

Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Departamento de Metalurgia Electromecánica

Trabajo de Diploma

En opción al Título de Ingeniero Mecánico

Título: Agrietamiento en la tubería de titanio para el transporte de pulpa lixiviada de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba.

Autor: Yoennis Pérez Castillo

Tutores: M Sc. Ing. Geovany Ruiz Martínez

Moa -2013

“Año 55 del Triunfo de la Revolución”



Declaración de Autoridad

Yo: Yoennis Pérez Castillo

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

Autor: Yoennis Pérez Castillo

Ms. C. Geovany Ruíz Martínez



PENSAMIENTO

El porvenir del país está ligado directamente al desarrollo de la ciencia y la técnica. Nunca podemos caminar con nuestros propios pies, mientras no tengamos una tecnología avanzada, basada en una técnica propia, en una ciencia propia. Por ello, la tarea de crear ingenieros es importante...

Ernesto Che Guevara.



DEDICATORIA

Cuando se culmina una meta deseada y se desea imponer momento de alegría, solo se debe tener presente a aquellas personas que con su dedicación y amor contribuyeron a la realización de esta.

En forma de agradecimiento y virtud del bello esfuerzo que esas personas realizaron en aras de mi bienestar, dedico este sueño:

A Esmerida Castillo Torreblanca (mi madre), por el amor que le tengo y por su incansable lucha ante las dificultades que la vida nos guarda, a ella que le debo todo lo que soy mientras viva.

A Magdaleno Pérez Mustelier (mi padre), por toda la confianza que ha depositado en mí y porque me ha servido de ejemplo en la vida.

A mis hermanas por el grandioso amor que les tengo, por todo lo que representa para mi vida, al igual que toda mi familia.

A mi queridos hijos, Rosalía Melisa Pérez Prometa y Giovanni Pérez Prometa para que le sirva de ejemplo en la vida.

A todas las personas que de una forma u otra me brindaron su ayuda y confiaron en mí en todo momento.



AGRADECIMIENTOS

Una obra se encuentra culminada solo cuando el conjunto de ideas, enfoques y un arduo trabajo han logrado vencer las adversidades del tiempo. Pero solo con valiosas colaboraciones es posible transitar por un camino de grandes contratiempos. De esta forma les doy mis gratos agradecimientos:

A mis padres por el constante aliento que me brindaron en todo momento de mi carrera.

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 y en especial a Yoelvis.

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

A mis amigas Carmen Maday y Yailin por el valioso tiempo que me brindaron.

A mi tutor Ms. C. Geovany Ruíz Martínez por toda la ayuda que me brindaron durante el desarrollo de este trabajo.

A todos los profesores que en mí formaron un profesional de estos tiempos por la ayuda desinteresada que me supo brindar.

A todas esas personas que sus nombres no están en esta página, pero que siempre vivirán en mi corazón.

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

Gracias a todos ustedes.



RESUMEN

En el presente trabajo de diploma se realiza un análisis de las causas que originan la rotura en los tramos tubulares de titanio, empleados para transporte de pulpa lixiviada desde la planta de lixiviación hasta lavadero. Para ello se realizó un extensivo análisis de los trabajos publicados sobre las aleaciones de titanio, lo cual permitió obtener las propiedades mecánicas de la aleación de titanio Ticp99 de grado dos.

Además se hizo análisis metalográfico de la unión, en el metal de depósito, zona afectada térmicamente y en el material base en las tuberías; se lleva a cabo el cálculo de la resistencia mecánica de la tubería y se realizó la simulación del comportamiento del material durante el transporte de pulpa lixiviada, los cuales se corroboraron a través de la simulación por medio del método de los elementos finitos (MEF).

Se demostró que los tramos de titanio son capaces de soportar los niveles de tensiones que se generan producto a las cargas externas y a la corrosión generada por el medio.

Las causas que originan las roturas en los tubos están asociadas a la abrasión generada por los productos químicos que arrastra la pulpa lixiviada (H_2SO_4).



Summary

Presently diploma work is carried out an analysis of the causes that originate the break in the tubular tracts of titanium, employees for pulp transport leached from the Leach plant until CCD. For it was carried out it an extensive analysis of the works published on the titanium alloys, that which allowed to research the mechanical properties of the titanium alloy grade Ticp99 two.

Metallographic analysis for union was also made, in deposit metal, area affected thermally and in the material it bases on the pipes; it is carried out the I calculate of the mechanical resistance of the pipe and one carries out the simulation of the material during the transport of leached pulp, which were corroborated through the simulation by means of the elements finite method (MEF).

It was demonstrated the titanium tracts are able to support levels of tensions they are generated product for external loads and corrosion generated by the mean.

The causes that originate the breaks in the tubes are associated to the abrasion generated by the chemical products that it drags the leached (H_2SO_4) pulp.



ÍNDICE

Contenido	Págs.
Introducción	1
Capítulo I Marco teórico de la investigación.	4
1.1- <i>Introducción.</i>	4
1.2- <i>Flujo Tecnológico de la planta lixiviación</i>	5
1.3- <i>Generalidades del Titanio.</i>	6
1.4- <i>Características del Titanio.</i>	7
1.4.1- <i>Característica mecánica.</i>	8
1.5- <i>Aleaciones de titanio.</i>	8
1.6- <i>Estructura y propiedades del titanio y sus aleaciones.</i>	10
1.7- <i>Zonas estructurales de la unión soldada .</i>	13
1.8- <i>Defectos en la soldadura del titanio.</i>	16
1.9- <i>Corrosión en el Titanio.</i>	17
1.10- <i>Conclusiones.</i>	18
Capítulo II Materiales y métodos	19
2.1- <i>Introducción</i>	19
2.2- <i>Fundamentación de las propiedades a investigar</i>	19
2.3- <i>Selección y preparación de muestras.</i>	20
2.4- <i>Pulido de las probetas.</i>	20
2.5- <i>Ataque químico</i>	21
2.6- <i>Análisis metalográfico.</i>	21
2.7- <i>Características principales de las microestructuras del titanio.</i>	22
2.8- <i>Propiedades del titanio.</i>	23
2.9- <i>Cálculo de la resistencia mecánica en tuberías de titanio.</i>	24
2.10- <i>Modelación y simulación por el Método de Elementos Finitos.</i>	27
2.10.1- <i>Simulación por el Método de Elementos Finitos del proceso de soldadura.</i>	27



2.10.2-	Condiciones y parámetros establecidos.	28
2.10.3-	Algoritmo para la simulación (ANSYS versión 11.0).	28
2.11.-	Conclusiones	29
Capítulo III	Análisis de los resultados.	30
3.1-	<i>Introducción.</i>	30
3.2-	Resultado de las pruebas de dureza.	30
3.3-	<i>Observación con microscopía óptica</i>	31
3.4-	<i>Resultados obtenidos en el cálculo de la resistencia mecánicas en tuberías de titanio</i>	34
3.5	<i>Simulación por el Método de Elementos Finitos del proceso de soldadura.</i>	35
3.6-	<i>Valoración económica.</i>	38
3.7	<i>Impacto Medio Ambiental</i>	38
3.7.1	Daños que causa al organismo humano.	39
3.7.2	Tratamiento y antídoto.	39
3.8	Conclusiones	40
	<i>Conclusiones Generales</i>	
	<i>Recomendaciones</i>	
	<i>Bibliografía</i>	



INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial de las tecnologías en el campo de la industria de níquel, exigen cada vez más disminuir los consumos de portadores energéticos y que cada unas de las instalaciones de la industrias sean más eficientes.

Hoy en día se encuentra enfrascada en dos grandes cambios: el de modernización de sus plantas, con el objetivo de disminuir los costos de producción de cada tonelada de níquel, y el perfeccionamiento empresarial para hacerla más competitiva en el mercado internacional.

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 zona de influencia térmica (ZIT) .

En la revisión bibliográfica realizada, de tecnologías empleadas para la soldadura del titanio, 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. 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 de las fallas en tuberías estuvieron relacionadas a defectos de soldadura



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 pulpa lixiviada

Campo de acción: Agrietamiento en tubos soldados

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

Si se realiza el análisis de resistencia mecánica y micro estructural será posible caracterizar la rotura de los tramos de tuberías de titanio que trasiega pulpa desde lixiviación hasta la planta de lavado. 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 zona de influencia térmica (ZIT) del titanio.

Y se definen los siguientes **Objetivos Específicos**

1. Definir las regularidades del comportamiento mecánico y micro estructural de la Zona fundida (ZF) y Zona de Influencia Térmica (ZIT), del titanio sometido a proceso de soldadura.
2. Analizar el procedimiento tecnológico de soldadura del titanio sometido a medio agresivo.
3. Analizar los factores que provocan el agrietamiento en el titanio 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 micro estructural del titanio 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 micro estructural del titanio en las Zona Fundida y la Zona de Influencia Térmica.
4. Análisis de los resultados y fundamentación del mecanismo de obtención micro estructural de la ZF y la ZIT del titanio durante el proceso de soldadura en línea de tubería con medios agresivos.
5. Realización de la simulación mediante el empleo de los Métodos de Elementos Finitos

Aseguramientos

1. Materiales de Oficina
2. Medios de computación
3. Equipos de Protección Personal
4. Software para la simulación(ANSY 11.0, programas CAD)
5. Muestras de los materiales



CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1- Introducción.

El desarrollo de unas series de ramas de la industria ha llevado a la utilización de nuevos materiales entre los cuales el Titanio ocupa uno de los primeros lugares.

El Titanio técnicamente puro es magnético por eso durante su soldadura visiblemente disminuye la desviación del arco por magnetismo.

El titanio proporciona excelente resistencia a la corrosión, alta relación resistencia/peso y propiedades favorables a temperaturas altas, resistencia de hasta 1 400 MPa, proporciona las excelentes propiedades mecánicas, mientras que una capa protectora adherente de TiO_2 confiere una excelente resistencia a la corrosión y a la contaminación por debajo de 535 °C. A temperaturas superiores a 535 °C, la capa de óxido se desintegra y átomos pequeños como los de carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno al difundirse hacia el sólido, fragilizan al titanio (Pero-Sanz, 2000 y Apraiz, 1975).

Por varios años el titanio, no pudo ser utilizado en el área comercial. De hecho, hasta el día de hoy, es un metal extremadamente caro. El símbolo del titanio Ti, es número 22 y se sitúa en el grupo número cuatro. Las propiedades físicas del titanio, son muy parecidas a la de los aceros. Posee una gran firmeza y dureza, al igual que una muy baja corrosión frente a químicos y al medio ambiente. Su principal uso se da en las expediciones aeroespaciales. Ya que aquella industria, es capaz de solventar el gasto del titanio. Debido a los altos presupuestos destinados por los gobiernos que poseen la tecnología necesaria para colocar un cuerpo en el espacio. La gracia del titanio, aparte de sus características técnicas, como ser buen conductor de la electricidad y el calor, bajísimo nivel corrosivo frente a químicos y otros agentes, está el hecho que es bastante más ligero que la mayoría de los metales. (Pero-Sanz, 2000 y Apraiz, 1975). El titanio es alotrópico con una estructura CCB por arriba de 882°C. Los elementos de aleación combinan la temperatura de transformación alotrópica y pueden dividirse en cuatro grupos. Ciertas adiciones como las de estaño producen un endurecimiento por solución sólida sin afectar la temperatura de transformación. El aluminio, el



oxígeno, el hidrógeno y otros elementos alfa estabilizadores incrementan la temperatura a la cual alfa se transforma en beta. Los beta-estabilizadores como el vanadio, el tantalio, el molibdeno y el niobio abaten la temperatura de transformación, causando incluso que la fase beta sea estable a temperatura ambiente. Finalmente, el manganeso, el cromo y el hierro producen una reacción eutectoide, reduciendo la temperatura a la cual ocurre la transformación alfa-beta, y produciendo una estructura difásica a temperatura ambiente.

El objetivo de presente capítulo es:

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

1.2- Flujo Tecnológico de lixiviación.

En esta planta comienza el proceso metalúrgico del mineral laterítico después de haber recibido el tratamiento físico en las plantas de Pulpa y Espesadores. La planta de lixiviación como su propio nombre lo indica es la encargada de lixiviar la pulpa por medio de un agente químico, que en este caso es el ácido sulfúrico (H_2SO_4), donde se efectúa la disolución de los óxidos de níquel y cobalto fundamentalmente, es decir donde se separan de los demás elementos que componen el mineral con vista a la extracción del níquel y cobalto en forma de sulfatos. Este proceso se efectúa bajo condiciones específicas y apropiadas de operación como son: temperatura, presión y otros factores que influyen y que determinan en este proceso. 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^2) 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 la cual traslada la pulpa mediante gravedad por una tubería hacia la planta de lavadero.



1.3- Generalidades del titanio.

Martin Kalproft, creador del nombre del titanio

El titanio (que recibe el nombre de titanos, tierra blanca en griego antiguo) fue descubierto en 1791 por William Gregor, al analizar un material que había encontrado. En 1795, el químico Martín Kalprotz, descubridor del uranio, le dio el nombre de titanio.

El titanio es un elemento químico de símbolo Ti y número atómico 22. Se trata de un metal de transición de color gris plata. Comparado con el acero, aleación con la que compite en aplicaciones técnicas, es mucho más ligero (4,5/7,8). Tiene alta resistencia a la corrosión y gran resistencia mecánica, pero es mucho más costoso que aquel, lo cual limita su uso industrial.

Es un metal abundante en la naturaleza; se considera que es el cuarto metal estructural más abundante en la superficie terrestre y el noveno en la gama de metales industriales. No se encuentra en estado puro sino en forma de óxidos, en la escoria de ciertos minerales de hierro y en las cenizas de animales y plantas. Su utilización se ha generalizado con el desarrollo de la tecnología aeroespacial, donde es capaz de soportar las condiciones extremas de frío y calor que se dan en el espacio y en la industria química, por ser resistente al ataque de muchos ácidos; asimismo, este metal tiene propiedades biocompatibles, dado que los tejidos del organismo toleran su presencia, por lo que es factible la fabricación de muchas prótesis e implantes de este metal.

El titanio fue declarado material estratégico por parte de Estados Unidos durante muchos años. Puede formar aleaciones con otros elementos, tales como hierro, aluminio, vanadio, molibdeno y otros, para producir componentes muy resistentes que son utilizados por las industrias aeroespacial, aeronáutica, militar, petroquímica, agroindustrial, automovilística y médica.

El titanio como metal no se empleó hasta 1946 en que William Justin Kroll desarrolló un método para poder producirlo industrialmente, reduciendo el $TiCl_4$ con magnesio. Este método, llamado Método de Kroll, se sigue utilizando



actualmente. En este proceso el metal se debe mantener en una atmósfera de gas inerte, como argón o helio, para impedir la reacción con otros elementos.[1]

En la década de 1950 y 1960 la Unión Soviética lo empleó en usos militares. En los EE. UU., el Departamento de Defensa (DOD) entendió la importancia estratégica del metal y durante la guerra fría el gobierno estadounidense lo consideró un material estratégico y las reservas de esponja de titanio fueron mantenidas por el Centro de Reservas.

1.4- Características del titanio.

El titanio no se encuentra libre en la naturaleza, los minerales que muestran una mayor concentración de este metal son el rutilo (TiO_2) y la ilmenita ($\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$), además de la anatasa y la brookita (ambas son también TiO_2).

Entre las características físicas del titanio se tienen las siguientes:

- ✓ Es un metal de transición.
- ✓ Su densidad o peso específico es de 4507 kg/m^3 .
- ✓ Tiene un punto de fusión de $1675 \text{ }^\circ\text{C}$ (1941 K).
- ✓ Su masa atómica es de $47,867 \text{ u}$.
- ✓ Es de color plateado grisáceo.
- ✓ Es paramagnético, es decir que presenta ligera susceptibilidad a un campo magnético.
- ✓ Forma aleaciones con otros elementos para mejorar las prestaciones mecánicas.
- ✓ Es resistente a la corrosión.
- ✓ Refractario.
- ✓ Tiene conductividad térmica y eléctrica: es muy buen conductor del calor y de la electricidad.

1.4.1- Características mecánicas.

Entre las características mecánicas del titanio se tienen las siguientes:



- ✓ Mecanizado por arranque de viruta similar al acero inoxidable.
- ✓ Permite fresado químico.
- ✓ Maleable, permite la producción de láminas muy delgadas.
- ✓ Dúctil, permite la fabricación de alambre delgado.
- ✓ Duro. Escala de Mohs 6.
- ✓ Muy resistente a la tracción.
- ✓ Gran tenacidad.
- ✓ Permite la fabricación de piezas por fundición y moldeo.
- ✓ Material soldable.
- ✓ Permite varias clases de tratamientos tanto termoquímicos como superficiales.
- ✓ Mantiene una alta memoria de su forma.

1.5- Aleaciones de titanio.

Para obtener titanio puro, a partir de los minerales que lo contienen se utiliza mayoritariamente el llamado Método de Kroll, que consiste en la reducción de tetracloruro de titanio con magnesio, en una atmósfera de argón que impide su oxidación.

Comercial y técnicamente existen muchas aleaciones de titanio. Las aleaciones más conocidas son las siguientes:

Ti grado 2, tiene la siguiente composición química: **TiFe(0,25-0,30)** Es conocido como titanio comercial puro. Tiene una resistencia a la tracción de 345 MPa, un límite elástico de 275 MPa, una ductilidad del 20% una dureza de 82 HRB, se puede soldar y una resistencia eléctrica de 0,56 ($\mu\Omega\text{m}$). Sus principales aplicaciones son campos donde se requiere resistencia a la corrosión y conformabilidad como las tuberías, intercambiadores de calor, etc.

Ti grado 5, conocido como Ti6Al4V, tiene un porcentaje del 6% de aluminio y un 4% de vanadio. Es la aleación de titanio más utilizada, sobre todo, en el campo de la aeronáutica, en el de la biomedicina o la estomatología. Tiene una resistencia a



la tracción de 896 MPa, un límite elástico de 827 MPa, una ductilidad del 10% una dureza de 33 HRB una soldabilidad muy buena y una resistividad eléctrica de 1,67 ($\mu\Omega\text{m}$). Sus aplicaciones son donde se requiera alta resistencia mecánica y altas temperaturas como en (tornillería y piezas forjadas).

Ti grado 19, tiene la siguiente composición química **Ti₃Al₈V₆Cr₄Zr₄Mo** (Beta-C) Tiene una resistencia a la tracción de 793 MPa, un límite elástico de 759 MPa una ductilidad de 15% una dureza de 45 HRB una soldabilidad regular y una resistividad de 1,55 ($\mu\Omega\text{m}$). Sus aplicaciones son donde se requiera alta resistencia a la corrosión y a la temperatura ((Aplicaciones marinas y motores de aviones).

Ti6246 Tiene la siguiente composición química: **Ti₆Al₂Sn₄Zr₆Mo**, Tiene una resistencia a la tracción de 1172 Mpa, un límite elástico de 1103 Mpa una ductilidad del 10% una dureza de 39 HRB una soldabilidad limitada y una resistividad eléctrica de 2 ($\mu\Omega\text{m}$) Sus aplicaciones son donde se requiera alta resistencia mecánica obtenida por temple.

Las especificaciones ASTM (American Society for Testing and Materials) clasifican las diferentes presentaciones del titanio.

Los más utilizados son los siguientes:

- ✓ Ti grado 1, 2, 3 y 4 incluyen el llamado titanio puro con una composición superior al 99% de Ti.
- ✓ Ti grado 5 y 9 son aleaciones resistentes a la corrosión y una resistencia mecánica media.
- ✓ Ti grado 7, 11 y 12 son aleaciones muy resistentes a la corrosión.
- ✓ La aleación Ti Beta-C es una aleación muy resistente a la corrosión y a la temperatura.
- ✓ Las normas ASTM fijan las utilidades del titanio y sus aleaciones:
- ✓ ASTM B265: fleje, pletina y chapa.
- ✓ ASTM B263: accesorios soldados y sin soldadura.



- ✓ ASTM B348: barras y palanquillas.
- ✓ ASTM B367: piezas de fundición.
- ✓ ASTM B381: forjados.
- ✓ ASTM B861: tubería sin soldadura.
- ✓ ASTM B862: tubería soldada.
- ✓ ASTM B863: hilo y alambre.

1.6- Estructura y propiedades del titanio y sus aleaciones:

El titanio posee dos modificaciones alotrópicas: hasta 882 °C existe el titanio, que tiene una red hexagonal ($a=2,9503 \text{ Kx}$ y $c=4,8631 \text{ kx}$), y a una temperatura mayor, el titanio con una red cúbica centrada ($a=3,3132 \text{ kx}$).

Las impurezas dañinas para el titanio son el nitrógeno, carbono, oxígeno e hidrógeno, que forman con él una solución intersticial. El nitrógeno y el oxígeno aumentan la solidez, pero disminuyen sensiblemente la plasticidad. El carbono en cantidades superiores a un 0,1- 0,15% baja la forjabilidad y el elaborado por corte y empeora violentamente la soldabilidad del titanio y sus aleaciones. El hidrógeno aumenta fuertemente la sensibilidad del titanio y sus aleaciones a la entalladura; Este defecto se denomina fragilidad hidrogenada del titanio.

El titanio se puede someter al elaborado por presión en caliente y en frío. Tiene perfecta soldabilidad (en soldadura al arco en argón o helio), pero mala maquinabilidad por corte (en comparación con el acero). En la superficie del titanio se forma una resistente película del óxido, por eso el titanio posee una alta resistencia a la corrosión en agua de mar y en algunos ácidos.

Las aleaciones del titanio en comparación con el titanio puro poseen propiedades mecánicas más altas, una mayor resistencia al arrastre (creep), un alto límite de fatiga y una mayor resistencia a la corrosión. Por eso las aleaciones de titanio han obtenido un empleo más amplio en la industria en comparación con el titanio puro.

Los titanios α y β con cromo, hierro, manganeso, molibdeno, estaño y vanadio forman soluciones sólidas de sustitución. Esto elemento aumentan el límite de



rotura del titanio, pero bajan la plasticidad. Los elementos, que se introducen en el titanio, se diferencian por su acción en la temperatura de transformación $\alpha \leftrightarrow \beta$. El aluminio, así como el oxígeno y el nitrógeno, aumentan la temperatura de transformación $\alpha \leftrightarrow \beta$ y se denominan estabilizadores α (por que esto ensanchan la zona α en el diagrama de estado). El estaño y el circonio no influyen prácticamente en la temperatura de transformación alotrópica; estos elementos se llaman endurecedores neutros.

El cromo, hierro, molibdeno y vanadio disminuyen la temperatura de transformación $\alpha \leftrightarrow \beta$ y ensanchan la zona de existencia de la fase β - estabilizadores β . Además, en las aleaciones de titanio con manganeso, hierro, como y otros elementos, tiene lugar la desintegración eutectoide de la fase β y se forma los compuesto ínter metálicos TixMey. El empleo práctico obtuvieron las aleaciones de estructura $\alpha + \beta$ y α . Las aleaciones a base de titanio β no se emplean, porque sus propiedades dependen fuertemente de la influencia de las impurezas que impurifican la aleación en el proceso de su producción.

Las aleaciones a base de titanio α se sueldan en buena forma, tienen una plasticidad normal y se pueden elaborar por corte. Las aleaciones $\alpha + \beta$ tienen altas propiedades mecánicas y buena plasticidad. Todas la aleaciones pertenecen al grupo $\alpha + \beta$, excepto la aleación VT5 - 1 que pertenecen a las aleaciones α . por las propiedades de solidez las aleaciones de titanio en amplia forma superan a las aleaciones a base de cobre y aluminio y no ceden antes las aleaciones de acero ligados.

Las aleaciones de titanio se pueden emplear en calidad de resistentes al calor (hasta una temperatura de 500 - 550 °C), sustituyendo a las aleaciones de aluminio y al acero; con esto disminuye la masa de las construcciones.

Una combinación de una densidad insignificante y alta solidez determinó un amplio empleo de las aleaciones de titanio para la aviación. El coeficiente pequeño de dilatación lineal de las aleaciones de titanio ($\alpha=8,0-8,5 \times 10^{-6}$ mm/mm) permite disminuir las tolerancia térmicas en los motores y las tensiones térmicas durante el calentamiento del revestimiento de los aparatos volantes. La falta del magnetismo



de las aleaciones de titanio excluye la acción negativa de las construcciones metálicas en los instrumentos de navegación.

Muchas aleaciones de titanio poseen una alta plasticidad a bajas temperaturas, lo que la hace aplicables para la técnica criogénica. La alta resistencia a la corrosión de las aleaciones de titanio permite recomendarla para la fabricación de tanques, filtros, serpentines, autoclaves, conductos, intercambiadores de calor y otras piezas en la industria química y alimenticia.

La industria constructoras de barcos emplea el titanio y sus aleaciones para la fabricación de aparatos de mar, bombas, para el revestimiento de los casco de buque y alas submarina de barcos fluviales y marítimos.

Las aleaciones de titanio se fabrican comúnmente en forma de chapa, redondos, piezas forjadas y estampadas. El intervalo de temperatura del elaborado por presión es 850- 1100 °C para las aleaciones VT8 y de 850 - 1050 °C para VT3 - 1. La deformación en frío del titanio y sus aleaciones aumenta considerablemente la solidez, pero disminuye la plasticidad. Casi todas las aleaciones de titanio deformables se pueden emplear en calidad de funciones, porque ésta posee buenas propiedades de fundición y conservan una plasticidad suficiente en estado fundido. No raramente, para la fundición se emplea la aleación VTL - 1 (5,0% de Al y 1,0% de Si).

Para aumentar la plasticidad después de la formación y para aumentar la estabilidad térmica, es decir la propiedad de conservar invariables las propiedades mecánicas bajo la acción de las tensiones de trabajo y de la temperaturas, las aleaciones de titanio se someten a reconocido. Para la aleación VT - 1 se recomienda emplear un recocido doble: a 870 y 659 °C. La aleación VT8 se reconoce a 920 y, posteriormente a 590 °C. El tiempo de calentamiento de la aleación durante el recocido depende de las dimensiones de la pieza y de los semiproductos. Para eliminar las tensiones internas, que surgen durante el tratamiento mecánico, el estampado en chapas, soldadura y otro tipo de tratamiento, las pieza son sometidas a recocido a 550 - 620 °C.



Para eliminar el endurecimiento, los semiproductos en chapas se someten a recocido a 650- 750 °C. El tiempo de recocido es de 20 a 60 min. En dependencia de las magnitudes del semiproducto. El enfriamiento durante el recocido se efectúa generalmente al aire. Las aleaciones del titanio se calientan en hornos eléctricos con atmósfera controlada.

Muchas aleaciones de titanio que contienen elementos que la ensanchan la fase β (por ejemplo, VT3 y VT8), pueden ser endurecidas por temple con envejecimiento posterior. Para el temple las aleaciones se calientan hasta 880 (VT3 - 1) – 950 °C (VT8). Durante el temple se fijan las martensitas meta estables de la fase α (α') y β que se desintegran como resultado del envejecimiento posterior a 500 - 600°C, formando partículas dispersa de la fases endurecedores. La matriz, como también las fases endurecedoras es una variación de soluciones sólidas a base de titanio.

Las aleaciones del titanio poseen bajas propiedades de antifricción. Para aumentar la resistencia al desgaste se recomienda el nitrurado a 850 - 950 °C en atmósfera de nitrógeno libre de oxígeno. La dureza de la capa nitrurada es de 1100 - 1200 HV.

1.7- Zonas estructurales de la unión soldada.

La soldadura de titanio por resistencia de un espesor dado se efectúa con las mismas maquinas y con los mismos ajustes que los empleados para espesores similares de acero inoxidable. Debido a la corta duración del ciclo de soldado, se hace innecesaria proteger con gas inerte las partes a soldar.

Las condiciones indispensables son una extremada limpieza del metal, una protección efectiva con gas en las zonas afectadas por el calor y un enfriamiento rápido. El titanio no puede ser soldado a otros metales debido a la formación de compuestos intermetalicos frágiles en la zona de fusión, aunque si puede ser unido a otros metales mediante el empleo de técnicas de plaqueados por explosión. (Rodríguez, 1987 y Seferian, 1983).

Durante la soldadura existe un proceso térmico inestable, en el cual la cantidad de calor procedente de la fuente de calor (proceso de soldadura) es mayor que la cantidad de calor que se evacua mediante la conductividad térmica, por lo que



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

La necesidad de limitar la temperatura de soldadura del titanio y sus aleaciones está vinculada con la gran velocidad de crecimiento de los granos y la fragilización, cuando en la aleación está presente el oxígeno, a temperaturas por encima de 1000-1050⁰ C, por ello, como bases para las aleaciones al soldar titanio se emplean metales con puntos de fusión medios: aluminio, plata, así como el estaño, que forman con el titanio compuestos químicos con puntos suficientemente bajos de fusión, ricas en titanio, con adiciones de cobre, níquel, silicio. Al soldar titanio y sus aleaciones mediante estos metales de aportación, en la costura pueden formarse capas intermedias de compuestos químicos y eutexias frágiles que contienen estos compuestos. Como resultado de esto, en el metal a soldar no se observa la erosión química intercrystalina, pero puede surgir la tendencia a fragilización de dicho metal durante la soldadura (Rodríguez y Burgos, 1987).

El titanio es alotrópico con una estructura CCB por arriba de 882°C. Los elementos de aleación combinan la temperatura de transformación alotrópica y pueden dividirse en cuatro grupos. Ciertas adiciones como las de estaño producen un endurecimiento por solución sólida sin afectar la temperatura de transformación. El aluminio, el oxígeno, el hidrógeno y otros elementos alfa estabilizadores



incrementan la temperatura a la cual alfa se transforma en beta. El beta-estabilizadores como el vanadio, el tantalio, el molibdeno y el niobio abaten la temperatura de transformación, causando incluso que la fase beta sea estable a temperatura ambiente. Finalmente, el manganeso, el cromo y el hierro producen una reacción eutectoide, reduciendo la temperatura a la cual ocurre la transformación alfa-beta, y produciendo una estructura difásica a temperatura ambiente.

Normalmente, la martensita de titanio se forma en las aleaciones alfa-beta con menos porcentaje de elementos aleantes (Guliaev, 1983, Pero-Sanz, 2000 y Callister, 1999), mientras que la beta sobresaturada es retenida más fácilmente en las aleaciones más cercanas a las aleaciones enteramente de fase beta. La martensita de titanio tiene típicamente una apariencia acicular. Durante el envejecimiento, la fase alfa se precipita en una estructura Widmanstätten que mejora las propiedades a la tensión así como la tenacidad de la aleación.

Las propiedades del titanio están relacionadas directamente con la microestructura. Las aleaciones de fase única son soldables con buena ductilidad, algunas de dos fases son soldables también, pero sus partes soldadas resultan menos dúctiles. Las aleaciones bifásicas alfa-beta son más fuertes que las unifásicas alfa, principalmente por que la beta BCC es más fuerte que la alfa HCP. Lo más importante es que las aleaciones bifásicas pueden fortalecerse mediante tratamiento térmico, porque la microestructura puede manipularse si se controla el calentamiento, el templado y los ciclos de envejecimiento (Glizmanenco, 1975).

La capa protectora que presenta el titanio lo hace insoldable por el proceso manual por arco eléctrico (S.M.A.W) con procedimientos normales, por lo que para obtener una unión con calidad se emplea el proceso T.I.G. El procedimiento T.I.G, puede ser utilizado en uniones que requieran alta calidad de soldadura y en soldaduras de metales altamente sensibles a la oxidación (tales como el titanio y el aluminio).

Este es un proceso donde la unión de metales se realiza por el calentamiento con un arco entre el electrodo de tungsteno no consumible y la pieza. El electrodo, el



arco, el baño de soldadura y el área adyacente calentada de la pieza están protegidos de la atmósfera por un gas. La varilla de aporte puede o no añadirse, (Rodríguez y Burgos, 1987).

1.8- Defectos en la soldadura del titanio.

A la hora de afrontar la soldadura de piezas de titanio hay que tener en cuenta que si se supera la temperatura de fusión, puede sufrir una decoloración porque reacciona fácilmente en contacto con los gases atmosféricos. Esta decoloración puede suponer pérdida de ductilidad y de resistencia mecánica. Por lo tanto es muy importante que en la soldadura se proteja la zona de soldadura con gases inertes.

También perjudican la soldadura los contaminantes de las superficies a soldar, tales como óxido, polvo, limaduras y virutas, por lo que deben eliminarse por baño de decapación, mecanizado pulido o chorro de arena.

La soldadura debe limpiarse con paño de acetona o cepillo de acero inoxidable o titanio.

Algunas consideraciones a tener en cuenta que simplifican la soldadura del titanio son:

- ✓ Limpiar las partes a soldar y el material de aporte antes de comenzar a soldar. Para ello se recomienda utilizar acetona y evitar el uso de tricloroetileno.
- ✓ Sujetar firmemente las piezas a soldar, y no soldarlas provisoriamente por puntos, salvo que tome las mismas precauciones en cuanto a la cuidadosa protección que debe aplicarse en soldaduras de titanio.
- ✓ Siempre conviene realizar un ensayo de soldadura antes de intentar una soldadura de producción.
- ✓ Nunca utilizar electrodos recubiertos, pues el titanio se combina con todos los recubrimientos fluidos conocidos.
- ✓ Cuando sea posible, utilizar material de relleno un grado mas bajo que el metal a unir; por ejemplo: utilizar como relleno Ti-65A para unir piezas de Ti-75A.



1. 9- Corrosión en el Titanio.

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

Cortés (2004) asevera que el mecanismo de vaporización condensación, conjugados con los efectos de la velocidad y turbulencia del flujo de gas, actúan como aceleradores del proceso de corrosión. La velocidad tiene un efecto significativo en la corrosión de tubos de hornos y líneas de transferencia debido a la turbulencia provocada por el flujo bifásico (líquido vapor). Siendo el efecto aun mayor donde ocurre turbulencia provocada por barreras físicas, como en curvas, locales con exceso de penetración de soldadura, cambios de diámetro y bombas.

La extraordinaria resistencia del titanio frente a muchos medios corrosivos se debe a su excepcional capacidad de pasivación. Esto significa que el metal forma rápidamente una capa de óxido protector en contacto con el aire o soluciones oxidantes, que es inmediatamente restablecida en el caso de producirse una ruptura de la misma. El titanio es resistente a la mayoría de los medios oxidantes y en contraste con los aceros inoxidable resiste el cloro húmedo y soluciones conteniendo cloruros tales como dióxido de cloruro o hipoclorito de sodio. (Shreir, 1963 y Borenstein, 1994).

Su resistencia es igualmente excelente en agua de mar y otras soluciones neutras conteniendo cloruros incluso a altas temperaturas. Es sin embargo menos resistente en medios no oxidantes tales como ácido clorhídrico, fosforito, sulfúricos y algunos ácidos orgánicos, aunque en estos medios su resistencia mejora ostensiblemente con la adición de paladio. Sorprendentemente es atacado rápidamente por ciertos medios tales como cloruro seco (reacción explosiva), ácido nítrico turnante, peróxido de hidrogeno, fluor y gases o líquidos conteniendo este elemento. (Cortés 2004).

1.10- Conclusiones.

- ✓ En este capítulo se definieron las principales características del objeto de estudio y la influencia de algunos parámetros que intervienen la soldadura. En



la búsqueda de información se encontraron varios trabajos realizados, sobre la corrosión bajo tensiones del titanio, pero no abordaban este fenómeno en el transporte de pulpa lixiviada a través de tuberías.

- ✓ El titanio presenta una capa protectora que lo hace insoldable por el proceso manual por arco eléctrico (S.M.A.W), por lo que para obtener una unión soldada con la calidad requerida se emplea el proceso T.I.G (Tungsten Inert Gas).
- ✓ El proceso T.I.G tiene grandes ventajas para la soldadura del titanio por la estabilidad y la concentración del arco y por su calidad en el depósito del cordón.
- ✓ Durante el proceso de soldadura, debido a la cantidad de calor que se genera en el proceso existen cambios en las zonas afectadas por el calor (Z.A.C), trayendo variación en la estructura del metal base. Con el empleo del proceso T.I.G, se logra durante la soldadura del titanio una unión soldada con gran calidad, y cordones lisos y sin salpicaduras.



CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1- Introducción.

Emisiones fugitivas de los sistemas usados para transportar pulpa lixiviada desde las cajas distribuidoras hasta la planta de lavado. Estas emisiones pueden abarcar las pérdidas fugitivas por fugas en los equipos, venteo y emisiones debidas a rupturas en las tuberías.

El segundo capítulo desarrolla los procedimientos que permitan determinar el comportamiento del material de la tubería bajo las condiciones de trabajo dadas. Los conceptos fundamentales relacionados con análisis de las propiedades mecánicas, microestructural y por el método de elementos finitos (MEF).

Se describen las normas y procedimientos del proceso de experimentación. Al mismo tiempo se fundamentan las propiedades a investigar y se establecen los parámetros que caracterizan el mecanismo de rotura. Para lograr el estudio de la rotura de la tubería es necesario realizar experimentos como el ataque químico, análisis metalográfico, ensayos de dureza y diferentes cálculos de resistencia mecánica.

Objetivo del capítulo.

Fundamentar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones experimentales para la solución del problema.

2.2- Fundamentación de las propiedades a investigar.

Las roturas en las líneas de circulación para el transporte de pulpa lixiviada son de constante preocupación debido a las considerables pérdidas económicas y efectos secundarios que implican; por lo que se hace necesario definir las regularidades del comportamiento mecánico de los mismos. Dichas regularidades se caracterizan por rasgos peculiares de la aleación, el procedimiento de soldadura, el medio corrosivo en el que se encuentra y la variación de dureza producto a elevadas temperaturas.



Lo expuesto trae consigo el empleo de técnicas de ensayos para identificar el carácter de la rotura en las líneas de circulación para el transporte de pulpa lixiviada.

2.3- Selección y preparación de muestras.

Los registros de averías (Libro de registro de datas y averías, 2011- 2012), el seguimiento a la durabilidad de las partes de la líneas de circulación para el transporte de pulpa lixiviada y los resultados obtenidos en investigaciones previas, condujeron a establecer el criterio de selección y la línea a estudiar, según la frecuencia de rotura manifestada.

Se tomaron un total de cinco muestras provenientes de todas las zonas de rotura predominantes y algunas de las zonas con mayor durabilidad para comparar el comportamiento del material en ambas. Se tomaron muestras de material virgen perteneciente a planchas de titanio de una aleación de Ti cp99 grado 2 destinadas a la laminación de tubos, según el procedimiento establecido en la norma NC 04 - 75: 86. En todos los casos, las muestras se replicaron con un tamaño igual a tres. Luego se marcaron para su posterior identificación durante la investigación.

2.4- Pulido de las probetas.

En el pulido se emplearon lijas del tipo N°- 180, 400 y 600 según ISO 9001, dicho pulido se llevó a cabo con papel abrasivo montado 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, por último las muestras se pasaron en una pulidora metalográfica, para lograr el acabado final, en ella se utilizó un paño de fieltro grueso usando como sustancia abrasiva el óxido de cromo.

La observación de cada superficie analizada fue fotografiada para procesar la información, para esto se utilizó una cámara fotográfica digital.



2.5- Ataque químico.

El ataque químico se realiza con el objetivo de resaltar la estructura obtenida después de realizado el pulido hasta alcanzar el brillo de espejo, para observar la estructura metalográfica formada después de la soldadura.

Para este ataque químico se utiliza: Acido fluorhídrico (HF) 2ml, Acido nítrico (HNO₃) 2ml y Agua (H₂O) 90 ML con inmersión de las muestras durante 5 minutos. . Después de atacadas, las muestras se lavaron con agua destilada, se sumergieron en alcohol durante 5 segundos.

2.6- Análisis metalográfico.

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 500X y cámara de vídeo acoplada y tensión de aceleración entre 10 y 20 kV.



Figura 2.1 Microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM-100.



2.7- Características principales de las microestructuras del titanio.

Gracias a la transformación alotrópica del titanio, existe la posibilidad de obtener aleaciones con microestructuras de tipo α , β o α/β , dependiendo de los elementos aleantes que estabilizan una fase u otra.

Distintos tipos de aleación y sus características:

Aleaciones α : Microestructura de fase α . Buena resistencia a la fluencia a temperaturas moderadamente elevadas. No se le aplican tratamientos térmicos. Buena soldabilidad, no están afectadas por las operaciones de soldeo. Buena ductilidad y resistencia a la corrosión en ambientes reductores. Aleaciones más comunes; (Ti cp99, 2Ti-0, 2PdTi-0, 3Mo-0, 8Ni).

Desventaja: En el proceso de soldeo la contaminación con Fe baja las propiedades anticorrosión.

Solución: Soldeo en estado recosido para evitar la pérdida de endurecimiento por deformación.

Aleaciones β : Altos contenidos de estabilizantes de la fase β , pero su microestructura no es completamente monofásica. Buenas propiedades para el conformado por deformación plástica. Se pueden incrementar sus propiedades mecánicas con tratamientos térmicos de maduración con bajas temperaturas y altos tiempos. La mayoría son soldables, tanto en condición de recosido como de tratamiento térmico. Buena ductilidad.

Desventaja: Baja resistencia en estado bruto de soldeo.

Solución: Debe soldarse en estado de recosido, someter la soldadura a un martillado y a solubilización y envejecimiento.

Aleaciones α / β : Casi α : Estructura esencialmente α , mejoran sus propiedades mecánicas con tratamientos térmicos de envejecimiento o maduración. Buena resistencia a la fluencia en caliente.

Desventaja: Problemas de agrietamiento en secciones grandes.

Solución: Se debe aliviar tensiones después del soldeo.



Casi β : Tienen una estructura esencialmente β , mejora las propiedades mecánicas mediante tratamientos térmicos de envejecimiento.

Desventaja: Muy afectadas por el ciclo térmico de la soldadura. Baja ductilidad asociadas a transformaciones en la ZAT o en el metal de soldadura. Tendencia al agrietamiento de las aleaciones con altos contenidos en aleantes β -estabilizadores.

Solución: Soldar con aportes α o $\alpha+\beta$ para reducir la fase β en el cordón, lo que eleva la ductilidad de la soldadura. Tratamiento de alivio de tensiones posterior al soldeo y previo precalentamiento 150 a 175 °C.

2.8- Propiedades del titanio.

La Tabla 2.1 presenta las propiedades físicas a temperatura ambiente, para los grados del titanio 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 2.1. Propiedades físicas del Titanio.

Densidad.	[g/cm ³]	4,5
Conductividad Térmica.	W/M °C	19
Módulo de elasticidad.	[N/mm ²]	110 000
Resistencia eléctrica.	mm ² /m	0.57Ω
Calor específico.	[J/(kg.°C)]	530
Punto fusión.	°C	1 371 – 1 398
Coefficiente de dilatación.		9.4 x10

Tabla 2.2. Propiedades Mecánicas.

	Ti - 1	Ti - 2	Ti - 3	Ti - Pd
Limite elástico Rp 0.2 % N / mm ²	190	250	320	190
Carga de rotura Rm N / mm ²	290 - 410	390 - 540	460- 590	290- 410
Alargamiento A5	30%	22%	18%	30%
Resiliencia (DVM) J	60	35	25	60
Dureza Vickers aprx.	140	170	190	140

Tabla 2.3. Parámetros de la instalación.

Temperatura interior.	°K	408,15
Radio exterior de la tubería.	mm	152,5
Altura de descarga.	mm	4500
Altura de succión.	mm	2000
Temperatura exterior.	°K	394,15
Coefficiente de expansión térmica.	W/m ⁰ K.	9.5 x10 ⁻⁶
Coefficiente de elasticidad.	N/mm ²	275
Coefficiente de Poisson.		0.29
Radio interior de la tubería.	mm	150

2.9- Cálculo de la resistencia mecánica en tuberías de titanio.

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

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 (2.1).

$$\sigma_r = \frac{\alpha E (T_a - T_b)}{2(1 - \nu) \left(\ln \frac{b}{a} \right)} \left[\left(\frac{a^2}{b^2 - a^2} \right) \left(\frac{b^2}{r_m^2} - 1 \right) \ln \left(\frac{b}{a} \right) - \ln \left(\frac{b}{r_m} \right) \right] \quad (2.1)$$



$$p_1 = \rho_d \cdot g \cdot ht \quad (2.2)$$

donde:

ν . Coeficiente de Poisson 0.29.

P_1 . Presión a la cual se transporta el fluido, (MPa).

T_a . Temperatura interior, (408,15 K).

T_b . Temperatura exterior, (394,15 K).

b y a . Radio máximo y mínimo de la tubería; con valor de 152,5 y 150 mm respectivamente.

r_m . Radio medio de la tubería; igual a 151,24 mm.

α . Coeficiente de expansión térmica con valor de 9.5×10^{-6} W/m⁰K.

E . Coeficiente de elasticidad con valor de $1,1 \times 10^5$ N/mm².

Las tensiones a lo largo del eje z provocada por la dilatación lineal se calculan por la ecuación 2.2:

$$\sigma_z = \frac{\alpha E (T_a - T_b)}{2(1 - \nu) \left(\ln \frac{b}{a} \right)} \left[1 - \left(\frac{2a^2}{b^2 - a^2} \right) \ln \left(\frac{b}{a} \right) - 2 \ln \left(\frac{b}{r_m} \right) \right] \quad (2.2)$$

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

$$\sigma_{eq} = \sigma_z - \nu \sigma_r < [\sigma] \quad (2.3)$$

donde:

ν . Coeficiente de relación de tensiones admisibles.

$$\nu = \frac{[\sigma]_t}{[\sigma]_c} \quad (2.4)$$



donde:

$[\sigma]_t$. Tensión normal admisible a tracción en N/mm^2 .

$[\sigma]_c$. Tensión normal admisible a compresión en N/mm^2 .

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

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

$$\delta = \frac{\rho}{E} (\sigma_z - \mu \sigma_r) \quad (2.5)$$

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

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

$$\sigma_z p = \frac{p_1 a^2 \left(1 + \frac{b^2}{a^2}\right) - p_2 b^2 \left(1 + \frac{a^2}{a^2}\right)}{b^2 - a^2} \quad (2.6)$$

$$\sigma_r p = \frac{p_1 a^2 \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) - p_2 b^2 \left(1 - \frac{a^2}{a^2}\right)}{b^2 - a^2} \quad (2.7)$$

donde:

p_1 . Presión en el interior del tubo igual a 4,481 N/mm^2 .

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

La variación del radio interior del tubo es:



$$\Delta r_1 = \frac{a}{E} \left[p_1 \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \mu \right) - 2p_2 \frac{b^2}{b^2 - a^2} \right] \quad (2.8)$$

$$\Delta r_2 = \frac{b}{E} \left[2p_1 \frac{a^2}{b^2 - a^2} - p_2 \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} - \mu \right) \right] \quad (2.9)$$

donde:

Δr_1 . Variación del radio interior del tubo.

Δr_2 . Variación del radio exterior del tubo.

$$\delta = \frac{\rho}{E(b^2 - a^2)} \left\{ p_1 a^2 \left[1 + \frac{b^2}{a^2} - \mu \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \right] - p_2 b^2 \left[1 + \frac{a^2}{a^2} - \mu \left(1 - \frac{a^2}{a^2} \right) \right] \right\} \quad (2.12)$$

2.10 - Modelación y simulación por el Método de Elementos Finitos.

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

2.10.1- Simulación por el Método de Elementos Finitos del proceso de soldadura.

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

Las propiedades del material 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. Temperatura de fusión.
2. Conductividad térmica.
3. Coeficiente de expansión térmica.
4. Coeficiente de Poisson.
5. Capacidad de calor específico.
6. Módulo de dilatación.
7. Módulo de elasticidad longitudinal.
8. Módulo de elasticidad transversal.

2.10.2- Condiciones y parámetros establecidos.

Se elaboró un modelo geométrico equivalente al objeto investigado, el que se discretizó con elementos tetraédricos de nodos intermedios del tipo "SOLID93". Se establecieron, además, las condiciones de frontera siguientes: se consideró que el material es homogéneo e isotrópico. El módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson varían en función de la temperatura.

2.10.3- 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.



2.11- Conclusiones.

- ✓ Los métodos establecidos permiten evaluar la incidencia de dichas variables en el comportamiento mecánico y funcional del titanio, así como los posibles efectos de la interacción.
- ✓ 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 cola lixiviada es producto de las cargas externas o asociada al mal soldeo.



CAÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

3.1- Introducción.

En este capítulo se argumentan y desarrollan los aspectos más importantes del trabajo o sea los resultados obtenidos a partir de la metodología de cálculo de la resistencia mecánica y los resultados obtenidos en los diferentes experimentos realizados. 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- Resultado de las pruebas de dureza.

En el desarrollo de esta investigación se utilizó la prueba de penetración, por lo que es necesario analizar de una forma más extensa la forma en que se lleva a cabo. Las dos pruebas de penetración más utilizadas y reconocidas mundialmente son: Brinell y Rockwell, aunque también existen la prueba tipo Vickers y la prueba Knoop.

Para el análisis de dureza de los elementos tres penetraciones en dos de las probetas y bajo las siguientes condiciones:

1. Tipo de prueba penetración.
2. Escala Rockwell.
3. Penetraciones en la parte central de la probeta.
4. Condiciones atmosféricas (temperatura, medio ambiente).

A continuación se muestran los resultados que se obtuvieron del penetrador en cada una de las probetas:

Probeta del metal base:

Probeta de la soldadura:

Penetración 1: 82 HRB

Penetración 1: 85 HRB

Penetración 2: 82.5 HRB

Penetración 2: 86.5 HRB

Penetración 3: 83 HRB

Penetración 3: 87 HRB

Promedio: Dureza 83 HRB

Promedio: 87 HRB

Podemos apreciar que como consecuencia del calentamiento durante el proceso de soldadura, la dureza que se registra en el centro del cordón de la soldadura es superior a la del metal base y a la de la zona de influencia térmica (ZIT), lo que significa que en esta zona disminuye la ductilidad, tenacidad y se hace más sensible frente a medios corrosivos.

3.3- Observación con microscopía óptica.

Después de pulidas adecuadamente y atacadas químicamente las muestras, se procede a la observación en el microscopio óptico. Se montan las muestras en la platina y se comienza la observación cambiando la combinación de ocular y objeto hasta encontrar la adecuada. Estas observaciones se le realizaron a la unión soldada, en la zona afectada por el calor (ZAC) y deformada por soldadura.

En cada muestra de la unión soldada se ilustran fotografías tomadas con diferentes aumentos, a la microestructura del centro de la costura y de la Z.I.T., lo que permitió establecer el comportamiento microestructural de la aleación de titanio Ticp99 de grado 2, soldado por el proceso T.I.G.

Se destacaron 5 zonas después del proceso de soldeo, las cuales serán relacionadas a continuación:

1. Zona de fusión incompleta.
2. Zona de recristalización.
3. Zona de recristalización incompleta.
4. Zona frágil azul.
5. Zona del borde del cordón.

En la **zona fusión incompleta**: 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. En esta zona se observó una fase martensítica con una estructura alargada en forma de aguja, debido a que el enfriamiento con este tipo de soldadura fue rápido y a baja temperatura manteniendo poca movilidad ver la figura 3.1.

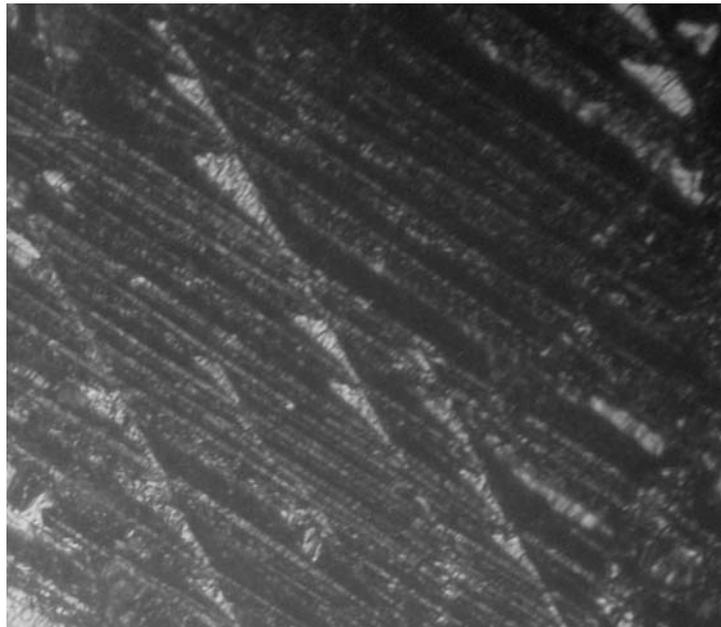


Figura 3.1. Zona fusión incompleta en la aleación de titanio.

Zona de Recristalización: Durante la soldadura de materiales que han sufrido deformaciones plásticas previas, en la zona que se calienta en el intervalo de 700 a 900 °C, de partes de granos surgen y crecen nuevos granos circulares. (Figura 3.2), si el metal no ha sido previamente deformado plásticamente la recristalización no ocurre.

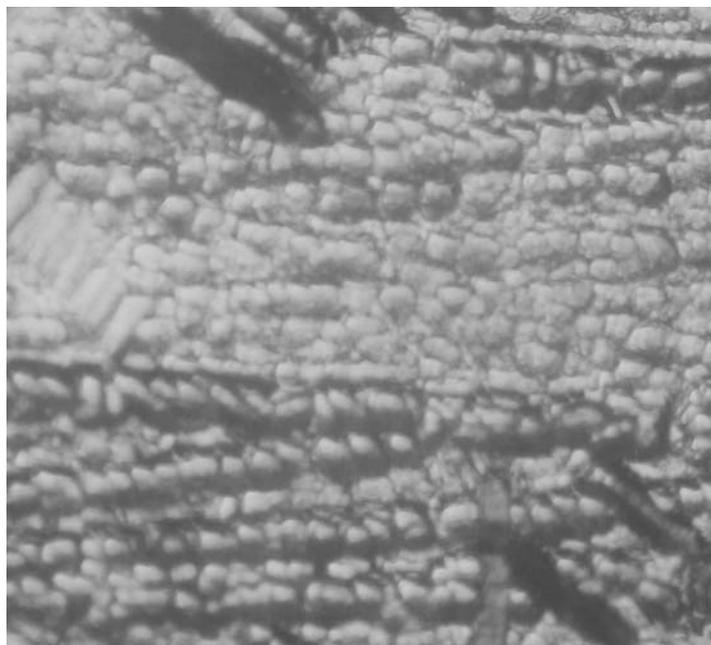


Figura 3.2. Estructura de la zona de recristalización.

Zona de recristalización incompleta: Se presenta en la zona calentado a temperaturas entre 150 a 180°C. Aquí el metal de esta zona alcanzó solo una

recristalización parcial, se observó que se mantiene la fase α residual con granos hexagonales (Figura 3.3).

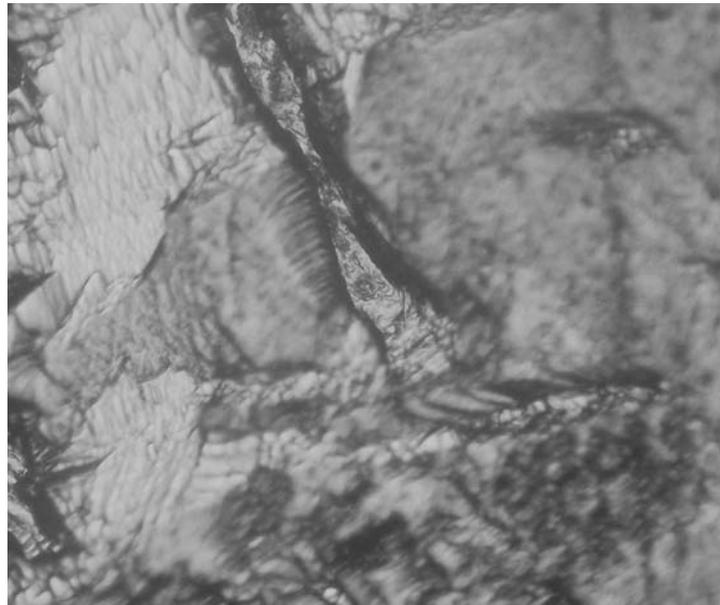


Figura 3.3. Comportamiento de la zona de recristalización incompleta.

Zona Frágil Azul: En esta zona se presenta una coloración azul de la superficie del metal, luego del enfriamiento (Figura 3.4). La zona frágil azul después de haber efectuado la soldadura presentó una estructura regular con granos del tipo poligonal.

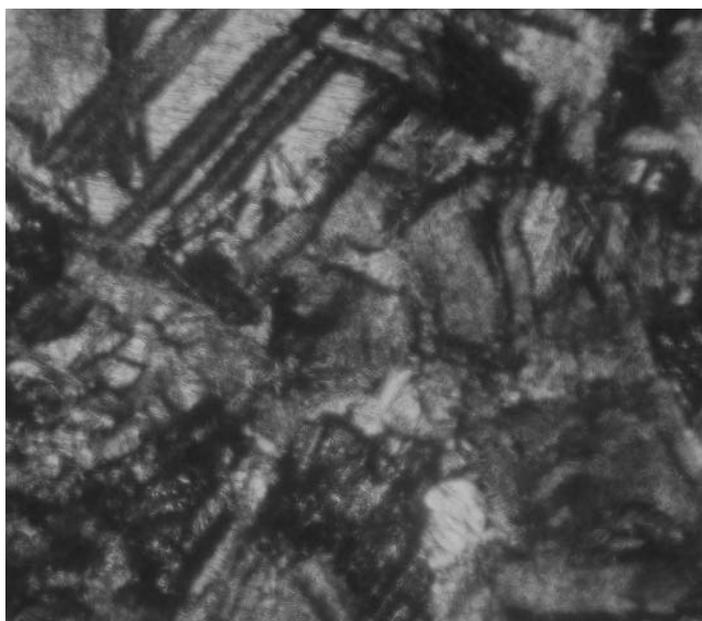


Figura 3.4. Estructura de la zona frágil azul.

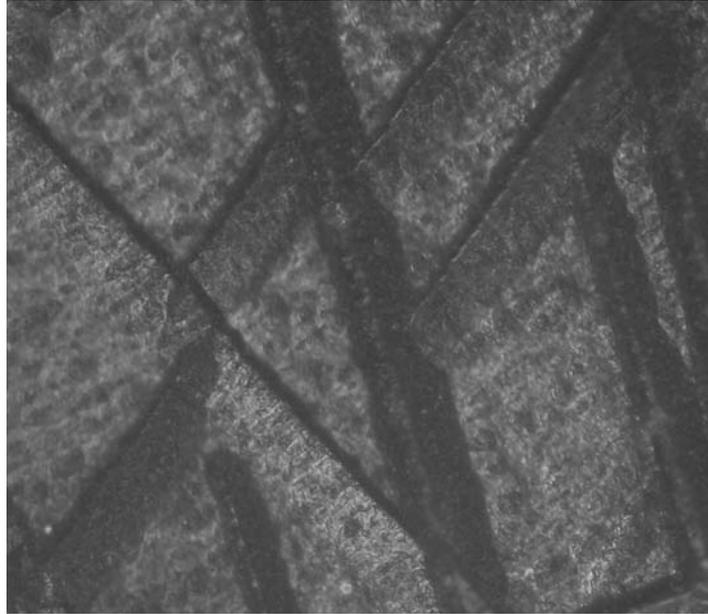


Figura 3.5. Borde del cordón.

La microestructura de la figura 3.5 se corresponde con el borde del cordón, es la denominada microestructura bimodal, la cual se obtiene enfriada lentamente desde el campo β . Esta estructura consisten en granos aislados de fase α en una matriz de fase β transformada a fase α secundaria.

3.4- Resultados obtenidos en el cálculo de la resistencia mecánica en tuberías de titanio.

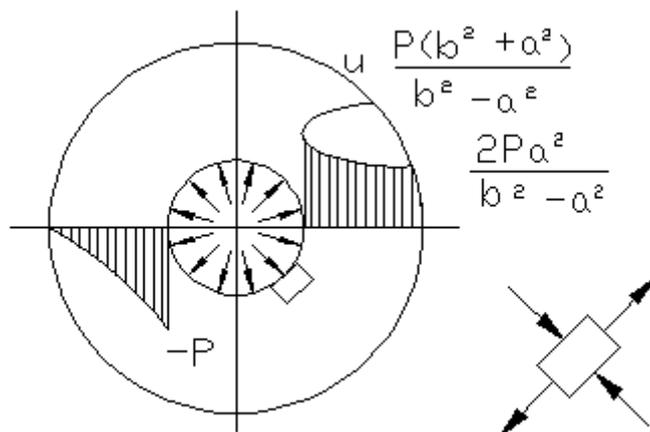


Figura 3.5. Distribución de tensiones en el tubo.

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: $\sigma_r = 16.361 \text{ Mpa}$ para la tensión radial y la tensión

circunferencial es de $\sigma_z = 63.3723 \text{ MPa}$. La condición de resistencia planteada en la ecuación (2.3), ($\sigma_{eq} = 271.112 \text{ MPa}$). Permite conocer los valores de *las tensiones generadas por la presión del trabajo* (2.6), $\sigma_{zp} = - 271.119 \text{ MPa}$, (2.7), $\sigma_{rp} = - 4.481 \text{ MPa}$ y $\sigma_{eqp} = - 266.638 \text{ MPa}$.

En este caso se determinó solamente el desplazamiento radial en el interior del cilindro $p_1 = 4.481 \text{ MPa}$, 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 (2.5), siendo el valor de $\delta = - 0,374 \text{ mm}$.

Las deformaciones radiales en el interior y exterior del tubo nos permiten determinar por las ecuaciones (2.8) y (2.9) respectivamente cuyos valores que son $\Delta r_1 = - 0.374 \text{ mm}$ y $\Delta r_2 = - 0.376 \text{ mm}$, 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 de 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 consiguiente los tubos serán proclives a fallar en esta zona.

3.5- Simulación por el Método de Elementos Finitos del proceso de soldadura.

El elemento que analizó corresponde con la geometría de los tubos que se emplean en proceso de transporte de cola lixiviada, para el mismo se realizó un mallado mediante el ANSYS 11.0 es fino con un total de 352857 nodos y 117619 elementos de forma triangular los que generan una malla tetraédrica como se muestra en la figura (3.7).



Figura 3.6. Modelo Geométrico Mallado.

Como se observa en la figura 3.7 y 3.8 tanto las tensiones como los desplazamiento no alcanzan valores peligrosos, los valores máximos se ubican en la parte interior de los tubos, además ocurren pequeñas expansiones en el espesor del material, pero como la temperatura no alcanza el límite elástico la resistencia del material no variará en gran escala; esto se demostró a través del cálculo de resistencia mecánica, no obstante a lo anteriormente planteado es bueno añadir que la cola lixiviada arrastra impuensas, y la tubería está constituidas por varios tramos de diferentes materiales, los que poseen menor resistencia a la abrasión y corrosión que el titaneo, esto genera gran cantidad de partículas pequeñas que desgarran las paredes del tubo de titaneo, por lo que su pared será más delgada y disminuirá su resistencia mecánica, haciéndola más sensible a la acción de la presión y temperatura las que pueden provocar pequeñas fisuras en las secciones más débiles.

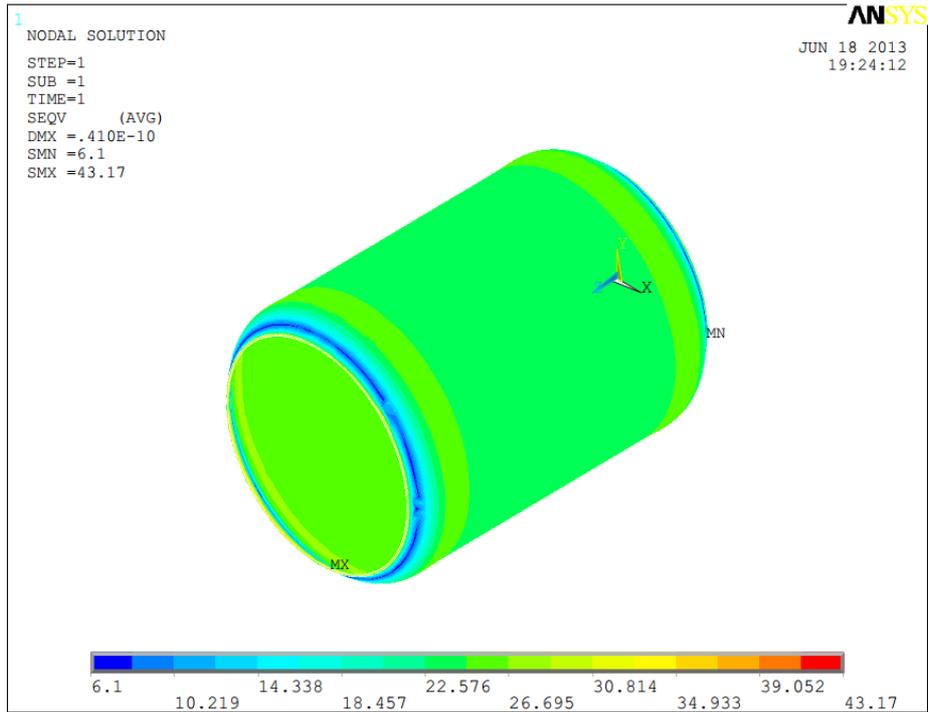


Figura 3.7. Tensiones de Von Moise.

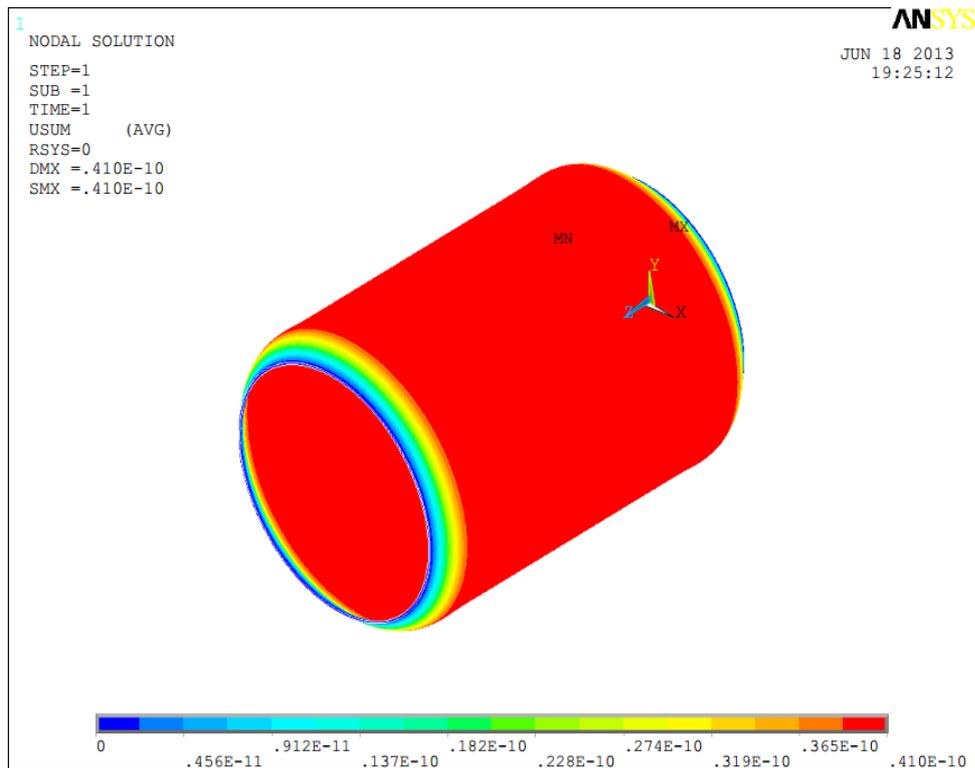


Figura 3.8. Vector desplazamiento.

3.6- Valoración económica.

Cuando se requiere realizar un paro por avería, el tiempo de parada de un tren es de 4 horas como promedio para realizar el cambio de línea. Lo que imposibilita la generación aproximada de 200 t de cola lixiviada.

Un factor negativo e importante a considerar, son los gastos por concepto de reparación. Según las estadísticas, durante un paro se reparan un promedio de 1 m de tubería de titanio, generando un gasto de 315,005 USD, además se usan 1 kg de varilla de titanio, con un costo de 217,0221USD, en mano de obra 132,95 CUP y cilindro de argón 125,022 USD representando un total de 789,9991 USD.

Tabla 3.2. Gastos por concepto de reparación de averías.

Orden de trabajo	Descripción	UM	Cantidad	Precio Unitario	Importe
213	Ayudante de construcción	hh	2	\$14,95	\$29,9
	Instalador de tuberías	hh	2	\$14,55	\$29,1
	Soldador	hh	1	\$14,95	\$14,95
	Tubo de ti. Ø 12''	m	1	315,005	315,005
	Varilla de ti. de 3mm	kg	1	217,0221 USD	217,0221
	Cilindro de argón	m ³ h	1	125,022	125,022

Las paradas imprevistas producto a la rotura de la tubería de titanio, acarrearán problemas serios en la estabilidad de la producción. Para solucionar este tipo de avería se necesitan aproximadamente 3h.

3.7- Impacto Medio Ambiental.

El ácido sulfúrico utilizado en nuestra planta como agente lixivante, 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 m³ de aire. Tiene un alto poder corrosivo, particularmente a concentraciones por debajo de 78 %, además de atacar a muchos metales, este ácido, 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. Debido a sus propiedades corrosivas, oxidantes y



sulforantes, este ácido produce rápida destrucción de los tejidos y graves quemaduras al contacto con los tejidos corporales de cualquier clase. Los efectos sintomáticos debido a la continua ingestión de pequeñas cantidades de ese material no han sido notados, hay efectos sintomáticos secundarios para daños a tejidos en contacto con él, no obstante el contacto repetido, con soluciones diluidas puede causar una dermatitis y la inhalación repetida y prolongada de niebla de ácido sulfúrico, puede causar una inflamación del conducto respiratorio superior que lleva a una bronquitis crónica. Al ponerse en contacto con la piel o los ojos, el ácido sulfúrico produce graves quemaduras. La inhalación de vapor o rocío concentrado del ácido caliente puede ser dañina para los pulmones. Él ingerirlo puede causar graves lesiones o la muerte.

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.

- ✓ Los resultados obtenidos a través del cálculo de resistencia mecánica demuestran que los esfuerzos de tensión originados por las cargas de trabajo, no alcanzan valores peligrosos y que las deformaciones originadas no producen cambio de forma en el elemento.
- ✓ El análisis estructural arrojó que las muestras analizadas presentan buena resistencia a la corrosión y no se producen variaciones significativas en la estructura de la misma y en el tamaño del grano.



CONCLUSIONES GENERALES

Luego de haber realizado el presente trabajo de diploma con todos los elementos fundamentales que lo caracterizan, pudimos llegar a las siguientes conclusiones:

1. El agrietamiento en los tubos de titanio está dado por la incorrecta selección de los electrodos para soldar los mismo; porque no se analiza la composición química real del metal base y sólo se toma la definida por catálogo.
2. A través del análisis metalográfico se demostró que la aleación de titanio empleada para el transporte de pulpa, es la indicada para transportar el fluido antes mencionado, y es capaz de resistir los efectos provocados por la atmósfera corrosiva del entorno.
3. Los cálculos de resistencia mecánica arrojaron que las tensiones equivalentes $\sigma_{eq} = 271.112 \text{ MPa}$ producidas por las cargas de trabajo no ocasionan rotura en los tubos de titanio, lo cual corroboró a través de la simulación utilizando técnicas computacionales, aunque estos constituyen valores peligrosos producto a la pérdida de espesor en los tubos.
4. Un factor negativo en las roturas de las tuberías son los gastos por concepto de reparación en el paro del proceso con un valor de mano de obra de 132,25 CUP, tramo de tubería de 315,005 USD, cilindro de argón 125,022 USD y varilla de titanio 217,0221 con un valor total de 789,9991 USD.



RECOMENDACIONES

1. Garantizar que la pulpa al salir de la caja distribuidora se mantenga con el valor requerido de H_2SO_4 , para que llegue a los tanques de almacenamiento con la calidad requerida con el objetivo de evitar roturas prematuras por corrosión.
2. Realizar análisis químico a muestras del metal base para garantizar una correcta selección de electrodo.
3. Utilizar los resultados de este trabajo, para la utilización del titanio en el transporte de pulpa lixiviada como guía para la investigación de otros proyectos.



BIBLIOGRAFÍA

- [1].ALFARO, W.; Simulación de procesos.
<http://www.monografías.com/trabajos6/>. 2001.
- [2].ANSYS. Version 11.0. Users Guide. Swanson Analysis Systems, Inc. 1999.
- [3].ASTM, Annual Book of ASTM Standards, ASTM Standard E-837-99, American Society for Testing and Materials, Vol. 03.01, pp. 675-684, 2000.
- [4].ASTM Handbook. Failure Analysis and Prevention, Ohio: ASM International, 1996.
- [5].APRAIZ. J.; "Aceros especiales y otras aleaciones". Ed. Dossat. 1 975.
- [6].Beddoes, J.; PARR, J. G. A review of stainless steel: What are they; What they do. En: Introduction to stainless steel. Beddoes, J. y Parr, J.G. (Eds). Pp. 1-30. American Society for Microbiology: Washington D.C. 1999
- [7].BILMES, P.; El análisis y prevención de fallas metalúrgicas en la ingeniería de los materiales. En: Memorias del IV Taller Científico Internacional TECNOMAT' METANICA'2000. C. Habana, 2000.
- [8].BOYLE. J y Spence. J.; Stress analysis for creep. Londres: Butterwoths, 1989.
- [9].BURGOS. J.;"Tecnología de Soldadura ". Editorial Pueblo y Educación. 1987. 285 pp.
- [10]. BROWN. R.; "How to select the right stainless steel. En: Advanced Materials & Processes". Vol. 145 (4). April, 1994. Págs. 20-24.
- [11]. CARABALLO, M. A. Comportamiento físico del acero Hadfield, en presencia de cargas explosivas. Revista Minería y Geología. Volumen XX. No. 2. 2004.
- [12]. DE MEYER, M.; D. Toch y B. C. De Cooman: The characterisation of retained austenite in trip steels by X-Ray Diffraction. En: Proceedings of 41th Mechanical Working and Steel Processing Conference. Baltimore, MD. 2001. Vol. XXXVII. Págs: 483-491.



- [13]. DIAZ. C. E. et al.; Manual para la capacitación de soldadores en el proceso de soldadura por arco con electrodo fusible y protección gaseosa. UCLV. 2000.
- [14]. DUMOV. S.; Tecnología de soldadura eléctrica por fusión. Ed. Construcción de Maquinaria. 1987. 461 pp.
- [15]. FROLOV. V.; Teoría de los procesos de soldadura. Ed. Esc. Superior. Moscú. 1988.
- [16]. INGHAM. T.; Moreland: The Influence of Time-dependent Plasticity on elastic-plastic fracture toughness. En: ASTM STP 803, Vol. I, 1983.
- [17]. GARCÍA, Y. R., BURGOS, J. S., Gil. F., RIVALTA, J: Obtención de Tensiones Residuales a lo Largo de un Cordón de Soldadura Mediante Métodos Analíticos y Experimentales. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas. UCLV. Facultad de Ingeniería Mecánica. 2004.
- [18]. GIACHINO JOSEPH. W.; Técnica y práctica de la soldadura. Editorial Reverté S.A 1981.
- [19]. GIZMANENCO, O.L.; "Soldadura y corte de metales". La Habana. Instituto Cubano del Libro. 1976. 472 pp.
- [20]. Hall, D. J. y J. J. Jones: High Temperature Alloys Their Exploitable Potential. En: Applied Science 54 (3), 1986): Págs. 113-124.
- [21]. HAMANO. R.; The effect of microstructure on the fatigue cracks growth behaviour age-hardened high strength stainless steels in a corrosive environment. En: Metallurgical Transactions A. Vol. 19 A. 1988. Págs: 1461-1469.
- [22]. INCHAURZA. A.; Corrosión de los aceros inoxidable. En: Aceros Inoxidables y refractarios. pp. 32 – 51. Olsa (Olarra, S.A): Vizcaya. 1971b.
- [23]. DAVIS. J.; Heat-Resistant Materials (American Society for Metals, Specialty Handbook, U.S.A. (1997)
- [24]. KWON. O.; NIKBIN. K.; WEBSTER. G.; y ATAK. J.; Crack Growth in the Presence of Limited Creep Deformation. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 62, 1999. Págs: 33-46.



- [25]. LAI. Y.; Heat Resistant Materials for Furnace Parts, Trays and Fixtures: Heat treating. ASM Handbook, Ohio: ASM International Vol. 1. 1992. Págs: 510-518.
- [26]. MACHERAUCH, E.; KLOOS, K. H. Proc. Int. Conf. Residual Stresses in Science and Technology, Vol. 1, Garmisch-Partenkirchen, DGM-Verlag, Oberursel, pp. 3-26. 1986.
- [27]. Mannan, S. L. y M. D. Mathew: Creep of austenitic stainless steel welds. En: Bulletin of Materials Science. Vol. 19. No. 6. 1996. Págs: 985-1007.
- [28]. MASUBUCHI, K. Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, Elmsford, N.Y. 1980.
- [29]. PERO - SANZ, J. A.: Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Madrid: DOSSAT 2000, 1996.
- [30]. RADHAKRISHNAN, V.M.; et al. Substructure characterizing parameter in creep, J. of Mater. Science, 30, 1521-1528, 1995.