MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO

“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”

FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECÁNICA

En Opción al Título de Ingeniero Mecánico

Título: Rotura en tubos soldados de acero al carbono en la línea de tubería para el transporte de ácido sulfúrico.

AUTOR: Nordis Olivares Silot.

TUTOR: M Sc. Geovany Ruiz Martínez

Moa-2013

“Año 55 de la Revolución”

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Nordis Olivares Silot

Autor de esta Tesis, certifico su propiedad intelectual a favor del I.S.M.M. de Moa, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Firma del Autor

Nordis Olivares Silot

Firma del tutor

M Sc. Ing. Geovany Ruiz Martínez

AGRADECIMIENTO

Agradezco a los profesores del ISMMM y En especial a mi tutor Ms. C. Geovanny Ruiz Martínez. Por la dedicación que tuvieron en el proceso de nuestra formación.

A mis Compañeros de trabajo, por la ayuda ofrecida durante la elaboración de este trabajo.

Agradezco a mi familia que en todo momento me apoyo para alcanzar esta meta.

Agradezco a mis hijos y mi esposa que estuvieron presentes en esta etapa de desarrollo de mi tesis y desde el inicio de mis estudios en la especialidad.

Y finalmente no por última menos importantes, agradezco a la Revolución la oportunidad que me ha brindado para la superación profesional y especialmente a Nuestro Comandante en jefe.

DEDICATORIA

El resultado de este trabajo quiero dedicarlo a todo aquel que de una forma u otra hayan contribuido a la realización del mismo, siendo este mi sueño durante la trayectoria de mi carrera. Con mucho amor, trabajo y perseverancia hoy veo el fruto de mis esfuerzos, expresados en este trabajo, el cual va dedicado a todos aquellos que lo merecen en especial. A la persona que más amo en el mundo, mis Padres, mis hijos, mi esposa, mis hermanos, mis cuñados, mis suegros y mis amigos.

Agradezco infinitamente a mi tutor y profesores que siempre me supieron orientar y me guiaron el camino a seguir.

PENSAMIENTOS

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

Ernesto Guevara de la Serna

"Che"

"El desarrollo de la ciencia es un drama, un drama de ideas. Ella debe cautivar e interesar a todo aquel quien ama la ciencia"

Albert Einstein

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el estudio sobre las causas que originan el agrietamiento en la línea de tubería para el transporte de ácido sulfúrico de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba”, para ello se prepararon cinco probetas, cuatro de ellas del material del tubo, las mismas fueron cortadas de forma longitudinal; las cuales correspondían a las distintas zonas del tubo y una como muestra patrón, se le realizó análisis químico y microestructural, además el cálculo de resistencia mecánica del proceso de sobrecalentamiento por el método de (Craig, 2002), y estos resultados se corroboraron a través de la simulación empleando el MEF, con ayuda de software profesional ANSY (versión 11.0), para evaluar el comportamiento de la línea frente a el agrietamiento . Se evaluó la soldabilidad de las muestras considerando la microestructura de las zonas soldadas. Se tuvo en cuenta la incidencia del procesos sobre el hombre y el medio ambiente. Por último se analizó la valoración económica.

Summary.

Presently work was carried out the study on the causes that originate cracking in pipe line for the sulfuric acid flow, of the "Commanding Company Pedro Soto Alba", for that got ready it five test tubes, four of them of the material of the tube, the same ones were cut in a longitudinal way; which corresponded to the different areas of the tube and one like sample pattern, were carried out chemical analysis and microestructural, also the calculation of mechanical resistance of the heater process for the method of (Craig 2002), and these results were corroborated through the simulation using MEF, with the help of professional software ANSY (version 11.0), to evaluate the behavior of the line in front of the cracking. The weldness of the samples was evaluated considering the microstructure of the welded areas. One kept in mind the incidence of the processes on the man and the environment. Lastly the economic cost was made.

ÍNDICE

CONTENIDO Páginas

Introducción 1

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO DE INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción 5

1.2 Descripción del flujo tecnológico de la planta de ácido sulfúrico 5

1.3 Generalidades de los aceros al carbono para la soldadura 8

1.4 Influencia de los elementos de aleación en el proceso de soldadura 9

1.5 Agrietamiento en uniones soldadas 11

1.5.1 Grietas en caliente de las uniones soldadas 12

1.6 Tensiones residuales y distorsión 14

1.7 Transformaciones físico-químicas y estructurales que ocurren en la zona de la unión soldada 17

1.7.1 Modificaciones estructurales de la zona fundida 17

1.7.2 Modificaciones estructurales y físico – química en el metal base 18

1.8 Soldadura manual por arco eléctrico (SMAW) 23

1.9- Simulación del proceso de soldadura por el Método de Elementos Finitos (MEF) 24

1.10- Conclusiones del capítulo I. 25

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción 26

2.2 Preparación metalográfica de la probeta 26

2.2.1. Desbaste y pulido 27

2.2.2. Limpieza y lavado de las superficies a investigar 28

2.2.3 Ataque químico 28

2.3 Análisis microestructural por el método de examen microscópico 28

2.4- Parámetros para el cálculo 29

2.5- Propiedades del acero ASTM A-106 29

2.6- Cálculo de la resistencia mecánica en tuberías de Aceros ASTM A - 106 30

2.6.1- Tensiones provocadas por las temperaturas 31

2.7- Simulación por el Método de Elementos Finitos del proceso de soldadura 35

2.7.1- Algoritmo para la simulación (ANSYS versión 11.0) 35

2.8- Conclusiones parciales de capítulo II 36

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1- Introducción 37

3.2-Resultados del análisis químico 37

3.3- Resultados del análisis metalográfico 37

3.4-Resultados obtenidos en el cálculo de la resistencia mecánica en tuberías de acero ASTM A-106 39

3.5. Resultados de la simulación con ANSYS (11.0) 40

3.6. Valoración económica 43

3.7- Impacto Medio Ambiental 44

3.7.1- Daños que causa al organismo humano 45

3.7.2- Tratamiento y antídoto 46

3.8- Conclusiones del capítulo III 46

CONCLUSIONES GENERALES 47

RECOMENDACIONES 48

BIBLIOGRAFÍA 49

INTRODUCCIÓN

La industria cubana del níquel juega un papel importante dentro de la economía nacional, es por ello que el incremento de la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que la componen incide considerablemente en la reducción del consumo de portadores energéticos. Actualmente se encuentra enfrascada en dos grandes procesos: el de modernización de sus plantas, con el objetivo de disminuir los costos en la producción de cada tonelada de níquel, y el perfeccionamiento empresarial para hacerla más competitiva en el mercado internacional.

El área de construcción de la empresa se encuentra al norte del yacimiento de mineral de Las Veguitas. Situada en la carretera del puerto s/n a 3 Km de la ciudad de Moa, provincia Holguín. El puerto marítimo por donde se realiza la exportación del mineral laterítico ya procesado se encuentra a unos 3 Km al norte de la compañía. En esta zona adjuntada también a la de Nicaro se ubica una de las mayores reservas minerales de níquel del mundo, aspecto que ha funcionado como inductor de un gran desarrollo socioeconómico local y regional.

Este complejo minero metalúrgico tiene como fundamental objetivo la elaboración de sulfuros de níquel y cobalto, productos semielaborados que se obtienen al someter el mineral laterítico a diversos procesos físicos y químicos.

La Empresa comandante “Pedro Sotto Alba” consta con seis plantas de procesos tecnológicos, los cuales son imprescindibles para la producción de sulfuro de Ni+CO.

El flujo tecnológico comienza con la extracción del mineral en minas a cielo abierto. La primera planta es la de beneficio, la cual consiste en separar las serpentinas como mineral de rechazo de la limonita como producto de la planta este mineral se traslada hacia la planta de Preparación de Pulpa por medio de la combinación de transportadores de esteras y bandas.

Esta tiene la función de clasificar el mineral a través de cribas vibratorias y Lavadoras en dos trenes tecnológicos independientes a una granulometría de

aproximadamente 0.083 mm con un sólido de 23 – 25 %, esta pulpa se transporta por gravedad a través de una línea de 48" hacia la planta de espesadotes donde se logra un sólido de 45 - 48 %. Esta pulpa es extraída de los tanques sedimentadores por medio de bombas centrífugas y enviadas a la planta de lixiviación donde se recibe el mineral en los precalentadores, el cual es precalentado con vapor pasando por los tanques de almacenaje, reactores de cada tren, enfriadores, separadores hasta llegar a la caja distribuidora y a la vez a la línea de níquel para ser enviado a la planta de lavaderos, aquí se recibe la pulpa lixiviada en el embudo del tanque 1, que es donde ocurre el lavado con el licor a contracorriente proveniente del tanque 2, para obtener la mayor cantidad de Ni en el licor y ser bombeada hacia la planta de neutralización, en la cual se reduce el hierro y el cromo precipitando el cobalto con H_2S y ser enviado nuevamente a lixiviación donde es precalentado con vapor desde cero y bombeado hacia la planta de Sulfuros. En esta se recibe el licor en precalentador pasando por gravedad a los calentadores de cada tren tecnológico donde es extraído por medio de bombas y alimentado el compartimiento C de las autoclaves en el cual se inyecta vapor y se alimenta H2S a contracorriente, ocurriendo la precipitación de Sulfuro de Ni+CO. Como producto final con un sólido 28%, donde es enviado a los espesadotes para alcanzar hasta el 60%.

En la revisión bibliográfica realizada, se aprecia una gran variedad de enfoques con relación a la descripción de tecnologías empleadas para la soldadura de acoro al carbono 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.

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.

Problema a investigar:

No se conocen las causas que originan el agrietamiento en la cercanía de la costura de soldadura en tubos soldados de acero al carbono en la línea de tubería para el transporte de ácido sulfúrico desde la empresa “Puerto Moa” hasta la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”.

***Como** Objeto de la investigación **se establece**:* tubos soldados de acero al carbono en la línea de tubería para el transporte de ácido sulfúrico.

Campo de Investigación:

Proceso de soldadura y mecánica de materiales

*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 y se realiza el análisis del proceso de soldeo con el empleo del método de elementos finitos, del acero empleado en los tubos soldados de acero al carbono en la línea de tubería para el transporte de ácido sulfúrico, se podrá determinar cuáles 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 tubos soldados de acero al carbono en la línea de tubería para el transporte de ácido sulfúrico en la empresa "Comandante 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), en tubos soldados de acero al carbono en la línea de tubería para el transporte de ácido sulfúrico en la empresa "Comandante Pedro Sotto Alba".

2. Obtener el comportamiento térmico durante el proceso de soldeo y el ciclo de fatiga con el empleo de técnicas computacionales.

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 en tubos soldados de acero al carbono en la línea de tubería para el transporte de ácido sulfúrico

3. Análisis de los resultados y fundamentación del mecanismo de obtención microestructural de la ZF y la ZIT y la simulación con el empleo de ANSYS.

4. Planteamiento de las ventajas económicas de la aplicación de la metodología propuesta.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO DE INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

El estudio de fallas de elementos que operan a temperaturas elevadas y fenómenos corrosivos constituye uno de los principales focos para las industrias del níquel en esencial a la planta de acido sulfúrico de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba”, por las incalculables pérdidas económicas y efectos sociales que implican para la humanidad.

El tipo de falla se establece mediante el análisis de las superficies de fractura y la comparación de los datos iniciales disponibles con las condiciones de operación del componente respecto a las cargas actuantes.

En la revisión bibliográfica realizada, se aprecia una gran variedad de enfoques con relación a la descripción de tecnologías empleadas para la soldadura de acero al carbono 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.

Además es necesario el conocimiento completo del sistema o problema particular y los factores que influyen en su operación como, presencia de altas tensiones y concentración de iones contaminantes entre otros. No existe un método específico para todas las posibles situaciones.

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 relacionada con el agrietamiento en la línea de tubería para el transporte de ácido sulfúrico y sustentar los resultados alcanzados en la investigación.

1.2 Descripción del flujo tecnológico de la planta de acido sulfúrico

Teniendo en cuenta que la materia prima a utilizar en esta planta es el azufre, con un proceso similar al nuestro, entonces tenemos que el azufre en forma líquida se hace llegar desde la piscina al horno a través de bomba centrifugas verticales, al llegar al

horno, este azufre entra a través de un quemador a una cámara en la cual existe determinada temperatura.

Este azufre es quemado en el homo, desde el cual saldrá una mezcla de gases, donde lo más importante es el dióxido de azufre SO_2, así como también oxígeno y nitrógeno.

Esta formación de SO_2 en el homo se le puede considerar el corazón de una planta de ácido sulfúrico y es una reacción exotérmica, por lo que el gas normalmente sale con temperatura de, por encima de lo 900 ^{0}C

El aire que se utiliza para la combustión del azufre y la obtención del SO_2 en el horno debe ser totalmente seco para evitar la formación de vapores que traerían consecuencia negativas en otra parte del proceso. Por esta causa este aire en la descarga del soplador circula a través de una torre de secado que cumple esta función

La torre de secado es un recipiente cilíndrico con silleta de cerámica en su interior y unos distribuidores de ácido en la parte superior, el flujo de aire entra por la parte inferior y el ácido por la parte superior, este ácido es capaz de absorber el agua que trae el aire, saliendo este seco al homo.

Este gas al salir del homo pasa por la caldera 1, que actúa como un intercambiador de calor y reduce la temperatura del gas hasta los niveles permisible a la entrada de la etapa 1 de conversión en el convertidor, en este intercambiador de calor se produce vapor de alta presión y alta temperatura 600 Psi y 750 f - 399 ^{0}C, que es utilizado en otras partes del proceso metalúrgico de la empresa.

La temperatura a la salida de la caldera o entrada al convertidor es controlada además por un by pass que tiene esta caldera y desde donde puede desviarse los gases para que circulen a través de la caldera o por el by pass, como es lógico si se necesita una mayor temperatura en lo gases de entrada al convertidor se pasan menos gases a través de la caldera y la producción de vapor de la mismo disminuye.

Nota: nunca permita que la temperatura de los gases de la salida de la caldera sobrepase los 420 ^{0}C .

Los gases luego de salir de la caldera pasan al filtro de gas caliente que tiene la función de remover cualquier ceniza, polvo o impureza solida en el flujo de gas ante de entrar al convertidor para su conversión de CO_2 a CO_3 por la primera cama, etapa o masa, esta queda situada en la parte superior del convertidor.

La reacción de conversión es exotérmica y por lo tanto deprende calor, así que los gases al salir de la primera masa han elevado su temperatura, por lo que es necesario a su vez pasarlo a través de un segundo intercambiador de calor o caldera numero 2, donde al igual en la caldera 1 se produce vapor de alta presión y alta temperatura

La caldera 2 también posee un by pass para regular la temperatura de la masa 2.

Para disminuir este aumento de temperatura en los gases de salida de la segunda masa y entrada a la tercera y de salida de esta de entada de los gases pasan a través de supercalentadores de vapor que están instalado dentro del propio calentador. Para regular la temperatura en cada uno de ellos se operan con la cantidad de vapor al pasar por los tubo, limitándola si fuera necesario.

Ya los gases al salir de la cuarta masa pasan a través de un economizador donde es transferida parte de la temperatura de los gases de salida del agua que va a las calderas para la generación de vapor. De pasar por el economizador de gases van a la torre de absorción, que al igual que la de secado es un recipiente cilíndrico con silleta de cerámica en su interior y distribuidores de ácido en la parte superior, el gas con alta contenido deSO_3 entra a la torre por la parte inferior y el ácido tiene la función de absorber este SO_3, el gas a la salida de esta torre va a la chimenea donde es expulsado a la atmósfera.

Tanto en la torre de absorción como en la de secado a la salida del gas están instalados los eliminadores de niebla, que tienen la función de no dejar el gas arrastre nieblas ácidas que se formen en estas torres y evitan que pasen al homo o a la atmósfera donde trae consecuencia indeseada.

El ácido que absorbe la humedad del aire en la torre de secado y el SO_3 en la torre de absorción van hacia un tanque denominado tanque de bombeo por gravedad, el acido que proviene de la torre de secado es un acido con menos concentración ya que ha

recibido el agua proveniente del aire y el ácido de la torre de absorción tiene una mayor concentración porque recibe el SO_3 del gas proveniente del convertidor.

Tanque de bombeo además están instaladas 3 bomba que tienen la función de bombear el acido a la torre de secado y absorción, pasando este por un intercambiador de calor de tubo y coraza llamado “enfriador de acido de recirculación”, este enfriador es necesario ya que el ácido que sale del tanque tiene una temperatura elevada, producto de la reacción exotérmica que se produce al recibir el agua para mantener su concentración. Parte de este ácido a la salida del enfriador de ácido de recirculación pasa a otro intercambiador denominado “enfriador de ácido producto” que igualmente es de tubo y coraza y tiene la función de enfriar hasta la temperatura adecuada el ácido que va a los tanque de almacenaje

El agua que circula por los enfriadores de ácido y que recibe calor de lo mismo es enfriada en una torre de enfriamiento que cuenta con cuatro celdas y un sistema de make up.

El sistema de almacenamiento de azufre cuenta con dos tanques de 400 ton de capacidad y cada uno de dos piscinas de 240 ton de capacidad aproximadamente.

1.3 Generalidades de los aceros al carbono para la soldadura

Los aceros representan el grupo más importante de materiales metálicos para ingeniería (Lajtin, 1973; Guliaev, 1983; Pero-Sanz, 2000), (empleados con mucha frecuencia en las industrias cubanas como el MINBAS, MINAZ, SIME y el MICONS). Los aceros al carbono son aleaciones Fe-C donde el contenido de este último no supera el 1,00%, el manganeso no supera el 1,65%, el cobre y el silicio no superan el 0,60% y en los que el fósforo y el azufre aparecen solo como impurezas. La característica más sobresaliente del acero es su versatilidad, ya que sus propiedades pueden ser controladas y modificadas con el fin de satisfacer los requerimientos de servicio. En estos aceros, los principales factores que afectan a sus propiedades mecánicas son el contenido en carbono y la microestructura. Básicamente, la resistencia a la tensión, a la cadencia y la dureza se incrementan al aumentar el contenido de carbono; por el contrario, la elongación, la reducción de área y la tenacidad disminuyen notablemente con dicho incremento. Otro atributo del acero, el

cual es seguramente de mayor importancia, es su capacidad para endurecer, cualidad que comúnmente se denomina templabilidad. Esta característica también se ve afectada con el aumento en el contenido de carbono.

Según Bengton (1991), son usados ampliamente para la construcción de estructuras y diversas partes de maquinaria, como pernos, tornillos, pasadores de baja resistencia; son de buena soldabilidad y no toma temple, además poseen favorables condiciones económicas como son su bajo coste y la garantía de abastecimiento. (Várela, 2003).

A pesar de tener buenas propiedades mecánicas en las uniones soldadas, se han adoptado una serie de prácticas como los tratamientos térmicos pre-soldadura de las piezas, tratamientos térmicos post-soldadura, mecanizado previo de las superficies a soldar, utilización de materiales especiales de aporte a la soldadura. Todos estos tratamientos logran atenuar los problemas relacionados con la soldadura, pero incrementan muy considerablemente la complejidad técnica y el coste de las operaciones. Por ejemplo los tratamientos térmicos previos a la soldadura requieren el diseño de herramientas específicas para cada aplicación, bien sea el diseño de devanados (en el caso de calentamiento por inducción eléctrica) o de sopletes (si se trata de un calentamiento por llama).

Por otra parte, en otros casos es necesario el diseño y preparación previa de la unión, siendo preciso el mecanizado de las caras a soldar. Este mecanizado no es siempre una tarea sencilla, fundamentalmente cuando la geometría de la unión es complicada. (Taylor, 1975).

1.4 Influencia de los elementos de aleación en el proceso de soldadura

Según Rodríguez (1983); González (1978); García (1983); Callister (1999) plantean que la soldabilidad de un material está dada por tres factores, de ellos el factor material es el que se refiere a la influencia de la composición química, método de fusión, existencia de impurezas, grado de desoxidación y las operaciones precedentes (laminado, forja y tratamiento térmico); también depende de la relación de las impurezas, elementos de aleación y el carbono. El grado de soldabilidad representa una característica cualitativa o cuantitativa, la cual muestra cuanto varían las propiedades del metal al soldar bajo determinadas condiciones. Por ejemplo es posible

establecer cuanto varían la resistencia, plasticidad, resiliencia y otras debido a la soldadura. Una de las características más sustanciales de la soldabilidad en aceros es la ausencia de grietas.

Los elementos de aleación tales como el carbono, silicio, manganeso, cromo, molibdeno, níquel, entre otros, ejercen influencia en las propiedades mecánicas del material, entre ellas podemos encontrar las siguientes:

Carbono: este elemento, como en los aceros al carbono, sigue siendo el fundamental para la determinación de las propiedades mecánicas tecnológicas. La temperatura de fusión y el peso específico, disminuyen con el aumento de este. Con su aumento, disminuye la soldabilidad, debido a que crece la templabilidad, por lo tanto la tendencia a la aparición de estructuras de mayor volumen específico en las uniones soldadas que ocasionan el surgimiento de tensiones internas y la disminución de las propiedades mecánicas.

Silicio: es un elemento reductor (desoxidante), al igual que el manganeso. Para desoxidar determinados aceros para piezas fundidas se añade hasta 0,8 %. En las uniones soldadas, la cantidad de este elemento debe limitarse por el aumento de la fragilidad (debido a que los cristales mixtos de hierro y siliciuro de hierro FeSi son de poca plasticidad); no influyendo negativamente si no sobrepasa el 0,3. .

Manganeso: es un elemento que actúa como desulfurante y desoxidante en la obtención del acero. Este no empeora la soldabilidad si su contenido no sobrepasa el rango de 0,3 a 0,8 %). En los aceros de mediano contenido de manganeso (1,8 a 2,5 %), aumenta la templabilidad y la tendencia a la formación de grietas.

Cromo: dificulta la soldadura porque acelera la oxidación del metal, forma uniones químicas con el carbono, aumenta la dureza del metal en las zonas de transición. Cuando existe una correcta selección del régimen de soldadura, de los materiales de aporte y también con la observación del proceso tecnológico, no influye en la soldabilidad.

Molibdeno: este elemento aumenta la templabilidad del acero durante los procesos de soldadura, generalmente su contenido está limitado a pequeños valores. En caso de los aceros de mediana aleación, la adición de una pequeña

cantidad eleva la temperatura de recristalización de la ferrita por lo cual aumenta la resistencia a elevadas temperaturas.

Níquel: en contenidos de 3 a 5 %, aumenta la resistencia sin aumentar la fragilidad de la unión soldada, sin embargo al superar estos valores, tiene tendencia al aumento de la templabilidad de la misma. Afina el grano, aumenta la plasticidad y no empeora la soldabilidad.

1.5 Agrietamiento en uniones soldadas

La tendencia al agrietamiento es un factor que determina grandemente la soldabilidad de los aceros al carbono y de baja aleación. Durante la soldadura se producen fundamentalmente dos tipos de agrietamiento: agrietamiento en frío y agrietamiento en caliente. Las grietas constituyen los defectos más peligrosos en las uniones soldadas y se pueden presentar tanto como defectos externos o internos.

Algunos autores (Masubuchi, 1980; Suzuki *et al*., 1984; EL - Hebeary *et al*., 2004; Satoh *et al*., 1975), plantean que el fenómeno del agrietamiento en frío se conoce como agrietamiento retardado o agrietamiento por hidrógeno. Constituye un agrietamiento que se produce generalmente a temperaturas inferiores a los 930 ^{0}C inmediatamente después de culminada la soldadura, o luego de varias horas. Constituyen por su morfología roturas frágiles de poca abertura y poco ramificadas que se producen en la zona afectada por el calor o en el metal de la costura y se orientan transversal o paralelamente al eje de la misma. En general las grietas en frío pueden ser externas o internas por su ubicación. La grieta en frío más frecuente se produce en la zona afectada por el calor (ZAC) en la zona de sobrecalentamiento o de grano grueso.

Este tipo de agrietamiento en general es característico de la soldadura de los aceros de medio y alto carbono y algunos aceros de baja aleación.

La fractura inducida por hidrógeno (FIH) es atribuible a tres factores principales: microestructura, hidrógeno y esfuerzo, (Oystein, 1994; Lancaster, 1999). Los factores causales que gobiernan la ocurrencia de la FIH, en las juntas de soldadura de aceros ferríticos son:

- ✓ Microestructura endurecida sensible a la fisuración, conteniendo productos de transformación martensíticos y/o bainíticos,
- ✓ Concentración localizada suficientemente alta de hidrógeno en términos del contenido de hidrógeno difusible de la soldadura (Maroef *et al*., 2002; Gedeón y Edgar, 1990),
- ✓ Esfuerzo elevado causado por la alta restricción estructural que es determinado por la rigidez del ensamble, es decir, espesores y altura del refuerzo del cordón de la soldadura.

La sensibilidad o susceptibilidad a la fractura inducida por hidrógeno de soldaduras se da por una combinación de estos tres factores primarios, (Pekka, 2003; Gangloff, 2003; Pitrun, 2004). El mecanismo de nucleación y crecimiento de este tipo de grietas se explica por el efecto fragilizante que tiene el hidrógeno en el acero, por su alta tasa de difusión y por la existencia de zonas con esfuerzos triaxiales máximos en el frente de una entalla concentrador de esfuerzos. La ubicación de estas grietas, es decir si se presentan en el metal de soldadura o en la zona afectada por el calor (ZAC), se explica a través de las diferencias que presenta el acero en estado austenítico (estructura cúbica cara centrada) y en estado ferrítico (cúbico de cuerpo centrado) en cuanto a la solubilidad y difusividad de hidrógeno atómico, para lo cual la templabilidad relativa entre el metal base y el metal fundido se convierten en los factores fundamentales para poder predecir su localización en uniones soldadas, (Giraldo y Chaves, 2004).

El hidrógeno se disuelve fácilmente en forma atómica hacia el baño de soldadura en estado líquido y a muy alta temperatura, y de aquí puede permanecer en la costura, pasar a la zona afectada por el calor (ZAC) o difundirse hacia la superficie y finalmente salir al medio.

1.5.1 Grietas en caliente de las uniones soldadas

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) (Weld Cracking, 2001; Ashby, 1996)

Los aceros propensos a este tipo de agrietamiento son fundamentalmente los aceros rápidos o de libre maquinado, que presentan grandes contenidos de azufre y fósforo, 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 esta 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 lo puede ser un ligero movimiento zigzagueante al soldar, con el fin de promover el crecimiento celular del grano. Se recomienda seguir los procedimientos adecuados al apagar el arco, a fin de evitar las grietas de cráter (Wilson, 1974).

1.6 Tensiones residuales y distorsión

Las tensiones residuales en los metales son causadas por la deformación de partes de la estructura cristalina interna del propio material. Para restaurar esta retícula interna, es necesaria la introducción de energía a la pieza.

Se denomina esfuerzos residuales o internos, al estado de esfuerzos existente en el volumen de un material en ausencia de una carga externa (incluyendo la gravedad) u otra fuente de esfuerzos, tal como un gradiente térmico (James, 1996; Masubuchi, 1980). En general, se distinguen tres clases de esfuerzos residuales de acuerdo con la distancia o rango sobre el cual pueden ser observados (James y Buck, 1980 y Alfonso, 2002). La primera clase de esfuerzos residuales, denominados macroscópicos, son de naturaleza de largo alcance y se extienden sobre varios granos del material. La segunda clase de esfuerzos residuales son denominados micro esfuerzos estructurales, abarcan la distancia de un grano o parte de uno, y pueden presentarse entre fases diferentes y tener características físicas distintas. La tercera clase de esfuerzos residuales se presenta sobre varias distancias interatómicas dentro de un grano. Los esfuerzos residuales son siempre consecuencias de deformaciones elásticas y/o plásticas no-homogéneas sobre una escala macroscópica o microscópica (Macherauch y Kloos, 1986).

El calentamiento y enfriamiento rápidos en regiones localizadas del trabajo durante la soldadura por fusión, especialmente la soldadura con arco eléctrico, producen expansiones y contracciones térmicas, que a su vez provocan tensiones residuales en la soldadura y distorsión del ensamble soldado (Mikliaev, 1986).

En la soldadura por arco de metal protegido (Shielded Metal Arc Welding, SMAW) es un proceso de soldadura por arco en el que se produce coalescencia de

metales por medio del calor de un arco eléctrico que se mantiene entre la punta de un electrodo cubierto y la superficie del metal base en la unión que se está soldando.

Durante el proceso la situación se complica porque: 1) el calentamiento está muy localizado, 2) la fusión de los metales base ocurre en estas regiones locales y 3) la ubicación del calentamiento y la fusión está en movimiento (al menos en la soldadura con arco eléctrico), (Meriño, 1999). Durante este proceso (figura 1.1), la operación empieza en un extremo y viaja al lado opuesto.

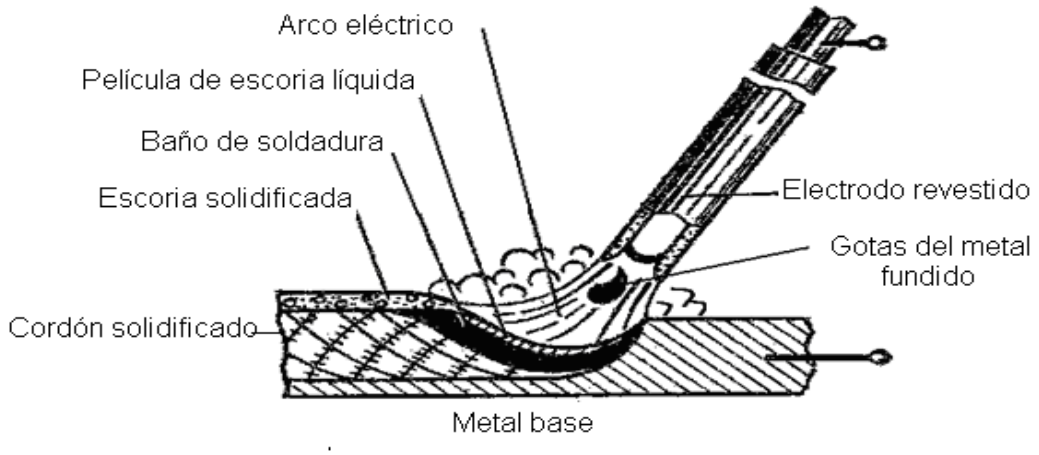

Figura 1.1. Esquema del proceso de soldeo SMAW

Como se puede observar en la figura 1.1, según avanza (Easterling, 1992) se forma un pozo fundido del metal base (y de metal de aporte), el cual se solidifica con rapidez detrás del arco en movimiento. Las partes del trabajo inmediatamente adyacentes a la gota de soldadura se vuelven extremadamente calientes y se expanden, en tanto que las porciones removidas de la soldadura permanecen relativamente frías. El pozo de soldadura se solidifica rápidamente en la cavidad entre las dos partes y, conforme el pozo y el metal circundante se enfrían y contraen, ocurre un encogimiento a través de lo ancho de la soldadura. La unión de la soldadura queda en tensión residual y se acumulan tensiones compresivas de reacción en las regiones de las partes lejanas a la soldadura. También ocurren tensiones residuales y encogimiento a lo largo de la gota de soldadura. Dado que las regiones exteriores de las partes base han permanecido relativamente frías y

sin cambios de dimensión, mientras que la gota de soldadura se ha solidificado a temperaturas muy altas y después se ha contraído, las tensiones residuales permanecen en forma longitudinal en la gota de soldadura. Es probable que el resultado neto de estas tensiones residuales, en forma transversal y longitudinal, produzca una deformación en el ensamble soldado.

La unión soldada con arco eléctrico mostrada anteriormente es solo uno de los diversos tipos de uniones y operaciones de soldadura. Las tensiones residuales inducidas en horma térmica y la distorsión implícita son un problema potencial en casi todos los procesos de soldadura por fusión y en ciertas operaciones de soldadura de estado sólido, en las cuales ocurre un calentamiento significativo.

A consecuencia de los procesos de fabricación de los materiales, de la mecanización de componentes, de las condiciones de servicio de estos últimos y el suministro de en uniones soldada (James, 1996) se generan en los agregados policristalinos campos de tensiones residuales. Tales tensiones residuales pueden llegar a condicionar negativamente la vida en servicio de los dispositivos y estructuras. Microscópicamente, las tensiones residuales actúan alterando las distancias entre los planos atómicos de los cristales.

En el caso específico de procesos de soldadura, los esfuerzos residuales son consecuencia de la interacción de procesos separados (Zinn y Scholtes, 2002; Schajer, 2001

a) Por la expansión impedida y contracción resultante de una distribución de temperatura no homogénea.

b) Efectos de enfriamiento rápido (temple).

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

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

1.7 Transformaciones físico-químicas y estructurales que ocurren en la zona de la unión soldada

Las variaciones en la composición química de la zona fundida pueden tener una influencia favorable o desfavorable sobre las propiedades de la unión.

Plantean (Mathar, 1934; James y Buck, 1980; Easterling, 1992), las pérdidas por oxidación de los elementos útiles como el carbono en los aceros, el silicio en las fundiciones, modifican las características mecánicas. Así mismo, la fijación de un tanto por ciento exagerado de carbono, de fósforo o de azufre, así como la absorción de oxígeno y nitrógeno**,** producen una pérdida en las cualidades de la unión. Por el contrario, el aporte voluntario por micrometalurgia de ciertos elementos especiales conduce a una mejora de las características mecánicas o químicas.

La pérdida de elementos por oxidación (Stout y Doty, 1971) son fenómenos bien conocidos por los metalúrgicos; en soldadura, se complican por la presencia de una atmósfera que rodea al metal fundido y cuya naturaleza depende del tipo de protección del arco y del baño fundido (tipo de gases de protección, fundentes o de la composición del revestimiento del electrodo). En el caso de los aceros, sabemos que estas pérdidas son en general consecuencia de la reducción del óxido de hierro por los elementos componentes del acero.

1.7.1 Modificaciones estructurales de la zona fundida

Las modificaciones estructurales pueden agruparse en dos grupos (Rodríguez, 1983; Guliar, 1978; Bailey, 1995) 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 (Ramírez, 1980).

1.7.2 Modificaciones estructurales y físico – química en el metal base

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 estructuran 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 (figura 1.2), 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 autentico. Estas modificaciones variaran en dependencia de las diferentes regiones de la zona térmicamente afectada donde se encuentre (Barreiro, 1966 y Bakker, 1968).

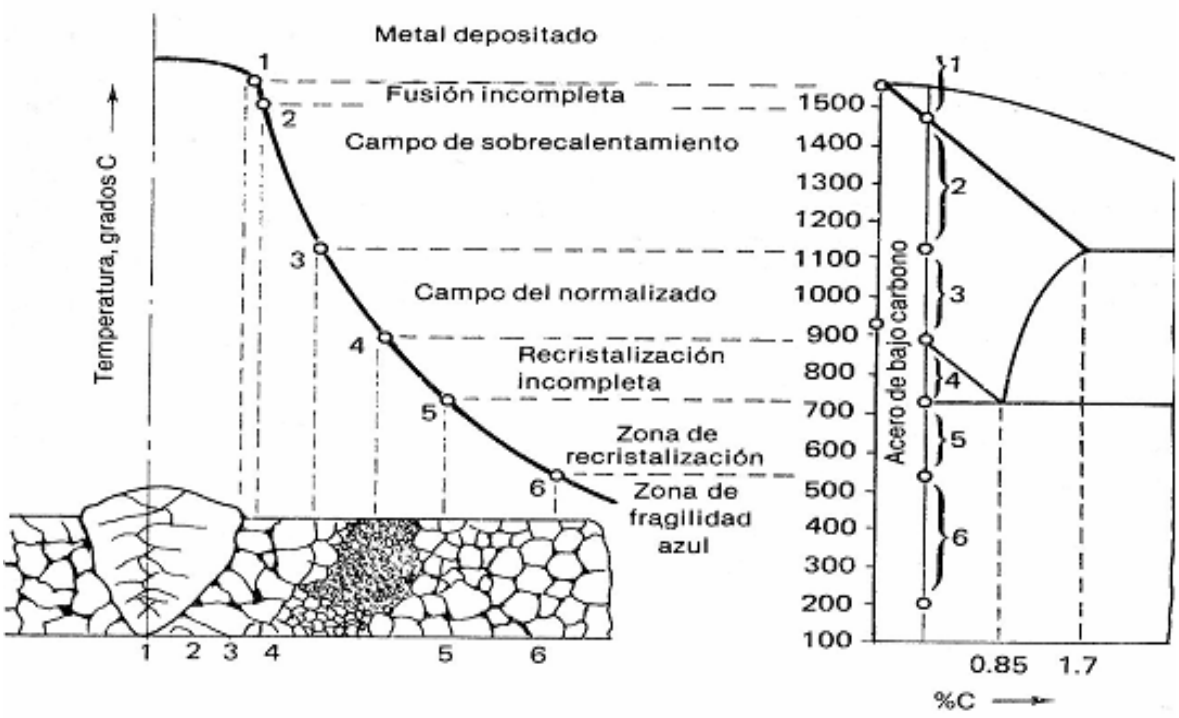

Figura 1.2. Zonas que se presentan en la soldadura, según el diagrama Fe – C. (Zúñiga, 1983)

a) En la **zona fusión incompleta**, la temperatura alcanzada es la de fusión con velocidades de enfriamiento del orden de 350 a 400 ^{o}C/min, es la región de máximo temple; se caracteriza porque en ella ocurren la mayoría de los procesos difusivos de la soldadura, sin embargo el problema se complica por la superposición de una transformación química, en particular por la pérdida de elementos útiles: carbono, manganeso y silicio. Por esta razón, esta zona, a veces, se templa menos que otras zonas próximas del metal de base.

b) En la **zona de recalentamiento** del metal base, que se produce a algunos milímetros del borde de la soldadura, se alcanza una temperatura muy elevada (entre 1100 y 1500 ^{o}C) y la velocidad de enfriamiento también es relativamente grande: 240 a 300 ^{o}C/min. Necesariamente tiene que haber crecimiento de los granos y una transformación estructural de importancia con un temple cuya naturaleza depende del tipo de acero. En esta región no existen transformaciones de tipo químico y por tanto, únicamente interviene el ciclo térmico de soldadura sobre la constitución de la estructura final.

c) En la **zona de recocido** es calentada ligeramente por debajo de los 900 ^{0}C, el metal tiende hacia una estructura normalizada con afinamiento del grano, pero esta transformación no puede ser total a causa de la velocidad de enfriamiento que aún es grande 170 a 200 ^{0}C/ min.

d) En la zona de **primera transformación** que se extiende entre los puntos de transformación Ac_1, y Ac_2, (720 a 900 ^{0}C), las modificaciones pueden adoptar distintos aspectos; en particular puede haber globulación del agregado laminar con tendencia a la coalescencia sin modificación sensible del grano de ferrita. Esta última zona de transformación puede extenderse en dependencia del espesor del metal soldado.

e) Zona de metal base no afectado: en esta zona el ciclo térmico que genera el proceso, no afecta la estructura del metal originalmente empleada.

Si el metal base hubiese sido modificado preliminarmente por algún tratamiento térmico (temple, revenido) o mecánico (laminado en frío), las transformaciones de la zona de recalentamiento o de la zona de recocido, prácticamente quedan como se ha dicho anteriormente, pero la zona de la primera transformación y una parte del metal de base no afectado, son asiento de nuevas transformaciones difíciles de prever.

A partir de las modificaciones estructurales y físico – química en el metal base (Glizmanenko, 1965; Bakker, Y Horestreydt, 1968; Rodríguez, 1983; ANSI/AWS D1.1-96, 1996) realizan una clasificación de las diferentes zonas del cordón de soldadura, para poder determinar los cambios en la estructura en la zona de influencia térmica (ZIT).

1. **Zona de fusión incompleta:** constituye la zona de transición entre el metal de la costura o zona fundida y el metal base no fundido. Es una zona estrecha del metal base que se calienta a temperaturas por debajo de la línea de líquidos y por encima de la línea de sólidos, o sea, a temperaturas que solo sobrepasan un poco la temperatura de fusión por lo que el metal se encuentra en estado bifásico sólido-líquido. El estado bifásico que se alcanza permite que ocurran procesos difusivos de algunos elementos entre las fases líquidas y sólidas de la zona de

fusión incompleta, lo que provoca que esta zona se diferencie en cuanto a composición química tanto de la zona de la costura, como del metal base. El ancho de esta zona depende del carácter de la fuente de calor y de la composición química del metal y varía desde 0.1-0.4 mm. Las propiedades de esta zona en ocasiones ejercen una influencia decisiva en la resistencia de la unión.

2. **Zona de sobrecalentamiento:** zona limitada a los puntos cuyas temperaturas máximas se limitan entre aproximadamente los 1100 ^{o}C (temperatura de crecimiento intensivo el grano austenítico) y la línea de sólidos. En esta zona el metal durante el calentamiento de soldadura sufre la transformación alotrópica de hierro-δ a Υ y producto de que el metal se calienta a temperaturas bastante por encima de Ac3 ocurre un sobrecalentamiento y crecimiento del grano autentico**.** Luego del enfriamiento la estructura final de esta zona depende de la composición del metal y el ciclo térmico de soldadura, de forma que en algunos casos durante la soldadura SMAW con un sobrecalentamiento significativo del acero y un contenido de carbono elevado se forma una estructura de grano grueso, que no influye significativamente en la resistencia del metal, pero que si disminuye significativamente su plasticidad**.** En estos casos la resistencia al impacto puede caer en un 25% y más. El ancho de esta zona oscila entre 1 y 3 mm. Por lo anterior se considera una de las zonas que más afectación pueden sufrir en la ZAC y donde ocurren la mayoría de las fallas en servicio.

3. **Zona de normalizado:** está constituida por el metal calentado algo por encima de Ac3 hasta la temperatura de aproximadamente 1100 ^{o}C. En esta zona se obtiene una estructura de grano fino muy favorable desde el punto de vista de propiedades mecánicas, siendo en algunos casos incluso superiores a las del metal base no afectado. El ancho de la zona varía de 1,2 a 4 mm.

4. **Zona de recristalización incompleta:** se presenta en la zona calentado a temperaturas entre Ac1 y Ac3, que en losa ceros de bajo carbono va de 725 a 850^{o}C. El metal en esta zona alcanza solo una recristalización parcial.

5. **Zona de Recristalización:** durante la soldadura de los aceros que han sufrido deformaciones plásticas previas, en la zona que se calienta en el intervalo de 450

a 700 ^{o}C, de partes de granos surgen y crecen nuevos granos equiaxiales. Si el metal no ha sido previamente deformado plásticamente la recristalización no ocurre.

6. **Zona Frágil Azul:** en esta zona se presenta una coloración azul de la superficie del metal, luego del enfriamiento. Se caracteriza porque durante la soldadura de aceros de bajo carbono con contenidos de más de 0.005% de O_2, 0.005% de N_2 y 0.0005% de H_2 ocurre una brusca caída de la resistencia al impacto. Esta es causada probablemente por el envejecimiento del metal, durante el cual la solución sólida sobresaturada segrega los componentes en exceso, en este caso nitrógeno u carbono, los que en forma de nitruros y carburos muy dispersos se agrupan alrededor de las zonas defectuosas de la red cristalina aumentando la resistencia del metal, pero disminuyendo su plasticidad.

Estas dos últimas zonas hay autores que las denominan **zonas de revenido.**

Metal base no afectado: en los aceros al carbono por debajo de la temperatura Ac1 no ocurren transformaciones importantes que afecten de forma importante las propiedades mecánicas, por lo que por debajo de esta temperatura se considera metal base no afectado térmicamente. Algunos autores extienden la ZAC por debajo de esta temperatura porque determinados aceros son susceptibles de sufrir modificaciones.

El ancho obtenido en la ZIT y sus diferentes subzonas, dentro de la soldadura por fusión, se diferencia grandemente en el proceso de soldadura a llama (OFW) respecto a los diferentes procesos de soldadura por arco eléctrico (SMAW, GMAW y SAW) ya que el primero es un proceso que utiliza una fuente de calor (llama) menos potente y concentrada que el arco, que avanza mucho más lentamente, con un baño más voluminoso, por lo que el calor introducido en la pieza por metro lineal es mucho mayor, obteniéndose una ZIT muy ancha.

1.8 Soldadura manual por arco eléctrico (SMAW)

Al principio del siglo XIX (1802), académico ruso V. V. Petroff, observó que al hacer pasar la corriente eléctrica a través de 2 electrodos de carbón entre sus extremos surgía un arco incandescente cegador (la descarga eléctrica) la cual poseía una temperatura muy alta. Indicó la posibilidad de aprovechar el calor del arco eléctrico para fundir metales (Glizmanenko, 1965). En 1808 Sir Humphry Davy demuestra que es posible conducir electricidad en el aire entre dos electrodos.

La clasificación del proceso lo define la American Welding Society (AWS), 1996, como Shielded Metal Arc Welding, SMAW (ANSI/AWS A3.0) o Soldadura por arco metálico con electrodo revestido, 111 (EN 24 063).

El surgimiento del proceso de soldadura por arco con electrodo revestido esta ligado al ingeniero marítimo sueco Oskar Kjellberg y al Inglés A. P Strohmenger. En el año 1910 Oskar Kjellberg, patentó un sistema de soldadura por arco empleando un metal de aporte revestido por inmersión con una mezcla de carbonatos y silicatos y luego secado al aire. Mas tarde, en 1912 Strohmenger patentó un electrodo fuertemente recubierto, capaz de producir a escala industrial soldaduras con buenas propiedades mecánicas.

Este es un proceso en el que su energía se obtiene por medio del calor producido por un arco eléctrico que se forma en el espacio o entrehierro comprendido entre la pieza a soldar y una varilla que sirve como electrodo. Por lo general el electrodo también provee el material de aporte, el que con el arco eléctrico se funde, depositándose entre las piezas a unir. La temperatura que se genera en este proceso es superior a los 5 500 °C.

La corriente que se emplea en este sistema puede ser continua o alterna, utilizándose en los mejores trabajos la del tipo continua, debido a que la energía es más constante, con lo que se puede generar un arco más estable.

La corriente alterna permite efectuar operaciones de soldadura con el objeto de trabajo en posición horizontal y preferentemente en materiales ferrosos, mientras que la corriente continua no presenta esas limitaciones de posición y material.

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

Los modelos computacionales para la predicción de curvas en procesos de soldadura son ventajosamente empleados en la actualidad para la comprensión de los complejos fenómenos de transferencia de calor considerando las transformaciones metalúrgicas que ocurren en estos procesos. Estas simulaciones permiten controlar las distribuciones espaciales de las propiedades físicas de la pieza tratada en término de los parámetros del proceso, convirtiéndose en el primer paso para el cálculo de las tensiones residuales en la pieza y su distorsión.

El problema de determinar los coeficientes de transferencia térmica dependientes del tiempo a partir de las evoluciones temporales de la temperatura en algunos puntos del material, es un ejemplo de lo que se denomina un problema inverso de conducción de calor. Conocidos estos coeficientes para diversas condiciones de trabajo, se puede resolver entonces el problema directo de conducción de calor, el cual consiste en obtener la distribución de temperaturas en toda la extensión de la pieza y en el lapso total de tiempo en el que tiene lugar la operación y a partir de la misma, pueden determinarse las tensiones térmicas, la distorsión del material y la distribución espacial de sus propiedades mecánicas. (Adrián, 2001; Pero-Sanz, 2000, Duffus, 2000).

1.10- Conclusiones del capítulo I.

- ✓ El estudio de diferentes fuentes rebeló que existen gran cantidad de trabajos realizados sobre la corrosión bajo tensiones en aceros al carbono, pero muy pocos de los consultados abordan este fenómeno en el proceso del trasporte del acido sulfúrico,
- ✓ El análisis bibliográfico referido al mecanismo de rotura, posibilitó profundizar en los elementos teóricos, para investigar la influencia de los elementos aleantes en proceso de soldadura, así como de los factores que favorecen la rotura de los aceros al carbono,
- ✓ Se fundamentan las teorías que estudian el comportamiento de la resistencia mecánica de metales sometidos a medios agresivos.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

Es de gran interés para la economía de nuestro país asegurar el buen funcionamiento en la línea de tubería para el transporte de ácido sulfúrico en la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”, es por ello la necesidad de tener una metodología de cálculo que asegure los parámetros de la producción deseados, así como el buen funcionamiento y la resistencia del material. La realización de experimentos de los materiales ha sido siempre una potente herramienta para el tratamiento, verificación de hipótesis y la solución a los problemas de averías en elementos y equipamientos industriales. Como **objetivo** este capítulo pretende:

Fundamentar las propiedades a investigar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones experimentales para la solución del problema.

2.2 Preparación metalográfica de la probeta

Se tomaron varias muestras de la línea de tubería para el transporte de ácido sulfúrico correspondientes a las zonas de roturas más frecuentes y con menor durabilidad mostrada por los componentes que son los tramos cercanos a los codos y en algunos casos en el cordón de soldadura.

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

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

Las muestras para la observación metalográfica con longitud de 15 x 15 (norma ASTM E3 – 95) se prepararon en una fresadora del tipo 6 H 82 Г.

Se realizó con una fresa de vástago marca P6 M5 de diámetro 20 mm y 8 dientes. Las probetas se elaboraron con abundante refrigeración, con el objetivo de lograr

una superficie con la menor cantidad posible de rugosidad superficial, para ello se calcularon los siguientes parámetros:

Velocidad de corte.

$$Vc = \frac{\pi.Df.n}{1000} \text{ m/min.} \quad (2.1)$$

Donde:

Df – Diámetro de La fresa.

N – Número de revoluciones

Profundidad de corte:

$$t = h \quad (2.2)$$

Tiempo de maquinado.

$$Tm = \frac{L}{n.s\log}.i \text{ min} \quad (2.3)$$

2.2.1. 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 se hizo siguiendo las normas (ISO 9001) con los papeles abrasivos (tipo 180, 400 y 600), se realizó variando la granulometría del mismo al ser aplicadas a la pieza de trabajo, desde la más gruesa a la más fina. En el pulido fino se empleó pasta abrasiva (Pasta GOI), añadida sobre discos provistos de paños o motas.

Este pulido se llevó a cabo con la lija montada sobre una placa de vidrio, cambiando el sentido del lijado 90º al pasar de un pliegue a otro de manera que se elimine la capa de metal distorsionado y deslizado dejado por el anterior. Para obtener una superficie lisa y pulida libre de impregnación de impurezas o ralladuras, las muestras se pasaron en una pulidora metalográfica marca MONTASUPAL (ubicada en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM). Con el objetivo de lograr el acabado final, se utilizó un paño de fieltro grueso

usando como sustancia abrasiva el óxido de cromo. Para eliminar los residuos de partículas, grasas y suciedades se lavó la superficie con agua.

2.2.2. Limpieza y lavado de las superficies a investigar

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.

2.2.3 Ataque químico

Una vez pulidas las muestras hasta alcanzar un brillo de espejo, estas deben ser atacadas químicamente con el objetivo de resaltar la estructura obtenida, para ello se empleó Ácido Nítrico (HNO_3) con 5 ml y Alcohol (etanol) 100 ml (ASTM E – 262 - Practice A), formando una sustancia química conocida como Nital al 4 %.

El Nital al 4%, resalta los diversos constituyentes estructurales y el contorno de los granos del acero. Pone en manifiesto las uniones de los granos de ferrita, la perlita se ennegrece y la cementista se mantiene blanca.

2.3 Análisis microestructural por el método de examen microscópico

El análisis metalográfico se realizó según los procedimientos establecidos en las normas NC 10-56:86 y ASTM E3-95. Se procedió a la selección y preparación de muestras y ataque químico de las superficies a investigar. Se aplicaron técnicas de microscopía óptica (MO) con un microscopio óptico NOVEL modelo NIM - 100 de magnificación hasta 800X y cámara de video acoplada y tensión de aceleración entre 10 y 20 kv.

Figura 2.1. Microscópio óptico.

NOVEL modelo Njf-120A.

La observación de la superficie a analizar es necesario fotografiarla para procesar la información. La observación microscópica permite reconocer la presencia de inclusiones no metálicas como sulfuros, silicatos, aluminatos, óxidos, microporosidades, microgrietas y grafito.

2.4- Parámetros para el cálculo

Tabla 2.1. Parámetros de la instalación.

P- presión	1,655 MPa
Ta – temperatura interior	40 ^{0}C.
Diámetro interior	8 pulgada 203,2 mm
Espesor	8 mm

2.5- Propiedades del acero ASTM A-106

Las propiedades de este material dependen del tipo de aleación y son función del proceso de fabricación y de los tratamientos superficiales a los que ha sido sometido.

Tabla 2.2. Propiedades químicas del acero ASTM A-106.

Carbón máx.	**manganeso**	**fósforo**	**azufre**	**Silicio - min**
0,35	0,29 – 1.06	0,035	0,035	0,10

En la tablas 2.3 se presentan las propiedades físicas a temperatura ambiente, para los grados de acero ASTM A según materiales (1996), Key to Steel (2002). Las propiedades físicas pueden variar ligeramente con la forma y el tamaño del producto, pero tales variaciones no suelen ser de importancia crítica para su aplicación.

Tabla 2.3. Propiedades físicas del acero ASTM A-106.

Denominación	Unidad	Valor
Densidad	[kg/dm^3]	7,87
Módulo de Dilatación	[10$^{-5^o}$C^{-1}]	16,0
Módulo de Elasticidad	[N/mm^2]	205
Capacidad de Calor Específico a 20ºC	[J/(kg.ºC)]	500-500
Punto de Fusión	ºC	1371 – 1398
Coeficiente de Poisson	NA	0,3
Conductividad Térmica	W/mºK	[100 ºC] → 16
		[500 ºC]→ 21
Coeficiente de Expansión Térmica	[10$^{-6\ °}$C^{-1}]	[0/100ºC] → 16,02
		[0/300ºC] → 16,20
		[0/500ºC] → 17,46
		[0/700ºC] → 18,54

2.6- Cálculo de la resistencia mecánica en tuberías de Aceros ASTM A - 106

En la realización de cálculos convencionales de resistencia de materiales a temperaturas elevadas las propiedades mecánicas se consideran, para todos los fines prácticos, independientes del tiempo, la resistencia mecánica depende mucho de la magnitud y velocidad de aplicación de la carga y del tiempo de exposición. A elevadas temperaturas, gran cantidad de materiales metálicos se comportan como materiales viscoelásticos, por lo que al ser sometidos a la acción de cargas, por ejemplo, de tracción, el metal “fluye” lentamente y surge un

aumento de su longitud que es función del tiempo. Por esta razón, en los cálculos de ingeniería tienen especial significación los resultados que proporcionan los ensayos que describen los mecanismos de deformación de una aleación a temperaturas elevadas (Boyle y Spence, 1989).

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

Se puede observar en la tabla 2.4 que las propiedades mecánicas a elevadas temperaturas del acero ASTM A-106 difieren de las mecánicas a temperatura ambiente.

Tabla 2.4. Propiedades mecánicas del acero ASTM A – 106.

Propiedades	**Tratamiento**	**Unidad**	**Valor**
Dureza (Brinell)	Recocido	[HB]	86 - 95
	Trabajo en frío		
Resistencia a la tracción	Recocido	MPa – (Kpsi)	300 – (43)
	Trabajo en frío		300 – (48)
Resistencia a la fluencia	Recocido	MPa –(Kpsi)	170 – (24)
	Trabajo en frío		280 – (26)
Elongación en 50 mm	Recocido	[%]	36
	Trabajo en frío		

2.6.1- Tensiones provocadas por las temperaturas

Si se tiene un contorno cilíndrico cerrado como se muestra en la figura 2.2, con una relación $\frac{a}{b} \geq 0{,}75$, en el que actúan elevadas temperaturas.

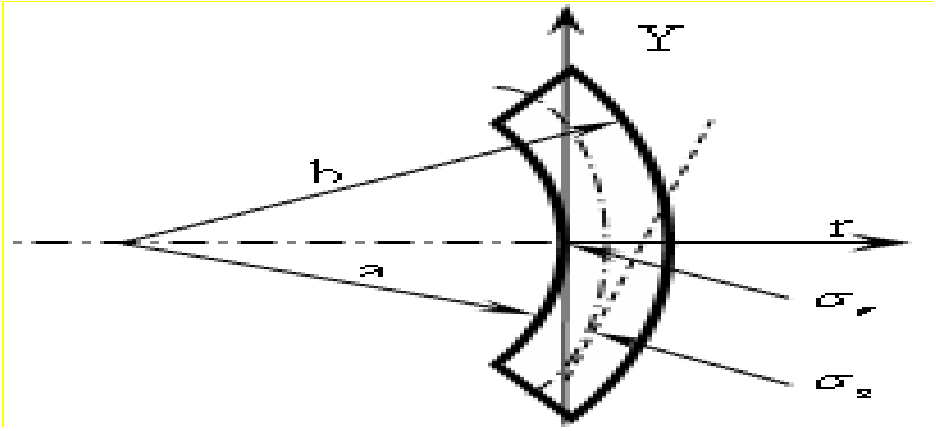

Figura 2.2. Sección de un cilindro de pequeño espesor.

Considerando que en las superficies (interior y exterior) del cilindro las tensiones a lo largo del radio provocadas por dichas temperaturas se pueden determinar por la ecuación (2.4)

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

Siendo:

ν .- coeficiente de Poisson.

T_a- temperatura interior de 32 ^{0}C.

T_b- temperatura exterior de ^{0}C.

b y a .- radio máximo y mínimo de la tubería; con valor de 109,6 y 101,6 mm respectivamente.

r_m.- radio medio de la tubería; igual a mm $\mathbf{r_m = \sqrt{a \times b}}$

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

$$\sigma_z = \frac{\alpha E(T_a - T_b)}{2(1-\nu)\left(\ln\frac{b}{a}\right)}\left[1-\left(\frac{2a^2}{b^2-a^2}\right)\ln\left(\frac{b}{a}\right)-2\ln\left(\frac{b}{r_m}\right)\right] \qquad (2.5)$$

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

$$\sigma_{eq} = \sigma_z - \nu\sigma_r \leq [\sigma] \tag{2.6}$$

Donde:

ν : coeficiente de relación de tensiones admisibles

$$\nu = \frac{[\sigma]t}{[\sigma]c} \tag{2.7}$$

Donde:

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

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

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

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

$$\delta = \frac{a}{E\left(b^2 - a^2\right)}\left\{p_1 a^2\left[1 + \frac{b^2}{a^2} - \mu\left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right)\right] - p_2 b^2\left[1 + \frac{a^2}{a^2} - \mu\left(1 - \frac{a^2}{a^2}\right)\right]\right\} \tag{2.8}$$

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

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

$$\sigma_z = \frac{p_1 a^2\left(1 + \frac{b^2}{a^2}\right) - p_2 b^2\left(1 + \frac{a^2}{a^2}\right)}{b^2 - a^2} \tag{2.9}$$

$$\sigma_r = \frac{p_1 a^2\left(1-\frac{b^2}{a^2}\right) - p_2 b^2\left(1-\frac{a^2}{a^2}\right)}{b^2 - a^2} \qquad (2.10)$$

Siendo:

P_1- presión en el interior del tubo igual a 1,655 MPa

P_2 - presión en el exterior del tubo igual a la presión atmosférica la cual es despreciada.

b y a .- radio máximo y mínimo de la tubería; con valor de 109,6 y 101,6 mm respectivamente

La variación del radio interior del tubo es:

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

$$\Delta r_2 = \frac{b}{E}\left[2p_1\frac{a^2}{b\ -a^2} - p_2\left(\frac{b^2+a^2}{b^2-a}-\mu\right)\right] \qquad (2.12)$$

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

El cálculo de la tensiones radiales se realizó por el método expuesto por (Fernández, 1989).

$$u_1 = \frac{1-\mu}{E}\left[\frac{P_1 \cdot r_m^3}{r_m^2 - a^2}\cdot P1 - \frac{1+\mu}{E}\frac{a^2 \cdot r_m}{r_m^2 - a^2}P_1\right] \qquad (2.13)$$

$$u_2 = \frac{1-\mu}{E}\cdot\frac{r_m^3}{b^2 - r_m^2}\cdot P_1 + \frac{1+\mu}{E}\cdot\frac{b^2 \cdot r_m}{b\ -r_m^2}\cdot P_1 \qquad (2.14)$$

Donde:

u_1 – deformación en el interior del tubo; (mm).

u_2 – deformación en el exterior del tubo; (mm).

2.7- Simulación por el Método de Elementos Finitos del proceso de soldadura

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

Las propiedades del material del tubo son constantes, como la conductividad térmica y coeficiente de expansión térmica correspondencia con los valores de temperatura, según ANSYS 11.0.

En dependencia del coeficiente de transferencia de calor y la temperatura ambiente.

Las variables a tener en cuenta en la simulación del proceso de solidificación son:

1. Conductividad térmica.
2. Coeficiente de expansión térmica.
3. Coeficiente de Poisson.
4. Capacidad de calor específico.
5. Módulo de dilatación.
6. Módulo de elasticidad longitudinal.
7. Módulo de elasticidad transversal.

2.7.1- Algoritmo para la simulación (ANSYS versión 11.0)

El algoritmo desarrollado por etapas para el análisis que desarrolla el paquete ANSYS. **Primera etapa:** Modelado de tubos de pequeñas dimensiones sometidos a temperatura de fusión.

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

Tercera etapa: Generación del mallado y condensación.

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

2.8- Conclusiones parciales de capítulo II

1. Los métodos establecidos permiten evaluar la incidencia de dichas variables en el comportamiento mecánico y funcional del acero al carbono, así como los posibles efectos de la interacción,
2. La metodología de cálculo empleada permite definir, si la rotura en la cercanía del cordón de soldadura de las tuberías de circulación para el transporte de acido sulfúrico es producto de las cargas externas o asociada al mal soldeo.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

En este capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo experimental y a partir de los mismos, las expresiones matemáticas que describen las regularidades del comportamiento mecánico y funcional del acero, También se hace la valoración económica de la reparación de la rotura de la tubería y los aspectos perjudiciales que ocasionan estos procesos al medio ambiente.

Objetivo del capítulo

Analizar los resultados de diferentes experimentos realizados, valoración económica y los daños que puede originar al medio ambiente y a la persona.

3.2. Resultados del análisis químico

Se comprobó la composición química de las muestras para verificarlas con los estándares y establecer su correspondencia con la aleación a investigar. El análisis químico se realizó empleando un espectrómetro de masa ESPECTROLAB 230 con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón en el laboratorio del taller de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel.

Las muestras analizadas fueron tomadas de diferentes secciones de los tramos analizado y a cada una de ellas se le realizaron de 3 a 6 chispazos separados uno del otro. Finalmente se toma una media de los resultados obtenidos por las chispas y se realiza una comparación para verificar que los valores se encuentren dentro del rango establecido.

Tabla 3.1. Composición química de acero ASTM A - 106.

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Probetas	0,35	0,10	0,96	0,035	0,35	0,40	0,15	0,40

3.3 Resultados del análisis metalográfico

Las micrografías de la figura 3.1 muestran la microestructura típica del material de los tubos analizados con aumentos (200 X) Como se observa, la estructura de la aleación es típica del acero hipoeutectoide del tipo ferrita + perlita.

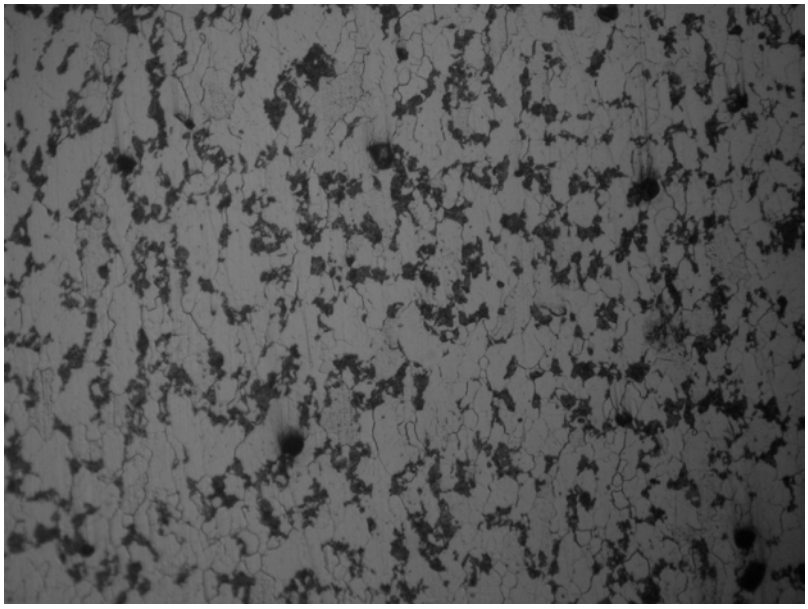

Figura 3.1. Microestructura del metal base (200X).

La Micrografía de la figura 3.2 muestra una estructura ferrita + perlita laminar perlita fina y con granos alargado orientados de forma irregular.

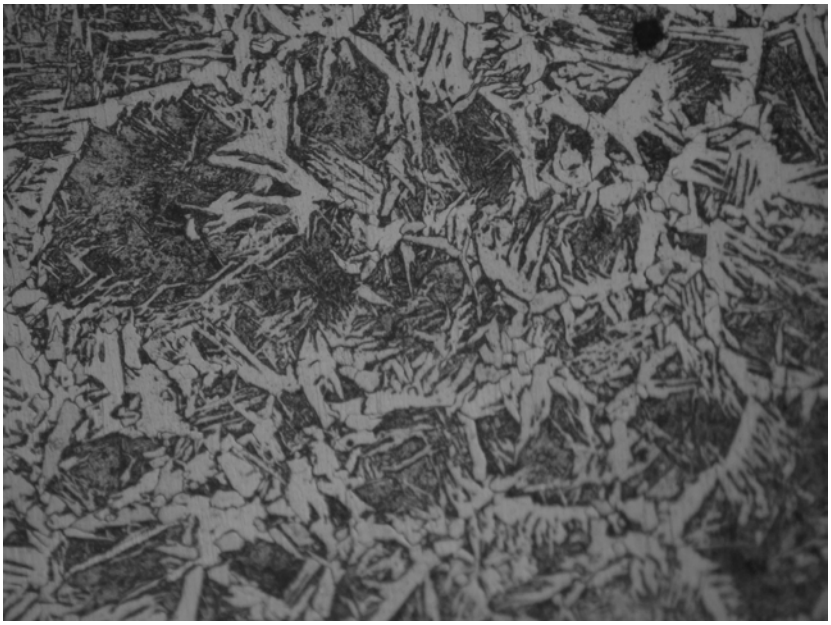

Figura 3.2 Microestructura en la unión del cordón de soldadura (200X).

La micrografía de la figura 3.3 muestra la estructura de la interface, la cual está formada por una estructura ferrita + perlita, con granos aciculares de menos tamaño que es la zona fundía.

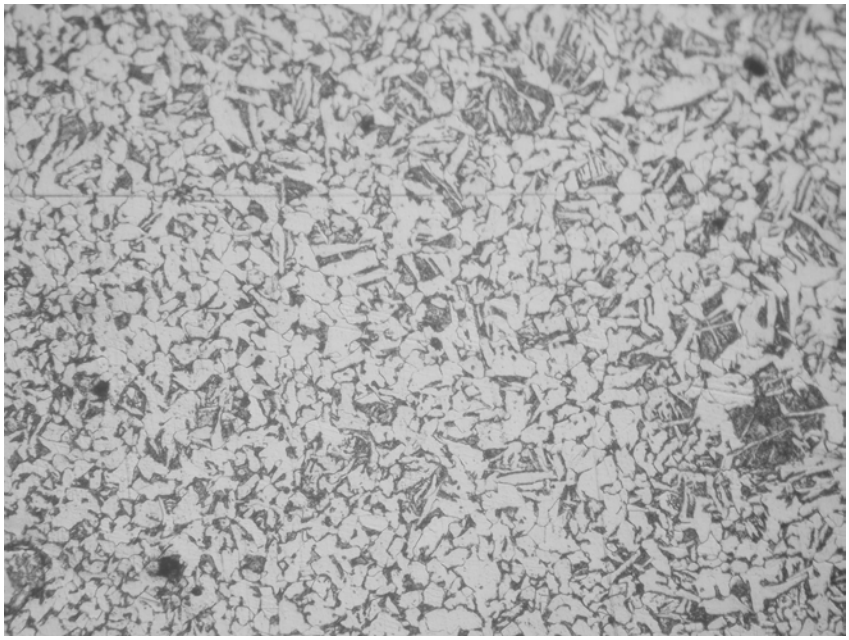

Figura 3.3. Microestructura de la interface (200X).

3.4 Resultados obtenidos en el cálculo de la resistencia mecánica en tuberías de acero ASTM A-106

El cálculo de resistencia realizado por el método descrito en el epígrafe 2.9, arrojó que los valores de esfuerzo de tensión producidos por las variaciones térmicas son de: σ_r = - *48,023 Mpa* para la tensión radial y la tensión circunferencial es de σ_z = - *228,466 MPa*. La condición de resistencia planteada en la ecuación (2.6), (σ_{eq} = *-180,444 MPa*). Permite conocer los valores de *las tensiones generadas por la presión del trabajo (2.6),* σ_{zp} = *21,877 MPa, (2.7),* σ_{rp} = - *1,655 MPa y* σ_{eqp} = *23,532 MPa.*

En este caso se determinó solamente el desplazamiento radial en el interior del cilindro p_1= 1.655 *MPa*, debido a que la presión en el exterior es despreciable, los puntos en el exterior se desplazan en la misma magnitud que varíe el radio exterior, el mismo se determinó por la ecuación (2.8), siendo el valor de δ = *0.011 mm* .

Las deformaciones radiales en el interior y exterior del tubo nos permiten determinar por las ecuaciones (2.11) y (2.12) respectivamente cuyos valores que son Δr_1 = *0.011 mm* y Δr_2 = *0.011 mm*, a pesar de que los mismo son pequeños, pueden favorecer al aumento del apriete entre los tubos y la placa soporte, provocando un aumento en las tensiones de contacto y la posterior rotura del los tubos en zonas cercanas a la placa de sujeción.

La expresión 2.3 que nos permitió determinar los valores de esfuerzo de tensión generados por la presión de trasiego del fluido, a partir de la misma se obtuvo el valor de la tensión equivalente al aplicar el quinto postulado de resistencia (*271.112 MPa*), aunque las tensiones producidas por las cargas externas no se acercan a los valores admisibles, es bueno precisar que durante los procesos de expansión y contracción del material, se pueden generar secciones más delgada que no pueden soportar estos valores de esfuerzo y por con siguiente los tubos

serán proclives a fallar en esta zona.

3.5. Resultados de la simulación con ANSYS (11.0)

Como se aprecia en la figura 3.4 se construyo un modelo geométrico a escala real de un segmento de la tubería de radio 109,6 mm y un espesor de 8 mm, al cual se le realizó un análisis estructural, se le introdujo las propiedades físicas del material y las condiciones de carga.

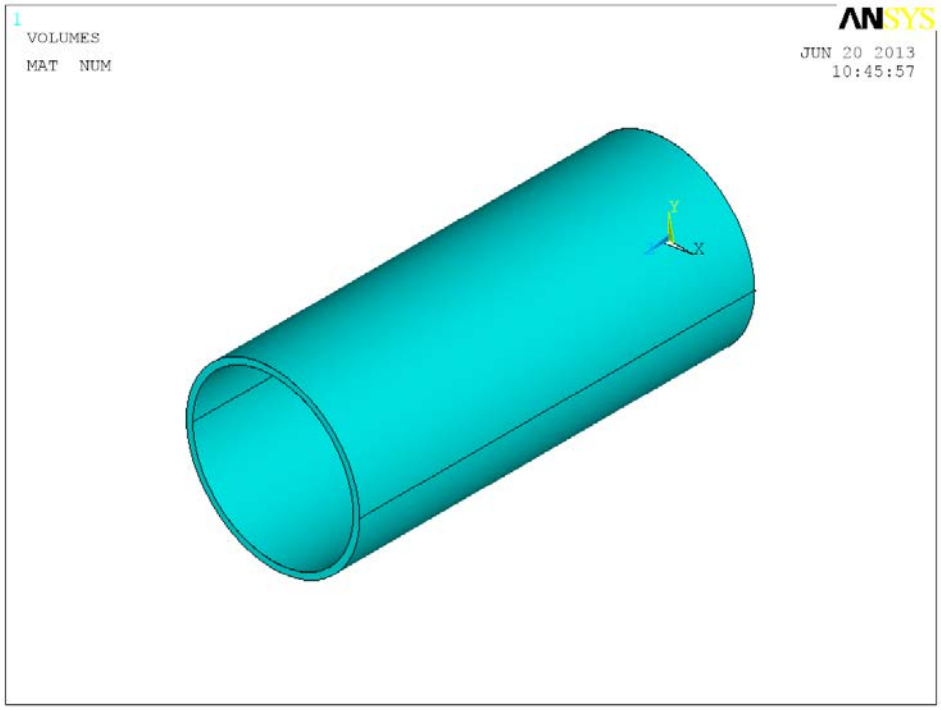

Figura 3.4. Modelo geométrico de un segmento de la tubería.

Como se observa en la figura 3.5 el modelo geométrico se discretizó como un elemento 20nodos95, formado por elementos triangulares de seis nodos que generan una malla tetraédrica (20 850 nodos y 3 475 elementos).

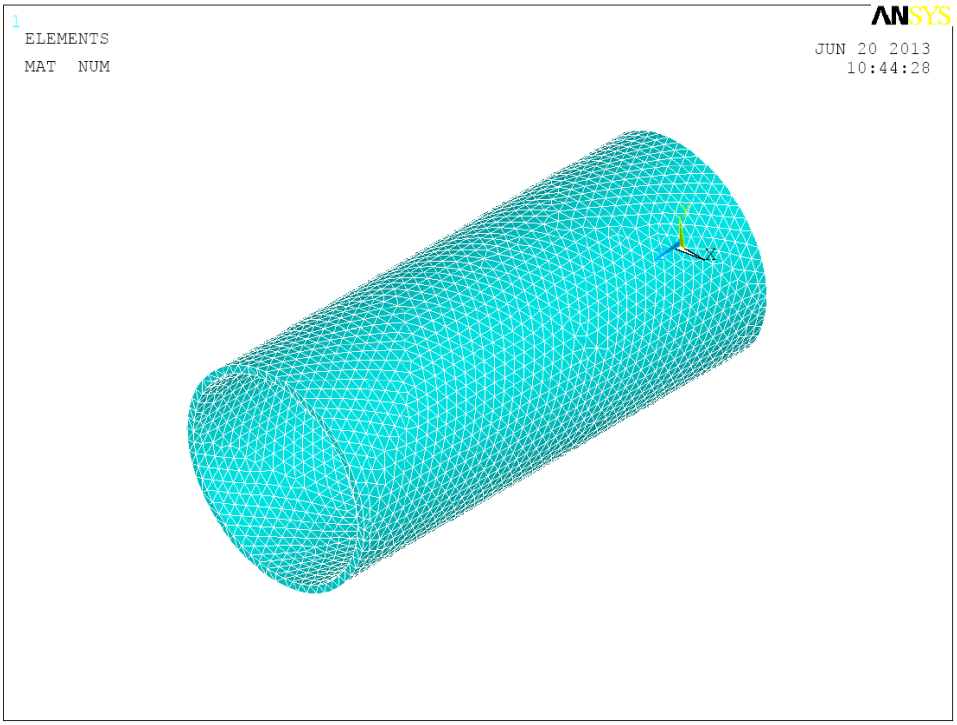

Figura 3.5. Modelo geométrico malla en el segmento de la tubería.

Como se muestra en la imagen de la figura 3.6, los desplazamientos máximos se encuentran a una distancia de 40 mm de la costura de soldadura en la cual los desplazamientos serán mínimos, esto está dado por la rigidización de la zona afectada térmicamente,

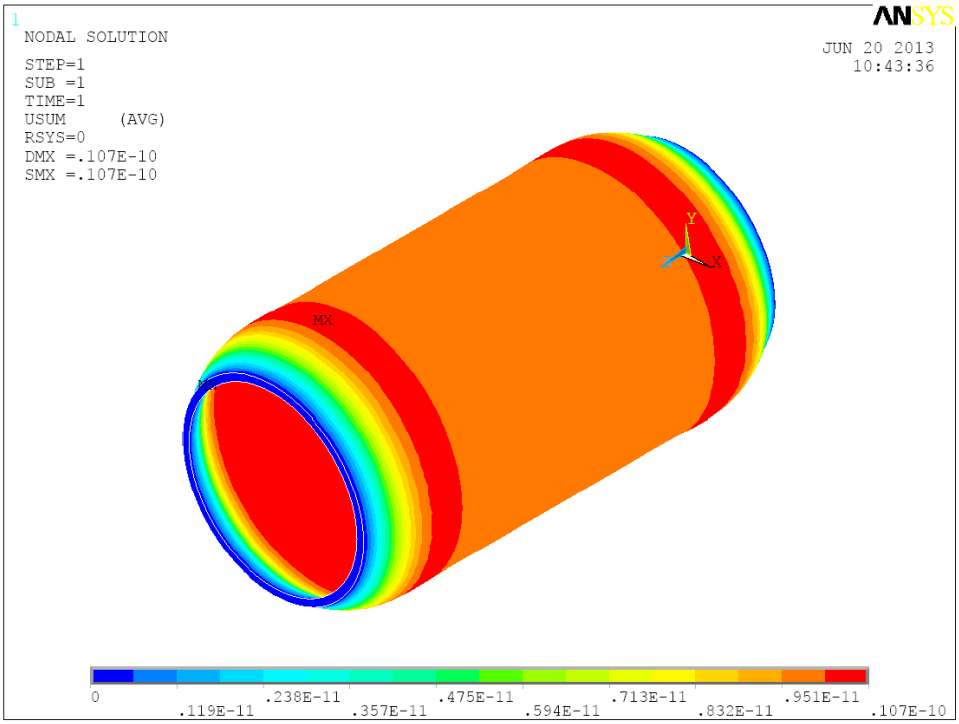

Figura 3.6. Desplazamientos en el segmento de tubería.

Como se aprecia en la figura 3.7 los valores de esfuerzos de tensión no alcanzan valores significativo, aunque la pared de la tubería en bastante delgada.

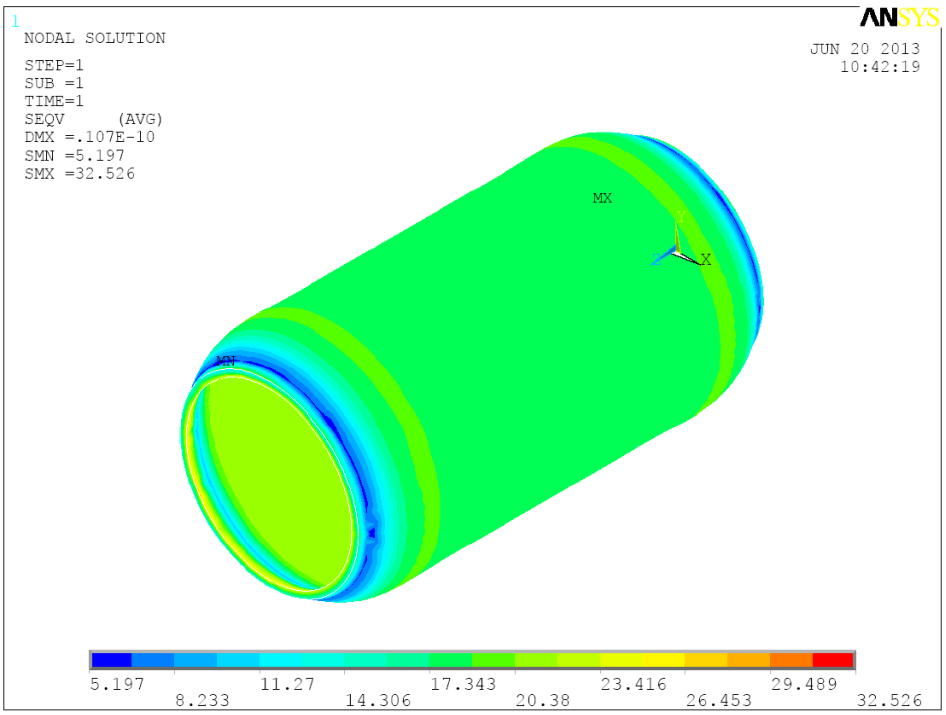

Figura 3.7 Tensiones de Von Mises en el segmento de la tubería.

Como se puede apreciar en la figura 3.8 los valores de tensiones de Von Mises generados por la temperatura son elevados y alcanzan los 242, 362 MPa, esto no está dado por la temperatura sino por las dimensiones de la sección y existir desplazamiento del material las secciones se hacen más delgadas y por consiguiente disminuye la resistencia mecánica del tubo.

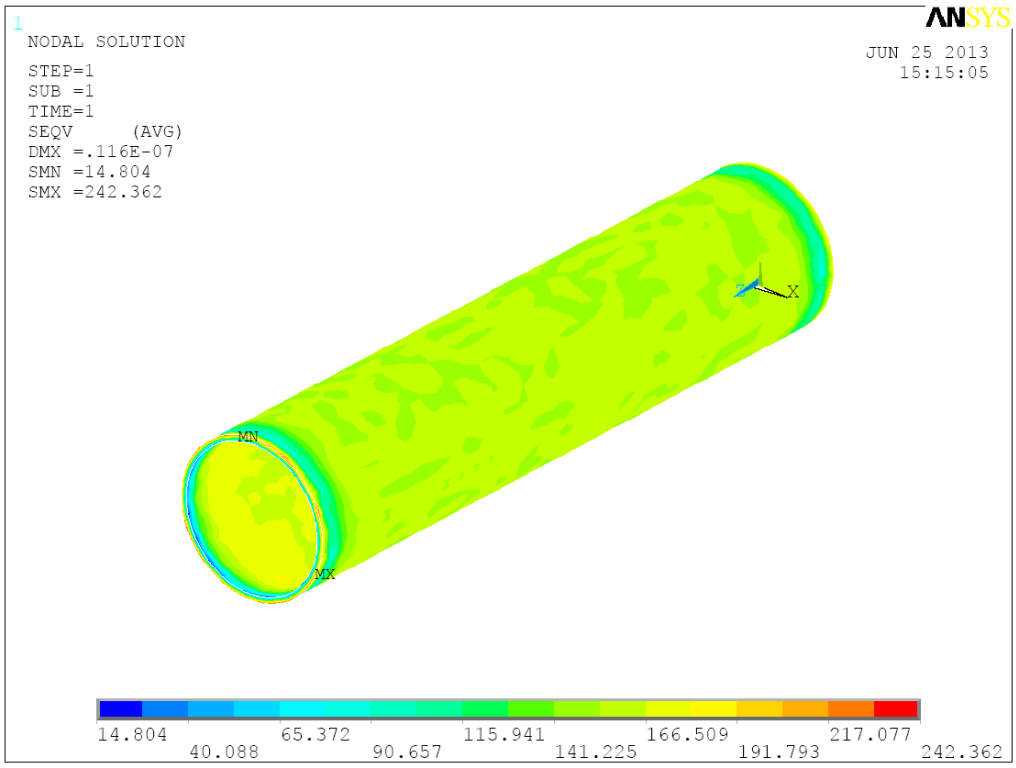

Figura 3.8. Tensiones térmicas en el segmento de tubería.

3.6. Valoración económica.

Cuando se requiere realizar un paro por avería, el tiempo mínimo de parada de la linia es de 24 horas como promedio para el enfriamiento y 12 horas para realizar el cambio.

Un factor negativo e importante a considerar, son los gastos por concepto de reparación. Según las estadísticas, durante un paro se sustituyen un promedio de 1,8 tones de tuberías de acero ASTM A 106 durante 8 horas en diferentes tramos de la linia. Generando un gasto de 883,000 CUC por (ton) además se usan 5,7 Kg. de electrodo AWS E – 6011 Ø 3,2 con un costo de 11,2461 CUC, en equipo se genero un gasto de 209,68CUC y en mano de obra 58,8 CUC representando un total de 1788,1261 CUC.

Una vez realizado el trabajo se tuvo en cuenta una estimación del costo de inversión del mismo, además de algunos gastos, tanto de materiales como de materia prima. Con la realización del trabajo, es beneficiada económicamente la empresa, ya que se puede incrementar la durabilidad de la línea.

Tabla 3.2. Gasto por concepto de reparación de averías.

Código	Descripción	UM	Tiempo(h)	Precio Unitario	Importe
211	Ayudante de construcción	hh	8	$1.91	$15,28
14923	Instalador de tuberías	hh	8	$2.72	$21,76
23033	Soldador	hh	8	$2.72	$21,76
2766020000	Tubo de acero	tm	1,8	838,00	1508,4
	Electrodo 6011 de 3mm	kg	5,7	1.05	11,2461
Total					1578,4461

Tabla 3.4. Gastos de equipo empleados en la reparación.

Descripción	**U/M**	**Tiempo(h)**	**Importe (CUP)**
Grúa de izaje de 9-14 ton	he	8	170,16
Soldador autógeno y equipo oxicortador	he	4	13,28
Soldador eléctrico por motor 60-340 ampere	he	8	26,24
Total			**209,68**

3.7- Impacto Medio Ambiental

La protección del medio ambiente se ha convertido, en los últimos años, en una de las cuestiones que más inquietan a la humanidad. Los adelantos técnicos de que dispone el hombre para explorar las riquezas naturales, el acelerado desarrollo de la economía y el crecimiento de la población, han dado lugar a consecuencias indeseables para la humanidad, tales como: el agotamiento de los recursos naturales, la contaminación ambiental, los ruidos y la pérdida de los valores estéticos del medio circundante entre otros. No es por lo tanto casual que

las organizaciones científicas, sociales, políticas, los estados y gobiernos de muchas partes del mundo se hayan preocupado por tomar medidas que de una forma u otra, están dirigidas a garantizar un uso racional de los recursos naturales y la protección del medio ambiente.

El ácido sulfúrico es utilizado como agente lixiviante, posee 98 % de pureza, es un líquido de color claro, de incoloro a nebuloso, de olor penetrante y no es inflamable.

La máxima concentración autorizada es de 0.3 parte por millón (ppm) en el aire, 1 miligramo por m^3 de aire.Tiene un alto poder corrosivo, particularmente a concentraciones por debajo de 78 %, además de atacar a muchos metales, este ácido causa grandes daños a la flora y fauna, en su forma concentrada, es un fuerte agente oxidante y puede causar la ignición, al contacto con materiales orgánicos y productos tales como nitratos, carburos, cloratos, etc. Reacciona exotérmicamente con agua

3.7.1- Daños que causa al organismo humano

Los trabajadores expuestos a concentraciones bajas de vapor gradualmente pierden la sensibilidad a su acción irritante. La inhalación de vapor concentrado o niebla procedente de ácido caliente o aceite puede causar la rápida pérdida de conciencia con daño serio al tejido pulmonar. En forma concentrada actúa como un poderoso cáustico a la piel destruyendo la epidermis y penetrando alguna distancia dentro de la piel y tejidos subcutáneos en los cuales causa necrosis (Gangrena) gran dolor y si gran parte de la piel es afectada viene acompañado por “shock”, colapso y síntomas similares a aquellos vistos en quemaduras severas. Los vapores o nieblas de este material causan tos e irritación de las membranas mucosas de los ojos y conductos respiratorios superiores. La exposición prolongada puede causar una neumonitis química y erosión de los dientes debido a exposición de fuertes vapores.

3.7.2- Tratamiento y antídoto:

El quitar rápidamente este material en contacto con el cuerpo es de primera importancia. Empiece los primeros auxilios al instante. Quite la ropa contaminada, someta al paciente a una ducha si está disponible. No intente neutralizar el ácido en contacto con la piel hasta que todas las áreas de contacto han sido completamente irrigadas con agua corriente. Entonces están indicadas soluciones débiles alcalinas. En todos los casos de contacto de cualquier forma, la demora en prestar los primeros auxilios puede ocasionar lesiones graves y todas las personas lesionadas deben ser enviadas a un médico. No obstante debe aplicarse gran cantidad de agua corriente.

3.8- Conclusiones del capítulo III

1. El análisis químico arrojó que el acero se corresponde con una cero ASTM A - 106 y que presenta el cual es un acero hipoutectoido con una estructura ferrita + perlita.
2. El cálculo de resistencia mecánica arrojó que las tensiones generadas por la temperatura, alcanzan valores superiores a los *200 MPa.*

CONCLUSIONES GENERALES

1-Se determinaron las causas que originan el agrietamiento en la línea para el trasporte de acido sulfúrico a partir de un análisis integral de resistencia mecánica, composición y microestructura del material, atribuyéndose a los efectos de la concentración de la temperatura que origina el flujo plástico alrededor del área de contacto, produciendo una deformación plástica y la aparición de microgrietas, que provocan la fractura del metal.

2 La estructura de la aleación es típica del acero hipoeutectoide del tipo ferrita + perlita, según el análisis químico, el material se corresponde con un acero ASTM A-106 el cual bajo las condiciones existente es capáz de soportar los esfuerzos de tensión generados .

3 Los resultados obtenidos por el Método de los Elementos Finitos demuestran que la tensión máxima alcanzan 23,532 MPa las cuales no alcanzan el limite elástico pero debido los cambios bruscos en la temperatura de operación y disminución de las propiedades elásto - plásticas del material de los tubos objeto de estudio, estos estarán propensos a la formación y propagación de las grietas.

4 Al efectuar la valoración económica del costo para la solución de este tipo de averías se necesitan aproximadamente 12horas, en este periodo de tiempo la línea genera un gasto de 3576,2522 CUC.

RECOMENDACIONES

- ✓ Utilizar los métodos de investigación empleados en la tesis y la caracterización de los parámetros del proceso, como referencia en futuros trabajos investigativos.
- ✓ Realizar estudios de corrosión y de mecánica de la fractura para caracterizar el agrietamiento en la línea para el trasporte de acido sulfúrico
- ✓ Recomendar continuar con el empleo del acero ASTM A-106 u otro material de mejores prestaciones mecánicas y mayor resistencia al medio corrosivo.

BIBLIOGRAFÍAS

1. Alfonso, E. Apuntes sobre la interrelación composición – microestructura y propiedades del acero. Monografía. ISBN 959 – 16 – 0188 - 3. Universidad de Matanzas. 2002.
2. Bengton, U., Design requeriments materials properties a basic for
3. materials selection. American society for testing. USA: 230 - 250, 1991

4. García, P; Casto, M., Metodología para la enseñanza práctica de soldadura por arco eléctrico. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1983. 256 p.
5. Guliaev, A. Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial MIR. 1983. p. 53 - 89.
6. Guliaev, A. Metalografía. Tomo II. Moscú. Editorial MIR. 1983. p 17 – 22.
7. Guliar, A. P. Metalografía, Tomo 1 y 2. Editorial. MIR MOSCÚ. 1978.
8. EL- Hebeary, R., Shennawy, M. y Abdel - Aziz, A., "Control del Riesgo dle Hidrógeno Inducido en grietas de la Soldadura del Acero, 2004 IIW. Congreso Internacional, 19 - 33, Cairo, Egipto 2004
9. García, P y Casto M. Metodología para la enseñanza práctica de soldadura por arco eléctrico. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1983. 256 p.
10. Gedeon, S. A., Eagar, T. W. Análisis termodinámico de la absorción del hidrógeno en la soldadura. Revista de soldadura. Julio 264s - 271s. 1990.

11. Giraldo, J. E. y Chaves, C. A. El agrietamiento Inducido por Hidrógeno en Soldadura de Acero, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia, 2000.
12. González, Vázquez. Manual de Soldadura a Fuego. Plátano Editora. Lisboa. 1978. 198 pp.
13. James M. R. in Handbook of Measurement of Residual Stresses, Edited by J. Lu, Society for Experimental Mechanics, Inc., pp. 1-4. 1996

14. Kedzierzawski, P., "Hydrogen Trapping in Iron and Iron Alloys", Hydrogen Degradation of Ferrous Alloys, 1st. Ed., Noyes Publications, 271 - 288, New Jersey, USA. 1985

15. Lamber A. y Herrero E. Libro de registro de datas y averías. Planta de Hornos de Reducción: Empresa Comandante Ernesto Ché Guevara. Moa, Cuba. 2000-2006
16. Macherauch E. y Kloos K. H. Conferencia en ciencia y tecnología de tensiones residuales. Vol. 1, Garmisch-Partenkirchen, DGM-Verlag, Oberursel, pp. 3 - 26. 1986
17. TERIALES. Bohler special steel manual for PC. Versión 1.1. 1996.
18. Ramírez, G. E. introducción a la técnica de ensayo no destructivos, Ed. Instituto Nacional de técnicas aeroespaciales, Madrid, 1980
19. Rodríguez, I. R, Fernández, T. C, Llaca, I. M. Comportamiento de la resistencia mecánica en tubos, de materiales dúctiles, con agujero, empleando técnicas MEF. IV C. C. I. M. Habana. Cuba. 2006.
20. Varela, A. Presentación de Metalurgia Física II. Octubre de 2003.Disponible en el World Wide Web. http://www.metallography.com/bboard/forum.htlm
21. Wilson, W. G. Minimicion de las grietas laminares mediante la elevación de la ductilidad en la dirección Z. Welding. Journal. Nro 11. 1974
22. Taylor, L. G. Aspectos Metalúrgicos de las propiedades mecánicas de metales soldados. Weld and Metal const. Nro 5. 1975
23. Varela, A. Presentación de Metalurgia Física II. Octubre de 2003.Disponible en el World Wide Web. http://www.metallography.com/bboard/forum.htlm
24. Rodríguez, H. Metalurgia de la Soldadura. Edit Pueblo y Educación 1983. 613 pp.
25. Hernández, G., Manual del soldador, Madrid CESOL, decimoquinta edición, 2006.

26. Pástor, M., Introducción a la Metalurgia de la Soldadura. Ecuador: Editorial ESPOCH, 2002. p.56.
27. Oystein Grong, Modelación Metalúrgica de la soldadura. 2da Ed. P 509 – 526. Instituto de Materiales, Londres, Inglaterra. 1994.
28. Maroef, I.; Olson; D. L., Eberhart; M., y Edwards; G. R. Hidrógeno atrapado en la soldadura de un acero ferrítico. Revisión Internacional de materiales. 47(4), 191-223. 2002. Mathar J. Transaccions ASME, 56, (4), pp. 249 - 254. 1934.

29. NANGEL, D. *Tensión y propiedades de deformación de aceros estructurales en la dirección del espesor*. Metal Const. No 2, Vol. 64. 1969.
30. NICHOLLS, D. M. *Grietas laminares en Aceros Laminados en Caliente*. Brit. Welding Journal. Nro 3, Vol. 15. 1968.
31. PEARCE J.T.H. *Trans*. AFS, 92, 599-622, 1984.
32. RADULOVIC, M.; FISET, M.; PEEV, K.; TOMOVIC, M. J. *Mater*.Sci., 29,5085-5094; 1994
33. ROUSSELIER, G. *Ductile fracture models and their potencial in local approach of fracture*. Nuclear Engineering and Design 105 (1987) 97{111.
34. REIFSNIDER, K.L. *Fatigue of composite materials.* Amsterdam: Elsevier, 1991
35. SARE, I.R. *Abrasion Resistance and Fracture Toughness of White Cast Irons Metals.* Technology 412-419; November 1995.
36. SENDECKYJ, G.P. *Life prediction for resin-matrix composite materials*. *En Fatigue of composite materials*, editado por K.L. Reifsnider El sevier, 1999.

37. SMITH, W. F. *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales.* Madrid: Mc Graw Hill, 1998.

38. MANUAL DE OPERACIONES DE LA ETE, 2001

39. MEJIA I.; MALDONADO C. *Determinación de Esfuerzos Residuales en la soldadura de placas de acero Inoxidable austenítico mediante el Método de Hole Driling*. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michuacana de San Nicolás de Hidalgo. XV congreso Nacional de Soldadura. Querétaro, México.2004.

40. MEYER, H. J. *Grietas Laminares en Construcciones Soldadas*. II Conf. On Significance of Defecte in Welds, Welding Inst. London.1968.

41. MOLINARI, A.; MUSQUAR, C.; SUTTER, G. *Adiabatic shear banding in high speed ma-chining of Ti 6Al-4V: Experiments and modeling*, International Journal of Plasticity 18 (2002) 443{459.