



REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ
FACULTAD METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO INGENIERIA MECÁNICA

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Título: ANÁLISIS DE ROTURA EN PLACAS DE AISI 316 PARA MEZCLADORES DE ÁCIDO DEL ÁREA DE TRATAMIENTO QUÍMICO DEL AGUA.

Autor: Antonio Rodríguez Venero
Tutor: Ms C. Geovanys Ruiz Martínez

MOA - 2012

“Año 54 de la Revolución”



Declaración de Autoridad

Yo: Antonio Rodríguez Venero

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

Firma

Diplomante: Antonio Rodríguez Venero.

Firma

Tutor: Ms C. Geovanys Ruiz Martínez



Agradecimientos

A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desempeño de mi carrera en especial al profesor Geovanys.

A mi tutor por confiar en mí en la realización de este trabajo, el Ms C. Geovany Ruiz Martínez.

A mis familiares que me apoyaron en los momentos de mi vida en que más lo necesitaba.

A mis amigos que siempre creyeron en mí.

A los que de una forma u otra me apoyaron y ayudaron en la realización de este trabajo.

A la revolución, por darme la oportunidad de convertirme en profesional.

A todos

Muchas Gracias



Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mis familiares.

A mi madre: Sobeida Venero Garcia.

***A mis hermanos: Rafael y Iraldo que les sirva
de ejemplo.***

A mi Novia: Kenia Fortuna Marino.

A mi padre: Antonio Rodríguez Rodríguez.

***A mis amigos: Geova, Alisvey, Adrian, Erito y
Félix.***

***A nuestra revolución, por las posibilidades
que me ofrece.***

PENSAMIENTO

"Cuando ustedes entiendan perfectamente su maquinaria, podrán manejarla mucho mejor, podrán hacer con ella, prácticamente, lo que quieran. Así ustedes tienen también que aprender a manejar una serie de elementos, para aprender a pensar, para poder proyectarse hacia el futuro. Recuerden que las sociedades no son cosas estáticas; recuerden que ustedes no pueden conformarse con llegar a un escalón, y allí quedarse. Están en el principio de una escalera que no debe acabarse."

Ernesto Guevarra de la Serna



Resumen

Se establece la resistencia mecánica del acero AISI 316 y el comportamiento microestructural empleado en los mezcladores de ácidos del área de tratamiento químico del agua, para ello se prepararon 12 probetas, las cuales fueron cortadas de forma longitudinal con dimensiones de 90 X 45. Fueron soldadas con diferentes electrodos para valorar el comportamiento del agrietamiento en el cordón de soldadura. Fueron empleados electrodos del tipo E 316 L 16, E 310 L – 16, E 309 L – 16. Se investigó la soldabilidad de las muestras considerando el [Cr] y [Ni]. Se tuvo en cuenta los procesos de soldadura sobre el hombre, el medio ambiente y la valoración económica.

Abstract

The AISI 316 steel mechanical strength and the microstructural behavior used in the acid mixer of the area for chemical water treatment are set up, thus, there were prepared 12 test tube, which were cut longitudinally with a dimension of 90 X 45. They were welded with different electrodes to assess the behavior of cracking in the weld bead. The type of electrodes used were: E 316 L 16, E 310 L – 16, E 309 L – 16. The weldability of the samples were searched, considering [Cr] and [Ni]. The welding processes, the environment, and the and economic validation were taken into account.

Índice

CAPITULO I. MARCO TEÓRICO	1
1.1 Introducción	1
1.2 Generalidades de los aceros inoxidables	2
1.3 Generalidades acerca del acero AISI 316	3
1.4 Defectos en la soldadura de los aceros inoxidables	5
1.5 Tensiones en las uniones soldadas	6
1.6 Distorsión por soldadura	13
1.7 Propiedades del acero AISI 316	15
1.8 Conclusiones del Capítulo I	17
CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	18
2.1 Introducción	18
2.2 Caracterización del material de la placa de AISI 316	18
2.3 Plan experimental	19
2.4 Materiales y equipos empleados en la experimentación	19
2.5 Electroodos	21
2.6 Microscopio óptico	23
2.7 Análisis microestructural	23
2.8 Preparación metalográfica de la probeta	24
2.9 Ataque de las muestras para su examen microscópico	27
2.10 Equipo utilizado en la medición de temperatura	27
2.11 Diagrama de Schaeffler	28
2.12 Cálculo de la resistencia mecánica en placas de acero AISI 316	29
2.13 Modelación y simulación por el Método de Elementos Finitos	30
2.14 Conclusiones del capítulo II	32
CAPITULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	33
3.1 Introducción	33
3.2 Análisis de la composición química del metal base	33
3.3 Análisis microestructural	38
3.5 Análisis por el diagrama de Schaeffler	43
3.6 Resultados del cálculo de tensiones provocadas por las temperaturas y desplazamiento	45
3.7 Análisis de los resultados de la simulación por el Método de Elementos Finitos (MEF)	45
3.7 Valoración económica	47



3.8 Peligros Ambientales relacionados con los trabajos de soldadura	48
3.9 Conclusiones del capítulo III	49
Conclusiones generales	50
Recomendaciones	51
Bibliografías	52

INTRODUCCIÓN

La necesidad de encontrar materiales resistentes a la corrosión, elevadas temperaturas y expuestos a medios ácidos, ocasionó la investigación y descubrimiento de aleaciones a base de hierro, carbono, cromo y otros elementos aleantes, principalmente níquel, molibdeno, manganeso, silicio, titanio entre otros que les confieren una resistencia particular ante algunos tipos de corrosión y atmósferas, denominadas inoxidable.

Los aceros inoxidables se caracterizan por tener en su composición química un contenido mínimo del 10,5% de cromo el cual tiene gran afinidad con el oxígeno y reacciona con él, formando una capa pasivadora que evita la corrosión del hierro contenido en la aleación. Sin embargo, esta película puede ser afectada por algunos ácidos dando lugar a un ataque y oxidación del hierro por mecanismos intergranulares o picaduras generalizadas.

Sus excelentes propiedades físico – mecánicas los convierten en materiales indispensables e insustituibles en las industrias químicas, del alcohol, petroquímicas, de papel y celulosa, petrolífera, textil, farmacéutica y metalúrgicos, no sólo por sus buenas propiedades anticorrosivas sino, por sus buenas cualidades tecnológicas y mecánicas. Además de soportar el embutido profundo y ser eléctricamente soldables.

Atendiendo a su composición y estructura, se encuentran clasificados en cuatro grandes grupos: martensíticos, ferríticos, dúplex y austeníticos, siendo estos últimos los de mayor resistencia a la corrosión. Dentro de los cuales encontramos el AISI 316 con una estructura cúbica de caras centradas, esencialmente no magnético en estado recocido y sólo puede endurecerse en frío.

En nuestro país como resultado de la inserción de nuevos procesos tecnológicos en las esferas de la ciencia y la técnica, principalmente a escala industrial, ha surgido la necesidad de investigar el por qué del agrietamiento en las zonas fundida (ZF) y de influencia térmica (ZIT) en el acero inoxidable austenítico 316.

El presente trabajo ha sido desarrollado en la planta termoeléctrica de la empresa "Ernesto Che Guevara". En los momentos actuales para el desarrollo económico del país se requiere de un incremento productivo en la producción de Níquel. Basado en la puesta en explotación de modo racional de todos los equipos con que cuenta, para lo cual se ha tomado como análisis especialmente en placas de AISI

316 para mezcladores de ácido del área de tratamiento químico del agua en la planta termoeléctrica de la empresa "Comandante Ernesto Ché Guevara".

En la revisión bibliográfica realizada, se aprecia una gran variedad de enfoques con relación a la descripción de tecnologías empleadas para la soldadura del AISI 316 y las regularidades de su comportamiento mecánico y funcional; sin embargo todavía no quedan resuelto todos los problemas asociados a su soldabilidad cuando este material trabaja en condiciones de ambiente de sustancia agresiva.

La **Situación Problemática** de la investigación la constituye:

A pesar de la implementación de estrictas regulaciones acerca de la construcción, explotación, inspección, mantenimiento y reparación en placas que transportan H_2SO_4 , estas fallan causando pérdidas humanas y económicas (Papadakis, 1999). Las causas de estas fallas son variadas y pueden estar relacionadas a la actividad humana o inducida por largos períodos de servicio. Específicamente sobre las fallas inducidas por el servicio, las causas principales son: pérdida de espesor debido a la corrosión y agrietamiento originado por fragilidad por hidrógeno, corrosión bajo tensión o fatiga.

Estudios desarrollados por Kiefner, 2001 muestran que entre 1986 y 1999, en los Estados Unidos, el 12 % de las fallas en placas estuvieron relacionadas a defectos de soldadura.

Frente a la presencia de daños en placas de AISI 316, que pueden conducir a una falla catastrófica, se hace necesario reparar y esta decisión tiene una fuerte justificación económica.

Hay varias alternativas para realizar la reparación en placas de AISI 316 y cada una tiene aspectos diferentes, el caso de las placas de AISI 316 presentando agrietamiento en las uniones soldadas, elemento este de considerable riesgo para la vida humana y la economía del país, así como la producción de la empresa.

El **Problema** a investigar lo constituye: La insuficiente información en la caracterización del agrietamiento de las zonas fundida (ZF) y de influencia térmica (ZIT) en el cordón de soldadura en placas de AISI 316.

Como **Objeto de la investigación** se establece: Cordón de soldadura en placas de AISI 316.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**

Si se caracteriza microestructuralmente la zona fundida (ZF) y la zona de influencia térmica (ZIT) del acero empleado en la placa de AISI 316, después del depósito de cordones con electrodos E 316 L 16, E 310L – 16, E 309L – 16, se podrá determinar cuales son las causas que provocan el agrietamiento.

A partir de la hipótesis planteada, se define como **Objetivo del trabajo**

Determinar las causas que originan el agrietamiento en las zonas fundidas (ZF) y de influencia térmica (ZIT) del acero inoxidable AISI 316, para mezcladores de ácido del área de tratamiento químico del agua de la planta termoeléctrica de la empresa "Comandante Ernesto Ché Guevara".

Y se definen los siguientes **Objetivos Específicos**

1. Definir las regularidades del comportamiento mecánico y microestructural de la Zona fundida (ZF) y Zona de Influencia Térmica (ZIT), del acero AISI 316 sometido a proceso de soldadura.
2. Analizar el procedimiento tecnológico de soldadura del acero AISI 316 sometido a medio agresivo.
3. Analizar los factores que provocan el agrietamiento en los aceros inoxidables sometidos a proceso de soldadura por el Método de Elemento Finito (MEF).

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas de trabajo:**

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Obtención de las regularidades del comportamiento mecánico y microestructural del acero en placas AISI 316 en la ZF y la ZIT sometido a proceso de soldadura.
3. Ejecución experimental para la validación y corroboración de la formulación desarrollada para la determinación del comportamiento mecánico y microestructural del acero en placas AISI 316 en las Zona Fundida (ZF) y la Zona de Influencia Térmica (ZIT).
4. Fundamentación del mecanismo de obtención microestructural de la ZF y la ZIT del acero en placas AISI 316 durante el proceso de soldadura en medios agresivos.
5. Análisis de los resultados.

CAPÍTULO I

CAPITULO I MARCO TEÓRICO

1.1 Introducción

El incansable deseo del hombre por alcanzar la perfección hace que cada día busque alternativas y vías para mejorar y alargar la calidad de vida de los seres humanos. Con este objetivo se buscan y se perfeccionan materiales ya sean ferrosos y no ferrosos para alargar la vida útil de maquinarias y equipos, y a la vez facilitar el trabajo. El vertiginoso desarrollo de la ciencia, la técnica y la tecnología, hace que el hombre busque alternativas para identificarse con estos adelantos científicos técnicos. Para ello se hace imprescindible la búsqueda de materiales que permitan la construcción de maquinarias, equipos y agregados, que le humanice el trabajo y lo ayude a desarrollarse. Estos materiales pueden ser ferrosos y no ferrosos, destacándose dentro de estos grupos el hierro, el cromo, el níquel, el acero, entre otros.

En la amplia utilización en la actualidad en todas las esferas de desarrollo industrial: Industrias Niquelífera, doméstica, médica, automovilística, constructiva, aeronáutica, es que tienen gran aplicación los aceros inoxidables.

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

Algunos ejemplos de productos fabricados con aceros inoxidables 316 son los equipos de procesos químicos y petroquímicos, equipos de proceso de alimentos y bebidas, equipos farmacéuticos, cámaras de combustión, sistemas de escape y filtros automotrices, vagones de ferrocarril, aplicaciones arquitectónicas y estructurales, mobiliario urbano, paneles de aislamiento térmico, intercambiadores de calor, tanques y recipientes, barriles de cerveza, instrumentos quirúrgicos, agujas hipodérmicas, monedas, ollas y sartenes, cubiertos, lavadoras, lavavajillas y utensilios de cocina. Se emplean además en las Industrias fotográfica, textil. Industria de la pintura. Industria de caucho. Industria del algodón. Construcciones marítimas. Artículos de alambres: mallas, rejillas, armazones, canastas (para pesca)

En la industria química, petroquímica y metalúrgica, los aceros inoxidables ofrecen elevada resistencia a la corrosión y excelentes propiedades mecánicas así como un

bajo costo de mantenimiento. En la industria de alimentos y bebidas y en la industria farmacéutica, proveen excelentes condiciones de higiene además de su resistencia a la corrosión y duración a largo plazo. Estos materiales por sus características anticorrosivos y sus propiedades térmicas son empleados en áreas de la Empresa "Ernesto Guevara", de Moa.

En el presente capítulo se establece como **objetivo**

Definir el estado del arte en la temática abordada y realizar un análisis de la bibliografía existente que permita sustentar los resultados alcanzados en la investigación.

1.2 Generalidades de los aceros inoxidables

El acero inoxidable no es un material simple sino una aleación. Lo que tienen en común todos los aceros es que el principal componente (elemento que forma la aleación) es el hierro, al que se añade una pequeña cantidad de carbono. El acero inoxidable fue inventado a principios del siglo XX cuando se descubrió que una pequeña cantidad de cromo (habitualmente un mínimo de 10%) añadido al acero común, le daba un aspecto brillante y lo hacía altamente resistente a la suciedad y a la oxidación. Esta resistencia a la oxidación, denominada «resistencia a la corrosión», es lo que hace al acero inoxidable diferente de otros tipos de acero.

El acero inoxidable es un material sólido y no un revestimiento especial aplicado al acero común para darle características "inoxidables". Aceros comunes, e incluso otros metales, son a menudo cubiertos o "bañados" con metales blancos como el cromo, níquel o zinc para proteger sus superficies o darles otras características superficiales. Mientras que estos baños tienen sus propias ventajas y son muy utilizados, el peligro radica en que la capa puede ser dañada o deteriorarse de algún modo, lo que anularía su efecto protector. La apariencia del acero inoxidable puede, sin embargo, variar y dependerá en la manera que esté fabricado y en su acabado superficial.

En metalurgia, el acero inoxidable se define como una aleación de acero con un mínimo de 10% de cromo contenido en masa. El acero inoxidable es resistente a la corrosión, dado que el cromo, u otros metales que contiene, posee gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasivadora, evitando así la corrosión del hierro. Sin embargo, esta capa puede ser afectada por algunos ácidos, dando lugar a

que el hierro sea atacado y oxidado por mecanismos intergranulares o picaduras generalizadas. Contiene, por definición, un mínimo de 10,5% de cromo. Algunos tipos de acero inoxidable contienen además otros elementos aleantes; los principales son el níquel y el molibdeno.

Los aceros inoxidables que contienen níquel son indispensables en la construcción de equipos para la industria de procesos. Estos aceros se usan en lugar de los aceros convencionales por sus excelentes propiedades tales como: resistencia a la corrosión, dureza a baja temperatura y buenas propiedades a altas temperaturas. Su resistencia a la corrosión es lo que da al acero inoxidable su nombre. Sin embargo, justo después de su descubrimiento se apreció que el material tenía otras muchas valiosas propiedades que lo hacen idóneo para una amplia gama de usos diversos. Las posibles aplicaciones del acero inoxidable son casi ilimitadas, (Di Caprio, 1987).

1.3 Generalidades acerca del acero AISI 316

Los aceros inoxidables austeníticos son esencialmente aleaciones ternarias de Fe, Cr y Ni, que contienen de un 16 hasta un 25% de Cr y de un 7 a un 20% de Ni, estas aleaciones son llamadas austeníticas debido a que su estructura permanece austenítica, (FCC, Fe - γ) a temperatura ambiente. La mayor parte de estos aceros contienen de un 0,06 a 0,1 % de C. Cabe señalar que algo del Ni de esta aleación puede ser reemplazado por Mn sin alterar la estructura austenítica del acero.

La aleación 316 es un acero inoxidable austenítico de uso general que reúne las mejores condiciones de resistencia al calor y a la corrosión. Esta característica de excelente resistencia se debe a la formación de una película adherente e invisible de óxido de cromo que se forma en la superficie del acero, como consecuencia del agregado de los elementos cromo, níquel, molibdeno y otros (Beddoes y Parr, 1999.)

Posee muy buena maquinabilidad, embutibilidad, y resistencia al impacto. Es un acero que se suelda fácilmente, pero en las zonas recalentadas si no se realiza hipertemple puede presentar corrosión intergranular. Se puede endurecer por deformación en frío (alambres). En estado recocido (hipertemplado) no es ferromagnético. A medida que se deforma en frío, adquiere ferromagnetismo. (Guliaev, 1983)

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

Algunos ejemplos de productos fabricados con aceros inoxidables 316 son los equipos de procesos químicos y petroquímicos, equipos de proceso de alimentos y bebidas, equipos farmacéuticos, cámaras de combustión, sistemas de escape y filtros automotrices, vagones de ferrocarril, aplicaciones arquitectónicas y estructurales, mobiliario urbano, paneles de aislamiento térmico, intercambiadores de calor, tanques y recipientes, barriles de cerveza, instrumentos quirúrgicos, agujas hipodérmicas, monedas, ollas y sartenes, cubiertos, lavadoras, lavavajillas y utensilios de cocina. (Isabel, 2005)

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

1.3.1 Composición química estándar del acero AISI 316

La composición química estándar de este acero según Databook 1988 y editada por la American Society for Metals, muestra la designación adoptada por la AISI y SAE, las cuales a su vez, coinciden con el sistema de numeración Unified Numbering System-UNS, de la American Society for testing Materials-ASTM y la SAE, se refleja a continuación en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Composición química del acero AISI 316 (Fuente Databook 1988)

Tipo	Cr	Ni	C	Mn	Mo	P	S	Al	Si	Cu
316	16 - 22	10 - 27	0,08	2,0	2,3	0,039	0,030	0,005	0,34	0,290

1.3.2 Influencia de los principales elementos de adición

Además de las familias de aceros inoxidables antes mencionadas, existen los aceros inoxidables endurecibles por precipitación. Su uso está muy acotado, y el fabricante suele suministrarlo con el tratamiento térmico de precipitación ya realizado. Pueden tener estructura austenítica, martensítica y semiaustenítica (con una temperatura Ms

por debajo de la temperatura ambiente). Son aceros con Cr entre 12 - 18% y Ni entre 4 - 9%, además de los aleantes que producen el endurecimiento por precipitación (Mo, Ti, N, Cu, Al, Ta, Nb, B y V).

Los elementos de aleación tienen un efecto importante sobre las propiedades de los aceros. En los aceros inoxidables este efecto también es importante, y se puede diferenciar la influencia sobre los aceros inoxidables no endurecibles por tratamiento térmico (ferríticos, austeníticos y austenoferríticos) y los que si pueden endurecerse por tratamiento térmico (martensíticos y endurecibles por precipitación). En los aparatos de cracking debe funcionar a temperaturas muy bajas, de hasta – 100 °C, sin presentar roturas frágiles, se utilizan aceros con 3,5% de níquel.

Podemos ver que, además del Ni, existen una serie de elementos presentes en estas aleaciones que nos ocupan que tienden a mantener la estructura gamma o austenítica hasta temperatura ambiente, son los elementos que llamamos gammágenos: Carbono, Nitrógeno, Manganeso, Cobalto, Cobre (y Níquel).

En cambio, al igual que el Cr, otro grupo de elementos tienden a facilitar la transformación hacia alfa o ferrítica, elementos que llamamos alfégenos y en resumen son: Hierro, Silicio, Titanio, Niobio, Molibdeno, Manganeso (y Cromo).

Para una correcta soldadura es importante predeterminedar el porcentaje de los elementos de aleación para conseguir la estructura deseada en el metal de soldadura.

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 en 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 (Jeffus, 1997).

1.4.1 Tendencia al agrietamiento en los aceros inoxidables austeníticos

Existe gran probabilidad de ocurrencia de grietas a elevadas temperaturas, en uniones soldadas de aceros inoxidables austeníticos (Radhakrishnan, 2000), para relaciones de Cr/Ni inferiores a 1,6.

Shankar, (2003) y Schindler, (2007) refrieren la ocurrencia de agrietamiento en estos aceros en el proceso de solidificación, la que se produce predominantemente por la

segregación de pequeñas cantidades de mezclas de fases secundarias, acompañadas de tensiones de contracción. Aunque el autor considera que la presencia de molibdeno, en dichos aceros reduce considerablemente este efecto.

Hazarabedian et al, (2000) analizan el comportamiento a la fractura en el envejecimiento de un acero inoxidable con entalla y establecen la probabilidad de rotura cuando hay presencia de éstas, aunque solo estudian aceros inoxidables dúplex y en ningún momento los someten a temperaturas superiores a 475 °C, por lo que no describen la conducta de éstos a dichas temperaturas.

La fragilización en caliente por procesos de solidificación se presenta como una de las causas más comunes de las roturas en partes de hornos y elementos sometidos a elevadas temperaturas de servicio (Avilés, 2007).

Los efectos de fases endurecedoras sobre las propiedades mecánicas de los inoxidables austeníticos (serie 300); así como aleaciones HH fueron estudiados por Hiller (1991) y Velázquez et al., (2001) respectivamente, los que proponen modelos termodinámicos, bajo distintas condiciones, con energía de Gibbs de los compuestos individuales que aparecen, enfocándose a la solubilidad y precipitación de carburos y fases sigma en la austenita, aunque no tienen en cuenta el efecto de dichas fases en presencia de concentradores tecnológicos.

1.5 Tensiones en las uniones soldadas

En las uniones soldadas se pueden encontrar 6 tipos de tensiones residuales fundamentalmente, se encuentran las tensiones transversales y longitudinales (o también llamadas de alargamientos), a lo largo del cordón o en toda su longitud, en las secciones transversales al cordón y las tensiones longitudinales y transversales en espesor. En dependencia de la potencia térmica de la fuente empleada, de la velocidad de soldadura, del espesor, del carácter de fijación de la pieza, la distribución de tensiones puede ser distinta. (Bonifaz, 2000)

Las tensiones térmicas que se originan en los procesos de soldadura, pueden ser de tracción y de compresión. Las altas tensiones residuales a tracción son conocidas por promover fractura y fatiga, mientras que las tensiones residuales a compresión pueden inducir a indeseables y a menudo imprevisibles pandeos globales o locales durante o después de la soldadura. Esta adversidad afecta la fabricación, el ensamblaje, y la vida

de servicio de las estructuras (Parlane, 1980). Por lo tanto, la predicción y control de las tensiones residuales y la deformación a partir del proceso de soldadura es extremadamente importante. Hoy en día numerosos investigadores dedicados al tema, hacen gran uso de la modelación por Elementos Finitos con el fin de predecir y determinar con gran exactitud los desplazamientos, las deformaciones y los valores de las tensiones residuales. (Parlane, 1980); (García; Burgos, 2002, 2003); (Masubuchi, 1980); (Goldak, Moashi, 1999); (Micharelis, 2004); Meo; Vignjevic, 1999).

1.5.1 Generalidades y naturaleza de la corrosión bajo tensión

En los últimos años han sido numerosos los trabajos específicos y obras generales publicados sobre este tema, ello se debe, sin duda, a la importancia práctica que presenta este tipo de corrosión que da lugar a la fisuración y rotura del material y que viene provocada por la acción combinada de esfuerzos mecánicos estáticos y de un agente químico corrosivo.

Mejia; Maldonado (2004) plantean que los esfuerzos pueden ser internos o superficiales o de ambos tipos conjuntamente, se ha comprobado que, para que se produzca este tipo de corrosión es preciso que el acero o material soporte esfuerzos de tracción, pues los de compresión no sólo no provocan el fenómeno, sino que, en ocasiones, puede ejercer una acción protectora.

Las tensiones causantes de la corrosión pueden ser de origen externo, es decir, aplicadas al material por cualquier medio, o bien inherentes al mismo, por ejemplo: residuales de operaciones de trabajado en frío o de tratamientos térmicos u operaciones de soldadura e incluso originadas en proceso de precipitación o de transformación estructural. (Hochmann, 1968)

La corrosión bajo tensión puede darse tanto en materiales metálicos como no metálicos, es decir, que puede considerarse como una propiedad asociada al estado sólido.

Laufgang (2003) considera que con respecto a los aceros inoxidable, se puede afirmar que de modo general, en presencia de determinados agentes corrosivos resultan susceptibles a la rotura de carácter intergranular, cualquiera que sea su estructura: austenítica, ferrítica o martensítica. Las roturas de este tipo están relacionadas con los procesos, que convierten a los aceros en susceptibles a la corrosión intergranular. En

cambio, las roturas de carácter transgranular se observa solamente en los aceros inoxidables con estructura austenítica.

Los aceros al cromo - níquel industriales, como es natural no son aleaciones Fe – Cr – Ni puras, sino que contienen impurezas. Estas impurezas, disolviéndose en las fases principales, influyen en las condiciones de equilibrio y en la cinética de la transformación, pero si las impurezas forman nuevas fases por ejemplo, carburos, nitruros, intermetales u otras, pueden cambiar considerablemente las propiedades del acero, aunque su influencia sobre la transformación sea en este caso menos importante. (Puchi-Cabrera, 2003).

1.5.2 Teorías sobre la corrosión bajo tensión

En el caso de los aceros inoxidables austeníticos 18 - 8, se ha supuesto que en aquellos en que la austenita es poco estable, las zonas de martensita, formada por deformación local, pueden intervenir como fase anódica. Esto nos lleva a considerar un camino preferente para la corrosión, análogo a la zona descromizada gracias a la cual se explica la corrosión intercrystalina. En el caso de la corrosión bajo tensión que provoca grietas transgranulares en los aceros inoxidables austeníticos es preciso imaginar que estos caminos preferentes pasan a través de los granos, lo cual obliga a considerar las causas químicas como poco probable y a imaginar teorías físicas para explicarlo (Edeleanu). La presencia de martensita podría ser una de las razones y, efectivamente, se ha demostrado que el cloruro de magnesio ataca las zonas martensíticas. (Mejía et al., 2000)

Guliar (1978); Nace (2000) plantean que en muchas aleaciones se ha presentado el agrietamiento transgranular en que no había transformación martensítica o que no pertenecen al sistema cúbico centrado en las caras y principalmente en los aceros austeníticos en los cuales grandes deformaciones en frío no provocan la aparición de martensita deben, pues, encontrarse otras razones para confirmar la teoría de Edeleanu. La deshomogenización de las soluciones podría ser una de estas razones.

Conde y Santiago (1971) consideran que ciertas teorías se apoyan, sin embargo, sobre la acción de fenómenos puramente mecánicos, posiblemente porque la absorción de sustancias químicas en el fondo de las grietas vuelve el metal frágil; es decir que los productos de corrosión depositados en el fondo de las grietas, cuyo volumen es mayor

que el del metal del cual provienen ejerzan una fuerza considerable y actúen como cuñas en el interior de las grietas. Ciertos exámenes efectuados al microscopio electrónico apoyarían esta última teoría.

Los aceros austeníticos tienen también tres problemas asociados a las altas temperaturas ya sea de servicio o durante la fabricación (soldadura). (Sabs, 1997; Olsson., 1998) en lo que se encuentran:

- ✓ Sensitización,
- ✓ Fisuración en caliente,
- ✓ Formación de fase sigma.

1.5.3 Sensitización. Corrosión intergranular (CIG)

En el 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 disminución de Cr de la solución sólida en las adyacencias del borde de grano deja poco Cr para formar la película protectora de óxido de cromo. Esta situación deja al acero inoxidable vulnerable a ciertos medios y se la denomina sensitización. (ASM Handbook, 1973)

La corrosión resultante es intergranular como consecuencia de la precipitación de los carburos de Cr, y en este orden cronológico.

Burgan (1993) en la soldadura de estos aceros produce áreas adyacentes al cordón que alcanzan las temperaturas antedichas, debido a ello estos aceros se sensitizan en dos bandas paralelas al cordón de soldadura levemente alejadas de este.

1.5.4 Corrosión intergranular (sensibilización) y degradación por soldadura

Gardner; Nethercot (2002) plantean que cuando los aceros inoxidables se someten a prolongados períodos de calentamiento a temperaturas entre 450 °C y 850 °C, el carbono presente en el acero se difunde hacia los contornos del grano, precipitando carburo de cromo. Ello hace que el cromo desaparezca de la solución sólida y deje un bajo contenido en cromo adyacente al contorno del grano. En estas condiciones se dice que el acero se sensibiliza. Los contornos del grano son propensos a un ataque preferencial en una exposición posterior a un ambiente corrosivo. Este fenómeno se

conoce como degradación por soldadura cuando ello ocurre en la zona afectada por el calor de una soldadura.

1.5.5 Ataque de Línea de cuchillo (Knife line attack KLA)

Baddoo, Gardner (2000) plantean que cuando un acero estabilizado se suelda, especialmente con SMAW (electrodo revestido), una muy fina (solo de algunos granos de ancho) y muy cercana capa de material base adyacente al cordón de soldadura se calienta a temperaturas superiores a 1 050 °C (en realidad debido a las grandes velocidades de calentamiento y a la propia inercia de la redisolución es necesario calentamientos un poco superiores (1 230 °C) para redissolver los carburos de (Nb) con la consiguiente disolución de todos los carburos, una vez que el electrodo avanza esa zona se enfría demasiado rápidamente en el rango de formación de carburo de Ti o Nb impidiendo su precipitación.

Glizmanenko (1965); Burgos (1987); American Welding Society (AWS) (1996); Rodríguez (1983) coinciden en plantear que esto ocurre especialmente en chapas de poco espesor. Esta zona, luego queda sensibilizada con las pasadas consecutivas, algún eventual tratamiento térmico o en servicio, ya que llega a la temperatura de precipitación del carburo de Cr teniendo todo el C disponible y precipitando carburo de Cr. Esta fina capa y una vez en servicio se corroe dejando a ambos lados del cordón y mucho mas cerca de este, que el caso de corrosión intergranular convencional, una fina ranura corroída que por su parecido al corte que dejaría un cuchillo se llama Knife Line Attack (KLA).

El KLA puede evitarse simplemente calentando a la zona afectada a una temperatura superior a 815°C a partir de la cual los carburos de Cr comienzan a redisolverse e inferior a 1050°C donde la redisolución es completa, y luego enfriar lentamente. En general el Tratamiento Térmico Post Soldadura (TTPS) es localizado y se realiza a unos 900°C, máxima temperatura que se puede alcanzar con los calefactores eléctricos normalmente utilizados en TTPS.

1.5.6 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.

De Almeida et al., (1986) 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. (Easterling, 1992)

1.5.7 Métodos para el alivio de las tensiones residuales en la soldadura

Generalmente los métodos para el alivio de las tensiones residuales se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- ✓ Por vía térmica,
- ✓ Por vía mecánica.

1.5.7.1 Alivio de tensiones por vía térmica

Este tratamiento, ampliamente utilizado en la industria, consiste en calentar los conjuntos soldados hasta una temperatura inferior a la de transformación y mantenerlos en ella un tiempo suficientemente largo como para que se uniforme en C toda la pieza y puedan efectuarse los reajustes dimensionales necesarios para establecer

el estado de equilibrio a los nuevos valores de la tensión de fluencia correspondiente a dicha temperatura. (Evanss, 1986)

Las temperaturas empleadas para el tratamiento térmico de alivio de tensiones son normalmente de alrededor de 600 °C para los aceros estructurales comunes y pueden llegar a 700/750 °C en aceros de alta aleación a base de molibdeno.

Tal es el caso de los aceros inoxidables (Guliaev, 1977) que son susceptibles a la precipitación de cromo para formar carburos de cromo cuando son sometidos a temperaturas dentro del rango 400 - 700 °C, trayendo como consecuencia que aparezca zonas cuya pasividad frente a los agentes químicos agresivos se encuentra disminuida, además de disminuir sus propiedades mecánicas.

Por lo anteriormente expuesto se puede concluir que el alivio de tensiones por vía térmica tiene ventajas y desventajas porque para realizarlo hay que contar con instalaciones complejas y costosas, además, de su alto consumo de energía eléctrica, estando limitado el tamaño de piezas voluminosas. Hay que tener en cuenta el tipo de material para que no ocurra la fragilización del mismo o la corrosión intercrystalina y por consiguiente una disminución catastrófica de las propiedades mecánica del material con el consiguiente gasto del recurso.

Existen en la actualidad importantes firmas extranjeras como lo es la Mannings Thermal & Environmental Engineers Inglesa que esta especializada en todo tipo de tratamiento térmico volumétrico con el uso de hornos de hasta 50 toneladas de capacidad capaz de alcanzar temperaturas de hasta 1100 °C, junto con una variedad de pequeños hornos y estufas, además utilizan para los tratamientos térmicos localizados elementos de calentamiento flexible de muy fácil aplicación. Recomiendan para el tratamiento "térmico in situ" de grandes recipientes cuyo transporte no es práctico el uso de quemadores de gas y de equipos de combustión de alta velocidad los cuales son encendidos dentro del recipiente con aislamiento exterior convirtiéndose en su propio horno, pero que en condiciones de difícil acceso, alta humedad del ambiente, estructuras de gran tamaño, tuberías, poco tiempo y necesidad de ahorrar energía eléctrica no compiten con el método de explosión. (Gooch, 1974).

1.5.7.2 Alivio de tensiones por vía mecánica

Este método es realizable cuando la pieza posee una suficiente reserva de ductilidad, es decir, exhibe capacidad de estirarse plásticamente. Dicho de otra forma (Masubuchi, 1980) durante la descarga, en metales que se comportan de una manera puramente

elástica, siempre si han tenido una deformación plástica. Ocurre una redistribución de las tensiones residuales al aplicar y remover tensiones externas.

1.6 Distorsión por soldadura

Tal y como sucede en otros metales (Davies y Griffith, 1999) el acero inoxidable se ve afectado por la distorsión inducida por la soldadura. Los diferentes tipos de distorsión (angular, curvatura, retracción) son de naturaleza muy similar a los que se dan en estructuras de acero al carbono. Sin embargo, la distorsión en estructuras de acero inoxidable y en particular para los grados austeníticos, es mayor que en las estructuras de acero al carbono debido a los más altos coeficientes de dilatación térmica y a las más bajas conductividades térmicas, que conducen a mayores gradientes de temperatura.

1.6.1 Modificaciones estructurales de la zona fundida (ZF)

Las modificaciones estructurales pueden agruparse en dos grupos (Rodríguez, 1983; Guliari, 1978), las que afectan el grano del metal, a su arquitectura interna. El estudio de esta estructura determina la forma, el tamaño y la orientación de los granos en la zona fundida y también en el metal de base hasta una cierta distancia.

Las que intervienen en el cambio de estado físico - químico de los constituyentes del metal. Estas modificaciones, para un acero de composición química dada, son función directa del ciclo térmico impuesto por la fusión, que determina el poder de templado en soldadura. El tamaño, la forma y la orientación del grano de solidificación, van a depender entonces de la temperatura a la que se ha llevado el metal, del tiempo que se hayan mantenido a esta temperatura y de la velocidad de enfriamiento al atravesar las líneas de transformación.

En soldadura eléctrica por arco, se procede en general con depósitos sucesivos de metal fundido de volumen muy pequeño con solidificación casi instantánea; como consecuencia, la estructura del metal fundido es más fina, alineada y acicular. Si la operación lleva varias pasadas, la influencia térmica de las pasadas producirá un refinamiento de grano en las estructuras, (Indura s.a, 1988).

1.6.2 Grietas en caliente

Las grietas en caliente se forman en la zona fundida, o en la ZAC muy cerca de la línea de fusión y a altas temperaturas (durante el período de cristalización del metal entre la

línea de líquidos y la de sólido, donde el metal se encuentra en estado bifásico o por debajo de la línea de sólidos) (Quesada et al., 2001).

Los aceros propensos a este tipo de agrietamiento son fundamentalmente los aceros rápidos o de libre maquinado, que presentan grandes contenidos de S y P, los que forman eutécticos de bajo punto de fusión (Temperatura de fusión) que se acumulan durante la cristalización en las fronteras de granos, aún en estado líquido mientras los granos ya solidificaron y que bajo el efecto de las tensiones de tracción propias de la soldadura, provocan la rotura del material, (Oriani, 1993; Kedzierzawski, 1985).

Fue Watanabe, 1962, el primero en reportar grietas laminares en estructuras soldadas, más tarde durante los años de la década de los sesenta aparecieron muchos trabajos al respecto, especialmente en Inglaterra, donde fue creado un Comité Nacional para atender este problema. Entre otros, se pueden destacar los trabajos de (Nangel, 1969, Meyer, 1968, Nicholls, 1968).

El agrietamiento laminar se presenta en la mayoría de los casos, asociado al acto de la soldadura, en los primeros momentos fue considerado como un defecto de la misma. Sin embargo, en la actualidad está demostrado de que la causa fundamental parte de un defecto del metal base, específicamente relacionado con inclusiones no metálicas alargadas o en cadenas en dirección del laminado. Según lo planteado anteriormente, es importante conocer si existe el peligro de agrietamiento laminar, en el caso de la reparación por soldadura de componentes de calderas de vapor, que por las condiciones de explotación presentan problemas de degradación estructural.

Para medir la susceptibilidad al agrietamiento laminar se han usado diferentes métodos y técnicas, así, en la literatura se pueden encontrar:

- ✓ Métodos metalográficos,
- ✓ Métodos de medición de propiedades mecánicas,
- ✓ Métodos de soldadura.

Se pueden usar procedimientos de soldadura apropiados para reducir las fisuras y el agrietamiento. Por ejemplo, un bajo amperaje resulta benéfico, también puede ser benéfico un ligero movimiento zigzagueante al soldar, con el fin de promover el crecimiento celular del grano. Se recomienda seguir los procedimientos adecuados al apagar el arco, a fin de evitar las grietas de cráter, (Wilson, 1974).

1.6.3 Modificaciones estructurales y físico – química en el metal base (MB)

El crecimiento de los granos en el metal base, está ligado invariablemente al ciclo térmico de la soldadura, temperatura y velocidad de enfriamiento.

En la soldadura por arco, la zona de crecimiento de los granos está más localizada y sus dimensiones pasan por un máximo, en una zona muy próxima a los bordes, disminuyendo bruscamente en las capas próximas al bisel. Este aspecto de la curva se debe al normalizado que provoca en el metal base las sucesivas pasadas del depósito por arco. Estos cambios de estructura generalmente están ligados a cambios en las propiedades del metal en esta zona, debido al tratamiento térmico a que está sometida esta zona. Según sea la potencia térmica aplicada en la zona fundida, así variará la zona influencia térmica (ZIT) en el metal base, el cual será sometido a modificaciones alotrópicas dando origen a toda una serie de estructuras que pueden ir desde el semi - temple del tipo bainítico, hasta el hipertemple totalmente austenítico. Estas modificaciones variarán en dependencia de las diferentes regiones de la zona térmicamente afectada donde se encuentre, (Barreiro, 1966, Bakker, 1968).

1.7 Propiedades del acero AISI 316

La Tabla 1.2 presenta las propiedades físicas a temperatura ambiente, para los grados de acero inoxidable según Materiales (1996), Key to Steel (2002). Las propiedades físicas pueden variar ligeramente con la forma y el tamaño del producto, pero tales variaciones no suelen ser de importancia crítica para su aplicación.

Tabla 1.2 Propiedades físicas del 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	$10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	[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 $12 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. 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 y un posterior recocido restablecería las propiedades no magnéticas.

1.7.1 Propiedades Mecánicas del acero AISI 316

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

La principal diferencia entre el acero inoxidable y el acero al carbono es la forma del diagrama a tensión–deformación. Mientras que el acero al carbono tiene un comportamiento elástico lineal hasta el límite elástico y luego presenta, en la mayoría de los casos, un claro escalón de cedencia, la curva del acero inoxidable es claramente no lineal, sin límite elástico. Como consecuencia de este comportamiento no lineal del material, el acero inoxidable pierde rigidez a partir de bajos niveles de tensión. El límite

elástico en acero inoxidable se determina como la tensión correspondiente a un determinado valor de la deformación plástica remanente, generalmente del 0,2%.

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

Tabla 1.3 Propiedades mecánicas del Acero AISI 316

Tipo	Condición	Tensión de rotura (MPa)	Límite elástico (MPa)	Elongación (%)
AISI 316	Recocido	515	205	40
	Terminado en frío	620	301	35
	Trabajado en frío	860	390	12

1.8 Conclusiones del Capítulo I

En la investigación de las fuentes bibliográficas consultadas permite plantear que:

1. La revisión bibliográfica permitió hacer la selección de uno de los métodos para analizar, la distribución de temperatura durante el proceso de soldeo.
2. La tendencia al agrietamiento de la Zona Fundida (ZF) y de la Zona de Influencia Térmica (ZIT) en los aceros inoxidables austeníticos, 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.
3. Se pudo demostrar que un fenómeno que produce las tensiones fuertes y débiles en algunos tipos de acero inoxidable, es la causa conocida como "corrosión por fatiga".

CAPÍTULO II

CAPITULO II MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

El segundo capítulo desarrolla los conceptos fundamentales relacionados con el análisis de las propiedades mecánicas y microestructural.

Se establece el diseño del plan experimental y se describen las normas y procedimientos del proceso de experimentación. Al mismo tiempo se fundamentan las propiedades a investigar y se establecen los parámetros que caracterizan el mecanismo de rotura.

Finalmente, se desarrollan los procedimientos que permitan determinar el comportamiento del material bajo las condiciones de trabajo.

En el presente capítulo se plantea como **objetivo**

Explicar las propiedades a investigar, fundamentar los métodos y comparar las condiciones en la que se realizarán los experimentos.

2.2 Caracterización del material de la placa de AISI 316

El acero inoxidable 316 tiene amplia utilización en la actualidad en todas las esferas del desarrollo industrial: Niquelíferas, domesticas, medicina, automovilística, constructivas, aeronáutica, alimentaría y metalúrgica, que tienen gran aplicación en los aceros inoxidables.

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

Algunos ejemplos de productos fabricados con aceros inoxidables 316 son los equipos de procesos químicos y petroquímicos, equipos de proceso de alimentos y bebidas, equipos farmacéuticos, cámaras de combustión, sistemas de escape y filtros automotrices, vagones de ferrocarril, aplicaciones arquitectónicas y estructurales, mobiliario urbano, paneles de aislamiento térmico, intercambiadores de calor, tanques y recipientes, barriles de cerveza, instrumentos quirúrgicos, agujas hipodérmicas, monedas, cubiertos, lavadoras, lavavajillas y utensilios de cocina.

Se emplean además en las Industrias fotográfica, textil, caucho y algodón.

En la industria química y petroquímica, los aceros inoxidables ofrecen elevada resistencia a la corrosión y excelentes propiedades mecánicas así como un bajo costo de

mantenimiento. En las industrias el acero inoxidable AISI 316 provee excelentes condiciones de higiene además de su resistencia a la corrosión y duración a largo plazo.

2.3 Plan experimental

Para el plan experimental se prepararon 9 probetas de acero AISI 316, las mismas se soldaron con diferentes electrodos y algunas se le aplicaron temperatura de calentamiento. Este diseño aparece en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Parámetros para la soldadura de las probetas

No	Electrodo	Amp	Veloc (kg/h)	Calent
1	E 316	84	1,12	180 ⁰
2	E 316	84	1,12	-
3	E 316	84	1,12	-
4	E 309	84	1,12	180 ⁰
5	E 309	84	1,12	-
6	E 309	95	1,12	-
7	E 310	84	1,12	180 ⁰
8	E 310	84	1,12	-
9	E 310	84	1,12	-

Las diferentes probetas se prepararon con longitud de 90 mm y un ancho de 45 mm, se cortaron longitudinalmente de la sección de la placa, en una sierra del tipo sinfín, después de cortada y antes de soldarla se procedió a puntearla en ambos extremos para de esta forma evitar alabeo y distorsiones, fueron sometida a proceso de soldeo en diferentes condiciones, la selección de los diferentes electrodos se basa en buscar un material de aporte que en dependencia de la deposición, también pueda emplearse para atenuar los problemas que ocurren en el cordón de soldadura por las condiciones de trabajo. Las muestras para la observación microscópica fueron cortadas con longitud de 15 X 15 (Norma ASTM E 92).

2.4 Materiales y equipos empleados en la experimentación

Dentro de los procesos de diseños, el corte de las muestras debe realizarse meticulosamente, tratando en lo posible de la selección adecuada de cada máquina, para ensayos microestructurales la no alteración de las propiedades de los materiales es de

vital importancia, ya que la alteración de la misma refleja una imagen distorsionada de lo que queremos obtener.

2.4.1 Pulidora metalográfica Montasupal

Ubicada en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM, se utilizó para lograr una superficie lisa y pulida libre de impregnación de impurezas o ralladuras, las muestras se desbastaron con lijas del tipo 100, 120, 150, 180, 220, 280.

2.4.1.1 Características de la máquina

Voltaje.	.	.	.	.	.	.	250 V
Corriente.	.	.	.	.	.	.	2,5 Amp
Número de revoluciones.	.	.	.	.	.	.	300 -1 000 rev/min
Potencia del motor.	.	.	.	.	.	.	5 HP

2.4.2 Máquina de soldar

La fuente de energía eléctrica o máquina de soldar tiene como propósito primario abastecer de potencia eléctrica, así como suministrar corriente y voltaje suficientes para mantener el arco de soldadura.

La soldadura manual con electrodo revestido se puede hacer tanto como corriente alterna (CA) como con corriente directa (CD) y esta última se puede aplicar con el electrodo como negativo.

El tipo de corriente está condicionado con el tipo de máquina (fuente de energía) que la genera.

2.4.2.1 Transformador

La máquina tipo transformador parte de un bobinado monofásico, que da como resultado corriente alterna, esto provoca que no sea posible controlar su polaridad, por lo que se convierte en una de sus principales desventajas.

Los rangos de amperaje para los que son diseñadas no sobrepasan los 180 A, las cuales limita los tipos de materiales en los que se puede utilizar, el arco que produce es muy inestable y alcanza un rendimiento de 85 a 90 %. La ventaja fundamental de este tipo de máquina es su gran economía en el consumo energético.

Las características de la máquina del tipo Miller aparecen en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Características de la máquina empleada del tipo Miller

Alimentación primaria		230V monofásica - 60/60 Hz
Consumo primario de intensidad máxima		19A (TIG) - 29A (ARCO)
Voltaje en vacío		82 V
Gama de ajuste		5A a 150 A
Factor de Marcha (a 40° C)	a 100%	100 A
	a 60%	120 A
	a 35%	150 A
Diámetro de electrodo máximo		4 mm / 5/32pulg
Índice de Protección		IP23
Normas		EN 60974-1
Dimensiones (L x a x A)		420 x 175 x 300 mm
Peso		10 kg

2.5 Electroodos

Un electrodo recubierto es una varilla que tienen un núcleo metálico (alma) de composición normalmente similar a la del metal base, cuya función es conducir la energía eléctrica para la formación del arco y mediante su fusión (fundamentalmente) garantizar el metal de aporte para la formación de la costura soldada. El electrodo consta además de un revestimiento a base de sustancias químicas que cumple varias funciones y posee además un extremo no revestido que permite fijarlo en el portaelectrodo. La elección de los electrodos se realizó según recomendaciones (AWS-A5-28-79, ASME SFA 5.28, 2006)

2.5.1 E 316 L -16

El 316L ha sido diseñado para aceros austeníticos con un contenido extra bajo de carbono. El contenido máximo de 0,04% de carbono, evita la formación y precipitación de carburos. Excelente protección contra la corrosión intergranular. Se recomienda especialmente para aplicaciones resistentes a la corrosión, cuando existen posibilidades de "picadura" (ataque por ácido). No es necesario tratamiento térmico posterior.

AWS A 5. 4. E 316 L 16

DIN 8556 E HI Ti 19 9 2 23

UTP 68 TiMo

2.5.1 1 Características de la soldadura

Arco suave y estable de transferencia spray. Depósito de excelente apariencia que se ajusta con facilidad a las exigencias del trabajo. La escoria se desprende fácilmente y como el arco es rápidamente restablecido, se usa en soldadura intermitente.

2.5 2. Electrodo E 310L – 16

Electrodo de Cr – Ni totalmente austenítico, para aceros resistente a la corrosión y a temperaturas altas (hasta 1200⁰C).

UTP 68 H

AWS A 5.4 E 310 – 16*

DIN 8556 E 25 20 R 26

2.5.2.1 Características de la soldadura

Es apropiado para unir y revestir aceros 25/20 Cr – Ni 19/9, resistente a temperaturas de trabajo hasta 12000C.

Permanece estable en el ambiente normal, así como en presencia de gases de combustión con nitrógeno y pobre de azufre. Además, puede aplicarse para soldar aceros ferríticos perlíticos al Cr, CrSi y CrAl, así como acero fundido resistente al calor. Por lo tanto, su campo de aplicación se encuentra en la reparación de hornos, placas y accesorios en general.

Este electrodo se puede surtir también estabilizado como AWS E 310 Cb – 16 (UTP 68 – Cb).

2.5.3 Electrodo E 309L – 16

Adecuado para uniones de aceros inoxidables a aceros bajo carbono y baja aleación. Apto para en mantequillado (buttering) y como depósito base para aplicaciones que requieren un posterior recubrimiento duro. Su depósito tiene excelente resistencia a la corrosión a temperatura ambiente, pero primordialmente fue diseñado para resistir la oxidación a altas temperaturas (1000⁰C).

Tabla 2.3. Denominaciones del electrodo.

UTP	AWS	DIN 8586
UTP 6824	AWS A 5. 4.	E 22 12 R 26
UTP 6824 LC	E 309 – 16	E 23 12 LR 26
UTP 6824 Cb	E 309 L – 16	E 309 Cb – 16 E 22 12 Nb R 26

2.5.3.1 Características de la soldadura

Su bajo contenido de carbono previene la precipitación de carburos de cromo. Excelente contra la corrosión intergranular. Excelente operatividad en toda posición.

2.6 Microscopio óptico

Para la observación de la microestructura de la probeta patrón, la cual se empleará para la comparación de las micrografías obtenidas, se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM - 100 ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, está dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. Para colocar las probetas en el microscopio se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada de estas. En la figura 2.1, se observa la imagen del microscopio empleado en la observación de las muestras.

**Figura 2.1** Microscopio Óptico NOVEL modelo NIM – 100

2.7 Análisis microestructural

El estudio microestructural consistió en la observación de una muestra patrón del material. Esta se emplearán para establecer el comportamiento del material de las

muestras después de efectuado el proceso de soldadura. La figura 2.2 es la microestructura del material de la placa de AISI 316.

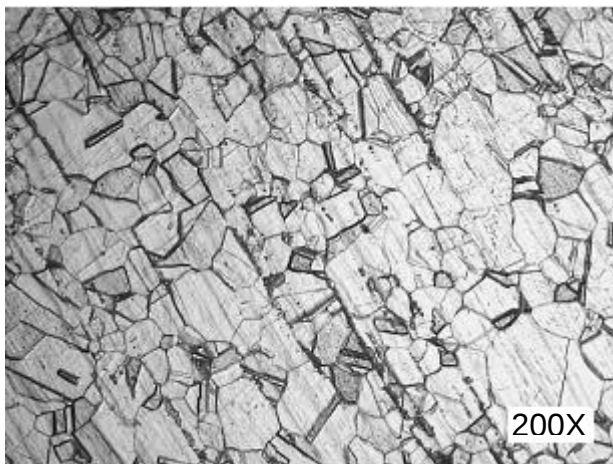


Figura 2.2 Microestructura del AISI 316

Según los ensayos realizados y la imagen en la figura 2.2, se puede plantear que la microestructura del material se corresponde con la del acero AISI 316, el cual presenta una estructura austenítica.

2.8 Preparación metalográfica de la probeta

El análisis mediante microscopio metalográfico permite resolver aspectos relacionados a la microestructura de un metal. Por ejemplo, forma y tamaño de los granos, las fases presentes además de su distribución, defectos e inclusiones. Por ejemplo, los constituyentes metálicos que pueden encontrarse en aceros al carbono a temperatura ambiente son ferrita, cementita, perlita, martensita. También algunos constituyentes no metálicos como sulfuros, óxidos y silicatos.

Las superficies de las muestras a investigar deben ser previamente pulidas para poder realizar la observación microscópica, por lo que se propone la realización de un conjunto de operaciones que permitan lograr la calidad superficial deseada. Las operaciones se resumen en el siguiente orden, según la norma NC 10-56:86 y ASTM E3-95.

✓ Corte, desbaste, pulido, desengrasado, lavado y ataque químico.

2.8.1 Corte de las muestras

Las dimensiones de la superficie a examinar varían en cada caso, es suficiente, siempre que sea posible, disponer de secciones mínimas de 10 x 10 mm, y no mayores de 25 x 25 mm, y con probetas con altura de 15 mm. (Sturla, 1951).

En la etapa de corte, si el material es relativamente blando puede realizarse mediante sierra mecánica o manual. Las muestras de materiales duros, difíciles de cortar, tales como aceros templados y aleaciones no férreas endurecidas por envejecimiento se pueden cortar fácilmente con discos abrasivos.

Se debe refrigerar adecuadamente la probeta durante el proceso de corte, la temperatura producida por el roce puede alterar radicalmente la estructura original, por lo menos en la superficie obtenida por el corte.

2.8.2 Desbaste y pulido

El desbaste, a grandes rasgos, consiste en obtener primeramente una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de máquinas herramienta y papeles abrasivos. El pulido con los papeles abrasivos se realiza variando la granulometría del mismo al ser aplicadas a la pieza de trabajo, desde la más gruesa a la más fina. Al concluir de pasar el papel abrasivo más fino se realiza la operación conocida como pulido fino, en el que se emplea la pasta abrasiva conocida comercialmente como "Pasta GOI", añadida sobre discos provistos de paños o motas. Después de esta operación se obtiene una superficie pulida.

En el pulido se emplearon lijas del tipo No, 320 y 400, a las cuales les corresponden el mismo número en granos de partículas abrasivas por mm² según (ISO 9001), respectivamente.

Este pulido se llevó a cabo con la lija montada sobre una placa de vidrio, cambiando el sentido del lijado 90° al pasar de un pliegue a otro de manera que se elimine la capa de metal distorsionado y deslizado dejado por el anterior.

2.8.3 Lijado grueso

Es conveniente redondear las aristas en el desbaste, ya sea con esmeriles, a fin de eliminar los ángulos que podrían llegar a provocar la rotura del papel esmeril o del paño durante el pulimiento. Por esta razón es preferible que las probetas sean redondas o al menos que no tengan ángulos y cantos vivos. (Sturla, 1951).

Las primeras etapas de lijado se realizan con papel de lija con tamaño de granos 120 y 240 respectivamente, su objetivo es obtener una superficie plana, libre de toda distorsión o huellas producto del corte, y además lograr que todas las marcas del lijado sigan una misma dirección.

2.8.3.1 Lijado fino

Se realiza semejante al anterior, con la diferencia que esta vez el proceso se inicia con lija de tamaño de granos 320 y de ésta hacia adelante. Cada vez que se cambia de lija se opera de la forma descrita anteriormente, a fin de obtener nuevas rayas perpendiculares a las anteriores.

Cuando la observación visual de la muestra solo tiene rayas producidas por la última lija empleada y las anteriores se han eliminado totalmente, se procede al pulido de la muestra.

El pulido se detiene cuando la muestra no presenta rayas ni colas de cometas al observarla en el microscopio con 100 aumentos. Este primer análisis debe mostrar únicamente inclusiones e imperfecciones del material. Si las rayas aún existen, es recomendable realizar todo el proceso nuevamente.

En ambas operaciones de pulido se debe utilizar abrasivos, los usados con frecuencia son la pasta de diamante, óxido de cromo y óxido de magnesio. Siendo la alumina (óxido de aluminio) el más satisfactorio y universalmente usado y que presenta los mejores resultados en el pulido final.

2.8.3.2 Paños para pulido

La textura superficial de los paños de pulir varía desde la que no tienen pelo, como la seda natural y el tejido empleado para cubrir las alas de aeroplanos, hasta aquellos con pelo relativamente largo, como el terciopelo y la pana, que son de aplicación muy general.

Dentro de los más comunes y utilizados, se encuentran los paños de mesa de billar, paños de lana de distintas finuras y lonas de diferentes pesos. La selección del paño de pulir, depende del material a pulir y el propósito al cual este destinado el estudio metalográfico.

Una vez pulida las probetas se lavan con agua destilada, se secan con papel de filtro y finalmente se vuelven a lavar con tetracloruro de carbono para evitar cualquier vestigio de grasa y pastas de pulir.

2.9 Ataque de las muestras para su examen microscópico

Consiste en atacar la superficie ya pulida con algún reactivo químico, su objetivo es hacer visibles las características estructurales de la muestra que se está analizando, de tal manera que se pueda diferenciar con claridad su microestructura. La superficie se debe protegerse de la oxidación y efectos atmosféricos que pudiesen afectarles.

Para determinar el tipo de reactivo se debe tener en consideración el material y la finalidad que se busca.

Se realizó con el objetivo de resaltar la estructura obtenida después de realizado el pulido hasta alcanzar el brillo espejo, para observar la estructura metalográfica formada después de la deformación del material bajo carga por rodadura. Según ASTM E – 262 – Practice A. Para este ataque químico se utilizó ácido acético.

2.10 Equipo utilizado en la medición de temperatura

El instrumento de medición utilizado fue un pirómetro digital Minolta/ Land/Ciclops, (ver figura 1 de los anexo) el cual tiene las siguientes características.

El pirómetro para altas temperaturas ha sido desarrollado especialmente para realizar mediciones en el sector del metal / acero, (especialmente para fundición) aunque también realiza mediciones en múltiples sectores que emplean altas temperaturas. El aparato puede determinar de manera rápida y precisa una temperatura de hasta + 1800 °C, además posee un rango de 0,001 mm de precisión.

Estos modelos usan sólo unas baterías pequeñas, comunes. Estos pirómetros poseen un rendimiento eléctrico que puede grabarse por un registrador del mapa portátil o fijo, su tiempo de contestación es de 0.08 segundos, posee un enfoque ajustable muy claro. Con el pirómetro puede determinar valores de 0 C medición en el sector de la producción, en mantenimiento, en investigación y desarrollo. Con ello el pirómetro se puede emplear en diferentes campos. El grado de emisión es ajustable dependiendo de la clase de superficie.

2.11 Diagrama de Schaeffler

Cuando el acero contiene muchos elementos, el efecto global es una suma de los diferentes efectos individuales. Ahora bien, sabemos que los elementos más característicos de los aceros inoxidables son el Cromo, el Molibdeno, el nitrógeno y el Níquel, elementos alfégenos y gammágenos. Estos últimos elementos permiten por eso la coexistencia de ferrita y austenita en el seno del acero. La figura 2.3 resume el efecto de los dos elementos mayores (Cr y Ni) sobre las familias de aceros inoxidables. (Kotecki y Siewert, 1992).

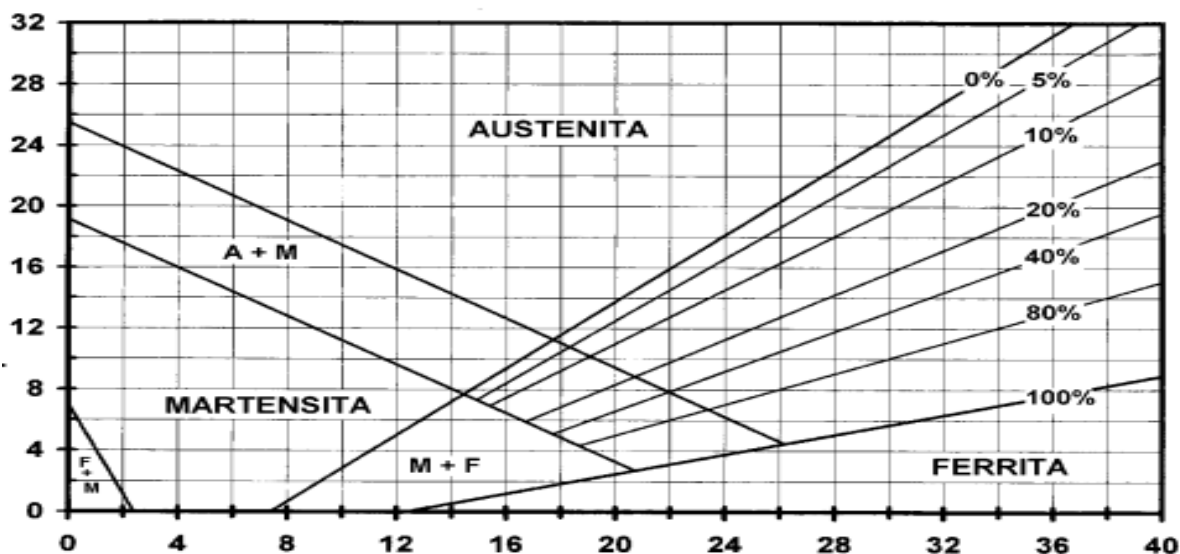


Figura 2.3 Diagrama de Schaeffler (Di Caprio, 1999)

En los aceros inoxidables austeníticos el Ni equivalente es superior a 8, mientras que Cr equivalente es superior a 18, el material aportado puede presentar estructuras: austenítica, con pequeñas cantidades de martensita, austenítico-ferrítica, con algún contenido de martensita y austenítico – ferrítica.

La utilización de este diagrama no se limita a los austeníticos, sino que permite predecir otras estructuras derivadas de la composición química del material.

$$[Cr] = \%Cr + \%Mo + \%Nb + 1,5 \%Si + 2,27 \%V \quad (2.1)$$

$$+ 0,72 \%W + 2,20 \%Ti + 2,48 \%Al$$

$$[Ni] = \%Ni + 0,5 \%Mn + 30 [\%N - 0,02] + 0,41\%Co + 0,44\%Cu \quad (2.2)$$

2.12 Cálculo de la resistencia mecánica en placas de acero 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 en 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).

2.12.1 Tensiones provocadas por las temperaturas

Si se tiene un contorno rectangular, con una relación $R/h \geq 0,75$, en el que actúan elevadas temperaturas. El mismo posee un espesor h en (mm) y un radio exterior R en (mm). En el caso de sección rectangular constante las tensiones se determinan por la ecuación (2.3) y (2.4) (Feodosiev, 1985).

$$\sigma_1 = \sigma_t = \frac{pR}{h} \frac{\alpha(T_a - T_b)}{2(1-\mu)(\ln \frac{R}{h})}, \dots\dots\dots (2.3)$$

Donde: P presión uniforme distribuida en (N/mm²), R radio exterior de la placa en (mm), h espesor de la placa en (mm), μ coeficiente de Poisson, T_a temperatura interior en °C, T_b temperatura exterior en °C y α coeficiente de expansión térmica en °C⁻¹.

$$\sigma_2 = \sigma_m = \frac{pR}{2h} \frac{\alpha(T_a - T_b)}{2(1-\mu)(\ln \frac{R}{h})}, \dots\dots\dots (2.4)$$

Donde: p presión uniforme distribuida en (N/mm²), R radio exterior de la placa en (mm), h espesor de la placa en (mm), μ coeficiente de Poisson, T_a temperatura interior en °C, T_b temperatura exterior en °C y α coeficiente de expansión térmica en °C⁻¹.

La tensión mínima σ_3 se considera igual a cero. De acuerdo con la teoría de Mohr, independientemente del valor de k .

$$\sigma_3 = 0$$

2.12.2 Cálculo de la tensión equivalente

En placas sometidos a altas temperaturas se producen grietas en la superficie exterior como resultado de las tensiones térmicas equivalentes que van hacer menores que las tensiones admisibles, las cuales se determinan aplicando tercera hipótesis de resistencia que aparece en la ecuación (2.5).

$$\sigma_{equi} = \sigma_1 - \kappa \sigma_3 < [\sigma] \dots\dots\dots (2.5)$$

Donde: σ_{equi} tensión equivalente (N/mm²), σ_1 tensión uno en (N/mm²) que va hacer igual a σ_{equi} porque $\sigma_3 = 0$.

2.12.3 Cálculo del desplazamiento máximo

$$\omega_{máx} = \mu \frac{pR^4}{Eh^3} \dots\dots\dots (2.6)$$

Donde: $\omega_{máx}$ desplazamiento máximo, α coeficiente que depende de la relación $\frac{R}{h}$, p presión uniformemente distribuida en (N/mm²), a lado menor de la placa en (mm), E módulo de elasticidad del material de la placa (N/mm²) y h espesor de la placa (mm).

2.13 Modelación y simulación por el Método de Elementos Finitos

La simulación del comportamiento durante el proceso de soldadura se realizó por medio del método de los elementos finitos (MEF) para verificar la conducta de los materiales sometido a las elevadas temperaturas. Dichos métodos garantizan la reducción de los costos y la cantidad de ensayos a realizar con una precisión aceptable. Las corridas se hicieron con ayuda del software ANSYS (V.11.0) coincidiendo con (Friedel, 2004; García, 2007 y Rodríguez et al., 2007).

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

✓ Durante la soldadura hay proceso térmico transitorio donde se tiene en cuenta los problemas de transferencia de calor conducción y radiación. Para la simulación se empleará el software ANSYS V.11.0, se trabajará con una sección de la pieza,

✓ Las propiedades del material de la placa de AISI 316 son constantes, como la conductividad térmica y coeficiente de expansión térmica en correspondencia con los valores de temperatura, según ANSYS 11.0,

✓ En dependencia del coeficiente de transferencia de calor y la temperatura ambiente. Las variables a tener en cuenta en la simulación del proceso de solidificación son:

- ✓ temperatura (80°C),
- ✓ conductividad térmica del AISI 316,
- ✓ coeficiente de expansión térmica,
- ✓ coeficiente de Poisson,
- ✓ capacidad de calor específico,
- ✓ módulo de dilatación,
- ✓ módulo de elasticidad longitudinal,
- ✓ módulo de elasticidad transversal.

2.13.2 Condiciones y parámetros establecidos

Se elaboró un modelo geométrico equivalente al objeto investigado, el que se discretizó con elementos tetraédricos de nodos intermedios del tipo "SOLID87". Se establecieron, además las condiciones de frontera siguientes: se consideró que el material es homogéneo e isotrópico. El módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson varían en función de la temperatura.

2.13.3 Selección de la temperatura de análisis

Se seleccionaron valores de temperaturas representativas en dependencia del electrodo a utilizar en el proceso anteriormente mencionado, se tomó como rango de temperatura de interés el comprendido entre 1000 - 1500 °C.

Como temperaturas representativas se consideraron: 700, 900 y 1100 °C. La utilización de idénticos valores de temperatura y tensiones aplicadas para las simulaciones y ensayos, permite realizar la validación de los resultados teóricos.

2.13.4 Algoritmo para la simulación (ANSYS versión 11.0)

El algoritmo desarrollado por etapas para el análisis que desarrolla el paquete ANSYS 11.0

Primera etapa: Modelación de la placa de pequeñas dimensiones sometidos a temperatura de fusión.

Segunda etapa: Modelación del AISI 316 inoxidables 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.

2.14 Conclusiones del capítulo II

1. La clasificación de los electrodos E 316 L – 16, E 310 L – 16, E 309 L – 16, está fundamentada por el estudio del desposito, con el objetivo de disminuir el agrietamiento en el cordón de soldadura.
2. Los procedimientos descritos permiten establecer el comportamiento microestructural del acero AISI 316.
3. Los métodos utilizados se perfeccionan con el empleo de una base experimental actualizada, tecnologías, software y equipamiento que avalan la precisión y fiabilidad a los resultados.

CAPÍTULO III

CAPITULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción

En éste capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo experimental, y a partir de los mismos, la representación de las regularidades del comportamiento mecánico y microestructural del acero AISI 316.

El objetivo del capítulo es:

Exponer los elementos científicos que dan solución al problema planteado a partir de la interpretación de las regularidades observadas y a través de ella realizar la valoración crítica de los resultados.

3.2 Análisis de la composición química del metal base

Se realizó empleando un Espectrómetro de Masa ESPECTROLAB 230 con electrodo de tungsteno 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. La composición química real del material estudiado y del cordón de soldadura aparecen en la tabla 3.1 y 3.2

Tabla 3.1 Composición química del acero AISI 316

C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni	Al	Co
0,05	0,61	0,84	0,023	16,55	2,13	10,15	0,0110	0,11
Cu	V	W	As	Fe				
0,30	0,07	0,04	0,019	69,08				

Tabla 3.2 Composición química del cordón de soldadura de la probeta patrón.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
0,05	0,32	1,03	0,031	0,007	17,31	2,42	11,11	0,0141	0,09
Cu	Ti	V	W	As	Fe				
0,14	0,0206	0,08	0,02	0,017	67,35				

3.2.1 Análisis de la composición química del depósito

Para valorar el comportamiento de los cordones de soldadura se efectuó el análisis químico de cada uno de los cordones de las diferentes muestras desde la 1 hasta la 9, a fin de apreciar las posibles variaciones en dependencia de los diferentes electrodos

empleados. Las tablas desde la 3.3 hasta la 3.11, se muestran la composición química de las mismas.

Muestras soldadas con electrodos E 316 L 16

Tabla 3.3 Composición química del cordón de soldadura de la probeta

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
0,04	0,31	1,06	0,028	0,006	18,05	2,34	11,55	0,0104	0,16
Cu	Ti	V	W	As	Fe				
0,25	0,0190	0,08	0,04	0,021	66,01				

Tabla 3.4 Composición química del cordón de soldadura de la probeta 2

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
0,03	0,28	0,95	0,029	0,006	18,10	2,34	11,55	0,0100	0,17
Cu	Ti	V	W	As	Fe				
0,26	0,0153	0,08	0,04	0,023	66,12				

Tabla 3.5 Composición química del cordón de soldadura de la probeta 3

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
0,05	0,28	0,99	0,023	0,008	17,71	2,53	11,24	0,0148	0,06
Cu	Ti	V	W	As	Fe				
0,13	0,0165	0,06	0,02	0,021	66,83				

Muestras soldadas con electrodos E 309L – 16

Tabla 3.6 Composición química del cordón de soldadura de la probeta 4

C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni	Al	Co
0,11	0,63	0,85	0,024	22,13	0,38	12,63	0,0244	0,16
Cu	Ti	V	W	As	Fe			
0,2	0,0120	0,06	0,03	0,020	62,74			

Tabla 3.7 Composición química del cordón de soldadura de la probeta 5

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
0,05	0,60	0,86	0,023	0,004	22,27	0,32	12,69	0,0085	0,16
Cu	Ti	V	W	As	Fe				
0,18	0,0113	0,06	0,03	0,019	62,72				

Tabla 3.8 Composición química del cordón de soldadura de la probeta 6

C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni	Al	Co
0,05	0,60	0,87	0,025	22,34	0,39	12,55	0,0130	0,16
Cu	Ti	V	W	As	Fe			
0,21	0,0110	0,06	0,03	0,021	62,68			

Muestras soldadas con electrodos E 310L – 16**Tabla 3.9** Composición química del cordón de soldadura de la probeta 7

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Co
0,09	0,41	1,26	0,020	0,002	24,84	0,35	18,97	0,08
Cu	Ti	V	W	As	Fe			
0,18	0,0234	0,06	0,03	0,023	53,65			

Tabla 3.10 Composición química del cordón de soldadura de la probeta 8

C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni	Co
0,11	0,38	1,22	0,020	24,89	0,32	19,17	0,08
Cu	Ti	V	W	As	Fe		
0,15	0,0216	0,06	0,02	0,023	53,51		

Tabla 3.11 Composición química del cordón de soldadura de la probeta 9

C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni	Co
0,10	0,42	1,29	0,019	25,18	0,27	19,57	0,07
Cu	Ti	V	W	As	Fe		
0,15	0,0238	0,06	0,02	0,025	52,78		

3.2.2 Análisis de la influencia de los principales elementos de adición

En las tablas relacionadas anteriormente se puede observar que al analizar la deposición de los cordones existe ligera variación en los elementos químicos, no siendo así para el carbono el cual tiene una diferencia notable, variando desde 0,04 % como promedio para los depósitos con E 316 L 16, elevado por ciento en los depósitos de los electrodos E 309L – 16 y E 310L – 16, el análisis para cada elemento es como sigue:

El Carbono - elemento fundamental que determina la aptitud para la soldadura de los aceros. Interviene en los aceros ferríticos, ya aumentando el poder de temple del empalme en la zona de transformación (agrietabilidad de la capa subyacente), ya

dando lugar a carburos bajo la acción de los tratamientos térmicos (aceros al cromo-molibdeno).

El Manganeso - Elemento gammágeno, favorece el temple del acero, es preciso limitar su contenido, excepto en los casos especiales en que se busque obtener dureza o resistencia al desgaste. Rara vez pasa del 2,0% en los aceros soldables. El manganeso es un desoxidante enérgico y constituye un ingrediente de los electrodos o las varillas de aporte como elemento favorable por sus reacciones con el metal líquido.

El Silicio - Elemento alfégeno es un reductor enérgico del acero al igual que el manganeso. Su contenido, que aumenta la tendencia al agrietamiento durante la soldadura y varía según el tipo de acero, el modo de elaboración y las concentraciones de carbono y de manganeso, ha de limitarse en los aceros de construcción de 0,15 a 0,30%, si bien en el metal fundido de los electrodos puede admitirse hasta un 0,40 ó 0,50%.

El Níquel - Elemento gammágeno, favorece el temple, como hacen también el carbono y el manganeso. En los aceros poco carburados ($C < 0,15\%$) y sin elementos de adición puede tolerarse del 3,0 al 5,0% de este elemento sin que la fragilidad del conjunto quede fuertemente afectada. En pequeña cantidad el níquel mejora la capacidad de deformación de la soldadura, afina el grano e interviene favorablemente en la temperatura de transición de fragilidad del acero.

En los aparatos de cracking debe funcionar a temperaturas muy bajas, de hasta -100°C , sin presentar roturas frágiles, se utilizan aceros con 3,5% de níquel.

El Cromo - Elemento alfégeno, suele estar unido a otros elementos como el níquel y el molibdeno, en los aceros ligeramente aleados de construcción y entonces aumenta la templabilidad del acero. El cromo presenta otro inconveniente desde el punto de vista de la soldabilidad operatoria, y es que forma óxido de cromo, material refractario que es indispensable eliminar con un flujo decapante en el soldeo. Dado que el óxido de cromo se elimina más fácilmente con escoria básica, los electrodos con alma de acero al cromo deben poseer preferentemente revestimiento básico.

El Molibdeno - Aumenta el poder de temple del acero, su contenido suele estar limitado al 0,25 ó 0,35% en los aceros con bastante carbono. Este elemento, incluso en pequeñas concentraciones, confiere a los aceros una mayor resistencia en caliente y la propiedad de resistir a la fluencia lenta, por lo cual presentan gran interés como elemento de adición en los aceros especiales ligeramente aleados.

El Vanadio - Aumenta rápidamente el poder de temple del acero, pero su contenido debe ser muy limitado; rara vez excede del 0,1 al 0,2%.

El Aluminio - Elemento alfégeno, es un poderoso reductor en concentraciones pequeñísimas. Calmando el acero con aluminio se reduce el efecto del nitrógeno en el envejecimiento (endurecimiento secundario) por formación de nitruro de aluminio. Se añade a ciertos aceros en concentraciones grandes (del 0,5 al 1,0%), con el objeto de hacerlo más resistentes a la oxidación en caliente, en estos casos, la operación de soldar resulta embarazosa por la formación de alúmina.

El Cobre - Es soluble en el acero hasta 0,40%, se recomienda no pasar este límite en los aceros destinados a conjuntos soldados, ya que este elemento es un factor de agrietabilidad en estado libre, y por tanto, en concentraciones mayores del 0,50%. Se le atribuye la propiedad de otorgar a los aceros de construcción mayor resistencia a la corrosión por el agua.

El Fósforo - Impureza que favorece el agrietamiento, especialmente en presencia de azufre.

Los que elevan las Temperaturas críticas del acero se denominan elementos de aleación Alfégenos mientras que los que las disminuyen se llaman Gammágenos.

3.2.2.1 Corrosión intergranular

Las muestras soldadas con electrodos E 309 L – 16 y E 310 L – 16, debido al tratamiento térmico del proceso de soldeo, producirán una retícula de carburos, ya que en la composición química se determinó que su porcentaje de carbono supera el más del 0,03 por ciento. El metal que contenga tal retícula es susceptible de corrosión intergranular que podrá ser causa de fracaso en condiciones muy corrosivas y reducir la duración útil en muchos servicios relativamente ligeros. Los procedimientos normales de soldadura introducen en el metal la susceptibilidad a la precipitación de los carburos.

Que el acero sea susceptible de corrosión intergranular no significa necesariamente que será atacado por ella. En servicio, el resultado puede ser satisfactorio. Pero la posibilidad de corrosión intergranular deberá ser tomada en cuenta siempre que no quede excluida según la experiencia previa.

3.3 Análisis microestructural

Fueron observadas las diferentes probetas en la zona fundida (ZF) y la zona de influencia térmica (ZIT) con un rango de aumento de 200 X. Se tendrá en cuenta la muestra patrón mostrada en el epígrafe 2.7 del capítulo II.

En las figuras 3.1; 3.3 y 3.5 se muestran la microestructura de las zona fundida (ZF) y la Zona Influencia Térmica (ZIT) y las figuras 3.2, 3.4 y 3.6, del cordón de soldadura de la muestra 1, 2 y 3, soldadas con E 316 L 16.

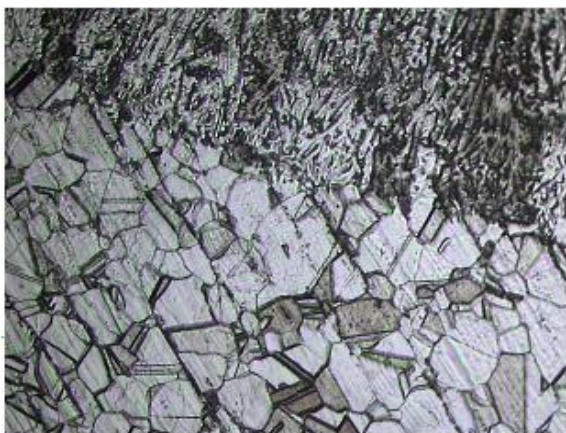


Figura 3.1. ZF y ZIT muestra 1

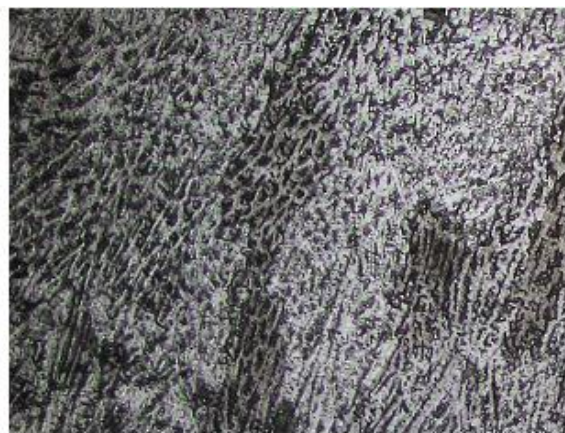


Figura 3.2. Cordón de soldadura muestra 1

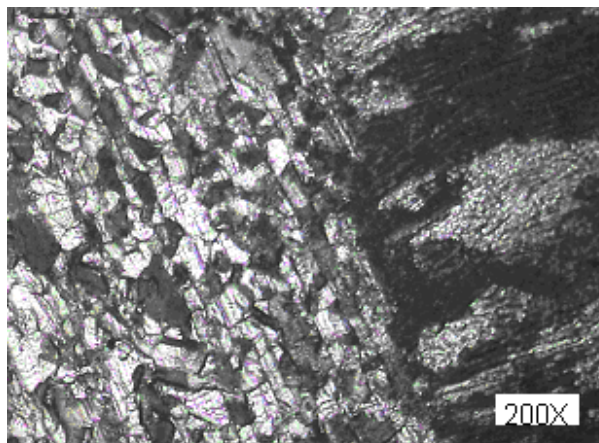


Figura 3.3. ZF y ZIT muestra 2

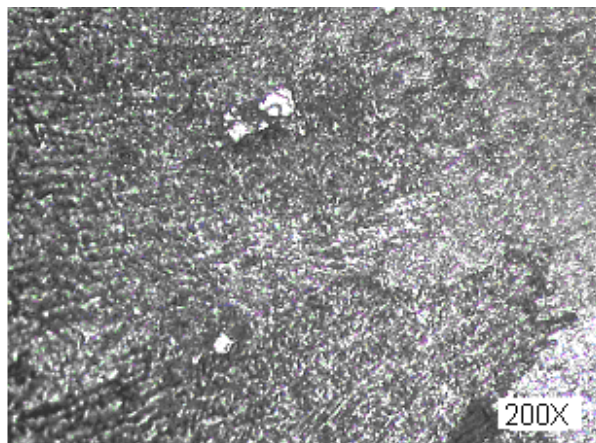


Figura 3.4. Cordón de soldadura muestra 2

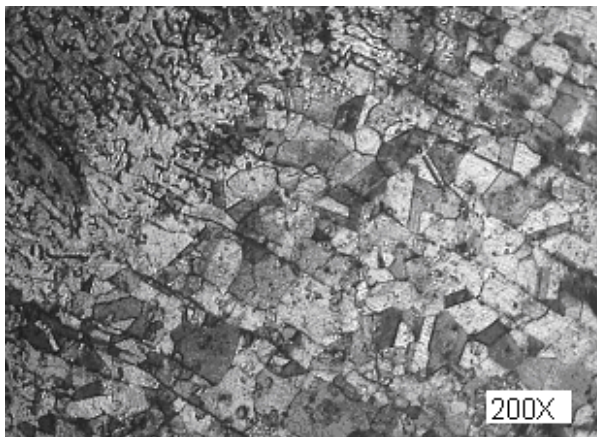


Figura 3.5. ZF y ZIT de la muestra 3

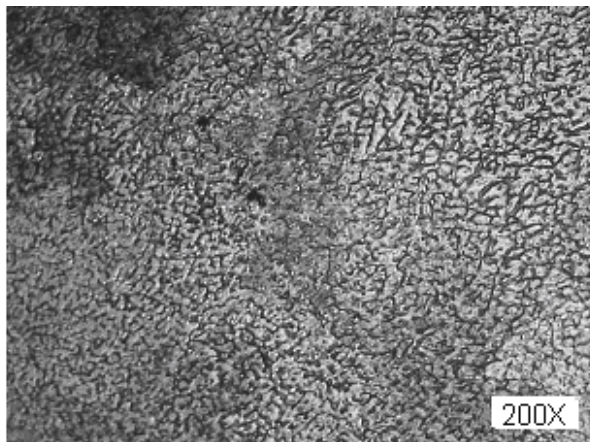


Figura 3.6 Cordón de soldadura muestra 3

Las figuras relacionadas anteriormente muestran una estructura transitoria austenita + martensita. En la parte superior de las figuras se observa el cordón de soldadura, el cual presenta dos tipos distintos de estructura, siguiendo una orientación definida. La primera estructura puede estar definida por el calentamiento de 180 0C aplicado a la muestra, aunque aquí, según la composición química de la tabla 3.1, se puede observar que hubo un ligero incremento del carbono hasta 0,04.

Estos comportamiento de la microestructura están relacionado con el porcentaje de carbono que se obtuvieron durante el proceso de soldeo, los valores del carbono se encuentran en 0,03 como promedio, lo recomendado por la literatura debe ser $< 0,03$, cuanto menor sea el contenido en carbono del acero, menores serán las posibilidades de combinación de los elementos reactivos con el carbono.

Como se puede observar la estructura austenítica del material base, no se ven afectadas significativamente por las altas temperaturas que se alcanzan en la Zona Afectada por el Calor (ZAC), la austenítica es de alta resistencia a la tensión, al impacto y al mismo tiempo dúctil [3].

3.3.1 Análisis de las muestras soldadas con electrodo E 309 L – 16

Las figuras 3.7, 3.9 y 3.11 muestran la zona fundida y la zona influencia térmica y las figuras 3.8, 3.10 y 3.12, correspondiente a las muestras 3,4 y 5.

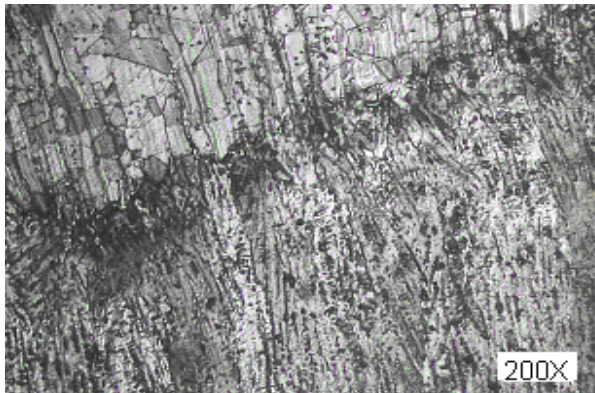


Figura 3.7. ZF y ZIT de la muestra 4

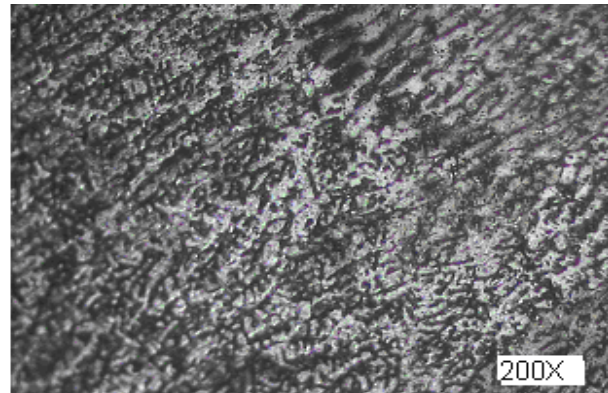


Figura 3.8. Cordón de soldadura muestra 4

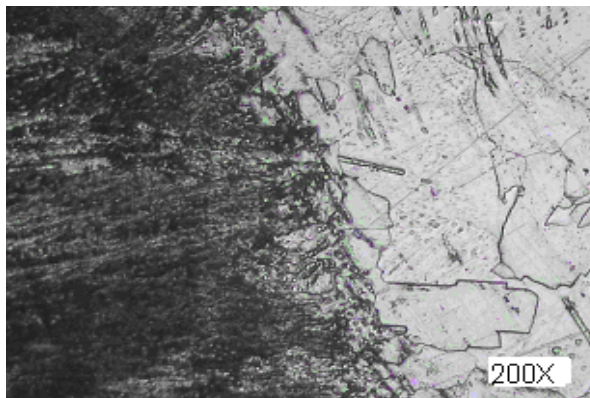


Figura 3.9. ZF y ZIT muestra 5

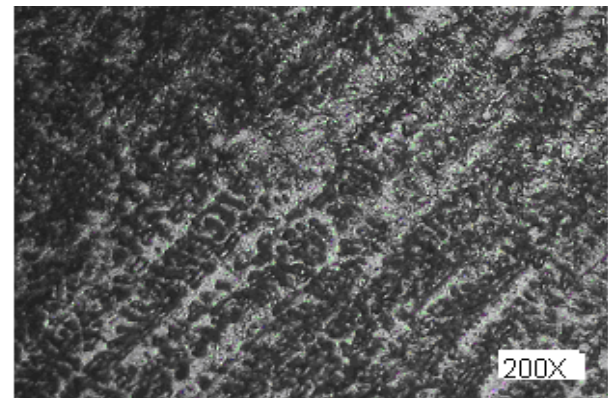


Figura 3.10. Cordón de soldadura muestra 5

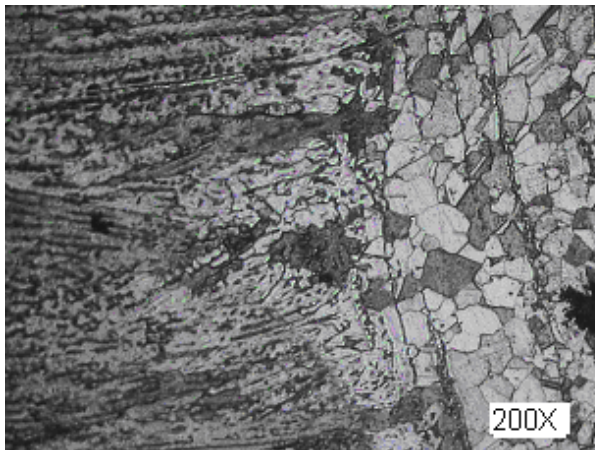


Figura 3.11. ZF y ZIT muestra 6

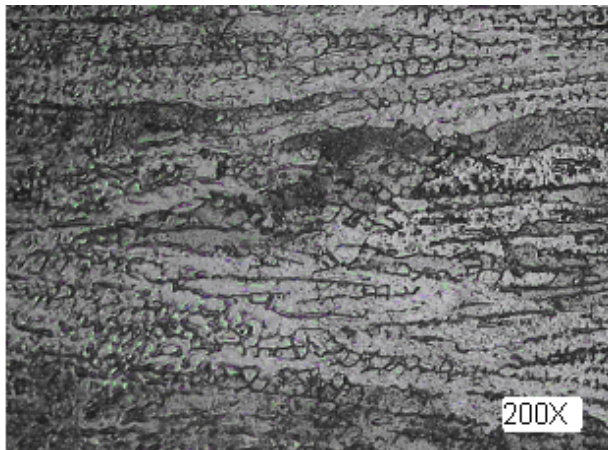


Figura 3.12. Cordón de soldadura muestra 6

Los resultados obtenidos en la microestructuras para las tres muestras, se observa que presentan dos tipos de estructuras: una acicular y la otra de forma equiaxial (austenita).

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 base. En este caso la unión soldada queda sensibilizada, es decir producto de la soldadura en las uniones anteriores existen áreas empobrecidas en cromo que puedan ser atacadas en estos ambientes corrosivos.

Los aceros inoxidable con contenidos en carbono superiores al 0,05% sufren en pocos minutos la sensibilización, a medida que disminuye el contenido en C por debajo de 0,03% el tiempo de sensibilización y el rango de temperatura disminuyen considerablemente

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.

Para las muestras analizadas anteriormente el contenido de carbono se encuentra entre 0,05 y 0,11.

3.3.2 Análisis de las muestras soldadas con electrodo E 310 L – 16

Las muestras 3.13, 3.15 y 3.17 se corresponden con la zona fundida y la de influencia térmica, y las figuras 3.14, 3.16 y 3.18 con el depósito del cordón de soldadura.

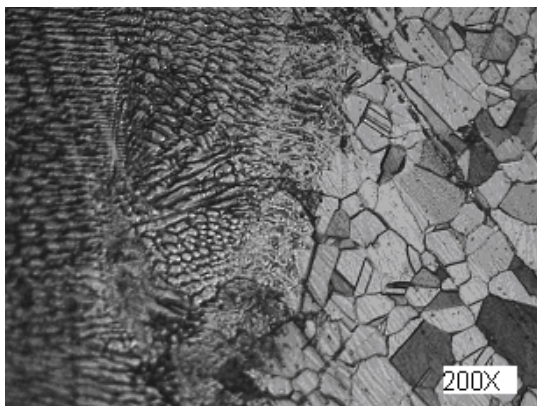


Figura 3.13. ZF y ZIT muestra 7

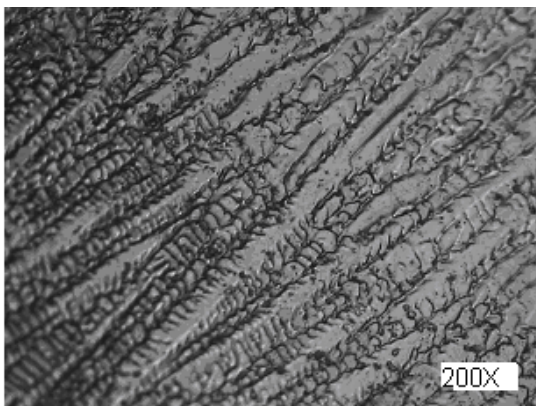


Figura 3.14. Cordón de soldadura muestra 7



Figura 3.15. ZF y ZIT muestra 8

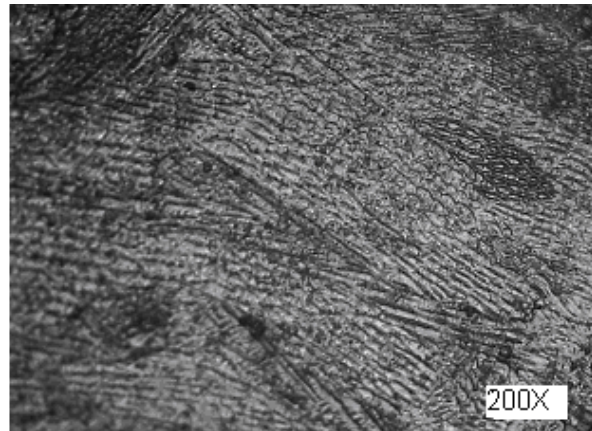


Figura 3.16. Cordón de soldadura muestra 8

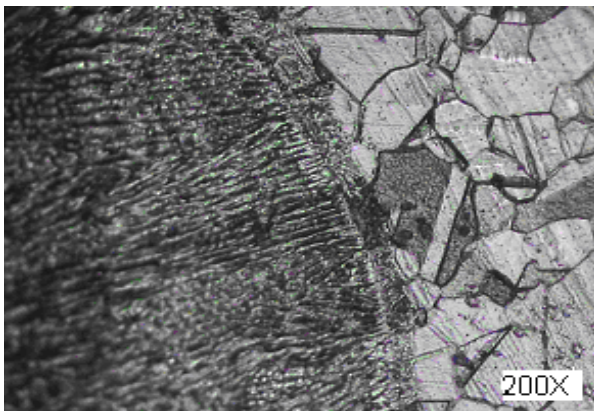
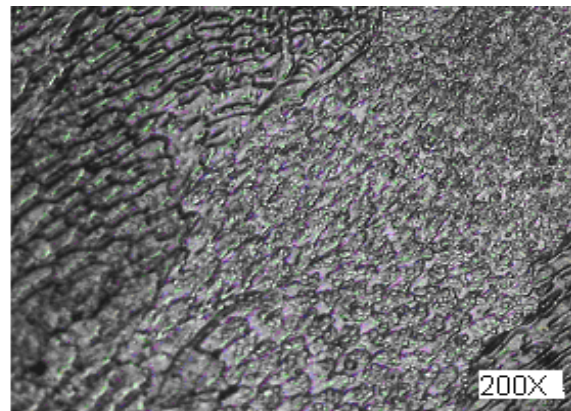


Figura 3.17. ZF y ZIT muestra 9



3.18 Cordón de soldadura muestra 9

La estructura obtenida es una estructura interdendrítica. La segregación interdendrítica del carburo así producida es muy persistente y no se puede eliminar con tanta facilidad como el carburo intergranular, además presenta una estructura columnar de dendritas gruesas, con un crecimiento epitaxial típico de los procesos de rápida solidificación a partir del material del sustrato. La orientación y formas de las estructuras se deben a las distintas velocidades de solidificación, en la cual no alcanza a solubilizar en una estructura totalmente austenítica, originándose distintas estructuras intermedias.

En las micrografías de las figuras 3.13 y 3.17 se tiene una estructura más grande de forma laminar y una estructura equiaxial mucho más pequeña que en la figura 3.15. Se destacan nítidamente las líneas de estructura laminar y equiaxial.

Los conjuntos laminar se diferencian por el tamaño y orientación de las láminas.

Al centro de las micrografías de las figuras 3.14 y 3.18, existe una estructura de forma laminar y en los extremos una estructura equiaxial. Los bordes de los granos corresponden a elementos insolubles en la matriz.

3.5 Análisis por el diagrama de Schaeffler

Este diagrama permite determinar la estructura de un metal conociendo su composición. Adicionalmente se indican problemas que presentan determinadas estructuras al soldar, dependiendo de su ubicación en el diagrama, que pueden evitarse al seleccionar adecuadamente el metal de aporte y el procedimiento de soldadura. Para su empleo se parte del cromo y el níquel equivalente del material base y del material de aporte. Estos se calculan a partir de las fórmulas dadas, para luego graficarlas en el diagrama de Schaeffler

Fueron analizadas las nueve probetas según la disposición de los cordones considerando la composición química del depósito. En la tabla 3.2 aparecen los resultados del [Cr] y [Ni]

Tabla 3.12 Resultados del [Cr] y el [Ni] en las nueve probetas

Muestra	Electrodo	[Cr]	[Ni]
Línea	E 316 L 16	20,5	11,10
1	E 316 L 16	21,12	11,65
2	E 316 L 16	21,3	11,6
3	E 316 L 16	20,9	12,6
4	E 309 – 16	23,7	12,6
5	E 309 – 16	23,7	12,65
6	E 309 – 16	23,8	12,53
7	E 310 – 16	26	19,1
8	E 310 – 16	25,9	19,27
9	E 310 – 16	26,3	19,7

En la figura 3.21 aparece el diagrama de Schaeffler y la ubicación según el [Cr] y [Ni] de las nueve probetas.

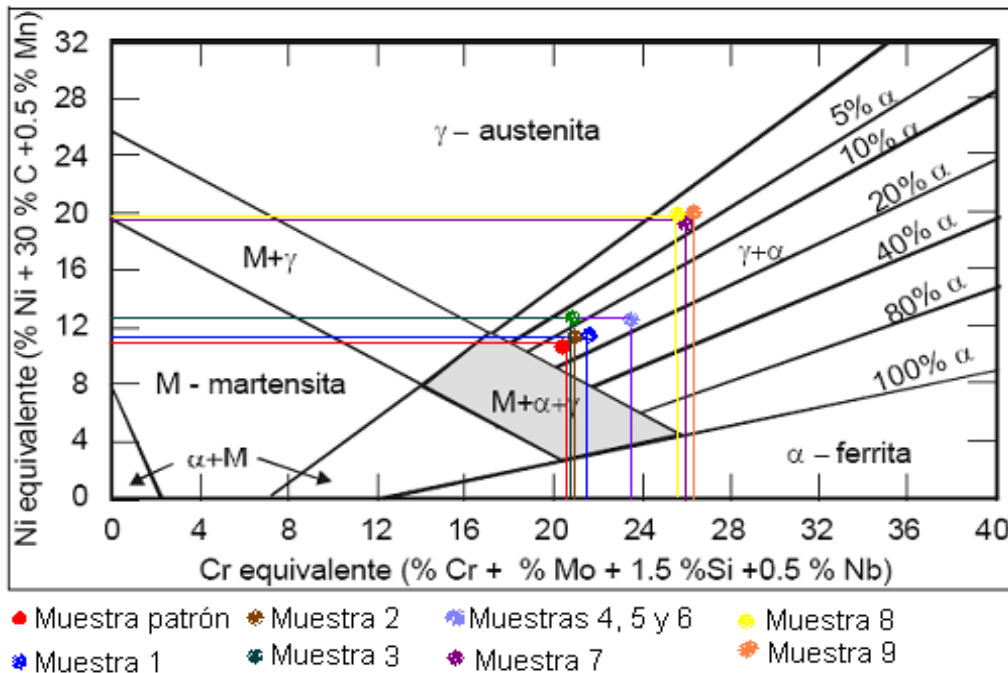


Figura 3.19 Ubicación en el diagrama de las nueve muestras.

Al ubicar cada una de las probetas y observando el diagrama presentado en el capítulo II, epígrafe 2.11, se puede observar que los resultados obtenidos de [Cr] y [Ni] se ubican en el campo 4.

La disposición de las uniones soldadas en este campo son los aceros austeníticos que tienen tendencia al agrietamiento en caliente a temperaturas superiores a los 1250 °C. Este fenómeno se presenta también en las uniones soldadas con estructuras de austenita + martensitas o martensítica.

Cierta cantidad de ferrita tiene efectos muy positivos para evitar el agrietamiento en caliente, además supone una mejora en las propiedades mecánicas del metal de soldadura. Sin embargo, supone una menor resistencia a la corrosión en medios ácidos oxidantes en caliente y puede permitir la aparición de la fase sigma.

Por lo tanto, el control del contenido en ferrita resulta básico. Cuando no sea necesario un cordón austenítico puro, es conveniente un porcentaje en ferrita entre el 5 y el 10%, y esto se puede conseguir mediante el control del material y del proceso de soldeo.

3.6 Resultados del cálculo de tensiones provocadas por las temperaturas y desplazamiento

La tensión uno y dos provocada por la temperatura y presión de trabajo se determinaron según las ecuaciones (2.3) y (2.4) son de valor p presión uniforme distribuida es de 25 (N/mm²), R radio exterior de la placa es de 400 (mm), h espesor de la placa 9,13 (mm), μ coeficiente de Poisson 0,3, T_a temperatura interior de 80 °C, T_b temperatura exterior de 50 °C y α coeficiente de expansión térmica $16,02 \cdot 10^{-6}$ °C⁻¹ con valor de $\sigma_1 = 9,984 \text{ N/mm}^2$ y $\sigma_2 = 4,992 \text{ N/mm}^2$. 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 el máximo es la tensión equivalente con valor de $\sigma_{eq} = 9,984 \text{ N/mm}^2$.

$$\sigma_{eq} = 9,984 \text{ N/mm}^2 < [\sigma] = 20 \text{ N/mm}^2$$

En este caso se determinó solamente el desplazamiento radial, debido a que la presión en el exterior es despreciable, los puntos en el exterior se desplazan en la misma magnitud que varíe el radio interior, el mismo se determinó por la ecuación (2.6), $w = 10,88 \text{ mm}$.

3.7 Análisis de los resultados de la simulación por el Método de Elementos Finitos (MEF)

Se trabajó en el modelo para la realización de la simulación empleando técnica de avanzada como es el método ANSYS 11.0, a través del cordón de soldadura y la placa de AISI 316. En la modelación se utilizó el mismo régimen de soldadura que para los ensayos experimentales, para el modelo geométrico mediante MEF se desarrolló un mallado tetraédrica con 20 nodos 95 elementos como se muestra en la figura (3.20).

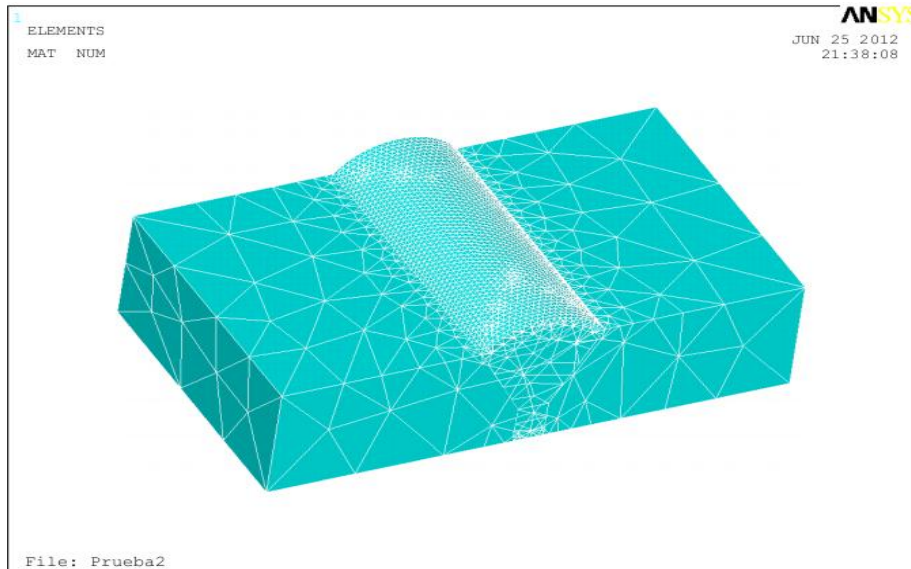


Figura 3.20 Mallado mediante el ANSYS 11.0

Los resultados muestran que la temperatura se distribuye a lo largo de toda la placa, desde los valores máximos de 1500 °C, hasta valores mínimos de 400 °C con una distribución uniforme de temperatura, siendo la dimensión de la zona de influencia térmica (ZIT) 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 1000 °C a partir de las cuales empieza a ocurrir las principales trasformaciones de fase como se muestra en la (figura 3.21)

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.

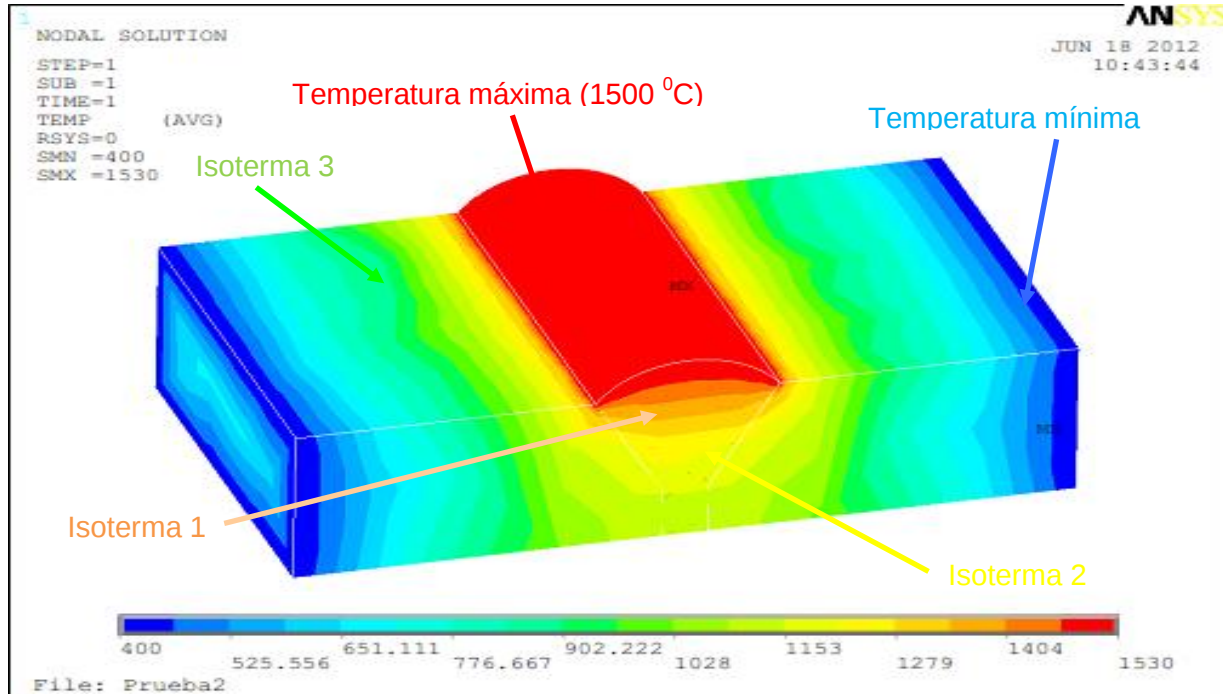


Figura 3.21 Comportamiento de la temperatura mediante el ANSYS 11.0.

3.7 Valoración económica

Al calcular los costos en los cuales se incurrió, se tuvo en cuenta mano de obra, precio de electrodo, gasto eléctrico entre otros, en la tabla 3.13, aparece el resumen de los costos.

Tabla 3.13 Costo de soldadura de las piezas

Costo de soldadura de la pieza.			
Tipo de material	Costo del material(\$)	Peso del semiproducto (kg)	Precio (\$)
Acero AISI 316 L	2,50	0,14	4,2
Operario	Tarifa(\$)	Tiempo efectivo(h/\$)	Costo(\$)
Soldador A	1,78	0,015	0,026
Salario Básico (Sb) = Suma de los costos = \$ 4,226			
Salario complementario Sc = (Sb*0,1) = \$ 0.422			
Aporte a la seguridad social Ss = (Sc+Sb)*0,09 = \$ 0.418			
Gasto de Energía			
Máquinas	Tiempo trab. (h)	Potenc máquina/kW	Energia cons. (kW/h)
Máquina de soldar	0,015	1,5	9

Costo Energía	
Máquina de soldar $C_{máq} = 0,06.Ec = 0,54$	Costo Energía Eléctrica. $Ce = 0,54$
Costo Total = \$ 33,6	

3.8 Peligros Ambientales relacionados con los trabajos de soldadura

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. 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.

3.8.1 Contaminación del aire, polvo, 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 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 m³ 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.

3.9 Conclusiones del capítulo III

1. Las micrografías observadas son representativas de todos los ensayos realizados que se encuentran caracterizadas en las zonas donde se obtuvieron de las probetas para obtener las micrografías.
2. Las muestras soldadas y analizadas por el diagrama de Schaeffler se encuentran ubicadas en el campo 4, que según el propio diagrama son propensos al agrietamiento en caliente.
3. El Método de Elementos Finitos (MEF) empleando el Software ANSYS 11.0, permitió establecer el comportamiento de la distribución de la temperatura, las mismas alcanzan valores significativos durante el proceso de soldadura.

Conclusiones generales

- ✓ Las roturas del mezclador de ácido está caracterizada por los defectos generados durante el procesos de soldeo del mismo, los resultados experimentales muestran que la soldadura del acero AISI 316 con electrodos del tipo E 309L – 16, E 310L – 16, no son recomendables ya que se obtiene una microestructura martensítica sensible al agrietamiento y a la corrosión.
- ✓ Con el cálculo de las tensiones se demostró que la unión soldada es capaz de soportar los esfuerzos producidos por las cargas actuantes y que las deformaciones se encuentran dentro del rango para estos tipos de uniones la cual se corroboró a través de la simulación.
- ✓ 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.
- ✓ Según la ficha para costos, precios y su componente en pesos convertibles” que se utiliza como Norma empresarial el costo total empleado el desarrollo del experimento fue \$ 38,18.

Recomendaciones

- ✓ Desarrollar el proceso de austenización en los cordones de soldadura como un medio de impedir el agrietamiento al cual están sujeto actualmente los cordones de soldadura.
- ✓ Siempre que se trabaje en placas de aceros inoxidables, utilizar soldadores que estén calificados en este tipo de soldadura y seguir los procedimientos determinados por las normas.
- ✓ Emplear siempre electrodos con características similares a la del material base y realizar el proceso del soldeo según lo establecido por normas (E 316L-16).

REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS

Bibliografías

1. AMERICAN WELDING SOCIETY. ANSI / AWS A 5.5: Specification for Low Alloy Steel Covered Welding Electrodes, USA, 1996, 55 p.
2. ASM HANDBOOK COMMITTEE. Metallographyc, structures and phase diagrams, American Society for Metals, 1973, USA
3. Avilés, A. 2007. Influencia de la transformación martensítica en la vida a fatiga de los aceros inoxidables austeníticos, ETSEIB, España.
4. Baddoo, N.R. and Gardner, L. WP5.2: Member behaviour at elevated temperatures. ECSC project – Development of the use of stainless steel in construction. Contract No. 7210 SA/842. The Steel Construction Institute, UK. 2000.
5. Bakker, F. J. Y Horestreydt A. J. W. Soldadura por arco, Madrid, 1968.
6. Barreiro, A. J. Aceros especiales, 3ª. ed. Madrid, 1966.
7. 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.
8. Bonifaz E.A. Finite Element Analysis of heat flow in single-pass arc welds. Welding Journal. May 2000.
9. Burgan, B. A. "Concise Guide to the Structural Design of Stainless Steel". The Steel Construction Institute, Ascot, UK, 2 edition, 1993.
10. Burgan, B.A., Badoo, N.R., Design Guidance on the use of Stainless Steel in Construction. International Congress – Stainless Steel' 99 Science and Market. Vol.3, Properties and Performances. 1999. Pages 175-184, Sardinia, Italy.
11. Burgos, S. J. Tecnología de la soldadura – 1 ed -. Editorial Pueblo y Educación. La Habana. 1987. 285 p.
12. Conde G. Y Santiago. Aceros inoxidables, refractarios y criogénicos. Editorial Blume, España, 1971.
13. De Almeida L. H., Le may I. AND Monterio S. N., Proc.Conf. On Strength of Metals and Alloys (ICSMA), H. J. McQueen (Ed.), Pergamon Press, Oxford, 1 1986. 337.
14. Di Caprio, G. "Los Aceros Inoxidable". GRUPINOX, 1987

- 15.** Easterling K., 1992: Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworth - Heinemann, pp. 18 - 19.
- 16.** Evanss, G. M., "Then effect of stress relieving on the microstructure and properties of C-Mn all weld metal deposits", Welding Journal, 1986, No. 12. pp. 326s-334s.
- 17.** García Y., Burgos, J.; Obtención de campos de temperaturas en juntas soldadas mediante el empleo de MEF. Revista de la Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Editorial Papiro, Venezuela, VOL 18-Nº 2, 2003. (a) Disponible en:< <http://www.revelo.com.ve/programa/indice/>> acceso: julio2005.
- 18.** García Y., Burgos J. Obtención de los campos de temperaturas en juntas soldadas mediante el empleo de MEF. JIFI 2002, Simposio de la red Iberoamericana de Aceros Tradicionales y Aceros Estructurales, Avanzados. 1er, Caracas, Venezuela. 2002.
- 19.** Gardner, L. and Nethercot, D.A. Improved efficiency for stainless steel structures. Proceedings of the International Iron and Steel Institute World Conference 2002: Steel in Sustainable Constructuion. Edited by Sansom, M. Luxemburg Congrès, and Luxemburg. 2002. p 75 - 80.
- 20.** Glizmanenko, O. L. "Soldadura y corte de metales". La Habana. Instituto Cubano del Libro. 1975. 472 pp.
- 21.** Gooch, T. G., "Stress corrosion craking of welded joints in high strength steels", Welding Journal, 1974, No. 7, pp. 47-51.
- 22.** Goldak J.; Moashi G. Numerical Aspect of modelling weld. Moashigu, Carleton University. ASM Handbook, Vol 6 Welding, Brazing and Soldering.1999.
- 23.** Guliaev, A. P, "Metalografia", Tomo I, Edit MIR Moscu, 1977, pp. 163-176.
- 24.** Guliaev, A. P: Metalografía. Tomos II, Moscú: Editorial Mir, 1983.
- 25.** Guliar, A.P Metalografía, Tomo 1 y 2, Edit MIR Moscú. 1978.
- 26.** Hazarabedian, A.; Forgetb, P.; Marini B. 2000. Aproximación local de fractura aplicada al envejecimiento de un acero inoxidable duplex. Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga. pp.: 655-661.
- 27.** Hiller, M; Qiu, C. 1991. Thermodynamic analysis and evaluation of the Fe-Cr-C and Fe-Cr-Ni-C systems. Metallurgical Transaction. 22 (A). pp.: 2187-2198.

- 28.** Hochmann. J. Aceros inoxidable / Aceros refractarios. Ediciones URMO, España, 1968
- 29.** INDURA S.A. Sistemas y Materiales de Soldadura, 132 páginas, Chile, 1998.
- 30.** Isabel, B. G. Estudio de la actividad bactericida de aceros inoxidable aleados con cobre. Sevilla, 2005. Disponible en World Wide Web http://fondosdigitales.us.es/public_thesis/393/9178.pdf.
- 31.** Jeffus, Larry. Welding principles and applications. Third edition. Delmar Publishers Inc. 1993.
- 32.** Kedzierzawski, P., "Hydrogen Trapping in Iron and Iron Alloys", Hydrogen Degradation of Ferrous Alloys, 1st. Ed., Noyes Publications, 271-288, New Jersey, USA. 1985
- 33.** Key to steel. Influence of Alloying Elements on Steel Microestructure. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en sitio Web <http://www.key-to-steel.com/>
- 34.** Laufgang, S. G. Aceros inoxidable. Tratamiento térmico de soldadura – prueba hidráulica de gasoductos. 2003
- 35.** Masubuchi, K., "Analysis of welded structures: Residual stresses, distortion, and their consequences", Massachusetts Institute of Technology, USA, 1980, pp.88-110, pp. 112-145, pp. 148-187, pp. 328-335.
- 36.** MATERIALES. Bohler special steel manual for PC. Versión 1.1. 1996.
- 37.** Mejía I.; Maldonado C. Determinación de Esfuerzos Residuales en la soldadura de placas de acero Inoxidable austenítico mediante el Método de Hole Drilling. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michuacana de San Nicolás de Hidalgo. XV congreso Nacional de Soldadura. Querétaro, México.2004.
- 38.** Mejía, I., C. Maldonado, Ch. J. García, M. A. Loubet, R. D. Cervantes, V. Osornio y J. Rivera. "Determinación de esfuerzos residuales en la soldadura de placas de acero inoxidable austenítico mediante el método de hole drilling". 2000
- 39.** Meyer, H. J. Grietas Laminares en Construcciones Soldadas. II Conf. On Significance of Defect in Welds, Welding Inst. London. 1968.

- 40.** Micharelis P. Minimization of welding residual stress and distortion in large structure. The Penn State University, University Park. P.A., 2003. Disponible en: <<http://www.me.psu.edu/micharelis/pubs/wj99.pdf>> acceso: marzo 2004
- 41.** Nangel, D. Tensión y propiedades de deformación de aceros estructurales en la dirección del espesor. Metal Const. Nro 2, Vol. 64. 1969.
- 42.** Nicholls D.M. Grietas laminares en Aceros Laminados en Caliente. Brit. Welding Journal. Nro 3, Vol. 15. 1968
- 43.** Olsson, A. "Plastic Behaviour of Stainless Steel. A phenomenological study" Licentiate Thesis. Lulea University of Technology. 1998.
- 44.** Oriani, R. A., "The Physical and Metallurgical Aspects of Hydrogen in Metals", ICCF4, Fourth International Conference on Cold Fusion", Lahaima Maui, Electrical Power Research Institute 3412, Hillview Av., Palo Alto CA 94304, USA. 1993.
- 45.** Radhakrishnan, V. 2000. Hot cracking in austenitic stainless steel weld metals. Science and Technology of welding and Joined Magazine, 5 (1). India.
- 46.** Quesada, H. J., Zalazar, M.; Asta, E. P. Ensayos de fisuración en frío aplicados en aceros de alta resistencia. JORNADAS SAM – CONAMET – AAS, septiembre 2001, Argentina.
- 47.** Parlane A. Origin and nature of residual stress in Welded Joints. Welding Institute.1980.
- 48.** Puchi-Cabrera. E. S. Comportamiento mecánico del acero inoxidable 316l bajo condiciones de trabajo en tibio. Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V., Vol. 18, N°2, pp. 63 - 72, 2003.
- 49.** Rodríguez P, H. Metalurgia de la soldadura – 1 ed -.Pueblo y Educación. La Habana. 1983. 613 p.
- 50.** SABS. Structural use of stainless steel – Part 4 The design of cold formed stainless steel structural members. SABS 0162-4:1997.
- 51.** Velázquez, A. 2002. *Fragilización de la aleación HH por precipitación de fases sigma*. Dr. C. Eleno Alfonso (tutor). Tesis en Opción al Título de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMM. Moa. Cuba.



- 52.** Watanabe, M. Grietas laminares. Welding in Shipbuilding. Welding Inst. London. 1962.
- 53.** Wilson, W.G. Minimación de las grietas laminares mediante la elevación de la ductilidad en la dirección Z. Welding Journal. Nro 11. 1974.