



*República de Cuba
Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"
Departamento de Metalurgia Electromecánica*

Trabajo de Diploma

Tesis en opción al Título de Ingeniero Mecánico

Título: Cálculo de las tensiones en la garganta del cordón de soldadura en una línea de tubería de licor amoniacal.

Autor: Diolvis Leyva Heredia.

Tutores: Ing. Geovany Ruiz Martínez.

M. Sc. Tomas Fernández Columbié.

Profesor Consultante: M. Sc. Isnel Rodríguez González.

*Moa – 2010
"Año 52 de la Revolución"*



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo Diolvis Leyva Heredia:

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Diolvis Leyva Heredia

Firma del Diplomante

Ing. Geovany Ruiz Martínez

Firma del Tutor

Ms.C. Tomás Fernández Columbié

Firma del Tutor



PENSAMIENTOS

"En la tierra hacen falta personas que trabajen más y critiquen menos, que construyan más y destruyan menos, que prometan menos y resuelvan más, que esperen recibir menos y den más, que digan mejor ahora que mañana."

Che

"...la verdad es que da vergüenza ver algo y no aprenderlo, y el hombre no ha de descansar hasta que aprenda todo lo que ve."

José Martí



DEDICATORIA

Dedico este trabajo a todos los que de una forma u otra han contribuido a su realización, a la Revolución por haberme dado esta oportunidad de ser alguien en la vida, a mis padres por la ayuda y por la confianza depositada en mi, y toda mi familia a mi esposa y toda su familia por su apoyo, a mis tutores por su valiosa consagración y todos los que me han apoyado para lograr este resultado tan importante para mi, a todos ellos muchas gracias.



RESUMEN

En el presente trabajo se realizaron los cálculos de las tensiones en la garganta de un tramo de tubería para el transporte de licor amoniacal. En el mismo se describen las características del Acero Inoxidable Austenítico AISI 316 así como su importancia, modo de empleo y aplicación. Se obtuvo el porcentaje de ferrita generada durante el proceso de soldadura, además se comprobó la resistencia mecánica, bajo la acción de temperatura y presión de trabajo. Se realizó la simulación por el método de elementos finitos (MEF), con el empleo del ANSYS versión 11.0. Donde se obtuvieron los valores de tensiones, deformaciones y el comportamiento de la temperatura durante el proceso de soldadura. Con los resultados obtenidos se pudo demostrar que la rotura en las tuberías no es generada por la presión o temperatura de trabajo.



ABSTRACT

Presently work was carried out the calculations of the tensions in the throat pipe tract for the transport of liquor amoniacal. In the same one the characteristics of the Stainless Steel Austenitico AISI 316 are described well as their importance, employment way and their application. The ferritepercent was obtained generated during the welding process, he/she was also proven the mechanical resistance, under the action of temperature and workpressure. One carries out the simulation for the method of finite elements(MEF), with the employment of the ANSYS version 11.0. Where the values of tensions, deformations and the behavior were obtained of to the temperature during the welding process. With the obtained results it could demonstrate himself that the break in the pipes is not generated by the pressure or work temperature.



ÍNDICE

Contenido	Págs.
Introducción.	1
Capítulo I Marco teórico de la investigación.	4
1.1- Introducción.	4
1.2- Zonas estructurales de la unión soldada.	6
1.3- Características de los aceros inoxidables austeníticos.	6
1.4- Defectos en la soldadura de los aceros inoxidables.	7
1.4.1.- Fragilidad en los aceros inoxidables austenítico.	9
1.5.- Efectos de los elementos en los acero inoxidables austeníticos AISI 316.	10
1.6.- Efectos del calor en la soldadura.	12
1.7.- La fluencia lenta en los aceros austeníticos.	13
1.8.- Tensiones residuales en uniones soldadas.	15
1.8.1.- Deformaciones y esfuerzos de tensión en la soldadura.	16
1.9.- Corrosión en los aceros inoxidables.	17
1.9.1- Efecto de la soldadura en la resistencia a la corrosión.	19
1.10- Simulación del proceso de soldadura por el Método de Elementos Finitos (MEF).	20
Conclusiones del capítulo I.	21
Capítulo II Materiales y métodos	
2.1- Introducción.	22
2.2- Caracterización de fallas en equipos.	22
2.3- Composición química estándar del acero austenítico AISI 316.	23
2.3.1 - Propiedades de acero AISI 316.	24
2.4- Determinación de la soldabilidad mediante el Diagrama	26



	de Schaeffler.	
2.5-	Cálculo de la resistencia mecánica en tuberías de Aceros AISI 316.	28
2.5.1-	Tensiones provocadas por las temperaturas.	29
2.6-	<i>Análisis tenso- deformacional mediante métodos numéricos.</i>	32
2.6.1-	Solución numérica del problema.	32
2.6.2-	Metodología utilizada.	33
2.6.3-	El sub-estructurado del elemento se desarrolló siguiendo la siguiente secuencia.	34
2.6.4-	Algoritmo para la simulación (ANSYS versión 11.0).	35
	Conclusiones del capítulo 2.	35
Capítulo III	<i>Análisis de los resultados. Impacto ambiental.</i>	
3.1-	Introducción.	36
3.2-	Resultado del cálculo de soldadura.	36
3.3-	Determinación del porcentaje de ferrita	36
3.4-	Resultados del cálculo de resistencia mecánica.	37
3.5-	Análisis de los resultados de la simulación por el Método de Elementos Finitos.	38
3.6-	Valoración Económica	
3.7-	Impacto Ambiental.	44
3.7.1-	Daños provocados a las distintas zonas de los ojos.	45
3.7.2-	Contaminación del aire con el polvo y con los vapores y gases nocivos.	47
	Conclusiones del Capítulo 3	48
	Conclusiones Generales.	49
	Recomendaciones.	50
	Bibliografía.	51



INTRODUCCIÓN

El empleo de los aceros inoxidable en la industria minero-metalúrgica ocupa un lugar determinante debido a la combinación de sus buenas propiedades mecánicas y físicas bajo condiciones de corrosión y altas temperaturas, aumentando el desarrollo de los mismos. Estos se dividen en cuatro grupos:

Austeníticos, Martensíticos, Ferríticos y los que se endurecen por precipitación. Estas clasificaciones se refieren principalmente a la estructura de los aceros. La estructura martensítica es dura y frágil, la ferrítica es blanda y dúctil, en cambio la austenítica es de alta resistencia a la tensión, al impacto y al mismo tiempo dúctil.

Los aceros inoxidable descansan principalmente en la presencia de cromo para lograr las cualidades de inoxidable. En general, mientras más alto sea el contenido de cromo, más resistente a la corrosión será el acero. Los elementos de aleación en el acero pueden clasificarse como estabilizadores de austenita y estabilizadores de ferrita. Los estabilizadores de austenita de importancia son el carbono, níquel, nitrógeno y manganeso. Estos elementos mejoran la retención de la austenita conforme se enfría el acero. Cuando está presente 12% o más de manganeso, o cuando está presente 20% o más de níquel, es imposible enfriar el acero con la lentitud suficiente para permitir que la austenita se transforme en ferrita.

La adición como mínimo de 8% de níquel a un acero con 18% de cromo lo transforma en austenítico manteniendo sus características de inoxidable. Esta y otras modificaciones, constituyen la serie 300 de la familia de Aceros inoxidable austeníticos o también llamados al cromo -níquel.

Los aceros austeníticos constituyen la familia más grande de los aceros inoxidable, en términos del número de la aleación y aplicaciones. No pueden ser endurecidos por tratamiento térmico, no son magnéticos y sus estructuras son cúbicas de cara centrada, poseen excelente ductilidad y buena soldabilidad a temperaturas criogénicas. La soldadura también puede inducir tensiones residuales en el área soldada, lo cual en ciertos ambientes puede resultar en

roturas por corrosión bajo tensión. Uno de los primeros problemas de corrosión relacionados con la soldadura fue el ataque intergranular, en la zona soldada afectada por la temperatura. En el rango de temperaturas que va de 425 a 900 ° C, el carbono se combina con el cromo para formar carburos de cromo en el borde de los granos. El área adyacente a los carburos tiene menor cantidad de cromo. Cuando la red de carburos es continua, la envoltura empobrecida en cromo alrededor de los granos puede ser atacada selectivamente, resultando en corrosión intergranular. En el peor de los casos, la capa empobrecida en cromo se corroe completamente y los granos se separan del metal de base. Se dice que las aleaciones están sensibilizadas, cuando por soldadura o tratamientos térmicos, existen áreas empobrecidas en cromo que puedan ser atacadas en estos ambientes corrosivos. Las aleaciones sensibilizadas aún pueden prestar buenos servicios en muchos de los ambientes moderados en que se usan los aceros inoxidable.

Situación problemática

El grupo de los aceros austeníticos al cromo-níquel tiene la mayor importancia dentro de los aceros inoxidable. La soldabilidad de los aceros austeníticos de la marca 316 a pesar de ser fácilmente soldables no endurecen por temple ni tienden a tener temple en la zona de influencia térmica (ZIT), así como tampoco crecimiento del grano en lo esencial, pero aparecen en determinadas circunstancias problemas asociados al material base y en el depósito. La mayor dificultad al soldarse los mismos radica en su tendencia a la formación de grietas en caliente condicionadas por su constitución.

Problema

Desconocimiento de las tensiones y deformaciones generadas por el incremento de la temperatura en la garganta del cordón de soldadura en una línea de tubería de licor amoniacal.



Hipótesis

Si se realiza la simulación de la soldadura en uniones tubulares de acero inoxidable AISI 316 es posible determinar la influencia de la temperatura en el comportamiento tenso deformacional de las uniones antes mencionada.

Objetivo

Determinar a través de la simulación por el método de elementos finitos el comportamiento de las tensiones en la garganta del cordón de soldadura de la línea fría y caliente para el transporte de licor amoniacal.

Objeto

La garganta del cordón de soldadura de la línea de tubería de licor amoniacal.

Objetivos Específicos

- Calcular la resistencia mecánica de la garganta del cordón de soldadura de la línea de tubería de licor amoniacal.
- Simular el comportamiento termo mecánico del cordón de soldadura de la línea de tubería de licor amoniacal.
- Realizar el análisis de los resultados obtenidos.

Tareas

- Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
- Analizar los efectos de las temperaturas de trabajo sobre las tensiones y deformaciones del acero AISI 316 por el Método de Elemento Finito (MEF).
- Simulación mediante el método finito el comportamiento del material cuando es sometido a elevadas temperaturas de trabajo producto del proceso de soldadura por arco eléctrico.
- Valoración de los resultados obtenidos.

CAPITULO I

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

Dentro del total de la producción mundial de aceros inoxidables, el 52 % pertenece a los aceros austeníticos inoxidables al cromo - níquel. La selección de estos materiales para aplicaciones que implican resistencia a la corrosión a altas temperaturas requiere de un conocimiento profundo sobre los mecanismos y la cinética de la formación de capas superficiales, su composición química, estructura, mecanismos de difusión. Todos estos factores y otros que están estrechamente relacionados con las propiedades mecánicas y estructurales a altas temperaturas permiten la adecuación del acero para usos específicos (De Meyer et al., 2001).

El objetivo del presente 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 Zonas estructurales de la unión soldada

En una unión soldada se distinguen macrográficamente dos partes fundamentales: la zona fundida, constituida por el cordón de soldadura con la región adyacente y el metal base.

La Zona Fundida (ZF), formada únicamente por el metal solidificado a partir del estado líquido sufre, durante la fusión, un cierto número de transformaciones que son de tipo químico, físico o estructural diferenciándose del metal base por su composición química, estructura y propiedades.

El metal base, también sufre un tratamiento técnico variable según el punto que se considere y, por ello, es asiento de transformaciones de tipo físico químico. La importancia de estas transformaciones es función, por una parte, del ciclo térmico y por otra, de la misma naturaleza de la aleación; aleaciones templables (aceros), aleaciones sensibles a los cambios de fase por precipitación.

Los fenómenos son complejos y difieren según la aleación considerada. También es indispensable estudiar las modificaciones separadamente en la zona fundida y en el metal de base, la que detallaremos a continuación.



❖ **Zona fundida**

En la zona fundida de la unión soldada ocurre el proceso metalúrgico donde se ponen de manifiesto cierto número de fenómenos como:

1. Modificaciones químicas.
2. Absorción de gas.
3. Precipitación de compuestos definidos de la solución sólida.
4. Transformaciones eutécticas.
5. Modificaciones estructurales.

❖ **Metal base**

Cuando se comienza a soldar existe un proceso térmico inestable, en el cual la cantidad de calor procedente de la fuente de calor (proceso de soldadura) es mayor que la cantidad de calor que se evacua mediante la conductividad térmica, por lo que existen dos efectos en la Zona Limite de la soldadura: resultados del calentamiento a temperaturas extremadamente altas y resultados del enfriamiento rápido. Por lo que un manejo adecuado de las variantes de soldadura requiere dejar muy claro en primer lugar qué tipo de acero es el que se está soldando, en qué estado se encuentra originalmente y cuál es su respuesta frente a variaciones de los ciclos térmicos impuestos sobre él durante la soldadura. El manejo de las variables puede llegar a ser cuantitativo en algunos casos, pero si no lo es, al menos se requiere tener una idea cualitativa clara sobre cual es el problema potencial y en qué dirección afectan cada una de las variables que puede contener un procedimiento de soldadura. Para ello es necesario contar con una comprensión básica de los fundamentos que gobiernan el comportamiento térmico y mecánico de los distintos tipos de aceros involucrados en procesos de soldadura. (Rodríguez, 1987, Seferian, 1983)

La American Welding Society (AWS) define una soldadura como una coalescencia localizada de metal, en donde esa conglutinación se produce por el calentamiento a temperaturas adecuadas, con o sin la aplicación de presión y con o sin la utilización de metal de aporte. El metal de aporte sólo se puede emplear si éste y el metal base son compatibles (en términos de la estructura cristalina) y si existe un contacto átomo a átomo (que sólo es posible si las superficies están limpias y

libres de material extraño). Si los metales base no son compatibles, es necesario emplear un proceso en el cual no se fundan (como la soldadura fuerte) o un metal de aporte que sea diferente a los de base, pero que se fusione con ellos. Siempre que se funde el metal base, se tiene una mezcla de los metales base y de aporte. Coinciden con (Rodríguez, 1987) y otros autores (Giachino, 1981); (Frolov, 1981); (Díaz, 2000) que también es posible que se produzca un efecto calorífico en la estructura o propiedades del metal base próxima a la soldadura. El metal base alterada de esta manera se llama zona alterada por el calor (ZAC, heat-affected zone). A veces, el metal base contiene impurezas que entran en la soldadura o son alteradas en forma adversa por el proceso y su esfuerzo contaminante. El metal de aporte puede tener un punto de fusión aproximadamente igual a los de los metales base (como en la soldadura con arco o con gas) o puede ser más bajo, pero siempre superior a 840°F (450°C) como en la soldadura fuerte). Con esta definición se distingue entre la soldadura y a unión mecánica y la liga con pegamentos. El límite de 840° F (450° C), distingue a la soldadura fuerte de la soldadura blanda esta última no se incluye en lo que sigue. La definición incluye procesos que caen en seis categorías generales: soldadura con arco, soldadura con gas, soldadura por resistencia, soldadura fuerte, soldadura en estado sólido y otros. (Rodríguez, 1987, Frolov. 1988).

1.3 Características de los aceros inoxidables austeníticos

La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables es debida a una delgada película de óxido de cromo que se forma en la superficie del acero; como consecuencia del agregado de los elementos cromo, níquel, molibdeno, titanio, niobio y otros se producen distintos tipos de acero inoxidable, cada uno con diferentes propiedades.

A pesar de ser sumamente delgada ésta película invisible fuertemente adherida al metal lo protege contra los distintos tipos de corrosión, renovándose inmediatamente cuando es dañada por abrasión, corte, maquinado, etc. Aunque la mínima cantidad de cromo necesaria para conferir esta resistencia superior a la corrosión depende de los agentes de corrosión, el Instituto Estadounidense de

Hierro y Acero ha elegido el 10 por ciento de cromo como la línea divisoria entre aceros aleados y aceros inoxidables, mientras que otros establecen ese límite entre el 10,5% y el 11%.

En la actualidad se cuenta con un gran número de tipos y grados de acero inoxidable en diversas presentaciones, y con una gran variedad de acabados, dimensiones, tratamientos,

Los aceros inoxidables austeníticos no son magnéticos y no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico. Son muy dúctiles y presentan excelente soldabilidad.

Son los más utilizados por su amplia variedad de propiedades, se obtienen agregando Níquel a la aleación, por lo que la estructura cristalina del material se transforma en austenita y de aquí adquiere el nombre de acero inoxidable austenítico. El contenido de Cromo varía de 16 a 28%, el de Níquel de 3,5 a 22% y el de Molibdeno 1,5 a 6%. Los tipos más comunes son el AISI 304, 304L, 316, 316L, 310 y 317. Las propiedades básicas son: excelente soldabilidad, no se endurecen por tratamiento térmico, se pueden utilizar tanto a temperaturas criogénicas como a elevadas temperaturas.

Tiene gran aplicación en las industrias químicas, farmacéuticas, de alcohol, aeronáutica, naval, uso en arquitectura, alimenticia, y de transporte. Es también utilizado en cubiertos, vajillas, piletas, revestimientos de ascensores.

1.4 Defectos en la soldadura de los aceros inoxidables

Los aceros inoxidables presentan tendencia al agrietamiento tanto en frío como en caliente, el elemento que más incide este defecto es el cromo, el cual precipita hasta los bordes de los granos y al reaccionar con los otros elementos provoca que la soldadura no sea la más adecuada en algunas ocasiones.

Los aceros inoxidables se caracterizan por su resistencia a la corrosión atmosférica y la acción de medios corrosivos orgánicos o minerales en forma líquido o gaseosa. Estas propiedades se derivan, fundamentalmente, de su composición química. El elemento aleante que los caracteriza es el Cr, en contenido superiores a 13 %; mucha veces se encuentra acompañado de Ni en

magnitudes superior a 8%. Pueden, además, estar presente otros elementos aleante como el Mo, Si, Mn, Ti, Nb y otros.

Los problemas que afectan la soldabilidad de los aceros inoxidables austenítico (Rodríguez, 1987) son:

❖ **Tendencia al agrietamiento:** en la Zona fundida o en la ZIT esta tendencia depende de la estructura.

La tendencia al agrietamiento aparece durante el enfriamiento del depósito desde alta temperatura, y se desarrolla, principalmente, por las fronteras de granos. Sus causas se relacionan con 2 fenómenos: tensiones de contracción y aparición de segregaciones de elementos aleantes e impurezas en fronteras de granos durante la solidificación. Estos factores también influyen en la aparición de fisuras, en la zona de influencia térmica, a los que se une el crecimiento excesivo del grano, si no se toman medidas que reduzcan la cantidad de calor que reciba la pieza durante su recuperación.

❖ **Precipitación de los carburos de cromo:** lo cual ocasiona la corrosión de estos aceros.

La precipitación de carburos de cromo que se produce a temperaturas entre 550 a 800 °C en las fronteras de granos, sensibiliza el material a la corrosión intercrystalina. El medio más efectivo para contrarrestar este fenómeno es la reducción del contenido de C en un rango de 0.02 a 0,4 %. Si ello se cumple no existirá esta dificultad durante la soldadura. De lo contrario habrá que general la estructura después de la recuperación, calentando la pieza hasta 900 a 1 050 °C, con un enfriamiento brusco al aire, aceite o agua, en dependencia de su composición y geometría.

❖ **Formación de una fase intermedia sigma:** esta fase se obtiene generalmente cuando los aceros con alto contenido de cromo se calientan a temperaturas en el rango de 650-900⁰C, lo que ocasiona la pérdida de la viscosidad de impacto, ductibilidad y puede causar pérdidas de la resistencia a la corrosión de estos aceros. La fase sigma se detectó por primera vez en 1907 al observarse escalones térmicos en curvas de enfriamiento de aleaciones Fe-Cr.

Desde un principio se supuso que la formación de estos escalones térmicos estaba originada por la precipitación de un compuesto intermetálico del tipo Fe_nCr_m , lo que posteriormente se corroboró por Maurer y Strauss en 1927, quienes la identificaron empleando técnicas de difracción por Rayos X.

La precipitación de fases endurecedoras y sus efectos sobre las propiedades fueron estudiadas por (Qiu, 1993). Este autor establecieron las propiedades termodinámicas de los sistemas Fe-Cr-C, Fe-Cr-Ni-C y Fe-Cr-Mn-N y propusieron modelos termodinámicos para energías de Gibbs de las fases individuales, prestando especial atención a la solubilidad y precipitación de carburos y fases sigma en la austenita bajo distintas condiciones.

Como aplicación práctica de estos trabajos, posteriormente (Qiu., 1993) obtuvo secciones verticales de diagramas de fases isotérmicos de los sistemas Fe-Cr-C, Fe-Cr-Ni-C y Fe-Cr-Mn-N. En estos trabajos, se evaluaron los efectos de los elementos de aleación sobre la precipitación de fases de carburos y fases sigma y se propusieron modelos estequiométricos basados en la estructura cristalina de las fases y el número de átomos en la red.

1.4.1 Fragilidad en los aceros inoxidables austenítico

Existen muchos factores que pueden contribuir de manera aislada o conjunta en la disminución de la resistencia de los elementos provocando la aparición de roturas; sin embargo, existe uno que predomina y generalmente constituye un factor común en las fallas ocurridas a elevadas temperaturas: las inestabilidades metalúrgicas.

Se denominan inestabilidades metalúrgicas a los cambios que ocurren en la estructura metalográfica originados por permanencias a altas temperaturas. Estas inestabilidades provocan focos que incluyen transiciones de fracturas transgranulares a intergranulares, recristalización, envejecimiento, precipitación o descomposición de fases, retardo de las transformaciones en el equilibrio de fases, oxidación, corrosión intergranular, agrietamiento por corrosión bajo tensión y contaminación por trazas de elementos, entre otras (Saxena., 1998; y Beddoes 1999). 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.

La existencia de estas estructuras anómalas frecuentemente son las causantes de roturas imprevistas. Ellas pueden actuar de manera independiente o interactuar bajo la influencia de otros factores (temperatura, sobrecargas) provocando cambios en las características de las fracturas.

(Hall et al., 1986; Hamano., 1988; Shah et al, 1990; Brown., 1994 y Mannan et al., 1996), han estudiado las características de fracturas en aceros austeníticos de la serie 300. Sin embargo, a pesar de que estos autores caracterizan y asocian las fracturas a fenómenos de envejecimiento durante ensayos de creep (fluencia) y a la presencia de fases sigma, sus resultados sólo se asocian a fallas ocurridas en uniones soldadas.

1.5 Efectos de los elementos en los aceros inoxidables austeníticos 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 límite 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.

Cuanto mayor es el contenido en cromo de los aceros inoxidable, 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 adición 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. (Beddoes y Parr 1999).

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 anticorrosiva, este elemento imparte al producto mejoras en las propiedades mecánicas tanto en frío como en caliente (resistencia a la tracción, termofluencia) (Inchaurza, 1971a).

1.6 Efectos del calor en la soldadura

El calentamiento del metal provoca la ruptura de los granos y de las partículas hierro - carburo, disolviéndose el carbono con el hierro caliente, lo que aumenta la tenacidad y ductibilidad del mismo.

Los autores (Howard, 1996),(Dumov, 1987) y (Rodríguez, 1987) coinciden en plantear que casi todas las soldaduras involucran calentamiento del metal siendo soldado. Esta región se conoce como la zona afectada por el calor ZAC. Los dos mayores efectos de dichos calentamiento son:

Transformaciones metalúrgicas que pueden ocurrir en el metal de soldadura y en la ZAC.

Las tensiones y esfuerzo que pueden inducirse conduciendo a distorsión y posible agrietamiento, con el efecto que la soldadura puede tener sobre el metal es necesario conocer la cantidad de calor que el proceso de soldadura suministra al metal, que temperaturas son experimentadas en la ZAC y cuan rápido enfría.

Bajo la acción del calor los materiales se deforman. El conocimiento de estas propiedades y el análisis sobre las fuerzas que los modifican, son cuestiones fundamentales en el estudio y proyecto de elementos estructurales.

La deformación, es el cambio en la forma de un cuerpo por aplicación de cargas exteriores, cuando las tensiones internas del material sobrepasan el límite elástico. Así, ambos términos: tensión y deformación, se relacionan en los cambios unitarios que experimenta la dimensión, forma y volumen de un cuerpo por aplicación de calor u otras fuerzas exteriores: acción mecánica y magnética(Howard, 1996).

Algunos autores consideran que el agrietamiento en caliente de estos aceros se debe a segregaciones de bajo punto de fusión ricas en S,P, Mn, Si, y mantienen el criterio que la fase ferrítica disminuye el agrietamiento, para evitar la tendencia al agrietamiento y determinar las condiciones de soldabilidad de los aceros es de vital importancia auxiliarse del diagrama de Schaeffler el cual interrelaciona la composición química del metal base y del electrodo con la estructura

metalográfica de los mismos, teniendo en cuenta la influencia del resto de los elementos aleantes, agrupando y cuantificando los mismos en dos grandes grupos: los que favorecen la formación de fase ferrítica (alfágenos) y los que favorecen la formación de fase austenítica (gammágenos), con el objetivo de cuantificar los elementos que mayor influencia tienen en la formación de estas fases que son el cromo y el níquel, (Rodríguez, 1987) y (Bohler Thyssen, 2000).

1.7 La fluencia lenta en los aceros austeníticos

El establecimiento de una relación funcional sencilla para determinar las propiedades a elevadas temperaturas de los materiales constituye un reto para los especialistas, fundamentalmente cuando la información y/o la base experimental que se dispone es escasa. Una solución preliminar aproximada en estos casos es la extrapolación para un tiempo mayor de los datos existentes, pero se corren grandes riesgos de no estimar correctamente los valores de resistencia (Van Wershoven., 1999).

Independientemente de los progresos experimentados en el conocimiento teórico de la resistencia mecánica de los metales a altas temperaturas, se ha comprobado que no existe mejor recurso que seleccionar juiciosamente las tensiones de diseño a partir de los datos experimentales. Sin embargo, con frecuencia, es necesario disponer de datos de resistencia mecánica a temperaturas elevadas para condiciones no ensayadas experimentalmente (Kwon et al., 1999).

Burgos (1987) y Gizmanenco (1976) señalan que el cordón de soldadura es también una fuente de defectos cuyas consecuencias pueden causar la falla de la unión. El metal de soldadura se forma por aportes relativos del electrodo utilizado y por fusión del metal base, los cuales luego de ser mezclados a altas temperaturas en el estado líquido, solidifican dando lugar a un material que presenta alguna similitud con una pequeña pieza fundida. Los defectos más frecuentes, asociados al metal de soldadura son los siguientes:

❖ **Agrietamiento en caliente:** grietas formadas durante la solidificación del metal de soldadura y asociadas a la segregación de impurezas y a la presencia de

tensiones de origen térmico. Influyen notablemente sobre esto la geometría de la poza líquida y la estructura de solidificación del cordón.

❖ **Inclusiones y porosidad:** partículas de fases no-metálicas y cavidades incluidas en el cordón de soldadura. Debidas a remanentes de escorias las primeras y a gases disueltos las segundas.

Autores como Rodríguez (1987); Glizmanenco (1965, 1976); García (2004), consideran que la ejecución de uniones soldadas en aceros significa introducir grandes alteraciones en la estructura y por ende en las propiedades del acero soldado, como consecuencia de la evolución del calor aportado en el proceso. En las cercanías del cordón de soldadura, el metal base queda expuesto a ciclos de calentamiento y enfriamiento, que pueden provocarles cambios incompatibles con las exigencias mecánicas para las que fue seleccionado. Un adecuado manejo de las variables del proceso de soldadura sin embargo, permite controlar tales efectos y asegurar la obtención de una estructura sana y adecuada al propósito. De los defectos de soldadura asociados al metal base, los siguientes son los más frecuentes:

❖ **Agrandamiento bajo cordón:** también conocido como agrandamiento en frío, principalmente asociado a la presencia de fases duras formadas en el metal base y gatillado por la presencia de hidrógenos y de tensiones residuales.

❖ **Desgarramiento laminar:** grietas asociadas a la presencia de inclusiones no metálicas abundantes y alargadas, en el metal base, y a esfuerzos aplicados en dirección transversal a ellas.

❖ **Agrietamiento por recalentamiento:** formación de grietas durante el tratamiento de postcalentamiento de uniones realizadas con ciertos aceros de baja aleación.

❖ **Ablandamiento:** esto si bien en general no es considerado como un defecto, sí lo es cuando el acero sometido a soldadura es uno que debe resistir el desgaste y para el cual la dureza es esencial.

❖ **Sensibilización:** fenómeno que produce pérdida de la resistencia a la corrosión en algunos tipos de acero inoxidable, redundando en definitiva en un problema de "corrosión intergranular".

1.8 Tensiones residuales en uniones soldadas

Se denomina esfuerzos residuales ó internos, al estado de esfuerzos existente en el volumen de un material en ausencia de una carga externa (incluyendo la gravedad) u otra fuente de esfuerzos, tal como un gradiente térmico; (Masubuchi, 1980).

En general, se distinguen tres clases de esfuerzos residuales de acuerdo con la distancia o rango sobre el cual pueden ser observados. La primera clase de esfuerzos residuales, denominados macroscópicos, son de naturaleza de largo alcance y se extienden sobre varios granos del material. La segunda clase de esfuerzos residuales son denominados micro esfuerzos estructurales, abarcan la distancia de un grano o parte de uno, y pueden presentarse entre fases diferentes y tener características físicas distintas. La tercera clase de esfuerzos residuales se presenta sobre varias distancias interatómicas dentro de un grano. Los esfuerzos residuales son siempre consecuencias de deformaciones elásticas y/o plásticas no-homogéneas sobre una escala macroscópica o microscópica (Macherauch y Kloos, 1986). En el caso específico de procesos de soldadura, los esfuerzos residuales son consecuencia de la interacción de los siguientes procesos separados.

1. Expansión impedida y contracción resultante de una distribución de temperatura no homogénea.
2. Efectos de enfriamiento rápido (temple).
3. Transformaciones de fase.

Consecuentemente, el tipo y cantidad de esfuerzos residuales en la pila de soldadura y zona afectada térmicamente dependen de la temperatura de transformación determinada por el diagrama tiempo-temperatura-transformación del material y la velocidad de enfriamiento. Obviamente, la composición química local tiene un papel importante. En adición, la resistencia a la cedencia

dependiente de la temperatura local y el grado de rigidez del elemento estructural son decisivos.

1.8.1 Deformaciones y esfuerzos de tensión en la soldadura

Burgos; García (2004) obtuvieron las tensiones residuales a lo largo de un cordón de soldadura mediante Métodos Analíticos y Experimentales, para uniones a topes de Acero AISI 316 en el proceso de soldadura por arco sumergido (SAW), donde se demostró que los valores nodales de tensiones residuales a partir de su relación con los desplazamientos en el modelo creado en MEF se corroboran con los logrados por vía experimental mediante la técnica de relajación de tensiones con orificios ciegos.

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.

Povolo y Mansillas (2001), caracterizaron la relajación de tensiones por curvado de acero inoxidable austenítico AISI 316 ensayado durante 490 horas a 773 K. Para ello, utilizaron probetas rectangulares cortadas en dirección perpendicular y paralela a la de laminación, sometidas a diferentes tratamientos térmicos previos a la misma. La relajación se interpretó como un proceso térmicamente activado, que se ajustó por los modelos de Johnston - Gilman y Hart. Los resultados más significativos muestran que en muestras transversales, todas ajustadas por Johnston - Gilman, se encontraron finas partículas dispersas de fase sigma donde supuestamente la textura favoreció su precipitación y las tensiones internas no son despreciables.

Cuando más se calienta un metal más se dilata. Al soldar un metal éste se calienta de forma dispareja. El calor es más intenso en el área donde se está realizando la soldadura que en el resto del metal. Esto trae como consecuencia que el metal se dilata desproporcionalmente, el mismo se dilata en el lugar donde recibe

directamente el calor. El resto del metal que está frío ofrece resistencia a la dilatación, si la chapa es suficientemente grande, tiende a combarse.

Si no existen fuerzas externas que se opongan a la deformación de la pieza que se está calentando, se originarán deformaciones en la misma. De acuerdo con la temperatura, el tamaño y la forma de determinada pieza, estas deformaciones pueden originar grietas en el metal base o en la soldadura así como la rotura de la pieza. La dilatación y la consecuente deformación de un metal se determinan por la temperatura a que el mismo se caliente y por su coeficiente de dilatación lineal.

1.9 Corrosión en los aceros inoxidables

De Las Heras y Walthera (2005), analizaron la microestructura y comportamiento frente a la corrosión de un acero AISI 316L nitrurado por plasma. Se nitruraron muestras de acero inoxidable AISI 316L en un reactor industrial bajo una descarga DC - pulsada durante 20 h a 673 K utilizando una mezcla 25% N₂ + 75% H₂.

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 consiguiente es preciso conocer los distintos tipos de corrosión a la cual están sometidos los aceros inoxidables unidos por soldadura, que trabajan en ambiente extremadamente agresivo, ya que el fenómeno de la corrosión en gran medida está dado por el comportamiento mecánico y las características del material.

Radhakrishnan (1995) establece que para relaciones de Cr/Ni inferiores a 1,6 existe gran probabilidad de ocurrencia de grietas a elevadas temperaturas en uniones soldadas de aceros inoxidables austeníticos.

Shankar (1980) concuerda con otros autores en la ocurrencia de grietas en estos aceros en el proceso de solidificación y que estas se producen predominantemente por la segregación de pequeñas cantidades de mezclas de

fase acompañadas de tensiones de contracción. Aunque el autor considera que la presencia de Molibdeno reduce considerablemente este efecto.

La corrosión es un proceso electroquímico que comprende una reacción anódica implicando la oxidación del metal (reacción de corrosión) y una reacción catódica basada en la reducción de especies químicas (Shreir, 1963) y (Borenstein, 1994).

En la actualidad se acepta que la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables (que contienen siempre un elevado % de cromo), es producto a la formación de una capa superficial de óxido de cromo muy fina, que impide que la corrosión de los aceros penetre del exterior hacia el interior. Para que un acero sea inoxidable, es necesario que estén presentes los factores de composición, estado del material y medio de ataque, convenientes para que se forme la capa de óxido protector.

Cuando actúan sólo los agentes atmosféricos, la presencia del 12% de cromo es suficiente para que se forme la capa de óxido que impide la corrosión producida por aire ambiente y la acción de agentes corrosivos débiles.

Al aumentar la intensidad del ataque, para que se pueda formar una capa de óxido suficientemente protectora, es necesario mayor porcentaje de cromo, pero esto ocurre hasta un cierto límite a partir del cual ya no se aumenta la resistencia a la corrosión y es necesario adicionar otros elementos como níquel, molibdeno, titanio, según sea el caso.

Una de las características más representativas y importantes de los aceros inoxidables es su gran resistencia a la corrosión frente a todo tipo de ambientes, propiedad que les da una durabilidad muy envidiable frente a otro tipo de aceros y materiales y también muy importante estéticamente. Esto permite una vida útil a la estructura mayor y con un menor mantenimiento, factor que a la larga es muy importante económicamente.

1.9.1 Efecto de la soldadura en la resistencia a la corrosión

Los aceros inoxidables austeníticos se especifican normalmente por su excelente resistencia a la corrosión. La soldadura puede reducir esa resistencia en ambientes agresivos. En la soldadura, el calor que se genera produce un

gradiente de temperatura en el metal de base. La soldadura también puede inducir tensiones residuales en el área soldada, lo cual en ciertos ambientes puede resultar en roturas por corrosión bajo tensión. Los tratamientos térmicos para reducir las tensiones residuales se discuten en la sección Tratamiento Térmico de Aceros Inoxidables Austeníticos. Uno de los primeros problemas de corrosión relacionados con la soldadura fue el ataque intergranular, en la zona soldada afectada por la temperatura. En el rango de temperaturas que va de 425 a 900 °C, el carbono se combina con el cromo para formar carburos de cromo en el borde de los granos. El área adyacente a los carburos tiene menor cantidad de cromo. Cuando la red de carburos es continua, la envoltura empobrecida en cromo alrededor de los granos puede ser atacada selectivamente, resultando en corrosión intergranular. En el peor de los casos, la capa empobrecida en cromo se corroe completamente y los granos se separan del metal de base. Se dice que las aleaciones están sensibilizadas, cuando por soldadura o tratamientos térmicos, existen áreas empobrecidas en cromo que puedan ser atacadas en estos ambientes corrosivos. Las aleaciones sensibilizadas aún pueden prestar buenos servicios en muchos de los ambientes moderados en que se usan los aceros inoxidables. Hoy, con la tendencia de las usinas a proveer productos con bajo carbono, el ataque intergranular de los aceros inoxidables austeníticos ocurre menos a menudo. El grado de sensibilización, o sea la cantidad de carburos de cromo formado en los límites de grano, está influenciado por la cantidad de carbono y la temperatura y tiempo de exposición

1.10 Simulación del proceso de soldadura por el Método de Elementos Finitos (MEF)

Los modelos computacionales para la predicción de curvas en procesos de soldadura son ventajosamente empleados en la actualidad para la comprensión de los complejos fenómenos de transferencia de calor considerando las transformaciones metalúrgicas que ocurren en estos procesos. Estas simulaciones permiten controlar las distribuciones espaciales de las propiedades físicas de la

pieza tratada en término de los parámetros del proceso, convirtiéndose en el primer paso para el cálculo de las tensiones residuales en la pieza y su distorsión. El problema de determinar los coeficientes de transferencia térmica dependientes del tiempo a partir de las evoluciones temporales de la temperatura en algunos puntos del material, es un ejemplo de lo que se denomina un problema inverso de conducción de calor. Conocidos estos coeficientes para diversas condiciones de trabajo, se puede resolver entonces el problema directo de conducción de calor, el cual consiste en obtener la distribución de temperaturas en toda la extensión de la pieza y en el lapso total de tiempo en el que tiene lugar la operación y a partir de la misma, pueden determinarse las tensiones térmicas, la distorsión del material y la distribución espacial de sus propiedades mecánicas (Pero-Sanz, 2000).

La solución de un problema mediante la aplicación del Método de los Elementos Finitos (MEF) es un proceso que consta de una secuencia lógica de trabajo, la cual se puede dividir, como regla general, en las siguientes etapas (Boada, 2003).

- Creación del modelo geométrico de la estructura o pieza a analizar.
- Definición de las propiedades mecánicas de material a utilizar.
- Generación de la malla de elementos finitos.
- Definición del esquema de carga y condiciones de contorno.
- Realización del análisis o cálculo.
- Visualización y análisis de los resultados.

Las propiedades mecánicas, que deben introducirse en el software con implementación del Método de Elementos Finitos, dependen del tipo de análisis que se quiere realizar.



Conclusiones del capítulo I

- En la revisión bibliográfica se comprobó que ha sido estudiado el comportamiento de las tensiones y la temperatura en uniones soldadas del tipo austenítico, sin embargo no queda claro este proceso mediante el Método de Elementos Finitos en tuberías de aceros austeníticos cuando trabajan en líneas de agua fría caliente.
- 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 al de los metales nobles.
- La tendencia al agrietamiento de la Zona Fundida y de la ZIT en los aceros inoxidable austeníticos al cromo - níquel, se debe a la formación de una película de silicatos que se forma alrededor de los granos de austenita que forman grietas en caliente, dando origen a una fase intermedia sigma, que provoca la fragilidad en estos aceros.

CAPITULO II

CAPÍTULO 2: 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 como las tensiones y las temperaturas para realizar la simulación por el Método de los Elementos Finitos (MEF).

El objetivo del presente capítulo es fundamentar las propiedades a investigar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones experimentales para la solución del problema y desarrollar una metodología de cálculo que nos permita determinar con exactitud el comportamiento mecánico del material en ambientes muy agresivos.

2.2 Caracterización de fallas en equipos

El estudio de fallas de elementos que operan en ambientes muy agresivos a elevadas temperaturas, alta corrosión y en presencia de partículas erosivas constituye uno de los principales problemas para las industrias del níquel en esencial la Planta de Hornos de Reducción de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, por las incalculables pérdidas económicas y efectos sociales y medioambientales que implican para la humanidad.

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 (Bilmes,2000).

Para el análisis de fallo por el MEF de la línea de tubería de hidrosulfuro en planta de Hornos de Reducción se tendrá en cuenta aspectos esenciales como:

1. Composición química del acero.
2. Forma geométrica de la unión.

3. Temperatura de trabajo de la línea.
4. Tensiones de resistencia y de la unión soldada.
5. Selección del software.
6. Distribución de la temperatura en el cordón de soldadura.

2.3 Composición química estándar del acero austenítico AISI 316

La composición química estándar de este acero austeníticos AISI 316 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 2.1y en la tabla 2.2 se reflejan las propiedades térmicas.

Tabla 2.1. 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

El acero inoxidable AISI 316 conduce el calor mucho más lentamente que los aceros al carbono, lo cual produce gradientes de temperatura más pronunciados. Esto acelera la deformación. Una difusión más lenta del calor a través del metal de base significa que la zona soldada permanece caliente por más tiempo, resultado de lo cual puede ser una mayor precipitación de carburos, a menos que se usen medios artificiales para extraer el calor. Las propiedades térmicas de este acero como se observa en la tabla 2.2, son de gran importancia a la hora de realizar procesos de soldadura en dependencia de las mismas se puede dar el tratamiento adecuado para evitar el fenómeno de agrietamiento.

2.3.1 Propiedades de acero AISI 316

Las propiedades del acero inoxidable AISI 316, son 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 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.

Tabla 2.2 Propiedades térmicas del acero austenítico AISI 316.

Recocido	1008 – 1120 ⁰ C
Temple	No templable
Forja	Comienzo: 1200 ⁰ C Finalización: 925 ⁰ C
Temperatura máxima operación	Serv. Continuo: 840 ⁰ C Serv. Intermitente: 925 ⁰ C

En la tablas 2.3 se presentan 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 2.3 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 20°C	[J/(kg.°C)]	500
Punto Fusión	°C	1371 – 1398
Coeficiente de Poisson	NA	0,3
Conductividad Térmica	W/m°K	[100 °C] → 16
		[500 °C] → 21
Coeficiente de Expansión Térmica	[10 ⁻⁶ °C ⁻¹]	[0/100°C] → 16,02
		[0/300°C] → 16,20
		[0/500°C] → 17,46
		[0/700°C] → 18,54

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 ($12 \times 10^{-6} \text{°C}^{-1}$). 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.

Las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 316 (tabla 2.4), dependen del tipo de aleación y son función del proceso de fabricación y de los tratamientos superficiales a los que ha sido sometido, se puede observar en la tabla 2.5 que las propiedades mecánicas a elevadas temperaturas del acero AISI 316 difieren de las mecánicas a temperatura ambiente.

Tabla 2.4. 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 50 mm	Recocido	[%]	64
	Trabajo en frío		
Resistencia al impacto		$k_{cu}(J/cm^2)$	160
		$k_{vII}(J/cm^2)$	180

Tabla 2.5. Propiedades mecánicas a elevadas temperaturas del acero AISI 316

Temperatura (°C)	Límite de fluencia $[N/mm^2]$
A 550 °C	82
A 600 °C	62
A 700 °C	20
A 800 °C	6,5
	Límite de elasticidad $(\sigma_{E(0,2)}) [N/mm^2]$
A 300 °C	140
A 400 °C	125
A 500 °C	6,5

2.4 Determinación de la soldabilidad mediante el Diagrama de Schaeffler

El diagrama de Schaeffler interrelaciona la composición química del metal base y del electrodo con la estructura metalográfica de los mismos, este diagrama es utilizado para determinar las condiciones de soldabilidad de los aceros inoxidables.

Campo de aplicación: relaciona la estructura del acero con la composición química total de este, teniendo en cuenta la influencia del resto de los elementos aleantes y agrupándolos en dos grupos, los que favorecen la formación de la fase austenítica (gammágenos, Ni, Mn, C) y los que favorecen la formación de la fase ferrítica (alfágenos, Cr, Mo). En la figura (2.1) se muestra el diagrama de Schaeffler.

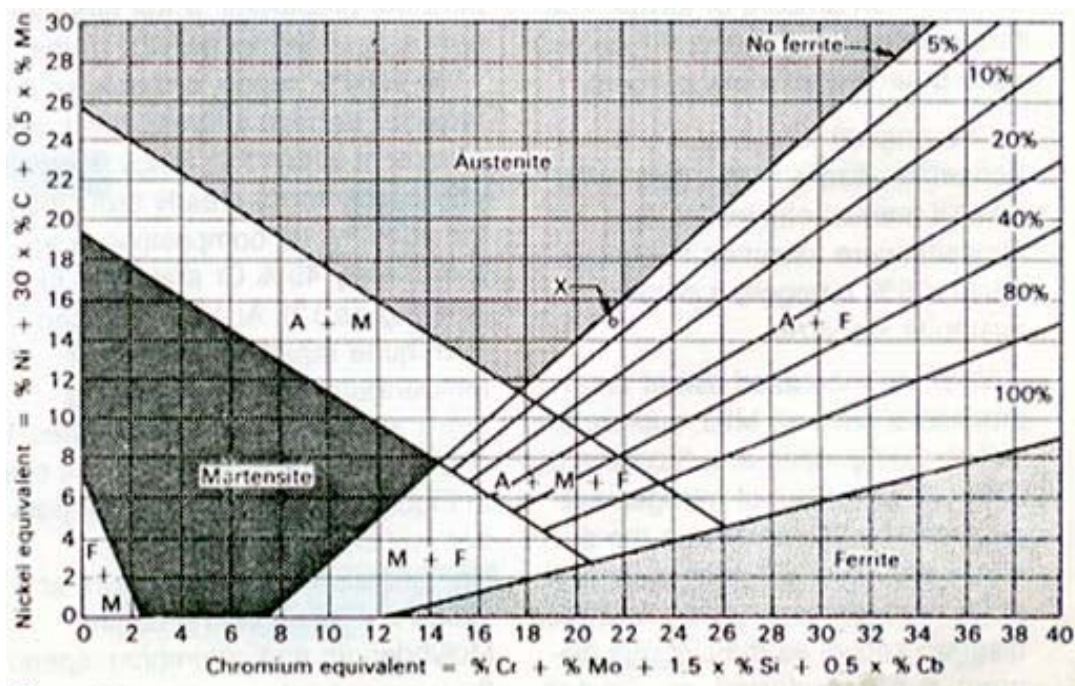


Figura 2.1. Diagrama de Schaeffler

En la siguiente metodología de cálculo del proceso térmico, consideramos que el arco de soldadura permanece con velocidad constante (calentamiento uniforme).

Según los reportes técnicos de la planta de recuperación de Amoniaco los electrodos utilizados en la unión de los tubos son E316L-16 y poseen la composición química que se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Composición Química del Electrodo E316L-16.

Elementos	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
%	0,03	0,8	0,003	0,031	0,70	18,50	11,70	2,5

Propiedades mecánicas

- Resistencia a la tracción → 78 kgf/pul²
- Elongación → 41%

Para determinar el porcentaje de ferrita se determina el cromo y el níquel equivalente por las siguientes fórmulas.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5*\% Si + 0,5*\%Nb \quad (2.1)$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30*\%C + 0,5*\%Mn \quad (2.2)$$

Los coeficientes de Schaeffler y las expresiones de éste último no toman en cuenta los contenidos de Nitrógeno (gammágeno), Titanio, y Niobio (alfágenos). Por consiguiente el porcentaje de ferrita se determinará por el diagrama De Long como se muestra en la figura 2.2

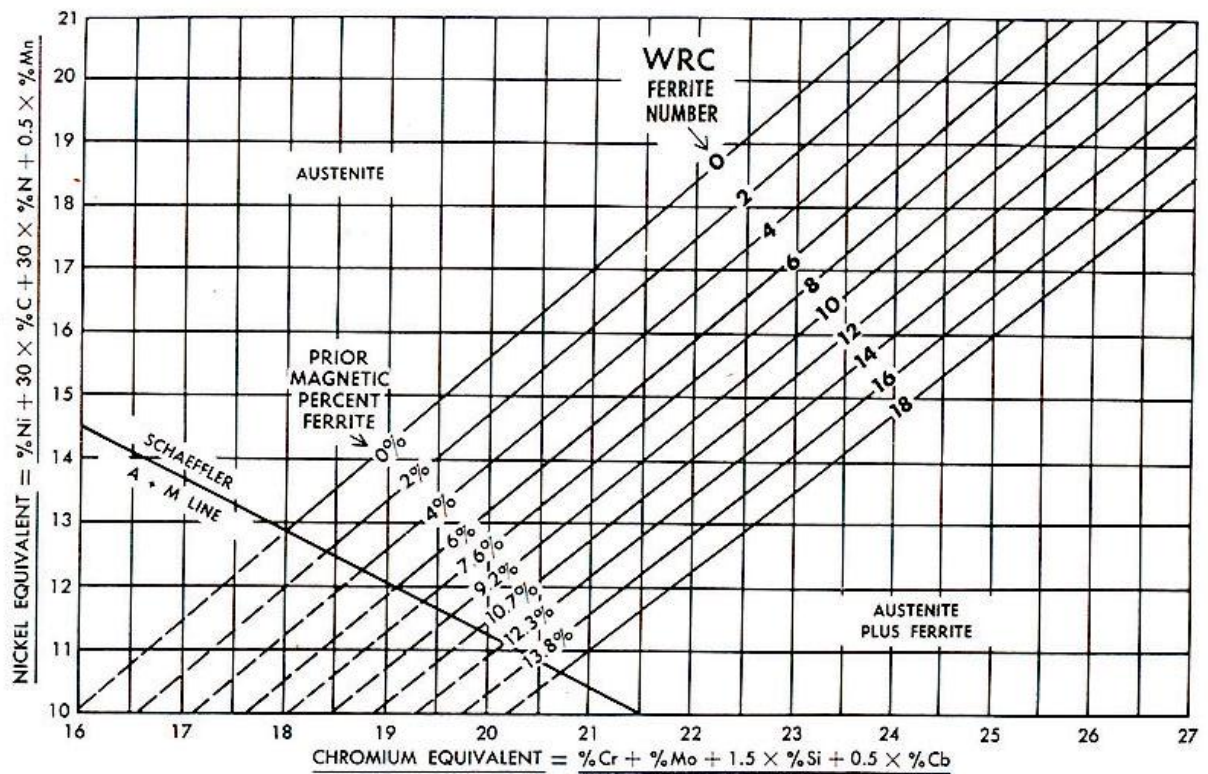


Figura 2.2 Diagrama De Long

2.5 Cálculo de la resistencia mecánica en tuberías de Aceros AISI 316

En la realización de cálculos convencionales de resistencia de materiales a temperaturas elevadas las propiedades mecánicas se consideran, para todos los fines prácticos, independientes del tiempo, la resistencia mecánica depende mucho de la magnitud y velocidad de aplicación de la carga y del tiempo de exposición. A elevadas temperaturas, gran cantidad de materiales metálicos se comportan como materiales viscoelásticos, por lo que al ser sometidos a la acción de cargas, por ejemplo, de tracción, el metal "fluye" lentamente y surge un aumento de su longitud que es función del tiempo. Por esta razón, en los cálculos de ingeniería tienen especial significación los resultados que proporcionan los ensayos que describen los mecanismos de deformación de una aleación a temperaturas elevadas (Boyle y Spence, 1989).

Las dimensiones del cilindro, así como la relación de los radios interior y exterior pueden ser arbitrarias. Al deformarse un cilindro se producen desplazamientos en cada punto de éste los cuales tendrán lugar en las direcciones radiales.

2.5.1 Tensiones provocadas por las temperaturas

Si se tiene un contorno cilíndrico cerrado como se muestra en la figura 2.3, con una relación $\frac{a}{b} \geq 0,75$, en el que actúan elevadas temperaturas.

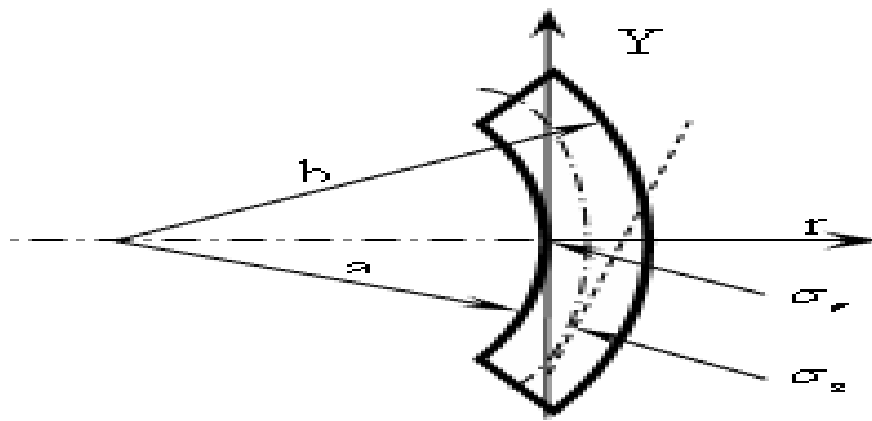


Figura 2.3. Sección de un cilindro de pequeño espesor.

Considerando que en las superficies (interior y exterior) del cilindro las tensiones a lo largo del radio provocadas por dichas temperaturas se pueden determinar por la ecuación (2.5)

$$\sigma_r = \frac{\alpha E (T_a - T_b)}{2(1 - \nu) \left(\ln \frac{b}{a} \right)} \left[\left(\frac{a^2}{b^2 - a^2} \right) \left(\frac{b^2}{r_m^2} - 1 \right) \ln \left(\frac{b}{a} \right) - \ln \left(\frac{b}{r_m} \right) \right] \quad (2.3)$$

Siendo:

ν .- Coeficiente de Poisson.

T_a - temperatura interior de 150°C.

T_b - temperatura exterior de 100°C.

b y a .- radio máximo y mínimo de la tubería; con valor de 125 y 120 mm respectivamente.

r_m .- radio medio de la tubería; igual a 72,45 mm

Las tensiones a lo largo del eje provocadas por la dilatación lineal entonces se calculan por la ecuación 2.5.

$$\sigma_z = \frac{\alpha E (T_a - T_b)}{2(1 - \nu) \left(\ln \frac{b}{a} \right)} \left[1 - \left(\frac{2a^2}{b^2 - a^2} \right) \ln \left(\frac{b}{a} \right) - 2 \ln \left(\frac{b}{r_m} \right) \right] \quad (2.4)$$

En tubos sometidos a altas temperaturas se producen grietas en la superficie exterior como resultado de las tensiones térmicas equivalentes las cuales se determinan aplicando tercera Hipótesis de resistencia (Burr, 1987).

$$\sigma_{eq} = \sigma_z - \nu \sigma_r \leq [\sigma] \quad (2.5)$$

Donde:

ν : Coeficiente de relación de tensiones admisibles

$$\nu = \frac{[\sigma]_t}{[\sigma]_c} \quad (2.6)$$

Donde:

$[\sigma]_t$ Tensión normal admisible a tracción

$[\sigma]_c$ Tensión normal admisible a compresión

Como el material tiene el mismo comportamiento a tracción que a compresión las tensiones antes mencionadas tiene el mismo valor por lo que $\nu=1$.

El desplazamiento radial δ de un punto cualquiera de la pared del tubo se determina por la fórmula:

$$\delta = \frac{\rho}{E} (\sigma_z - \mu \sigma_r) \quad (2.7)$$

Siendo ρ la distancia que existe entre el centro del tubo y el punto en el espesor donde se desea determinar el desplazamiento, como los desplazamiento significativo ocurren en el interior del cilindro $\rho=a$

Para obtener los valores de tensiones producidas por la presión de trabajo se aplicó el método de Craig. Jr 2002.

$$\sigma_z = \frac{p_1 a^2 \left(1 + \frac{b^2}{a^2}\right) - p_2 b^2 \left(1 + \frac{a^2}{a^2}\right)}{b^2 - a^2} \quad (2.8)$$

$$\sigma_r = \frac{p_1 a^2 \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) - p_2 b^2 \left(1 - \frac{a^2}{a^2}\right)}{b^2 - a^2} \quad (2.9)$$

Siendo:

p_1 Presión en el interior del tubo igual a 0.4 N/mm^2

p_2 Presión en el exterior del tubo igual a la presión atmosférica la cual es despreciada.

b y a .- radio máximo y mínimo de la tubería; con valor de 125 y 120 mm respectivamente

La variación del radio interior del tubo es:

$$\Delta r_1 = \frac{r_1}{E} \left[p_1 \left(\frac{b_2^2 + a_1^2}{b_2^2 - a_1^2} + \mu \right) - 2p_2 \frac{b_2^2}{b_2^2 - a_1^2} \right] \quad (2.10)$$

$$\Delta r_2 = \frac{r_2}{E} \left[2p_1 \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} - p_2 \left(\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} - \mu \right) \right] \quad (2.11)$$

Como por el interior del tubo solamente actúa una sola presión que es la presión interna, la tensión equivalente se determina por la ecuación (2.5).

2.6 Análisis tenso- deformacional mediante métodos numéricos

La gran evolución de los métodos informáticos tanto en su aspecto de hardware como software, ha permitido afrontar la resolución de complejos problemas físico-matemáticos cuya resolución analítica resultaría prácticamente imposible.

De hecho, muchos de estos problemas hace ya años que están planteados matemáticamente, solo falta un medio adecuado para la obtención de resultados prácticos confiables.

En la actualidad, el Método de los Elementos Finitos (MEF) ha sido muy generalizado y constituye una potente herramienta de cálculo numérico capaz de resolver cualquier problema formulable de la matemática, la física y la mecánica; permitiendo simular y realizar una gran cantidad de análisis en componentes y estructuras complejas, difícilmente calculables por los métodos analíticos tradicionales.

Con la simulación mediante MEF se intenta reproducir la realidad a partir de la resolución numérica de las ecuaciones matemáticas que describen el fenómeno estudiado con el uso de un ordenador. Por lo tanto, se puede asumir que la simulación es tan exacta como tantas sean las ecuaciones de partida y la capacidad de los ordenadores para resolverlas, lo cual fija límites a su utilización (Ingham y Moreland, 1993).

2.6.1 Solución numérica del problema

En lo referido al cálculo estructural, el método de elementos finitos puede ser entendido como una generalización de estructuras al análisis de sistemas continuos. El principio del método consiste en la reducción del problema con infinitos grados de libertad, en un problema finito en el que intervenga un número finito de variables asociadas a ciertos puntos característicos del objeto denominado "nodos".

Las incógnitas dejan de ser funciones matemáticas del problema cuando pasan a ser los valores de dichas funciones en un número infinito de puntos. Así pues, en

el MEF se supone que el comportamiento mecánico de cada parte o elemento en los que se subdivide el objeto, queda definido por un número finito de parámetros (grados de libertad) asociados a los puntos que en dicho momento se unen al resto de los elementos de su entorno (nodos).

Para establecer el comportamiento en el interior de cada elemento se supone que dentro del mismo, todo queda perfectamente definido a partir de lo que sucede en los nodos a través de una adecuada función de interpolación elaborada por ANSYS (Alfaro, 2001).

En el caso específico del análisis tenso-deformacional de elementos sometidos a la acción de cargas estáticas, el método permite la determinación de los componentes de los nodos por el efecto de una sollicitación estática y, en una segunda fase, la determinación del estado deformacional en ciertos puntos característicos. Este tipo de análisis permite acotar la deformación del objeto de estudio y localizar zonas altamente sollicitadas o zonas de baja sollicitación.

Esta presentación aproximada de la realidad en forma de un modelo numérico permite la resolución del problema, donde los coeficientes se calculan automáticamente por el ordenador a partir de la geometría y propiedades físicas de cada elemento.

Sin embargo queda en manos del usuario decir hasta que punto la discretización utilizada en el modelo representa adecuadamente el modelo de la estructura.

2.6.2 Metodología utilizada

Debido a las dimensiones del elemento analizado, para el cálculo de los esfuerzos mediante MEF se empleó el método del sub estructurado. El proceso de sub-estructurado es una técnica de elementos finitos basada en el principio de Saint Venant's que consiste en la interpretación física del método de la condensación aplicado a problemas mecánicos para la solución de grandes estructuras en las que se requieren, para ser resueltas, miles de elementos, nodos

y grados de libertad y los recursos del cómputo no son suficientes para procesar toda la información que se pueda obtener.

A través del sub-estructurado, el objeto de estudio se analiza como resultado del "ensamble" de complejos elementos (Kenneth y Thornton, 1995).

La división del elemento en sub-elementos garantiza la facilidad y rapidez de cálculo con los ordenadores disponibles (ANSYS5.7. User's Guide, 1999)

2.6.3 El sub-estructurado del elemento se desarrolló siguiendo la siguiente secuencia:

1. Creación de los sub-estructurado. En dependencia de las dimensiones del elemento, ANSYS genera por separado una serie de súper-elementos que se modelan en distintas etapas de generación con sus correspondientes archivos para posteriormente poder realizar el ensamblaje de los mismos según la secuencia de análisis.
2. Fase de generación. En esta fase, también denominada fase de mallado, se subdividen los súper-elementos en sub-elementos o mallas, las que posteriormente se condensan en un solo súper-elemento. La condensación se realiza identificando los grados maestros de libertad que se utilizan como interfase entre las mallas de un super-elemento y las del próximo súper elemento. Con la ayuda de los nodos maestros la información se trasmite sucesivamente de un súper elemento a otro.

Fase de expansión. En esta fase, la solución dada a los nodos maestros se trasmite a los nodos restantes de los súper elementos, realizándose la "expansión" de la información a cada uno de los superelementos.

Después de aplicar la técnica del sub-estructurado, se aplica la técnica del sub-modelado con el objetivo de determinar las tensiones de trabajo máximas a partir de los cálculos de resistencia a la flexión compilados por ANSYS, luego se determina la zona más peligrosa (zona sometida a mayores esfuerzos). La utilización del sub-modelado después del sub-estructurado tiene dos ventajas:

- Facilitar, mediante el sub-estructurado, la reducción del frente de onda al trabajar los súper-elementos con un mallado "sencillo".
- Encontrar una distribución de esfuerzos internos más uniforme en el elemento ya condensado al "asignarle" al sub-modelo un mayor número de elementos a través del mallado.

2.6.4 Algoritmo para la simulación (ANSYS versión 11.0)

El algoritmo desarrollado por etapas para el análisis que desarrolla el paquete ANSYS fue:

Primera etapa: Modelado de tubos de pequeñas dimensiones sometidos a temperatura de fusión.

Segunda etapa: Modelado de tubos inoxidables y termorresistentes empleados en la industria minero metalúrgica.

Tercera etapa: Generación del mallado y condensación.

Cuarta etapa: Procesamiento de datos y expansión a través de los diferentes pasos:

Conclusiones del capítulo 2

1. Se fundamentaron las propiedades a investigar a partir de la necesidad de la descripción y caracterización del objeto de estudio, quedó establecido el método de cálculo de resistencia mecánica.
2. Se estableció el método de cálculo para la resistencia mecánica así como para la determinación del porcentaje de ferrita en la unión.
3. Se estableció el algoritmo para la realización de la modelación y simulación por el método de elementos finitos con el empleo del ANSYS versión 11.0.

CAPITULO III

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

3.1 Introducción

En este capítulo se establece el conjunto de criterios y postulados que sustentan las teorías que corroboran la veracidad de la hipótesis científica planteada, como resultado del análisis y el procesamiento de la información obtenida a través de la observación o realización de los experimentos y cálculos.

El objetivo del capítulo:

Realizar la valoración crítica de los resultados y a través de ella, explicar los fundamentos científicos que dan solución al problema planteado a partir de la interpretación de las regularidades observadas.

3.2 Resultados de los cálculos de soldadura.

La composición química se tomó como promedio de los resultados de tres chispas para sacar el de cada una de ellas. El análisis químico se realizó empleando un Espectrómetro de Masa ESPECTROLAB 230 con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón en el Laboratorio del Taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel, Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche", Moa.

El material utilizado fue un acero AISI 316 cuya composición química se obtuvo muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Composición del AISI 316.

E	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	N ₂
%	0.058	1.60	0.039	0.031	0.030	18.50	10.27	2.12	0,29	0,05	0,04

3.3 Determinación del porcentaje de ferrita

La composición del metal de soldadura difiere un poco de la del metal base con el fin de producir un depósito de soldadura que contenga ferrita (esto es, que no sea del todo austeníticos) para evitar fisuras o agrietamiento en caliente del metal de soldadura.

En la Tabla 3.2, presentan los porcentajes de Cromo y Níquel equivalentes obtenidos por la expresión 2.1 y 2.2.

Tabla 3.2. Cr y Ni Equivalentes para el metal base .

Material	% Cr _{eq}	% Ni _{eq}
Metal Base	20.6	12.81

Teniendo en cuenta el diagrama de Shaeffler se obtuvo el porcentaje de ferrita para el electrodo y la Mezcla, lo que se muestran a continuación en la tabla 3.3

Tabla 3.3 Porcentaje de ferrita según diagrama de Shaeffler

Material	Electrodo(E316L-16)	Mezcla
% Ferrita	7.5	5

Como el diagrama de Shaeffler no tiene en cuenta algunos elementos alógenos, analizamos el material por el diagrama De Long a través del cual se obtuvo un 14% ferrita favorece lo que trae como consecuencia la fisuración y el agrietamiento en caliente por la precipitación de carburo de cromo, fracturas y envejecimiento. Según los estudios realizados por Hiller y Qiu, (1991), (Saxena., 1998; y Beddoes 1999, Hall et al., 1986; Hamano., 1988; Li., 1989; Shah et al., 1990; Brown., 1994 y Mannan et al., 1996).

3.4 Resultados del cálculo de resistencia mecánica

La tensión circunferencial y radial provocada por la temperatura según las ecuaciones (2.3) y (2.4) respectivamente son de $\sigma_z = 0.4658 \frac{N}{mm^2}$ y la tensión radial es de $\sigma_r = 0.4214 \frac{N}{mm^2}$.

La condición de resistencia planteada en la ecuación (2.5), permite conocer los valores de la tensión normal máxima, generadas para la temperatura de trabajo, lo cual demuestra que los máximos no alcanzan el 5% de las tensiones de cadencia mínima del material objeto de estudio.

$$\sigma_{eq} = 0.04 N / mm^2 \leq [\sigma] = 56.65 MP_a$$

En este caso se determinó solamente el desplazamiento radial en el interior del cilindro, debido a que la presión en el exterior es despreciable los puntos en el exterior se desplazan la misma magnitud que varíe el radio exterior, el mismo se determinó por la ecuación (2.7), $\delta = 0.20 mm$

Las tensiones provocada por la presión de trabajo se determinaron por las ecuaciones (2.8) y (2.9) es de $\sigma_z = 19.60 N / mm^2$ y la tensión lineal es de $\sigma_r = -0.4 N / mm^2$

Las deformaciones radiales en el interior del tubo está determinada por las ecuaciones (2.10) y (2.11) respectivamente cuyos valores son $\Delta r_1 = 15.27 mm$ y $\Delta r_2 = 12.28 mm$

Las deformaciones radiales exterior se va a comportar de manera similar que la interior porque va a producir un desplazamiento similar, orientadas hacia el exterior del tubo. (Craig. Jr 2002).

Estas variaciones de radio son quienes caracterizan las deformaciones en elementos sometidos a este tipo de sollicitación. Cuando un cuerpo sólido está sometido a cargas externas o a cambios de temperaturas, se deforma, por eso podemos considerar que aunque la presión actuante no produce rotura en el elemento si produce deformaciones significativas en el interior del tubo.

La condición de resistencia planteada en la ecuación (2.5), permite conocer los valores de la tensión normal máxima producto de la presión de trabajo, a través de ella podemos plantear, que la rotura en las tuberías no es producto a las cargas externas producidas por dicha presión.

$$\sigma_{eq} = 20 N / mm^2 \leq [\sigma] = 56.65 MP_a$$

3.5 Análisis de los resultados de la simulación por el Método de Elementos Finitos.

Se trabajó en el modelo para la realización de la simulación empleando técnica de avanzada como es el método ANSYS 11.0. Donde se simula un tramo de tubería de recirculación para el transporte de Amoniaco, un tramo de 200 mm aplicando una presión de 3.9 atm a una temperatura ambiente de 32°C .

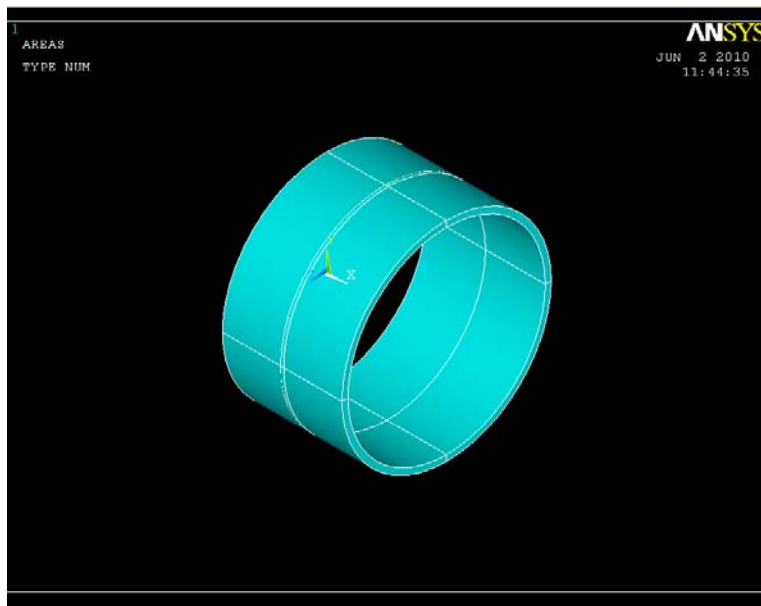


Figura 3.1 Geometría de la tubería.

El mallado mediante el ANSYS 11.0 es fino con un total de 23059 nodos y de forma triangular con un total de 7 686 elementos como se muestra en la figura (3.2).

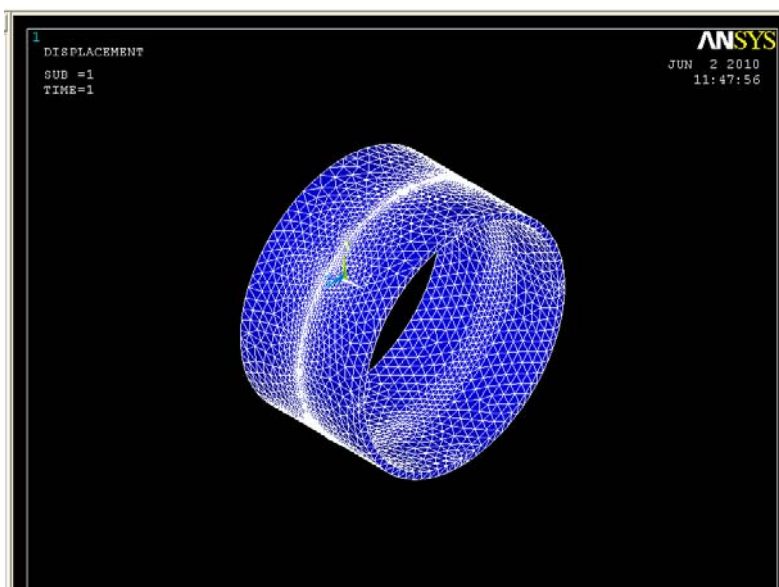


Figura 3.2 Mallado mediante el ANSYS 11.0.

Los resultados muestran que la temperatura se distribuye a lo largo de todo el tubo, desde los valores máximos de 1535°C , hasta valores mínimos de 32°C con una distribución uniforme de temperatura siendo la dimensión de la zona de influencia térmica de los campos de temperaturas generados en la junta soldada se mantienen termo dependiente a lo largo de todo el proceso de simulación considerando tres isotermas fundamentales que no son más que puntos de igual temperatura en dicha zona a 700 ; 900 y 1100°C a partir de las cuales empieza a ocurrir las principales transformaciones de fase (Rodríguez, 1987) como se muestra en la (figura 3.3).

Los principales problemas de estos aceros a altas temperaturas son:

- La sensitización se puede formar entre los rango de 420 - 850°C el cromo y el carbono disueltos en el hierro de estos aceros se combina y precipita en el borde de grano como carburo de cromo.
- La fisuración en caliente: El mecanismo de fisuración parece ser el resultado de la ruptura de una película intergranular líquida debajo punto de fusión (1100 - 1200°C) durante la contracción que tiene lugar cuando una estructura totalmente Austenítica se enfría desde su temperatura de fusión.

- La formación de fase sigma se forma entre los 550-950°C, o si tiene especificado un tratamiento térmico post soldadura, puede formarse Fase Sigma reduciendo la ductilidad.

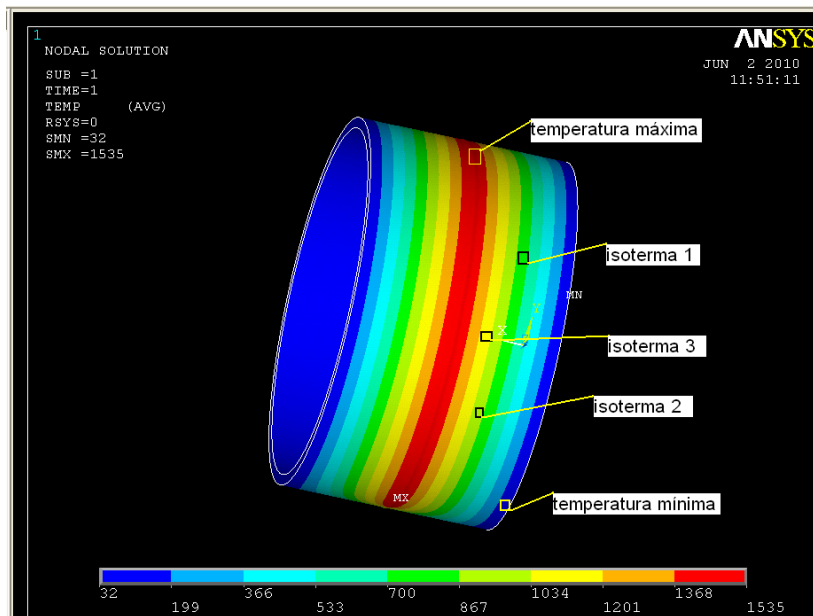


Figura 3.3 Comportamiento de la temperatura mediante el ANSYS 11.0.

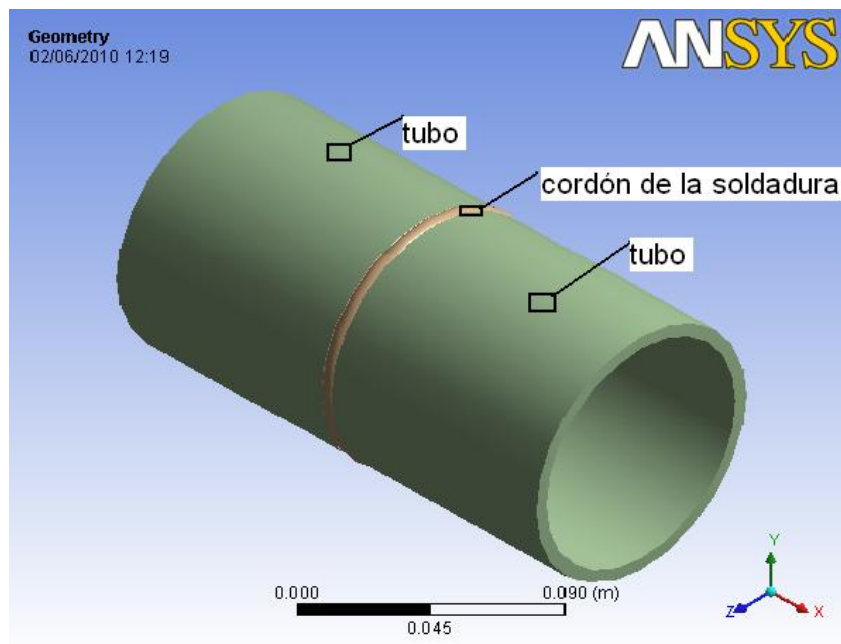


Figura 3.4 Geometría de la tubería mediante el ANSYS 11.0 .

En la (figura 3.5) se muestra el tramo de la tubería mallado, este paso se realiza con el objetivo de concentrar en la superficie de la figura la mayor cantidad de nodos posible para facilitar la aplicación de las cargas externas con 101 189 nodos y 18 808 elementos.

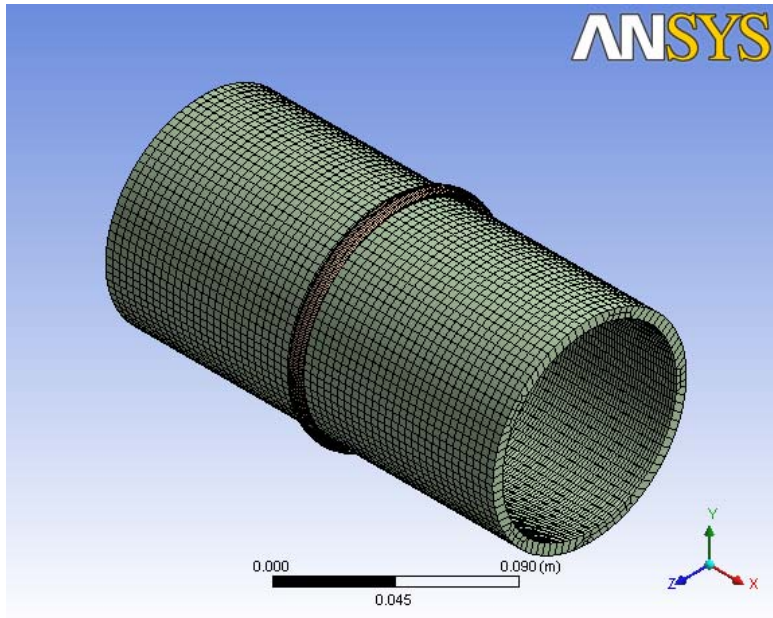


Figura 3.5 Enmallado de la tubería mediante el ANSYS 11.0

Se determinó las tensiones máximas con una presión de 0.4 N/mm^2 a una temperatura de 150°C con su valor máximo de $1.0965 \times 10^7 \text{ Pa}$ y el mínimo es de 1262.9 Pa con una distribución no uniforme como se muestra en la figura (3.6).

Las tensiones de trabajo no son lo suficientemente grande para provocar rotura en el material, pero los autores consultados en este trabajo plantean que las tensiones generadas durante el proceso de soldadura alcanzan aproximadamente la mitad del límite de fluencia, esto depende el espesor de la unión. Alfonso (2002), Sarkar (1980), Guliáev (1983), Key to Steel (2002), Macherauch y Kloos (1986) y Masubuchi (1980).

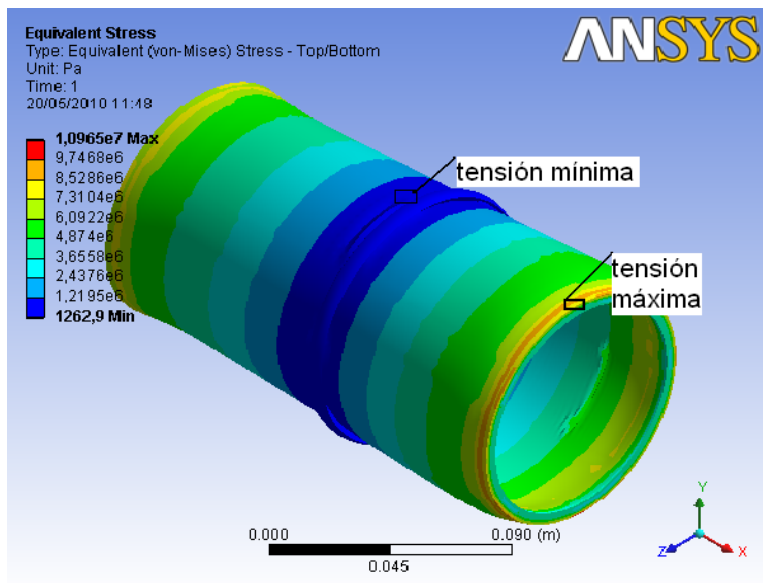


Figura 3.6 Comportamiento de las tensiones equivalentes mediante el ANSYS 11.0

La deformaciones existente producto a la temperatura y a la presión de trabajo cuyo valor máximo es de 0.0019136 m y se encuentra en la unión soldada donde es el mayor área de acción donde se distribuye a lo largo del tubo hasta su valor mínimo de color azul hasta sus extremos del tramo de tubería que es casi mínima como se muestra en la figura (3.7). Este fenómeno es producido bajo condiciones de alta restricción a la contracción.

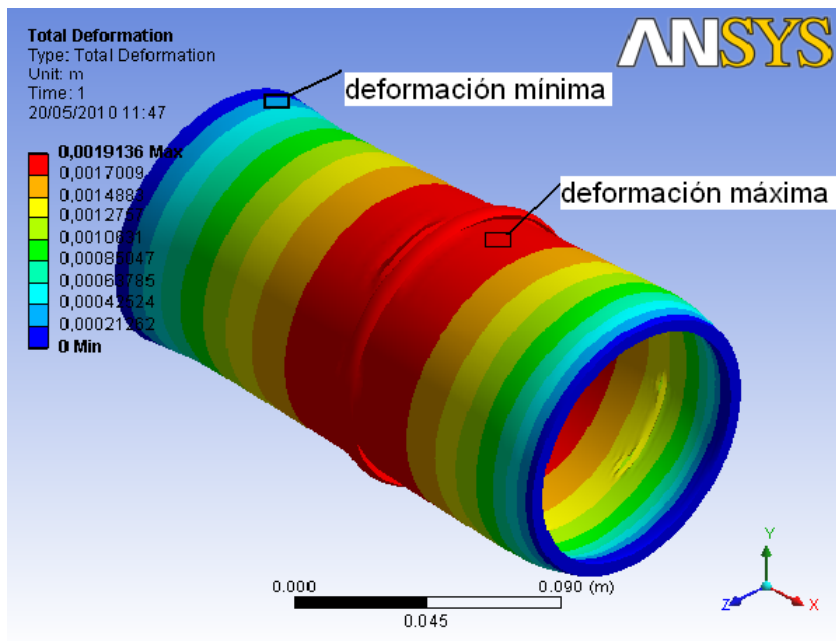


Figura 3.7 Comportamiento de las deformaciones mediante el ANSYS 11.0

3.6 Valoración Económica

Para la realización del análisis económico se toma como referencia el tiempo de ejecución obtenido durante la simulación por el (MEF) en la computadora del laboratorio de Resistencia de Materiales.

Tabla 3.4. Costo por concepto de tiempo para equipos eléctricos

Por concepto de consumo diario				
Cantidad de equipos	Consumo (kW/h)	Tarifa (\$/kW)	Tiemp (h)	Costo _{Co} (\$)
6 – lámparas	0,16	0,04	4	0,24
1- Computadora	0,25			
1 - Aire acondicionado	1,12			
Días trabajado en la realización del trabajo:60				
Costo total de días trabajado: 14.40 \$				

3.7 Impacto Ambiental

La protección del medio ambiente se ha convertido, en los últimos años, en una de las cuestiones que más inquietan a la humanidad. Los grandiosos medios técnicos de que dispone el hombre para explorar las riquezas naturales, el acelerado desarrollo de la economía y el crecimiento de la población, han dado lugar a consecuencias indeseables para la humanidad, tales como: el agotamiento de los recursos naturales, la contaminación ambiental, los ruidos, la pérdida de los valores estéticos del medio circundante y la merma acelerada del fondo genético, entre otros. No es por lo tanto casual que las organizaciones científica, sociales, políticas, los estados y gobiernos de muchas partes del mundo se hayan preocupado por tomar medidas que, de una forma u otra, están dirigidas a garantizar un uso racional de los recursos naturales y la protección del medio ambiente.

3.7.1 Daños provocados a las distintas zonas de los ojos a causa de las radiaciones

El daño a los ojos no es el único causado por la radiación ultravioleta, esta también causa enrojecimiento en la piel y quemaduras, y puede, luego de largos períodos de exposición, causar daños malignos en la piel (cáncer de piel). La garganta y los brazos son los más vulnerables a esta afección.

Los trabajadores expuestos a las radiaciones ultravioletas, en particular los soldadores por arco eléctrico, pueden presentar diversas patologías además de los trastornos oculares, como por ejemplo: trastornos sexuales (a veces atribuidos al Mn), y también lesiones de la piel, éstas pueden quemar o broncear la piel expuesta (eritema, quemadura solar), la exposición por largo período de tiempo a estos rayos han causado cáncer en la piel, reacciones de fotosensibilización (reacciones fototóxicas, reacciones fotoalérgicas), lesiones cutáneas premalignas y malignas.

Edema agudo de pulmón: Es provocado por los vapores nitrosos cuando la soldadura se efectúa en un lugar cerrado. Asimismo, hay que tomar precauciones

cuando se trabaja sobre piezas recubiertas con cadmio y en el caso de metales que hayan sufrido un desengrasado con disolventes clorados. Estos disolventes, a altas temperaturas o por acción de los rayos ultravioletas, pueden descomponerse, dando lugar a compuestos clorados nocivos para las vías respiratorias lo que implica que tales sustancias no deben manejarse nunca cerca de un puesto de trabajo. A veces la sintomatología es la de una bronconeumonía.

Alteraciones sanguíneas: Anemia, síndrome hemorrágico, poliglobulina, hemopatía maligna. Diferentes autores han observado hipersideremia. Hay que hacer notar que un soldador con siderosis pulmonar e hipersideremia puede fallecer finalmente por hemocromatosis.

Alteraciones nerviosas: Cefaleas, insomnio y astenia en los obreros que trabajan en espacios cerrados.

Afectaciones cardiovasculares: De las observaciones realizadas no se puede concluir que el trabajo de soldadura provoque alteraciones en el aparato circulatorio. Los signos de sufrimiento miocárdico, cuando los hay, son siempre secundarios a una afección pulmonar, pero está casi demostrado que los gases de la soldadura pueden agravar lesiones preexistentes.

Afectaciones cutáneas: Se han descritos eritemas actínicos a causa de los rayos ultravioletas. Se han observado dermatosis pigmentadas y alteraciones vasculares; con ciertos derivados metálicos también son posibles manifestaciones alérgicas.

La influencia perjudicial de la radiación del arco eléctrico.

Los rayos invisibles ultravioletas, producidos por el arco eléctrico influyen perjudicialmente en la vista del obrero. Si miramos sin protegernos a la luz del arco durante 5-10 minutos, después de 1-2 horas sentiremos unos dolores muy fuertes en los ojos, comienza el lagrimeo, se inflaman los párpados, etc. En este caso será necesario dirigirse al médico.

La prolongada acción de los otros rayos invisibles (infrarrojos), que también son producidos por el arco eléctrico, provoca enfermedades de la vista muy serias.

Para proteger la vista del soldador se usan unas caretas y cascos especiales con cristales protectores. Esos cristales no dejan pasar por ejemplo los rayos ultravioletas, y la filtración de los rayos infrarrojos es muy pequeña aproximadamente de 0,1 a 3 % de la cantidad total.

Para proteger al personal que nos rodea de la acción de los rayos del arco eléctrico, los lugares donde se efectúa la soldadura se deben proteger con pantallas impenetrables, con cabinas de lona u otro material teniendo una altura de 1,8 metros. Para mejorar la ventilación en el interior de la cabina las paredes no se llevan hasta el piso en unos 25 - 30 cm. Para disminuir la diferencia de la luminosidad de la luz, sería mejor que las paredes de la cabina se pinten en colores claros mates (en gris, azul, verde, amarillo) y aumentar la iluminación artificial en el puesto de trabajo.

3.7.2 Contaminación del aire con el polvo y con los vapores y gases nocivos

En el proceso de la soldadura a causa de la oxidación de los vapores del metal se forman polvos. En la zona próxima a la llama del arco eléctrico la cantidad de polvo puede alcanzar 130 mg/m^3 de aire. En los talleres de soldadura el contenido de polvo en el aire no debe ser mayor de 5 mg/m^3 de aire. El contenido del óxido de nitrógeno en el aire no debe ser mayor de 3 mg/m^3 . Durante la soldadura, además de los óxidos de nitrógeno, se forma el óxido de carbono, el cual no debe ser mayor de $10 - 20 \text{ mg/m}^3$ de aire. Para eliminar el polvo y los gases nocivos (óxidos de cobre, de manganeso, fluoruros), sobre los puestos permanentes de la soldadura se hacen unos aspiradores locales con la instalación de campanas de ventilación.

La cantidad de aire aspirada de cada puesto de soldar, debe ser de 4 000 a 6 000 m^3 por cada kilogramos de electrodos consumidos. Es particularmente perjudicial la soldadura que se efectúa en el interior de recipientes, donde se acumula una gran cantidad de polvo y gases nocivos. En este caso para mejorar la ventilación

al recipiente se le suministra aire puro. Mejores resultados ofrecen el suministro de aire de ventilación directamente a la zona de respiración del soldador, suministrando el aire por una manguera a la careta del soldador, la cual posee una empuñadura hueca y doble cristales. Durante la soldadura en caliente, es imprescindible instalar campanas de tiro, para extraer los productos de combustión de los hornos y pozos calentadores. La soldadura de zinc, del latón y del plomo se debe efectuar con caretas para protegerse de la aspiración de esos óxidos y vapores que desprenden el zinc, cobre y plomo.

Conclusiones del Capítulo 3

1. Luego de realizado el cálculo del % de ferrita el cual es de un 14% según diagrama De Long favorece a la formación de carburos de cromo y fisuración el caliente.
2. Se calculó las tensiones bajo la temperatura y presión de trabajo los parámetros calculados permiten determinar el comportamiento mecánico de los tubos. Las tensiones generadas por dichas cargas no alcanzan el 5 % de la tensión de Cedencia de material por consiguiente podemos afirmar que la rotura no es generada por las cargas externas antes mencionadas.
3. El Método de Elementos Finitos empleando el Software ANSYS, permitió determinar el comportamiento de la distribución de la temperatura, las tensiones y las deformaciones. Las mismas alcanzan valores significativos durante el proceso de soldadura.
4. Los resultados experimentales muestran que la temperatura se distribuye a lo largo de toda la plancha, desde los valores máximos (color rojo), hasta valores mínimos (color azul), siendo la dimensión de la zona de influencia térmica de 10 mm aproximadamente a ambos lados del cordón de soldadura como se muestra en la (figura 3.3) .

CONCLUSIONES GENERALES

1. Mediante la modelación y simulación por el método de elementos finitos con el empleo del Métodos ANSYS versión 11.0 se demuestra la validez de los resultados y la fiabilidad de los valores de tensiones para la temperatura y presión de trabajo.
2. Con el cálculo de las tensiones y deformaciones se demostró que el problema de la soldadura de la tubería no es problema de la resistencia del material debido a que este resiste para la temperatura y la presión de trabajo. Debido a que las tensiones apenas alcanzan los: $\sigma_{eq} = 0.04N/mm^2$ y $\sigma_{eq} = 20N/mm^2$ respectivamente.
3. El porcentaje de ferrita para la aleación y el metal de aporte es de un 14%, el cual es considerado un valor peligroso para la soldadura debido a que un ligero aumento puede ocasionar la fisuración en caliente en la soldadura.
4. El proceso de soldadura manual por arco eléctrico, está considerado como un proceso perjudicial para el organismo por la emanación de diferentes radiaciones que provocan enfermedades profesionales al obrero.



RECOMENDACIONES

1. Proponer a la empresa Ernesto Che Guevara el mantenimiento de las líneas según se establece en normas, 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.
2. Realizar ensayos de microdureza y microestructural en el cordón de soldadura de la tubería de licor amoniacal.
3. Proponer a la empresa Ernesto Che Guevara utilizar en la tubería la unión de platillo que son ensamblados en el mismo taller.
4. A partir del ensamble de la tubería aplicar un austenizado a cada cordón de soldadura.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alfaro, W.: Simulación de procesos. En: <http://www.monografias.com/trabajos6/>. 2001.
2. 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 difracción de rayos x, La Habana: Fondo Nacional de Manuscritos Científico -Técnicos del CITMA, 2002. 6p
3. ANSYS. Version 5.7. Users Guide. Swanson Analysis Systems, Inc. 1999.
4. ASTM, Annual Book of ASTM Standards, ASTM Standard E-837-99, American Society for Testing and Materials, Vol. 03.01, pp. 675-684, 2000.
5. ASTM Handbook. Failure Analysis and Prevention, Ohio: ASM International, 1996.
6. 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
7. Bilmes, P.: El análisis y prevención de fallas metalúrgicas en la ingeniería de los materiales. En: Memorias del IV Taller Científico Internacional TECNOMAT' METANICA' 2000. C. Habana, 2000.
8. Boada, O., Díaz, S., Campos, Y. "Estudio del estado físico-mecánico de superficies tratadas por deformación plástica superficial", Revista Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría (ISPJAE), Volumen 6, No. 2, Mayo-Agosto 2003, Pág. 53-58, Cuba. ISSN1029-516X.
9. BORENSTEIN, S. W. Microbially influenced corrosion handbook. Woodhead, Cambridge. 1994.
10. Boyle, J. y J. Spence: Stress analysis for creep. Londres: Butterworths, 1989.
11. Bohler Thyssen Welding. UTP Mexico, SA de CV Catálogo de productos. 2000.



12. Burgos Sola, José Leopoldo." Tecnología de Soldadura ". Editorial Pueblo y Educación. 1987. 285 pp.
13. Brown, R. S.: How to select the right stainless steel. En: Advanced Materials & Processes. Vol. 145 (4). April, 1994. Págs. 20-24.
14. CARABALLO, M. A. Comportamiento físico del acero Hadfield, en presencia de cargas explosivas. Revista Minería y Geología. Volumen XX. No. 2. 2004.
15. Craig, Jr. Johan. Mecánica de Materiales. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Utah. Ed. Prentice Hall . Segunda Edición 2002, C-267-480137.
16. De Meyer, M.; D. Toch y B. C. De Cooman: The characterisation of retained austenite in trip steels by X-Ray Diffraction. En: Proceedings of 41th Mechanical Working and Steel Processing Conference. Baltimore, MD. 2001. Vol. XXXXVII. Págs: 483-491.
17. E. De Las Heras, F. Walther, P. A. Corengia, M. O. Quinteiro, A. Cabo, S. Brühl, S. Sommadossi: Anales SAM/CONAMET, 2005, pp 909-912.
18. Diaz Cedré, E. et al: Manual para la capacitación de soldadores en el proceso de soldadura por arco con electrodo fusible y protección gaseosa. UCLV. 2000.
19. Dumov, S. I.: Tecnología de soldadura eléctrica por fusión. Ed. Construcción de Maquinaria. 1987. 461 pp.
20. Frolov. V. V.: Teoría de los procesos de soldadura. Ed. Esc. Superior. Moscú. 1981.
21. Ingham, T. y E. Moreland: The Influence of Time-dependent Plasticity on elastic-plastic fracture toughness. En: ASTM STP 803, Vol. I, 1993.
22. García, Y. R., Burgos, J. S., Gil. F., Rivalta, J: Obtención de Tensiones Residuales a lo Largo de un Cordón de Soldadura Mediante Métodos Analíticos y Experimentales. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas. UCLV. Facultad de Ingeniería Mecánica. 2004.



23. Giachino Joseph W. Técnica y práctica de la soldadura. Editorial Reverté S.A 1981.
24. Gizmanenco, O.L. "Soldadura y corte de metales". La Habana. Instituto Cubano del Libro. 1976. 472 pp.
25. Hall, D. J. y J. J. Jones: High Temperature Alloys Their Exploitable Potential. En: Applied Science 54 (3), 1986): Págs. 113-124.
26. Hamano, R.: The effect of microstructure on the fatigue cracks growth behaviour age-hardened high strength stainless steels in a corrosive environment. En: Metallurgical Transactions A. Vol. 19 A. 1988. Págs: 1461-1469.
27. Howard B. Cary. Manual de soldadura moderna. ED.Prentice Hall, Hispanoamericana, Segunda Edición .1996
28. INCHAURZA, A. Corrosión de los aceros inoxidables. En: Aceros Inoxidables y refractarios. pp. 32 – 51. Olsa (Olarra, S.A): Vizcaya. 1971a.
29. Ingham, T. y E. Moreland: The Influence of Time-dependent Plasticity on elastic-plastic fracture toughness. En: ASTM STP 803, Vol. I, 1993.
30. Kwon, O.; K. Nikbin; G. Webster y K. Jata: Crack Growth in the Presence of Limited Creep Deformation. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 62, 1999. Págs: 33-46.
31. Lai, G. Y.: Heat Resistant Materials for Furnace Parts, Trays and Fixtures: Heat treating. ASM Handbook, Ohio: ASM International Vol. 1. 1992. Págs: 510-518.
32. Li, D. J: Influence of sigma phase in creep properties of Cr2520Ni stainless steel. En: Scripta Metallurgica. 23 (8). 1989. Págs: 1319-1323.
33. 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.



34. Mannan, S. L. y M. D. Mathew: Creep of austenitic stainless steel welds. En: Bulletin of Materials Science. Vol. 19. No. 6. 1996. Págs: 985-1007.
35. MASUBUCHI, K. Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, Elmsford, N.Y. 1980.
36. F. POVOLO, G. A. Mansilla y E.B. Hermida. Relajación de tensiones por curvado a 773 en AISI 316. Disponible en la World Wide Web en <http://www.materiales-sam.org.ar>
37. Pero-Sanz, J. A.: Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Madrid: DOSSAT 2000.
38. QIU, C.: Thermodynamic calculation and precipitation of carbides in the Fe-Cr-Ni-C system. En: Steel research. Vol. 64, (12), 1993. Págs.: 618-622
39. RADHAKRISHNAN, V.M.; et al. Substructure characterizing parameter in creep, J. of Mater. Science, 30, 1521-1528, 1995.
40. Rodríguez, Héctor. "Metalurgia de la soldadura". Editorial Pueblo y Educación 1987. 613 pp.
41. Saxena, A.: Nonlinear Fracture Mechanics for Engineers. Boca Ratón: Editorial CRC Press. 1998.
42. SARKAR, A. D. Friction and wear. Academic Press Inc. (London) LTD. London. 1980. 423 p
43. Seferian, D.: Metalurgia de la soldadura. Ed. Revolucionaria. 1983. 397 pp.
44. SHREIR, L. L. The microbiology of corrosion. En: Corrosion 1. Wiley, J. (Ed). pp. 2.52 – 2.64. New York. 1963.
45. Van Wershoven, T.: How to Conduct Failure Analysis, En: Advanced Materials & Processes, Vol. 11, 1999.