Ministerio De Educación Superior

Instituto Superior Minero Metalúrgico

"Dr. Antonio Núñez Jiménez"

Facultad: Metalurgia - Electromecánica

Departamento De Ingeniería Mecánica.

Trabajo de Diploma

En opción al título de Ingeniero Mecánico

Título: Caracterización del Mecanismo de rotura de las líneas fría y caliente de recirculación, para el transporte de Amoniaco.

Autor: Yulieski Zamora Avila

Tutor(es): Ing. Geovany Ruiz Martínez

Ing. Vicheider Montero Romero

Moa-2008

"Año 50 del aniversario de la Revolución"

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo autor de este trabajo de Diploma y los tutores Ing. Geovany Ruiz Martínez, Ing. Vicheider Montero Romero, declaramos la propiedad intelectual de este servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

_____

Diplomante: Yulieski Zamora Avila

_____ _____

Tutor: Ing. Geovany Ruiz Martínez Tutor: Ing. Vicheider Montero Romero

PENSAMIENTO

Solo hay un bien: el conocimiento; solo hay un mal: la ignorancia.

Sócrates.

Ninguna decisión importante puede ser tomada sin tener en cuenta no solamente el mundo como es hoy sino como será mañana.

Isaac Asimos.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco la realización de este trabajo al Ing. Geovany Ruíz Martínez y al Ing. Vicheider Montero Romero mis tutores, que sin su ayuda y confianza depositada no hubiera sido posible la realización de este trabajo. Agradezco grandemente a toda, mi familia a mis tíos Marlenis, Eddy y Evelio, a mis hermanas Yulianar y Edelis, a todos mis primos Oscar, Yuri, leo, Papuchín, a mi novia Niuvis, por darme el apoyo que necesitaba para llegar donde ahora estoy, y en especial a mi madre y a mi abuela que siempre han sabido llevarme por buenos caminos.

También agradezco grandemente a mis compañeros de estudios, a mis queridos, y como diría alguien que conozco ¨Qué más que queridos, amigos, carnales¨, compañeros de cuarto y a mis amigos de Bayamo que me brindaron toda su ayuda a lo largo de estos cinco años.

Por otra parte agradezco también a Roberto Guillarte (tito) que fue como un padre para mí y también a su familia por brindarme todo su apoyo.

A todos "Muchas Gracias"

Yulieski Zamora Avila

DEDICATORIA

Dedico este trabajo:

Dedico este trabajo especialmente a mi madre María Luisa y a mi abuela Mabel por ser la luz que siempre ha alumbrado mi camino, también quiero dedicar este trabajo a todos los que de una forma u otra colaboraron con la realización del mismo y me brindaron su ayuda incondicionalmente, a todos mis amigos que siempre estuvieron en las buenas y malas, a todos mis tios, mis hermanas y hermanos y a mi novia por soportarme todo este tiempo.

A todos "les dedico este éxito"

Yuliesky Zamora Avila.

Resumen

En el presente trabajo se llevó a cavo la caracterización del mecanismo de rotura de las líneas frías y calientes de recirculación para el transporte de Amoniaco en la Empresa Comdte. Ernesto Che Guevara de Moa, en el mismo se describen primeramente las principales características del Acero Inoxidable Austenítico AISI 316, también se realizaron los cálculos de resistencia mecánica de los tramos en estudio, los cuales soportan temperaturas de entre 32 y 70^0C. Se realizó la simulación por el método de elementos finitos (MEF), donde se analizaron los tramos de tuberías en estudio para diferentes condiciones de trabajo atendiendo a las temperaturas y las presiones que actúan dentro de estas. Se realizó también la valoración de los resultados obtenidos de los métodos empleados, impacto económico acerca de la caracterización de rotura y un amplio impacto ambiental de la instalación.

Abstract

In presently work its was carried out a characterization of the mechanism of break of the cold lines and heat of recirculation for the transport of Ammonia in the Company Comdte. Ernesto Che Guevara of Moa, in the same one is described the main characteristics of the Stainless Steel firstly Austenítico AISI 316, they were also carried out the calculations of mechanical resistance of the tracts in study, which support temperatures of between 32 and 70^0C. By means of the simulation for finite elements the tracts of pipes were modelled in study for different work conditions assisting to the temperatures and the pressures that act inside these. It was also carried out the valuation of the obtained results of the used methods, economic impact about the break characterization and a wide environmental impact of the installation.

Índice # de página

INTRODUCCIÓN 1

CAPITULO I

Marco Teórico- Metodológico 4

1.1. Introducción 4

1.2. Estado del Arte 4

1.3. Clasificación de los aceros inoxidables 6

1.3.1. Aceros Inoxidables martensíticos 7

1.3.2. Aceros Inoxidables ferríticos 8

1.3.3. Aceros Inoxidables dúplex 9

1.3.4. Aceros Inoxidables endurecibles por precipitaciones 10

1.3.5. Aceros Inoxidables Austeníticos 10

1.4. Características y aplicaciones de los Aceros Inoxidables Austeníticos AISI 316 12

1.4.1. Propiedades físicas y eléctricas de los acero AISI 316 13

1.4.2. Propiedades mecánicas del acero AISI 316 15

1.4.3. Composición química estándar del acero austenítico AISI 316 17

1.5. Efectos de los distintos elementos en el acero inoxidable AISI 316 17

1.6. Trabajos Precedentes 19

1.7. Análisis de rotura de los Aceros Inoxidables Austeníticos AISI 316 20

1.7.1. Fatiga 22

1.7.2. Estadios de fatiga 23

1.8. Corrosión en Aceros Inoxidables Austeníticos AISI 316 24

1.9. Descripción de las líneas 27

1.10. Conclusiones del capítulo 27

CAPITULO II

Materiales Y Métodos 29

2.1. Introducción 29

2.1.1. Fundamentación de las propiedades a investigar 29

2.2. Selección y preparación de muestras 30
2.3. Cálculo de la resistencia mecánica en tuberías de Aceros Inoxidables Austeníticos 33
2.4. Análisis tenso- deformacional mediante métodos numéricos 38
2.4.1. Solución numérica del problema 39
2.4.2. Metodología utilizada 40
2.4.3. Algoritmo para la simulación (ANSYS) 41
2.4.4. Algoritmo para la simulación de CosmosDesignStar versión 4.5 42
2.5. Conclusiones del capítulo 43
CAPITULO III
Análisis de los resultados 44
3.1. Introducción 44
3.2. Resultados del cálculo de resistencia mecánica 44
3.3. Resultados de la modelación 45
3.4. Análisis químico 54
3.4.1. Análisis microestructural 56
3.4.2. Análisis Metalográfico 56
3.4.3. Examen fractográfico 57
3.5. Valoración Económica e Impacto Ambiental 58
3.5.1. Impacto Ambiental 60
3.5.1.2. Peligros para la salud 60
3.5.1.3. Efectos Crónicos 61
3.5.1.4. Efectos Sistémicos 62
3.5.1.5. Comportamiento en el Ambiente 64
3.5.1.6. Medidas para mitigar estos efectos 67
3.6. Conclusiones del capítulo 68
CONCLUSIONES GENERALES 69
RECOMENDACIONES 70
BIBLIOGRAFÍA 71

ANEXOS **76**

INTRODUCCIÓN

La empresa Comandante Ernesto Che Guevara fue construida entre los años 1973 y 1985 como fruto de la colaboración bilateral entre los gobiernos de Cuba y la antigua Unión Soviética. Con la finalidad de producir concentrado de níquel y cobalto. Actualmente la producción de níquel y cobalto constituye unas de las mayores posibilidades para el incremento del desarrollo de la economía cubana, ya que su precio cobra gran auge en el mercado internacional.

Hoy en día la Empresa Mecánica del Níquel se encuentra enfrascada en dos grandes cambios: la modernización de su equipamiento, con el objetivo de disminuir los costos en la producción y el perfeccionamiento empresarial para hacerla más competitiva y lograr su inserción en el mercado internacional. Este último como proceso integral no puede soslayar el impulso tecnológico a partir de una aplicación consecuente de la ciencia y la técnica (Mesa Redonda, Enero del 2001).

El costo de producción del niquel está incrementando en gran medida por el elevado consumo energético debido a que una parte significativa del equipamiento utilizado se encuentra en fase de deterioro progresivo, exigiendo grandes esfuerzos para sustituir o recuperar los dispositivos, agregados y piezas que conforman los componentes principales del equipamiento.

En el costo de extracción del níquel y en la eficiencia de su proceso tecnológico, incide de forma especial el deterioro prematuro provocado por la acción simultánea de la corrosión en diversos equipos de transporte de fluido: Transportador de tornillo sin fin Castellano (2006). Las tuberías que transportan fluidos a elevadas temperaturas se fabrican de acero inoxidable Austenítico AISI 316 teniendo en cuenta las propiedades que este posee que no se endurece por tratamiento térmico, se puede utilizar tanto a temperaturas criogénicas como a elevadas temperaturas.

Las inestabilidades metalúrgicas son los cambios que ocurren en la estructura metalográfica originadas por permanencias a altas temperaturas. Cuando un material es muy propenso a estos cambios a elevadas temperaturas, se modifican y disminuyen las propiedades que lo caracterizan por el surgimiento o aparición de estructuras anómalas. Muchas han sido las causas aparejadas a roturas de componentes de hornos industriales en condiciones de servicio, líneas que trasportan fluidos y en muchos caso dichas roturas ocurren por violación en normas, sin embargo, la más

común encontrada en la literatura es la fragilización en caliente por procesos de solidificación, envejecimiento, fluencia, fatiga o corrosión bajo tensión.

Situación problémica: En la planta de Recuperación de Amoniaco ocurren frecuentes averías en las líneas fría y caliente de recirculación, para el transporte de Amoniaco. La avería ocurrió al agrietarse diametralmente el cuerpo tubular.

Problema: Frecuentes averías de la planta de Recuperación de Amoniaco de la Empresa Comandante Ernesto Ché Guevara.

Hipótesis: Si se realiza el análisis de esfuerzos internos y metalográfico del material de las líneas fría y caliente de recirculación, para el transporte de Amoniaco. Se podrá caracterizar los mecanismos de rotura que se originan en el mismo.

Objetivo: Caracterizar el mecanismo de rotura de las líneas fría y caliente de recirculación, para el transporte de Amoniaco de la planta Recuperación de Amoniaco de la Empresa Comandante Ernesto Ché Guevara,

Objetivos específicos:

1. Realizar la comprobación de resistencia mecánica.
2. Realizar la simulación de algunos tramos de las líneas fría y caliente de recirculación para el transporte de Amoniaco.
3. Hacer el análisis metalográfico al material de las mismas.

Tareas:

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Recopilación de materiales y preparación de probetas
3. Analizar el comportamiento de las tensiones en las diferentes zonas.
4. Realizar el análisis metalográfico de las muestras.
5. Análisis de los resultados.

CAPITULO I. Marco Teórico- Metodológico

1.1. Introducción

En el presente capítulo, recogeremos los aspectos más importantes sobre el acero austenítico AISI 316 desde un punto de vista técnico, su clasificación y las propiedades características de este material que puedan ayudar a ubicar y comprender el fenómeno que estamos estudiando, por lo que el **Objetivo de este capítulo** es realizar un análisis de la bibliografía existente que permita definir el estado del arte en la temática abordada y sustentar los resultados alcanzados en la investigación.

1.2. Estado del Arte

El acero inoxidable es el nombre genérico para un grupo de aceros usados básicamente por su resistencia a la corrosión. El único elemento clave que todos ellos comparten, a parte del bajo contenido en carbono, es un porcentaje mínimo en masa de un 11% en cromo. Evidentemente, el elemento preponderante de la aleación debe ser el hierro. No obstante, otros elementos como el níquel y el molibdeno pueden ser añadidos para mejorar esta resistencia a la corrosión, pero será este contenido en cromo el factor decisivo

El acero inoxidable es un material relativamente joven que apareció hace menos de un siglo. Su resistencia a la corrosión ha hecho de él un material versátil con aplicaciones en diferentes campos como la industria, la medicina, la automoción, entre otros.

Las primeras normativas sobre acero inoxidable se basaban en las reglas de diseño establecidas para el acero al carbono. Ha sido en la última década cuando se ha impulsado el estudio del comportamiento estructural del material para desarrollar las reglas de diseño que permitan explotar todo su potencial en construcción.

El padre del acero inoxidable fue Harry Brearley (Inglaterra en 1871). En 1912, con la finalidad de resolver los problemas de erosión que padecían los rifles en su interior, empezó a investigar con aceros con contenido en cromo, ya que tenían un punto de fusión superior a los aceros ordinarios.

Fue entonces cuando Brearley descubrió que el nuevo acero era muy resistente a los ataques químicos y a los ácidos de comida como el vinagre y el limón.

Otras empresas empezaron a investigar otros tipos de aleaciones. Por ejemplo se fabricaron aceros con adición de níquel y resultó un acero más resistente a los ácidos, más dúctil y fácil de trabajar.

La mayoría de aleaciones que se utilizan actualmente se inventaron entre 1913 y 1935 en Inglaterra, Alemania, América y Francia.

La primera colada industrial de aceros inoxidables del tipo martensítico con adicción exclusiva de cromo tuvo lugar en Sheffield en la siderurgia, Firth Brown. El producto de esta primera colada contenía 13% de Cr y 0,355 de C, y se empleó en la fabricación de hojas de cuchillos. En los Estados Unidos casi simultáneamente, Elwool Haynes, que había estudiado las aleaciones cobalto-cromo y aleaciones cobalto-cromo-tungsteno, observo su resistencia notable a la corrosión, incluso después de la adición de hierro. En Alemania, Strauss y Maurer en 1914 indicaban las propiedades de resistencia a la herrumbre y a los ácidos de aceros que contenían una cantidad considerable de cromo y níquel. Alrededor de 1920 se publicó un trabajo detallado y se lanzaron estos aceros al mercado, durante la Exposición Mundial de Malmo. En Francia, fue en 1917 cuando se patentaron los aceros que contenían del 10 al 15% de cromo y del 20 al 40% de níquel, como resultado de los trabajos realizados por Chevenard en el laboratorio de Imphy. Monnartz, en Alemania, estudió por primera vez la pasividad de estas aleaciones e indicó el límite mínimo del 12% de cromo a partir del cual aparece la pasividad, la acción del carbono, la posibilidad de una estabilización y la influencia favorable del molibdeno (Monnartz,1911).

A partir de 1970 se empezaron a desarrollar los aceros inoxidables Dúplex que tienen mayor resistencia a la corrosión y mayor resistencia mecánica.

Fue en la década de los 60 cuando en Estados Unidos se publicó la primera normativa relativa al empleo estructural de acero inoxidable, fruto de proyectos de investigación

universitarios. En Europa tuvimos que esperar hasta la década de los 90 para la aparición del primer manual de diseño estructural del acero inoxidable.

A partir de estos sucesos empezaron a publicarse de forma regular artículos sobre el empleo estructural del acero inoxidable desde los principales centros de investigación:

- Steel Construction Institute, por sus siglas en inglés (SCI), Inglaterra.

- Rand Afrikaans University, Sudáfrica.

- University of Sydney, Australia.

- University of Missouri-Rolla, EEUU.

Posteriormente aparecieron nuevos grupos de investigación, de los cuales podemos destacar en Europa la Universidad de Lulea (Suecia), el Technical Research Centre (VTT) de Finlandia y la Universidad Politécnica de Cataluña en España.

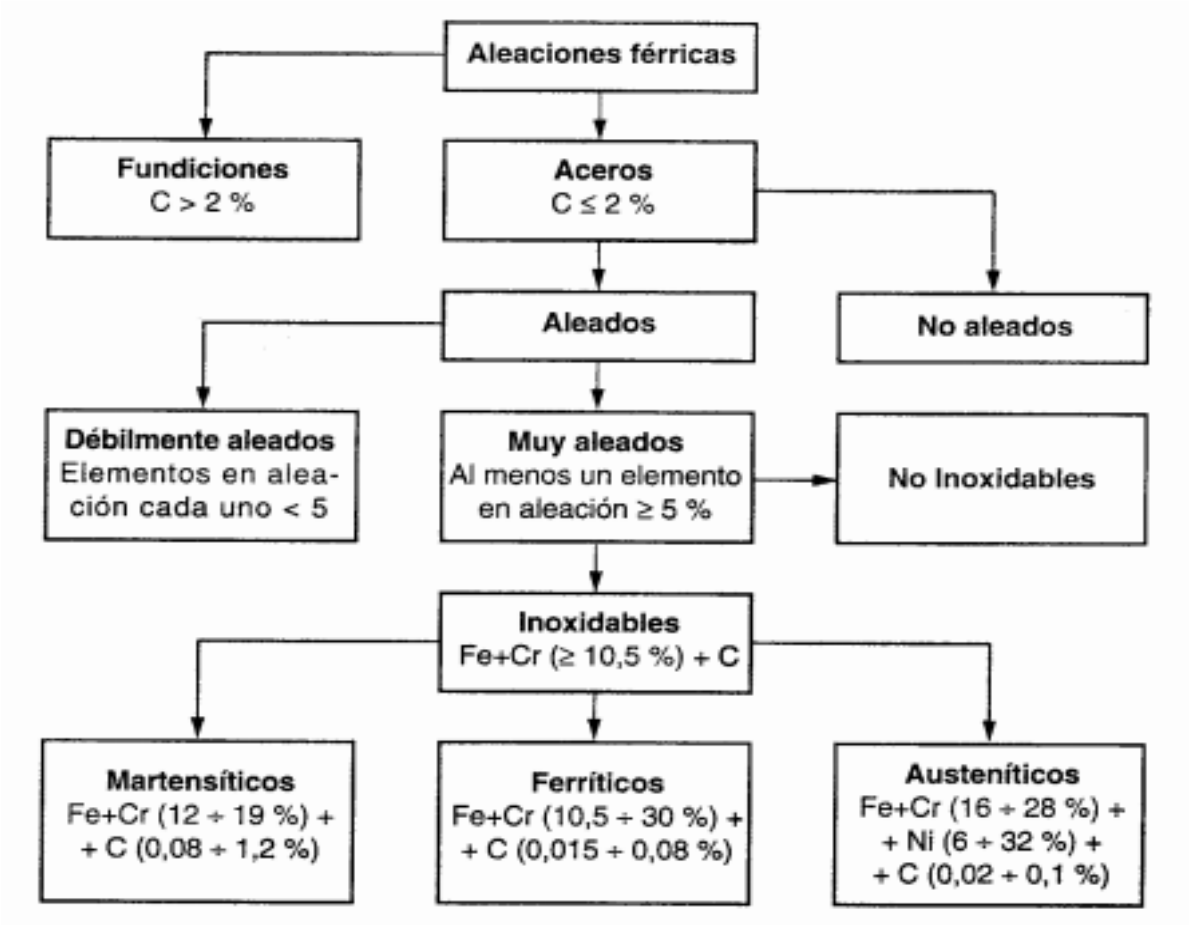
Pero ninguno de estos científicos tuvo en cuenta lo que sucedía cuando se le aplicaba una presión interior a un tuvo.

1.3. Clasificación de los aceros inoxidables

Según Di Caprio, 1999, existen varios grupos o familias de aceros inoxidables, y cada uno contiene un número específico de tipos con características distintas.

Con objeto de entender la nomenclatura, es necesario establecer que la estructura interna de los metales está compuesta de un arreglo entre los átomos que forma una red espacial y que para su estudio se ha llamado estructura cristalina.

Los aceros inoxidables son aleaciones complejas en las que entran en juego múltiples elementos. El porcentaje de estas partículas y su variación cambian la porción de las fases presentes, lo cual da lugar a cinco diferentes familia; cuatro de éstas corresponden a las particulares estructuras cristalinas formadas en la aleación: austenita, ferrita, martensita, y dúplex (austenita más ferrita); mientras que la quinta familia son las aleaciones endurecidas por precipitación, que están basadas más en el tipo de tratamiento térmico usado que en la estructura cristalina.



Otros tipos: Austeníticos al Cr, Mn, Ni.

Austeno – Ferríticos (Dúplex, bifásicos o Dual Phase)

Endurecidos por precipitación (PH, precipitación Hardening)

Figura 1.2 *Árbol genealógico de los aceros inoxidables*

1.3.1. Aceros Inoxidables martensíticos

Los aceros inoxidables martensíticos son en general aleaciones de cromo, hierro y carbono, su propiedad característica es su pemplabilidad, única de todas estas series que la posee. Tienen una ductilidad mediana en frío, aunque son fácilmente deformables en caliente. Fueron los primeros que se desarrollaron industrialmente y representan una porción de la serie AISI 400. (Beddoes y Parr, 1999).

Sus características son las siguientes:

Moderada resistencia a la corrosión.

Son endurecibles por tratamiento térmico y por lo tanto se pueden desarrollar altos niveles de resistencia mecánica y dureza.

Son magnéticos.

Debido al alto contenido de carbono y a la naturaleza de su dureza, es de pobre soldabilidad.

Después de ser tratados para endurecimiento, generalmente son utilizados en procesos de maquinado y formado en frío.

Metalurgia básica.

Los aceros inoxidables martensíticos son esencialmente aleaciones de cromo y carbono cuya principal característica es su habilidad para aumentar su resistencia mecánica y dureza mediante tratamiento térmico que produce martensita. La configuración metalográfica martensítica posee estructura cristalina tetragonal centrada en el cuerpo (bct). El contenido de cromo es generalmente en el rango de 10.5 a 18% y el de carbono es alto, alcanzando valores de hasta 1.2%. El contenido de Cr y C está balanceado para asegurar la formación de la estructura martensítica durante el tratamiento térmico.

1.3.2. Aceros Inoxidables ferríticos

Estos aceros inoxidables de la serie AISI 400 mantienen su estructura ferrítica estable desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión.

Sus características son las siguientes:

Resistencia a la corrosión de moderada a buena, la cual se incrementa con el contenido de cromo y en algunas aleaciones de molibdeno.

Endurecidos moderadamente por trabajo en frío; no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico.

Las aleaciones ferríticas son magnéticas.

Su soldabilidad es pobre por lo que generalmente se limitan las uniones por soldadura a calibres delgados.

Usualmente se les aplica un tratamiento de recocido con lo que obtienen mayor suavidad, ductilidad y resistencia a la corrosión.

Debido a su pobre dureza, el uso se limita generalmente a procesos de conformado en frío.

Metalurgia básica.

Como su nombre lo indica tienen una configuración metalográfica ferrítica con la estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (bcc) que se mantiene estable desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión. El cromo inhibe la formación de austenita y promueve la formación de ferrita. Estos aceros son esencialmente aleaciones con cromo, cuyo contenido es usualmente del rango de 10.5 a 30%, pero contenidos limitados de carbono del orden de 0.08% en relación con los martensíticos. Algunos grados pueden contener molibdeno, silicio, aluminio, titanio y niobio que promueven diferentes características. (Beddoes y Parr, 1999).

1.3.3. Aceros Inoxidables dúplex

Los aceros inoxidables dúplex son los de más reciente desarrollo; son aleaciones cromo-níquel-molibdeno que forman una mezcla de cantidades aproximadamente iguales de austenita y ferrita.

Sus características son las siguientes:

Son magnéticos.

No pueden ser endurecidos por tratamiento térmico.

Buena soldabilidad.

La estructura dúplex mejora la resistencia a la corrosión de fractura bajo tensión en ambientes con iones de cloruro.

Metalurgia básica

Los aceros inoxidables dúplex presentan dos fases: dispersión de austenita fcc en una matriz de ferrita bcc. La cantidad exacta de cada fase está en función de la composición y el tratamiento térmico. Los principales elementos de aleación son cromo y níquel, sin embargo la cantidad de níquel es insuficiente para desarrollar completamente la estructura cristalina austenítica. El contenido de cromo varía del 18 al 26%, y el contenido de níquel de 4.5 a 6.5%. La adición de elementos como nitrógeno, molibdeno, cobre, silicio, y tungsteno permite controlar el balance en la configuración metalográfica, así como impartir ciertas características de resistencia a la corrosión.

1.3.4. Aceros Inoxidables endurecibles por precipitaciones

Este tipo de aceros inoxidables se desarrolló a escala industrial después de la Segunda Guerra Mundial, como una alternativa para elevar las características de resistencia mecánica mediante tratamientos térmicos de envejecimiento. Estos aceros se denominan “endurecibles por precipitación” o PH (precipitación hardening) y ofrecen una alternativa a los aceros inoxidables austeníticos cuando se desee asociar elevadas características mecánicas y de maquinabilidad.

Metalurgia básica.

Los aceros inoxidables endurecibles por precipitación son aleaciones hierro-cromo-níquel que se caracterizan por la resistencia mecánica obtenida a partir del endurecimiento por tratamiento térmico de envejecimiento. Estos grados se pueden clasificar en función de su estructura en estado de recocido y del comportamiento resultante tras el tratamiento de envejecimiento, como austeníticos, semiaustenítico o martensíticos.

1.3.5. Aceros Inoxidables Austeníticos

Los aceros inoxidables austeníticos constituyen la familia con el mayor número de aleaciones disponibles, integra las series AISI 200 y 300.

Su popularidad se debe a su excelente formabilidad y superior resistencia a la corrosión, no son templables, presentan buena ductilidad y son fácilmente soldables. (Beddoes y Parr, 1999).

Sus características son las siguientes:

Excelente resistencia a la corrosión.

Endurecidos por trabajo en frío y no por tratamiento térmico.

Excelente soldabilidad.

Excelente factor de higiene y limpieza

Formado sencillo y de fácil transformación.

Tienen la habilidad de ser funcionales en temperaturas extremas, bajas temperaturas (criogénicas) previniendo la fragilización, y altas temperaturas (hasta 925 ºC).

Son esencialmente no magnéticos. Pueden ser magnéticos después de que son tratados en frío. El grado de magnetismo que desarrollan después del trabajo en frío depende del tipo de aleación de que se trate.

Los aceros austeníticos

se dividen en dos categorías:

Serie AISI 300. Aleaciones cromo-níquel.

Serie AISI 200. Aleaciones cromo-manganeso-nitrógeno.

Serie AISI 200

Son aleaciones Cr-Mn-Ni y representan la más reciente adición a la familia austenítica. Contienen menor cantidad de níquel hasta 7% y mantienen la estructura austenítica con altos niveles de nitrógeno. El manganeso de 5 a 20% es necesario en estas aleaciones bajas en níquel para aumentar la solubilidad del nitrógeno en la configuración austenítica, además de prevenir la transformación a martensita. La adición de nitrógeno también incrementa la resistencia mecánica.

Serie AISI 300

Es la más extensa y son aleaciones Cr-Ni. El níquel es un elemento estabilizador o formador sustitucional de austenita, y se emplea con este propósito en un porcentaje de 4 a 37%. La serie AISI 300 mantiene alto contenido de níquel y hasta 2% de manganeso.

También pueden contener molibdeno, cobre, silicio, aluminio, titanio y niobio, elementos que son utilizados para conferir ciertas características, como podría ser el prevenir en las estructuras soldadas la corrosión en la región cercana a la soldadura. En ciertos tipos se usa azufre o selenio para mejorar su habilidad de ser maquinados.

1.4. Características y aplicaciones de los Aceros Inoxidables Austeníticos AISI 316

La aleación 316 es un acero inoxidable austenítico de uso general que reúne las mejores condiciones de resistencia al calor y a la corrosión. Esta característica de excelente resistencia se debe a la formación de una película adherente e invisible de oxido de cromo que se forma en la superficie del acero, como consecuencia del agregado de los elementos cromo, níquel, molibdeno y otros

Posee muy buena maquinabilidad, embutibilidad, y resistencia al impacto. Es un acero que se suelda fácilmente, pero en las zonas recalentadas si no se realizo hipertemple puede presentar corrosión intergranular. Se puede endurecer por deformación en frío (alambres). En estado recocido (hipertemplado) no es ferromagnético. A medida que se deforma en frío, adquiere ferromagnetismo.

La aleación AISI 316 representa casi la mitad del tonelaje que se utiliza hoy en día, estos son ampliamente utilizados en varios sectores, desde la más sofisticada aplicación industrial hasta los utensilios domésticos.

Algunos ejemplos de productos fabricados con aceros inoxidables 316 son los equipos de procesos químicos y petroquímicos, equipos de proceso de alimentos y bebidas, equipos farmacéuticos, cámaras de combustión, sistemas de escape y filtros

automotrices, vagones de ferrocarril, aplicaciones arquitectónicas y estructurales, mobiliario urbano, paneles de aislamiento térmico, intercambiadores de calor, tanques y recipientes, barriles de cerveza, instrumentos quirúrgicos, agujas hipodérmicas, monedas, ollas y sartenes, cubiertos, lavadoras, lavavajillas y utensilios de cocina. Se emplean además en las Industrias fotográficas, textil, Industria de la pintura, Industria de caucho, Industria del algodón.

En la industria química y petroquímica, los aceros inoxidables ofrecen elevada resistencia a la corrosión y excelentes propiedades mecánicas así como un bajo costo de mantenimiento. En la industria de alimentos y bebidas y en la industria farmacéutica, proveen excelentes condiciones de higiene además de su resistencia a la corrosión y duración a largo plazo.

1.4.1. Propiedades físicas y eléctricas de los acero AISI 316

La Tabla 1.1 presenta las propiedades físicas a temperatura ambiente, para los grados de acero inoxidable según Materiales (1996), Key to Steel (2002). Las propiedades físicas pueden variar ligeramente con la forma y el tamaño del producto, pero tales variaciones no suelen ser de importancia crítica para su aplicación.

Tabla 1.1 *Propiedades físicas del acero AISI 316*

Densidad	[kg/dm^3]	7.95
Módulo de Dilatación	[10^{-5} °C^{-1}]	16.0
Módulo de Elasticidad longitudinal	[N/mm^2]	193
Módulo de Elasticidad transversal	[10^5 kg/cm^2]	8.0
Capacidad de Calor Específico a 20ºC	[J/(kg.ºC)]	500
Punto Fusión	ºC	1371 – 1398
Coeficiente de Poisson	NA	0.3

Conductividad Térmica	W/mºK	[100 ºC] → 16
		[500 ºC]→ 21
Coeficiente de Expansión Térmica	[10^{-6} °C^{-1}]	[0/100ºC] → 16.02
		[0/300ºC] → 16.20
		[0/500ºC] → 17.46
		[0/700ºC] → 18.54

Tabla 1.2 *Propiedades Eléctricas AISI 316*

Conductividad Eléctrica	[%]	650
Resistividad Eléctrica Específica a 20 ºC	[V.mm /m^2]	0.74
Permeabilidad magnética Recocido	Paramagnético 1.008	

Desde el punto de vista estructural, la propiedad física más importante es el coeficiente de dilatación térmica lineal que, para los grados austeníticos, difiere considerablemente del correspondiente al acero al carbono (12 x 10^{-6}ºC^{-1}). En los casos en los que se utilice conjuntamente acero al carbono y acero inoxidable, deberá considerarse en su dimensionamiento el efecto de dicha dilatación térmica diferencial.

Cuando las propiedades no magnéticas de los grados austeníticos sean de importancia para su aplicación, deberá tenerse cuidado al seleccionar los consumibles de soldadura adecuados para minimizar el contenido de ferrita en la soldadura. Un trabajo en frío considerable, en especial el del acero austenítico aleado, puede aumentar también la permeabilidad magnética; un posterior recocido restablecería las propiedades no magnéticas. Para aplicaciones no magnéticas, se recomienda seguir los informes y consejos del fabricante del acero.

1.4.2. Propiedades mecánicas del acero AISI 316

Las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 316, es distintas a las del acero al carbono, si bien los parámetros que definen tales propiedades son similares para ambos tipos de aceros. Por otra parte, las propiedades mecánicas de este material dependen del tipo de aleación y son función del proceso de fabricación y de los tratamientos superficiales a los que ha sido sometido.

La principal diferencia entre el acero inoxidable y el acero al carbono es la forma del diagrama a tensión–deformación.

Mientras que el acero al carbono tiene un comportamiento elástico lineal hasta el límite elástico y luego presenta, en la mayoría de los casos, un claro escalón de cedencia, la curva del acero inoxidable es claramente no lineal, sin límite elástico.

Como consecuencia de este comportamiento no lineal del material, el acero inoxidable pierde rigidez a partir de bajos niveles de tensión. El límite elástico en acero inoxidable se determina como la tensión correspondiente a un determinado valor de la deformación plástica remanente, generalmente del 0,2%.

El conformado en frío es una vía para mejorar las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables, especialmente el límite elástico, por considerarse relativamente bajo con respecto a otros materiales. La reducción en sección, o el trabajo en frío, aumenta el límite elástico y la tensión a la rotura, mientras disminuye la capacidad del acero al alargamiento.

Tabla 1.3 *Propiedades mecánicas del acero AISI 316*

Dureza (Brinell)	Recocido	[HB]	130 – 185
	Trabajo en frío		
Dureza (Rockwell)	Recocido	[HRB]	70 – 85
	Trabajo en frío	[HRC]	
Resistencia a la tracción	Recocido	R_m(N/mm^2)	540 – 690
	Trabajo en frío		
Límite elástico	Recocido	R_p(N/mm^2)	205 – 410
	Trabajo en frío		
Elongación en 50mm	Recocido	[%]	64
	Trabajo en frío		
Resistencia al impacto		Kcul(J/cm^2)	160
		Kvll(J/cm^2)	180

Tabla 1.4 *Propiedades mecánicas a elevadas temperaturas del acero AISI 316*

Temperatura(^{o}C)	**Límite de fluencia [N/mm^2]**
A 550 ºC	82
A 600 ºC	62
A 700 ºC	20
A 800 ºC	6,5
	Límite de elasticidad ($\sigma_{E(0.2)}$) [N/mm^2]
A 300 ºC	140
A 400 ºC	125

A 500 ºC	6,5

1.4.3. Composición química estándar del acero austenítico AISI 316

La composición química estándar de este acero según Databook (1988) y editada por la American Society for Metals, Según el Alloy Casting Institute (ACI), muestra la designación adoptada por la AISI y SAE, las cuales a su vez, coinciden con el sistema de numeración Unified Numbering System – UNS, de la American Society for testing Materials – ASTM y la SAE, se refleja a continuación en la tabla 1.5 y en la tabla 1.6 se reflejan las propiedades térmicas.

Tabla 1.5 *Composición química estándar del acero austenítico AISI 316*

(C)	(Mn)	(P)	(S)	(Si)	(Cr)	(Ni)	(Mo)
0.08	2.0	0.04	0.03	0.75	16.0 -18.0	10.0 - 14.0	2.0 - 3.0

Tabla 1.6 Propiedades térmicas

Recocido	1008 – 1120
Temple	No templable
Forja	Comienzo: 1200 Finalización: 925
Temperatura máxima operación	Serv. Continuo: 840 Serv. Intermitente: 925

1.5. Efectos de los distintos elementos en el acero inoxidable austenítico AISI 316

Los principales elementos que conforman la aleación AISI 316 son el molibdeno, el manganeso, el carbono, y sobre todo el cromo y el níquel.

Cromo: la adición del elemento cromo origina la formación de diversos carburos de cromo que son muy duros; sin embargo, el acero resultante es más dúctil que un acero de la misma dureza producido simplemente al incrementar su contenido de **carbono**. La adición de cromo amplía el intervalo crítico de temperatura. El aumento del contenido de carbono en el acero eleva su resistencia a la tracción, incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad. Además el carbono, poseer un potente carácter gammágeno, contribuye a mejorar el limite elástico. Sin embargo, una cantidad excesiva de carbono provocar un efecto negativo sobre la ductilidad, la tenacidad, y el riesgo de sensibilización y, consecuentemente, la disminución de la resistencia a la corrosión intergranular.

El carbono, hasta contenidos ligeramente superiores a 1,00 % proporciona elevada resistencia mecánica, incrementa la dureza, el límite de fluencia (hasta aproximadamente 350 MPa), la capacidad de endurecimiento y la resistencia al desgaste abrasivo; disminuyendo en contraposición los valores de resistencia al impacto y de la elongación relativa. Subramanyan; et al, (1999); Manganese Centre (1998).

Cuanto mayor es el contenido en cromo de los aceros inoxidables, mayor resulta su resistencia a la corrosión. (Beddoes y Parr 1999).

Níquel: la adición de níquel al acero amplía el nivel crítico de temperatura, no forma carburos u óxidos. Esto aumenta la resistencia sin disminuir la ductilidad.

El cromo se utiliza con frecuencia junto con el níquel para obtener la tenacidad y ductilidad proporcionadas por el níquel, y la resistencia al desgaste y la dureza que

aporta el cromo. En la deformación en frío aumenta la resistencia y conformabilidad del acero.

La adicción del níquel al acero inoxidable le proporciona propiedades como maleabilidad, soldabilidad, magnetismo, aumenta la resistencia a la corrosión y a la fatiga, la resiliencia, la ductilidad, etc. (Beddoes y Parr 1999).

Carbono: es el ingrediente fundamental en el acero, ejerce una gran influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas del acero. Eleva su resistencia, dureza y templabilidad.

Manganeso: el manganeso se agrega a todos los aceros como agente de desoxidación y desulfuración, pero si el contenido de manganeso es superior a 1%, el acero se clasifica como un acero aleado al manganeso. Reduce el intervalo crítico de temperaturas, elemento que inhibe la fragilidad en caliente al formar sulfuro de manganeso (Inchaurza, 1971a)).

Molibdeno: el molibdeno forma carburos y también se disuelve en ferrita hasta cierto punto, de modo que intensifica su dureza y la tenacidad. El molibdeno abate sustancialmente el punto de transformación. Debido a este abatimiento, el molibdeno es de lo más eficaz para impartir propiedades deseables de templabilidad en aceite o en aire. Exceptuando al carbono, es el que tiene el mayor efecto endurecedor y un alto grado de tenacidad (Inchaurza, 1971a).

El molibdeno se agrega a algunos aceros inoxidables al cromo y al níquel para aumentar la resistencia a la corrosión en determinados ambientes agresivos. Además de mejorar la resistencia anticorrosivo, este elemento imparte al producto mejoras en las propiedades mecánicas tanto en frío como en caliente (resistencia a la tracción, termofluencia, etc.) (Inchaurza, 1971a).

1.6. Trabajos Precedentes

Fueron consultados una gran cantidad de trabajos precedentes, en los cuales se vieron expuestas las principales características de los Aceros Inoxidables, así como sus

propiedades entre otras, ejemplo de estos son el trabajo de Sergio G. Laufgang. Aceros Inoxidables, E. De Las Herasa, F. Walthera, P. A. Corengia a G. Ybarra b, C. Moina b N. Mingoloc, S. Brühld, Caboe. Microestructura y Comportamiento Frente a la Corrosión de un Acero Inoxidable, destacándose los de mayor importancia como lo son:

Castellanos (2006), en este trabajo se realizó el análisis microestructural del tramo #5 del transportador de sinfín, donde también se realizaron los cálculos de resistencia mecánica del tramo a elevadas temperaturas, mediante la simulación por elementos finitos.

Cintra (2007), se analizaron esfuerzos residuales a diferentes distancias del centro de la unión soldada de placas de acero inoxidable mediante el proceso SMAW, se realizaron también mediciones para determinar la naturaleza y magnitud de esfuerzos residuales mediante el método de Holle driling. La unión soldada presenta un alto grado de distorsión en la proximidad de la interface. Los esfuerzos residuales disminuyen a medida que se aleja de centro de la unión soldada.

Caraballo (2004), analizó el comportamiento tensional de una acero austenítico del tipo Hadfield donde se demostró comportamiento mecánico y funcional del acero Hadfield endurecido mediante explosivos. Se produce un incremento de las tensiones principales normales de primer género y de la dureza de 872 a 1315 MPa y de 270 a 400 HB respectivamente, y una disminución del desgaste gravimétrico de 0,02524 a 0,00981 g.

Loubert y Mejía (2006), Realizaron el análisis tensional de planchas soldadas de un acero inoxidable asutenítico 304 aplicando el método de Holle driling, donde obtuvieron los siguientes resultados. La placa soldada presenta un alto grado de distorsión y el esfuerzo residual máximo se localiza en las cercanías del cordón de soldadura y que el esfuerzo residual máximo alcanza un valor de 355 MPa, el cual rebasa el 50% de la resistencia a la cedencia del material base, por lo que, la unión soldada bajo estudio pasa a tener un carácter crítico. Asimismo, se corrobora la tendencia a disminuir de esfuerzos residuales a medida que se aleja de centro de la unión soldada.

1.7. Análisis de rotura de los Aceros Inoxidables Austeníticos AISI 316

Desde un punto de vista ingenieril se define la fractura como una discontinuidad física en el sólido.

Es necesario establecer la diferencia física que existe entre un fallo dúctil y uno frágil, puesto que el tratamiento y estudio del comportamiento es diferente en uno que en otro caso.

Un material puede fracturar entre otros motivos, por:

Rotura dúctil: debido a una excesiva deformación plástica, que conduce a la formación de cuellos y que se identificará como una rotura dúctil. Es decir es una rotura que pre-avisa su advenimiento **(Ver anexo 1)**. Esta fractura normalmente se desarrolla bajo estados tensionales tangenciales y por ello su aspecto describe bandas de 45^0 respecto del eje de carga. Este fenómeno produce rotura bajo cargas cíclicas y también se desarrolla bajo mecanismos plásticos, pero siempre muestra indicios de fragilidad.

Rotura frágil: debido a una deformación pequeña que conduce a la propagación de fisuras por el cuerpo del sólido, sin que alcancen a desarrollarse mecanismos plásticos **(Ver anexo 2)**. El aspecto de esta fisura es plana y motivada fundamentalmente por tensiones axiales dirigidas en la dirección de la acción.

La teoría básica de la mecánica de la fractura tiene su origen en el trabajo publicado por Griffith en 1921.

Su objetivo primordial es determinar las combinaciones críticas de tres variables relativas a un componente o estructura: “la tensión aplicada, el tamaño de los defectos que contiene y la tenacidad de fractura del material”. De las consideraciones anteriores se desprende que la aplicación de la mecánica de la fractura resulta fundamental para el diseño de componentes, la planificación de inspecciones en servicio y, en general, para una utilización segura de los materiales en ingeniería.

Según (Irwin 1948) el criterio de fractura establecido por Griffith para materiales frágiles, podía extenderse a materiales dúctiles considerando también la parte plástica de la densidad de energía.

También introdujo un avance importante en la mecánica de fractura ya que planteó el análisis en términos de tensiones (formulación tensional), independientemente de la magnitud de la carga aplicada. Para su formulación, Irwin plantea que el proceso de fractura no puede concentrarse en un solo punto, como se deduciría de un análisis netamente elástico, sino que se presenta en una zona pequeña pero finita, que denomina zona plástica en la cual, las tensiones ya dejan de ser infinitas porque parte de la energía elástica se consume en la deformación plástica del material próximo a la punta.

Según sea el sólido, la fractura puede ocurrir además motivada por otras acciones no mecánicas, como la temperatura, humedad y expansión de componentes en materiales compuestos. También bajo cargas extremas se desarrollan fenómenos reológicos dependientes del tiempo, como los denominados viscosos y que pueden conducir en concurrencia con otros fenómenos a la fractura de estructuras y piezas de máquina. Existen además otros fenómenos que son nocivos y detonantes de posibles fracturas, como la corrosión en metales, entre otros.

En la mayoría de los materiales, la fractura es un fenómeno muy dependiente de la temperatura de servicio, es decir que existe: transición dúctil hacia frágil o viceversa. Según esto los materiales tienen un comportamiento a fractura que no es intrínseco, sino que depende de las condiciones que lo rodean.

1.7.1. Fatiga

Un componente se ve sometido a fatiga cuando soporta cargas alternadas, por ejemplo la rueda de un ferrocarril, la biela de un motor de explosión, entre otros. Pese a diseñarse estas piezas por debajo de su límite elástico, con un número suficiente de ciclos, las piezas se rompen. El 90% de las piezas que se rompen en servicio fallan debido a esta insidiosa patología.

Esto lo descubre August Wöhler, hacia el año 1860, y propone unos límites a las tensiones de diseño en función del número de ciclos que se requieran para una pieza, se conocen como *curvas de Wöhler* o curvas *S-N* (tensión frente a número de ciclos).

Aparece una microgrieta, que crece a medida que se realizan ciclos de carga hasta alcanzar un tamaño tal que la sección remanente es incapaz de soportar la carga máxima en el ciclo y finalmente el ligamento restante rompe de forma frágil o dúctil. A las formas de crecimiento lento de la grieta se les llama subcríticas, como son la fatiga.

1.7.1.1. Estadios de fatiga

Estadio I: grietas cortas

Habitualmente en la superficie se encuentran zonas con altas cargas alternadas que producen deformaciones plásticas en los granos próximos ala superficie.

Esta deformación se localiza en bandas persistentes de deslizamiento. Cuando un grano, situado en la superficie, deforma, se genera un escalón en la superficie, que inmediatamente se oxida. Una vez oxidada la superficie del escalón, resulta imposible invertir la deformación en ese plano. La deformación en sentido contrario deberá acontecer en otro plano, que obviamente forma otro escalón que se oxida y se suprime la deformación en este nuevo plano. La repetición de este ciclo de deformación, oxidación y bloqueo acaba por formar protuberancias o entrantes en la superficie original del sólido, que concentran tensiones. La situación se agrava y termina por aparecer una microgrieta a partir de estos defectos superficiales que se propaga a lo largo de las bandas persistentes de deslizamiento (formando 45º con la dirección de la tracción).

Estadio II

A medida que crece la grieta, pronto descubre que su dirección de crecimiento no es óptima y que su propagación requiere un menor trabajo si se orienta perpendicular al campo tractivo.

Habitualmente la reorientación de la grieta ocurre cuando la microgrieta ha atravesado unos pocos granos en el material.

A partir de este momento su propagación es estable y se ajusta a una ley potencial en el factor de intensidad de tensiones, de acuerdo con la ley empírica que propusieron Paris y Erdogan (1960).

Estadio III

Cuando el tamaño de la grieta es mayor, el máximo factor de intensidad de tensiones durante el ciclo se aproxima a *K*IC. Los *poppings* (pequeñas zonas rotas por clivaje) son frecuentes y la velocidad de crecimiento se acelera aún más por estas contribuciones frágiles a su propagación.

Llega un momento en que se alcanza el valor de *K*IC y la propagación se convierte en catastrófica: la pieza rompe por clivaje o coalescencia de microcavidades.

Este último estadio de la fatiga, en general, carece de interés: la velocidad de crecimiento es tan grande que el número de ciclos consumidos en el estadio III apenas cuenta en la vida de la pieza.

1.8. Corrosión en Aceros Inoxidables Austeníticos AISI 316

La fragilización en caliente de aceros austeníticos es un fenómeno muy investigado desde la década de los 50. Roturas catastróficas producidas en tuberías, depósitos, recipientes a presión, equipos para el trasiego de fluidos y otros muy comunes en plantas químicas, energéticas y metalúrgicas, han dado lugar a que se destinen cuantiosos medios y recursos al estudio de la relación entre el carácter de la rotura de elementos fabricados de aceros austeníticos inoxidables y su microestructura. Lai (1992).

Por mucho que se diseñe por debajo del límite elástico, el factor de intensidad de tensiones crítico, el umbral de fatiga, los materiales y estructuras no son eternos. La mayoría de los metales se encuentran en la naturaleza en forma de óxidos, sulfuros,

nitruros, carburos. Con la excepción de los metales nativos, los metales no son termodinámicamente estables en su artificial estado metálico.

Luego la batalla contra su destrucción está "termodinámicamente" perdida. Lo que podemos es retrasar su vuelta al estado de óxido, sulfuro.

Dependiendo del tipo de compuestos que se formen hablamos de oxidación: formación de óxidos, o corrosión: formación de otro tipo de compuestos (sulfuros, nitruros, carburos).

Tipos de corrosión que pueden afectar a los aceros inoxidables

- Corrosión generalizada.
- Corrosión localizada.
- Corrosión Intergranular
- Corrosión Pitting
- Corrosión Galvánica
- Stress corrosion cracking (corrosión bajo tensiones)
- Crevice corrosion (corrosión por grietas)

Corrosión generalizada

Este tipo de corrosión actúa en forma uniforme en toda la superficie del material, y se debe al debilitamiento uniforme del film de pasivación (óxido de cromo) sobre toda la superficie del acero.

Generalmente ocurre a causa de la mala selección del tipo de acero inoxidable, un ejemplo de corrosión generalizada es exponer acero inoxidable de tipo ferrítico de bajo contenido de cromo (AISI 430) a una moderada solución de ácido sulfúrico a temperatura.

Corrosión Intergranular

Este tipo de corrosión ataca generalmente a los aceros del tipo 18/8 (serie 300), que se exponen a temperaturas entre 430 a 870°C. Este problema se presenta en las proximidades de zonas soldadas en las que durante este proceso el material alcanza estas temperaturas, formándose carburos de cromo en los límites de los cristales de austenita, empobreciendo esta zona de este elemento (cromo) quedando de esta forma expuesto el grano del material a la corrosión.

Una forma de evitar la corrosión intergranular es usar aceros de bajo contenido de carbono (tipo L), y cuando las condiciones temperaturas son aún más severas se debe usar aceros estabilizados. **(Ver anexo 3)**

Corrosión por pitting

Es el ataque localizado (picaduras) que produce penetración en el acero inoxidable. El pitting se asocia con la discontinuidad local del film de pasivación, puede ser debido a, condiciones extremas de agentes corrosivos o a imperfecciones mecánicas, tales como partículas extrañas, daño en la superficie del material, o por fallas en la película de óxido de cromo.

El fenómeno ocurre cuando se rompe la capa pasivante y hay un ataque muy localizado. Es posible prevenir o retardar este efecto, utilizando aceros con contenido de molibdeno. **(Ver anexo 4)**

Corrosión Galvánica

Todos los aceros inoxidables son susceptibles a este tipo de corrosión y se produce por el contacto de dos metales de distinto potencial de oxidación que están en contacto en un medio corrosivo. **(Ver anexo 5)**

Como un metal altamente resistente a la corrosión, el acero inoxidable puede actuar como cátodo cuando está en contacto con un material menos noble, generándose un fenómeno electrolítico que daña la superficie del acero inoxidable.

Stress corrosion cracking (corrosion bajo tensiones)

Este tipo de corrosión es el menos frecuente y como tal el menos estudiado, se trata de un tipo de corrosión transgranular, es producido por tensiones generadas en el material, tales como tracción, deformaciones en frío, soldaduras, etc., ante la presencia de agentes químicos, principalmente compuestos clorados. Este tipo de corrosión se manifiesta por pequeñas en las zonas expuestas a tensión. **(Ver anexo 6)**

Crevice corrosion (corrosión por grietas)

Ocurre solo en las líneas de fusión (línea de soldadura) del metal base en aceros inoxidables estabilizados, al ser expuestos a ácido nítrico concentrado en caliente. Esta corrosión es más rápida en aceros con alto contenido de carbono.

Se puede mejorar esta resistencia con un mayor agregado de estabilizantes y de ser posible no usar estos aceros en presencia de ácido nítrico caliente. **(Ver anexo 7)**

1.9. Descripción de las líneas

Líneas de transporte de NH3

- Línea caliente de recirculación (esta entre el sistema de absorción y enfriadores)
- Líneas de recirculación fría (esta en la misma zona)
- Línea de licor fresco a lixiviación (va de la planta hasta lixiviación)
- Línea de solución al 25% va desde los tanques de solución al 25% hasta el sistema de absorción

Todas estas líneas están constituidas por tramos de 2 hasta 8m de acero inoxidable Austenítico AISI 316, que están sometidas a una presión que oscila entre 3.8 y 3.9Atm, la temperatura de las líneas fría fluctúa entre 32 y 40 grados Celsius mientras que en las líneas calientes el rango de temperatura es de 50 a 70 ^{0}C.

1.10. Conclusiones del capítulo

1. Los Aceros Inoxidables, desde el punto de vista de la corrosión, son reactivos, debido a que la película de productos de la corrosión que se forma sobre la superficie, se adhiere tan fuertemente, es tan continua e impermeable, que lleva al material a un estado que se llama pasivo cuyo comportamiento frente a medios oxidantes es similar a el de los metales nobles.
2. Cuando se selecciona un Acero Inoxidable deben preverse exactamente las condiciones de servicio, cualquier pequeña variación por insignificante que parezca (tanto cuantitativamente como cualitativamente) puede producir fracasos.
3. Luego del análisis bibliográfico podemos afirmar que las tensiones en uniones soldadas de acero AISI 316 alcanzan aproximadamente el 50% del límite de fluencia para estos materiales (sin tener en cuenta las cargas externas), por eso se considera como la parte más sensible de una unión soldada de acero AISI 316 la zona de influencia térmica (ZIT).

CAPITULO II. Materiales Y Métodos

2.1. Introducción

Para el diseño y explotación de las líneas frías y calientes de recirculación en el transporte de amoníaco, es necesario tener en cuenta algunas variables, por lo que el **Objetivo del capítulo** desarrollar una metodología de cálculo que nos permita determinar con exactitud el comportamiento mecánico del material en ambientes muy agresivos. Uno de los métodos más comúnmente utilizados es el experimental, el cual ha sido siempre una potente herramienta para la solución a los problemas de averías en equipamientos industriales.

2.1.1. Fundamentación de las propiedades a investigar

El estudio de fallas de elementos que operan en ambientes muy agresivos (elevadas temperaturas, alta corrosión y en presencia de partículas erosivas) constituye uno de los principales focos para las industrias del níquel en esencial a la Planta de Hornos de Reducción de la ECG, por las incalculables pérdidas económicas y efectos sociales y medioambientales que implican para la humanidad. Debido a ello en este capítulo se describirán los experimentos y métodos para determinar los parámetros más influyentes en la longevidad del acero inoxidable AISI 316.

El tipo de falla se establece mediante el análisis de las superficies de fractura y la comparación de los datos iniciales disponibles con las condiciones de operación del componente respecto a las cargas actuantes. En este caso, se requiere de un análisis más completo, ya que las temperaturas y el tiempo afectan la durabilidad de los mismos bajo la acción de los esfuerzos. Sin embargo, un análisis del tiempo de rotura o falla no está completo sin los consiguientes criterios metalográficos para establecer el mecanismo de la falla inicial.

2.2. Selección y preparación de muestras

Las informaciones obtenidas de los reportes de averías en la Planta de Recuperación de Amoniaco de la Empresa Ché Guevara, el seguimiento prestado a la durabilidad de las líneas frías y calientes de recirculación para el transporte de esta sustancia previamente marcado desde la puesta en explotación hasta la rotura y los resultados obtenidos en investigaciones anteriores sobre la frecuentes roturas permitieron establecer el criterio de decisión a tomar en cuanto a las irregularidades de la superficie.

Una vez cortada la muestra al tamaño adecuado se obtiene una superficie plana por limado. Desde el principio se tendrá cuidado de reducir al mínimo la profundidad del flujo y de la distorsión del metal que tiene lugar por la superficie trabajada.

Después de nivelar la superficie de la muestra con un lima fina, por medio de rectificado con refrigeración en una máquina rectificadora, la cual procede a eliminar el redondeando de los ángulos o bordes de las muestra.

Rectificadora Modelo: 3A151

Potencia del motor del cabezal de rectificar Nm = 7 kW.;

Rendimiento de la rectificadora = 0.8.

Frecuencia de la pieza a rectificar: 63 - 400 rev/min.

Velocidades de carreras longitudinales de la mesa 0.1 - 6 m/min (regulación sin escalones).

Avance periódico transversal de la muela (mm/carrera): 0.05.

Luego se procede a desbastar la muestra empleando de forma sucesiva papeles o telas de lija cada vez más finos, con la serie de 80, 100. 400, 600.

La cual se emplea colocándolo sobre una placa de vidrio de unos 6mm de espesor; con un movimiento firme de vaivén que acerque y aleje al operador, hasta formar un sistema plano y uniforme de rayas paralelas.

Donde el objetivo primario de este método es eliminar las capas de metal distorsionado y deslizado. Ya que en el examen del material se buscan defectos tales como grietas finas o gordas, porosidades o inclusiones.

Después de haber pasado la muestra por la lija, ya esta dispuesta para el acabado. Se lava con agua y se aplica contra un disco que gira rápidamente y esta cubierto con un tejido adecuado impregnado con una suspensión acuosa de polvo de pulir, donde la instalación se encuentra en un laboratorio del ISMM con las siguientes características:

Potencia del motor: 5H.P

Intensidad de corriente: 2 - 5A

Voltaje: 250V

Velocidad de rotación: 1000 rev/min

Después de la adecuada preparación de las superficies, las probetas se lavan con acetona para eliminar restos de grasa, polvo y pasta de pulir cuidando no frotar la superficie pulida. Posteriormente se limpian con etanol absoluto para eliminar cualquier vestigio de humedad.

Inmediatamente después de la limpieza, se procedió a realizar el ataque de las superficies a investigar. Se emplearon las técnicas de ataque químico. En el laboratorio del ISMM.

Composición de los reactivos, fueron tres partes de ácido clorhídrico con un (peso 3) y una parte de ácido nítrico con un (peso especifico de 1,48 específico de 1,9 kgf/m 3kgf/m).

Después de atacadas, las superficies de las muestras se lavan con agua destilada y posteriorm

CONCLUSIONES GENERALES

1. Los resultados del cálculo de Resistencia Mecánica demuestra que las tensiones no alcanzan valores lo suficientemente grandes para que se produzca la rotura de las tuberías, o se formen grietas en la parte interna de las mismas, no obstante se puede afirmar que las deformaciones en el interior del las tuberías pueden producir irregularidades en la forma del elemento lo que lo hará más vulnerable a la corrosión y a la fatiga.

2. Luego de realizar la modelación por el método de elementos finitos (MEF) podemos plantear que las tensiones y deformaciones máximas aparecen en los extremos y en las inmediaciones de los tubos; aunque bajo condiciones de trabajo dadas podemos plantear que las mismas alcanzan valores poco significativos para que la falla se produzca por la acción de cargas externas no cíclicas. Por lo que podemos afirmar que la rotura precoz de las líneas frío caliente de recirculación se debe a la incorrecta técnica aplicada durante el proceso de soldadura y la selección incorrecta de los consumibles de soldadura.

3. Las investigaciones realizadas revelan que el Amoniaco es una sustancia perjudicial para el hombre debido a las afectaciones que este provoca, por lo que todo el personal que labore con este tipo de sustancia debe cumplir estrictamente con las medidas de seguridad para su uso y transporte, evitando a toda costa el derrame de esta sustancia.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda usar electrodo **E 316-L** según la norma AISI del 2003, para las uniones de las líneas siempre que el material tenga la misma composición química que el analizado, o seleccionar el consumible de soldadura relacionando la composición del electro y del metal base (**Diagrama de Schaeffler**).
2. Realizar el mantenimiento de las líneas según se establece en normas y evitar el uso frecuente de parches y no usar aceros con alto contenido de carbono, debido a que esto favorece a la formación de tensiones residuales de tracción y compresión que van a disminuir la resistencia a la corrosión del material, producto a la formación de carburos de Cromo y que los aceros al carbono tienen mala resistencia a la corrosión.
3. Continuar investigando la rotura prematura de las líneas y determinar las tensiones residuales usando métodos más precisos, para así tener un resultado más confiable, además en necesario que se realicen ensayos a la corrosión de diferentes zonas de la sección de los tubos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ALFONSO E.; MARTIN, J. Aplicación de la Ley de Wolf - Bragg en la determinación de las tensiones residuales de primer género. Memorias del II Taller Internacional de Didáctica de la Física "DIDACFISU' 2000". Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos". 2000. 7p. Disponible en la World Wide Web en. http://www.ucbcba.edu.bo/institut/cexactas/didacfisu/documentos/ActasHTML/AplicacionDeLaLeyDeWolfBragg.html
2. ALFONSO, E. Formación de la estructura y propiedades de las capas superficiales de las piezas de acero templado y revenido mediante su elaboración por corte. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas. 199 p. Instituto de Construcción de Maquinarias Químicas. Moscú. 1990.
3. ALFONSO, E.; et. al., Determinación de las tensiones residuales de primer género en las capas superficiales del acero templado y revenido, tratado por corte, utilizando la difractometría por rayos x, La Habana: Fondo Nacional de Manuscritos Científico - Técnicos del CITMA, 1994. 6p
4. ALFONSO, E.; et. al., Investigación del mecanismo de formación de la acritud y tensiones residuales en las capas superficiales durante el proceso de corte de piezas endurecidas, p.52-56, Construcción de Maquinarias (Santa Clara). No. 1. Ene-Abr. 1995.
5. ALFONSO, E. Apuntes sobre la interrelación composición– microestructura – propiedades del acero. Monografía. ISBN 959-16-0188-3. Universidad de Matanzas. 2002. Disponible en la Intraweb de la Facultad de Ingenierías Química y Mecánica de la UMCC en. http://lib.fiqm.umcc.cu/download.asp?id=steel/cover.pdf&typ=book
6. ALFONSO, JR. Estadísticas en las Ciencias Geológicas. Tomo 2. Editorial ISPJAE 1989.
7. AVILA, J. Corporación editorial Ma. Teresa Cuesta. Manuel editado por el Centro Nacional para el Desarrollo del acero inoxidable Acero Inoxidable (CENDI). "Acero Inoxidable". Mayo 2002.

8. BARRET, C. Estructura de los metales. 1 ed. Editorial Aguilar. Madrid. 1957. 838p.

9. BEDDOES, J.; PARR, J. G. A review of stainless steel: What are they; What they do. En: Introduction to stainless steel. Beddoes, J. y Parr, J.G. (Eds). Pp. 1-30. American Society for Microbiology: Washington D.C. 1999.

10. BORENSTEIN, S. W. Microbially influenced corrosion handbook. Woodhead, Cambridge. 1994.

11. BURGOS, S. J. Tecnología de la soldadura – 1 ed -. Editorial Pueblo y Educación. La Habana. 1987. 285 p.

12. CALLISTER, W. Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Departament of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley & Sons, Inc. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7. 1999.

13. CARABALLO, M. A. Comportamiento de piezas de acero Hadfield endurecidas mediante explosivos. Revista Minería y Geología. Volumen XX. No. 1. 2004.

14. CARABALLO, M. A. Comportamiento físico del acero Hadfield, en presencia de cargas explosivas. Revista Minería y Geología. Volumen XX. No. 2. 2004.

15. CARABALLO, M. A; FELIU, R. M. Mecánica de la fractura. Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa. 2006

16. CULLITY, B. D. Elements of X – Ray Difraction. Department of Metallurgical Engineering and Materials Science. University of Notre Dame. Instituto Cubano del Libro. Ediciones Revolucionarias. La Habana. 1967. 514p.

17. DAVIS J. R.: Heat-Resistant Materials (American Society for Metals, Specialty Handbook, U.S.A. (1997)

18. DI CAPRIO, G. Notas históricas y de producción sobre los aceros inoxidables. En: Los aceros inoxidables. Grupinox: Barcelona. 1999a.

19. DI CAPRIO, G. La resistencia a la corrosión. En: Los aceros inoxidables. Grupinox: Barcelona. 1999b.

20. EASTERLING, K. Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworth-Heinemenn, pp. 18-19. 1992.

21. GRIFFITH, A. "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids". Philosophical, A221, p. 163, 1921. Transactions of Royal Society.

22. GULIAEV, A. P.: Metalografía. Tomos I y II, Moscú: Editorial Mir, 1983.

23. INCHAURZA, A. Corrosión de los aceros inoxidables. En: Aceros Inoxidables y refractarios. pp. 32 – 51. Olsa (Olarra, S.A): Vizcaya. 1971b.

24. ISABEL, B. G. Estudio de la actividad bactericida de aceros inoxidables aleados con cobre. Sevilla, 2005. Disponible en World Wide Web http://fondosdigitales.us.es/public_thesis/393/9178.pdf.

25. JAMES, M. R.; BUCK, O. Quantitative Non-destructive Measurements of Residual Stresses, CRC, Critical Reviews in Solid State and Materials Science, Vol. 9, Issue 1. 1980.

26. JAMES, M. R. In Handbook of Measurement of Residual Stresses, Edited by J. Lu, Society for Experimental Mechanics, Inc., pp. 1-4. 1996.

27. J. R. Davis: Heat-Resistant Materials (American Society for Metals, Specialty Handbook, U.S.A. (1997)

28. KELSEY, R. A. 1956: Proceedings SESA, 8, (1), pp. 17-28.

29. KEY TO STEEL. Influence of Alloying Elements on Steel Microestructure. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en sitio Web http://www.key-to-steel.com/

30. KEY TO STEEL. Fracture Thoughness. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en la World Wide Web en http://www.key-to-steel.com/

31. LAMBERTS, R. Modelación del comportamiento del acero al alto manganeso en presencia de cargas explosivas aplicando el Método de los Elementos Finitos. Trabajo de Diploma. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2003.

32. LEFEVRE, P.; Reynaud, F. *Choix d'un format de représentation normalisé de la estructure physique des documents*, Clamart: EDF, Mars 1993, 97 p. Collection de notes internes de la direction des Études et Recherches EDF.

33. LEYVA, Y. T. Apantallamiento de en la soldadura. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2006

34. LULA, R. A. "*Stainless Steel*". American Society for Metals, Ohio. 1965

35. LUZINETE, P. B. y Costa, I. Instituto de Pesquisas Energéticas y Nucleares, Ipen/cnen-spCentro de Ciencia y Tecnología de Materiales, Laboratorio de Corrosión. Evaluación de la resistencia a la corrosión de los filtros del acero inoxidable de AISI 316. Mat. Res., abr./jun. 2005, vol.8, No.2, p.165-168. ISSN 1516-1439.

36. MACHERAUCH, E.; Kloos, K. H. Proc. Int. Conf. Residual Stresses in Science and Technology, Vol. 1, Garmisch-Partenkirchen, DGM-Verlag, Oberursel, pp. 3-26. 1986.

37. Mathar, J. Transactions ASME, 56, (4), pp. 249-254, 1934.

38. MASUBUCHI, K. Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, Elmsford, N.Y. 1980.

39. MEJÍA, C.; Loubert, R.D.; et al. S31ago, Universidad Tecnológica de la Mixteca. "*Determinación de esfuerzos residuales generales durante la soldadura de placas de acero inoxidable austenítico mediante el método de Hole Drilling*", según norma ASM 837-99, p.12, 2006.

40. MONNARTZ, P. Beitrag zum studium der eisenchromlegier unger unter besonderer beücksichtigung der säurebeständigkeit. Metalurgie 8: 161-170 y 193-201. 1911.

41. PERKINS, H.C.; Reynolds, W.C.: Engineering Thermodynamics. McGraw-Hill, ISBN 0-07-052046-1. 712 P. 1980.

42. SURATMAN, R; PERMANA, M. S. Effect of solution treatment on Hadfield's Steel Microstructures. University of Pasundan. West Java. Indonesia. 2001. Disponible en World Wide Web http://www.maxpages.com/msper2000/A1_Alloy

43. RADHAKRISHNAN, V.M.; et al. Subestructure characterizing parameter in creep, J. of Mater. Science, 30, 1521-1528, 1995.

44. RENDLER, N. J.; VIGNESS, I. 1966: Experimental Mechanics, 6, (12), pp. 577-586.

45. RUUD, C. In Handbook of Residual Stresses and Deformation of Steel, Edited by Totten G., Howes M. and Inoue T., ASM International, pp. 99-110, 2002.

46. SARKAR, A. D. Friction and wear. Academic Press Inc. (London) LTD. London. 1980. 423 p

47. SHREIR, L. L. The microbiology of corrosion. En: Corrosion 1. Wiley, J. (Ed). pp. 2.52 – 2.64. New York. 1963.

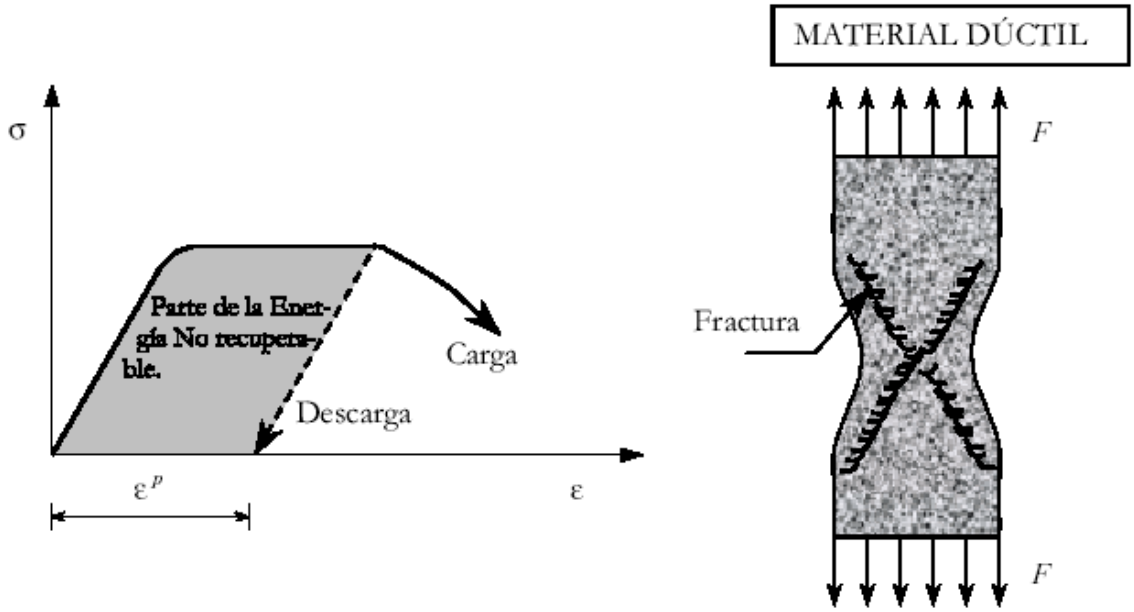
48. SCHAJER, G. S. Hole – Drilling Residual Stress Calculation Program (H-Drill), v. 2.2. 2001.

49. SOETE, W.; VANCROMBRUGGE, R. 1950: Proceedings SESA, 8, (1), pp. 17-28.

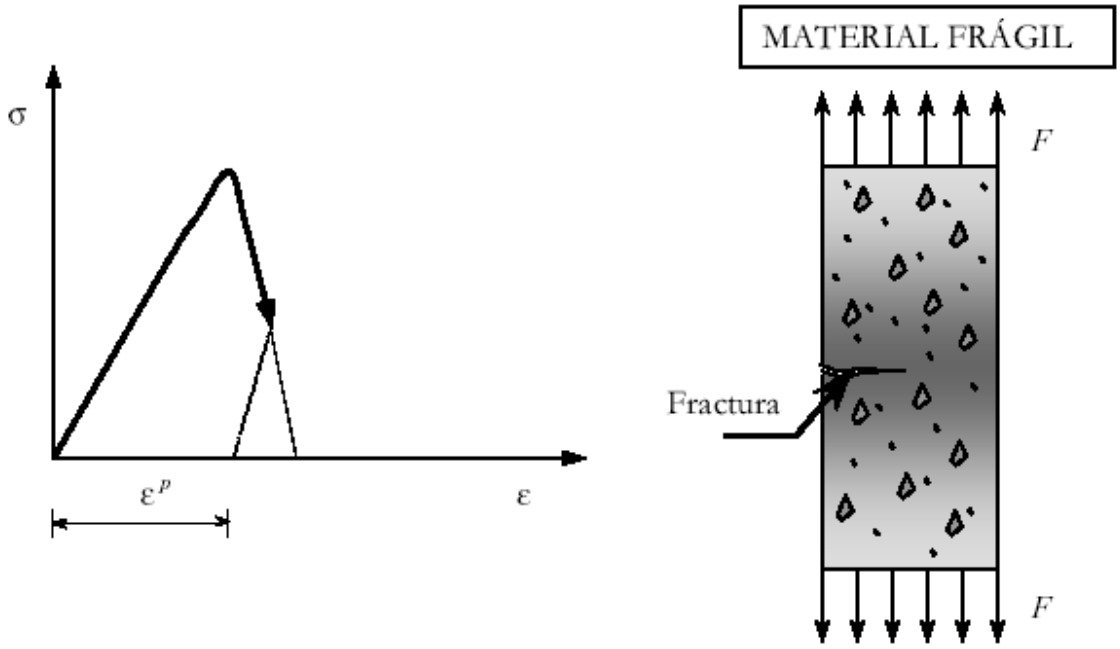
50. SUBRAMANYAN, D K; et al. Austenitic Manganese Steel. ASTM. Specialty Steel and Heat Resistant Alloys. ASTM Hanbook. USA. 1999. pag 822-840

51. TORRES, E. Influencia del Cr y el Ni en las propiedades mecánicas y funcionales de los depósitos de soldadura de acero austenítico al alto manganeso. Tesis en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Universidad de Matanzas “Martha Abreu”. 2002.

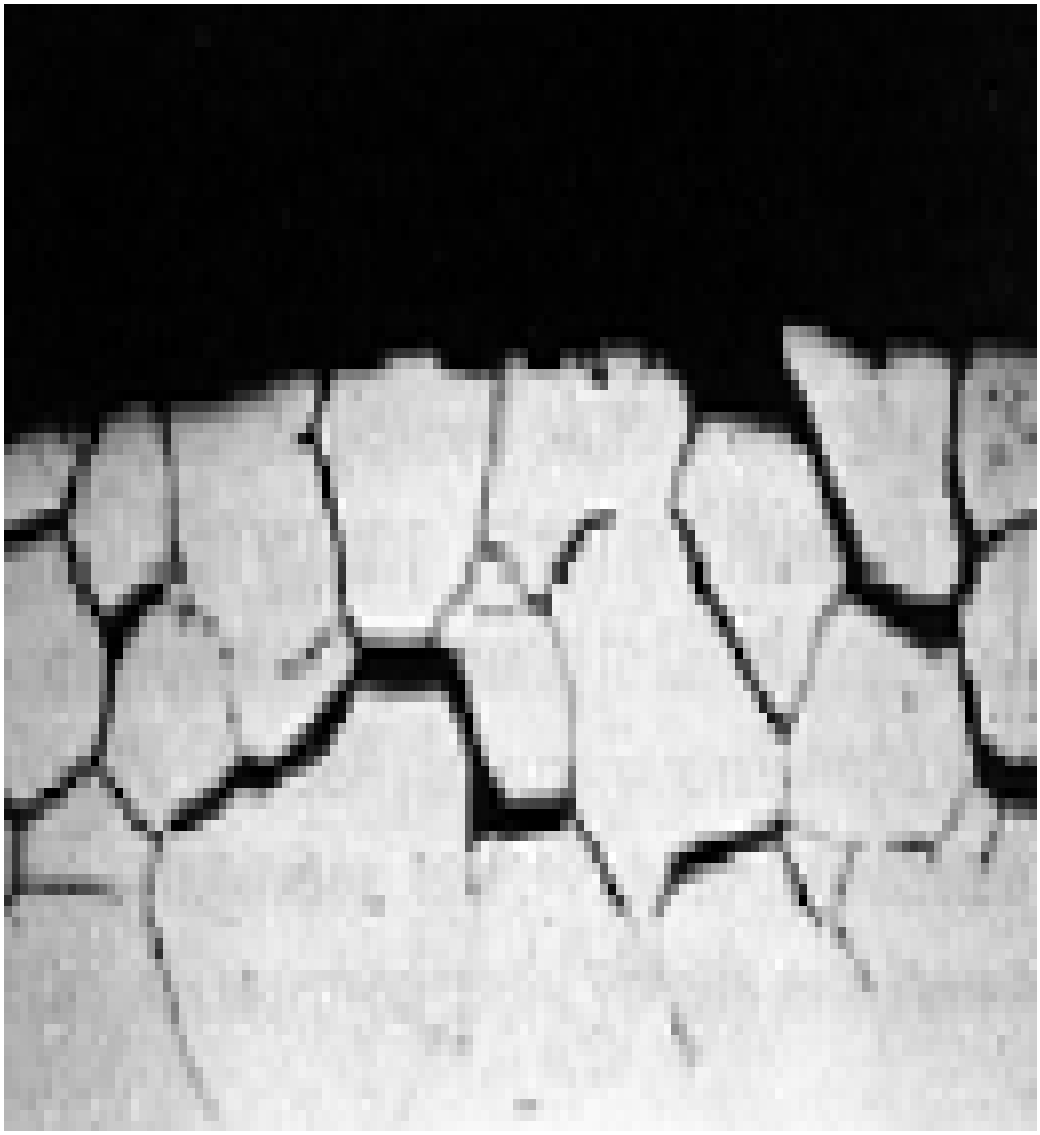
52. ZINN, W.; Scholtes, B. In Handbook of Residual Stresses and Deformation of Steel, Edited by G. Totten, M. Howes and T. Inoue, ASM International, pp. 391-396. 2002.



Anexo1. *Comportamiento esquemático de un material dúctil*



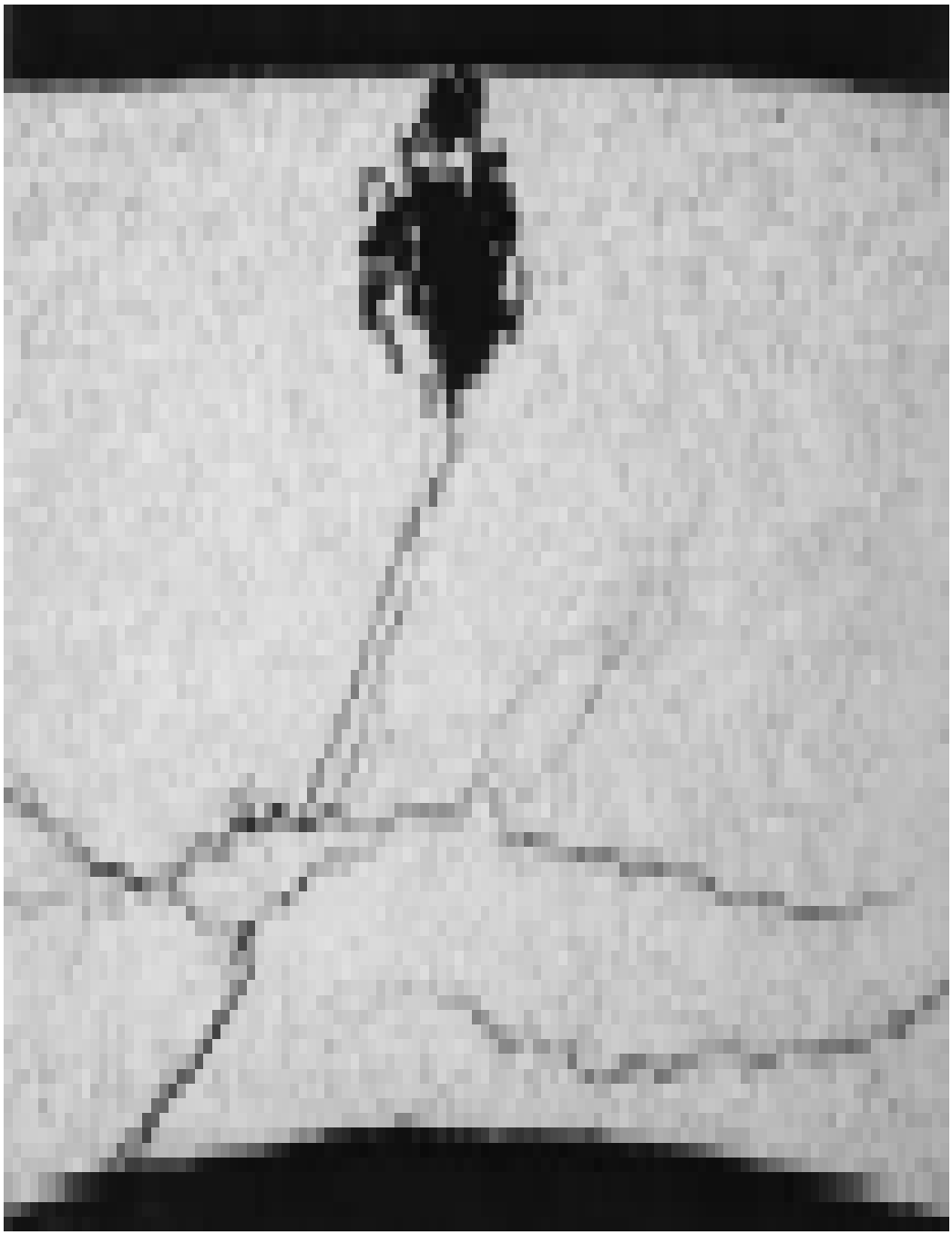
Anexo2. *Comportamiento esquemático de un material frágil*



Anexo3. *Corrosión Intergranular*

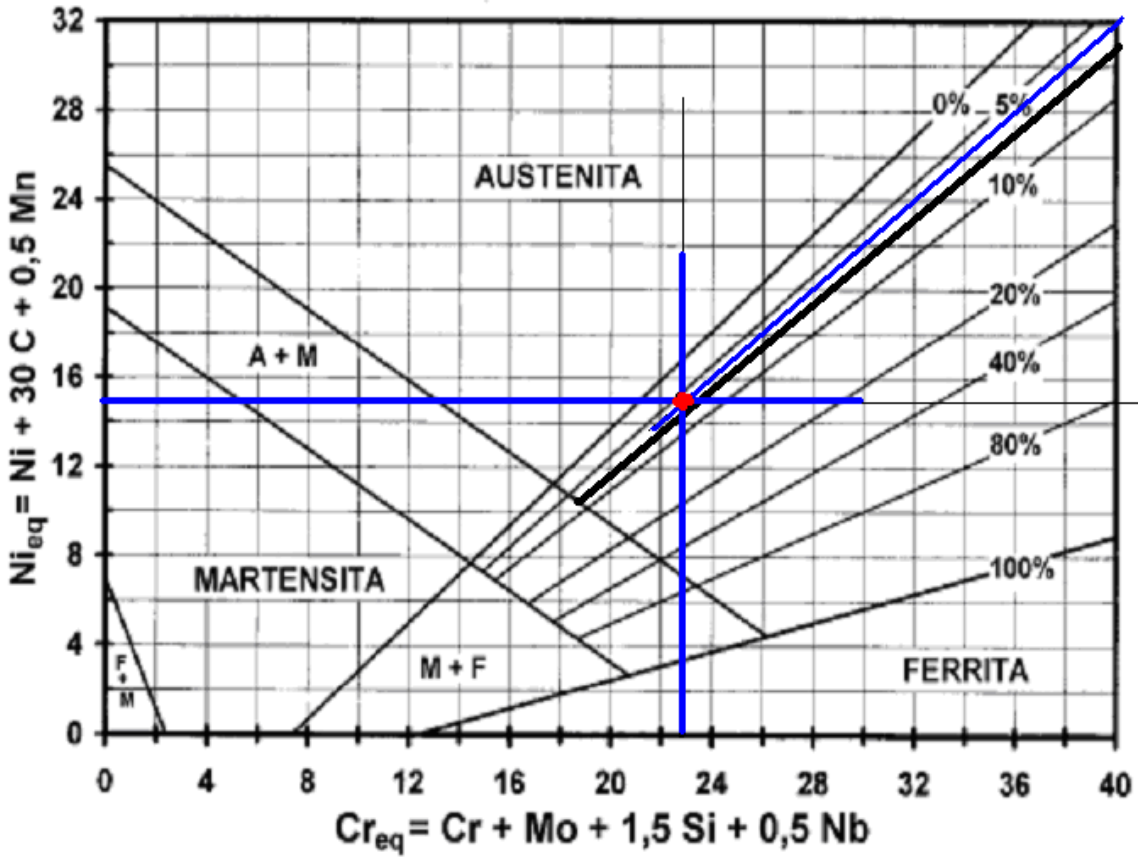
Anexo4. *Corrosión por pitting*

Anexo5. *Corrosión Galvánica*



Anexo6. *Stress corrosion cracking (bajo tensiones)*

Anexo7. *Crevice corrosion (grietas)*



Anexo8. *Diagrama de Schaeffler*