



REPUBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO  
Dr. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ  
FACULTAD METALURGIA ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO. INGENIERIA MECANICA

## TESIS EN OPCION AL TITULO DE INGENIERO MECÁNICO

*Título: Agrietamiento en el cordón de soldadura de una línea de tubería de pulpa lixiviada*

*Autor: José Luís Sablón Quevedo*

*Tutores: MS.c. Tomás Fernández Columbié  
MS.c. Isnel Rodríguez González*

*Curso 2009 – 2010*

*“Año 52 de la Revolución”*

*Moa 2010*



## **Declaración de Autoridad**

**Yo:** José Luís Sablón Quevedo

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.

-----  
José Luís Sablón Quevedo

-----  
MSc. Tomás Fernández Columbié

-----  
MSc. Isnel Rodríguez González



## **Agradecimientos**

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

***A mis tutores por confiar en mí en la realización de este trabajo, el MSc. Tomás Fernández Columbié y el MSc. Isnel Rodríguez González***

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

***A mis amigos que siempre creyeron en mi.***

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

***A la revolucion, por darme la oportunidad de convertirme en profesional .***

***A todos***

***Muchas Gracias***



## ***Dedicatoria***

***Quiero dedicar este trabajo a mis familiares.***

***A mis hijos, José Luís Sablón Mora y Lorena Sablón Mora, que les sirva de ejemplo.***

***A mí querida y estimada esposa***

***Marisol Mora Téllez***

***A mis compañeros de aula a todos por igual***

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



## **Resumen**

Se analiza el comportamiento microestructural del acero AISI 316 empleado en la línea de tubería de pulpa lixiviada en la planta de lixiviación en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, para ello se prepararon 10 probetas, 9 de ellas del material del tubo, las cuales fueron cortadas de forma longitudinal con dimensiones de 100 X 50, fueron soldadas y una como muestra patrón del cordón actual de la línea de tubería, para evaluar el comportamiento del agrietamiento en el cordón de soldadura. Fueron empleados electrodos del tipo E 310 – 16, E 309 – 16, E 316 L 16. Se evaluó la soldabilidad de las muestras considerando el [Cr] y [Ni]. Se tuvo en cuenta la incidencia de los procesos de soldadura sobre el hombre y el medio ambiente. Por último se analizó la valoración económica.

## **Abstract**

The behavior microstructure of the steel AISI 316 employee is analyzed in the line of pulp pipe leached in the leaching out plant in the Company Major Pedro Sotto Alba, for they got ready it 10 test tubes, 9 of them of the material of the tube, which were cut in a longitudinal way with dimensions of 100 X 50, they were soldiers and one like patron sample of the current cord of the pipe line, to evaluate the behavior of the cracking in the welding cord. They were employes electrodes of the type AND 310 - 16, AND 309 - 16, AND 316 L 16. The soldabilidad of the samples whereas clause the was evaluated [Cr] and [Neither]. One kept in mind the incidence of the welding processes on the man and the environment. Lastly the economic valuation was analyzed.



## TABLA DE CONTENIDOS

<b>SINTESIS</b>	<b>Pág</b>
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO I. MARCO TEORICO Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION</b>	
1.1 Introducción.	5
1.2 Aceros inoxidables austeníticos.	5
1.2.1 Composición química del acero AISI 316.	7
1.2.2 Influencia de los principales elementos de adición.	7
1.3. Formación de precipitados y fases intermetálicas.	8
1.3.1 Precipitación de carburos en borde de grano.	8
1.4. Tensiones en las uniones soldadas.	9
1.4.1 Generalidades y naturaleza de la corrosión bajo tensión.	10
1.4.2 Teorías sobre la corrosión bajo tensión.	11
1.4.3 Sensitización. Corrosión intergranular (CIG).	12
1.4.4 Corrosión intergranular (sensibilización) y degradación por soldadura.	12
1.4.4 Ataque de Línea de cuchillo Knife line attack (KLA).	12
1.4.5 Efecto de la soldadura en la resistencia a la corrosión.	13
1.4.6 Métodos para el alivio de las tensiones residuales en la soldadura.	14
1.4.6.1 Alivio de tensiones por vía térmica.	14
1.4.6.2 Alivio de tensiones por vía mecánica.	15
1.5 Fisuración en caliente y la influencia de la ferrita $\delta$ .	16
1.6 Formación de fase sigma.	16
1.7 El papel de la ferrita en el metal soldado.	17
1.8 Distorsión por soldadura.	18
1.8.1 Modificaciones estructurales de la zona fundida (ZF).	18
1.8.2 Grietas en caliente.	19
1.8.3 Modificaciones estructurales y físico – química en el metal base (MB).	20
1.9. Conclusiones del Capítulo I.	21
<b>CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	
2.1. Introducción.	22



2.2.	Características del flujo tecnológico.	22
2.2.1	Condiciones de trabajo de la línea de tubería.	23
2.3	Caracterización del material de la línea de tubería de pulpa lixiviada.	23
2.4.	Plan experimental.	24
2.5	Análisis microestructural.	25
2.6	Materiales y equipos empleados en la experimentación..	25
2.6.1	Pulidora metalográfica Montasupal.	26
2.6.2	Características de la máquina.	26
2.6.3	Máquina de soldar.	26
2.6.3.1	Transformador.	26
2.6.4	Electrodos.	27
2.6.4.1	Características de la soldadura.	27
2.6.4.2	Electrodo E 309 – 16.	28
2.6.4.3	Campo de aplicación.	28
2.6.4.4	Electrodo E 310 – 16.	28
2.7	Microscopio óptico.	29
2.8	Preparación metalográfica de la probeta.	29
2.8.1	Corte de las muestras.	30
2.8.2	Desbaste y pulido.	30
2.8.3	Lijado grueso	31
2.8.3.1	Lijado fino	31
2.8.3.2	Paños para pulido	32
2.9	Ataque de las muestras para su examen microscópico	32
2.10	Equipo utilizado en la medición de temperaturas	32
2.11	Diagrama de Schaeffler	33
2.11.1	Determinación del Número de Ferrita (FN)	34
2.12	Conclusiones del capítulo II	35
<b>CAPITULO III. ANALISIS DE LOS RESULTADOS</b>		
3.1.	Introducción.	36
3.2.	Análisis de la composición química del metal base	36
3.2.1	Análisis de la composición química del depósito.	36



3.2.2	Análisis de la influencia de los principales elementos de adición. . . . .	38
3.2.2.1	Corrosión intergranular. . . . .	40
3.3.	Análisis microestructural. . . . .	41
3.3.1	Análisis de las muestras soldadas con electrodo E 309 – 16 . . . . .	42
3.3.2	Análisis de las muestras soldadas con electrodo E 310 – 16 . . . . .	44
3.3.3	Análisis de la unión soldada de la línea de tubería. . . . .	45
3.3.4	Análisis de la unión soldada de la muestra 3 y la línea de tubería. . . . .	45
3.5	Análisis por el diagrama de Schaeffler . . . . .	46
3.6.	Valoración económica . . . . .	48
3.7	Peligros Ambientales relacionados con los trabajos de soldadura . . . . .	49
3.7.1	Contaminación del aire, polvo, los vapores y gases nocivos . . . . .	49
3.6	Conclusiones del capítulo III . . . . .	50
	Conclusiones generales	
	Recomendaciones	
	Referencias bibliográficas	
	Anexos	





## INTRODUCCIÓN

La necesidad de encontrar materiales resistentes a la corrosión, elevadas temperaturas de servicio y ácidos a determinadas temperaturas y concentraciones, 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 inoxidable se caracterizan por tener en su composición química un contenido mínimo de 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 y farmacéutica, 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.

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 Problémica** de la investigación la constituye:

A pesar de la implementación de estrictas regulaciones acerca de la construcción, explotación, inspección, mantenimiento y reparación de las tuberías 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 tuberías estuvieron relacionadas a defectos de soldadura.

Frente a la presencia de daños en tuberías, que pueden conducir a una falla catastrófica, se hace necesario reparar y esta decisión tiene una fuerte justificación económica. Estudios de Palmer – Jones, 2000 revelan que la reparación de un tubo, con un diámetro entre 406,4 mm y 610 mm, puede ahorrar entre el 10 % y el 50 % del costo de una tubería nueva.

Hay varias alternativas para realizar la reparación de una tubería y cada una tiene aspectos diferentes, el caso de la tubería de la planta de lixiviación y lavado de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, que trasiegan Ácido Sulfúrico están presentando agrietamiento en las uniones soldadas en los tramos de tuberías, 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 de las zonas fundida (ZF) y de influencia térmica (ZIT) en el cordón de soldadura de la línea de tubería de pulpa lixiviada de la Empresa Pedro Sotto Alba.



Como **Objeto de la investigación** se establece: Cordón de soldadura de la línea de tubería de ácido sulfúrico.

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 del acero empleado en la línea de tubería que trasiega pulpa lixiviada, después del depósito de cordones con electrodos E 316 L 16, E 309 – 16, E 310 – 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, en la línea de pulpa lixiviada de la Empresa Pedro Sotto Alba.

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 en la línea de ácido sulfúrico.
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 Shield Metal Arc Welding (SMAW).

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 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 AISI 316 en las Zona Fundida y la Zona de Influencia Térmica.
4. Análisis de los resultados y fundamentación del mecanismo de obtención microestructural de la ZF y la ZIT del acero AISI 316 durante el proceso de soldadura en línea de tubería con medios agresivos.
5. Planteamiento de las ventajas económicas de la aplicación de la metodología propuesta.

# CAPITULO I

## **“”CAPITULO I. MARCO TEORICO Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION**

### **1.1. Introducción**

El acero inoxidable es el nombre genérico para un grupo de aceros usados básicamente por su resistencia a la corrosión. El único elemento clave que todos ellos comparten, a parte del bajo contenido en carbono, es un porcentaje mínimo en masa de un 11% en cromo. Evidentemente, el elemento preponderante de la aleación debe ser el hierro. No obstante, otros elementos como el níquel y el molibdeno pueden ser añadidos para mejorar esta resistencia a la corrosión, pero será este contenido en cromo el factor decisivo (Di Carprio, 1987).

El contenido de cromo del acero inoxidable permite la formación de una película anti-corrosión de óxido de cromo adherente, invisible y pasivo, es decir, que no daña a los otros materiales que están en contacto. La película pasiva vuelve a reconstruirse cuando se la daña, naturalmente si el ambiente es suficientemente oxidante y si el oxígeno puede entrar en contacto con la aleación. Esta película es aproximadamente de 130 Angstroms de espesor, siendo un Angstrom una miliónésima parte de un centímetro.

Hay más de 60 tipos de aceros inoxidables. No obstante, el grupo entero puede ser dividido en cinco clases en función de su estructura metalúrgica y del tratamiento termomecánico al que han estado sometidos. Cada grupo tiene sus propias características, sobretodo en cuanto a su resistencia mecánica y resistencia a la corrosión.

En el presente capítulo se establece como objetivo.

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

### **1.2 Aceros inoxidables austeníticos**

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 -  $\gamma$ ) 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)

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 y petroquímica, los aceros inoxidables ofrecen elevada resistencia a la corrosión y excelentes propiedades mecánicas así como un bajo costo de mantenimiento. En la industria de alimentos y bebidas y en la industria

farmacéutica, proveen excelentes condiciones de higiene además de su resistencia a la corrosión y duración a largo plazo.

### 1.2.1 Composición química 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

### 1.2.2 Influencia de los principales elementos de adición

Además de las familias de aceros inoxidable antes mencionadas, existen los aceros inoxidable 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 inoxidable este efecto también es importante, y se puede diferenciar la influencia sobre los aceros inoxidable 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 predeterminar el porcentaje de los elementos de aleación para conseguir la estructura deseada en el metal de soldadura.

Existen numerosos trabajos para determinar esta relación, llegándose a la obtención de unos diagramas que relacionan los diferentes elementos de aleación con la formación de estructuras y fases.

### **1.3 Formación de precipitados y fases intermetálicas**

Si un acero inoxidable, que ha sido desarrollado y obtenido por metalurgia artificial (ya que no existe como tal en la Naturaleza) hasta conseguir una estructura en cierto modo metaestable, es sometido durante un tiempo a altas temperaturas, puede sufrir dos tipos de modificaciones:

- Precipitación de compuestos intersticiales.
- Formación de fases intermetálicas.

#### **1.3.1 Precipitación de carburos en borde de grano**

Bermúdez (2003) plantea que elementos aleantes como el Cr, el Ti y el Nb, tienen una alta reactividad con el C y el N, componentes habituales del acero. Esta reactividad se incrementa con la temperatura y la posibilidad de una cierta motilidad atómica. De esta forma, la mayor precipitación de carburos y nitruros tiene lugar cuando se alcanzan temperaturas en el rango de 500 - 800 °C, temperaturas que están presentes en las operaciones de soldadura.

Ya vimos como determinar la temperatura alcanzada a ambos lados del cordón, con lo que es posible conocer la zona expuesta a este rango de temperaturas.

La formación de carburos precipitados en borde de tiene dos consecuencias negativas:

- Por una parte se produce un empobrecimiento local de carbono, generándose unos cristales frágiles intergranulares, lo que significa facilidad de rotura o de caminos de rotura.

- Por otra parte se empobrece la zona en Cr, lo que significa que la capa de óxido de Cr característica de los inoxidable no podrá regenerarse, dando lugar a problemas de corrosión en la zona descromada.

Cuando se produce la formación de estos carburos de cromo ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ), decimos que el material está sensibilizado.

Las consecuencias generales de la sensibilización son:

- Disminución de la resistencia a la corrosión en general, por picaduras y por aireación diferencial.
- Aparición de corrosión intergranular.
- Disminución de la ductilidad.
- Disminución de la tenacidad y asociado incremento de la fragilidad.

#### **1.4 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).

#### **1.4.1 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 inoxidables, 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)

#### **1.4.2 Teorías sobre la corrosión bajo tensión**

En el caso de los aceros inoxidable 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 inoxidable 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

#### **1.4.3 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 sensibilizan en dos bandas paralelas al cordón de soldadura levemente alejadas de este.

#### **1.4.4 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.

#### **1.4.4 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 sensitizada 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.

#### **1.4.5 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 inoxidable. Hoy, con la tendencia de las usinas a proveer productos con bajo carbono, el ataque intergranular de los aceros inoxidable 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)

#### **1.4.6 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:

- a) Por vía térmica
- b) Por vía mecánica

##### **1.4.6.1 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 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.

En algunos materiales no resulta aconsejable la permanencia a temperaturas del orden indicado por el riesgo de afectar desfavorablemente su aptitud para hacer frente satisfactoriamente a las solicitudes del servicio.

Tal es el caso de los aceros inoxidable (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)

#### **1.4.6.2 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.

### **1.5 Fisuración en caliente y la influencia de la ferrita $\delta$**

Bajo condiciones de alta restricción a la contracción, algo frecuente en juntas soldadas de aceros Inoxidables suelen aparecer pequeñas fisuras distribuidas al azar cuando el material se encuentra a alta temperatura (1000°C). A menudo estas fisuras no son visibles pero un ensayo de plegado de cara las pone en evidencia como rupturas del material no mayores a tres mm de longitud. Son llamadas microfisuras.

Real, et al., (1997) plantean que el por que algunas soldaduras exhiben esta tendencia a la fisuración en caliente y otras no ha sido tema de estudio desde los años 50. Se comprobó que si pequeñas (2 - 3%) cantidades de Ferrita  $\delta$ , solución sólida de carbono en hierro BCC, acompañaba a la predominante austenita se aumentaba la posibilidad de producir soldaduras sanas, sin fisuración en caliente.

Talja, Salmi (1995) el mecanismo de fisuración parece ser el resultado de la ruptura de una película intergranular líquida de bajo punto de fusión (1100 - 1200°C) durante la contracción que tiene lugar cuando una estructura totalmente austenítica se enfría desde su temperatura de fusión (1420 - 1450°C). Los 250 - 300°C de diferencia producen tensiones de tracción cuando hay restricción a la contracción. La presencia de pequeñas cantidades de Ferrita  $\delta$  provee un número de remedios:

- Se incrementa la cantidad de borde de grano disponible reduciendo de esta manera la concentración de impurezas que quedan segregadas en el borde de grano.
- La ferrita disuelve mas fácilmente que la austenita que los elementos alógenos como fósforo y azufre y silicio reduciendo de esta manera la influencia de estas perniciosas impurezas que segregan en borde de grano austenítico.

### **1.6 Formación de fase sigma**

Una pequeña cantidad de Ferrita  $\delta$  evita la fisuración en caliente, también debemos agregar que se mejora además la resistencia mecánica y algunas veces la resistencia a la corrosión. La cantidad de ferrita  $\delta$  no conviene que sea mayor que 12 -15 % debido a que ella, como se observa en el diagrama Fe - Cr, se transforma en Fase Sigma,

umentando los riesgos de fisuración como así también disminuyendo la resistencia a la corrosión. (Di Caprio, 1999)

Si la parte a ser fabricada es destinada a un servicio entre 550 - 950°C, o si tiene especificado un Tratamiento Térmico Post Soldadura, puede formarse Fase Sigma reduciendo la ductilidad. La composición de la fase Sigma es de aproximadamente 45% Cr - 55Fe, a 730°C se forma rápidamente, pero a más bajas temperaturas los tiempos se incrementan el Molibdeno y el Niobio aceleran la reacción formadora de fase Sigma, mientras que el níquel eleva la máxima temperatura a la que todavía la fase sigma está todavía presente. El hierro disuelve grandes cantidades de cromo y, a causa de la micro segregación, la ferrita en el borde de grano contendrá usualmente suficiente cromo para convertirse en Sigma con una mínima difusión. Una vez formada, la fase Sigma solo podrá ser removida con un calentamiento de redisolución a 1050°C. La fase Sigma es no magnética, y la cantidad de fase Sigma formada durante un calentamiento dado puede ser fácilmente determinada si se conocen las cantidades de ferrita antes y después del calentamiento. (Bleich, 1952)

Debido a esta transformación de ferrita a fase Sigma, las partes que sean sometidas a calentamientos ya sea en servicio o durante el proceso de fabricación, como ser Tratamiento Térmico Post Soldadura el contenido de ferrita se limita a 12 - 15%.

### **1.7 El papel de la ferrita en el metal soldado**

Cladera (1999) considera que se conoce que ocurren microfisuras o grietas en soldaduras de aceros inoxidable austeníticos y pueden aparecer en el metal soldado durante o inmediatamente después de la soldadura, o pueden ocurrir en la zona afectada por el calor de la capa de soldadura depositada previamente. La microestructura del metal soldado influye fuertemente en la formación de microfisuras. Una soldadura completamente austenítica es más susceptible a las microfisuras que una soldadura con algo de ferrita.

Niveles de ferrita de 5 a 10% o más en soldaduras o fundiciones pueden ser bastante beneficiosas en la reducción de grietas producidas en caliente y microfisuras. Por ejemplo, una soldadura tipo 308 (UNS W30840) con 0 a 2% de ferrita puede ser bastante sensible a agrietarse, mientras otra soldadura con 5 a 8% de ferrita puede

tener una buena resistencia al agrietamiento. La cantidad de ferrita en la serie 300 se controla con la composición y velocidad de enfriamiento de la soldadura, cuanto más rápido el enfriamiento, más alto el contenido de ferrita. (Estrada, 2000)

### **1.8 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.

#### **1.8.1 Modificaciones estructurales de la zona fundida (ZF)**

Las modificaciones estructurales pueden agruparse en dos grupos (Rodríguez, 1983, Guliari, 1978; Doyle, 1988), 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

)

### **1.8.2 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 (Temp. 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; Park et al., 2002; 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, Wormington, 1967, 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).

### **1.8.3 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 variaran en dependencia de las diferentes regiones de la zona térmicamente afectada donde se encuentre (Barreiro, 1966, Bakker, 1968).

## **1.9. Conclusiones del Capítulo I**

El análisis de las fuentes bibliográficas consultadas permite plantear que:

- ❖ En la revisión bibliográfica se comprobó que no existe información acerca de las causas que provocan el agrietamiento en los cordones de soldadura de una línea de tubería que transporta pulpa lixiviada.
- ❖ La tendencia al agrietamiento de la Zona Fundida y de la ZIT en los aceros inoxidables austeníticos al cromo – níquel, se debe a la formación de una película de silicatos que se forma alrededor de los granos de austenita que forman grietas en caliente, dando origen a una fase intermedia sigma, que provoca la fragilidad en estos aceros.
- ❖ Se pudo comprobar que un fenómeno que produce pérdida de la resistencia a la corrosión en algunos tipos de acero inoxidable, es la causa conocida como “corrosión íntergranular”.

# CAPITULO II



## **CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Introducción**

El análisis de tensiones y deformaciones es difícil y complejo en el caso del acero inoxidable, debido a la no linealidad de su comportamiento tenso - deformacional.

A pesar del gran avance que han experimentado los métodos numéricos en el estudio de las tensiones, ello no es suficiente y se hace imprescindible la verificación experimental.

La primera guía de diseño estructural de acero inoxidable es la Guía de Diseño del Steel Construction Institute (SCI) (Burgan, 1993). Esta guía contiene especificaciones propias del acero inoxidable, estas son un complemento a las especificaciones recogidas por la British Standards Institution (1990) en BS5950 Part 1. La guía incluye recomendaciones para la elección del tipo de acero inoxidable más adecuado en cada aplicación. También encontramos información sobre las propiedades mecánicas y físicas así como sobre la resistencia de proyecto de secciones transversales, barras, uniones y fabricación. Para ilustrar el uso de la guía se incluyen ejemplos de proyecto.

#### **En este capítulo se plantea como objetivo**

1. Fundamentar las propiedades a investigar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones en la que se realizarán los experimentos.

### **2.2. Características del flujo tecnológico**

El mineral viene de la planta de espesadores a los TK de almacenaje de lixiviación de ahí se extrae a través de las bombas Denver, se envía a un pre calentador y luego pasan a la bomba will, que es la que lo transporta a los reactores. En los reactores se le aplica un porcentaje de ácido sulfúrico al 99,9%, vapor a 650 Psi (45 kgf/mm<sup>2</sup>) y una temperatura de 475°C, al salir de los reactores pasan por los enfriadores donde pierden alrededor de 200°C, a esta temperatura entra a los flash, donde se despresuriza, continúa el recorrido por una caja distribuidora que es la que lo envía a la planta de lavadero a través de una tubería de 305 mm de diámetro y un espesor de 6 - 8 mm. Esta tubería tiene un tiempo útil sin averías de alrededor de 6 meses



### 2.2.1 Condiciones de trabajo de la línea de tubería

Las líneas trabajan en un medio altamente agresivo lo que provoca que las mismas presenten agrietamiento en el cordón, las características del fluido en el que trabaja son:

Pulpa ácida y abrasiva de sólidos lixiviados con ácido sulfúrico.

Los elementos que más afectan la concentración del medio en que trabaja la válvula aparecen reflejados en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Concentración de elementos en el medio.

Elemento	Elemento	Elemento
Ni de 6 a 7 g/l	Co de 0,5 a 0,6 g/l	Mg de 1 a 2 g/l
Al de 2 a 3 g/l	Fe de 1 a 2 g/l	Cu de 0,8 a 1,0 g/l
Zn de 0,2 a 0,3 g/l	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> de 30 a 35 g/l	Temperatura: 246 °C
PH - 0,9 a 1, 3	% Sólido 30 a 33	100 mesh de 6% a 8%.

### 2.3 Caracterización del material de la línea de tubería de pulpa lixiviada

El acero inoxidable 316 tiene amplia utilización en la actualidad en todas las esferas de desarrollo industrial: Industrias Niquelíferas, domésticas, medicina, automovilística, constructivas, aeronáutica es que tienen gran aplicación 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, 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 y petroquímica, los aceros inoxidable 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 "Pedro Sotto Alba", en la línea pulpa lixiviada.

#### **2.4. Plan experimental**

Para el desarrollo del plan experimental se prepararon 9 probetas de acero AISI 316, se seleccionaron del material de la tubería retirada de servicio, las mismas se soldaron con diferentes electrodos y algunas se le aplicaron temperatura de calentamiento. Este diseño aparece en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Parámetros para la soldadura de las probetas

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

Las diferentes probetas se prepararon con longitud de 100 mm y un ancho de 50 mm, se cortaron longitudinalmente de la sección del tubo, 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 de la línea de pulpa lixiviada. Las muestras para la observación microscópica fueron cortadas con longitud de 15 X 15 (Norma ASTM E 92).

## **2.5 Análisis microestructural**

El análisis microestructural consistió en la observación de una muestra patrón del material de la línea de tubería. Esta se emplearán para establecer el comportamiento del material de las muestras después de efectuado el proceso de soldadura. La figura 2.1 es la microestructura del material de la tubería

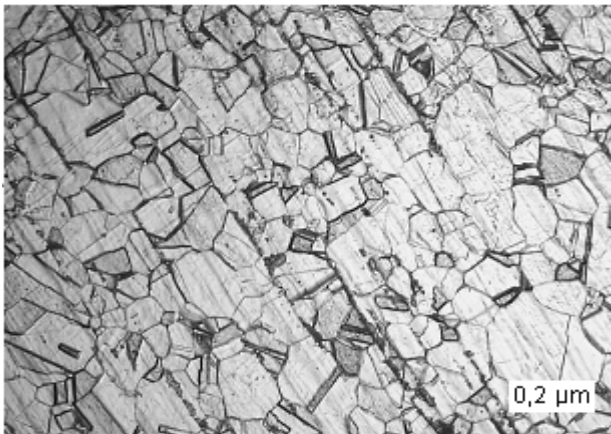


Figura 2.1. Microestructura del AISI 316

Según los ensayos realizados y la imagen en la figura 2.1, se puede plantear que la microestructura del material de la línea de tubería se corresponde con la del acero AISI 316, el cual presenta una estructura austenítica.

## **2.6 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 maquina, 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.



### 2.6.1 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.

### 2.6.2 Características de la máquina

Voltaje.	. . . . .	. 250 V
Corriente.	. . . . .	. 2.5 Amp
Número de revoluciones.	. . . . .	. 300 -1 000 rev/min
Potencia del motor.	. . . . .	. 5 HP

### 2.6.3 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.

#### 2.6.3.1 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 unas de sus principales desventajas.

Los rangos de amperaje para los que son diseñadas no sobrepasan los 180 A, las cual 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 en su gran economía en el consumo energético.

La curva de característica de la fuente permite saber las relaciones voltaje-intensidad en cada momento de utilización de las máquinas y de hecho se convierte en la característica del arco.

Las características de la máquina del tipo Miller aparecen en la tabla 2.3

Tabla 2.3. 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	

#### **2.6.4 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)

#### **E 316 L 16**

Electrodo de alto rendimiento y extra bajo contenido de carbono para aceros inoxidable y resistentes a los ácidos.

AWS A 5. 4. E 316 L 16

DIN 8556 E HI Ti 19 9 2 23

UTP 68 TiMo

#### **2.6.4.1 Características de la soldadura**

Suelda en todas las posiciones excepto vertical descendente. Tiene un arco estable y sin salpicaduras. El arco se enciende y reenciende con facilidad. La escoria se quita sin dificultad. La superficie del cordón tiene un aspecto liso y limpio sin socavaciones. Se usa para unir y revestir aceros del tipo Cr – Ni – Mo

18/11/2.5, así como en aceros fundidos de tipo semejante. Se suelda también aceros chapeados de la misma composición química.

#### **2.6.4.2 Electrodo E 309 – 16**

Electrodos especiales de revestimiento rutilico para aceros al 22/12 CrNi resistente a la corrosión y al calor, no estabilizado (UTP 6824), de bajo carbón (UTP 6824 LC, estabilizado (UTP 6824 Cb). Las denominaciones aparecen en la tabla 2.3.

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

#### **2.6.4.3 Campo de aplicación**

Se emplea para unir aceros Cr – Ni de similar análisis, de más baja aleación, estabilizado y no estabilizado, así como resistentes a la corrosión y el calor. Un campo especial de aplicación es el revestimiento (cladding) de aceros no aleados o de más baja aleación cuando en la primera capa se pretende lograr una aleación 18/8 CrNi

#### **2.6.4.4 Electrodo E 310 – 16\***

Electrodo de Cr – Ni totalmente austenítico, para aceros resistente a la corrosión y a temperaturas altas (hasta 1200<sup>0</sup>C)

UTP 68 H

AWS A 5. 4. E 310 – 16\*

DIN 8556 E 25 20 R 26

Campo de aplicación.

Es apropiado para unir y revestir aceros 25/20 Cr – Ni 19/9, resistente a temperaturas de trabajo hasta 1200<sup>0</sup>C.

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 construcción de hornos, tuberías y accesorios en general.

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

## 2.7 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 2.2, se observa la imagen del microscopio empleado en la observación de las muestras.



Figura 2.2. Microscopio Óptico NOVEL modelo NIM – 100

## 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 10mm, y no mayores de 25 x 25 mm, y con probetas con altura de 20 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 mm<sup>2</sup> 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 las.

Con el pirómetro puede determinar valores de 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 2.2 resume el efecto de los dos elementos mayores (Cr y Ni) sobre las familias de aceros inoxidables. (Kotecki y Siewert, 1992)

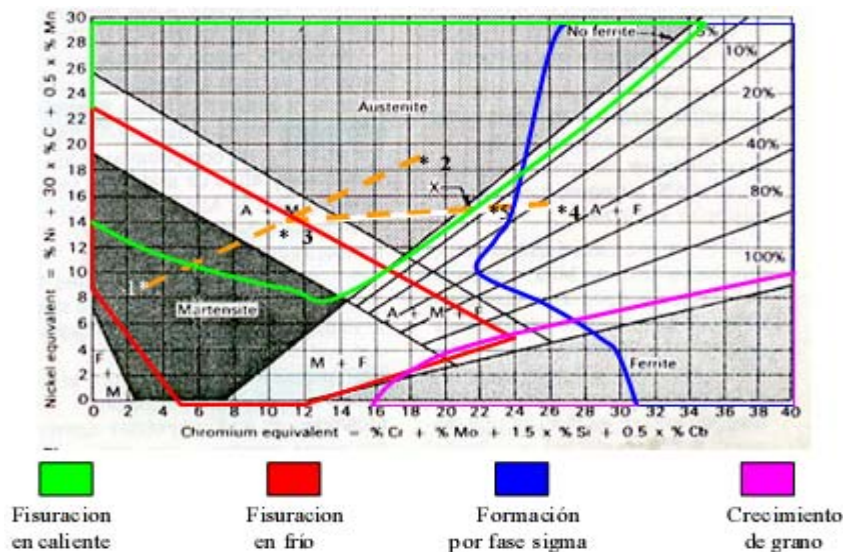


Figura 2.2. Diagrama de Schaeffler.

En los aceros inoxidable 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.

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

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

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

### **2.11.1 Determinación del Número de Ferrita (FN)**

Una limitación mayor en la constitución de los diagramas normalmente usados es el hecho que la influencia de unir los elementos en el volumen de la ferrita es independiente de la aleación en la composición y la presencia o ausencia de otros elementos unidos, reflejado por los coeficientes constantes en el cromo y níquel reflejados en las ecuaciones 2.1 y 2.2. Claramente, esta restricción no representa muy bien la conducta real por ejemplo, el efecto de carbono esta en dependencia de la formación de carburos o no en la aleación.

Los FNN - 1999 desarrollaron con los mismos datos la constitución del diagrama Welding Research Council, WRC - 1992, el mismo se realizó para reducir los errores en la predicción del FN. (Vitek et al., 2000)

$$\text{FN}_{\text{máx}} = -0,025813 (\text{Fe})^2 + 5,408679 (\text{Fe}) - 102,3902 \quad (2.3)$$

#### **Donde:**

Fe.- Peso neto en % de Fe en la aleación.

Kotecki, 1997 mostró que una simple relación 1:1 entre el volumen % (el vol -%) de la ferrita y la FN normalizado (= FN/FN) es razonable. Por consiguiente, este máximo se puede convertir el vol -% la ferrita a FN combinando la ecuación 2.6 para obtener la ecuación 2.4.

$$\text{FN} = (\text{vol}\% \text{ ferrita}) (- 0,025813 (\text{Fe})^2 + 5,408679 (\text{Fe} - 102,3902)/100 \quad (2.4)$$



## **2.12 Conclusiones del capítulo II**

- ✓ Los procedimientos descritos permiten establecer el comportamiento microestructural del acero AISI 316 empleado en la línea de tubería que transporta pulpa lixiviada.
- ✓ La selección de los electrodos E 316 L 16, E 309 – 16, E 310 – 16\*, está fundamentada en el análisis del depósito, con el objetivo de atenuar el agrietamiento en el cordón de la línea de tubería.
- ✓ Al efectuar procesos de soldadura en aceros inoxidables, estos quedan expuestos a corrosión intergranular en el cordón, al estar también sometido a las características de la pulpa, pueden sufrir corrosión bajo tensión.

# CAPITULO III

## **CAPITULO III. ANALISIS DE LOS RESULTADOS**

### **3.1. Introducción**

En éste capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo experimental, y a partir de los mismos, la descripción de las regularidades del comportamiento mecánico y microestructural del acero AISI 316 empleado en la línea de tubería que trasiega pulpa lixiviada en la Pedro Sotto Alba.

#### **El objetivo del capítulo es**

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

### **3.2. 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	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
0,05	0,61	0,84	0,023	0,002	16,55	2,13	10,15	0,0110	0,11
Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	B	Fe	
0,30	0,0066	0,07	0,04	0,002	0,001	0,019	0,0017	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	Pb	Sn	As	B	Fe	
0,14	0,0206	0,08	0,02	0,002	0,001	0,017	0,0010	67,35	

#### **3.2.1 Análisis de la composición química del depósito**

Para evaluar el comportamiento de los cordones de soldadura se realizó el análisis químico de cada uno de los cordones de las diferentes muestras desde la 1 hasta la 9, a fin de evaluar 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 1.

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	Pb	Sn	As	B	Fe	
0,25	0,0190	0,08	0,04	0,002	0,003	0,021	0,0010	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	Pb	Sn	As	B	Fe	
0,26	0,0153	0,08	0,04	0,002	0,005	0,023	0,0010	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	Pb	Sn	As	B	Fe	
0,13	0,0165	0,06	0,02	0,002	0,001	0,021	0,0010	66,83	

**Muestras soldadas con electrodos E 309 – 16**

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

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
0,11	0,63	0,85	0,024	0,007	22,13	0,38	12,63	0,0244	0,16
Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	B	Fe	
0,2	0,0120	0,06	0,03	0,002	0,001	0,020	0,0010	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	Pb	Sn	As	B	Fe	
0,18	0,0113	0,06	0,03	0,002	0,001	0,019	0,0010	62,72	

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

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
0,05	0,60	0,87	0,025	0,003	22,34	0,39	12,55	0,0130	0,16
Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	B	Fe	
0,21	0,0110	0,06	0,03	0,002	0,001	0,021	0,0010	62,68	



**Muestras soldadas con electrodos E 310 – 16**

Tabla 3.9. Composición química del cordón de soldadura de la probeta 7.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
0,09	0,41	1,26	0,020	0,002	24,84	0,35	18,97	0,0075	0,08
Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	B	Fe	
0,18	0,0234	0,06	0,03	0,002	0,003	0,023	0,0010	53,65	

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

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
0,11	0,38	1,22	0,020	0,002	24,89	0,32	19,17	0,0086	0,08
Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	B	Fe	
0,15	0,0216	0,06	0,02	0,002	0,003	0,023	0,0010	53,51	

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

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
0,10	0,42	1,29	0,019	0,002	25,18	0,27	19,57	0,0097	0,07
Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	B	Fe	
0,15	0,0238	0,06	0,02	0,002	0,004	0,025	0,0010	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 porcentaje en los depósitos de los electrodos E 309 – 16 y E 310 – 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 – 16 y E 310 – 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 tenida 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 2.5 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.

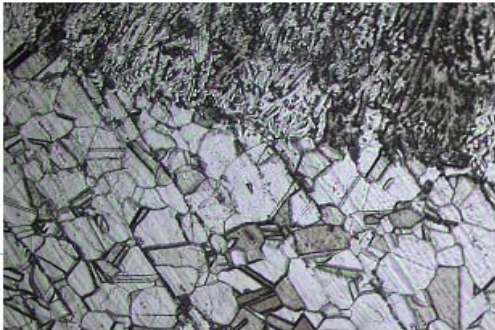


Figura 3.1. ZF y ZIT muestra 1



Figura 3.2. Cordón de soldadura muestra 1

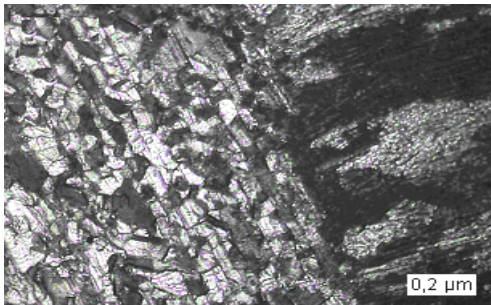


Figura 3.3. ZF y ZIT muestra 2

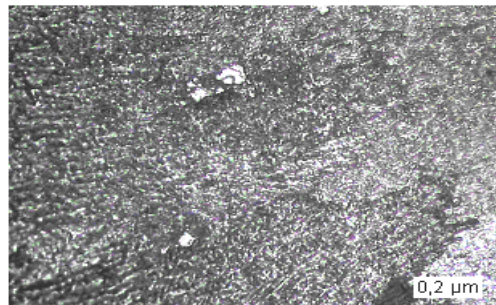


Figura 3.4. Cordón de soldadura muestra 2

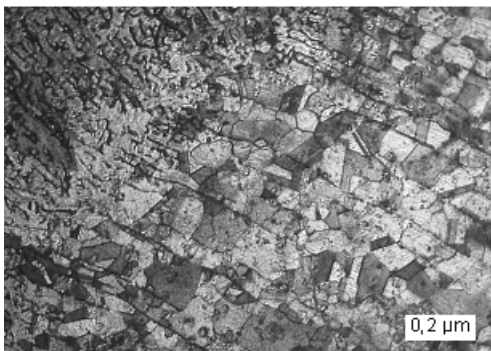


Figura 3.5. ZF y ZIT de la muestra 3

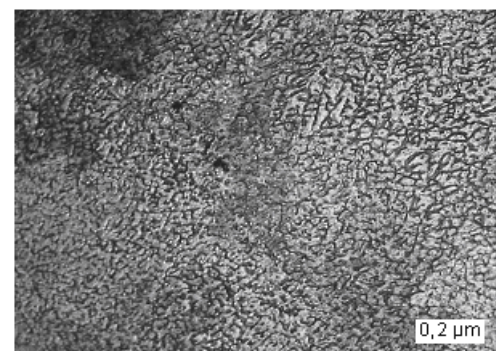


Figura 3.6 Cordón de soldadura muestra 3

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 primer estructura estructura puede estar definida por el calentamiento de  $180^{\circ}$  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 – 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.

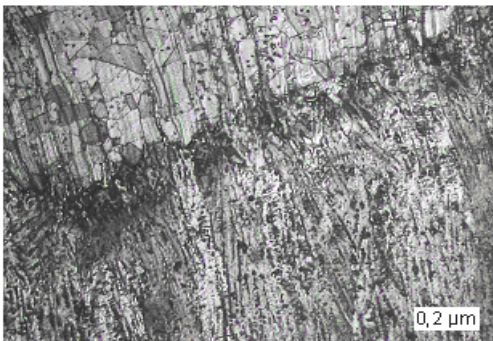


Figura 3.7. ZF y ZIT de la muestra 4

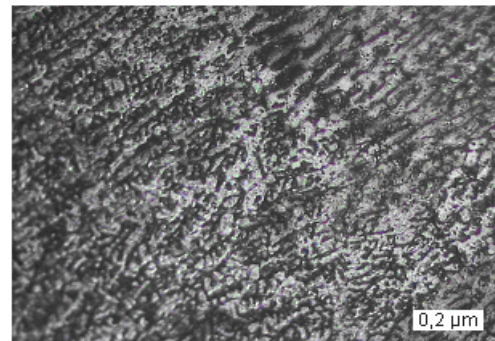


Figura 3.8. Cordón de soldadura muestra 4

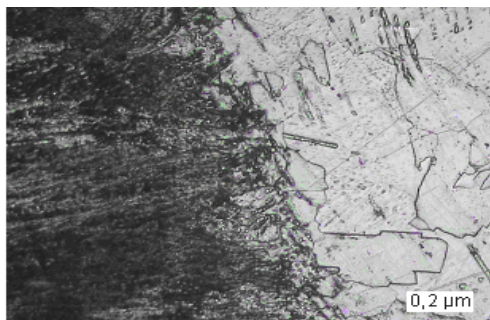


Figura 3.9. ZF y ZIT muestra 5

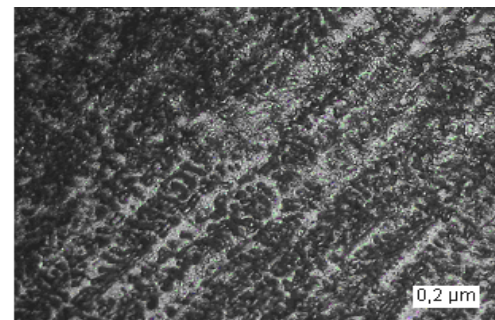


Figura 3.10. Cordón de soldadura muestra 5

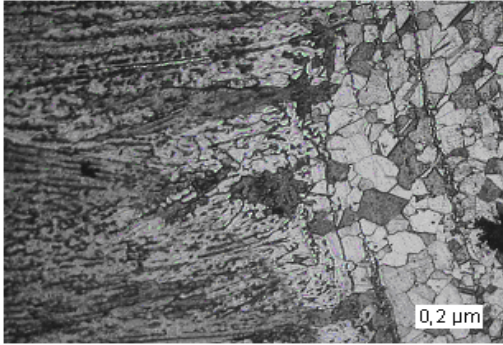


Figura 3.11. ZF y ZIT muestra 6

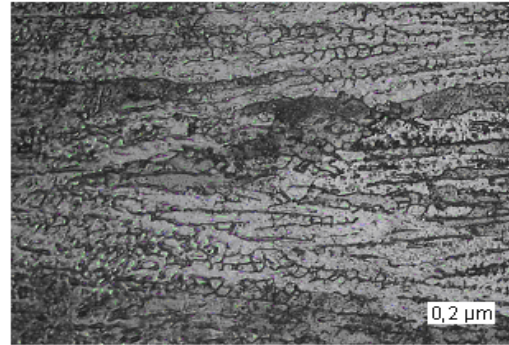


Figura 3.12. Cordón de soldadura muestra 6

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 inoxidables 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 – 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.

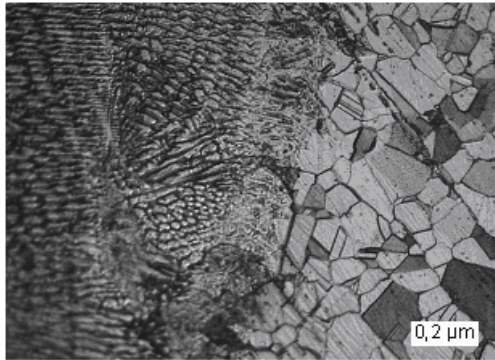


Figura 3.13. ZF y ZIT muestra 7

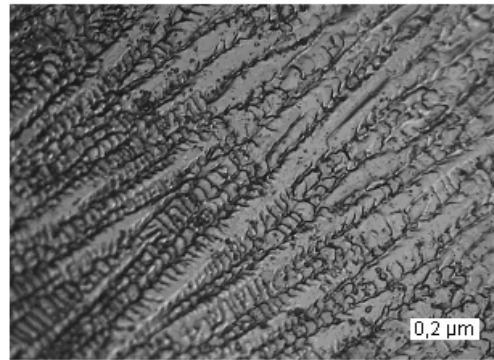


Figura 3.14. Cordón de soldadura muestra 7



Figura 3.15. ZF y ZIT muestra 8

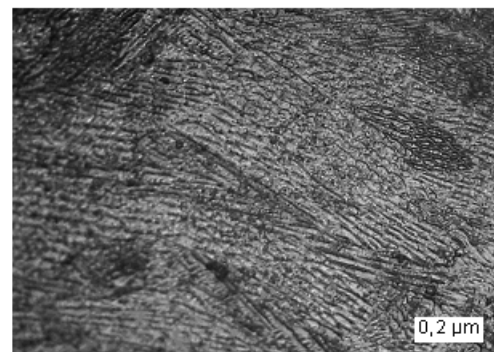


Figura 3.16. Cordón de soldadura muestra 8

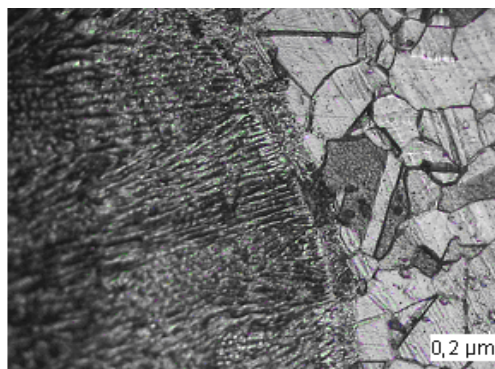
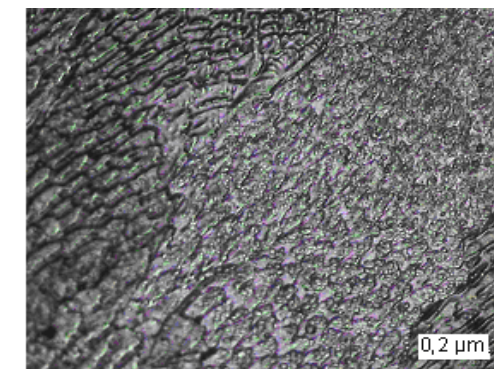


Figura 3.17. ZF y ZIT muestra 9



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 debe a la distintas velocidades de solidificación, en la cual no alcanza a solubilizar en una estructura totalmente austenítica, originándose distintas estructura 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.

### 3.3.3 Análisis de la unión soldada de la línea de tubería

Las microestructuras de las figuras 3.19 y 3.20 se corresponden con la muestra obtenida de la línea de tubería actual. (ver figura II del anexo 1)

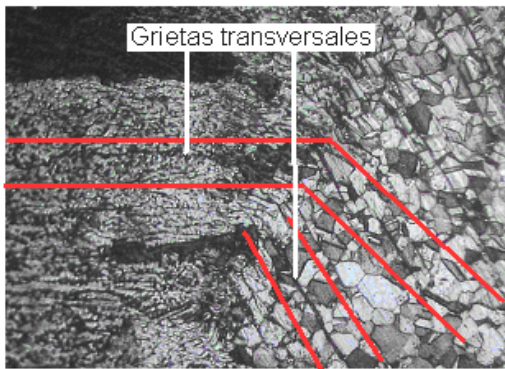


Figura 3.19 ZF y ZIT de la línea de tubería

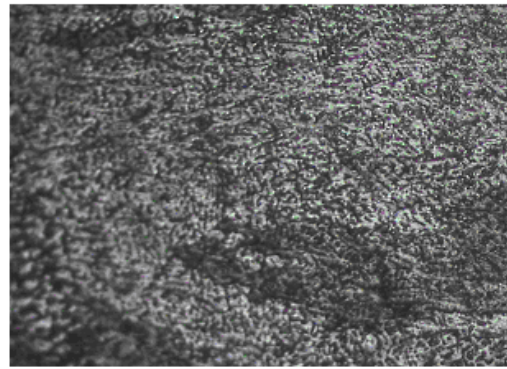


Figura 3.20. Cordón de la línea de tubería

Se observa que existe correspondencia con las estructuras obtenidas en las muestras 1, 2 y 3.

La figura 3.19 presenta grietas transversales que van desde la zona fundida hasta el metal base, este agrietamiento es un problema típico de la soldadura de los aceros inoxidables austeníticos. Es debido a la acumulación de impurezas en el cordón de soldadura, impurezas que segregan en la última zona que solidifica y que se ven sometidas a grandes esfuerzos por la elevada contracción.



Otro problema que debe tenerse presente con los aceros austeníticos es su baja resistencia a la corrosión bajo tensión, en ambientes con iones cloruro, aún en la presencia de trazas de iones cloruros. Las tensiones residuales existentes en el material promueven la corrosión bajo tensión. Este efecto es localizado y opera en ausencia de corrosión generalizada, la fractura ocurre en forma transgranular con escasa o nula deformación plástica y a menudo con efectos catastróficos. Este tipo de fractura ocurre en los aceros que contienen Ni, y con el mayor riesgo en aceros con los porcentajes usuales de Ni. Los remedios no son simples, porque consisten en reducir tensiones y eliminar iones cloruro.

### 3.3.4 Análisis de la unión soldada de la muestra 3 y la línea de tubería

Se comparó la microestructura del cordón de soldadura de la muestra 3 (figura 3.6) y la microestructura del cordón de soldadura de la línea de tubería (figura 3.20)

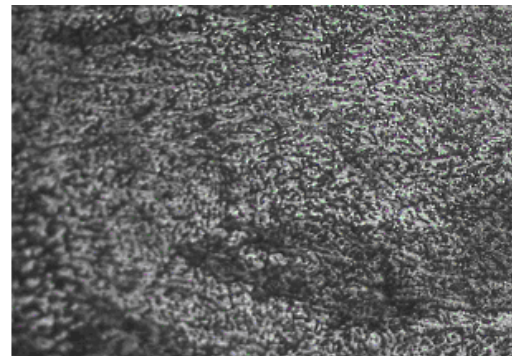
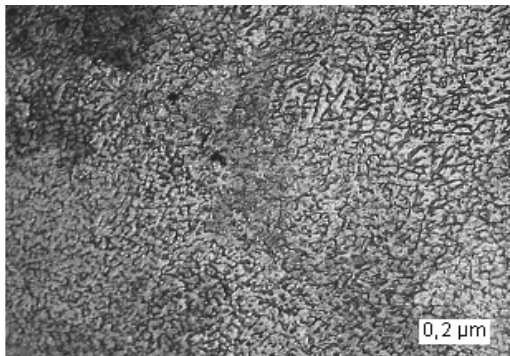


Figura 3.6 Cordón de soldadura muestra 3

Figura 3.20. Cordón de la línea de tubería

Ambas microestructura presentan estructura similar, es decir que la deposición de los cordones fue realizada con electrodos E 316 L 16.

### 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 nuevas 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 nuevas probetas

Muestra	Electrodo	[Cr]	[Ni]	FN
Línea	E 316 L 16	20,5	11,10	4,85
1	E 316 L 16	21,12	11,65	5,1
2	E 316 L 16	21,3	11,6	5,9
3	E 316 L 16	20,9	12,6	5,58
4	E 309 – 16	23,7	12,6	2,6
5	E 309 – 16	23,7	12,65	4,31
6	E 309 – 16	23,8	12,53	4,7
7	E 310 – 16	26	19,1	0,28
8	E 310 – 16	25,9	19,27	- 0,52
9	E 310 – 16	26,3	19,7	- 0,37

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

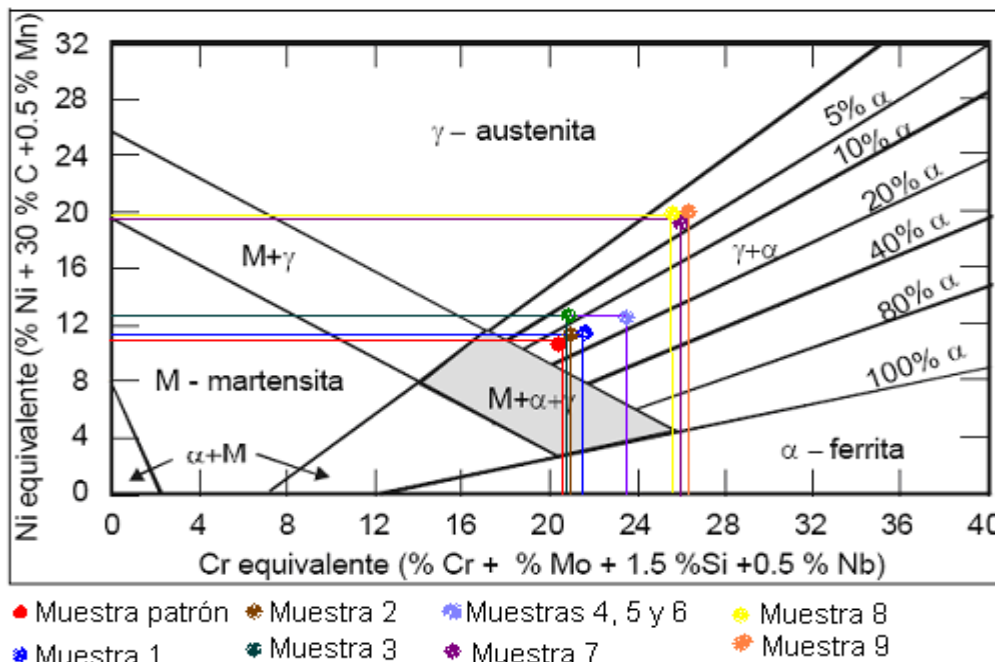


Figura 3.21. Ubicación en el diagrama de las nuevas muestras.

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<sup>0</sup>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. Valoración económica

Al evaluar los costos en los cuales se incurrió, se tuvo en cuenta mano de obra, precio de electrodo, consumo 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	Energ 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			

### **3.7 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, etc. En este caso será necesario dirigirse al médico.

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

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

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

#### **3.7.1 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  $130 \text{ mg/m}^3$  de aire. En los talleres de soldadura el contenido de polvo en el aire no debe ser mayor de  $5 \text{ mg/m}^3$  de aire. El contenido del óxido de nitrógeno en el aire no debe ser mayor de  $3 \text{ mg/m}^3$ . Durante la soldadura, además de los óxidos de nitrógeno, se forma el óxido de carbono, el cual no debe ser mayor de  $10 - 20 \text{ mg/m}^3$  de aire. Para eliminar el polvo y los gases nocivos (óxidos de cobre, de manganeso, fluoruros), sobre los puestos permanentes de la



soldadura se hacen unos aspiradores locales con la instalación de campanas de ventilación.

La cantidad de aire aspirada de cada puesto de soldar, debe ser de 4 000 a 6 000 m<sup>3</sup> 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.

### **3.6 Conclusiones del capítulo III**

- ✓ Las micrografías analizadas son representativas de todos los ensayos realizados se encuentran caracterizadas en las zonas donde se obtuvieron las probetas para obtener las micrografías a analizar.
- ✓ Bajo las condiciones de soldadura aplicadas, las muestras 1, 2 y 3 presentan diferencia con respecto a las muestras 4, 5, 6, 7, 8 y 9, sin embargo la muestra de la línea muestra similitud con la muestra 1.
- ✓ Las muestras soldadas y analizadas por el diagrama de Schaeffler se encuentran ubicadas en el campo 4, que según el propio diagrama son propenso al agrietamiento en caliente.



### **Conclusiones generales**

- ✓ En las fuentes consultadas no se encontraron datos o reportes relacionados con el agrietamiento en la Zona Fundida (ZF) y la Zona de Influencia Térmica del cordón de soldadura de la línea de pulpa lixiviada en la planta de lixiviación.
- ✓ Los parámetros establecidos permiten determinar el comportamiento microestructural del acero AISI 316 cuando es sometido al proceso de soldadura por arco eléctrico manual (SMAW).
- ✓ Los resultados experimentales muestran que la soldadura del acero AISI 316 empleado en la línea de tubería de pulpa lixiviada con electrodos del tipo E 309 – 16, E 310 – 16, no son recomendables ya que se obtiene una microestructura sensible al agrietamiento.
- ✓ 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**

- ✓ Proponer a la Empresa "Comandante Pedro Sotto Alba", el empleo de bridas o platillos en la línea de tubería y evitar la unión a tope en los tramos.
- ✓ Analizar en futuros trabajos la posibilidad de la sujeción de la línea de tubería en el payrrat, ya que actualmente se encuentra suelta.
- ✓ Realizar proceso de austenización en los cordones de soldadura como un medio de evitar el agrietamiento al cual están sujeto actualmente los cordones de soldadura.



## **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. 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.
4. 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.
5. Bermúdez, M. D. y otros, "Erosión – corrosión de tantalio y aceros inoxidable", Memorias del IX Congreso de Ciencia y Tecnología de Materiales, Madrid, España, 2003.
6. Bonifaz E.A. Finite Element Analysis of heat flow in single-pass arc welds. Welding Journal. May 2000.
7. Borenstein, S. W. Microbially influenced corrosion handbook. Woodhead, Cambridge. 1994.
8. Burgan, B. A. "Concise Guide to the Structural Design of Stainless Steel". The Steel Construction Institute, Ascot, UK, 2 edition, 1993.
9. 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.
10. Burgos, S. J. Tecnología de la soldadura – 1 ed -. Editorial Pueblo y Educación. La Habana. 1987. 285 p.
11. Bleich, F. Buckling Strength of Metal Structures. McGraw-Hill Book Company, New York. 1952.





12. British Standards Institution. The Structural Use of Steelwork in Building BS5950 Part 1: Code of practice for Design in Simple and Continuous Construction London. 1990.
13. Conde G. Y Santiago. Aceros inoxidables, refractarios y criogénicos. Editorial Blume, España, 1971.
14. Cladera, A. Estudio teórico y propuesta experimental de vigas armadas de acero inoxidable sometidas a cortante. Tesina de especialidad. ETSECCPB-UPC, 1999.
15. Davies, A.W. y Griffith, D.S.C. Shear strength of steel plate girders. Proc. Instn. Civ. Engrs. Structs & Bldgs, 134. 1999. p. 147-157.
16. 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.
17. Easterling K., 1992: Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworth - Heinemann, pp. 18 - 19.
18. Di Caprio, G. "Los Aceros Inoxidables". GRUPINOX, 1987.
19. DI Caprio, G. La resistencia a la corrosión. En: Los aceros inoxidables. Grupinox: Barcelona. 1999.
20. Doyle, Lawrence E. y otros. Procesos y Materiales de Manufactura para ingenieros, Tercera edición, 1042 pág, Prentice Hall, México, 1988.
21. Estrada, I. Campaña experimental para el análisis del fenómeno de abolladura por cortante en vigas armadas de acero inoxidable. Tesina de especialidad. ETSECCPB-UPC, 2000. 2000.
22. 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.



23. 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.
24. 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.
25. Gooch, T. G., "Stress corrosion craking of welded joints in high strength steels", Welding Journal, 1974, No. 7, pp. 47-51.
26. Goldak J., Moashi G. Numerical Aspect of modelling weld. Moashigu, Carleton University. ASM Handbook, Vol 6 Welding, Brazing and Soldering.1999.
27. Guliar, A.P Metalografía, Tomo 1 y 2, Edit MIR Moscú. 1978.
28. Guliaev, A. P., "Metalografia", Tomo I, Edit MIR Moscu, 1977, pp. 163-176.
29. Guliaev, A. P.: Metalografía. Tomos II, Moscú: Editorial Mir, 1983.
30. 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.
31. Hochmann. J. Aceros inoxidable / Aceros refractarios. Ediciones URMO, España, 1968
32. INDURA S.A. Sistemas y Materiales de Soldadura, 132 páginas, Chile, 1998.
33. 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](http://fondosdigitales.us.es/public_thesis/393/9178.pdf).
34. Jeffus, Larry. Welding principles and applications. Third edition. Delmar Publishers Inc. 1993.
35. Kedzierzawski, P., "Hydrogen Trapping in Iron and Iron Alloys", Hydrogen Degradation of Ferrous Alloys, 1<sup>st</sup>. Ed., Noyes Publications, 271-288, New Jersey, USA. 1985



36. Kotecki, D. J and Siewert, T. A. WRC-1992 constitution diagram for stainless steel weld metals: a modification of the WRC-1988 diagram. *Welding Journal* 71: 171-s to 178-s. 1992.
37. Laufgang, S. G. Aceros inoxidable. Tratamiento térmico de soldadura – prueba hidráulica de gasoductos. 2003
38. Mars G. Fontana/Norbert D. Greene Corrosion Engineering. McGraw-Hill Book Company, 1978
39. 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.
40. Meo M., Vignjevic R. Welding Simulation Using FEA. Vignjevic College Of Aeronautics, Cranfield University, Bedford, UK, MK 43 0AL 1999.
41. 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.
42. 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
43. Meyer, H. J. Grietas Laminares en Construcciones Soldadas. II Conf. On Significance of Defects in Welds, Welding Inst. London. 1968.
44. 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
45. Nace – INTERNATIONAL / THE CORROSION SOCIETY. The Journal of Science and Engineering Corrosion. Vol. 56 N° 6, June, 2000



46. Nangel, D. Tensión y propiedades de deformación de aceros estructurales en la dirección del espesor. *Metal Const.* Nro 2, Vol. 64. 1969.
47. Nicholls D.M. Grietas laminares en Aceros Laminados en Caliente. *Brit. Welding Journal.* Nro 3, Vol. 15. 1968
48. Olsson, A. "Plastic Behaviour of Stainless Steel. A phenomenological study" Licentiate Thesis. Lulea University of Technology. 1998.
49. Parlane A. Origin and nature of residual stress in Welded Joints. *Welding Institute.*1980.
50. Park, Y. D.; I. S., Maroef; A., Landau y D. L., Olson, "Retained Austenite as a Hydrogen Trap in Steel Welds", *Welding Journal*, February, 27s-35s. 2002.
51. 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.
52. 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.
53. 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.
54. Real, E.; Mirambell, E.; Arnedo, A. "Aplicaciones Estructurales del Acero Inoxidable. Situación de la Normativa.". Seminario: El acero inoxidable en la construcción. CEDINOX. Madrid, Septiembre 1997.
55. Rodríguez P, H. *Metalurgia de la soldadura de la Soldadura – 1 ed -.Pueblo y Educación.* La Habana. 1983. 613 p.
56. SABS. Structural use of stainless steel – Part 4 The design of cold formed stainless steel structural members. SABS 0162-4:1997.
57. Sturla, A. E. & E. Castellano 1951. *Metalografía microscópica: guía práctica de metalografía microscópica y macrografía.* Buenos Aires: Alsina. 278pp.



58. Talja, A. and P. Salmi. "Design of Stainless Steel RHS Beams, Columns and Beamcolumns". Research Notes 1619, Technical Research Centre of Finland, VTT, Espoo. 1995.
59. Vitek, J. M., Iskander, Y. S., and Oblow E. M. 2000. Improved ferrite number prediction in stainless steel arc welds using artificial neural networks — Part 2: neural network results. *Welding Journal* 79(2): 41-s to 50-s.
60. Wilson, W.G. Minimacion de las grietas laminares mediante la elevación de la ductilidad en la direccion Z. *Welding Journal*. Nro 11. 1974.
61. Wormigton, H. Grietas laminares en Planchas de Acero calmados con Silicio. *Weld and Metal Const.* Nro 9, Vol. 35. 1967

## ANEXOS I



Figura 1. Medición de la temperatura de calentamiento con el empleo del pirómetro.



Figura 2. Área de la zona de soldadura afectada.

