interrumpido es una mezcla de un temple rápido y un recocido. Consiste en temple desde temperaturas de Austenitización hasta para pasar la "rodilla del diagrama" con objeto de evitar la formación de Perlita, la temperatura necesaria para pasar esta parte del diagrama esta aproximadamente a los 260°C en gran parte de los aceros, donde comienza la formación de Martensita, posteriormente se retira y se deja enfriar lentamente_(3,15).

Tanto la superficie como el centro se transforman al mismo tiempo y no existen esfuerzos considerables, evitando de esta forma la aparición de grietas y fracturas. Es aconsejable para piezas de todos tamaños que carecen de elementos aleantes. El producto, al igual que en el temple es Martensita.

4) REVENIDO

El revenido es considerado como un tratamiento complementario al temple, sea este directo o interrumpido; su finalidad es proporcionar algo de tenacidad al metal endurecido a costa de reducir muy poco la dureza original. La Martensita procedente del temple libera algo de Carbono, convirtiéndose en una Martensita incompleta; el resultado es un acero con propiedades balanceadas de dureza y tenacidad ^(3,15).

Este tratamiento consiste en calentar el acero previamente templado a temperaturas medias, no mayores a las aplicadas en el recocido, dejar por espacio de cierto tiempo, y retirar para enfriar al aire. Este tratamiento es necesario ante todo temple efectuado.

5) REVENIDO DE AUSTENITA

Sumamente parecido a la mecánica del Martemple o temple interrumpido, la diferencia radica en que en vez de retirar y dejar enfriar para obtener Martensita, se pasa inmediatamente a un horno previamente calentado y se deja ahí hasta formar Bainita, una vez obtenida se retira y se deja enfriar lentamente al aire_(3,15). La ventaja que tiene el revenido de Austenita es evitar a toda costa cualquier agrietamiento y ahorrar el tratamiento posterior al temple (revenido), la desventaja radica en que para llegar a la transformación de Bainita se requiere de bastante tiempo en horno y debido a esta razón es que a menudo se prefiere no emplearlo.

En la Figura 3.3, se presenta un diagrama TTT en que se explica gráficamente estos tratamientos térmicos descritos.

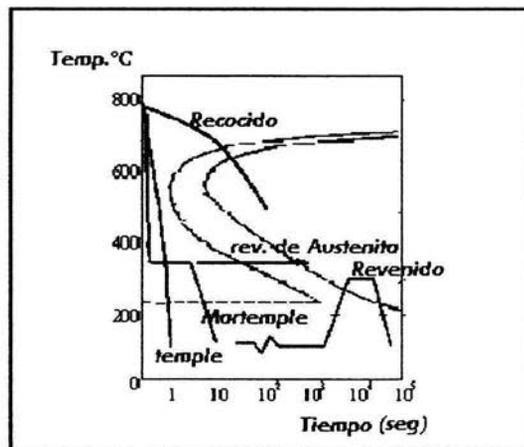


Fig 3.3 Tratamientos térmicos básicos y el diagrama TTT.

3.3 LOS ACEROS INOXIDABLES Y LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS.

La aplicación y efecto de los tratamientos térmicos de los aceros al Carbono no distan de ser diferentes para los aceros inoxidables, salvo que se tiene que evitar a toda costa la precipitación de carburos, que ocasionan serios problemas en los aceros inoxidables, especialmente con porcentajes medios y altos de Carbono_(1,16).

El temple en los aceros inoxidables se realiza con el mismo propósito; sin embargo, los resultados son menores en aceros inoxidables Ferríticos pues el contenido de Carbono es escaso y en los aceros inoxidables Austeníticos se prefiere endurecerlos mediante trabajo en frío pues es igualmente insuficiente el Carbono. Entre los aceros inoxidables, los aceros Martensíticos son los de mayor contenido de Carbono y como su nombre lo indica, son capaces de desarrollar Martensita y por lo tanto son los idóneos para este tratamiento térmico.

Las temperatura para realizar el temple en aceros inoxidables están entre los 950 y 1100 °C y la velocidad de enfriamiento aplicada, no es tan brusca pues pueden ser templados en aceite precalentado, por ejemplo entre 180 y 200°C, con esto, se consigue buena dureza y sobre todo se evita la distorsión y posible aparición de grietas en piezas delgadas₍₁₎.

El acero templado se puede revenir a temperaturas de 550 y 700°C cuando se requiere disminuir la dureza; sin embargo, el enfriamiento no será a temperatura ambiente pues se daría la posibilidad de precipitar carburos, por lo que el enfriamiento se hace en agua₍₁₎. Otra finalidad de revenir los aceros, sea al Carbono o inoxidable, es la capacidad de poder trabajarlos, ya sea para maqunarlos o bien para deformarlos; una vez realizadas estas operaciones se puede volver a templar, para que vuelvan a tener las propiedades mecánicas iniciales.

El sometimiento de aceros inoxidables carentes de elementos estabilizadores (aceros inoxidables con adiciones de Niobio o bien de Titanio) y el uso de aceros con porcentajes altos de Carbono a temperaturas mayores de 400°C por periodos prolongados, los hace propensos a sufrir de sensitización₍₁₎. La sensitización es el empobrecimiento del Cromo en la capa protectora producto de la temperatura. La sensitización propicia el desarrollo de corrosión, que bien si no es en toda la superficie, aparece en forma de picadura ocasionando severos daños, pues con una simple picadura se podría dejar fuera de servicio a los equipos.

RESUMEN (CAP.3)

Los tratamientos térmicos involucran el sometimiento al calor de los aceros, para posteriormente practicarles un enfriamiento siguiendo patrones; la finalidad, modificar sus propiedades mecánicas tales como dureza o tenacidad principalmente, siempre y cuando el contenido de Carbono lo permita. La presencia de elementos aleantes ayuda de manera significativa en los tratamientos térmicos pues da la oportunidad de realizar enfriamientos a velocidades no muy severas, evitando la distorsión en piezas delgadas; es por eso, que son ocupados para la fabricación de herramientas.

Los tratamientos térmicos son posibles en los aceros gracias al polimorfismo del elemento Hierro. Este elemento cambia su estructura cristalina, que no es más que el arreglo en sus átomos cuando la temperatura aumenta, dando el mayor acomodamiento de átomos de Carbono cuando se encuentra presente la fase Austenítica. El diagrama TTT (Tiempo, Temperatura, Transformación), es una gráfica de suma utilidad en los tratamientos térmicos, ya que sirve de guía durante los mismos, esta basada en 3 variables como su nombre lo indica.

CAPÍTULO 4

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA
TENSIÓN.

4.1 EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSION.

El desarrollo de nuevos materiales proporcionan momento a momento nuevas opciones para los Ingenieros de diseño, sin embargo, aunque existen tablas y referencias acerca de las propiedades de la mayoría de estos materiales, algunos de ellos de recién descubrimiento, han sido muy poco estudiados y la información suele ser escasa; es por eso que existen determinadas pruebas estandarizadas, algunas de carácter destructivo, que nos ayudan a conocer las propiedades básicas para un material. Asociaciones de Ingenieros, tales como la AISI (American Iron and Steel Institute), la ASTM (American Society for Testing Materials) y la SAE (Society of Automotive Engineers) han propuesto normas de estandarización para todas las pruebas mecánicas₍₁₆₎. Estas normas son reconocidas a nivel mundial y tienen que ser usadas para poder realizar comparaciones con materiales estudiados.

Las propiedades mecánicas clásicas aplicadas para un material metálico son: la dureza, la resistencia a la tensión, la tenacidad y la resistencia a la torsión; de entre estas, la dureza, y la resistencia a la tensión son las más significativas_(10,11); pues nos proporcionan datos valiosos, mediante estos, se evalúa el material estudiado y se le puede canalizar para aplicarlo de la mejor forma.

Mediante la prueba de dureza, tal como su nombre lo indica, se mide la resistencia opuesta por el material a realizarle una impresión de manera permanente en su superficie; mientras que la prueba de resistencia a la tensión proporciona datos sobre la cantidad de esfuerzo máximo soportado, antes de causarse la ruptura⁽⁴⁾. La fuerza es de carácter tensil y constante. El ensayo de resistencia a la tensión es la prueba mecánica concerniente en el desarrollo de esta tesis; mediante ella, obtendremos datos acerca del comportamiento del acero inoxidable Superduplex tipo FERRALIUM 255[®] y del cual se hablara más adelante; por ahora, nos enfocaremos a conocer más acerca de esta prueba destructiva.

Los ensayos de tensión son realizados en máquinas universales, estas máquinas desarrollan fuerzas de enormes proporciones, siendo común encontrar equipos entre 10 y 30 toneladas de fuerza. Aunque estas magnitudes de fuerza parecen descomunales, son magnitudes características de equipos hidráulicos.

Las muestras de material destinadas al ensayo de tensión son conocidas comúnmente como PROBETAS y generalmente su forma final es realizada en máquinas-herramientas; tales como la fresadora y el torno o bien, pueden ser conseguidas del colado, usando un modelo.

Una vez que se tiene la probeta lista, se marca la longitud calibrada mediante una herramienta de uso común llamada "punzón", el cual deja impreso dos pequeños puntos y los cuales nos servirán de referencia para conocer la variación en la longitud al aplicarse la fuerza; pasado este punto, se procede a sujetar la probeta por ambos extremos en la máquina y se aplica la carga de tensión registrando a cada instante la fuerza aplicada y la variación en la longitud. Los cambios en la longitud son registrados mediante instrumentos conocidos como extensómetros.

4.2 LA DEFORMACIÓN ELÁSTICA Y PLÁSTICA.

Cuando se aplica una fuerza tensil a la probeta, los enlaces existentes entre átomos tienden a extenderse y el material sufre una variación en su longitud, de acuerdo a la forma en que se comporte al retirar la fuerza, podremos catalogar si la deformación existente fue de carácter *elástico* o *plástico*_(12,13). En una **deformación elástica**, los enlaces atómicos deformados vuelven a su forma original y el material no sufre variación de ninguna clase; en cambio, en la **deformación plástica**, los enlaces atómicos no regresan a su posición original y se comienza a formar dislocaciones de tipo lineal (movimiento de filas de átomos con respecto a otras dentro del material), se desplazan y estos efectos son manifestados por una deformación física₍₁₂₎.

Al pasar a la deformación plástica, la probeta experimentara un cambio de longitud y por lo tanto de área, que son expresadas como alargamiento y reducción del área porcentual respectivamente.

Alargamiento porcentual en la fractura

$$L = \frac{(l_f - l_o)}{l_o} \times 100$$

donde: l_o = longitud original
 l_f = longitud final

Reducción porcentual de área (restricción)

$$A = \frac{(A_o - A_f)}{A_o} \times 100$$

donde: A_o = Área original
 A_f = área final

La magnitud de los extremos no afecta de ninguna manera las lecturas, y entre mas grande sean estas superficies se facilita el agarre. La curvatura presentada en la probeta entre la magnitud calibrada y los extremos es con la finalidad de liberar esfuerzos y evitar que la ruptura se realice en esa zona. La figura 4.1 revela la constitución clásica de una probeta para ensayo de tracción.

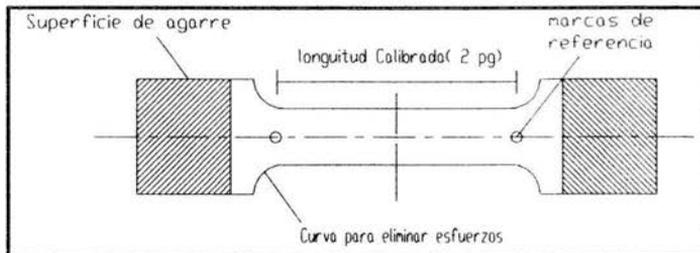


Fig. 4.1 Identificación de secciones en una probeta (americana).

4.3 LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN

La curva esfuerzo-deformación es la gráfica obtenida en un ensayo de tensión. Como su nombre lo indica, es una gráfica producto de 2 variables, claro esta, del esfuerzo aplicado y la deformación obtenida. Esta gráfica es de utilidad pues nos indica en gran parte las características del material, es un indicativo de la calidad, pues los resultados tienen que ver por ejemplo, con los elementos que forman la aleación, defectos ocasionados en la producción del mismo, inclusiones y porosidades, el efecto de algún tratamiento térmico, entre otros⁽¹²⁾. A continuación se presenta una curva esfuerzo-deformación clásica (Figura 4.2), en la cual se han identificado los puntos relevantes de todo ensayo de tracción y de los cuales se tratará más adelante.

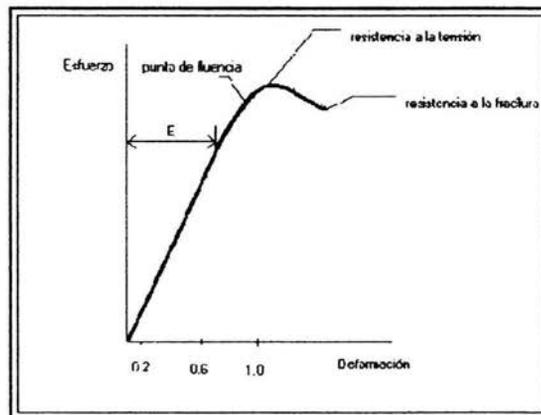


Fig 4.2 Curva esfuerzo-deformación clásica de un acero.

TÉRMINOS USADOS EN LOS ENSAYOS DE TENSIÓN

➤ **Esfuerzo:**

El esfuerzo relaciona la fuerza aplicada y el área que la soporta, la fuerza en este tipo de ensayos es de tipo tensil, es decir es una fuerza que se aplica en sentido del eje de la probeta y va de adentro hacia fuera. El esfuerzo es denotado siempre mediante la letra sigma (σ) y la relación matemática es la siguiente:

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{\text{Carga aplicada}}{\text{Área transversal}} \quad \text{unidades [lbf/in}^2, \text{MN/m}^2\text{]}$$

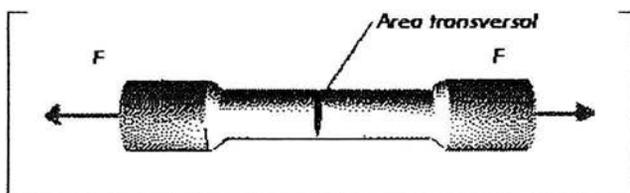


Fig. 4.3 Probeta indicando la acción de la fuerza sobre su área transversal.

➤ **Deformación Unitaria:**

La deformación unitaria es denotada por la letra griega epsilon (ϵ) y es la relación de la variación de la longitud respecto a la original, representa la deformación ocurrida en forma de porcentaje.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\text{Variación de la longitud}}{\text{Longitud original}} \quad \text{unidades [adimensional]}$$

➤ **Módulo de Elasticidad**

Expresa el máximo de esfuerzo soportado por la probeta antes de deformarse plásticamente, por lo tanto, representa el límite elástico y relaciona los términos esfuerzo y deformación unitaria. El módulo de elasticidad se representa por la letra E.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación unitaria}} \quad \text{unidades [lbf/in}^2\text{, MN/m}^2\text{]}$$

En la tabla 4-1 se presentan algunos Módulos de elasticidad de metales y aleaciones de uso común, con esto, nos damos idea de su resistencia mecánica.

<i>Material</i>	<i>Módulo de elasticidad x 10⁶ [lbf/in²]</i>
Aceros en general	30
Aleaciones de Níquel	26 a 30
Aleaciones de Cobre	15 a 18
Aleaciones de Aluminio	10 a 11
Aleaciones de Magnesio	6.5
Fundiciones	15 a 22
Molibdeno	47

Tabla 4-1. Módulos de elasticidad de algunos metales y aleaciones.

➤ **Punto de Fluencia convencional**

Generalmente se estima al 0.2% de deformación plástica, es de vital importancia en el desarrollo de proyectos, ya que por lo regular las piezas no deben exceder esta cantidad de deformación_(12,13).

➤ **Resistencia a la tensión**

Es el dato más relevante del ensayo de tensión e indica el valor máximo de esfuerzo soportado por la probeta antes de fracturarse. Es de fácil localización en la curva esfuerzo-deformación, ya que es el valor de esfuerzo más alto, por lo tanto representa la cima de la curva. El valor de resistencia a la tensión aparece momentos antes de sufrir la reducción repentina de área, conocida como “cuello” en materiales dúctiles.

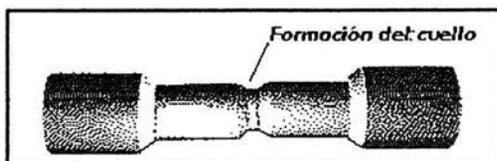
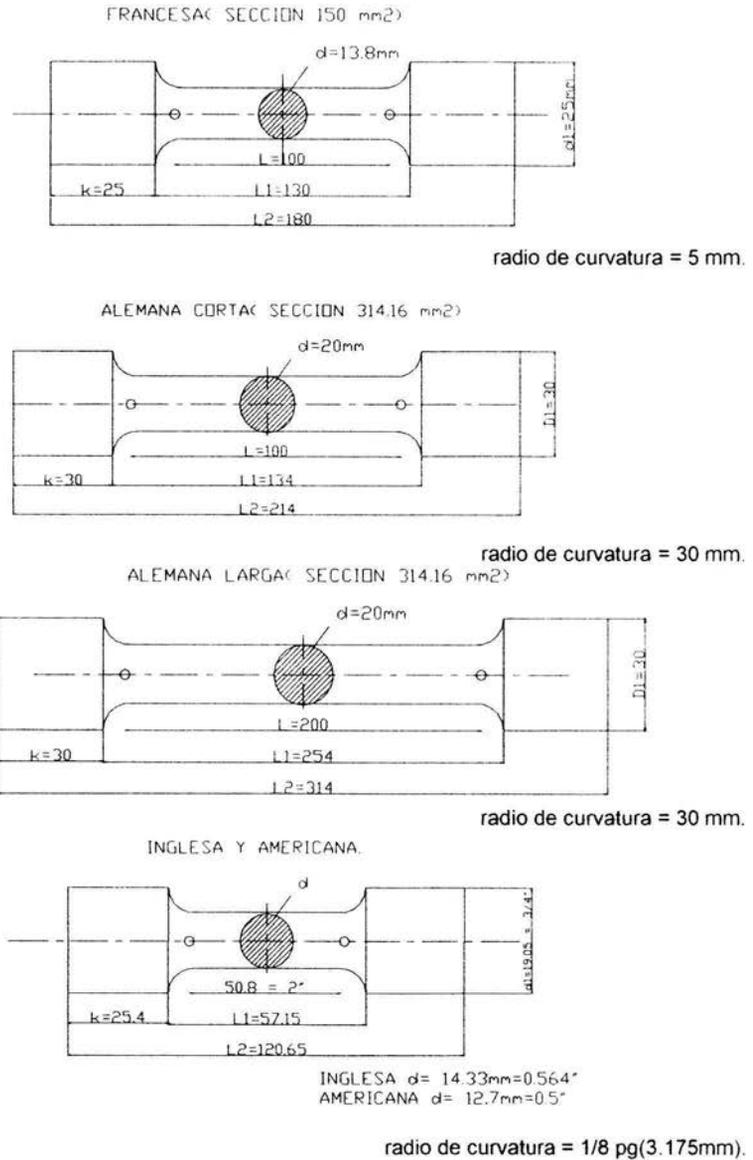


Fig. 4.4 Probeta mostrando la formación del denominado “cuello”.

➤ **Resistencia a la ruptura**

Es el esfuerzo necesario para romper la probeta, aunque se pensaría que fuera el de mayor magnitud no lo es, y es menor o por mucho igual al de resistencia a la tensión₍₁₂₎. La razón es que al momento de aparecer la reducción de área cuando se presenta el esfuerzo de resistencia a la tensión, la sección es más delgada y se necesita menos fuerza para romperla ; en materiales frágiles es muy difícil identificarla.

Estandarización de probetas para ensayos de tensión



NOTA: En la fabricación de probetas planas, utilizar las mismas dimensiones a excepción del espesor, el cual siempre será igual al radio de curvatura.

Fig. 4.5 Diversos tipos de probetas para el ensayo de tensión.

RESUMEN (CAP.4)

El ensayo de resistencia a la tensión es una prueba mecánica de carácter destructivo y tiene por finalidad evaluar al material. Los especímenes fabricados para esta prueba son generalmente terminados en máquinas-herramienta tales como el torno y la fresadora y sus dimensiones están sujetas a estándares. A estos especímenes se les conoce como *probetas* y pueden ser cilíndricas o planas. La selección no afecta los resultados siendo común utilizar probetas cilíndricas por comodidad puesto que es más fácil fabricarlas a costa de usar mayor material; cosa totalmente contraria para probetas planas, en las que la escasez de material o el costo hace viable su selección.

Las probetas son sometidas a fuerzas de tensión en máquinas universales hasta provocar la fractura, las mediciones de fuerza y de longitud son registradas. La gráfica esfuerzo-deformación expresa estos resultados. De todos los datos obtenidos, el valor de esfuerzo de fluencia y el resistencia a la tensión son los más importantes; pues manifiestan la cantidad de esfuerzo necesario para deformar plásticamente en 0.2%, y muestran el máximo esfuerzo soportado por el material antes de ocurrir la fractura respectivamente, por lo tanto son indicadores de la calidad en el material.

CAPÍTULO 5

METALOGRAFÍA.

5.1 LA METALOGRAFIA

La metalografía es una serie de técnicas enfocadas al estudio interno de los metales y aleaciones, con objeto de dar a conocer básicamente el tipo de fases, la composición porcentual de las mismas en la microestructura del material y en algunas ocasiones dar a conocer el tamaño de grano⁽⁷⁾. El estudio metalográfico sirve como fundamento para explicar las propiedades mecánicas presentadas en los materiales. El conocimiento de las fases se realiza mediante un microscopio metalográfico, el cual no dista de ser muy diferente al de laboratorio, salvo que la iluminación producto de una fuente puntual es reflejada e incide perpendicularmente sobre la muestra; cosa totalmente opuesta en el microscopio clásico, en el que la luz proviene desde abajo y atraviesa el objeto de estudio que generalmente es translucido. En la Figura 5.1 se hace la comparación entre un microscopio de laboratorio y un metalográfico.

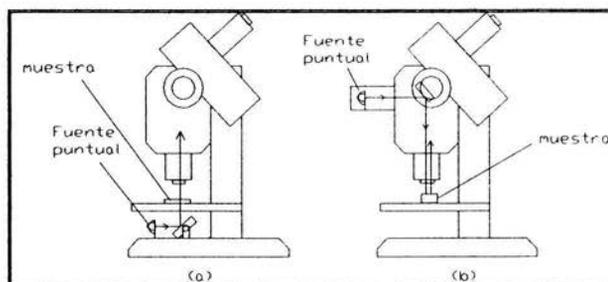


Fig. 5.1 (a) Microscopio de Laboratorio, (b) Microscopio Metalúrgico.

Las muestras de metal deben ser pulidas y deben proporcionar una superficie uniforme para la correcta reflexión del haz de luz; de otro modo, no toda la luz reflejada llegara al ocular y se presentara una imagen incompleta. La evaluación porcentual de las fases a menudo se lleva a cabo por la cuantificación de pequeñas áreas que son trazadas de la imagen tomada bajo el microscopio. Una práctica no alejada en la metalografía es el conocimiento del tipo de estructura cristalina presente en la fase. Las estructuras cristalinas o arreglos de los átomos, son conocidas bajo la aplicación de rayos X y de acuerdo a la difracción de los mismos, se precisa el tipo de estructura₍₇₎. Fases comunes en los aceros han sido estudiadas ampliamente y por lo tanto se conocen sus estructuras cristalinas. El estudio mediante rayos X es usado solo cuando se conoce muy poco acerca de alguna fase₍₄₎.

5.2 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Los metales a estudiar o también conocidos como muestras, deberán ser obtenidas mediante corte mecánico y de igual forma deberá controlarse la temperatura durante el corte para evitar el sobrecalentamiento mediante líquido refrigerante y usando velocidades de corte media; la razón, se puede dar lugar a desarrollar cambios microestructurales con la temperatura, aportando datos falsos₍₁₁₎.

Para muestras, los espesores aconsejables están entre los 5 y 10 mm. Sin embargo, no siempre es posible tener estas dimensiones de muestras, ya que algunas veces hay que realizar estudios por ejemplo de alguna sección de un equipo y por lo tanto la magnitud de la probeta será seleccionada a criterio propio; y suponiendo el estudio con materiales extremadamente delgados tal como los alambres, se utilizarán montajes especiales para trabajarlos correctamente.

En metales y aleaciones forjadas, es decir que han sufrido trabajo mecánico tales como el laminado y el extruido; es necesario tomar muestras tanto de las secciones transversales como longitudinales, ya que en estos casos, las propiedades varían con la dirección. Para fundiciones, basta con tomar muestras en cualquier dirección pues sus propiedades son isotrópicas⁽⁷⁾. Las muestras serán sometidas a un rectificado si es necesario, cuidando siempre el sobrecalentamiento superficial. Pasado este punto, entonces se procede a desbastar usando papeles de lija cada vez más finos; recuérdese que entre más grande es el número de papel lija, es más fino el grano abrasivo, así una lija # 100 tiene partículas de mayor tamaño que una lija # 1000.

Para el proceso de desbaste se coloca el material abrasivo sobre una superficie totalmente lisa y firme; por ejemplo un cristal o una mesa, el cual tiene por objetivo servir de referencia para la obtención de la cara plana, o superficie de estudio. Actualmente es común encontrar “máquinas pulidoras” para realizar este trabajo, que disminuyen sustancialmente el tiempo.

En la Figura 5.2 se presenta un esquema básico de una máquina de desbaste y pulido.

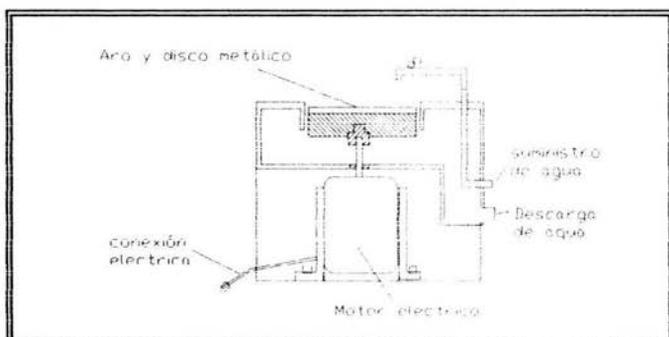


Fig 5.2. Partes de una máquina pulidora.

Cada vez que se cambie a un papel lija de grado más fino, se lavara la muestra al chorro de agua con objeto de eliminar cualquier partícula y evitar rayar la superficie al trabajar con el siguiente papel. En cada cambio, se rota 90° la dirección en el lijado para formar un ángulo recto en relación a la serie de rayas anteriores y las cuales serán reemplazadas por un sistema de rayas más finas. El objetivo del desbaste es eliminar la capa de metal distorsionado y deslizado producido durante el corte y el cual puede ocultar

grietas y porosidades de la microestructura₍₄₎. Una vez pasada la muestra por la lija de número más fino, se procede al pulido; para ello hay que lavar perfectamente con agua y presionar firmemente la muestra contra un disco cubierto con un paño adecuado, impregnado de polvo para pulir. En la máquina pulidora basta con sustituir el papel lija por el paño.

El tejido del disco o paño esta hecho de "Selvit" o bien de gamuza, este material es muy satisfactorio para pulir metales y en combinación con Alumina u óxido de Aluminio (Al_3O_2) y agua, las superficies de las muestras quedan con acabado espejo listas para la metalografía microscópica. Es importante destacar que durante el pulido es indispensable mantener la muestra húmeda, ya que si la Alumina llega a secarse, se incrusta está en las porosidades y no llega a eliminarse en el pulido posterior.

5.3 ATAQUE QUÍMICO DE LAS MUESTRAS

Antes de examinar la muestra bajo el microscopio es necesario realizar el ataque químico de la misma, para revelar la microestructura presente; pues de lo contrario no podrá apreciarse. El ataque químico acaba con residuos de metal deslizado que llegaran a existir y los cuales ocultan detalles, además el ataque cambia en algunas ocasiones la tonalidad de ciertas fases, facilitando la distinción_(7,10).

La velocidad del ataque, es decir el tiempo que permanece la superficie de la muestra en contacto con el químico, varia de acuerdo a la composición del material. Cuando se sabe que el material esta compuesto por más de dos fases, se requieren tiempos menores puesto que debe haber un material más electropositivo con respecto a otro, y la corrosión será mayor. Generalmente el ataque no va más allá del minuto^(5,7).

Las soluciones alcohólicas atacan con más uniformidad y es menos frecuente que produzcan manchas y oxidaciones en aceros al Carbono. Una solución alcohólica comúnmente utilizada es el "Nital", formada por 5% de ácido nítrico en alcohol. Para aceros inoxidable se necesita una solución mucho más agresiva, la solución apta para esta tarea está constituida por 10 gramos de ácido oxálico preferentemente en polvo, el cual será diluido en 100 mililitros de agua destilada, aplicando 6 a 12 Volts al material bajo la solución para acelerar el proceso⁽⁷⁾.

Una vez atacada correctamente la muestra, se lavara perfectamente en agua para evitar que está siga atacando, y posteriormente se seca mediante una ráfaga de aire caliente.

5.4 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

La iluminación es de vital importancia, por lo tanto hay que controlar la intensidad para obtener los mejores resultados. La magnificación o resolución es producto del trabajo en conjunto del ocular y el objetivo⁽⁴⁾, resoluciones comunes en metalografía son 100X, 400X y 1000X. El signo X, como es de esperarse indica el término aumentos.

Las imágenes obtenidas del microscopio son capturadas mediante una cámara fotográfica de 35 mm, que se coloca en el ocular con ayuda de un aditamento semejante a un tubo y el cual acopla el ocular del microscopio con el objetivo de la cámara. En la figura 5.3 se muestra esta mecánica.

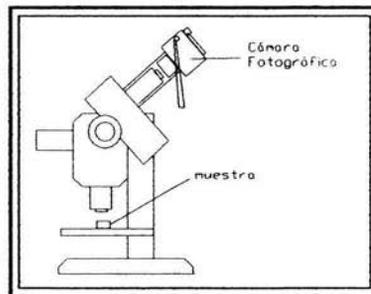


Fig.5.3 Toma de imágenes en el microscopio metalográfico.

TAMAÑO DE GRANO

Para la medición del tamaño de grano se usa el método comparativo propuesto por la ASTM_(6,7,8). Para realizar esta estimación se utilizan una serie de tarjetas que muestran imágenes de distintos tamaños de granos identificadas por un número, estas imágenes están tomadas a 100x (Tabla 5-2). El resultado se obtiene mediante una comparación de nuestras imágenes o metalografías tomadas a 100x con la serie de tarjetas.

Para metales y aleaciones constituidas por una fase, el tamaño de grano estará basado por un sólo número; en caso de presentarse dos o más fases, tendrá que especificarse el tamaño de grano de cada una₍₄₎. En la tabla 5-1 se muestra el tamaño de grano ASTM e información adicional como es el número de granos por unidad de área y por volumen.

Número de grano ASTM	Granos por mm ² en 1X (N _A)	D nominal (mm)	Área promedio de la sección(mm ²)	Núm aprox. de Granos por mm ³
00	3.88	0.51	0.258	6.11
0	7.75	0.36	0.129	17.3
1	15.5	0.25	0.0645	48.8
2	31	0.18	0.0323	138
3	62	0.125	0.0161	391
4	124	0.090	0.01	1105
5	248	0.065	0.0049	3126
6	496	0.045	0.0025	8842
7	992	0.032	0.00123	25,010
8	1980	0.022	0.000504	70,700
9	3970	0.016	0.000252	200,000
10	7940	0.011	0.000126	566,000

Tabla 5-1. Tamaño de grano ASTM.

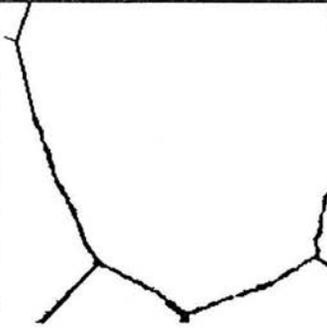
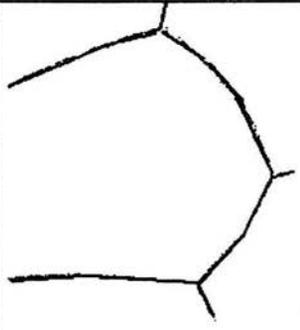
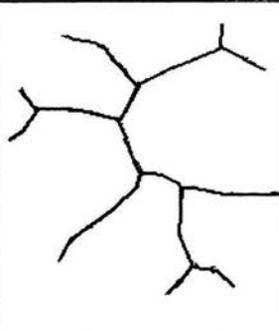
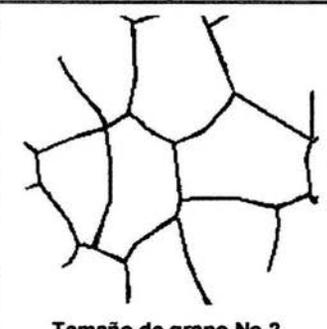
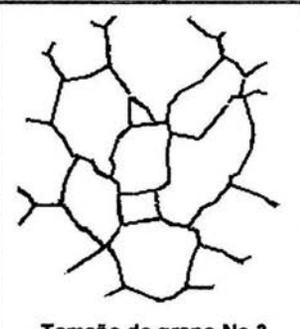
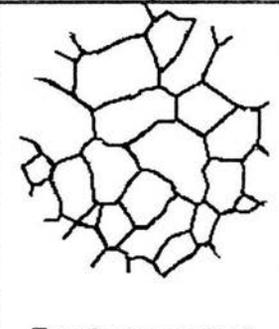
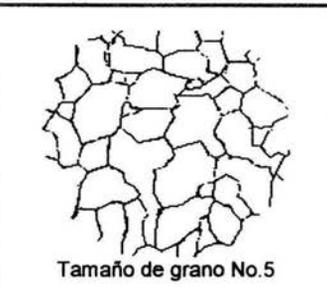
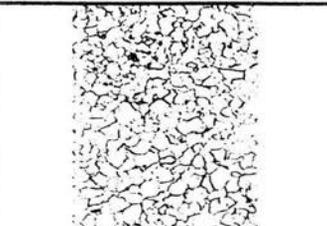
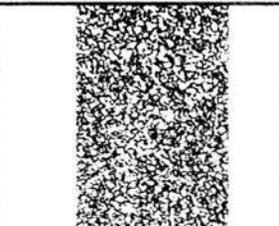
 <p>Tamaño de grano No.00</p>	 <p>Tamaño de grano No.0</p>	 <p>Tamaño de grano No.1</p>
 <p>Tamaño de grano No.2</p>	 <p>Tamaño de grano No.3</p>	 <p>Tamaño de grano No.4</p>
 <p>Tamaño de grano No.5</p>	 <p>Tamaño de grano No.6</p>	 <p>Tamaño de grano No.7</p>
 <p>Tamaño de grano No.8</p>	 <p>Tamaño de grano No.9</p>	 <p>Tamaño de grano No.10</p>

Tabla 5-2 Tarjetas comparativas para tamaños de grano ASTM.

RESUMEN (CAP.5)

La metalografía es una técnica auxiliar en el estudio de los metales y aleaciones; por medio de ella se da a conocer las fases presentes, la composición porcentual de las mismas y el tamaño de grano. Las secciones de material a ser estudiado son denominadas "Muestras" y son conseguidas mediante corte mecánico cuidando el sobrecalentamiento. Las muestras son desbastadas para remover excedentes del corte y después son pulidas con calidad espejo, con objeto de reflejar perfectamente la luz incidente del microscopio y poder observar la microestructura, recordemos que los metales son cuerpos opacos.

Cuando los metales o aleaciones provienen de fundición, basta con tomar muestras en cualquier dirección pues sus propiedades son iguales en todas direcciones (isotrópicas); sin embargo, cuando han sido forjadas, por ejemplo que han sufrido un laminado o un extruido, se deberá obtener cortes de diversas secciones. El conocimiento de las fases presentes es posible por identificación visual tales como color y forma que toman, la evaluación porcentual se conoce por cuantificación de pequeñas secciones trazadas en las imágenes tomadas y el tamaño de grano generalmente se calcula por comparación con una serie de imágenes de grano ASTM.

CAPÍTULO 6

PARTE EXPERIMENTAL.

PARTE EXPERIMENTAL

6.1 OBJETIVO.

Identificar la temperatura de recocido que más afecta al acero inoxidable Superduplex tipo FERRALIUM 255[®] con respecto a la prueba destructiva de ensayo de resistencia a la tensión; así como cuantificar metalográficamente el cambio de fases presentes y explicar dicho comportamiento.

6.2 PROPIEDADES DEL FERRALIUM 255[®].

ESPECIFICACIONES

Ferralium 255[®] es un acero inoxidable clasificado como Superduplex y puede ser fabricado como:

- Forjado (wrought)

Conocido por la ASTM como A890 7A y sin clasificación por la UNS.

- Fundición (cast)

Conocido por AISI como Ferralium 255[®] y por la UNS como S32550.

ALEACIÓN	ESPECIFICACIONES DE FORJADO		ESPECIFICACIONES DE FUNDICIÓN	
	ASTM	UNS	AISI	UNS
Ferralium 255 [®]	A890 7A	---	Ferralium 255 [®]	S32550

Tabla 6-1. Especificaciones del Ferralium 255[®].

Esta aleación es fabricada principalmente en Estados Unidos, lugar de donde procede; la patente es propiedad de Aleaciones LANGLEY pero también encontramos a fundidoras de prestigiado nombre como MEIGHS LTD y CREUSOT-LOIRE INDUSTRIE que fabrican esta aleación bajo permiso.

COMPOSICIÓN QUÍMICA

En la Tabla 6-2 se presenta la composición química de este acero inoxidable Superduplex.

Aleación	Composición Química en peso (%)						
	C	Cr	Ni	Mo	Cu	Si	N
Ferrallium 255®	0.02	25.5	5.5	3.4	2	0.7	0.2

Tabla 6-2. Composición química del Ferrallium 255®.

PROPIEDADES GENERALES

Propiedades físicas, químicas, eléctricas, y térmicas mostradas por la aleación a 21°C.

Densidad (g/cm ³ .)	7.81
Punto de fusión (°C)	1568.5
Resistividad Eléctrica (microhm-cm)	506
Permeabilidad Magnética	3.5
Coefficiente de expansión térmica lineal (De 21°C a 315°C) (mm/mm°C)	0.001702
Corrosión(mpy)	5-40
Conductividad térmica(W/m °C)	14

Tabla 6-3 Diversas propiedades mostradas por el Ferrallium 255®.

Resistencia a la Tensión(ksi)	174
Fatiga(ksi)	114
Limite de Fluencia(ksi)	94
Módulo de Elasticidad (psi)	30.5×10^6
Elongación en 2 in(%)	10-30
Dureza(Rc)	21-27

Tabla 6-4 Propiedades mecánicas del Ferralium 255®.

MAQUINABILIDAD

Ferralium 255® es maquinado satisfactoriamente bajo cualquier método convencional, tales como operaciones de corte, fresado y torneado; bajas velocidades de corte y poca profundidad dan los mejores resultados.

SOLDABILIDAD

Es exitosamente soldado mediante métodos convencionales usados en aceros inoxidable; por ejemplo soldadura TIG, MIG, y electrodo recubierto₍₁₎. Los mejores resultados son cuando el material a soldar y el material de aporte presentan similitud en las composiciones en relación al Cromo, de preferencia 1 ó 2% mayor al material base. Se sugiere evitar a toda costa el precalentamiento de la zona, para no dar oportunidad a la formación de carburos; así mismo, evitar tener períodos largos en el proceso de soldadura y finalizada la operación, enfriar rápidamente.

MANIPULACIÓN MECÁNICA Y ENDURECIMIENTO

Buenos resultados al ser trabajado en frío; mediante este, es posible obtener algo de endurecimiento pues sus bajos contenidos en Carbono no la hacen posible mediante tratamiento térmico, consiguiendo durezas mayores en comparación con los aceros inoxidable Austeníticos. Para el caso de trabajo en caliente, los resultados son excelentes, pues la microestructura formada por dos fases, Ferrita y Austenita, a temperaturas cercanas a la fusión hacen posible la superplasticidad, disminuyendo así los espesores en la fabricación de equipos.

La tabla 6-5 muestra algunos beneficios y aplicaciones que se le dan a esta aleación.

BENEFICIOS	APLICACIONES
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Buena Resistencia Mecánica. ✓ Alta resistencia a la corrosión. ✓ Alta resistencia a la corrosión por picado, causada principalmente por soluciones cloridas y al agua de mar. ✓ Alta conductibilidad térmica. ✓ Bajo coeficiente de Expansión térmica. ✓ Buena manipulación mecánica tanto en frío como en caliente . 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Intercambiadores de calor, tuberías y accesorios para la producción y manejo de gas y petróleo. ✓ Intercambiadores de calor en plantas de desalinización ✓ Componentes mecánicos y estructurales de plataformas petroleras. ✓ Equipos y accesorios para procesos industriales donde se manejan soluciones cloridas, tales como el ácido clorhídrico. ✓ Fabricación de rotores para turbina, ventiladores donde la presión y la resistencia a la corrosión juegan un papel importante. ✓ Fabricación de Bombas hidráulicas, partes de barco expuestas continuamente al agua de mar. ✓ Equipos para el manejo de ácido fosfórico, tales como la industria del papel. ✓ Consumibles, tales como electrodos para la soldadura de equipos inoxidables.
<p>ADVERTENCIAS Se aconseja no usar al Ferralium 255® por encima de los 260° C.</p>	

Tabla 6-5 Beneficios y aplicaciones asociadas al Ferralium 255®

6.3 METODOLOGÍA

A partir de un lingote trapezoidal de Ferralium 255[®], de base mayor 5, base menor 3, altura 12 y espesor 20 cm, se obtuvieron 6 secciones, las cuales fueron cortadas mediante sierra de disco, evitando el sobrecalentamiento durante toda la operación. Posteriormente se maquinaron con objeto de conseguir probetas planas para el ensayo de tensión; las probetas terminadas se ajustaron al estándar de probetas planas americanas y tuvieron las siguientes dimensiones:

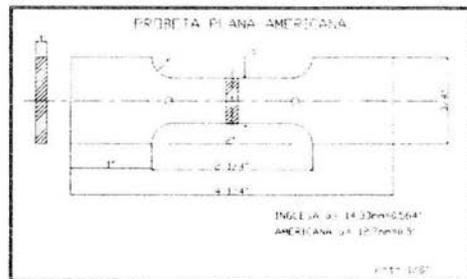


Fig 6.1 Estándar de probetas planas americanas.

Una vez obtenidas las probetas, fueron sometidas a las siguientes temperaturas de recocido mostradas en la tabla 6-6.

Probeta No.	Temperatura(°C)
1	Ninguna
2	400
3	500
4	600
5	700
6	800

Tabla 6-6 Temperaturas del tratamiento térmico propuesto.

El tratamiento térmico de recocido fue aplicado por espacio de 5 horas, a excepción de la primera probeta pues se dejó intacto el material para poder realizar una comparación posteriormente. Pasado este punto, todas las probetas se ensayaron en una máquina universal, donde fueron sometidas a la prueba destructiva de tensión; a partir de estos datos se obtuvo información muy importante, tal como el esfuerzo de fluencia, la resistencia a la tensión y la máxima elongación.

Finalizado el ensayo de resistencia a la tensión, se procedió a cortar pequeñas muestras de cada una de las probetas para la realización del estudio metalográfico. Estas muestras fueron desbastadas y pulidas hasta calidad espejo; la información e imágenes arrojadas por este estudio se presentan más adelante.

Para toda la investigación, se utilizó el siguiente equipo:

- Cortadora de disco.
- Rectificadora.
- Máquina desbastadora y pulidora.
- Mufla con temperatura máxima de 1200°C.
- Microscopio metalográfico.
- Cámara fotográfica de 35 mm.
- Otros: Alumina (Al_2O_3), lijas de diversos números.

6.4 PLANTEAMIENTO DE EXPERIMENTOS

El tratamiento térmico de recocido se utiliza generalmente para ablandar a los aceros o para eliminar esfuerzos cuando es aplicado correctamente; sin embargo, este tratamiento a una temperatura y permanencia excesiva provocan estragos, afectando la microestructura y reflejándose en las capacidades mecánicas del acero_(12,13). En base a esto, se planea exponer al Ferralium 255[®] a un recocido excesivo a diversas temperaturas y registrar su comportamiento.

El tipo de tratamiento térmico y la duración seleccionada tienen como fundamento que son tratos que comúnmente sufren los aceros en la industria, pues por ejemplo, con ellos se fabrican contenedores que calientan sustancias a temperaturas semejantes a las de la tabla 6-6, se dejan por tiempos prolongados y posteriormente se les retira del calor para dejar enfriarlos lentamente al ambiente.

Mediante el trato expuesto, se pretende encontrar una temperatura de recocido crítica de entre las seleccionadas, aspectos que serán corroborados tanto por el ensayo de resistencia a la tensión como por el estudio metalográfico. Si bien, la formación de carburos no fuera excesiva, podríamos atribuir los resultados a un posible desequilibrio de fases.

6.5 RECOPIACIÓN DE RESULTADOS

Resultados obtenidos del ensayo de Resistencia a la tensión.

Probeta Original

Carga (KN)	Esfuerzo (Mpa)	Incre. Long. (mm)	Deformación (mm/mm)
0	0	0	0
2	49.6007	0.3302	0.0065
4	99.2014	0.6248	0.0123
6	148.8021	0.9702	0.0191
8	198.4028	1.2344	0.0243
10	248.0035	1.529	0.0301
12	297.6042	1.8643	0.0367
14	347.2049	2.164	0.0426
16	396.8057	2.4739	0.0487
18	446.4064	2.9108	0.0573
20	496.0071	3.1038	0.0611
22	545.6078	3.429	0.0675
24	577.04	3.49	0.0688
24	595.2085	4.2367	0.0834
26	644.8092	5.3441	0.1052
28.9	692.25	6.01	0.1184
28.1	672.17	6.05	0.1191

Probeta 400°C

Carga (KN)	Esfuerzo (Mpa)	Incre. Long (mm)	Deformación (mm/mm)
0	0	0	0
2	49.6007	0.32	0.0065
4	99.2014	0.6451	0.0123
6	148.8021	1.0007	0.0191
8	198.4028	1.3716	0.0243
10	248.0035	1.6611	0.0301
12	297.6042	1.9354	0.0367
14	347.2049	2.2098	0.0426
16	396.8057	2.6416	0.0487
18	446.4064	3.0734	0.0573
20	496.0071	3.2512	0.0611
21.05	504.46	3.26	0.0642
22	545.6078	4.13	0.0675
24	595.2085	6.289	0.0834
26	644.8092	5.3441	0.1052
28.46	692.08	6.34	0.1248

Probeta 500°C

Carga (KN)	Esfuerzo (Mpa)	Incre Long (mm)	Deformación (mm/mm)
0	0	0	0
2	49.6007	0.2844	0.0056
4	99.2014	0.4673	0.0092
6	148.8021	0.8686	0.0171
8	198.4028	1.1887	0.0234
10	248.0035	1.4782	0.0291
12	297.6042	1.5392	0.0303
14	347.2049	2.1183	0.0417
16	396.8057	2.4333	0.0479
18	446.4064	2.4536	0.0483
20	496.0071	2.8244	0.0556
21.02	506.83	2.9006	0.0571
22	545.6078	3.9319	0.0774
24	595.2085	5.7404	0.113
25.56	634.12	7.112	0.14
25.73	638.33	7.62	0.15
25.76	638.89	8.636	0.17
27.96	669.98	9.49	0.1868
24.7	692.08	11.16	0.2194

Probeta 600°C

Carga (KN)	Esfuerzo (Mpa)	Incre. Long. (mm)	Deformación (mm/mm)
0	0	0	0
2	49.6007	0.2692	0.0053
4	99.2014	0.5588	0.011
6	148.8021	1.036	0.0204
8	198.4028	1.4732	0.029
10	248.0035	1.7424	0.0343
12	297.6042	2.1539	0.0424
14.82	355.21	2.53	0.0498
14	347.2049	2.6771	0.0527
16	396.8057	3.7795	0.0744
18	446.4064	6.223	0.1225
20	452.33	7.1112	0.14
19.26	461.6	7.79	0.1533
16.08	385.31	9.12	0.1796

Probeta 700°C

Carga (KN)	Esfuerzo (Mpa)	Incre. Long (mm)	Deformación (mm/mm)
0	0	0	0
2	49.6007	0.4013	0.0079
4	99.2014	0.9296	0.0183
6	148.8021	1.5087	0.0297
8	198.4028	1.8288	0.036
10	248.0035	2.2352	0.044
12	297.6042	2.7482	0.0541
13.71	328.52	3.02	0.0594
14	347.2049	3.7185	0.0732
16	396.8057	4.5821	0.0902
18	446.4064	6.9596	0.137
19.15	458.91	8.18	0.1611
18.61	446.13	8.59	0.1692

Probeta 800°C

Carga (KN)	Esfuerzo (Mpa)	Incre. Long (mm)	Deformación (mm/mm)
0	0	0	0
2	49.6007	0.3403	0.0067
4	99.2014	0.6197	0.0122
6	148.8021	0.9652	0.019
8	198.4028	1.2192	0.024
10	248.0035	1.529	0.0301
10.81	259.13	1.5443	0.0304
12	297.6042	1.9354	0.0381
14	347.2049	2.9565	0.0582
15.08	361.54	3.1038	0.0611

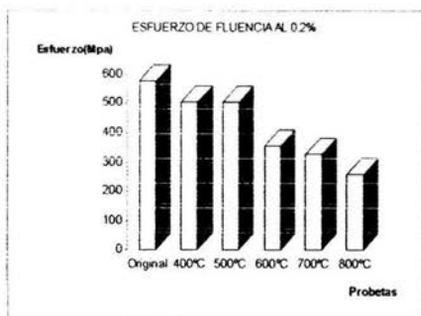


Fig. 6.2 Esfuerzo de Fluencia al 0.2%.

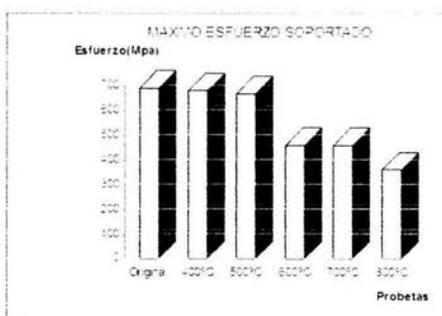


Fig. 6.3 Resistencia a la tensión.

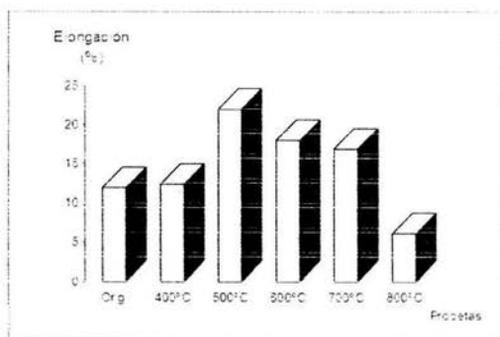


Fig. 6.4 Ductilidad presentada.

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN

PROBETA	<i>0.2% de Deformación plástica</i>				<i>Resistencia a la tensión</i>				<i>Ruptura</i>			
	Distancia obtenida (mm)	Carga aplicada (KN)	Esfuerzo registrado (Mpa)	Reduc.del área (%)	Distancia obtenida (mm)	Carga aplicada (KN)	Esfuerzo registrado (Mpa)	Reduc.del área (%)	Distancia obtenida (mm)	Carga aplicada (KN)	Esfuerzo registrado (Mpa)	Reduc.del área (%)
Original	3.49	23.98	577.04	6.88	6.01	28.89	692.25	11.84	6.05	28.05	672.17	11.91
400°C	3.26	21.05	504.46	6.42	6.34	28.46	682.08	12.48	6.34	28.46	682.08	12.48
500°C	2.9	21.02	503.83	5.71	9.49	27.96	669.98	18.68	11.15	24.7	592.08	21.94
600°C	2.53	14.82	355.21	4.98	7.79	19.26	461.6	15.33	9.12	16.08	385.31	17.96
700°C	3.02	13.71	328.52	5.94	8.18	19.15	458.91	16.11	8.59	18.61	446.13	16.92
800°C	1.54	10.81	259.13	3.04	3.1	15.08	361.54	6.11	3.1	15.08	361.54	6.11

Tabla 6-7 Resultados mas relevantes del ensayo de resistencia a la tensión.

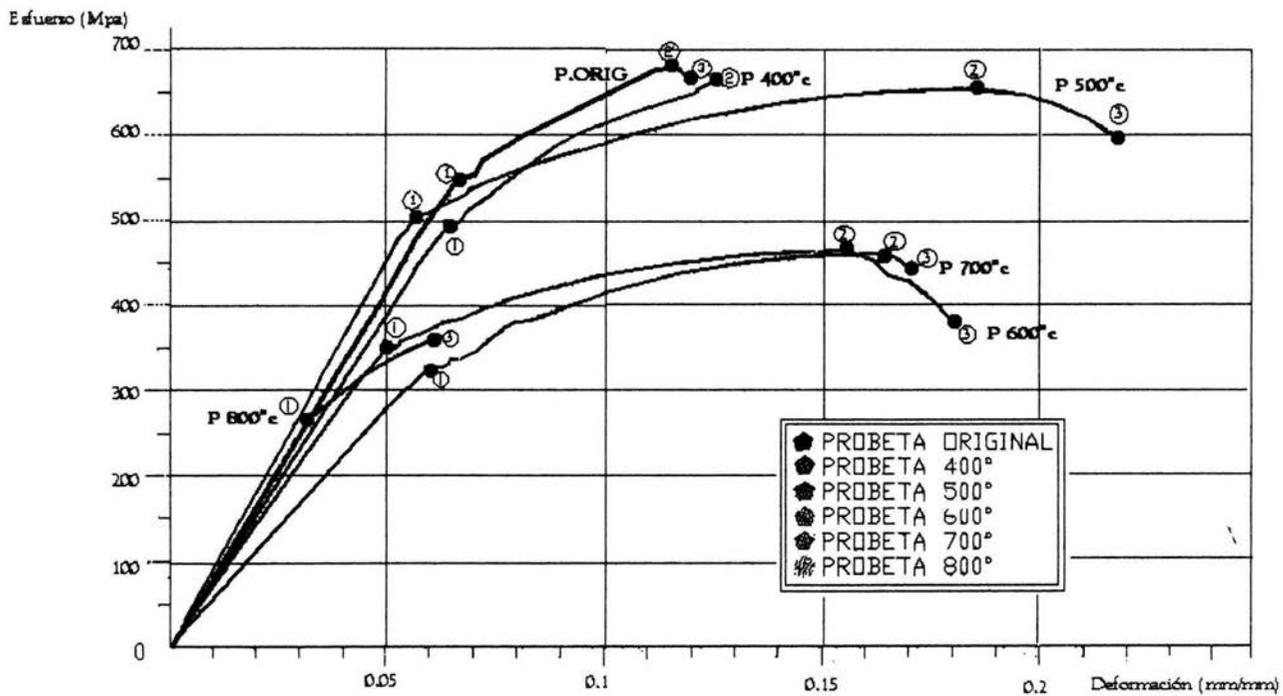


Fig. 6.5 Gráfica esfuerzo-deformación de las probetas ensayadas.

METALOGRAFÍAS

PROBETA ORIGINAL

Se observa un tamaño medio de grano Austenítico y granos muy finos de Ferrita dispersos transcristalinamente (sobre el cristal), mientras varios de estos últimos se acomodan de forma intercrystalina rodeando el grano Austenítico e identificando así su tamaño. Además se presentan zonas oscuras que indican precipitación de algunos carburos de Cromo_(5,7).



Metalografía tomada a 100x.
Ataque con ácido oxálico al 10%.



Metalografía tomada a 400x.
Ataque con ácido oxálico al 10%.

PROBETA 400°C

Se incrementa el tamaño de grano Austenítico causado por la temperatura del tratamiento térmico pero sobre todo por la duración⁽⁷⁾, el tamaño de grano Ferrítico permanece invariable al igual que siguen observándose varias zonas con carburos de Cromo ($Cr_{23}C_6$), en mucho mayor cantidad con respecto al material original.



Metalografía tomada a 100x.
Ataque con ácido oxálico al 10%.



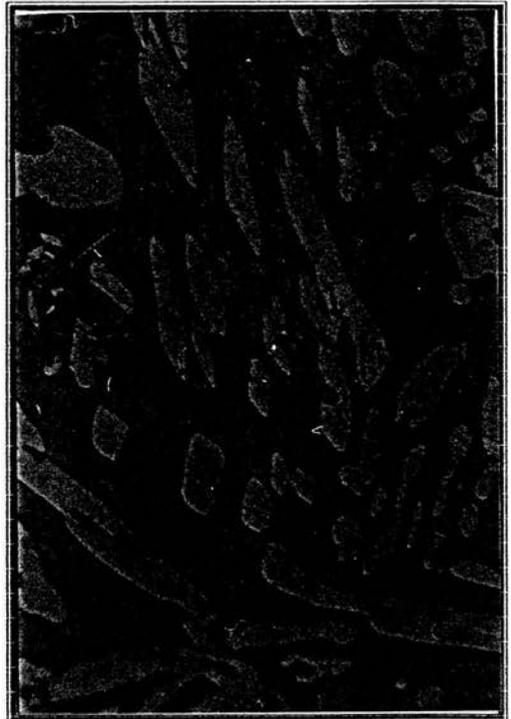
Metalografía tomada a 400x.
Ataque con ácido oxálico al 10%.

PROBETA 500°C

El tamaño de grano Austenítico se mantiene sin variación respecto a la probeta tratada a 400°C, debido a que la Ferrita y los carburos han entorpecido el crecimiento⁽⁷⁾; sin embargo, se han disuelto varios granos de Ferrita y los existentes han tomado un tamaño de grano algo mayor en comparación con las probetas anteriores. Se observan prácticamente escasas zonas con carburos.



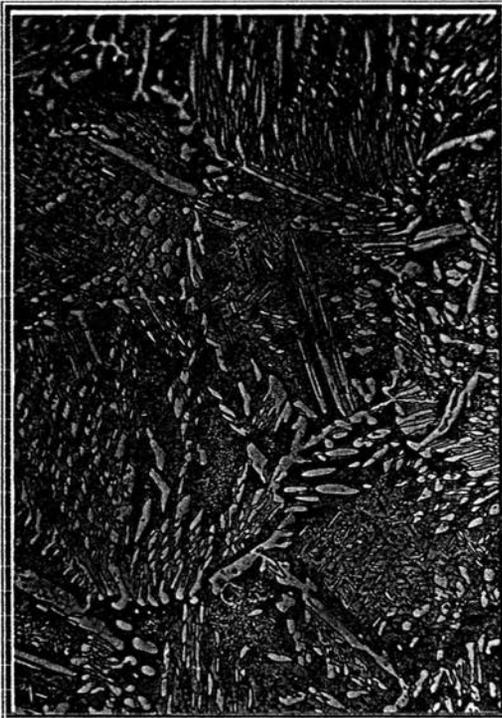
Metalografía tomada a 100x.
Ataque con ácido oxálico al 10%.



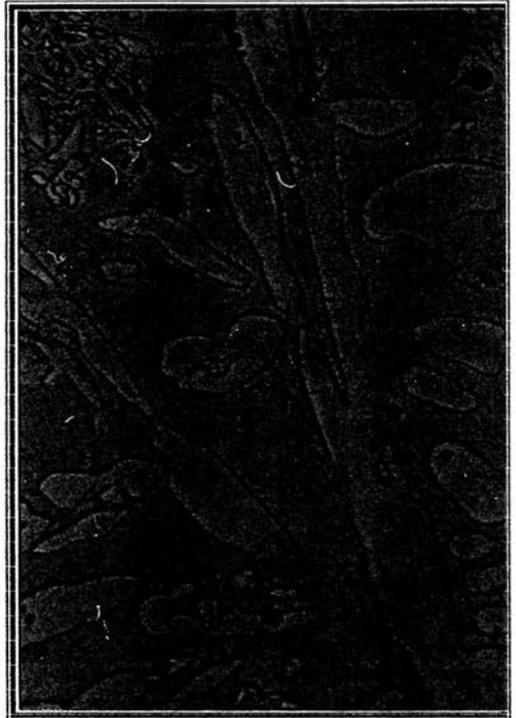
Metalografía tomada a 400x.
Ataque con ácido oxálico al 10%.

PROBETA 600°C

El tamaño de grano Austenítico sigue sin cambio; sin embargo ha reaparecido Ferrita de tamaño no muy fino de forma transcristalina e intercristalina, los granos de Ferrita intercristalina están tan próximos que varios de ellos forman largos granos, haciendo notar perfectamente la forma del grano Austenítico; surgen carburos de Cromo ($Cr_{23}C_6$) y su presencia empieza a ser considerable.



Metalografía tomada a 100x.
Ataque con ácido oxálico al 10%.



Metalografía tomada a 400x.
Ataque con ácido oxálico al 10%.

PROBETA 700°C

Ha sido excesiva la combinación de calor y tiempo, el tamaño de grano Austenítico ha crecido descomunalmente. Sigue reapareciendo Ferrita preferentemente en posiciones intercrystalinas, el grano Austenítico prácticamente esta libre de esta segunda fase. Las zonas con carburos de Cromo ($Cr_{23}C_6$) surgen nuevamente.



Metalografía tomada a 100x.
Ataque con ácido oxálico al 10%.



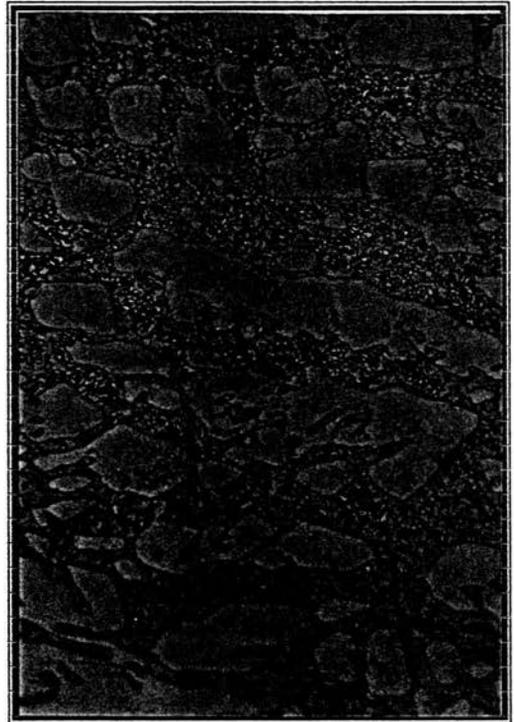
Metalografía tomada a 400x.
Ataque con ácido oxálico al 10%.

PROBETA 800°C

El tamaño de grano Austenítico sigue siendo excesivamente grande, la Ferrita incrementa sus campos de área y cubre de forma intercrystalina y transcristalina los granos Austeníticos, el tamaño presentado por la Ferrita se incrementa un poco. Además, es innegable el exceso de carburos de Cromo ($Cr_{23}C_6$), pues ambas metalografías lo demuestran.



Metalografía tomada a 100x.
Ataque con ácido oxálico al 10%.



Metalografía tomada a 400x.
Ataque con ácido oxálico al 10%.

6.4 RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN METALGRÁFICA

ANÁLISIS DE FASES

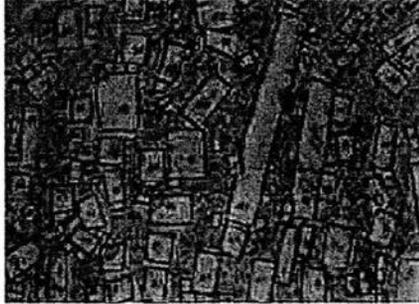
PROBETA ORIGINAL	PROBETA 400°C
	
Área cubierta por Ferrita = 5756 mm ² Ferrita= 37.86% Austenita y carb= 62.14%	Área cubierta por Ferrita = 5574 mm ² Ferrita= 36.28% Austenita y carb= 63.72%
PROBETA 500°C	PROBETA 600°C
	
Área cubierta por Ferrita = 4942 mm ² Ferrita= 32.5% Austenita = 67.5%	Área cubierta por Ferrita = 5110 mm ² Ferrita= 33.61% Austenita= 66.39%
PROBETA 700°C	PROBETA 800°C
	
Área cubierta por Ferrita = 5941 mm ² Ferrita= 39.08% Austenita y carb= 60.92%	Área cubierta por Ferrita = 6346mm ² Ferrita= 41.75% Austenita y carb= 58.25%

Tabla 6-8. Metalografías tomadas a 400x. El área total de referencia es de 15 200 mm².

ANÁLISIS DE LOS TAMAÑOS DE GRANO

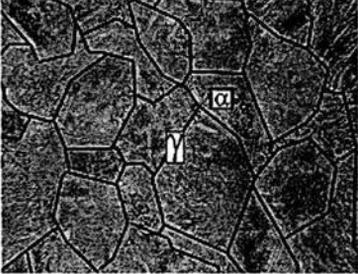
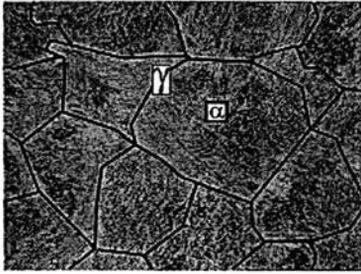
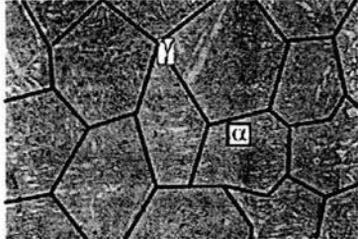
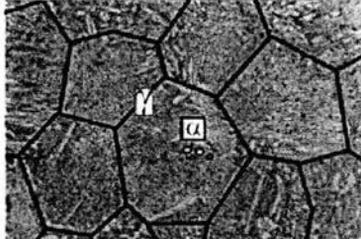
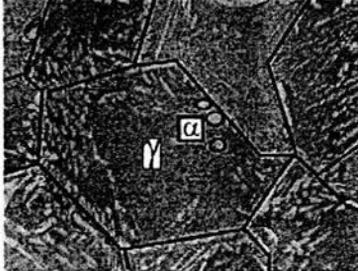
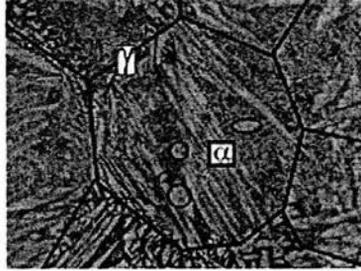
PROBETA ORIGINAL	PROBETA 400°C
	
<p>Tamaño de grano Ferrítico (α) = 9 Tamaño de grano Austenítico (γ) = 1</p>	<p>Tamaño de grano Ferrítico (α) = 9 Tamaño de grano Austenítico (γ) = 0</p>
PROBETA 500°C	PROBETA 600°C
	
<p>Tamaño de grano Ferrítico (α) = 7 Tamaño de grano Austenítico (γ) = 0</p>	<p>Tamaño de grano Ferrítico (α) = 7 Tamaño de grano Austenítico (γ) = 0</p>
PROBETA 700°C	PROBETA 800°C
	
<p>Tamaño de grano Ferrítico (α) = 7 Tamaño de grano Austenítico (γ) = 00</p>	<p>Tamaño de grano Ferrítico (α) = 6 Tamaño de grano Austenítico (γ) = 00</p>

Tabla 6-9. Metalografías tomadas a 100x para el estudio comparativo de grano.

RESULTADOS DEL ESTUDIO METALGRÁFICO.

Probeta	%Ferrita	% Austenita y/o carburos dispersos.	Presencia de carburos	Tamaño de grano Ferrítico	Tamaño de grano Austenítico
Original	37.86	62.14	+	9	1
400°C	36.28	63.72	+	9	0
500°C	32.50	67.5	-	7	0
600°C	33.61	66.39	++	7	0
700°C	39.08	60.92	++	7	00
800°C	41.75	58.25	+++	6	00

Tabla 6-10. Resultados del estudio metalográfico efectuado a las probetas.

6.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a los datos obtenidos del ensayo de resistencia a la tensión y al estudio metalográfico, principalmente tabla 6-7, 6-10 y figuras 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5, observamos lo siguiente:

1) El esfuerzo de fluencia permanece casi invariable solo hasta rebasar la temperatura de 500°C (Fig. 6.2); sin embargo pasando los 600°C cae drásticamente. Recordemos que el esfuerzo de fluencia es de vital importancia para el diseño de elementos, pues rebasando el 0.2% de deformación plástica son inútiles. Estos valores de esfuerzo en las probetas original, 400°C y 500°C se atribuye según el estudio metalográfico, a una conservación en el tamaño de grano de la matriz (Austenita), al grano fino de Ferrita con altos porcentajes ocupados por esta en la microestructura (tabla 6-10), y sobretodo a la poca presencia de carburos.

2) La resistencia a la tensión se comporta semejante al punto anterior, sin grandes cambios para las primeras 3 probetas y totalmente contrario para las demás (Fig. 6.3). La resistencia a la tensión es útil aunque no de tanta magnitud como el esfuerzo de fluencia; para el caso de concepto en seguridad, donde las piezas tuvieran que dar su máximo esfuerzo pese a deformarse es de vital importancia este dato. Los resultados que se obtuvieron se atribuyen a las mismas razones que en el punto anterior.

3) En cuanto a elongación o ductilidad presentada (Fig. 6.4), destaco la probeta tratada a 500°C, presentando un incremento de 21.94% con respecto a su tamaño original; este resultado se debe al tamaño medio de grano de ambas fases pero con más importancia a la máxima reducción en el porcentaje de Ferrita (Tabla 6-10), y por consiguiente una fuerte aparición de Austenita en la microestructura, tendiendo a ser muy parecido a un acero inoxidable Austenítico; además de estar prácticamente libre de carburos.

4) Para finalizar, la temperatura crítica de recocido se presento en las probetas tratadas a 700 y 800°C; especialmente esta última (Fig 6.5). Como era de esperarse, es el resultado de un grano descomunal de la matriz, a un tamaño de grano medio Ferrítico, a los grandes porcentajes de la segunda fase en la microestructura y a la presencia excesiva de carburos principalmente en los límites del grano de la matriz.

CONCLUSIONES

El material original muestra un tamaño de grano Austenítico medio que aunque no es pequeño en comparación con otros aceros, se mantiene y casi no crece. La presencia de una segunda fase (Ferrita) y algunos carburos restringen el crecimiento en el tamaño de grano.

Sin embargo a temperaturas superiores a los 600°C y sobre todo al tiempo de permanencia se generan graves estragos, atribuido principalmente al crecimiento de la segunda fase (Ferrita) y a la aparición de carburos en los bordes de la matriz; demostrado en el ensayo de resistencia a la tensión, disminuyendo la resistencia mecánica y de igual modo mostrando valores pésimos de ductilidad.

Se demostró que la resistencia mecánica del Ferralium 255[®] decrece con la temperatura; sin embargo, no es tan significativo el cambio hasta temperaturas de 500°C, siendo la probeta tratada a esta temperatura la que mostró un balance entre resistencia a la tensión y ductilidad adecuada. Por lo tanto, podemos decir que para el diseño de elementos, Ferralium 255[®] no debe ser recocido a temperaturas mayores a los 500°C, siendo ideal utilizar el material original para obtener el máximo valor en este concepto. Por los datos obtenidos, se aconseja usar al Ferralium 255[®] en su estado original y en caso de ser necesario no exceder los 500°C.

BIBLIOGRAFÍA

1.- ACEROS INOXIDABLES Y ACEROS RESISTENTES AL CALOR

Inchaurza Zabala Adrian

Editorial Limusa, 1981.

2.- ALLOYING ELEMENTS IN STEEL

Bain, E. Y Paxton

ASM, 1972.

3.- FABRICACIÓN DE HIERROS, ACEROS Y FUNDICIONES

José Apriz Barreiro

Editorial Urmo, Bilbao 1978.

4.- FUNDAMENTAL OF PHYSICAL METALLURGY

Verhoeven, J.

John Wiley and Sons Inc, 1989.

5.- INGENIERIA METALURGICA

Raymond Aurelius Higgins

Editorial Continental, México 1963.

6.- INTRODUCCIÓN A LA METALURGIA FÍSICA

Avner, S.

Editorial Mc Graw Hill, 1978.

7.- METALOGRAFIA Y TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS METALES

Lajtin, Yu M.

Moscu Mir, 1973

8.- METALS HANDBOOK VOL.7, 8a

American Society for Metals

1981.

9.- METALS HANDBOOK VOL.9, 9a

American Society for Metals

1985.

10.-METALLURGY AND HEAT TREATMENT OF TOOL STEELS

Wilson, R.

Mc Graw Hill, 1985.

11.-PRINCIPIOS DE METALURGIA FÍSICA

Reed-Hill, R.

Editorial CECSA, 1979.

12.-TECNOLOGIA DE MATERIALES

Aparicio Izquierdo Francisco

Editorial Paraninfo, Madrid 1980.

13.-TECNOLOGIA DE MATERIALES

Lawrance H. Van Black

Editorial Fondo Educativo Interamericano, 1984.

14.-TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS METALES

Pere Mora Sola

Editorial Marcombo, Barcelona 1991.

15.-TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS ACEROS

José Apriz Barreiro

Editorial Dossat, Madrid 1974.

16.-TOOL STEEL

Roberts G. y R, Cary

American Society for Metals, 1980.