



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ESTUDIO QUIMICO METALURGICO APLICADO A
DIVERSOS COMPONENTES INGENIERILES UTILIZADOS
EN PLATAFORMAS PETROLERAS COSTA FUERA DE LA
SONDA DE CAMPECHE, MEXICO

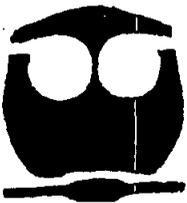
Informe General de Conocimientos

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA

MARTIN I. GUERRERO LOPEZ



MEXICO, D. F. 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

... de la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e imprimir el contenido de mi trabajo excepcional.

NOMBRE: Martín Queirero

LOPEZ

FECHA: 13- Febrero - 2006

FIRMA: _____

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE	Dr. Juan Mendoza Flores (IMP)
VOCAL	Dr. Enrique Martínez Martínez (IMICORR)
SECRETARIO	Dr. Carlos González Rivera (FQ)
1er. SUPLENTE	Dr. José Gonzalo González Rodríguez (UAEM) Morelos
2° SUPLENTE	M. en C. Sergio García Galán (FQ)
2° VOCAL	Dr. Sergio Alonso Serna Barquera (UAEM) Morelos
3er. VOCAL	Dr. Jesús Mario Colín de la Cruz (UAEM) Morelos

Sitio donde se desarrolló el tema:

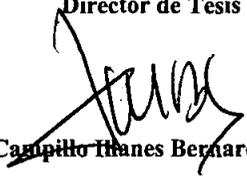
En Laboratorio:

CENTRO DE CIENCIAS FISICAS, UNAM

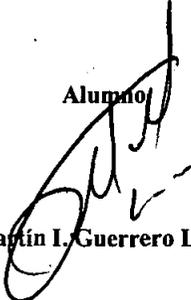
En Campo:

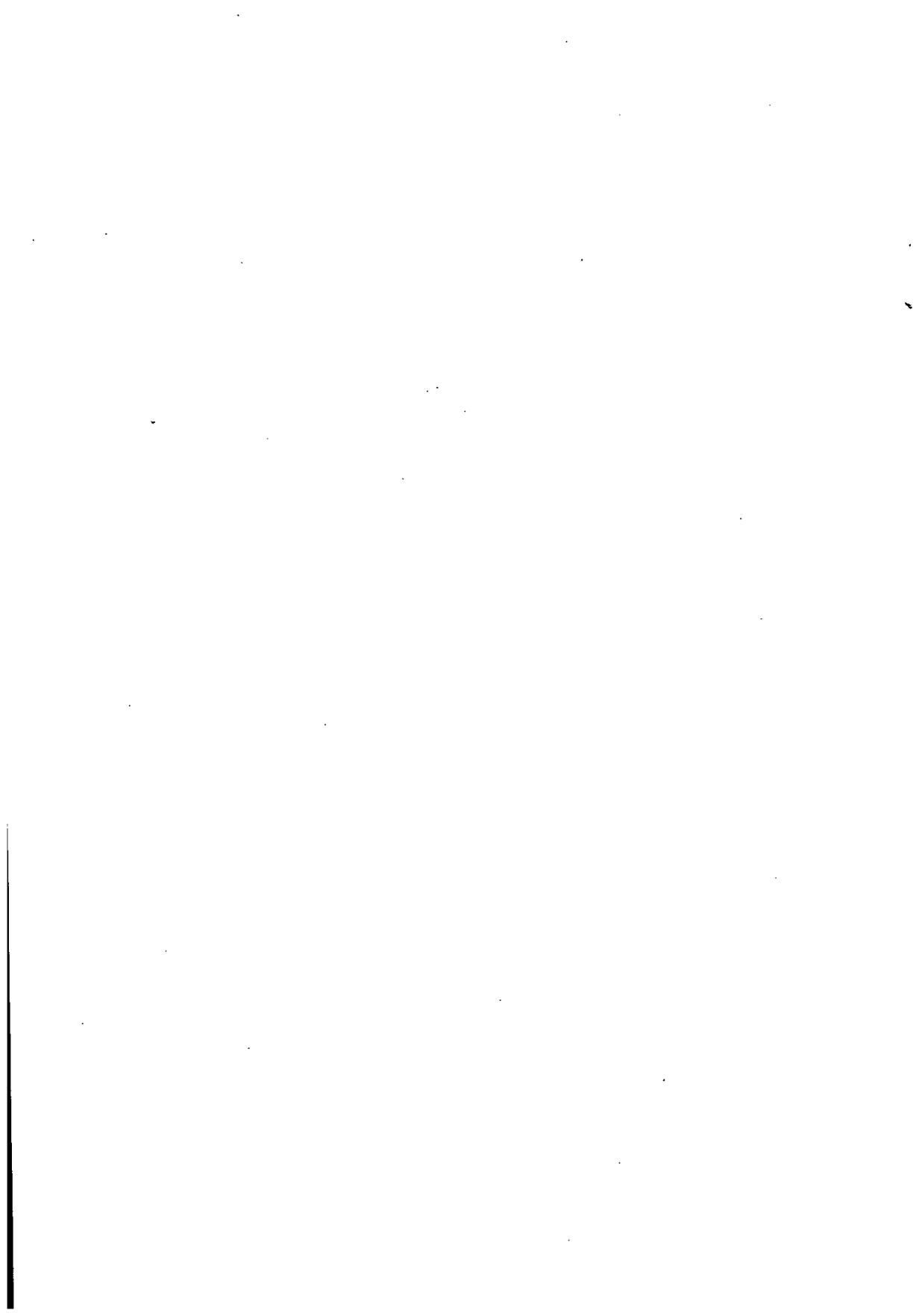
PLATAFORMAS PETROLERAS COSTA FUERA, PEMEX

Director de Tesis


Dr. Camillo Itanes Bernardo Fabián

Alumno


Martín I. Guerrero López



A:

Mi esposa: Laura Patricia.

Mis Hijas: Maria Fernanda y Laura Andrea.

Mis Padres: †

Mis hermanos, sobrinos y amigos.

A mi Director de Tesis: Dr. Campillo Illanes Bernardo Fabián

Por ayudarme a mantener la "Fe" para que "yo" llegará hasta la meta.

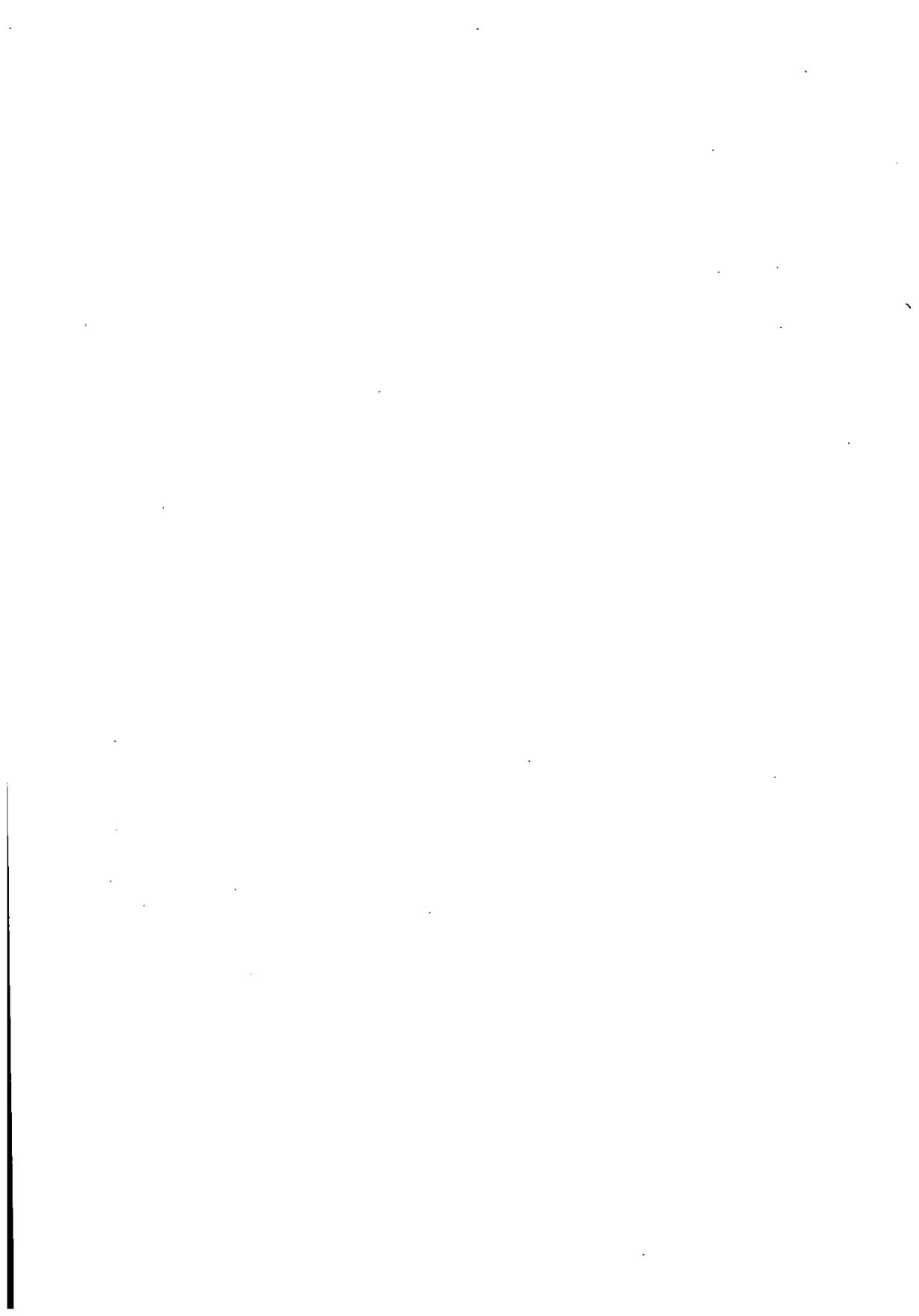
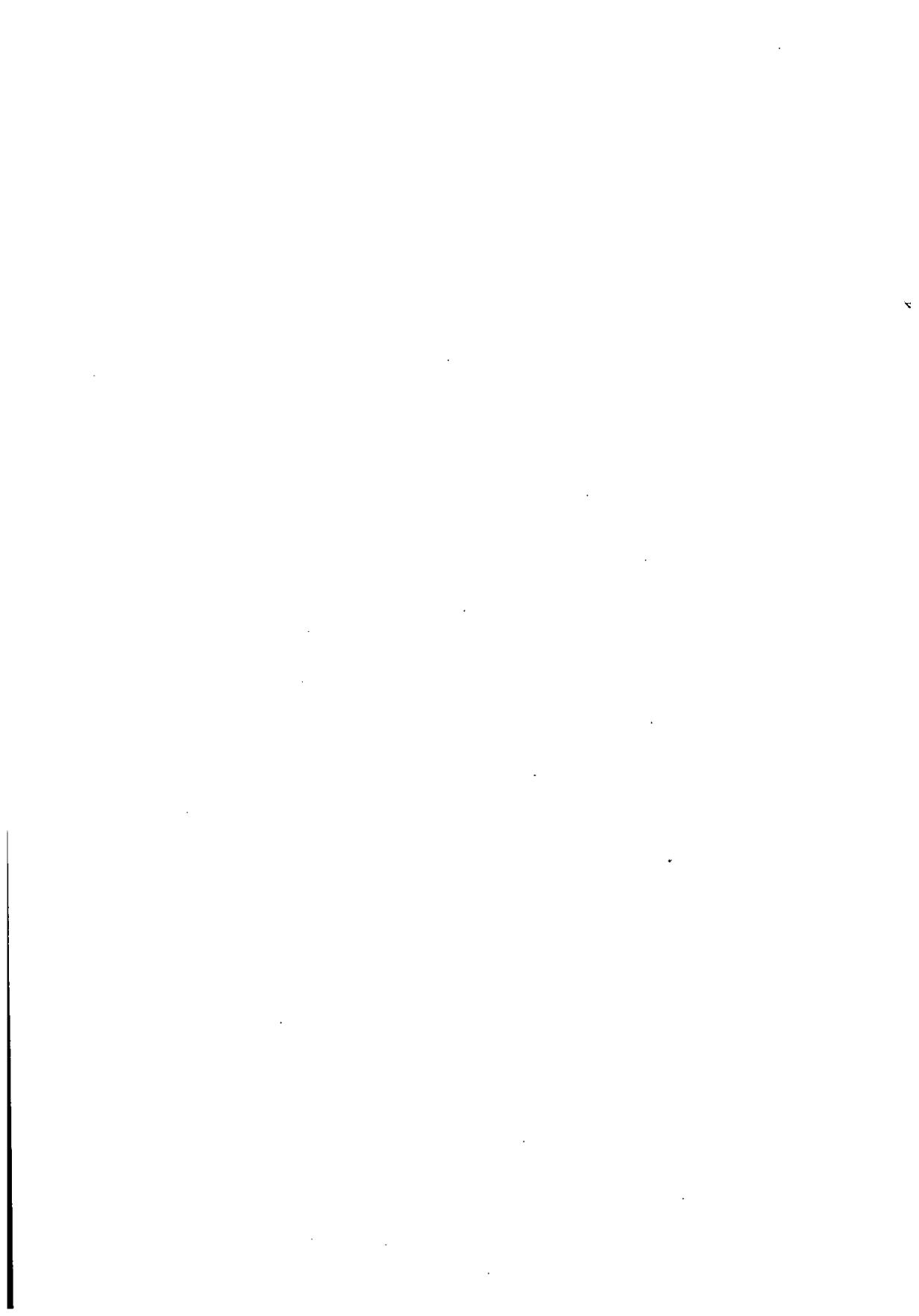


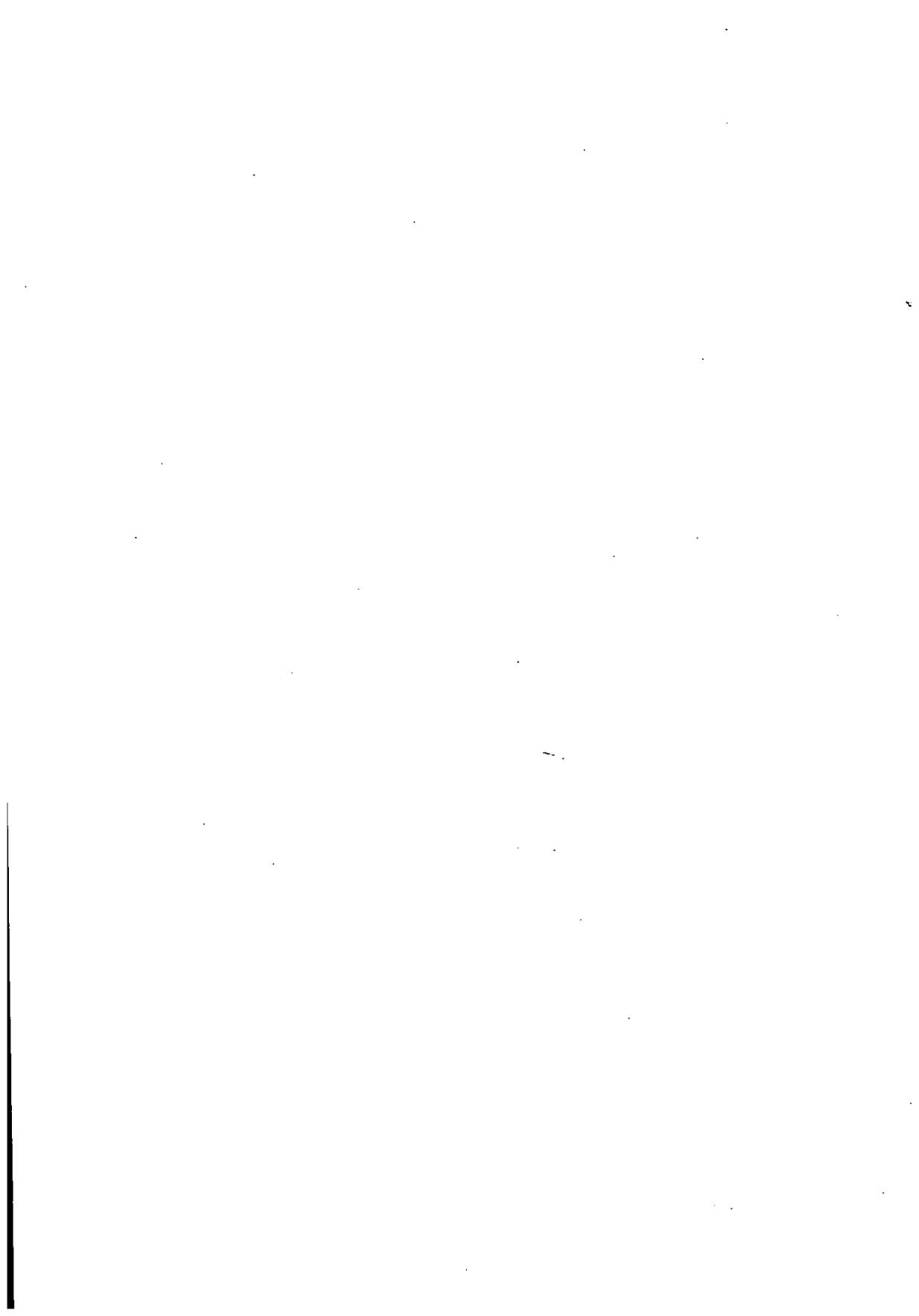
Tabla de Contenido

Capitulo	... Página
Resumen	...i
Reporte 1. Aseguramiento de la calidad de los aceros usados para transporte de hidrocarburos amargos, en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.	...1
Reporte 2. Detección de la causa que origino la falla de la soldadura de la estructura del helipuerto de la plataforma petrolera costa fuera, Akal Nova.	...30
Reporte 3. Análisis de la falla de un cojinete deslizante proveniente de una flecha para turbina de gas, ubicada en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Bravo.	...57
Reporte 4. Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.	...87
Lista de figuras.	...128
Figuras.	...132



Aseguramiento de la calidad de los aceros usados para transporte de hidrocarburos amargos, en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

Capítulo	... Página
1.1	Introducción ...1
1.2	Antecedentes ...2
1.2.1	El proceso de extracción de petróleo
1.2.2	Efectos del sulfuro de hidrógeno y los tipos de fragilización
1.2.3	Ampollamiento
1.2.4	Agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC)
1.2.5	Aceros empleados en la industria petroquímica
1.3	Procedimiento Experimental ...8
1.3.1	Objetivo
1.3.2	Prueba de susceptibilidad
1.3.3	Preparación metalográfica de los cupones
1.4	Resultados y discusión ...16
1.4.1	Análisis químico
1.4.2	Metalografía y microestructura
1.4.3	Prueba de HIC
1.5	Conclusiones ...27
1.6	Referencias ...28



Hablando en términos geográficos, los mantos o campos petrolíferos ubicados en el golfo de México, frente a las costas de los estados de Tabasco y Campeche reciben el nombre genérico de "Sonda de Campeche" localizados tan solo a 80 Km de la costa de Cd. del Carmen, Campeche, mismos que se recorren en 30 minutos por vuelo en helicóptero o de 2 a 4 horas en barco.

Petróleos Mexicanos, PEMEX, renombro la sonda de Campeche, como "Proyecto Cantarell" convirtiéndose el mencionado proyecto, en Pilar de Desarrollo para nuestra Nación. Dentro de este proyecto destaca por su importancia: La gerencia de mantenimiento a ductos, El programa de mantenimiento a ductos y por su tamaño las Plataformas Petroleras Costa Fuera, Akal Bravo, Akal Nova y Akal Lima (Akal, en voz maya, significa, extensión de agua salada, separada por un arrecife). Dichas plataformas fueron el escenario, donde, se realizaron los estudios Químicos Metalúrgicos que conforman el presente Informe General de Conocimientos a saber:

Reporte 1. Aseguramiento de la calidad de los aceros usados para transporte de hidrocarburos amargos, en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

Los resultados sirvieron para la toma de decisiones de un tendido de línea submarina.

Reporte 2. Aseguramiento de la calidad de un lote de aluminio no clasificado utilizado en la construcción del helipuerto de la plataforma petrolera costa fuera, Akal Nova.

El resultado se utilizó en la construcción y puesta en marcha del helipuerto.

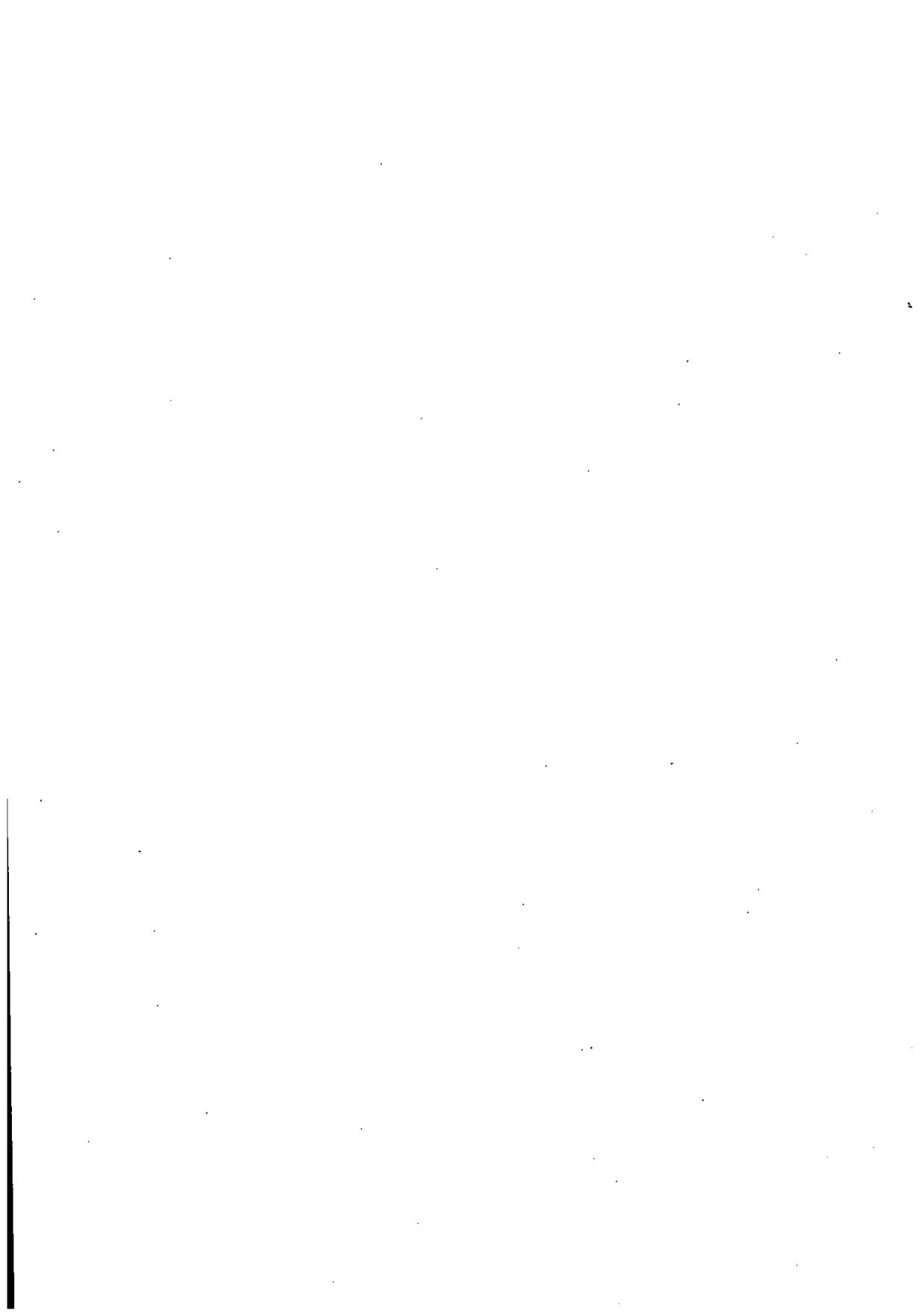
Reporte 3. Análisis de la falla de un cojinete deslizante proveniente de una flecha para turbina de gas, ubicada en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Bravo.

El resultado sirvió para la toma de decisiones en el mantenimiento preventivo.

Reporte 4. Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

El resultado sirvió para modificar la proyección de los ductos, optimizar el espacio entre los mismos y planear mantenimientos preventivos.

Utilizando para ello, técnicas sobresalientes como la microscopía electrónica de barrido para caracterizaciones micro y las pruebas no destructivas para las caracterizaciones macro encontradas en cada estudio. Los resultados son reportados desde el punto de vista Metalurgia Física, cada reporte fue entregado y aceptado por la gerencia de mantenimiento a ductos de PEMEX.



1.1 Introducción

El petróleo es un recurso natural no renovable, del que sus derivados tienen muchas aplicaciones en la vida cotidiana. Se pueden utilizar como combustibles o como materias primas para la elaboración de productos, sin embargo, el petróleo que conocemos no es el mismo que se extrae de los pozos petroleros, sino que éste es transformado y refinado en plantas de tratamiento especiales, a las cuales, el petróleo crudo así como otros hidrocarburos que lo acompañan, llegan por medio de una red de ductos ó tuberías de transporte, siendo este un proceso muy complejo.

Las instalaciones para la producción de petróleo y gas están constituidas de tal forma, que el flujo proveniente del pozo, es separado en varias corrientes diferentes, siendo una de ellas la que transporta el llamado "Gas amargo". Se le da este nombre debido a que contiene grandes cantidades de azufre en forma de compuestos como por ejemplo el sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico.

Ahora bien, debido a que el proceso de transporte implica la exposición de las tuberías a agentes químicos altamente corrosivos como es el caso del sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico ⁽¹³⁾, es común la ocurrencia de fallas de componentes estructurales debido a problemas de corrosión y/o fragilización por hidrógeno. Este es uno de los principales problemas de la industria petrolera en México ^(7,8), en donde aproximadamente el 50 % del total de tubos en operación tiene más de treinta años y a pesar del riguroso mantenimiento del que son sujetos, con frecuencia se observa la falla de las tuberías debido a la corrosión y/o a la fragilización por hidrógeno. Esto ha hecho necesario el desarrollo e implementación de nuevas técnicas y/o métodos de protección, así como un control de calidad más riguroso, todo esto encaminado a la prevención del deterioro de las tuberías de transporte de hidrocarburos, siendo este el tema a tratar en el presente reporte.

1.2 Antecedentes

1.2.1 El proceso de extracción de petróleo

El proceso de extracción de petróleo es muy complejo y consiste de pozos e instalaciones de campo para separar el flujo en tres corrientes distintas, a saber, gas natural, hidrocarburos líquidos y agua de formación. El agua de formación es removida de los hidrocarburos líquidos previamente a su conducción a la refinería. La corriente de agua de formación es desechada después de ser tratada. La corriente de gas por su parte, también es tratada para separar las fracciones de hidrocarburos y quitar los gases ácidos tales como el ácido sulfhídrico y el bióxido de carbono (H_2S , CO_2 respectivamente).

El ácido sulfhídrico es transformado en azufre cuando los pozos emiten grandes cantidades de este compuesto. Por otra parte, si los pozos son ricos en bióxido de carbono, este compuesto es separado, deshidratado y entubado a los campos de petróleo para su utilización en operaciones de recuperación forzada.

Uno de los varios fluidos que es transportado en los ductos de la industria petrolera es el llamado "Gas amargo", el cual contiene cantidades considerables de bióxido de carbono (CO_2), ácido sulfhídrico (H_2S) y algunos otros condensados. De manera más formal, el "Gas amargo" está definido por la Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión (NACE por sus siglas en inglés) como aquel que presenta una presión parcial de sulfuro de hidrógeno superior a 0.05 psi. Así mismo, el gas "dulce" es definido como aquel en el cual se observa la ausencia de los compuestos antes mencionados y esencialmente del H_2S ^(4, 12, 13).

Eventualmente y durante la producción de gas, ocurre que algunos hidrocarburos líquidos se pueden formar por condensación en estos pozos, observándose una disminución tanto de la presión como de la temperatura de la corriente de gas.

En los pozos de gas y de petróleo, el bióxido de carbono (CO_2) es el primer elemento y quizás el más agresivo en términos de corrosión, cuando éste se combina con agua de formación y con algunos otros condensados. Ahora bien, el sulfuro de hidrógeno tiende a inhibir la reacción química del bióxido de carbono con los

Aseguramiento de la calidad de los aceros usados para transporte de hidrocarburos amargos, en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

condensados, pero además introduce la posibilidad de efectos adversos en la tubería tales como al fenómeno del agrietamiento bajo esfuerzo en presencia de sulfuros, cuyas siglas en inglés son SSC (Sulfide Stress Cracking)⁽¹³⁾.

1.2.2 Efectos de la presencia de sulfuro de hidrógeno y tipos de fragilización

El hidrógeno provoca graves daños a los equipos de la plantas petroquímicas construidos con acero. ^(1,2,3) El hidrogeno provoca fisuras y ampollas además de estas dos causas se le suma otra, si se cuenta con la presencia en cantidades substanciales de sulfuro de hidrogeno a pH 7 a 9.

La penetración del hidrógeno en ambas causas pueden ser eliminadas por la adición de polisulfuro de amonio, en fase acuosa o por incorporación de oxigeno gas a chorro, por el momento no vamos a ver el punto de cómo es el ataque del hidrogeno al acero en función e la temperatura.

Un mecanismo de ¿cómo? es la penetración del hidrógeno y los efectos en el acero de los equipos de las plantas petroquímicas es lo que vamos a discutir.

Para detectar la penetración de hidrogeno, es mediante una inspección visual interna y/o externa. La inspección externa es la más usual y se realizan utilizando sistemas de ultrasonido especializados para detección de microgrietas⁽¹⁷⁾. La inspección interna es mucho mas peligrosa y costosa, peligrosa por que hay que entrar al interior del equipo (hay gases VENENOSOS atrapados), y costosa porque hay que parar el proceso.

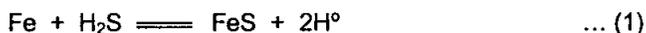
Condiciones necesarias para que ocurra el ataque:

Un estudio de las condiciones comunes para que ocurra el ampollamiento en los equipos de las plantas petroquímicas revela cinco factores ⁽¹³⁾

1. La corrosión depende de la superficie del acero.
2. El hidrógeno reacciona con la superficie.
3. Presencia de agua en fase líquida.
4. Un agente capaz de envenenar la superficie del acero para formar hidrogeno molecular a partir de hidrógeno atómico.
5. Imperfecciones en el acero, por ejemplo; inclusiones de escorias, poros socavados, o algún daño provocados por el proceso de soldadura.

Todos los aceros de bajo contenido de carbón se ha visto que son susceptibles al ataque del hidrógeno. Algunos tipos de acero como son inoxidables de grado austenítico son resistentes a la corrosión por H₂S.

Presencia de agua en fase líquida, es necesaria para que proceda la reacción de corrosión. El hidrógeno atómico es un producto de una reacción de corrosión primaria.



El acero con el que están construidos los equipos de la plantas petroquímicas esta representado por (Fe) en la reacción (2), mismo que sirve de catalizador entre la combinación del hidrógeno atómico e hidrógeno molecular.

Sin embargo con la presencia de sulfuro de hidrogeno, la velocidad de combinación de los átomos de hidrógeno con los átomos de forma molecular se reduce considerablemente.

Como resultado de estas altas concentraciones de hidrógeno atómico acumulado en la superficie del acero. El hidrógeno atómico es ligeramente soluble en el Fe y éste, puede difundirse a través de las celdas unitarias (redes) del Fe al azar. Provocando que muchos de estos átomos de hidrógeno se difundan dentro del acero.

Cuando las inclusiones de escoria, o cualquier otra imperfección que exista en el acero, el hidrogeno atómico puede combinarse en este punto para producir hidrógeno molecular. El hidrógeno molecular continúa acumulándose y sigue difundiéndose dentro del acero.

Esto es un daño permanente y sostenido dentro de la celda unitaria del Fe y cuando la presión de equilibrio excede la fuerza del Fe (acero).

Condiciones que promueven la penetración del hidrogeno:

Tres condiciones son las causas que promueven la penetración del hidrogeno en el acero en presencia del sulfuro de hidrogeno.

1. Bajo pH.
2. Alto pH, bajo condiciones anaerobicas
3. Alto pH en un sistema que contenga cianuros.

Alta velocidad de penetración se observa a bajos pH, la penetración decrece si el pH se incrementa, la mínima velocidad de penetración ocurre a un pH de 7.5 aproximadamente.

1.2.3 Ampollamiento

En la ausencia de esfuerzos residuales o cargas externas, la fragilización por hidrógeno se manifiesta de varias formas tales como son: ampollamiento, *agrietamiento interno*, *formación de hidruros* y *una considerable reducción de la ductilidad*.

La absorción del hidrógeno se genera por la corrosión del acero en presencia de ácido sulfhídrico y tiene varios efectos nocivos, dependiendo de las propiedades del acero y de las características del medio ambiente y de otras variables. Uno de estos efectos es la generación y desarrollo de defectos tales como el agrietamiento y el ampollamiento. Este último, afecta primeramente a los aceros de bajo carbón y ocurre cuando el hidrógeno atómico se combina para formar hidrógeno molecular a lo largo de planos de impurezas bien definidos. Estos planos de impurezas usualmente corren paralelos a la superficie, cerca del plano medio de la placa de acero. Debido a que el hidrogeno molecular se forma a lo largo de planos de impurezas, éste ejerce cierta presión interna, la cual eventualmente se incrementa, hasta alcanzar un valor lo suficientemente alto para separar y expandir los dos planos. Esta separación es local, se incrementa continuamente y abarca una cierta área o región, la cual es relativamente pequeña. La región afectada presenta una morfología parecida a una ampolla, de ahí el nombre "ampollamiento".

En los aceros al carbón, el proceso de agrietamiento por corrosión asistida por hidrógeno es similar al del ampollamiento. Se da cuando el ácido sulfhídrico reacciona con el acero y se libera hidrógeno atómico. Cuando esto ocurre, el hidrógeno atómico se difunde hacia el interior del acero, sin embargo, cuando un solo átomo de hidrógeno encuentra un espacio hueco o una inclusión, éste átomo de hidrógeno se combina con otros átomos para formar hidrógeno molecular, el cual ya no puede pasar a través del acero y queda atrapado en el interior, dándose posteriormente la generación y crecimiento de grietas a lo largo de la dirección del laminado de la hoja de acero

Las grietas en un plano tienden a unirse con otras grietas adyacentes a este mismo plano, para formar escalones a través de la pared de la lámina o del tubo, según sea el caso. Obviamente estas grietas pueden reducir el espesor efectivo de la pared de la tubería dando como resultado un colapso de la misma debido a la presión.

1.2.4. Agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC) ⁽¹³⁾

El agrietamiento por escalonamiento o más propiamente dicho, el agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC por sus siglas en inglés, Hydrogen Induced Cracking), está íntimamente relacionado con el ampollamiento por hidrógeno, y desde 1940 se ha reconocido como un problema serio en recipientes y tuberías que transportan productos amargos y en la actualidad se reconoce como un problema altamente potencial en las tuberías usadas en la industria petrolera y petroquímica.

El HIC, a diferencia del SSC se observa predominantemente en aceros con bajas propiedades mecánicas (dureza, resistencia a la tensión, etc) y además está asociado con las inclusiones en el acero o con estructuras anormales como la laminación a la mitad de la pared del tubo. La iniciación de la grieta es el producto de la formación de hidrógeno molecular en las inclusiones y discontinuidades en los aceros y el crecimiento de la grieta resulta de los esfuerzos residuales o aplicados en conjunción con los efectos de la fragilización por hidrógeno. El fenómeno del HIC se ha observado principalmente en aceros de baja resistencia a la tensión (<550 Mpa) y en la placa de acero que se emplea para la construcción de recipientes a presión y/o la utilizada en la fabricación de tubería con costura. Caso contrario, la tubería sin

costura es la menos propensa a este fenómeno ya que ha sido muy poco observado, sin embargo, no se debe considerar inmune.

1.2.5 Aceros empleados en la industria petroquímica ^(1,12)

Existen diversos aceros para su uso en la industria petrolera y petroquímica. Entre ellos están los aceros al carbón y de baja aleación, de donde, aproximadamente un 80 % de todos los componentes encontrados en las refinerías y en las plantas petroquímicas están hechos de aceros al carbón.

Los aceros de baja aleación para servicio en refinerías son los aceros al cromo-molibdeno, los cuales contienen menos de 10% de cromo. Estos aceros poseen excelente resistencia a ciertos tipos de corrosión sulfurosa así como al ataque por hidrógeno a alta temperatura. Para mejorar la resistencia al agrietamiento por hidrógeno, los aceros de baja aleación requieren normalmente un tratamiento térmico posterior a las operaciones de soldadura. Es importante mencionar que los aceros al carbón y los aceros de baja aleación se encuentran establecidos en las normas del American Petroleum Institute (API), como materiales para uso en procesos petroquímicos.

Los aceros inoxidable también son muy utilizados en las plantas petroquímicas. En las refinerías y debido a su resistencia, los aceros inoxidable han sido limitados a aplicaciones que involucran corrosión sulfurosa a alta temperatura y algunas otras formas de ataque a alta temperatura, sin embargo, muchos aceros inoxidable presentan picaduras cuando existe la presencia de cloruros.

El hierro colado también tiene aplicaciones en el campo petroquímico, pero debido a su fragilidad, normalmente no se usan para componentes que involucren presión o manejo de hidrocarburos inflamables.

Con todo esto, y aun con el constante monitoreo e inspección de los materiales usados en esta industria, debido a que el proceso de transporte implica la exposición de las tuberías a los agentes químicos antes mencionados, así como a esfuerzos mecánicos de tensión producidos por las elevadas presiones internas, es común la ocurrencia de fallas de componentes estructurales, siendo este uno de los principales problemas de la industria petrolera en México. Esto hace que los costos de pérdida

Aseguramiento de la calidad de los aceros usados para transporte de hidrocarburos amargos, en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

de tiempo, el reemplazo de piezas o de materiales de construcción, el personal involucrado en el control de la corrosión, etc., sean muy elevados, además de que un mal control de la corrosión puede resultar en un serio daño del medio ambiente.

Actualmente en México, la red de ductos para la conducción de petróleo y sus derivados es de aproximadamente 56 mil kilómetros, incluidos los ubicados en zonas submarinas y aproximadamente el 50 % del total de tubos en operación tiene más de treinta años⁽⁷⁾. Ahora bien, a pesar de que el mantenimiento es riguroso y constante, con frecuencia ocurren complicaciones provocadas por el fallo del material, lo cual como ya se mencionó, es producto de la corrosión.

Este problema ha hecho necesario el desarrollo e implementación de nuevas técnicas y/o métodos de protección, así como un control de calidad más estricto, todo ello encaminado a la prevención del deterioro de las tuberías de transporte de hidrocarburos.

1.3 Procedimiento Experimental. ^(14, 15)

1.3.1 Objetivo

Objetivo General:

Asegurar el cumplimiento de los requisitos mínimos de calidad de los tubos de acero usados en el transporte de gas amargo y en aplicaciones petroquímicas en México, a través de la realización de pruebas de susceptibilidad y resistencia al agrietamiento inducido por hidrógeno en estos materiales.

Objetivo Particular:

La evaluación de la susceptibilidad y de la resistencia al agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC), de las tuberías empleadas en el transporte de gas amargo y efectuar un análisis y una discusión enfocados a establecer las razones por las que se aceptan o se rechazan los materiales en cuestión.

1.3.2 Prueba de Susceptibilidad

Se considera importante mencionar que fueron dos las tuberías a estudiar, cada una fabricada con un tipo de acero distinto, a saber, acero X-52 para la primera, la cual a partir de este punto llamaremos **X-52** y de acero X-60 la segunda, la cual será nombrada **X-60**.

1.3.2.1. Corte y obtención de barras. Con la ayuda de un soplete, del tubo de acero a estudiar se recortó, una sección cuadrada de aproximadamente 250 X 250 mm. Así mismo, a partir de este trozo de tubo, se procedió a cortar 3 barras para lo cual se utilizó una máquina sierra-cinta. Este proceso se realizó de acuerdo con lo especificado en la norma NACE TM0284-96 ⁽¹⁴⁾, sección 4, apartado 4.1.1, la cual menciona que: Las dimensiones de las barras a estudiar deberán ser 100 ± 1 mm de longitud por $20 + 1$ mm de ancho. El espesor de las barras, deberá ser el permitido por el espesor de la pared del tubo, sin embargo, un máximo de 1mm podrá ser removido de la superficie interna y/o externa. En el presente trabajo, el espesor obtenido fue de 19 mm y el ancho fue de 33 mm. Así mismo, en el apartado 4.2.3 inciso (c) referente al número, localización y orientación de las barras, se establece que: las muestras deberán tomarse de tal manera que su eje longitudinal sea perpendicular al eje longitudinal de la soldadura (ver figura 1).

Figura 2. Barras de acero X-52 obtenidas a partir de la tubería bajo estudio. El mismo procedimiento se realizó sobre la muestra X-60.

Aseguramiento de la calidad de los aceros usados para transporte de hidrocarburos amargos, en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

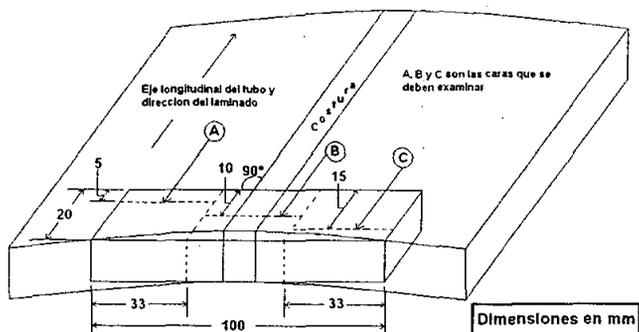


Figura 1. Esquema de un tubo con costura longitudinal y región del mismo en donde se debe realizar la extracción de las barras para el ensayo de susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno.

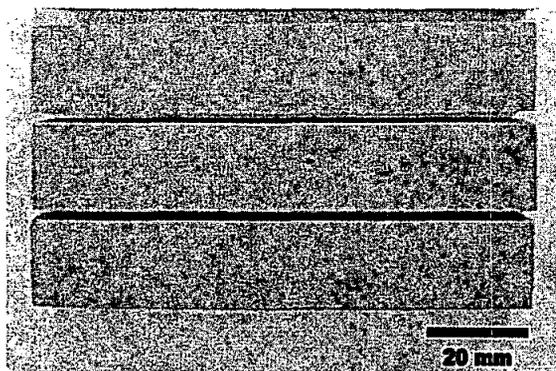


Figura 2. Barras de acero X-52 obtenidas a partir de la tubería bajo estudio. El mismo procedimiento se realizó sobre la muestra X-60.

Aseguramiento de la calidad de los aceros usados para transporte de hidrocarburos amargos, en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

1.3.2.2. Limpieza. Las seis caras de la barra se desbastaron en seco comenzando con lija calibre 100 o inferior y/o de grano más grueso y el acabado final se realizó con lija calibre 320, tal y como lo establece la norma NACE TM0284-96, que es el estándar bajo el cual se realizó el presente trabajo. Antes de la exposición de las muestras al reactivo de prueba, éstas se desengrasaron con acetona. Posteriormente las muestras se almacenaron en un desecador. Es importante mencionar que la permanencia de las muestras en el desecador no deberá exceder de 24 horas. Si se sobrepasara este tiempo, las muestras se deberán desengrasar nuevamente.

1.3.2.3. Colocación de las barras en el interior del reactor. La prueba se realizó dentro de un reactor hermético (ver figura 3) y duró aproximadamente 100 horas (4 horas más de lo que establece la norma). Las muestras fueron colocadas en el interior del reactor empleando para ello el arreglo mostrado en la figura 4. Es importante resaltar que las muestras se deben colocar tal y como se muestra en la figura 4, con la cara ancha en forma vertical. Los rodillos separadores de las muestras deberán tener un diámetro mínimo de 6 mm, deben ser de cristal o de un material no metálico y químicamente estable, es decir, que no reaccione con la solución de prueba.

1.3.2.4. Llenado del reactor. El reactivo empleado en el ensayo fue agua de mar sintética. Para la preparación de éste reactivo, el presente estudio se refirió a la norma ASTM D 1141. El pH inicial obtenido en la solución fue de 8.0 (la norma NACE TM0284 bajo la que se realizó el presente estudio, establece un intervalo de pH de 8.1 a 8.3) y la temperatura de ensayo fue de 26 °C. El reactor fue llenado con el reactivo antes mencionado, teniendo especial cuidado de cubrir completamente las muestras (cupones) con la solución, de tal manera que éstas quedaran totalmente sumergidas.

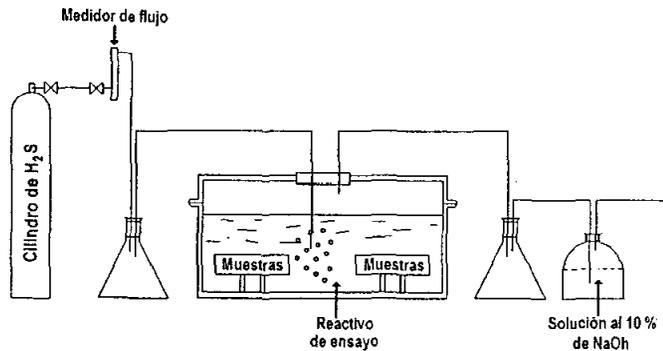


Figura 3. Diagrama esquemático del aparato utilizado durante la prueba. En él se muestra el arreglo del reactor junto con otros dispositivos auxiliares.

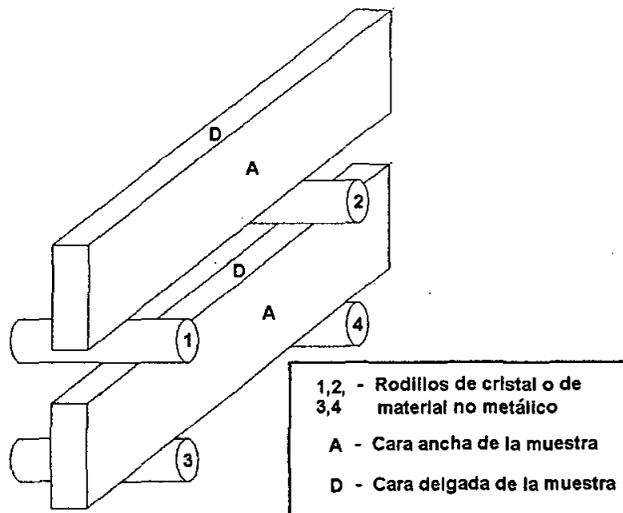


Figura 4. Diagrama esquemático del aparato utilizado durante la prueba. En él se muestra el arreglo del reactor junto con otros dispositivos auxiliares.

1.3.2.5. Purga y saturación del reactor. Una vez sumergidas las muestras en la solución, el reactor se cerró herméticamente y se procedió a purgar el aire que quedó atrapado en el interior del mismo. Para el proceso de purga, se utilizó nitrógeno gaseoso, el cual se introdujo en el reactor a razón de 100 cm^3 por minuto por litro de solución. El tiempo de purga fue de 90 minutos aproximadamente. Pasado este tiempo, se cerró el flujo del nitrógeno y se abrió el de sulfuro de hidrógeno para dar paso a la saturación. El sulfuro de hidrógeno se introdujo en el reactor a razón de 200 cm^3 por minuto por litro de solución. Esta proporción se mantuvo por un periodo de 60 minutos, para después disminuirse a 10 cm^3 por minuto por litro de solución. La norma establece un tiempo de exposición de 96 horas, sin embargo, en el presente trabajo, dicha exposición se mantuvo por un periodo de 100 horas.

1.3.2.6. Seccionamiento de las barras. Transcurrido el tiempo de exposición, las barras expuestas, se seccionaron en tres muestras individuales, a cada una de las cuales se le llama "cupón". De las barras de 20 X 100 mm se obtuvieron 3 cupones con las siguientes dimensiones:

- 1 cupón de 15 X 33mm para lo cual se removió una porción de 5mm.
- 1 cupón de 10 X 100mm para lo cual se removió una porción de 10 mm.
- 1 cupón de 5 X 33mm para lo cual se removió una porción de 15 mm.

El seccionamiento de las muestras se debe realizar tal y como se muestra en la figura 5.

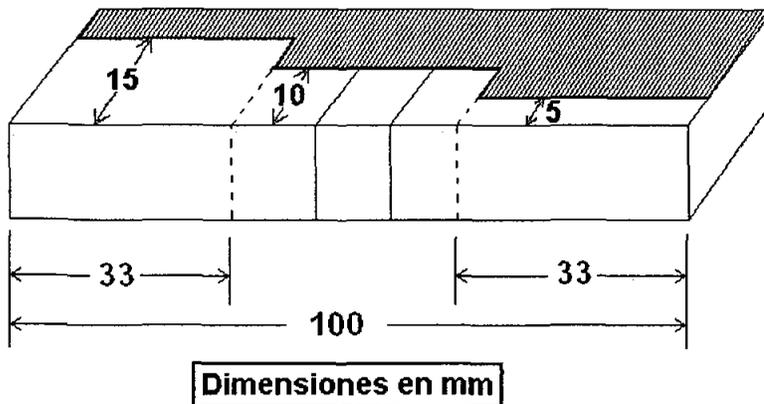


Figura 5. Diagrama esquemático en donde se muestra la forma de seccionar las barras para la obtención de los cupones.

1.3.3 Preparación metalográfica de los cupones.

1.3.3.1. Desbaste. El desbaste se realizó friccionando las caras a estudiar, sobre lijas de diferentes calibres, comenzando con una lija calibre 240 considerada como de grano grueso y terminando con una lija calibre 1500 considerada como de grano fino. Se utilizó agua como refrigerante y/o lubricante.

1.3.3.2. Pulido. Posteriormente al desbaste, se procedió a pulir la muestra, para tal efecto se empleó una máquina para pulir marca Leco, Mod. AX-3, con un paño microcloth como superficie de pulido y alúmina con tamaños de partícula de $1\ \mu\text{m}$, $0.5\ \mu\text{m}$ y $0.03\ \mu\text{m}$.

1.3.3.3. Microataque y observación de muestras. El ataque químico es una operación que se realiza con la finalidad de revelar la microestructura de la o de las muestras bajo estudio, para poder observarla en el microscopio, ya sea óptico o electrónico de barrido. Típicamente en la literatura se sugiere como reactivo de ataque el Nital III o Nital IV, siendo este reactivo, una solución compuesta por ácido nítrico disuelto en etanol en la proporción indicada por el nombre, es decir, tres

partes de ácido nítrico por cada 10 de etanol para el Nital III, cuatro partes de ácido nítrico por cada 10 de etanol para el Nital IV y así sucesivamente.

El microataque se realizó sumergiendo en el reactivo la cara pulida de la muestra durante 2 segundos aproximadamente. Inmediatamente después, la muestra se lavó con agua y posteriormente se sumergió en acetona para eliminar cualquier residuo de agua y finalmente se secó mediante la aplicación de aire caliente sobre la superficie pulida y atacada.

Para la observación de las muestras se utilizaron dos microscopios, a saber, un microscopio óptico marca Olympus modelo MO61 y un microscopio electrónico de barrido marca Jeol modelo JSM-T200, los cuales, tienen acoplada una cámara fotográfica. Se buscaron zonas de interés y se procedió a hacer las mediciones correspondientes de longitud de la grieta y del espesor de la misma.

1.3.3.4. Mediciones y cálculos. La medición de las grietas se realizó como se muestra en la figura 6. Por norma ⁽¹⁴⁾, la nomenclatura empleada es la siguiente: la longitud de las grietas se denomina a y al espesor de las mismas se le denomina b . Del mismo modo, el ancho de la muestra se representa con la letra W y al espesor de la misma se representa como T . Es importante mencionar que las grietas con una separación inferior a 0.5 mm (500 μm) se deben considerar como una sola. Aun las grietas identificables a ampliaciones de hasta 100X deberán ser incluidas en los cálculos.

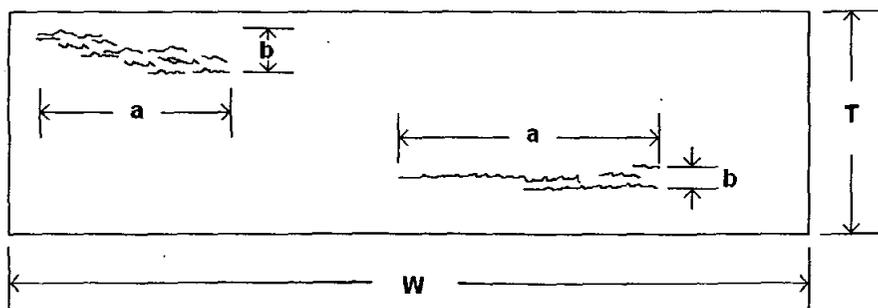


Figura 6. Método de medición de las grietas escalonadas en la prueba de susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno.

Aseguramiento de la calidad de los aceros usados para transporte de hidrocarburos amargos, en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

Posteriormente, los valores medidos de **a** y de **b** se sustituyen en las formulas 1 a 3 que se muestran a continuación.

$$\text{Indice de Sensibilidad al Agrietamiento, } CSR = \frac{\sum(a \times b)}{W \times T} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Indice de Longitud de Agrietamiento, } CLR = \frac{\sum a}{W} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{Indice de Espesor de Agrietamiento, } CTR = \frac{\sum b}{T} \times 100\% \quad (3)$$

1.4 Resultados y Discusión

1.4.1 Análisis químico

El análisis químico se realizó con un equipo de absorción atómica marca LECO, modelo TS2000. Para tal efecto se extrajeron virutas y limaduras (aprox. 10 – 15 gr) de las aleaciones bajo estudio (Muestra X-52 y Muestra X-60). Dichas virutas se diluyeron en ácido clorhídrico para hacer las distintas disoluciones y posteriormente hacer el análisis químico correspondiente.

En la tabla 1. se muestran los resultados obtenidos.

Muestra	Composición elemental (% en Peso)						
	C	S	Mn	Cu	P	V	Si
X-52	0.11	0.005	0.90	-	0.015	0.03	0.26
X-60	0.11	0.005	0.09	-	0.015	0.04	0.25
Valores máximos permitidos por la norma NRF-001-PEMEX-2000	0.10	0.005	1.050	0.350	0.020	0.11	-

Tabla 1. Composición química (% en Peso) de las muestras bajo estudio.

Al comparar los resultados obtenidos en el análisis químico con los exigidos por la norma **NRF-001-PEMEX-2000**⁽¹⁵⁾ de Petróleos Mexicanos y mostrados en la parte inferior de la tabla 1, se observa que todos los elementos se encuentran dentro del

Aseguramiento de la calidad de los aceros usados para transporte de hidrocarburos amargos, en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

rango de composición permitido por dicha norma, a excepción del carbón (C), el cual es ligeramente superior por un valor de 0.01.

A este respecto, se encuentra reportado en la literatura que la presencia de carbón en el acero es importante, ya que este elemento es considerado como efectivo en el aumento de la resistencia de los aceros, puesto que tiende a formar carburos con elementos aleantes tales como el Cr y el Mo, observándose con esto un incremento en la resistencia del acero al ataque por hidrógeno. Sin embargo los elementos (Cr y Mo) no se encuentran presentes en el material bajo estudio. Ahora bien, también se ha reportado que un incremento en el contenido de C en el acero, puede disminuir la resistencia del acero al ataque por hidrógeno, lo cual sugiere que el material bajo estudio podría exhibir cierta susceptibilidad a este fenómeno.

Del mismo modo, la norma **NRF-001-PEMEX-2000**⁽¹⁵⁾ exige un valor máximo del carbono equivalente igual a 0.32%. Por lo tanto y a fin de verificar el cumplimiento de la norma, se procedió a realizar el cálculo del carbono equivalente, el cual está dado por la ecuación 4, misma que se muestra a continuación.

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (4)$$

El valor del carbono equivalente calculado con la ecuación anterior fue de 0.266 % para la muestra X-52 y 0.136 % para la muestra X-60. Estos valores se encuentran dentro del límite permitido por la norma y que es de 0.32 %.

El cálculo del carbono equivalente es una forma de determinar cuantitativamente la influencia de la composición química sobre la soldabilidad del material. Ahora bien, está reportado que una reducción del contenido de carbono se traduce en un incremento en el grado de soldabilidad del material.

Se considera importante mencionar que en las requisiciones de tubería para servicio amargo, al proveedor se le debe proporcionar la siguiente información:

- Tipo de tubería
- Especificación
- Grado
- Tipo de servicio
- Diámetro de la tubería
- Espesor nominal de la pared
- Longitud nominal
- Acabado de los extremos
- Con o sin costura
- Proceso de fabricación del acero
- Historia de laminación.

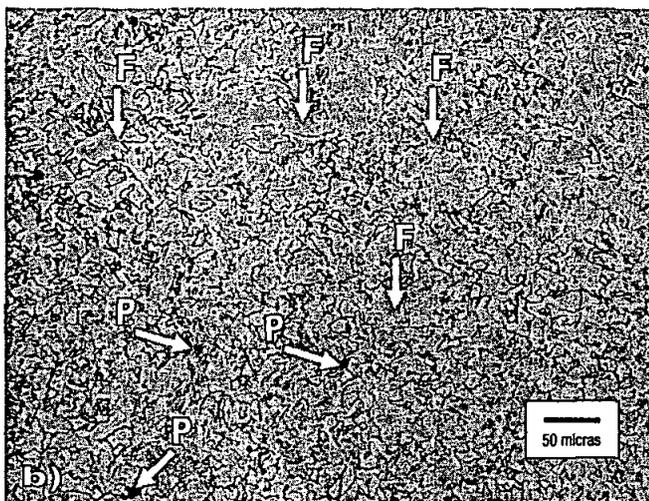
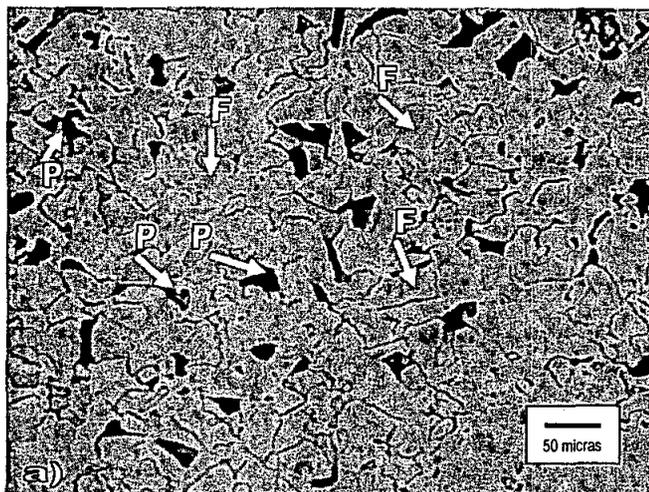
1.4.2 Metalografía y microestructura

Con la finalidad de determinar el estado microestructural de ambas muestras en el presente estudio, se realizaron metalografías, ensayos de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y microanálisis sobre las muestras X-52 y X-60 antes y después de las pruebas de HIC. A continuación se presentan algunas micrografías representativas de la microestructura presente en cada uno de estos dos aceros. Aunque la composición química de estos dos aceros es muy similar (ver tabla 1.), la morfología microestructural difiere bastante, lo cual se puede apreciar en las micrografías de la figura 7a) y 7b). La muestra de acero X-52, figura 7a), exhibe una microestructura resuelta y constituida por granos de ferrita equiaxiados mezclados con granos de ferrita parcialmente aciculares. Por otra parte, las regiones oscuras corresponden a la fase perlítica, señalados por las flechas, esta fase no se alcanza a resolver claramente debido a los bajos aumentos. El tamaño de grano promedio de este acero es de 3-4 ASTM.

La figura 7b) corresponde a la microestructura del acero X-60. Se pueden apreciar granos de ferrita de tipo idiomorfa con un tamaño de grano promedio de 6 – 7 ASTM. Esta morfología se presenta cuando existen regiones mezcladas de granos

equiaxiales, aciculares, alargados, etc. Así mismo, las regiones perlíticas son menos notorias (ver flechas en ambas figuras). Si bien la composición química de ambos aceros es similar, las diferencias en la morfología microestructural se debe tal vez a los procesos de fabricación de ambos aceros.

Con el objeto de corroborar y definir la presencia de la fase perlítica, las muestras del acero X-52 fueron observadas en un microscopio electrónico de barrido. Las figuras 8 y 9, muestran de manera clara la morfología de las fases ferrítica y perlítica, de donde se observa una definición de la perlita, formada por laminillas alternadas de ferrita y carburo de hierro (Fe_3C). Otro aspecto relevante de esta microestructura es que nota claramente como la fase perlítica se desarrolla a partir de los límites de grano. Los microanálisis mostrados corresponden, uno realizado en la región ferrítica y el otro en la región perlítica. En estos se puede observar que en el correspondiente a la zona perlítica se observa una mayor presencia de C debido a la fase de carburo de hierro (Fe_3C), y en la región ferrítica como era de esperarse, hay una menor presencia de C.



Figuras 7a) y 7b): Micrografías de las microestructuras observadas en los diferentes aceros a) Acero grado XA-52 (100x). b) Acero grado X-60 (100x).

Se considera apropiado mencionar que el reactivo de ataque utilizado en ambos tipos de acero fue Nital 2, cuya composición se reporta a continuación: 98% de alcohol etílico + 2% de ácido nítrico.

Aseguramiento de la calidad de los aceros usados para transporte de hidrocarburos amargos, en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

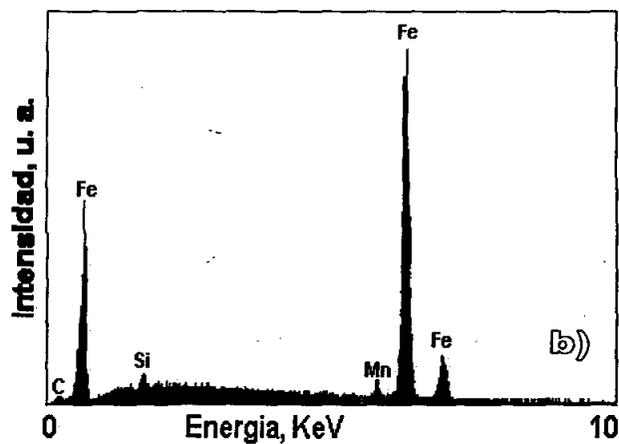
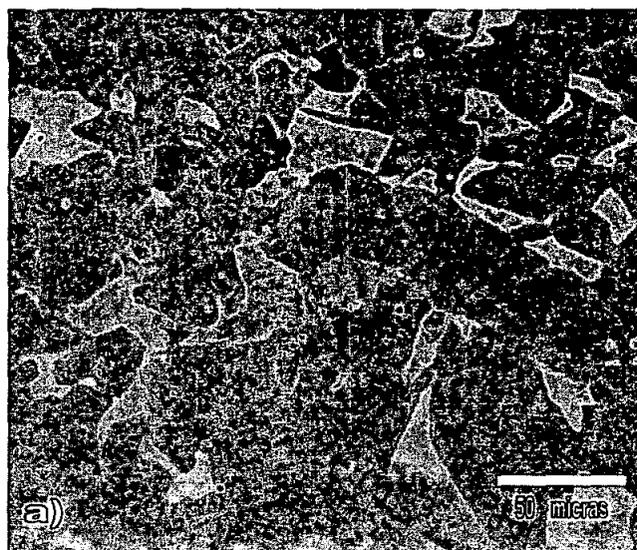


Figura 8a) Micrografía de SEM mostrando una vista general de la microestructura bifásica de ferrita y perlita presente en el acero de la muestra X52 b) Espectro de microanálisis mostrando los elementos constituyentes del acero.

Aseguramiento de la calidad de los aceros usados para transporte de hidrocarburos amargos, en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

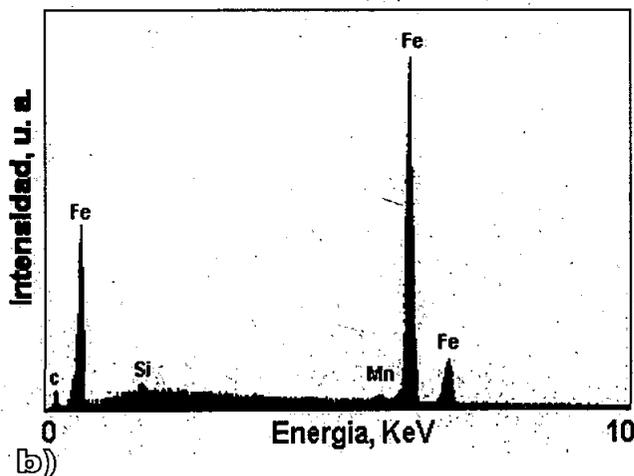
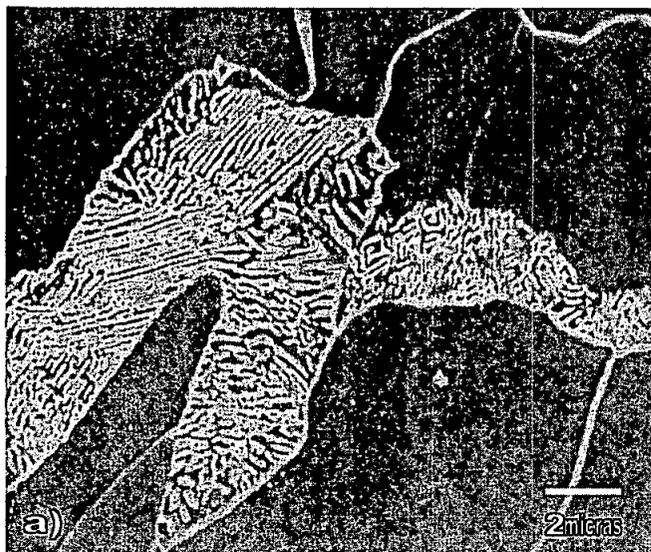


Figura 9a) Micrografía de SEM en donde se muestra una ampliación de la región perlitica observada en el acero de la muestra X52 b) Espectro de microanálisis mostrando los elementos presentes en esta región.

Aseguramiento de la calidad de los aceros usados para transporte de hidrocarburos amargos, en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

1.4.3. Prueba de HIC ⁽¹⁴⁾

La norma NACE TM0284-87 en la sección 7, apartado 7.2 establece que al final de la prueba de HIC, se debe reportar: el método o medio para desengrasar las muestras, el pH inicial del agua de mar sintética utilizada antes de la saturación y el pH de la solución de prueba al final del periodo de exposición

En la tabla 2 se proporciona la información requerida por la norma y también se muestran los resultados de los cálculos realizados con las mediciones (dimensiones de a y de b) hechas sobre las muestras X-52 y X-60.

Medio de desengrasado:		Acetona		
Duración de la prueba:		100 hrs		
	pH inicial:	8	pH final:	9.2
Concepto	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Promedio
	Muestra X-52			
CSR	1.861118419	0.706407	1.533518432	0.367014617
CLR	0.652750726	0.699158	1.255328143	2.869078956
CTR	0.134782592	0.085563976	0.171279215	0.130541927
Muestra X-60				
CSR	0.781426205	19.59696131	1.70600345	0.536163655
CLR	0.709332744	2.019303545	1.797674694	1.508770328
CTR	0.207410129	1.303790615	0.299591008	0.60359725

Tabla 2. Valores de a y b registrados en las muestras de acero X-52 y X-60 bajo estudio.

Índice	Valor máximo permitido por la norma
CSR	0.7 %
CLR	5.0 %
CTR	1.0 %

Tabla 2. Valores máximos del índice de sensibilidad al agrietamiento (CSR), del índice de longitud del agrietamiento (CLR), y del índice de espesor del agrietamiento (CTR) permitidos por la norma NRF-001-PEMEX-2000

Tomando como referencia los datos de la tabla 3.3.1 referentes a los valores promedio de CSR, CLR y CTR de cada muestra y al compararlos con los requerimientos de la norma NRF-001-PEMEX-2000 especificados en la tabla 2. se observa que todos los valores están dentro del rango especificado por la norma.

El valor del índice de sensibilidad al agrietamiento (CSR) experimental fue de 0.367% para la muestra X-52 y de 0.536 % para la muestra X-60, mientras que el máximo permitido por la norma es de 0.7 %. La exhibición de este bajo valor por parte de las muestras, indica que no hay posibilidad de que suscite la nucleación o el crecimiento de una grieta, en los aceros bajo estudio, al menos durante un lapso de 96 horas, tiempo, contemplado dentro de la norma.

Así mismo, tampoco existe la posibilidad de que una grieta avance en el sentido longitudinal del tubo, ya que el valor del índice de longitud del agrietamiento experimental fue de 2.869 % para la muestra X-52 y de 1.508 % para la muestra X-60, mientras que el valor máximo de CLR permitido por la norma NRF-001-PEMEX-2000 es de 5.0 %.

Por último, el valor índice del espesor del agrietamiento nos puede dar una idea de si el crecimiento de la grieta se puede suscitar en forma escalonada o no. La norma NRF-001-PEMEX-2000 especifica un valor máximo de CTR igual a 1.0 %. Con esta base, se puede afirmar que en las presentes muestras no existe la posibilidad de un crecimiento escalonado, ya que los bajos valores experimentales del CTR obtenidos así lo demuestran, 0.131 % para la muestra X-50 y 0.604 % para la muestra X-62.

Durante la realización del ensayo y debido a la agresividad del medio de prueba, la muestra sufrió un tipo de corrosión localizada, llamada comúnmente como corrosión por picadura, como se puede ver en la figura 10 y 11. En esta figura se pueden observar los huecos o picaduras resultantes del fenómeno.

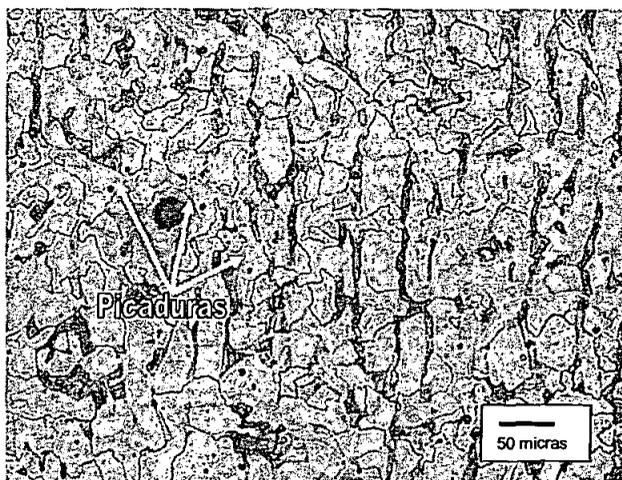


Figura 10. Fotografía de microscopía óptica mostrando los efectos (picaduras) de la agresividad del medio de prueba utilizado en los aceros bajo estudio.

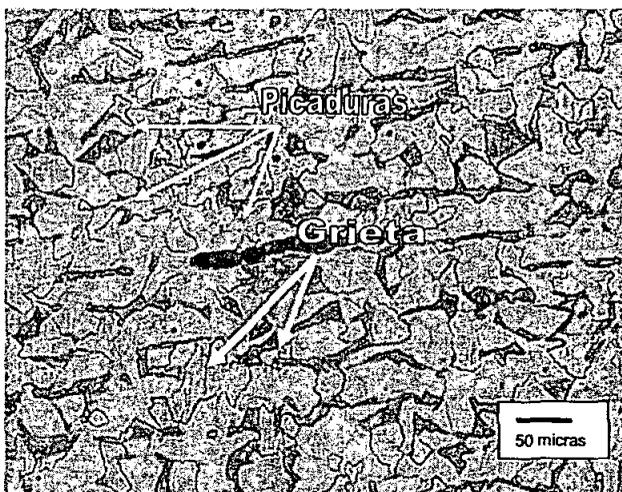


Figura 11. Fotografía de microscopía óptica en donde se observan picaduras debido a la agresividad del medio de prueba, así como una grieta, la cual también fue generada por efecto del medio de prueba.

Con base en esta información, se puede afirmar que los aceros estudiados si cumplen con los requisitos de calidad exigidos por la norma NRF-001-PEMEX-2000, sin embargo, se encuentra reportado en la literatura que la selección de materiales para instalaciones que implican el manejo y/o transporte de fluidos con CO₂ y H₂S como es el presente caso, se hace frecuentemente en base a la concentración de H₂S, de acuerdo con normas de amplia aceptación lo cual también es el presente caso. Ahora bien, este mecanismo o procedimiento tiene algunas desventajas, por ejemplo, para pozos de corta duración, el procedimiento especificado en la o las normas puede resultar en un sobrediseño y una inversión de capital innecesaria. Además, si el nivel de H₂S es menor que el correspondiente a la región de transición dulce/amargo, la selección del material se debe realizar en base a la resistencia a la corrosión en CO₂.

En un trabajo realizado por E.M.Moore ⁽¹³⁾, se demostró que cuando el Fe puro es expuesto a soluciones contaminadas con CO₂ en proporciones de 3.3 ppm y 0.0015 psi a una presión total de 450 psi, la velocidad de corrosión del hierro se incrementa hasta un valor máximo de 100 °C, a partir del cual comienza a decrecer, en el rango de temperaturas desde 50 – 150 °C. Para temperaturas mayores, no se observó diferencia en la velocidad de corrosión. Ahora bien, para concentraciones de H₂S mayores a 3.3 ppm, el efecto resultante fue un incremento en la velocidad de corrosión a temperaturas por debajo de 75 °C y un decremento más allá de este punto. La causa de este efecto, resultó ser la cinética competitiva de la precipitación del FeS y del FeCO₃ en el rango de temperaturas estudiado.

1.5 Conclusiones.

- Se evaluó la resistencia al agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC) de un acero para transporte de gas amargo, dentro de una solución estándar de acuerdo a la norma NACE TM0284-96
- El acero exhibió una bajo grado de corrosión, lo cual indica que el material en cuestión si es resistente al agrietamiento inducido por hidrógeno.
- Aunque no se mencionó en el texto, al término del ensayo se obtuvieron ciertos productos de corrosión, los cuales fueron identificados con sulfuro de hierro y algunos compuestos constituidos por Fe-C-O, los cuales muy probablemente sean óxidos de hierro o carburos de hierro.
- Los ensayos de HIC realizados en el presente trabajo, fueron hechas a una sola temperatura, siendo esta la temperatura ambiente. Ahora bien, está reportado con el incremento de la temperatura de ensayo genera velocidades de corrosión más altas, esto debido a que con el incremento de la temperatura, la solubilidad del H₂S en el agua también se incrementa.
- Con base en el punto anterior, se considera importante establecer que los datos plasmados en el presente reporte sólo son aplicables y confiables a temperatura ambiente.

1.6 Referencias

1. Russel D. Kane and Michael S. Cayard, *Materials Performance*. Pp. 48 – 54, July (1999).
2. R.T. Effinger, M.L. Renquist. *Hydrogen Attack of Steel in Refinery Equipment*, Proc. API , 31M(III) 33-107 (1951).
3. *Case Histories of Hydrogen Blistering and Hydrogen Embrittlement*. *Petroleum Processing* 4(8) .(1988).
4. *Corrosion – Damage to Interior of Vessel Walls from Hydrogen Blistering Studied*. *Petroleum Processing* 5 (3) (1990).
5. F. Paredes and W.W. Mize, *Oil and Gas Journal*, vo.l 53, p.p. 99 – 101, (1974).
6. E.M.More and J.J. Warga, *Materials Performance*, vol. 15, No. 6, pp 17 – 23, (1976).
7. CORROSIÓN . *Revista de divulgación Técnica y Científica de la Asociación Mexicana de Ingenieros en Corrosión A.C.* (1991).
8. L.A. De Vedia, *Boletín técnico Conarco*, No. 2, febrero, pp.2-3. (1988).
9. M.H. Bartz and C.E. Rawlins, *Corrosion*, vol. 4, pp. 187 – 206, (1948).
10. K. van Gelder, Simon Thomas and C.J. Kroese, *Corrosion* 85, paper 235.

11. Alberto Valdes, Raymundo Case, Marjorie Ramirez and Augusto Ruiz, Corrosion 98, paper 22.
12. "Materials System Specification for Sour, Wet Service Linepipe", Saudi, ARAMCO: Dhahran. P. 1 – 17 (1996).
13. E.M. Moore, J.J. W, "Factors Influencing Hydrogen Cracking Sensitivity of Pipeline Steels", in H₂S Corrosion in Oil and Gas Production - A Compilation of Classic Papers, R.N, Tuttle, R.D. Kane, Ed. NACE, Houston TX, P.936-942 (1981).
14. NACE Standard Test Method TM0284-96: "Evaluation of of Pipeline and Pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen Induced Cracking", NACE: Houston, Tx. P. 1-10 (1997).
15. Norma PEMEX: NRF-001-PEMEX-2000, Tubería de acero para recolección y transporte de hidrocarburos amargos.
16. M.Guerrero, L. Martinez, XI Congreso Internacional de Investigación en Materiales, P-20-14, (2002).
17. Force Technology, High end, Expandable, Automatic Inspection system P-Scan 4(4) (2005).

Detección de la causa que origino la falla de la soldadura de la estructura del helipuerto de la plataforma petrolera costa fuera, Akal Nova.

Capitulo	... Página
2.1	Introducción ...30
2.2	Antecedentes ... 32
2.2.1	Clasificación del aluminio y de sus aleaciones
2.2.2	Tratamiento térmico del aluminio
2.2.3	Aleaciones no tratables térmicamente
2.2.4	Aleaciones tratables térmicamente
2.2.5	Unión y/o soldadura del aluminio
2.2.6	Aleaciones utilizadas como material de aporte
2.2.7	Imperfecciones en las soldaduras
2.3	Procedimiento Experimental ... 41
2.3.1	Objetivo
2.3.2	Toma de muestras
2.3.3	Análisis químico
2.3.4	Preparación metalográfica
2.3.5	Determinación del tipo de aluminio
2.3.6	Propiedades mecánicas
2.3.7	Determinación del tipo de aluminio
2.4	Resultados y discusión ... 44
2.4.1	Determinación del tipo de aleación
2.4.2	Análisis y determinación de la causa de la falla en las piezas soldadas
2.5	Conclusiones ... 55
2.6	Referencias ... 56

2.1. Introducción

El aluminio es un metal de color blanco brillante semejante a la plata, el cual es altamente resistente a la corrosión y a la oxidación, es muy maleable y también es altamente reflectivo, tanto a la luz como al calor, por lo que estas mismas propiedades se pueden observar en sus aleaciones.^(10, 11)

La elevada resistencia a la corrosión que exhiben el aluminio y sus aleaciones, es el resultado de la formación de una delgada película de óxido, misma que se origina debido a la reacción química de este elemento con el medio ambiente. Dicha película es muy estable químicamente, por lo que protege al metal base, de la mayoría de los agentes químicos, de las condiciones climáticas y aun de muchos ácidos, sin embargo, se encuentra reportado que las sustancias alcalinas pueden penetrar dicha película corroyendo de esta manera al metal base, lo cual es una característica indeseable.

Además de las propiedades antes mencionadas, el aluminio y sus aleaciones poseen también baja densidad y excelente resistencia mecánica en comparación con otros metales tales como el acero, el níquel, el bronce y el cobre, sin embargo, a temperaturas relativamente altas, del orden de 200 – 250 °C, la resistencia mecánica de las aleaciones de Al tiende a decrecer hasta casi perderse. Caso contrario, a temperaturas inferiores a 0 °C ($T < 0$ °C) la resistencia mecánica se incrementa, reteniendo al mismo tiempo su grado de ductilidad, lo cual es una característica del aluminio que es muy deseable puesto que puede tener aplicaciones estructurales a baja temperatura sin que se observe fragilidad.^(7, 8)

Es importante mencionar que el aluminio posee además una muy baja resistencia eléctrica, por lo que se considera un excelente conductor, lo cual permite su aplicación como conector eléctrico, sin embargo, estos conectores presentan tendencia a “ aflojarse ” después de un uso repetido, lo que provoca un falso contacto y consecuentemente la generación de arcos eléctricos y fuego.

Las características mecánicas antes mencionadas, hacen del Al y sus aleaciones metales muy versátiles, ya que permiten la realización de los procesos de laminado, estampado, extruido, estirado, forjado y por lo tanto permiten un fácil maquinado.⁽¹⁰⁾



Además de que se les puede dar una amplia variedad de acabados superficiales y algo muy importante es que se pueden hacer uniones de piezas de **Al** mediante el uso de ciertas técnicas de soldadura y también mediante la aplicación de cierto tipo de resinas. Como se puede ver, el **Al** posee muchas ventajas y muy pocas desventajas pero sobretodo, la combinación única de bajo peso, baja densidad y resistencia mecánica relativamente alta, hace de este metal, el segundo más utilizado en la fabricación de partes que van desde piezas estructurales para aparatos electrodomésticos, hasta piezas de ingeniería empleadas en la industria automotriz. Por lo tanto, es de esperarse que este sea también uno de los metales que se sueldan y/o se unen con mayor frecuencia, ahora bien, el aluminio no es difícil de soldar, sin embargo, el método y/o proceso, es distinto al de los aceros, ya que se tienen que tomar en cuenta diversos factores, los cuales son vitales para la obtención de una excelente unión.⁽⁶⁾

En el presente trabajo, se tiene un lote, compuesto por diversas placas de aluminio, las cuales aparentan ser de buena calidad, sin embargo, se desconoce la clasificación de las mismas, es decir, su clasificación.

Se intentaron unir dos piezas de aluminio provenientes del lote antes mencionado mediante soldadura de arco, pero la soldadura final exhibió excesiva porosidad y demasiada escoria, además de que a consecuencia de lo anterior, la soldadura falló y se fracturó.

Como se mencionó anteriormente, el tamaño del lote es grande e implica una fuerte suma de dinero, por lo que se planea aprovechar todo el aluminio que lo constituye. Ahora bien, es importante considerar que no todo el aluminio se puede unir mediante procesos de soldadura de arco, ya que debe existir cierta compatibilidad entre el aluminio de las diferentes partes, que permita la unión mediante dicho proceso.

2.2. Antecedentes

2.2.1. Clasificación del aluminio y de sus aleaciones

El aluminio, aunque es menos resistente que un acero, es ampliamente utilizado en la fabricación de dispositivos o componentes estructurales, debido a que es altamente resistente a la corrosión y a la oxidación, posee una baja densidad lo cual se traduce en bajo peso y también es fácilmente soldable.

Puesto que el aluminio puro es relativamente suave, generalmente se agregan pequeñas cantidades de elementos aleantes para producir un rango dado de propiedades mecánicas. Las aleaciones son agrupadas de acuerdo a los principales elementos aleantes. Específicamente, las aleaciones comerciales tienen una designación de cuatro dígitos, de acuerdo a las especificaciones internacionales para las aleaciones forjadas, ver figura 12. ^(1, 3)

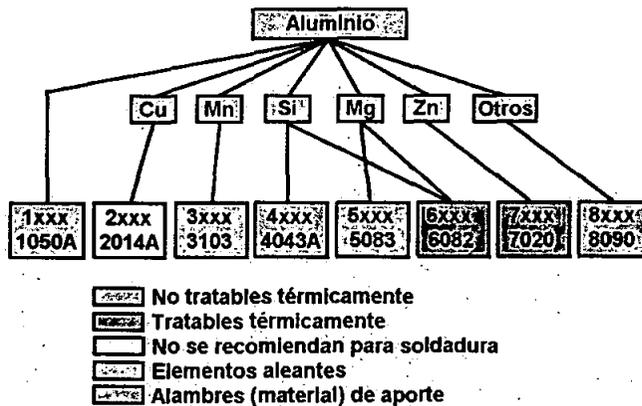


Figura 12. Clasificación de las diferentes aleaciones de aluminio, en base a los elementos aleantes constituyentes.

La asociación del aluminio (The Aluminum Association, Inc) ha ideado un sistema de numeración y de designación para clasificar a las aleaciones de aluminio, y este sistema fue adoptado por la American Society for Testing of Metals (ASTM). ⁽⁴⁾ A este respecto, la designación del aluminio forjado y de las aleaciones de aluminio forjadas, consta de un sistema de numeración de cuatro dígitos. El primero indica el grupo de aleación, el segundo, señala el cambio de la aleación original o límite de impurezas.

El cero se utiliza para la aleación original y los números enteros del 1 al 9, indican las modificaciones realizadas en la aleación. El grupo 1xxx se utiliza para el aluminio que tiene una pureza mínima de 99 % y mayores. Los dos últimos dígitos son los mismos que los dos a la derecha del punto decimal en el porcentaje mínimo de aluminio cuando se expresa a casi el 0,01 %. De este modo, 1060 indica un material con 99.60 % como mínimo de pureza de aluminio y ningún control especial sobre las impurezas individuales.

La designación anterior sigue a la de la aleación y se encuentra separada de ésta por un guión. Se utiliza para el aluminio y para las aleaciones de aluminio forjadas y de fundición y se basa en las secuencias de los tratamientos básicos utilizados para producir diversos temple. El sistema estándar de designación de temple consta de una letra que indica el temple básico, siendo estos, cuatro. ^(3,6)

1. F. Condición de fabricado, aplicado a productos que adquieren terminado de temple como resultado del tratamiento térmico de manufactura
2. O. Recocido, precristalizado. Es el temple más suave de los productos de aleación forjados.
3. H. Endurecido térmicamente. Se aplica a los productos susceptibles de incrementar térmicamente sus propiedades mecánicas, únicamente mediante un trabajado mecánico en frío.
4. T. Tratado térmicamente. Se aplica a productos tratados térmicamente, con o sin endurecimiento por deformación suplementaria. Para producir temple estables, la T se coloca posteriormente a los números 2 al 10, designando una combinación específica de operaciones básicas.

T2: Recocido (sólo productos finales)

T3: Tratados térmicamente y luego trabajados en frío

T4: Envejecidos

T5: Envejecidos artificialmente. Fabricado a alta temperatura con un posterior enfriamiento rápido (fundiciones, extrusiones).

T6: Tratados térmicamente y envejecidos artificialmente.

T7: Estabilizados.

Las aleaciones también pueden ser clasificadas de acuerdo al medio por el cual los elementos aleantes desarrollan las propiedades mecánicas, estas son, las aleaciones tratables térmicamente y las aleaciones no tratables térmicamente.

2.2.2. Tratamiento térmico del aluminio

Contrario a lo que podría pensarse, las aleaciones de aluminio son sujeto de tratamientos térmicos, siendo los tipos generales de tratamientos térmicos aplicados al aluminio y sus aleaciones los siguientes: ^(2, 5, 13)

- Precalentamiento u homogeneización, para reducir la segregación de las estructuras de colada también para mejorar su manipulación y su maquinabilidad.
- Recocido, que se utiliza para suavizar las estructuras endurecidas por deformación (endurecimiento por trabajado mecánico), así como de aleaciones tratadas térmicamente. Se hace con la finalidad de relevar esfuerzos mecánicos internos y para estabilizar las propiedades y las dimensiones.
- Tratamiento térmico de solución, que se realiza para disolver los elementos aleantes constituyentes y obtener una solución sólida homogénea y así mejorar las propiedades mecánicas del material.
- Tratamiento térmico de solución, que se efectúa para proporcionar un endurecimiento por la precipitación en forma de fases, de los elementos constituyentes de la solución sólida.

Ahora bien, es importante hacer notar que la definición común de tratamiento térmico empleada en las aleaciones de hierro + carbón (aceros), no es aplicable a las aleaciones de aluminio. La literatura define un tratamiento térmico, como la serie de operaciones de enfriamiento y calentamiento que son realizadas con la finalidad de cambiar las propiedades mecánicas, la estructura metalúrgica o el estado de esfuerzos residuales de un producto metálico dado. Sin embargo, cuando el término se aplica al aluminio y/o a sus aleaciones, su uso con frecuencia se restringe a las operaciones

empleadas para incrementar la resistencia y la dureza de una aleación forjada o de colada, endurecible por precipitación. Estas aleaciones usualmente son llamadas aleaciones " tratables térmicamente ", para distinguirlas de aquellas en las que mediante las operaciones de calentamiento y enfriamiento, no se obtiene un gran incremento en la resistencia mecánica, éstas últimas usualmente referidas como aleaciones " no tratables térmicamente ". De cualquier forma, a continuación se proporciona una definición un poco más rigurosa de ambos tipos de aleación.

2.2.3. Aleaciones no tratables térmicamente

Son aquellas en donde la resistencia del material depende del efecto del endurecimiento por trabajado mecánico o endurecimiento por deformación y el endurecimiento por solución de los elementos aleantes tales como el magnesio y el manganeso; *los elementos aleantes se encuentran principalmente en las series 1xxx, 3xxx y 5xxx.* Cuando estas aleaciones son soldadas, pueden perder los efectos del endurecimiento por deformación lo cual resulta en un ensuavecimiento de la zona afectada por el calor (HAZ por sus siglas en inglés) adyacente a la soldadura.

2.2.4. Aleaciones tratables térmicamente

Son aquellas en las que la dureza y la resistencia mecánica dependen de la composición química de la aleación y del tratamiento térmico (de solución y de temple seguido de un envejecimiento ya sea natural o artificial, lo que produce una fina dispersión de los elementos constituyentes). Los principales elementos aleantes son encontrados en las series 2xxx, 6xxx, 7xxx y 8xxx. La soldadura por fusión redistribuye los constituyentes endurecedores en la zona afectada por el calor (HAZ), lo cual reduce localmente la resistencia del material.

2.2.5. Unión y/o soldadura del aluminio

Como se mencionó anteriormente, el aluminio y sus aleaciones son metales que se sueldan y/o se unen con mucha frecuencia, por lo que se han desarrollado e implementado una amplia variedad de métodos encaminados a la unión de este

elemento y de sus aleaciones. Ejemplos de estos son el uso de ciertas resinas, soldadura por resistencia eléctrica e incluso mediante soldadura por fusión y por láser entre otros. En la figura 13 se muestran los principales métodos de soldadura.

Cuando se utiliza el método o técnica adecuada de soldadura, las uniones exhiben una tenacidad y resistencia apropiada a las demandas y/o aplicaciones del aluminio.

Actualmente se han desarrollado y fabricado una gran diversidad de aleaciones de aluminio, por ejemplo, Alclad 3003-H12, H14, H16, H18, Alclad 3004-H32, H34, H36, H38, H14, H16, 5456-H111, H112, H321, H323, H343, etc., por lo que en los procesos de soldadura que impliquen cualquiera de estas aleaciones, es importante conocer qué tipo de aleación o de aleaciones se van a soldar, siendo especialmente recomendable

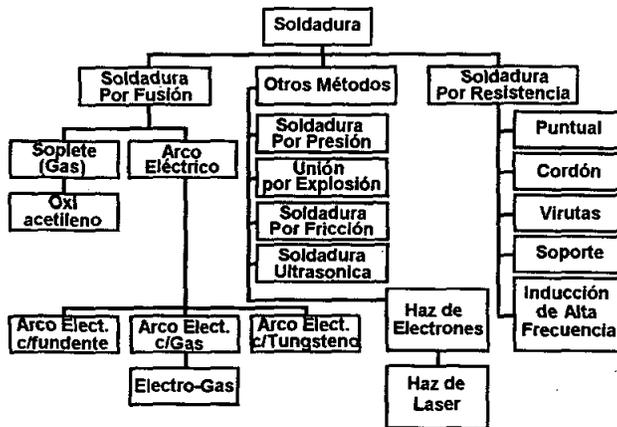


Figura 13. Técnicas y tipos de soldadura mediante las cuales se pueden hacer uniones de piezas de aluminio.

que el aluminio del metal base y el aluminio del metal de aporte sean lo más similares posible.

La mayoría de los grados de forja en las series 1xxx, 3xxx, 5xxx, 6xxx y de media resistencia, 7xxx, pueden ser soldadas por fusión empleando las técnicas TIG (Tungsten Inert Gas) y/o MIG (Metal Inert Gas).

En particular, las aleaciones de la serie 5xxx poseen excelente soldabilidad, sin embargo, la mayoría de las aleaciones de la serie 2xxx no se recomiendan para

Detección de la causa que origino la falla de la soldadura de la estructura del helipuerto de la plataforma petrolera costa fuera, Akal Nova.

soldadura por fusión debido a que son propensas al agrietamiento por licuefacción y por solidificación.

2.2.6. Aleaciones utilizadas como material de aporte ⁽⁸⁾

La composición del material de aporte está determinada por los siguientes factores:

- Soldabilidad del material base
- Propiedades mecánicas mínimas del metal a soldar
- Resistencia a la corrosión
- Requerimientos de recubrimiento anódico

Para la soldadura de aleaciones no tratables térmicamente, se emplean materiales de aporte iguales o lo más parecido posible al material base. Sin embargo, para materiales muy "puros" y para aleaciones térmicamente tratables, los materiales de aporte utilizados son diferentes del metal base, esto con la finalidad de prevenir el agrietamiento por solidificación.

La selección de la composición del material de aporte para varios tipos de aleaciones soldables, se especifica en la norma BS 3019 Pt 1 para soldadura por TIG y en BS 3571 Pt 1 para soldadura por MIG. Las composiciones recomendadas del material de aporte para las aleaciones más comúnmente usadas se muestran en la tabla 2.2.61.

Designación	ISO	Clasificación	Mat.Aporte	Aplicación
1080A	A1998	NHT	1080A	En plantas químicas
3103	A1-Mn1	NHT	4043A	Edificios, intercambiadores de calor
4043A	A1-Si5	-	-	Metal de aporte
5083	A1-Mg4.5Mn	NHT	5556A	Embarcaciones, vagones de ferrocarril, puentes
5251	Al-Mg2	NHT	5356	Marina
5356	Al-Mg5	-	-	Metal de aporte
5556A	AlMg5Mn	-	-	Metal de aporte
6061	Al-Mg1SiCn	HT	4043A/5356	Estructuras y tuberías
7020	Al-Zn,4.5Mg1Mn	HT	5556A	Estructuras y transporte
HT = Térmicamente tratable NHT = No térmicamente tratable				

Tabla 2.2.61.

2.2.7. Imperfecciones en las soldaduras ⁽⁸⁾

El aluminio y sus aleaciones se pueden soldar fácilmente obteniéndose un producto final de calidad si se toman las medidas precautorias apropiadas. Sin embargo, si no se tiene cuidado, el producto resultante será de muy baja calidad, además de que presentará una serie de imperfecciones, las cuales lo pueden llevar a la falla con consecuencias desastrosas. A este respecto, las imperfecciones más comúnmente observadas son las siguientes:

1. Porosidad
2. Agrietamiento
3. Perfil de soldadura deficiente y de mala calidad

Porosidad

La porosidad con frecuencia es tomada como una característica inherente de las soldaduras por el proceso MIG. La típica aparición de porosidad finamente distribuida en una soldadura del tipo TIG se muestra en la figura 14.

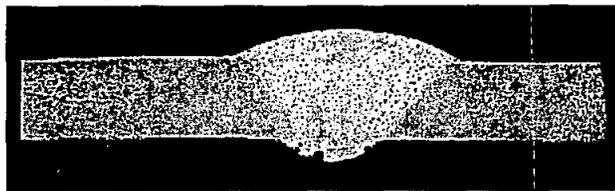


Figura 14. Vista transversal de la unión de dos placas de aluminio. El cordón de soldadura presenta en su interior una porosidad excesiva

La causa principal de la porosidad es la absorción de hidrógeno en el charco de soldadura en el cual se forman discretos poros debido a la solidificación del metal soldado. Las fuentes de hidrógeno más comunes son los hidrocarburos y la humedad presentes en el metal base y en la superficie del o de los materiales de aporte y el vapor de agua presente en la atmósfera de gas que rodea a la soldadura. Aún las trazas de hidrógeno pueden exceder el umbral de la concentración requerida para nuclear

burbujas en el charco de la soldadura, siendo el aluminio uno de los metales más susceptibles a la porosidad.

Para minimizar el riesgo de formación de poros, se recomienda limpiar rigurosamente la superficie del material base y del material de aporte. A este respecto, tres técnicas de limpieza son sugeridas; limpieza mecánica, desengrasado con solventes apropiados y limpieza mediante ataque químico.

Limpieza Mecánica

Para remover de la superficie de los materiales a unir así como el material de aporte el óxido y cualquier otro posible contaminante, se recomienda utilizar un cepillo de alambres con cerdas de acero inoxidable. Es importante mencionar que el desengrasado con un solvente, se deberá realizar previamente al cepillado o a la limpieza mecánica.

Solventes

Para remover las grasa, el aceite y/o la suciedad presente en las superficies de los materiales a usar en la soldadura, con la ayuda de un paño éstos se pueden empear, rociar o frotar con algún solvente orgánico.

Ataque químico

Una solución de 5% hidróxido de sodio se puede utilizar para limpiar en volumen, es decir, toda la pieza, pero esta operación debe ser seguida inmediatamente por un enjuague en ácido nítrico y agua para remover los productos formados en la superficie debido a la reacción.

En las operaciones de soldadura con atmósfera de gas inerte, se deberá prevenir la entrada de aire mediante el aseguramiento de una cortina de gas protectora, y que el arco eléctrico está protegido de cualquier corriente de aire. Así mismo, también se deberán tomar precauciones para prevenir la entrada del vapor de agua recogido de las líneas de gas y del equipo de soldadura. Para tal efecto, se recomienda que los sistemas de soldadura se purguen por espacio de una hora, antes de su uso.

Agrietamiento por solidificación

En las aleaciones de aluminio, el agrietamiento (ver figura 14) ocurre debido a los altos esfuerzos generados a través de la soldadura, ocasionados por la elevada expansión

térmica (dos veces mayor que en el acero) y la contracción sustancial debido a la solidificación, típicamente de ~5% más que en las soldaduras de acero equivalentes.

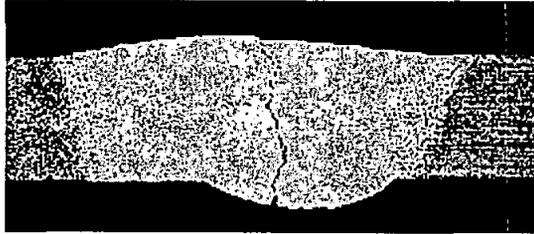


Figura 15. Vista transversal típica de un cordón de soldadura el cual presenta falla debida al agrietamiento por efecto del proceso de solidificación.

Las grietas debido a la solidificación se forman en el centro de la soldadura y usualmente se extienden a lo largo de la línea central durante el proceso de solidificación. Del mismo modo, las grietas por solidificación también ocurren en el cráter de la soldadura al final de la operación de soldadura. Las causas principales de la formación de grietas durante el proceso de solidificación son:

- i Combinación incorrecta del metal del material de aporte y el metal base
- ii Incorrecta geometría de la soldadura
- iii Soldadura con condiciones de restricción altas.

El riesgo de agrietamiento se puede reducir mediante el uso de un material de aporte resistente al agrietamiento y hecho de un metal diferente al del metal base, usualmente se usan las aleaciones de las series 4xxx y 5xxx; existe sin embargo una desventaja y es que la soldadura resultante puede exhibir una resistencia mecánica inferior que la del metal base y por lo tanto no responderá a un tratamiento térmico subsecuente.

El cordón deberá ser lo suficientemente delgado para resistir los esfuerzos producto de la contracción. También el grado de restricción en la soldadura se puede minimizar mediante la correcta preparación de los bordes a unir, la precisa configuración de la unión y la secuencia correcta de soldadura.

Agrietamiento por fusión

El agrietamiento por efectos de la fusión ocurre en la región afectada por el calor (HAZ) cuando en los límites de grano se forman películas con bajo punto de fusión. Estas películas no pueden resistir los esfuerzos de contracción generados cuando el metal soldado solidifica y se enfría. Las aleaciones de las series 6xxx, 7xxx y 8xxx tratables térmicamente, son más susceptibles a este tipo de agrietamiento.

Para reducir el riesgo de agrietamiento, se recomienda el uso de un metal de aporte con un punto de fusión inferior al del metal base, por ejemplo, las aleaciones de las series 6xxx son soldadas con metales de aporte de las series 4xxx. Sin embargo, los metales de las series 4xxx no se deben usar como materiales de aporte para soldar aleaciones con alto contenido de magnesio (por ejemplo la 5083), ya que se puede formar una cantidad excesiva de silicato de magnesio (magnesium-silicide) en los límites de la fusión, lo cual traerá como consecuencia un decremento en ductilidad y un incremento en la sensibilidad al agrietamiento.

2.3. Procedimiento experimental

2.3.1 Objetivo

Detección de la causa que originó la falla de la soldadura de la estructura del helipuerto de la plataforma petrolera, Akal Nova y como consecuencia el aseguramiento de la calidad de un lote de aluminio no clasificado.

2.3.2. Toma de muestras

Como se mencionó anteriormente, se tiene un lote, constituido por 70 barras de aluminio, las cuales presentan las siguientes dimensiones y formas:

10 barras de 2 X 2 X 0.125 X 25" STR Angle

20 barras de 4 X 4 X 0.250 X 25" STR Angle

20 barras de 1/4 X 8 Flat Bar

10 barras de .500 X 4.00 X 12" Rec Bar

10 barras de .12 X 7 X .310 I Beam

La composición química exacta de estas barras se desconoce completamente y por tal motivo, se procedió a tomar muestras de las diversas placas para realizar los análisis químicos correspondientes por absorción atómica.

Previamente a los análisis químicos, a las barras con su respectiva muestra se les asignó un nombre o etiqueta, esto con la finalidad de poderlas identificar fácilmente. La etiqueta asignada quedó como sigue:

Muestra 1: 2 x 2 x 0.125 x 25" STR Angle

Muestra 2: 4 x 4 x 0.250 x 25" STR Angle

Muestra 3: 1/4 x 8 Flat Bar

Muestra 4: .500 x 4.00X12" Rec Bar

Muestra 5: .12 x 7 x 0.310 I Beam.

Debido a que el ensayo no requiere de grandes cantidades de muestra, se recortaron solamente algunos trozos pequeños, de aproximadamente 3 o 4 cm² según lo permitiera la forma de la barra. De estos mismos fragmentos se extrajeron a su vez algunas limaduras teniendo especial cuidado de "etiquetar" con la nomenclatura antes mencionada, tanto las muestras obtenidas, como la barra de donde se obtuvieron.

Los trozos pequeños se utilizaron para realizar la metalografía, así como las correspondientes observaciones en el microscopio óptico y en el microscopio electrónico de barrido SEM.

Para la determinación de las propiedades mecánicas de las muestras bajo estudio, también se tomaron algunas muestras (20 a 30 cm de longitud) para la fabricación de las probetas de tensión y para los ensayos de dureza.

En lo que respecta a las piezas soldadas y fracturadas, se tomaron muestras de ambos extremos y también se les realizaron los ensayos y/o pruebas mencionadas arriba.

2.3.3. Análisis químico.

Los análisis químicos se realizaron en un equipo de absorción atómica marca LECO, modelo TS2000. Para tal efecto, las virutas obtenidas en el paso anterior, fueron diluidas en ácido clorhídrico para hacer las diferentes disoluciones y el análisis químico correspondiente a cada muestra.

2.3.4. Preparación Metalográfica.

Al proceso de corte, desbaste, pulido y ataque químico de una muestra se le llama metalografía. La metalografía se realizó tanto a las muestras provenientes del lote de aluminio, como a las piezas fracturadas.

El proceso de desbaste se inició con lija grado 400 y se terminó con lija grado 1000. Del mismo modo, el pulido de la muestra se realizó utilizando un paño "microcloth" y alúmina de diversos tamaños de grano, específicamente de 2, 1, 0.1 y 0.05 μm

El ataque químico se realizó con una solución compuesta por 0.5 ml de ácido clorhídrico (40%), disuelto en 100 ml de agua destilada. Las muestras fueron sumergidas en este reactivo por periodos que variaron desde 2 hasta 7 segundos aproximadamente y a temperatura ambiente.

Posteriormente al ataque químico, se procedió a hacer las observaciones de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. Es importante mencionar que dentro de las observaciones de SEM, se realizaron también análisis puntuales o microanálisis.

2.3.5. Determinación del tipo de aluminio

Terminada la preparación metalográfica, se procedió a buscar zonas de interés con la ayuda de un microscopio óptico metalográfico marca Olympus modelo MO61 y de un microscopio electrónico de barrido (SEM) marca JEOL, modelo JSM-6400, los cuales tienen acoplada una cámara fotográfica, misma que permite la toma de fotografías de la microestructura de la muestra. En el caso del SEM, éste cuenta además con un detector especial para efectuar el microanálisis elemental. El equipo cuenta además con un software que permite cuantificar en % en peso y % atómico los elementos químicos detectados.

2.3.6. Propiedades mecánicas

En el presente estudio, las propiedades mecánicas se determinaron mediante la realización de ensayos de tensión y pruebas de dureza sobre las muestras estudiadas. Los ensayos de tensión se realizaron en una máquina universal para pruebas de

tensión marca Instron, modelo 1125. Por su parte, las pruebas de dureza se realizaron en un durómetro Brinell marca Leco, modelo B201. A este respecto es conveniente mencionar que por cada muestra se realizaron 4 mediciones en diferentes zonas, tomándose como el resultado final, el promedio de estas cuatro lecturas.

2.3.7. Determinación del tipo de aluminio.

Con los resultados de los análisis químicos por el método de absorción atómica y con una tabla de designaciones y composiciones correspondientes a los diferentes tipos de aluminio, se procedió a hacer una comparación y posteriormente la determinación del tipo de Al bajo estudio.

Así mismo y con la finalidad de corroborar la identificación del tipo de aleación hecha con los análisis químicos, los resultados de las pruebas mecánicas fueron comparados con los reportados en la literatura para diferentes designaciones de aleaciones de Al.

En cuanto a la investigación de las causas de la falla, para tal efecto, se procedió a determinar los tipos y/o las clasificaciones del aluminio de las piezas bajo estudio. Se tomó la decisión de determinar los tipos de Al de las piezas, ya que se tenía la duda de si las piezas soldadas eran o no compatibles entre si.

2.4. Resultados y discusión

2.4.1. Determinación del tipo de aleación

Los resultados de los análisis químicos realizados sobre las muestras 1 a 5 se muestran en la tabla 2.4.1.1

Muestra	Composición química (% en peso)							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
1	0.55	0.7	0.25	0.16	0.93	0.15	0.25	0.15
2	0.42	0.7	0.18	0.15	0.97	0.05	0.25	0.15
3	0.45	0.7	0.21	0.15	0.81	0.15	0.25	0.15
4	0.66	0.7	0.18	0.15	0.88	0.28	0.25	0.15
5	0.48	0.7	0.33	0.16	1.1	0.31	0.25	0.15

Tabla 2.4.1.1 Composición química (% en peso) resultante de los análisis químicos realizados sobre las diferentes muestras de aleación de aluminio.

En la tabla anterior, se observa cierta similitud entre las concentraciones elementales de las cinco muestras, siendo la concentración de Fe, Zn y Ti, la misma en todos los especímenes. Los elementos que presentan una ligera variación son: Si ($\pm 0.24 \%$); Cu ($\pm 0.15 \%$); Mg ($\pm 0.29 \%$) y Cr ($\pm 0.26 \%$). Esta variación en la composición sugiere que cada una de las aleaciones pudiera tener una designación particular. En la tabla 2.4.1.2. se muestra la composición química reportada en la literatura para diferentes tipos y/o clasificaciones de aleaciones de aluminio. Comparando las tablas 2.4.1.1. y 2.4.1.2. se puede observar que existe correspondencia entre las composiciones químicas tanto de las aleaciones reportadas en la literatura, como de las aleaciones bajo estudio, sin embargo, los valores de las concentraciones elementales en el presente estudio, son más coincidentes con los correspondientes a la aleación designada como 6061. Por tal motivo, en principio se puede especular que las aleaciones bajo estudio son del tipo 6061. Ahora bien, las propiedades mecánicas típicas de las aleaciones 6061 reportadas en la literatura así como los resultados de los ensayos mecánicos realizados sobre las diferentes muestras (1 a 5), se exhiben en la tabla 2.4.1.3.

Si se analizan y se comparan ahora las propiedades mecánicas de las aleaciones bajo estudio (muestras 1 a 5) con los valores de las propiedades mecánicas de las aleaciones con designación 6061 y diferente tipo de temple reportadas en la literatura, se puede apreciar que dichas propiedades mecánicas no son exactamente iguales, sin embargo sí presentan mucha similitud, siendo la variación entre las propiedades de las aleaciones bajo estudio y las de la aleaciones reportadas en la literatura, la que se observa en la tabla 2.4.1.3. Como se puede ver, la variación es muy pequeña e incluso se encuentra entre los límites establecidos para este tipo de aleación, por lo que, con la evidencia anterior (análisis químicos) y los resultados de las propiedades mecánicas se puede afirmar con razonable precisión, que las aleaciones bajo estudio tienen la designación 6061 con temple T6 o T651.

Detección de la causa que origino la falla de la soldadura de la estructura del helipuerto de la plataforma petrolera costa fuera, Akal Nova.

Designación y composición química de algunas aleaciones de Al de uso más común										
Designación	Composición Química, % en peso									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros	Al
1100	0.95Si+Fe	-	0.05-0.2	0.05	-	-	0.1	-	0.15	99%
1145	0.55Si+Fe	-	0.05	0.05	0.05	-	0.05	0.03	0.03	99.45
2011	0.4	0.7	5.0-6.0	-	-	-	0.3	-	0.15	Rem
2014	0.5-1.2	0.7	3.9-5.0	0.4-1.2	0.2-0.8	0.1	0.25	0.15	0.15	Rem
2017	0.2-0.8	0.7	3.5-4.5	0.4-1	0.4-0.8	0.1	0.25	0.15	0.15	Rem
2024	0.5	0.5	3.8-4.9	0.3-0.9	1.2-1.8	0.1	0.25	0.15	0.15	Rem
2124	0.2	0.3	3.8-4.9	0.3-0.9	1.2-1.8	0.1	0.25	0.15	0.15	Rem
3003	0.6	0.7	0.05-0.2	1-1.5	-	-	0.1	-	0.15	Rem
3004	0.3	0.7	0.25	1-1.5	0.8-1.3	-	0.25	-	0.15	Rem
3005	0.6	0.7	0.3	1-1.5	0.2-0.6	0.1	0.25	0.1	0.15	Rem
3105	0.6	0.7	0.3	0.3-0.8	0.2-0.8	0.2	0.4	0.1	0.15	Rem
5005	0.3	0.7	0.2	0.2	0.5-1.1	0.1	0.25	-	0.15	Rem
5052	0.25	0.4	0.1	0.1	2.2-2.8	0.15-0.35	0.1	-	0.15	Rem
5086	0.4	0.5	0.1	0.2-0.7	3.5-4.5	0.05-0.25	0.25	0.15	0.15	Rem
6053	-	0.35	0.1	-	1.1-1.4	0.15-0.35	0.1	-	0.15	Rem
6060	0.3-0.6	0.1-0.3	0.1	0.1	0.35-0.6	0.05	0.15	0.1	0.15	Rem
6061	0.4-0.8	0.7	0.15-0.4	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	0.25	0.15	0.15	Rem
6063	0.2-0.6	0.35	0.1	0.1	0.45-0.9	0.1	0.1	0.1	0.15	Rem
6101	0.3-0.7	0.5	0.1	0.03	0.35-0.8	0.03	0.1	-	0.1	Rem
6463	0.2-0.6	0.15	0.2	0.05	0.45-0.9	-	0.05	-	0.15	Rem
7050	0.12	0.15	2-2.6	0.1	1.9-2.6	0.04	5.7-6.7	0.06	0.15	Rem
7075	0.4	0.5	1.2-2	0.3	2.1-2.9	0.18-0.28	5.1-6.1	0.2	0.15	Rem

Tabla 2.4.1.2. Composición química de algunas de las aleaciones de aluminio comerciales de uso más común.

Propiedades mecánicas (ksi) de algunas aleaciones de aluminio				
Aleación	Temper	Resistencia a la tensión	Esfuerzo de cedencia	% de elongación
6061	O	18	8	25
	T4, T451	35	21	22
	T6, T651	45	40	12
Alclad 6061	O	17	7	25
	T4, T451	33	19	22
	T6, T651	42	37	12
M1		44 **	40 **	10 **
M2		44 **	38 **	12 **
M3		45 **	40 **	10 **
M4		44 **	39 **	11 **
M5		44 **	39 **	13 **

Tabla 2.4.1.3. Propiedades mecánicas (reportadas en la literatura) para las aleaciones 6061 y resultados de las pruebas mecánicas realizadas sobre las aleaciones bajo estudio.

* Con probetas de 1.6 mm de espesor.

** Algunos de estos valores fueron redondeados al entero más próximo a partir del .6, por ejemplo 39.67 fue redondeado a 40.

A este respecto, se encuentra reportado en la literatura que este tipo de aleaciones, 6061, cuya designación de temple es T6, son aleaciones con un tratamiento térmico de solución y envejecidas artificialmente. Son aleaciones que no se trabajaron en frío después del tratamiento de solución o que el efecto del trabajo en frío no es significativo en cuanto a lo que a propiedades mecánicas se refiere, el envejecimiento artificial dicho sea de paso, es un tratamiento térmico de precipitación usado en las aleaciones de aluminio para proporcionar un endurecimiento adicional y consecuentemente una mejora de las propiedades mecánicas. Este tratamiento consiste en calentar la aleación a una temperatura mucho menor que la temperatura usada en el tratamiento de solución manteniéndose el material a esta temperatura durante un periodo prolongado de tiempo. Este tratamiento fortalece significativamente los granos de la estructura del material, haciéndolo más resistente y tenaz, lo cual explica el grado de resistencia mecánica observado en las aleaciones bajo estudio.

También está reportado que la designación T511 es para productos extruidos o para tuberías cuya relevado de esfuerzos se hace mediante una reducción permanente del área de sección transversal, que va desde 1 hasta 3 %. Dicha reducción se realiza posteriormente al tratamiento térmico de solución o después de un enfriamiento desde una temperatura elevada, producto del proceso de conformado.

Además de los análisis químicos realizados por el método de la vía húmeda, también se realizaron ensayos de microanálisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). La figura 16 muestra dos espectros representativos obtenidos mediante varios microanálisis, realizados sobre algunas de las muestras de aleación.

En estos se observa la presencia del aluminio como elemento predominante con la contribución adicional de otros elementos tales como el magnesio y el silicio, los cuales son los elementos aleantes, propios de este tipo de aleación como se puede observar en las tablas 2.4.1.1. y 2.4.1.2.

Detección de la causa que origino la falla de la soldadura de la estructura del helipuerto de la plataforma petrolera costa fuera, Akal Nova.

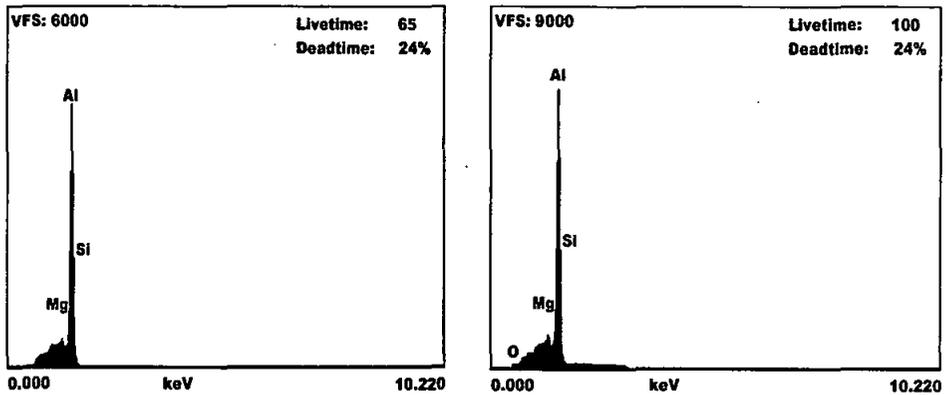


Figura 16. Espectros obtenidos de los microanálisis realizados sobre las muestras bajo estudio

El magnesio y el silicio son dos elementos que al combinarse forman un compuesto algunas veces llamado silicuro y en otras silicato de magnesio y cuya fórmula química es: $MgSi$. Este compuesto o fase, es parte constituyente de un sistema eutéctico bifásico formado por las fases $\alpha(Mg)$ y $MgSi$, como se puede ver en el diagrama de fases de la figura 17.

Durante el envejecimiento artificial, el compuesto $MgSi$ precipita y es el responsable del incremento y mejoramiento de las propiedades mecánicas de las aleaciones T6 y T511. Este tipo de tratamiento es aplicado a las aleaciones 6053, 6061 y 6063.

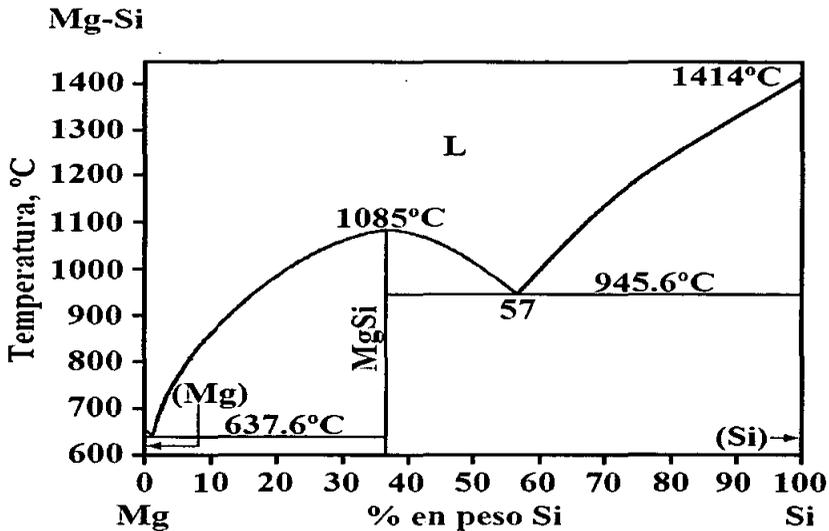


Figura 17. Diagrama de equilibrio de fases y porción del diagrama en donde se muestra la región de estabilidad eutéctica (α +MgSi) correspondiente al sistema Mg-Si.

Específicamente la aleación 6061 se caracteriza por la excelente resistencia a la corrosión y se puede trabajar más que otro tipo de aleaciones. Entre las aplicaciones típicas de esta aleación (6061) se encuentran la fabricación de mallas de refuerzo para pistas de aterrizaje en aeropuertos, tuberías, puentes, vagones de ferrocarriles, aplicaciones de indole arquitectónica y otras estructurales en donde la resistencia, la soldabilidad y la resistencia a la corrosión son necesarias.

2.4.2. Análisis y determinación de la causa de la falla en las piezas soldadas.

La figura 18 muestra dos macrografías en donde se observan las regiones fracturadas de las piezas que fallaron. En ellas se puede apreciar la existencia de poros y de inclusiones. Se logra observar además que la morfología de la fractura aparentemente es del tipo frágil lo que sugiere que la zona de la soldadura y la región afectada por el calor, se endurecieron excesivamente debido probablemente a un proceso de precipitación de alguna fase dura, producto de un mal control de la temperatura. Así

mismo, otro factor a considerar, es que el procedimiento de soldadura utilizado no haya sido el adecuado, además de que no se tiene la certeza de que los materiales utilizados en y/o para la unión de las piezas sean los correctos, es decir, que sean compatibles entre si.

Para determinar lo anterior se realizaron los análisis químicos correspondientes con un equipo de absorción atómica, tanto en las piezas fracturadas como en el material de aporte empleado en la soldadura. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2.4.2.1.

Composición química (% en peso)									
Muestra	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Resto
Pieza1	0.5	0.7	0.21	0.15	0.8	0.10	0.25	0.15	Al
Pieza2	0.3	0.35	0.10	0.10	0.6	0.10	0.10	N/A	Al
M. Aporte	0.25	0.4	0.10	1.1	5.0	1.01	0.10	0.09	Al

Tabla 2.4.2.1. Resultados de los análisis químicos realizados sobre las piezas fracturadas

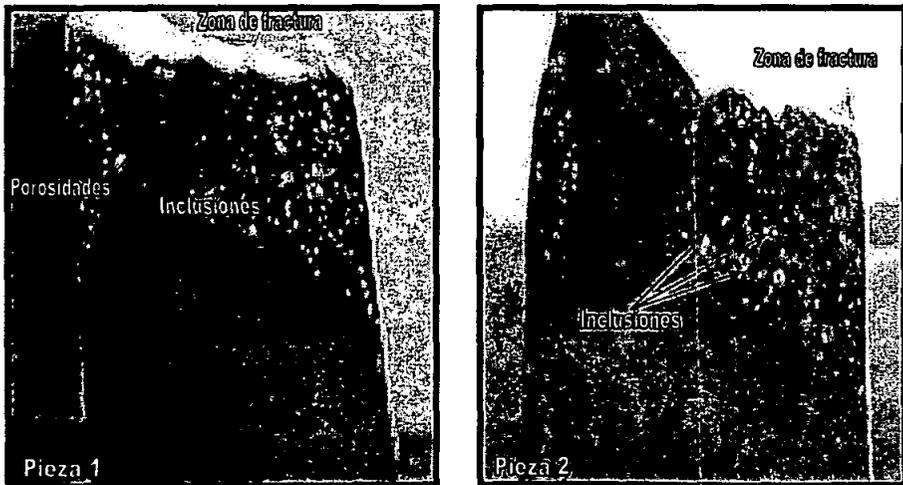


Figura 18. Macrografías de las piezas fracturadas en donde se resaltan aspectos importantes tales como la presencia de poros y de inclusiones.

Tomando como base los resultados de la tabla 2.4.2.1. y de acuerdo con las composiciones químicas mostradas en la tabla 2.4.1.2 tomadas como referencia, las muestras anteriores fueron identificadas como:

Pieza 1 = Aleación 6061

Pieza 2 = Aleación 6063

M. Aporte = Aleación 5356.

Es importante mencionar que, además de los análisis químicos efectuados para determinar la composición elemental general de ambas piezas, también se realizaron análisis químicos puntuales (microanálisis) sobre diversas partes y/o regiones de las piezas fracturadas, esto con la finalidad de determinar cualitativamente y también obtener una aproximación cuantitativa de la composición elemental local de dichas partes y/o regiones. Algunas de estas regiones y/o piezas que fueron de especial interés para la presente investigación fueron: el metal base, el interior de los poros y sobre algunas inclusiones. Los espectros más representativos, resultantes de los microanálisis se muestran en la figura 19.

Como se puede observar en esta figura, todas las piezas presentan como elemento predominante al aluminio con alguna contribución de magnesio y en mucho menor grado el silicio y algo de oxígeno. Este último elemento presumiblemente se encuentra presente en forma de un óxido, posiblemente óxido de aluminio Al_2O_3 . El óxido de aluminio (Al_2O_3) se forma inmediatamente en las superficies expuestas al medio ambiente. Esta capa de óxido es muy estable químicamente, incrementa su espesor conforme la temperatura y el tiempo también se incrementan y es bastante gruesa en las piezas de aluminio tratadas térmicamente.

La literatura específica que antes de unir dos piezas de aluminio mediante soldadura por fusión, éstas se deben limpiar de las capas de óxido formadas en su superficie. Para tal efecto, se recomiendan métodos mecánicos tales como el cepillado, el maquinado o incluso con algunos agentes químicos. En la tabla 2.4.2.2. se muestran algunos métodos de limpieza.

Del mismo modo, durante el proceso de soldadura se debe prevenir la formación de capas nuevas de óxido de aluminio. Para tal efecto, se debe inducir la formación escudo protector de gas argón, helio o hidrógeno, que impida la entrada y/o la presencia de oxígeno. Es importante mencionar además que existen algunos otros métodos de soldadura tales como el de presión y explosión, el ultrasónico y por fricción, en los cuales la película de óxido es fragmentada y dispersada mecánicamente durante la operación.

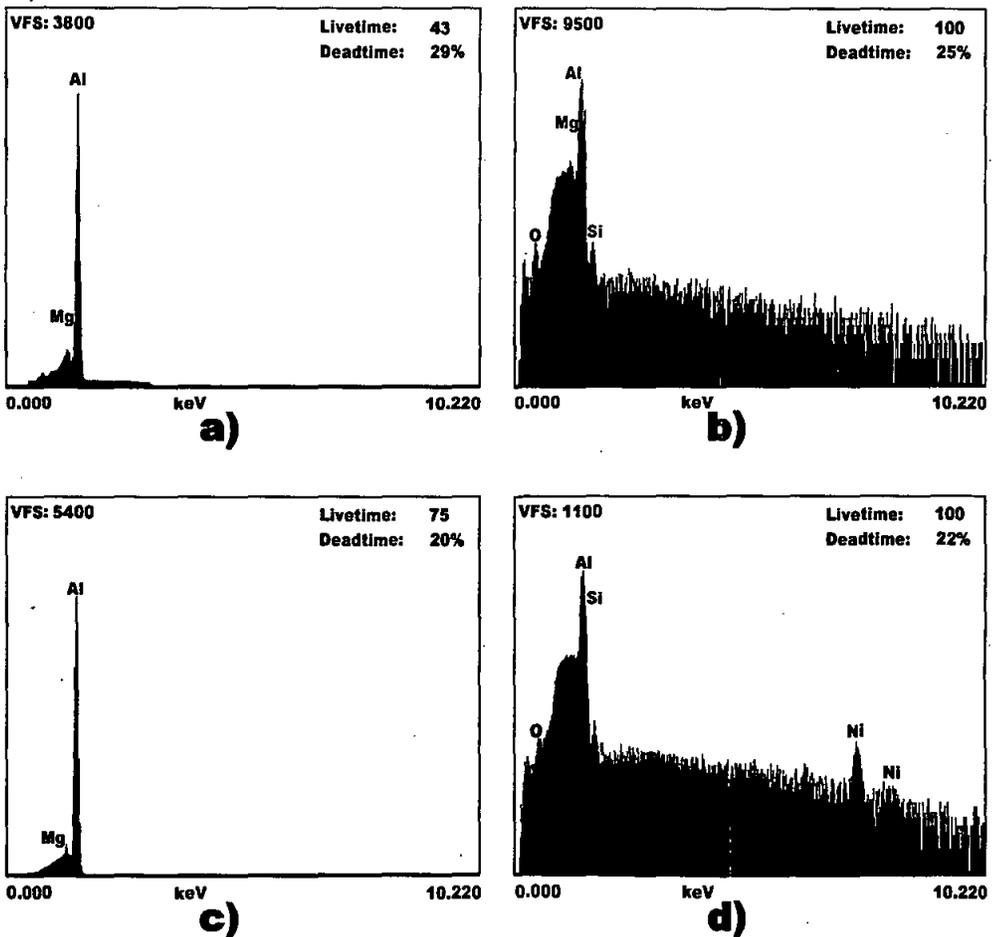


Figura 19. Espectrogramas obtenidos de los microanálisis realizados sobre diversas partes de las muestras fracturadas: a) Metal base, b) poro, c) interior del poro y d) inclusión.

Detección de la causa que origino la falla de la soldadura de la estructura del helipuerto de la plataforma petrolera costa fuera, Akal Nova.

Método y condiciones	Observaciones
Limpieza manual con un trapo limpio	Aplicable a todas las aleaciones, para todos los tipos de unión metalúrgica
Desengrasado con solventes comerciales por medio de frotación, rocío, inmersión o con vapor	Remueve aceite, grasa, suciedad y partículas perdidas; aplicable a todas las aleaciones, para todos los tipos de unión metalúrgica
Remoción mecánica de óxido por medio de cepillado, limado, desbastado, lijado, rectificado, etc.	Tratamiento suficiente para regiones y/o zonas tales como bordes en donde la oxidación no es muy severa. Aplicable a todas las aleaciones, para todos los tipos de unión metalúrgica
Tratamiento químico superficial por inmersión durante 15 minutos a temperatura ambiente en una solución al 50 % de ácido nítrico concentrado, seguido de un enjuague con agua fría, después con agua caliente y finalmente secado	Para la remoción de finas películas de óxido para todos los procesos de soldadura por fusión
Remoción química de óxido por inmersión a 70 °C y de 10 a 60 segundos, en una solución al 5 % de hidróxido de sodio, seguido de un enjuague con agua fría y un enjuague posterior en ácido nítrico concentrado a temperatura ambiente. Finalmente la pieza se enjuaga con agua caliente y se seca.	Para remover películas gruesas de óxido en todas las aleaciones y para todos los procesos de soldadura por fusión y latonado

Tabla 2.4.2.2. Métodos de limpieza típicos utilizados durante la preparación superficial de aleaciones de aluminio previamente al proceso de soldadura por fusión.

Por su parte, el espectrograma correspondiente a la inclusión (figura 19 d) exhibe la presencia de Ni además de los elementos antes mencionados. Este espectrograma en específico fue de especial interés, ya que proporcionó información

valiosa para la determinación de algunas de las posibles causas de la falla de las piezas. Por ejemplo, se encuentra reportado en la literatura que se debe evitar en lo posible la presencia del elemento Ni en este tipo de aleaciones, ya que promueve la disminución de la resistencia a la corrosión de las mismas. No se encontraron reportes formales de fallas por corrosión en este tipo de aleaciones, sin embargo, la literatura

menciona que la corrosión sí puede ser un factor que induzca la falla de una pieza de aleación de aluminio. Ahora bien, al observar detenidamente el espectrograma de la inclusión (figura 19 d) se aprecia que el pico correspondiente al níquel es relativamente alto, lo cual indica que la cantidad de este elemento es también hasta cierto punto alta, es decir, el pico de níquel no se debe a rastros y/o trazas de este elemento sino que indica una cierta cantidad en particular. Bajo esta premisa, se puede especular también que dicha inclusión podría estar formada por un compuesto intermetálico el cual a su vez está formado por Ni y Al rico en Al, ya que es éste último elemento el más abundante. A este respecto, se han publicado reportes en donde se informa que los compuestos intermetálicos de NiAl ricos en Al, son altamente resistentes a la temperatura, es decir, no se funden con facilidad puesto que su punto de fusión es de alrededor de 1638 °C, además de que también son excesivamente frágiles y duros exhibiendo poca o nula ductilidad a temperatura ambiente.

Por otra parte y en base a los resultados de los análisis químicos tanto de las piezas que forman parte de la unión como del material de aporte empleado, se determinó que las piezas unidas son de aleación de aluminio 6061 y 6063, y el material de aporte es aleación 5356. A este respecto, se encuentra reportado que las aleaciones de aluminio 6061 y 6063 entre otras, sí son compatibles entre si por lo que sí es posible unir las mediante soldadura, siempre y cuando el material de aporte a utilizarse sea el adecuado. Los materiales de aporte permitidos para este tipo de unión son, 4043, 4145 y 5356. Ahora bien, la elección del tipo de material de aporte, depende del uso o servicio que va a prestar o bajo el que va a operar la soldadura. En el presente caso, el material de aporte utilizado en la unión es aleación 5356, la cual se reporta como apropiada para unir piezas de aleación de aluminio con designaciones, 6061, 6063, 6101, 6151, siempre y cuando estas no estén sometidas a temperaturas de operación superiores a 65 °C.

En el presente trabajo y como ya se ha mencionado, el material de aporte usado en la unión de las piezas que fallaron es aleación de aluminio con designación 5356 el cual sí está permitido para unir aleaciones de aluminio con designación 6061 y 6063.

2.5 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en el presente estudio se determinaron las siguientes conclusiones:

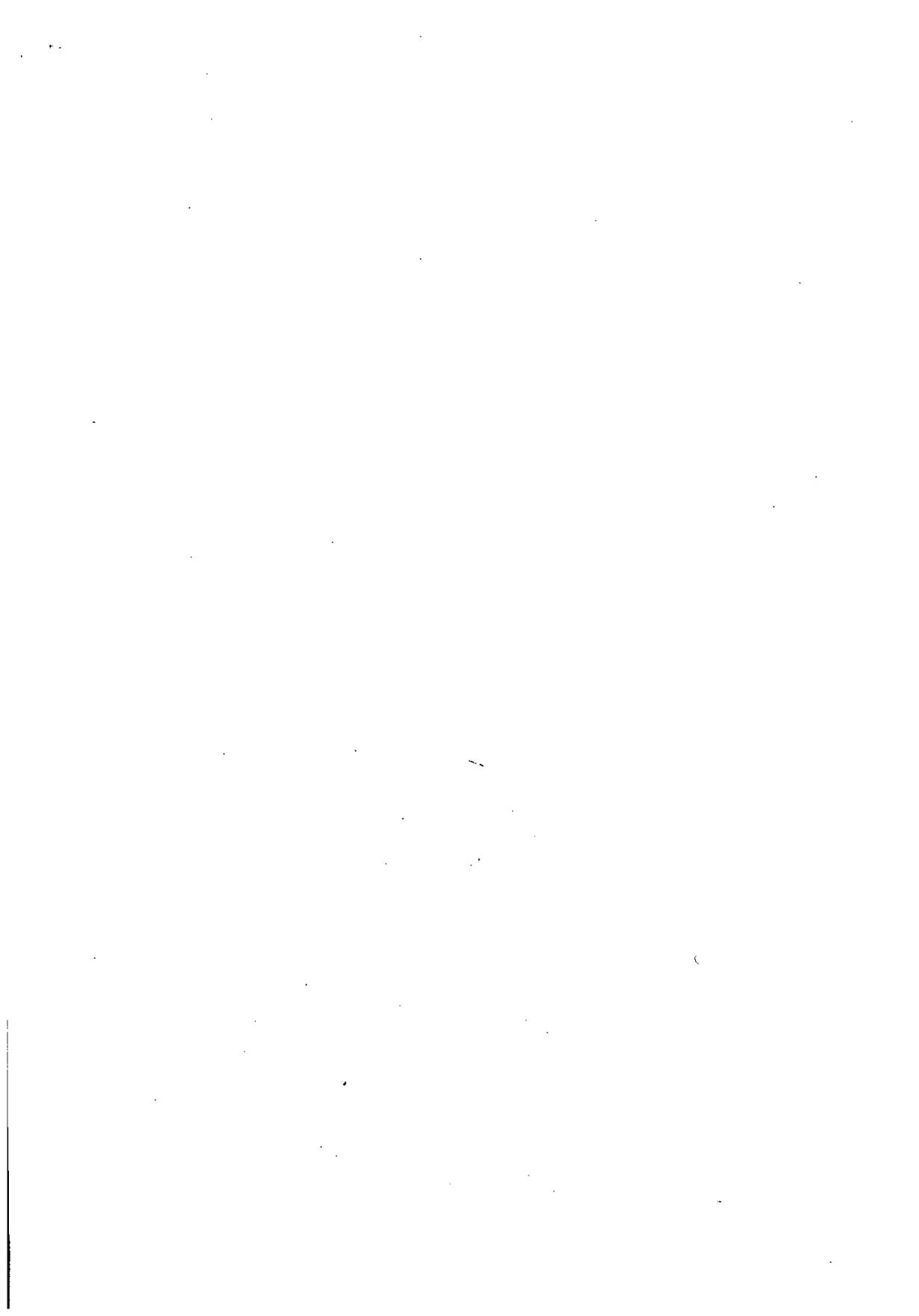
- Las aleaciones del lote bajo estudio y en principio desconocidas, poseen la designación 6061 con temple T6 o T651
- En las aleaciones estudiadas se encontró la presencia del compuesto MgSi el cual es una fase que se precipita durante el tratamiento térmico de envejecimiento artificial que se proporciona a las aleaciones de Al con designación 6061 y con temple T6 o T651.
- La fase MgSi conocida como silicuro de magnesio, es la responsable directa del incremento y mejoramiento de las propiedades mecánicas de las aleaciones T6 y T511
- Las piezas que forman parte de la unión (piezas fracturadas) así como el material de aporte empleado en la soldadura, son de aleación de aluminio 6061 y 6063 respectivamente y el material de aporte es aleación 5356. Todas estas aleaciones son compatibles entre sí para unirse mediante soldadura por lo que se descarta que la falla de la unión de las piezas se deba a incompatibilidad de los materiales.
- Se encontró una cantidad apreciable de Ni y de Al únicamente en una inclusión, lo cual sugiere que dicha inclusión podría estar formada por un compuesto intermetálico el cual a su vez está formado por Ni y Al y es rico en Al, ya que es éste último elemento el más abundante.
- Los compuestos intermetálicos de NiAl ricos en Al son altamente resistentes a la temperatura, es decir, no se funden con facilidad puesto que su punto de fusión es de alrededor de 1638 °C, además de que también son excesivamente frágiles y duros exhibiendo poca o nula ductilidad a temperatura ambiente, por lo que se puede especular que la falla de las piezas fracturadas se debe a la presencia de un compuesto de este tipo

Referencias

1. Metals Handbook, 8th Ed. Metallography and Phase Diagrams, ASM
2. K.R. Van Horn, Aluminum Properties, Physical Metallurgy and Phase Diagrams, Vol. 1, ASM .Metals Park.(1967).
3. Totten, G.E., Handbook of Quenching and Quenching Technology ASM:Metals Park OH. (1987).
4. Metals Reference Book, 3rd Ed. Ed. ASM International, Materials Park OH 44073. (2002).
5. Arc Welding, The Lincoln Electric Company, Cleveland OH 44117.(1999).
6. Welding Aluminum, Reynolds metals Company. Richmond Vancuber (1999).
7. Structural Welding code – Aluminum. 3rd Ed. Prepared by ANSI/AWS D1.2-90. American Welding Society, 550 N.W. LeJeune Road, Miami Florida 33126
8. Metals Handbook, 8th Ed. Joining of Aluminum in *Welding*, ASM
9. Metals Handbook, 8th Ed. Properties of Wrought Aluminum in *Properties and Selection of non-Ferrous Alloys*, ASM
10. More About Aluminum and Aluminum Alloys, McMaster-Carr. Copyright 2002 McMaster-Carr Supply Company, Document 8975KAC
11. Barrand Pierre, Enciclopedia del Aluminio. Bilbao:URMO. (1967).
12. Handbook of aluminum, Edited by George E, Totten, D.Scott MacKenzie, New York: M Dekker, c. (2003).
13. Mathers Gene. The Welding of Aluminum and it's Alloys, Boca Ratory, Florida: CRC; Cambridge, England: Woodhead, (2002).
14. Williams Clifford David 1900, Structural Design in Metals. New York: Ronald, c(1949).

Análisis de la falla de un cojinete deslizante proveniente de una flecha para turbina de gas, ubicada en plataforma petrolera costa fuera, Akal Bravo.

Capitulo	... Página
3.1	Introducción ...57
3.2	Antecedentes ... 59
3.2.1	Definición
3.2.2	Clasificación de los cojinetes de acuerdo al tipo de rozamiento
3.2.3	Clasificación de los cojinetes de acuerdo al tipo de carga
3.2.4	Materiales utilizados en los cojinetes
3.2.5	Desgaste
3.2.6	Lubricación
3.2.7	Tipos de lubricantes
3.3	<i>Procedimiento Experimental</i> ... 64
3.3.1	Objetivo
3.3.2	Recopilación de información
3.3.3	Descripción de la pieza
3.3.4	Desarrollo del estudio
3.4	Resultados y discusión ... 69
3.4.1	Análisis químico
3.4.2	Microscopía óptica
3.4.3	<i>Microscopía electrónica de barrido</i>
3.4.4	Propiedades Mecánicas
3.5	Conclusiones ... 83
3.6	Referencias ... 86



3.1 Introducción

El uso de chumaceras y cojinetes en cualquier industria es vital importancia y juegan un destacado papel en cualquier máquina y/o dispositivo que implique movimiento de dos piezas en contacto directo. Obviamente estos dispositivos deben tener una excelente lubricación, ya que de lo contrario estos dispositivos pueden sufrir un sobrecalentamiento el cual pudiera desembocar en la fusión de la pieza y posteriormente en el colapso del dispositivo.

Un cojinete del tipo deslizante, es un dispositivo sencillo para dar soporte y posición radial mientras permite la rotación de una flecha. Las cargas o fuerzas de reacción son normalmente paralelas a la dirección del eje de la flecha; y estas cargas pueden ser axiales y radiales, y a su vez acomodar estas cargas mediante el uso de este tipo de cojinetes. En la clasificación más amplia de cojinetes se pueden incluir una gran variedad de materiales, formas y tamaños. Los materiales que se utilizan incluyen un número infinito de aleaciones metálicas, metales sinterizados, plásticos, madera, goma, cerámica, lubricantes sólidos y compuestos. Los tipos van de un agujero sencillo en un armazón de hierro fundido a los extremadamente complejos cojinetes de rotores de alta velocidad lubricados por gas.

En la aplicación de los cojinetes, el factor más importante es la selección del material antifricción del cojinete. Los tres materiales industriales más comunes son babbit, bronce y hierro fundido. Después existe una cantidad sorprendente de materiales para cojinetes, muchos de ellos especiales para una aplicación en particular. En la mayoría de los casos, los detalles para su selección son únicos, por lo que debe obtenerse asistencia del fabricante del material del cojinete. Los cojinetes sencillos fabricados con babbit son aceptados en todo el mundo, ya que ofrecen una capacidad razonable y un servicio confiable, muchas veces en condiciones adversas. El babbit es un material para cojinetes relativamente suave, lo que disminuye el peligro de marcar o dañar las flechas o los rotores. a menudo pueden repararse rápidamente en el sitio raspando o poniendo material nuevo. Las temperaturas ambientales no deben sobrepasar los 130°F, y la temperatura de operación real del cojinete no debe exceder los 200°F. Los cojinetes

babbit por lo común tienen aplicaciones restringidas que comprenden cargas ligeras a moderadas y golpeo suave.

La lubricación es muy importante en los cojinetes deslizantes. Existen condiciones básicas de lubricación para los cojinetes deslizantes: lubricación de película completa o hidrodinámica de frontera y de frontera extrema. En la lubricación de película completa, las superficies en contacto de los materiales de la flecha y del cojinete están separadas por completo por una película relativamente gruesa de lubricante. La lubricación de frontera sucede cuando la película de separación se vuelve muy delgada. La frontera extrema sucede cuando la pareja de superficies se encuentran en contacto directo en varios de los puntos altos. Las primeras dos categorías ofrecen una vida larga al cojinete, la tercera ocasiona desgaste y una vida más corta.

El desgaste es un término general que cubre muchas formas de fallas, todas ellas mostrando cambios en la superficie de la pieza. La falla por desgaste por lo general es un proceso gradual que por lo general implica una pérdida de material en la superficie de las piezas sólidas en el sistema. Los movimientos de desgaste de interés son el deslizamiento, el rodamiento o una combinación de ambos. El desgaste se considera divisible en cuatro categorías generales, el *desgaste por adhesión*, el *desgaste por abrasión*, el *desgaste por corrosión* y la *fatiga superficial*. Otros mecanismos, como la fatiga por corrosión y la corrosión-vibración, combinan elementos de más de una de estas categorías. Desde un punto de vista del material (diseño y selección) algunos de los distintos mecanismos de desgaste que provocan daños son: desgaste superficial por fatiga, desgaste adhesivo, desgaste abrasivo, erosivo y corrosivo, principalmente.

Estos daños se potencializan cuando están íntimamente relacionados con interacciones que se presentan durante la operación característica de los sistemas, tales como: la magnitud de las cargas, la naturaleza de las cargas (cíclica, estable, unidireccional, reversa, etc.), velocidad, lubricación y limpieza del lubricante, temperaturas de operación, material de la flecha (en este caso) y su acabado superficial, alineamiento y rigidez, y vida media.

En el presente estudio, se recibió una chumacera que soportaba parte del rotor de una turbina de gas. Se requirió la realización de un análisis de falla por desgaste. Como parte constituyente de la chumacera, se detectó un cojinete del tipo deslizante, mismo que presentó daños físicos identificables a simple vista, y que fueron producto del desgaste. El cojinete dañado junto con sus elementos de fricción fueron separados de la chumacera para realizar un estudio, tendiente a determinar el origen de la falla.

3.2 Antecedentes

3.2.1. Definición

Cuando un elemento de una máquina o de un equipo dado, se encuentra soportado por un segundo elemento de tal manera que existe un movimiento relativo entre ellos y las superficies en contacto deslizan una sobre la otra, el conjunto formado por ambos elementos se denomina cojinete. Sin embargo, comúnmente se ha dado el nombre de cojinete, únicamente al elemento de soporte o a aquel sobre el cual se mueve el otro elemento. Este segundo elemento puede ser una flecha, un collar de empuje o unas zapatas, entre otros.

3.2.2. Clasificación de los cojinetes de acuerdo al tipo de rozamiento

Los cojinetes por lo general se clasifican, según el tipo de rozamiento que experimentan y por el tipo de carga que soportan.

Tomando en cuenta el tipo de rozamiento, los cojinetes se clasifican en:

- Cojinetes de fricción o de deslizamiento
- Cojinetes de antifricción o de rodadura.

En la primera clase (cojinetes de fricción) se ubican los cojinetes de casquillo completo o buje, así como los de casquillo partido. Del mismo modo, en la segunda clasificación se encuentran los denominados, de bolas o de rodillos. En la figura 20 se muestran estos tipos de cojinetes.

Análisis de la falla de un cojinete deslizante proveniente de una flecha para turbina de gas, ubicada en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Bravo.

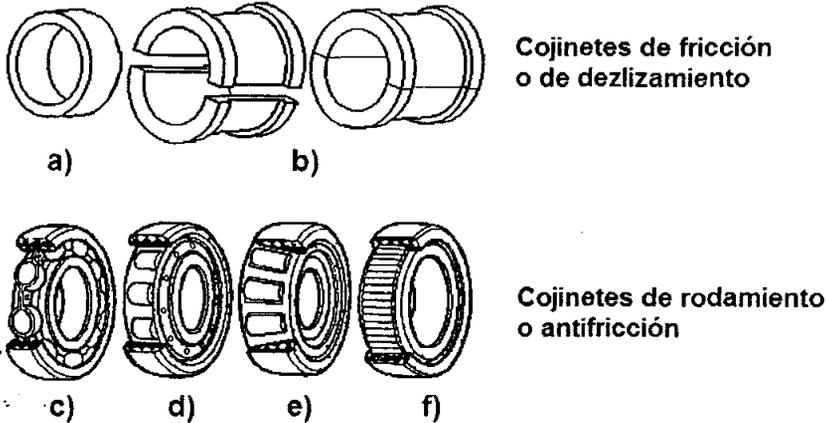


Figura 20. Clasificación de los cojinetes y tipos de cojinetes de uso más común, a) de casquillo completo o buje, b) de casquillo partido, c) de bolas, d) de rodillos cilíndricos, e) de rodillos cónicos y f) de agujas.

3.2.3. Clasificación de los cojinetes de acuerdo al tipo de carga

Por otra parte, cuando se toma en consideración la carga que soportan, la clasificación de los cojinetes es como sigue:

- 1- *Cojinetes radiales*, son aquellos que soportan cargas radiales transmitidas por ejes horizontales rotantes o flechas.
- 2- *Cojinetes axiales o de empuje*, son los que soportan cargas axiales transmitidas por ejes verticales rotantes o pivotes
- 3- *Cojinetes de guías*, este tipo de cojinetes, soportan cargas de distintos tipos, guiando los elementos móviles con trayectoria rectilínea como son los *patines de deslizamiento*, *colizas*, etc. En la figura 21 se muestran los distintos tipos de cojinetes antes mencionados.

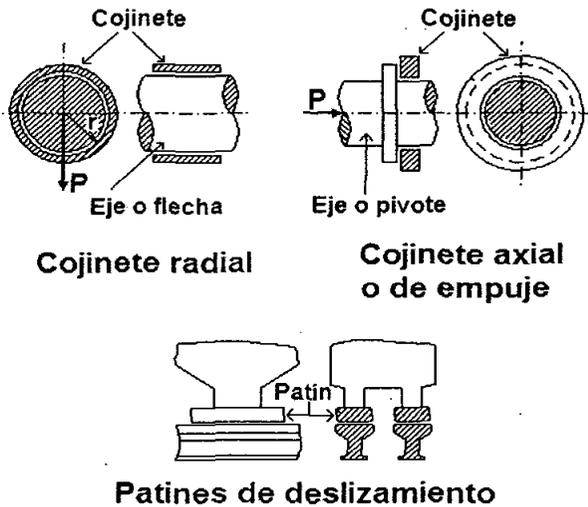


Figura 21. Clasificación de los cojinetes de acuerdo al tipo de carga que soportan.

Específicamente, un cojinete del tipo deslizante, es un dispositivo sencillo que tiene la función de dar soporte y posición radial a una flecha o un eje mientras que permite la libre rotación del mismo. Las cargas o fuerzas de reacción son normalmente paralelas a la dirección del eje longitudinal de la flecha; y estas cargas pueden ser axiales y radiales como se vio arriba. Así mismo, estas cargas se pueden acomodar convenientemente mediante el uso de este tipo de cojinetes.

3.2.4. Materiales utilizados en los cojinetes

Dentro de la amplia clasificación de los cojinetes, además de los factores antes mencionados, influyen también otro tipo de factores tales como los materiales de los que están fabricados, la forma y el tamaño.

Los materiales que se utilizan en la fabricación de los cojinetes implican un número infinito de aleaciones metálicas, metales sinterizados, polímeros, madera, goma, cerámica, lubricantes sólidos y compuestos. Los tipos de cojinete varían desde un

sencillo agujero en una armazón de hierro fundido, hasta los cojinetes extremadamente complejos que forman parte de rotores de alta velocidad lubricados por gas.

En la aplicación de los cojinetes, el factor más importante es la selección del material antifricción del cojinete. Los tres materiales industriales más comunes son el babbit, el bronce y el hierro fundido. Después de éstos, existe una vasta cantidad de materiales para cojinetes, muchos de ellos especiales para una aplicación en particular. En la mayoría de los casos, los detalles para su selección son únicos, por lo que debe obtenerse asistencia del fabricante del material del cojinete.

Los cojinetes sencillos fabricados con babbit, son aceptados en todo el mundo ya que ofrecen una capacidad razonable y un servicio muy confiable, muchas veces en condiciones adversas. El babbit se aplica por ejemplo, en los cojinetes que se encuentran en las bancadas de los motores de combustión interna, tanto a gasolina como a diesel.

El babbit es un material que es relativamente suave por lo que disminuye el peligro de marcar o dañar por fricción las flechas o los rotores. A menudo pueden repararse rápidamente in situ, desbastando los restos de material usado y poniendo material nuevo.

Los cojinetes de babbit por lo común tienen aplicaciones restringidas que comprenden cargas ligeras a moderadas y golpeteo suave, así mismo, las temperaturas ambientales no deben sobrepasar los 130°F, y la temperatura de operación real del cojinete no debe exceder los 200°F.

3.2.5. Desgaste

El desgaste es un término general que abarca muchas formas de fallas, todas ellas mostrando cambios en las superficies de las piezas en contacto. Por ejemplo, la falla por desgaste es un proceso gradual que por lo general implica una pérdida de material en la superficie de las piezas sólidas del sistema, lo cual se traduce en cambios en las superficies de las mismas.

Los movimientos de desgaste que son de interés científico son, el deslizamiento, el rodamiento o una combinación de ambos.

El desgaste se considera divisible en cuatro categorías generales que son:

- El desgaste por adhesión
- El desgaste por abrasión
- El desgaste por corrosión
- La fatiga superficial.

Algunos otros mecanismos tales como la fatiga por corrosión y la fatiga por corrosión-vibración, combinan elementos de más de una de estas categorías.

Desde el punto de vista del material (diseño y selección), algunos de los distintos mecanismos de desgaste que provocan daños son: desgaste superficial por fatiga, desgaste adhesivo, desgaste abrasivo, erosivo y corrosivo, principalmente.

Los daños por desgaste se toman potenciales cuando están íntimamente relacionados con interacciones que se presentan durante la operación característica de los sistemas, tales como: la magnitud de las cargas, la naturaleza de las cargas (cíclica, estable, unidireccional, reversa, etc.), velocidad, lubricación y limpieza del lubricante, temperaturas de operación, material de la flecha (en este caso) y su acabado superficial, alineamiento y rigidez, y vida media, etc.

3.2.6. Lubricación

Desde el momento que existe un movimiento relativo entre dos superficies en contacto, una cierta cantidad de energía será utilizada para vencer la fuerza que se opone al movimiento y que es debida al rozamiento. Si las superficies se tocan entre sí (contacto directo), existirá elevación de temperatura y un desgaste rápido y pronunciado de las mismas con peligro de deformación, arrastre de material, avería, etc.

A fin de reducir el rozamiento, disminuir el desgaste y evitar desperfectos, comúnmente se coloca entre ambas superficies una substancia que forma un *colchón* o *película* para mantenerlas separadas, y que al mismo tiempo tenga muy bajo índice de rozamiento, esto es, baja fricción. Esta substancia recibe el nombre de *lubricante*, siendo por lo general de consistencia líquida o pastosa. De esta forma, el rozamiento entre sólido-sólido se convierte en sólido-líquido o pastoso-sólido. Cuando se tiene esta condición, entonces se dice que los cojinetes trabajan lubricados.

La lubricación es un factor muy importante en lo que a cojinetes deslizantes concierne. Por tal motivo, existen condiciones básicas de lubricación para los cojinetes deslizantes, algunas de las más comunes y/o importantes son:

- Lubricación de película completa. En este tipo de lubricación, las superficies de los materiales en contacto, tanto de la flecha como del cojinete están, separadas por completo mediante una película de lubricante relativamente gruesa.
- Lubricación de frontera: Esta se produce cuando la película de separación se torna muy delgada.
- Lubricación de frontera extrema: Sucede cuando la pareja de superficies se encuentran en contacto directo en varios de los puntos altos.

Las primeras dos categorías ofrecen un bajo desgaste debido a que las partes en funcionamiento no están en contacto directo una con otra por lo que la vida útil del cojinete se alarga. Así mismo, puesto que en la tercera categoría las partes móviles sí están en contacto directo una con la otra, se produce fricción y por lo tanto se observa un severo desgaste lo cual trae como consecuencia que la vida útil del dispositivo en cuestión se acorte.

3.2.7. Tipos de lubricantes

Se le da el nombre de lubricante, a toda aquella sustancia que posee la capacidad de formar una película delgada entre las superficies rozantes de dos o más objetos sólidos, impidiendo en cierto grado el contacto directo de éstas entre sí.

Los lubricantes pueden ser líquidos, sólidos e incluso gaseosos. Entre los lubricantes líquidos se cuentan el agua, los aceites, etc. Como lubricantes sólidos se tiene la grasa (pastoso), el grafito, disulfuro de molibdeno, etc. Los lubricantes gaseosos como el aire, trabajan a presión y en muchos casos en compartimentos estancados.

3.3. Procedimiento experimental.

3.3.1. Recopilación de información.

Al momento de recibir el dispositivo a estudiar, se le requirió a la plataforma, Akal Bravo, solicitadora del servicio, información concerniente al funcionamiento de dicho artefacto. La información proporcionada fue la siguiente:

1. Reportes de las condiciones de operación del dispositivo bajo estudio
2. Croquis de la forma de operación del mismo
3. Muestras del material de recubrimiento identificado como aleación babbit, del cual no se especificó el espesor
4. Reporte de que la turbina en donde va montado el dispositivo presenta vibraciones.

Ya con la posesión de la pieza bajo estudio, se procedió a la realización de una inspección visual macroscópica de la misma. La siguiente información fue la que se registró:

- El mecanismo bajo estudio, es un conjunto que esta formado por tres piezas individuales, designadas como pieza 1, pieza 2 y pieza 3.
- Se observó daño superficial en las piezas 1 y 3, de donde ésta última, debido a su modo de operación, se identificó como un cojinete del tipo deslizante.
- La pieza 3 fue seleccionada para su análisis debido a que fue en esta pieza en donde se observó el mayor deterioro. El daño observado, se concentró únicamente en los elementos antifricción de la misma, los cuales presentaban rastros de material lubricante (aceite).

3.3.2. Descripción de la pieza

La pieza 3 consiste de un alojamiento (housing o carcasa) el cual a su vez aloja 5 elementos antifricción los cuales están soportados por cinco varillas individuales. Los elementos antifricción constan de un substrato y un recubrimiento identificado como babbit que es el que esta en contacto con la flecha. La pieza 3 se muestra en la figura 22. Es importante aclarar que el desarme de la pieza 3 se hizo posteriormente al análisis visual macroscópico de la misma.

Inmediatamente después de desensamblar y retirar los elementos antifricción, se efectuó un análisis detallado de los mismos, en donde se observó un daño mecánico

Análisis de la falla de un cojinete deslizante proveniente de una flecha para turbina de gas, ubicada en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Bravo.

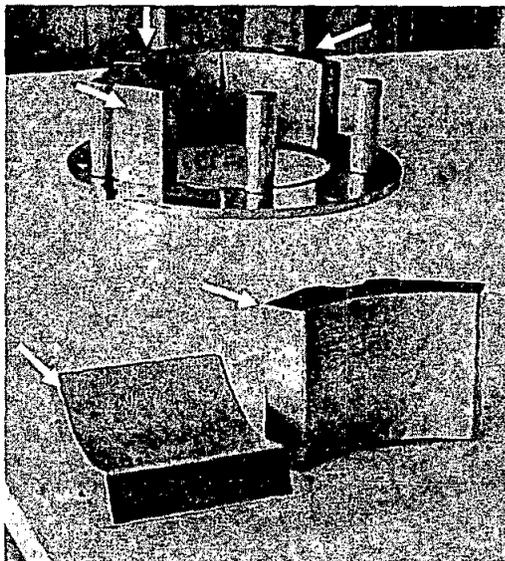


Figura 22. Desensamblaje del cojinete del tipo deslizante (pieza 3), en donde los elementos de fricción se encuentran señalados por las flechas.

(deformación-desgaste), localizado en la esquina superior izquierda de cada elemento. En la figura 23. a), b), c); d) y e) se muestran estas regiones (señaladas con flechas).

En esta misma figura, 23. b), d) y e), se logra apreciar que algunas piezas presentan daños de menor magnitud en otras regiones diferentes. Así mismo, se observa además una zona oscura tendiente hacia el lado izquierdo de manera ondular en cada elemento antifricción. Al observar estos elementos en forma lateral no se aprecia ningún daño en la interfase substrato-recubrimiento ni en el substrato mismo.

Los elementos antifricción que fueron analizados mediante microscopía óptica (OM) y microscopía electrónica de barrido (SEM) fueron los designados con los números 65385-19 y 65400-4, que son los números de marcado del elemento provenientes de la fábrica) ver figura 23 a) y b). Los elementos restantes presentaron la misma falla pero en menor magnitud por lo que éstos fueron utilizados para la realización de otro tipo de análisis tales como análisis químico, propiedades mecánicas, etc.

Análisis de la falla de un cojinete deslizante proveniente de una flecha para turbina de gas, ubicada en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Bravo.

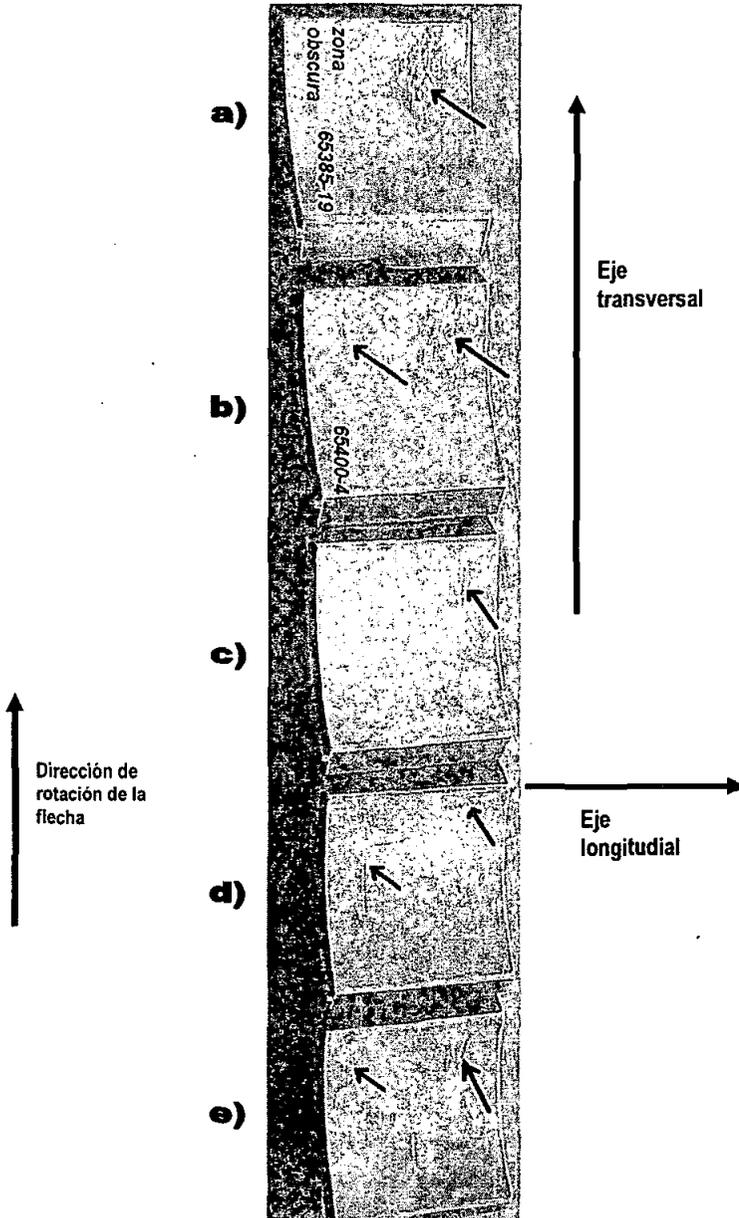


Figura 23. Fotografía de los elementos constituyentes del cojinete, en donde se muestran las zonas dañadas, así como las diferentes direcciones de referencia.

3.3.3. Desarrollo del estudio

1. Para el presente estudio, se seleccionaron las piezas cuya numeración y designación es 65385-19 y 65400-4. Estas piezas se seccionaron con la ayuda de una máquina de corte con disco abrasivo marca buehler modelo 12L y en donde se obtuvieron cortes transversales y longitudinales. De estas mismas piezas, se extrajeron muestras del recubrimiento para la realización del análisis químico correspondiente, mismo que se efectuó en un equipo para análisis químicos marca Leco, modelo TS200
2. Se procedió a la realización de la metalografía, misma que implicó los procesos de corte, desbaste, pulido y ataque químico de las muestras. Es importante aclarar que para el pulido de las muestras se empleó una máquina pulidora marca buehler modelo 12C
3. Mediante el uso de un microscopio óptico marca Olympus modelo TX100 y de un microscopio electrónico de barrido marca Leo, modelo L200 se realizaron observaciones de la interfase substrato-recubrimiento, poniendo especial atención en las zonas que presentaban el mayor daño y en las cuales, con la ayuda de la técnica de EDX, se analizó la composición química de las fases y/o partículas existentes en dichas zonas.
4. Se efectuaron los ensayos de dureza Rockwell y microdureza Vickers tanto en el recubrimiento como en el sustrato. Para tal efecto, se utilizó un macrodurómetro Rockwell marca Leco modelo T24 y un microdurómetro Vickers marca Buehler modelo B101
5. Se fabricaron probetas para la realización de las pruebas de tensión, tomándose como referencia la norma ASTM E8.

3.4. Resultados y discusión

3.4.1. Análisis químico

Los resultados del análisis químico realizado sobre el recubrimiento (aleación babbit) se muestran en la tabla 3.1.1.

La composición mostrada concuerda con las típicas reportadas en la literatura para las diferentes aleaciones babbit, según norma ASTM B23 (UNS55188) de base estaño y que son utilizadas para recubrimiento el de cojinetes en sistemas deslizantes.

Tabla 3.1. Composición química en % en peso del recubrimiento (babbit)

Muestra	Composición elemental % en peso					
	Pb	Sb	Sn	Cu	Fe	Zn
65385-19	0.038	7.471	86.94	5.826	0.0	0.0

3.4.2. Microscopia óptica

La microestructura del metal que funge como sustrato, esta compuesta por dos fases, a saber, de ferrita y perlita, lo cual nos indica que se trata de un acero de bajo carbono, ver figura 24. y 25. Se realizaron análisis puntuales (microanálisis) en los cuales no se observó la existencia de elementos aleantes, ver recuadro en la figura 24.

En las mismas figuras, se logra apreciar que a baja amplificación la microestructura del sustrato no presenta defectos tales como grietas, porosidad o inclusiones aparentes, por lo que se deduce que el acero del sustrato es de buena calidad. Los granos de ferrita son equiaxiados, sin embargo, la microestructura observada en la dirección longitudinal muestra un bandeo de perlita, lo cual puede ser debido al proceso de fabricación del acero.

Se realizaron también mediciones del tamaño de grano encontrándose que el tamaño de grano promedio es de aproximadamente 30 μm .

En la figura 26. a) y b), se muestran micrografías de la interfase sustrato-recubrimiento en donde se observa una buena adherencia por parte de los dos materiales sin la presencia aparente de defectos en esta interfase.

Análisis de la falla de un cojinete deslizante proveniente de una flecha para turbina de gas, ubicada en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Bravo.

El material de recubrimiento presenta una microestructura típica de los babbitts de base estaño (Sn), compuesta por una fase rica en este elemento (fase oscura) y por

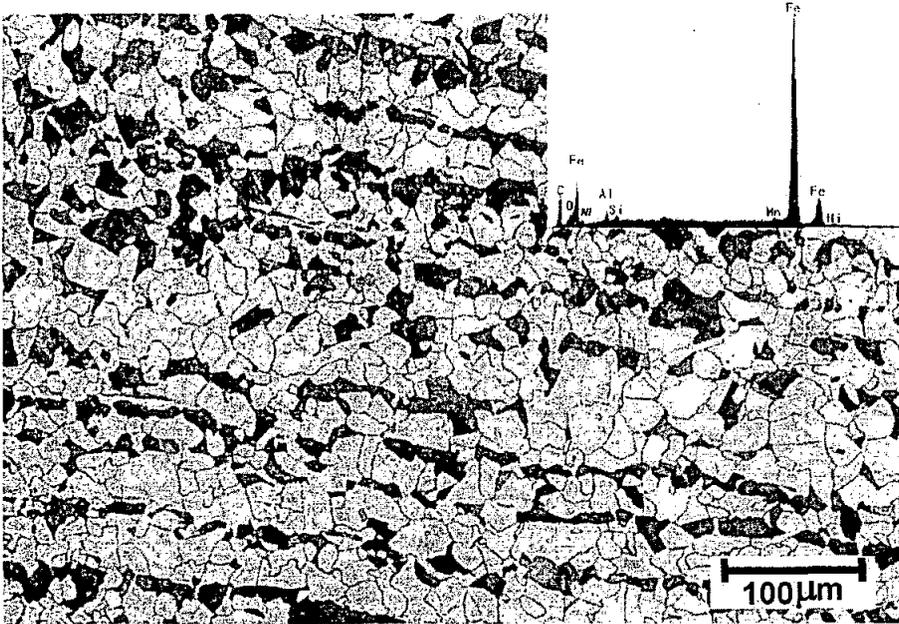


Figura 24. Observación a bajos aumentos, del sustrato del cojinete, el cual presenta algunas trazas de elementos tales como Al, Ni, Si y Mn, sin observarse la presencia de elementos aleantes tales como Cr, V, Co, etc.

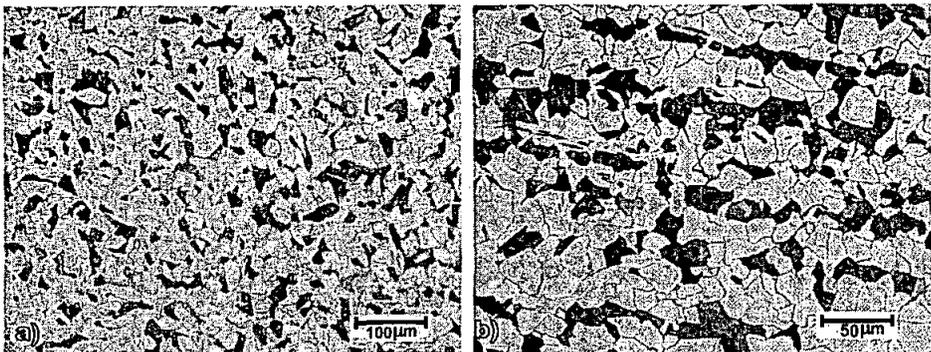


Figura 25. Detalle de la microestructura presente en el del sustrato del cojinete bajo estudio, en la dirección a) longitudinal y b) transversal. Ver figura 23.

Análisis de la falla de un cojinete deslizante proveniente de una flecha para turbina de gas, ubicada en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Bravo.

partículas y/o fragmentos de un compuesto intermetálico de antimonio-estaño, ver figuras 27 a) y b). Las partículas o fragmentos por lo general exhiben formas alargadas aparentando ser agujas de martensita. La literatura reporta que en algunos casos se llega a observar la presencia de una tercera fase con formas redondeadas que corresponde a un microconstituyente eutéctico formado por la fase cobre-estaño y por el elemento antimonio.

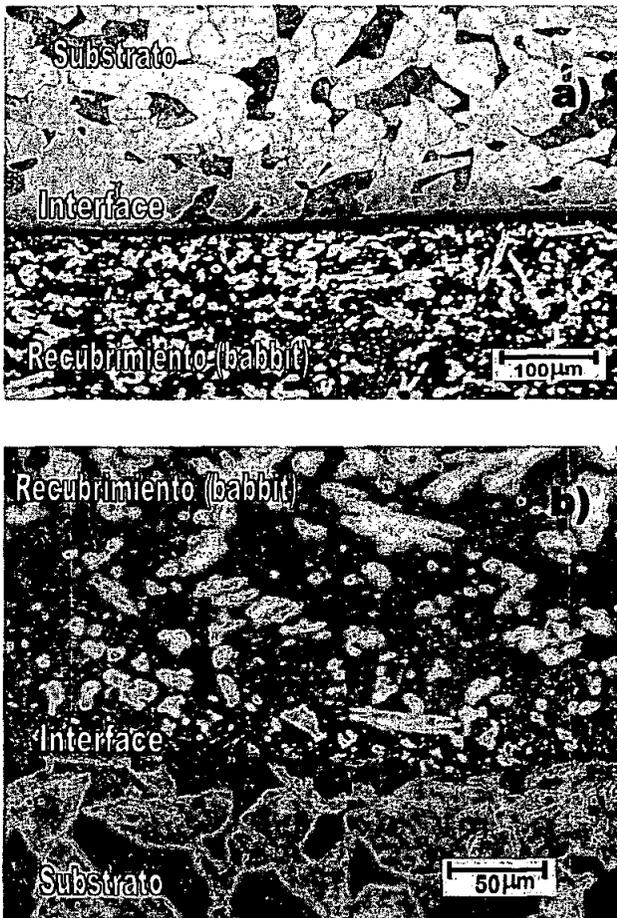
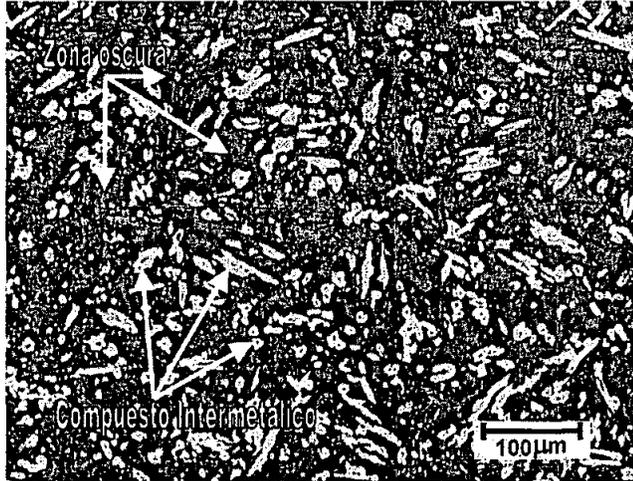
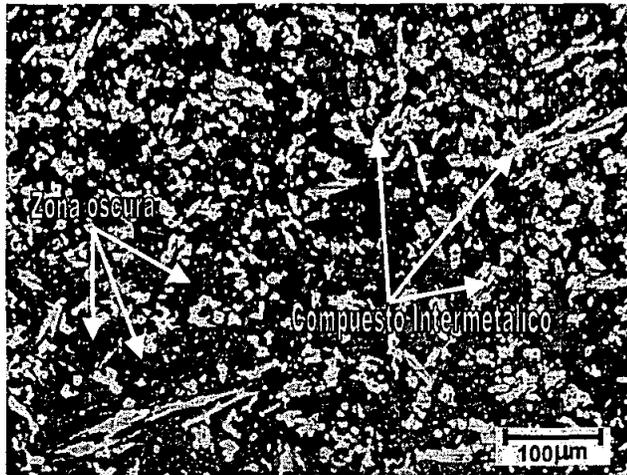


Figura 26. Fotografías de microscopía óptica mostrando la interfase substrato/recubrimiento a)vista panorámica b) detalle de la interfase.

Análisis de la falla de un cojinete deslizante proveniente de una flecha para turbina de gas, ubicada en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Bravo.



a)



b)

Figura 27. Fotografías tomadas sobre la superficie del recubrimiento, y en donde se puede apreciar la morfología tanto de la matriz (zona oscura) como de las partículas de compuesto intermetálico.

Análisis de la falla de un cojinete deslizante proveniente de una flecha para turbina de gas, ubicada en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Bravo.

3.4.3. Microscopía electrónica de Barrido

En la figura 28 se muestra el aspecto superficial del recubrimiento del cojinete, fuera de la región dañada. Se observa la presencia de zonas rayadas las cuales son propias del desgaste y debidas al uso. Se alcanza a apreciar que algunas de las rayas son de considerable longitud, entrecruzandose entre si con otras rayas que probablemente sean las propias del acabado superficial de fábrica, aunque esto es muy poco probable. En la figura 28 b), se observa con bastante claridad que algunas rayas son sobresalientes y que corren en varias direcciones.

Las observaciones anteriores sugieren la existencia de partículas abrasivas sueltas e inmersas en el lubricante. Estas partículas probablemente venían dentro del lubricante o quizás provengan del mismo recubrimiento (partículas que con el desgaste se desprenden del babbit y se mezclan con el lubricante).

Los microanálisis realizados sobre estas regiones (ver recuadro), muestran la presencia abundante de Sn y Sb, que son los dos elementos primordiales de este tipo de recubrimientos (Babbitts base Sn). No se detectó la presencia de Cu que es otro elemento que acompaña al Sn y al Sb en esta clase de recubrimientos, sin embargo, esto pudo ser debido tal vez a una baja concentración de este elemento al momento de hacer el microanálisis, o bien por que esta técnica analítica está restringida sólo a aquellos elementos con una concentración mayor que 1% en peso.

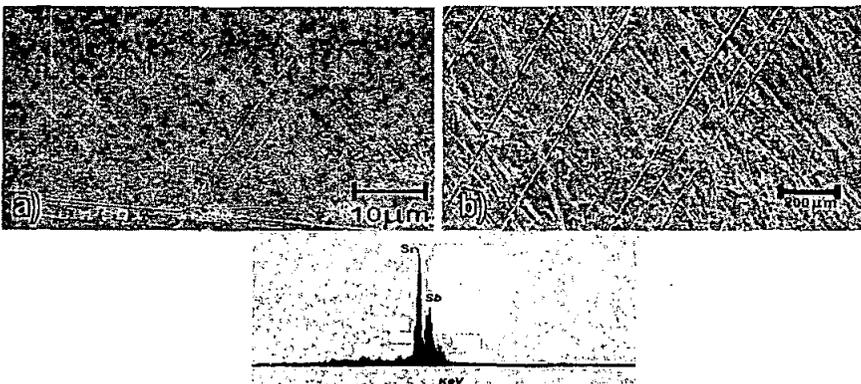
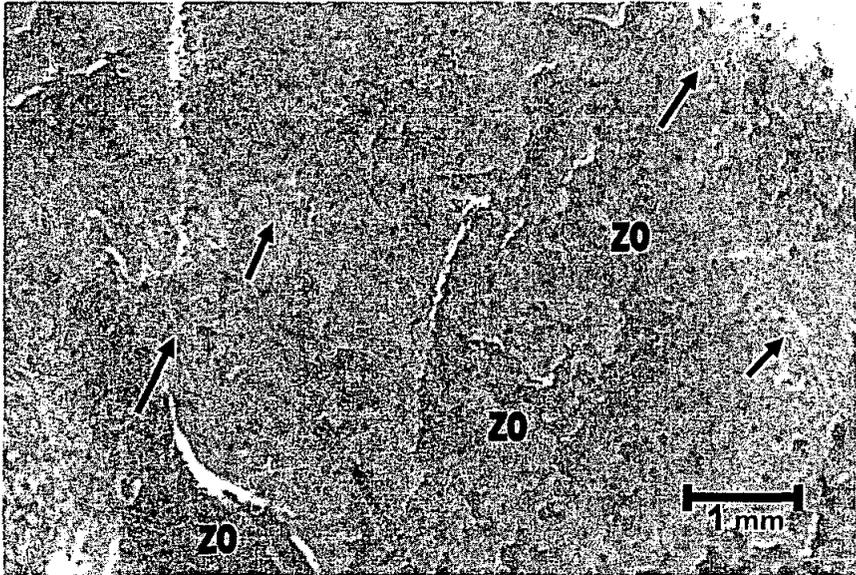


Figura 28. Micrografías y espectro de microanálisis tomados sobre el recubrimiento del cojinete bajo estudio, a) panorámica del recubrimiento en donde se alcanzan a apreciar rayas entrecruzadas, b) detalle de la zona rayada (mayor amplificación).

Análisis de la falla de un cojinete deslizante proveniente de una flecha para turbina de gas, ubicada en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Bravo.



a)



b)

Figura 29. Micrografías de SEM, mostrando las regiones del recubrimiento que presentan daño severo y daño por deformación plástica.

La figura 29 a) muestra una región del recubrimiento (marcado por flechas) en donde se observa un deslizamiento, el cual es indicativo de que existió adhesión, lo que se deduce por la forma que presentan este tipo de marcas o huellas.

En la misma figura, se aprecian zonas oscuras (ZO) las cuales carecen de parte del recubrimiento antes mencionado debido a que se ha desprendido por el uso. Ahora bien, lo anteriormente descrito no significa una pérdida total del espesor del recubrimiento quedando únicamente el sustrato, sino que se ha desprendido solamente una pequeña parte del recubrimiento quedando algo así como un poro o un "bache", pero sobre el recubrimiento mismo.

Una característica inherente de este tipo de recubrimientos es que poseen una alta conformabilidad por su naturaleza dúctil y esto permite que después de un cierto tiempo, la región dañada se reconforme nuevamente.

En la figura 29 b) se observa otra parte de la porción dañada del cojinete en donde son evidentes las zonas con ausencia del recubrimiento original. Estas regiones adoptan formas granulosas indicando un desprendimiento del recubrimiento debido al desgaste. Ahora bien, es necesario resaltar que en esta parte, el desgaste pueda ser debido tal vez a una región fatigada que provoca que el recubrimiento se deteriore paulatinamente hasta que finalmente se desprende, y no necesariamente por el efecto de partículas sueltas o dispersas o por alguna incrustación en el recubrimiento.

En la figura 30 a) se muestra una micrografía a mayor amplificación de una región oscura de la figura 29 b). Se observa el aspecto granular del interior de la zona oscura A y B rodeada por el recubrimiento el cual aparece severamente deformado (ver flechas). El aspecto granular es un indicativo de que el recubrimiento ya ha fallado al menos superficialmente. La figura 30 b) y c) muestra los patrones de EDX obtenidos en la región expuesta en la figura 30 a). El primer espectro corresponde a la zona granular en donde se observa la ausencia parcial del recubrimiento. Aquí se aprecia que la región es rica en C con la presencia también de S y Mo aunque en cantidades inferiores. La presencia del C así como del S y Mo, puede ser debida a muchos factores siendo uno de ellos la posible contaminación de estas zonas por el lubricante y/o grasa. Es importante mencionar que los elementos C, S y Mo no forman parte del

Análisis de la falla de un cojinete deslizante proveniente de una flecha para turbina de gas, ubicada en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Bravo.

recubrimiento, por lo que probablemente, además del factor contaminación, también pudieran ser debidos a la penetración del haz de electrones hacia el interior del

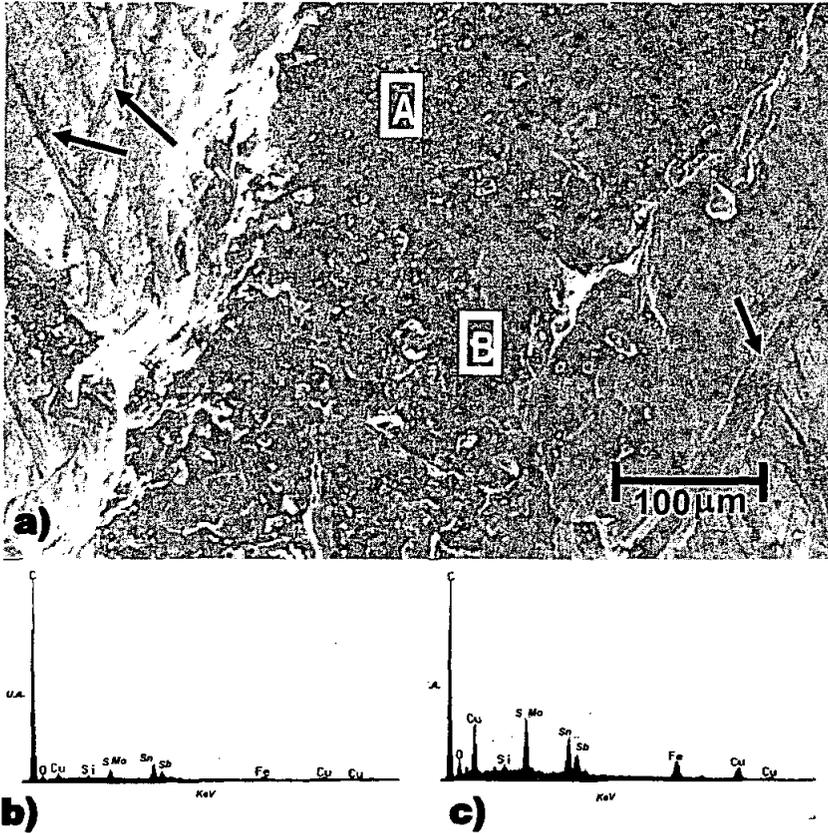


Figura 30

material del substrato el cual es un acero. Ahora bien, no se debe descartar que la presencia de las partículas abrasivas, pudiera en un momento dado, provenir de la flecha, esto es, que durante las etapas iniciales de la conformación del recubrimiento y durante la operación del sistema, se hayan podido suscitar posibles desprendimientos de finas rebabas del acero de la flecha y que estas mismas se hayan podido insertar o incrustar en el recubrimiento que es muy blando (posee una dureza baja, del orden de 25 a 30 Brinell).

Análisis de la falla de un cojinete deslizante proveniente de una flecha para turbina de gas, ubicada en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Bravo.

El patrón mostrado en la figura 30 c) fue obtenido en la región deformada del recubrimiento. En este se observa la presencia de los elementos constituyentes del recubrimiento (Sn, Sb y Cu), así como también del elemento Fe. La aparición de este último elemento puede ser debida a la presencia de partículas que provengan

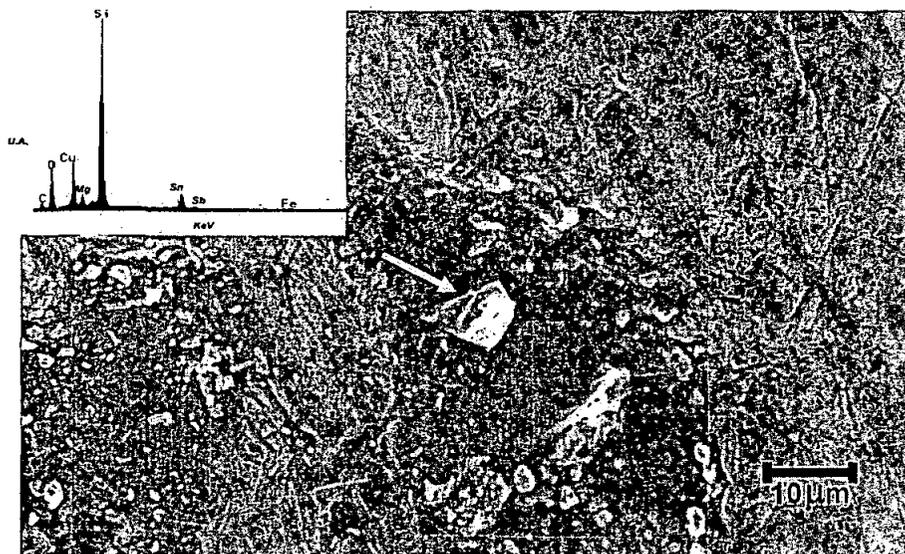


Figura 31.

de la flecha y que estén como rebabas en el lubricante, o bien como se mencionó anteriormente, a la penetración del haz de electrones hasta alcanzar el sustrato.

La figura 3.3.4 por su parte, muestra un aspecto importante de la región dañada en la que se amplifica una porción sin recubrimiento, rodeada por una zona deformada del mismo. Nuevamente se observa la formación de pequeños gránulos o partículas blancas que se encuentran alojadas en el interior de la falla, exhibiendo algunas de ellas morfologías redondeadas y otras tantas presentando facetas o formas angulares. Este último tipo de partículas pueden ocasionar micro-cortes hacia el interior del recubrimiento, lo que puede acelerar el proceso de desgaste, y por consecuencia la falla del mismo.

Análisis de la falla de un cojinete deslizante proveniente de una flecha para turbina de gas, ubicada en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Bravo.

Se realizaron microanálisis sobre algunas de las partículas blancas (ver flecha y recuadro en la figura 31) encontrándose la presencia de Si, sin embargo este elemento tampoco corresponde a la composición elemental del recubrimiento, por lo que existe la posibilidad de que estas partículas provengan de la flecha o de una contaminación localizada en el lubricante. Cabe mencionar que la partícula señalada por la flecha y sobre la que se realizó este microanálisis, es una partícula angulada, por lo tanto se sugiere que esta morfología de alguna forma inducirá un microcorte hacia el interior del recubrimiento.

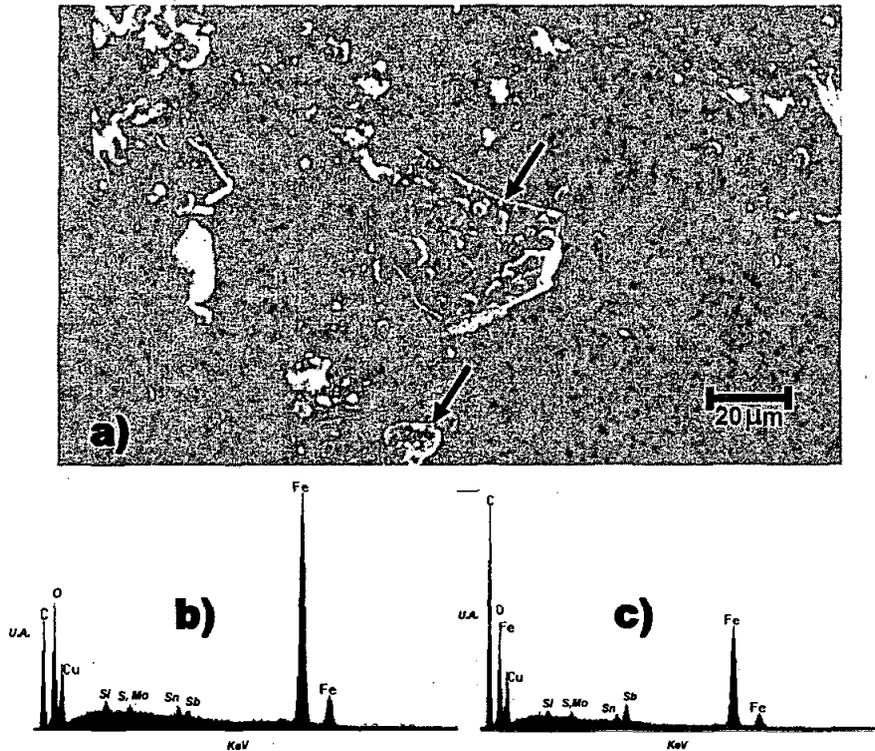


Figura 32. Diversas Morfologías y espectros de microanálisis de las partículas encontradas en las regiones del recubrimiento (babbit) con daño severo.

En la micrografía de la figura 32 se observan distintas morfologías de partículas o rebabas encontradas en las regiones dañadas del recubrimiento del cojinete. Se puede

observar una partícula desprendida de aproximadamente 30 μm de tamaño, y una más de aproximadamente 10 μm . La partícula de mayor tamaño parece ser un desprendimiento de metal de base hierro (Fe) ya que el espectro de EDX, figura 32a), muestra abundancia de este elemento. Se observan también otros elementos tales como Cu, Sn, Sb, los cuales forman parte del recubrimiento. Así mismo los elementos C, O, Si, S, Mo, Fe pudieran ser elementos constituyentes de partículas impureza tales como óxidos o restos de lubricante degradado. Estas partículas, debido al movimiento propio de la operación del dispositivo, se pudieran incrustar en el recubrimiento, generando micro-cortes en el interior del mismo, y a su vez pudieran también actuar como partículas abrasivas, cortando y deformando al recubrimiento.

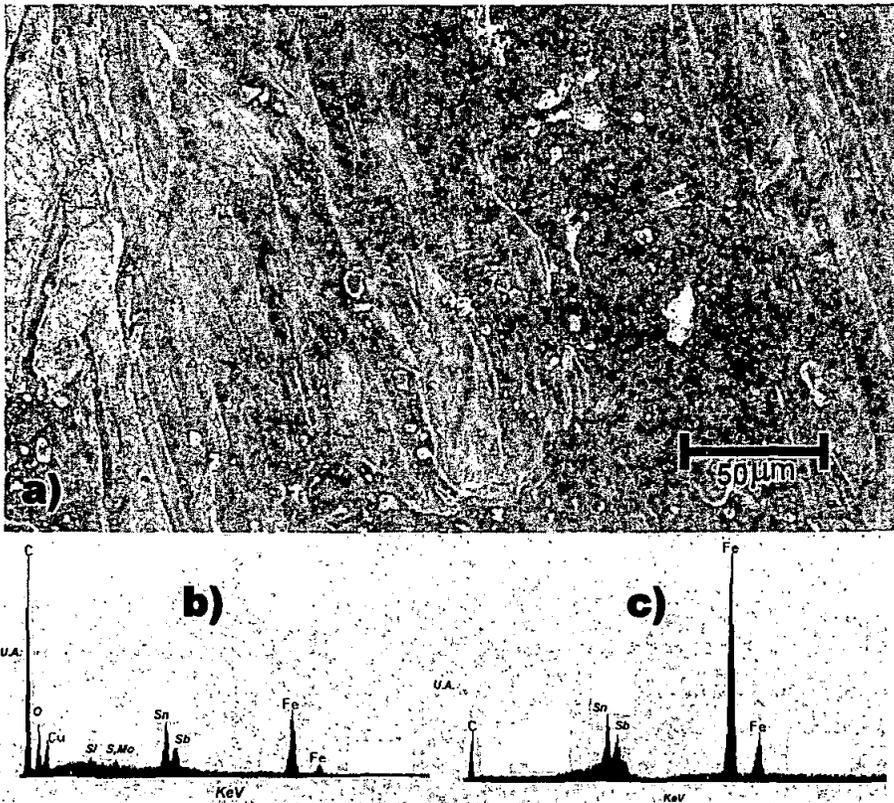


Figura 33. Zona dañada del recubrimiento en donde se aprecia la presencia de partículas impureza y sus correspondientes patrones de microanálisis.

El difractograma de EDX mostrado en la figura 32 b), corresponde al microanálisis realizado en otra partícula de morfología similar. Se puede observar que las composiciones son parecidas, sin embargo la cantidad de Fe en este segundo espectro y partícula, es menor, manifestándose el C como elemento predominante. Como se mencionó anteriormente, es posible que este elemento provenga del lubricante.

En la figura 33. se observa a menor ampliación la región del recubrimiento en donde aparecen las partículas desprendidas. Estas partículas se encuentran localizadas dentro de los surcos de deformación plástica del recubrimiento, lo cual sugiere que tales partículas son las que ocasionan el desgaste abrasivo. Los difractogramas de EDX, a) y b), correspondientes a estas partículas, muestran nuevamente la presencia de Fe acompañado de los elementos constituyentes del recubrimiento (Sn y Sb).

La aparición de los elementos del recubrimiento, en el microanálisis hecho en la partícula ferrosa, se debe a las limitaciones del equipo de microanálisis, ya que el haz de electrones es tan potente, que penetra y aún atraviesa la partícula ferrosa bajo análisis, recogiendo la información composicional tanto de la partícula como del recubrimiento.

3.4.4. Propiedades Mecánicas

Los ensayos de microdureza Vickers realizados sobre el recubrimiento, mostraron que su microdureza es del orden de 24.9 HV. Se considera importante mencionar que se realizaron diez mediciones utilizando para ello una carga de prueba de aproximadamente 10g. El valor de microdureza Vickers mencionado es un promedio de todas estas mediciones. El equivalente de este valor en dureza Brinell es de aproximadamente 24 a 26 HB, ya que ambos valores muestran una tendencia casi lineal por debajo de 500, lo cual permite realizar la conversión.

Los valores de dureza encontrados sobre el recubrimiento son se encuentran dentro de los límites permitidos por lo que se considera que el recubrimiento es apto para este tipo de aplicación. Así mismo, el espesor del recubrimiento es de aproximadamente de 0.58 a 0.60 mm; el cual esta dentro de las normas reportadas para babbitts base estaño (según norma ASTM B23 (UNS55188)).

Análisis de la falla de un cojinete deslizante proveniente de una flecha para turbina de gas, ubicada en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Bravo.

Es importante mencionar que dentro de las propiedades mecánicas, se encuentran considerados los ensayos de tensión y/o compresión, sin embargo, no fue posible la realización de estos ensayos sobre el recubrimiento, debido a las limitantes de dicho material, tales como la poca disponibilidad de material, debido a que se encuentra como recubrimiento.

En lo que al material del sustrato respecta, sobre este se realizaron el ensayo de dureza Rockwell, así como el ensayo de tensión. En la tabla 3.4.1. y figura 34 se muestran los resultados obtenidos.

Análisis de la falla de un cojinete deslizante proveniente de una flecha para turbina de gas, ubicada en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Bravo.

Tabla 3.4.1. Resumen de las propiedades mecánicas del material del sustrato

Dureza (RB)	Módulo de Young E (GPa)	Resistencia a la cedencia (YS MPa)	UTS (MPa)	Tamaño de Grano μm	Elongación (%)	Reducción de Área (%)
52.38	200	380	450	30	10	16.6

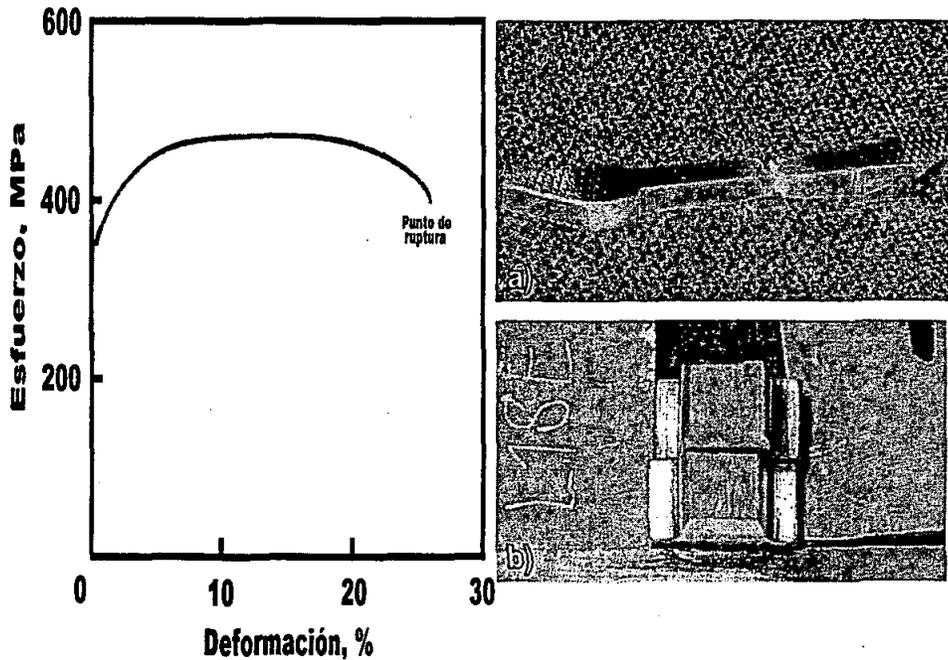


Figura 34. Gráfica de esfuerzo-deformación correspondiente al ensayo de tensión realizado sobre el material del sustrato (acero) del cojinete bajo estudio. a) Probeta de tensión fracturada b) Superficies de fractura de la probeta mostrada en el inciso a

3.5 Conclusiones

- El acero utilizado como sustrato, es el adecuado para este tipo de aplicación, no presenta ningún tipo de defecto que pudiese ser la causa del daño superficial observado en el recubrimiento. Su microestructura no muestra cambios de fase radicales, solo existen dos fases presentes de ferrita y perlita, y no se observaron defectos como inclusiones, poros, etc, se trata en general de un acero limpio. El tamaño de grano es homogéneo, no presenta cambios.
- Con base en los microanálisis realizados sobre la superficie del sustrato, se deduce que se trata de un acero de bajo carbón, no presenta aleantes principales tales como Cr, Ni, Mo, solo Al y Si además de los elementos comunes. Sus propiedades mecánicas están acorde a este tipo de aceros.
- En la región de la interfase sustrato-recubrimiento no se observaron defectos y en general la adherencia del recubrimiento es la adecuada. Aparentemente no se utiliza para su aplicación ninguna interfase, si bien esta puede existir, pero en nuestros análisis no fue posible identificar esta interfase.
- La microestructura observada en el recubrimiento es la típica de este tipo de babbitts base Sn. Presenta una matriz rica en Sn en la cual están embebidas partículas de compuestos intermetálicos y de metaloides, los cuales son típicos de esta clase de recubrimientos, de matriz suave con partículas duras embebidas en la matriz. No se observaron en el recubrimiento poros o inclusiones, o partículas extrañas, en general se trata de un recubrimiento limpio, muy homogéneo.
- El análisis químico del recubrimiento reveló que se trata de un recubrimiento base Sn, con las cantidades, en % en peso, de los demás componentes del recubrimiento tales como Sb y Cu principalmente, se encuentran dentro de la norma B23 de ASTM.

Análisis de la falla de un cojinete deslizante proveniente de una flecha para turbina de gas, ubicada en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Bravo.

- La propiedad mecánica de dureza es la adecuada para este tipo de recubrimientos.
- Mediante una observación macroscópica (3x máximo) en todos los cojinetes que integran la chumacera, se observó el defecto-daño. En todos los casos, el aspecto superficial a estos aumentos es muy parecido, variando entre ellos sólo en la profundidad y/o magnitud del daño.
- El daño-defecto siempre aparece en la misma zona de todos los cojinetes en una región específica. En todos los cojinetes se observó una mancha oscura, (visualizable fácilmente y a simple vista). Esto sugiere un posible aumento de la temperatura en la interfase cojinete/flecha debido a una pobre lubricación, ocasionando y/o favoreciendo una reacción del poco fluido lubricante con el material del recubrimiento.
- La morfología observada en regiones no afectadas muestran una superficie rayada, con líneas más o menos paralelas que indican la dirección del deslizamiento. Esta observación supone que en la sección del cojinete donde el daño no apareció, el desgaste es paulatino y que existe una considerable interfase de lubricante entre las dos superficies en contacto (cojinete/flecha). No se observó daño mecánico.
- A medida que las rayas se aproximan a la región dañada, las mismas se ensanchan haciéndose cada vez más gruesas, observándose que el patrón de desgaste es con rayas paralelas y perpendiculares a la dirección del deslizamiento. Las observaciones realizadas en el interior de las rayas mostraron la existencia de material desprendido, que tal vez sea el que origina el daño superficial mediante un mecanismo de micro-cortes en el mismo recubrimiento. Estas partículas desprendidas provienen tanto del recubrimiento, como de la superficie de la flecha.
- La aparición del daño-defecto en el recubrimiento se debe a varias situaciones:
 - a) Las fallas en la superficie presumiblemente son provocadas por la fuerza de fricción, y no por causas térmicas. Inicialmente la fricción no es tal que provoque la pérdida de

material asociado con la falla, por lo que el recubrimiento todavía alcanza a tolerar los esfuerzos. Sin embargo y con el paso del tiempo y el uso, hay desprendimiento de material o partículas acelerando el desgaste y con esto el daño es ya visible.

b) Cuando el deslizamiento es oscilatorio y de baja amplitud como es presente caso, la superficie del recubrimiento tiende a fallar por fatiga.

c) La aparición de protuberancias (se les da este nombre debido a su morfología), hace que la presión por contacto sea alta en estas regiones y sea mínima en otras. Por lo tanto, el aspecto del daño es una mezcla de deslizamiento (alta deformación plástica) y adhesión, es decir, su apariencia se asemeja como a parches en donde la superficie se adhiere y en donde a su alrededor aparecen áreas granulares en las cuales posteriormente ocurrirá un deslizamiento (deformación plástica) y desprendimiento de partículas que ocasionaran micro-cortes al interior del recubrimiento.

d) Las regiones mezcladas o de transición se caracterizan por contener una alta concentración de esfuerzos, lo que los hace sitios ideales para la aparición de falla por fatiga (regiones granulares).

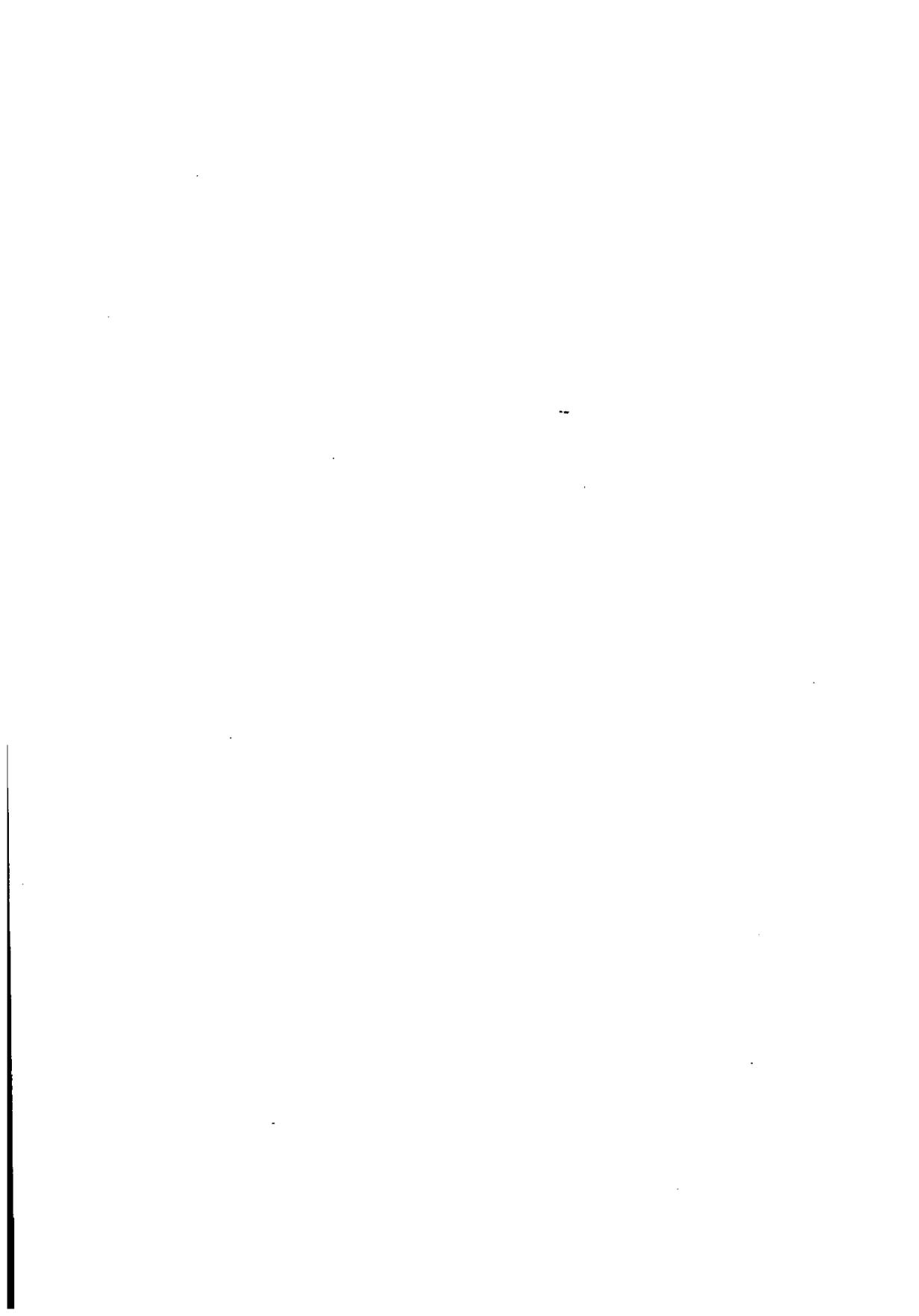
• Debido a que el defecto-daño se encuentra perfectamente localizado en áreas específicas de los cojinetes, y por la morfología que este presenta, así como los resultados de los microanálisis, se concluye que el daño se debió muy probablemente a una distorsión y una deflexión de la flecha, aunque en estas situaciones no son posibles grandes movimientos de deslizamiento, incluso pequeñas deflexiones (pueden bastar movimientos microscópicos del orden de milésimas de pulgada) son suficientes para causar desgaste. Muy probablemente un desalineamiento de la flecha, tal vez durante su ensamble o debido a un desgaste de los muñones de la flecha pudo provocar vibraciones las cuales son otra fuente posible de pequeños movimientos que puedan causar desgaste, así como ocasionar un calor excesivo y atascamiento. La presencia de vibraciones y/o deflexiones mecánicas repetidas tienen tendencia a interferir con la capa de recubrimiento, pudiendo contener este partículas oxidadas, raspándola y/o soltándola. Esto promueve la adhesión entre piezas y también proporciona medios abrasivos bajo forma de partículas de óxido duros en la interfaz.

3.6. Referencias

1. I.B. Kraghelsky. Friction and wear, Butterworths, Londres 1965
2. E. Ravinowicz, Friction and wear of materials, J. Wiley and Sons. 1976
3. A.D. Sarkar, Wear of metals, Pergamon Press. 1976
4. A.D. Sarkar, Friction and wear, Pergamon Press, Oxford 1980
5. T. F. J. Quinn, The application of modern phisycal techniques to tribology, Butterwhorths, Londres 1971
6. Metals Handbook Vol 8, 8th ed. ASM, Metals Park OH, 1973.
7. E. Ravinowicz, Friction, wear and lubrication study guide, MIT, Cambridge Mas. 1977
8. Y.Tsuya. Microstructure of wear, friction and solid lubrication, TECH.REPT. No 81. MECH.ENG.LAB., IGUSA SUGINAMI-QKU, TOKIO, 1976.
9. R.E. Reed-Hill and R. Abbaschian. Physical Metallurgy Principles, 3rd ed. PWS, Boston 1991.
10. Metals Handbook Vol 9, 5th ed. ASM, Metals park OH, 1992.
11. Metals Handbook Vol 18, 1th ed. ASM, Metals park OH, 1992.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto, que transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

Capitulo	... Página
4.1	Introducción ... 87
4.2	Antecedentes ... 88
4.2.1	Definición y aplicación
4.2.2	Corrosión
4.2.3	Aceros para tuberías
4.2.4	Efecto de los elementos aleantes sobre los aceros HSLA
4.2.5	Clasificación general de las tuberías
4.2.6	Especificaciones API
4.2.7	Definición para Rayos X.
4.3	Procedimiento Experimental ...107
4.3.1	Objetivo
4.3.2	Desarrollo
4.3.3	Inspección Visual
4.3.4	Producción y evaluación de Replicas metalográficas en campo
4.3.5	Inspección Radiográfica con Rayos X en campo
4.3.6	Análisis químico cuantitativo vía Espectro
4.3.7	Análisis cualitativo vía Luz Monocromatica
4.3.8	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)
4.4	Resultados y Discusión ...119
4.4.1	Inspección Visual
4.4.2	Producción y evaluación de Replicas metalográficas en campo
4.4.3	Inspección Radiográfica con Rayos X en campo
4.4.4	Análisis químico cuantitativo vía Espectro
4.4.5	Análisis cualitativo vía Luz Monocromatica
4.4.6	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)
4.5	Conclusiones ... 125
4.6	Referencias ... 126



Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

4.1 Introducción⁽¹⁾

Por el territorio nacional mexicano, hay una red de ductos de aproximadamente 54 mil kilómetros, por donde circulan desde el petróleo crudo hasta los productos refinados como las gasolinas y el diesel. A estos deben sumarse otros 2 mil kilómetros de ductos que van por debajo del mar y que cumplen el mismo cometido.

El ducto es el medio de transporte de hidrocarburos más seguro y económico. El material que se transporta puede ser de alta peligrosidad, como gas natural o gasolinas de manejo difícil y muy valioso, no tanto por costo sino por el problema que significaría que no se abasteciera una población, y que puede repercutir en actividades industriales o domésticas. Algo igualmente importante es que cuando un ducto falla, puede cobrar vidas humanas o estructuras de operación, pero igualmente lamentable puede ser el daño ecológico, uno de los problemas prioritarios de Petróleos Mexicanos (PEMEX).

Casi el 50 por ciento de los ductos en México tienen 30 o más años de uso. No obstante PEMEX nunca ha dejado de brindarles mantenimiento. Por ello, existe el "Programa de Mantenimiento a Ductos" cuyo objetivo es: Maximizar el rendimiento, la seguridad y confiabilidad de la red de ductos en México. Las investigaciones y proyectos que comprenden el citado Programa y que están ya en operación, y del cual este trabajo forma parte, se dirigen a solucionar los principales problemas por los que los ductos sufren fallas, es decir, incursionar en temas como corrosión, nuevos materiales, soldadura, mecánica de la fractura, así como confiabilidad y análisis de riesgos, detección de fugas, instrumentación y control.

Los padecimientos de los ductos⁽²⁾

Por dentro y por fuera el ducto se enfrenta a condiciones que propician su corrosión, tal vez su principal problema. Pese a que el acero del que se fabrican está pensado para soportar condiciones corrosivas, los ductos contienen elementos al interior (como el sulfuro de hidrógeno) que degradan lentamente el metal. Particularmente, las tuberías marinas enfrentan un problema más, ya que el mar es el hábitat de sepas bacterianas

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

que solas o en consorcio forman colonias altamente corrosivas, que incluso puede llegar a perforar un ducto a una velocidad de un centímetro por año. En tierra hay también bacterias corrosivas con iguales consecuencias, a lo que debe añadirse que algunos suelos en que se entierran los ductos contienen elementos muy salinos que en igual medida son corrosivos.

4.2. Antecedentes⁽⁸⁾

4.2.1. Definición y aplicación

Dentro de la industria petroquímica, se hace uso extensivo de ductos de aceros de diferentes grados, designaciones, calibres, composiciones y formas, para el transporte de hidrocarburos. Tales formas van desde tubos rectos, pasando por reducciones, válvulas cambios de dirección, etc. Especialmente en los cambios de dirección de un fluido se emplean codos de 90°, como ya se mencionó, estos se usan comúnmente en la industria petroquímica, conducción y transporte de hidrocarburos.

A este respecto, las instalaciones para la producción de petróleo y gas (Petroquímicas) consisten de pozos e instalaciones de campo para separar el flujo de los pozos en tres corrientes, a saber, gas natural, hidrocarburos líquidos, que están formados de petróleo crudo y de condensados de hidrocarburos y agua de formación. La corriente de hidrocarburos líquidos es tratada para remover el agua de formación antes de ser conducida a la refinería. Esta agua puede variar en su composición desde agua condensada, hasta diferentes salmueras y/o sales solubles de las cuales, los principales son las cloruros en concentraciones cercanas o superiores al 25%. En el proceso, la corriente de agua de formación es tratada antes de desecharse. La corriente de gas puede tratarse posteriormente en una planta de gas para separar las fracciones de hidrocarburos y quitar gases ácidos tales como el H₂S y el CO₂. Si los pozos producen cantidades significativas de H₂S, una planta de azufre convierte el H₂S en azufre. Por otro lado, si los pozos producen muy altas concentraciones de CO₂, el CO₂ separado puede ser deshidratado y entubado a los campos de petróleo para ser utilizado en operaciones de recuperación forzada.

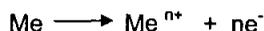
Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

Todo lo anterior conlleva al enfrentamiento de un fenómeno natural conocido como corrosión. Desde que el hombre comenzó a hacer uso de instrumentos de materiales metálicos, se enfrentó al problema de la corrosión y aunque ha habido grandes avances para el control y prevención de la misma, la corrosión es un problema permanente e infranqueable. Los países de primer mundo e industrializados invierten grandes cantidades de dinero en la investigación y aplicación de métodos para prevenir este fenómeno. Los costos y pérdidas causados por la corrosión son el motivo principal que promueve las actividades de investigación en este campo y la disminución de la vida útil de los materiales por acción de contaminantes en el ambiente. Así mismo, la contaminación de productos y del medio circundante debido a la corrosión de los materiales en contacto con ellos, son también problemas alarmantes que igual merecen atención.

4.2.2. Definición de Corrosión^(9,10)

La corrosión puede definirse como la reacción química o electroquímica de un metal o aleación con su medio circundante con el siguiente deterioro de sus propiedades.

La reacción básica de corrosión es por tanto:



De acuerdo con ello también es posible definir la corrosión desde un punto de vista químico como el tránsito de un metal de su forma elemental a su forma iónica o combinada con cesión de electrones a un no metal como el oxígeno o el azufre, por ejemplo. Es decir, el metal, a través de la corrosión, retorna a la forma combinada formando óxidos, sulfuros, hidróxidos, etc., que es como los metales se encuentran habitualmente en la naturaleza por tratarse de formas termodinámicamente más estables.

Desde el primer momento de su extracción, para lo cual es necesario cambiar las condiciones termodinámicas utilizando reductores, altas temperaturas, etc., el metal muestra una tendencia inherente a reaccionar con el medio ambiente (atmósfera, agua suelo, etc.) retornando a la forma combinada. El proceso de corrosión es natural y

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

espontáneo, y cuando mayor es la energía gastada en la obtención del metal a partir del mineral, tanto más fácilmente el metal revierte al estado combinado, es decir, tanto más favorecida termodinámicamente está la reacción de corrosión.

Metalurgia extractiva y corrosión son, por lo tanto procesos de acción opuesta.

El proceso de corrosión es la interacción de un metal con el medio que lo rodea, produciendo el consiguiente deterioro en sus propiedades tanto físicas como químicas. Las características fundamental de este fenómeno, es que sólo ocurre en presencia de un electrólito, ocasionando regiones plenamente identificadas, llamadas estas anódicas y catódicas: una reacción de oxidación es una reacción anódica, en la cual los electrones son liberados dirigiéndose a otras regiones catódicas. En la región anódica se producirá la disolución del metal (corrosión) y, consecuentemente en la región catódica la inmunidad del metal.

Los enlaces metálicos tienden a convertirse en enlaces iónicos, los favorece que el material puede en cierto momento transferir y recibir electrones, creando zonas catódicas y zonas anódicas en su estructura. La velocidad a que un material se corroe es lenta y continua todo dependiendo del ambiente donde se encuentre, a medida que pasa el tiempo se va creando una capa fina de material en la superficie, que van formándose inicialmente como manchas hasta que llegan a aparecer imperfecciones en la superficie del metal.

Este mecanismo que es analizado desde un punto de vista termodinámico electroquímico, indica que el metal tiende a retornar al estado primitivo o de mínima energía, siendo la corrosión por lo tanto la causante de grandes perjuicios económicos en instalaciones.

Pérdidas económicas originadas por la corrosión⁽¹⁾

Las primeras estimaciones de los costos de la corrosión, así como las más recientes

coinciden en señalar que éstos corresponden a aproximadamente el 3% del PBI en nuestro país. La corrosión es un fenómeno que puede afectar prácticamente a cualquier

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

material y cuando ésta no es prevenida o controlada puede reducir significativamente la vida útil o la eficiencia de componentes, equipos, estructuras e instalaciones.

Las pérdidas económicas derivados de la corrosión pueden clasificarse en directas e indirectas. Las pérdidas directas se relacionan con los costos necesarios para la reposición de estructuras, equipos, maquinaria o componentes que pueden quedar inservibles por efecto de la corrosión. Respecto a pérdidas indirectas, se pueden nombrar las siguientes: pérdidas por interrupciones, pérdidas de productos, pérdidas por contaminación de productos, pérdidas de rendimiento, pérdidas por sobredimensionamiento, pérdidas por accidentes.

Se estima que la relación entre los gastos directos e indirectos se sitúa entre 1/6 y 1/10. Además se estima que entre el 10 y el 12% de la producción mundial de acero se pierde completamente cada año a causa de la corrosión.

Los paros de las plantas pueden ocurrir y ocurren como un resultado de la corrosión provocando gastos directos e indirectos de aspecto económico y humano.

Dentro de los aspectos económicos tenemos:

- a) Reposición del equipo corroído.
- b) Coeficiente de seguridad y sobre diseño para soportar la corrosión.
- c) Mantenimiento preventivo como la aplicación de recubrimientos.
- d) Paros de producción debida a fallas por corrosión.
- e) Contaminación de productos.
- f) Pérdida de eficiencia ya que los coeficientes de seguridad, sobre diseño de equipo y productos de corrosión por ejemplo, decrecen la velocidad de transmisión de calor en cambiadores de calor.
- g) Pérdida de productos valiosos.
- h) Daño de equipo adyacente a aquel en el cual se tuvo la falla de corrosión.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

Dentro de los aspectos humanos y sociales tenemos:

- a) La seguridad, ya que fallas violentas pueden producir incendios, explosiones y liberación de productos tóxicos.
- b) Condiciones insalubres por ejemplo, contaminaciones debido a productos del equipo corroído o bien un producto de la corrosión misma.
- c) Agotamiento de los recursos naturales, tanto en metales como en combustibles usados para su manufacturera.
- d) Apariencia, ya que los materiales corroídos generalmente son desagradables a la vista.

Clasificación y características de los distintos procesos de corrosión

La corrosión ocurre en muchas y muy variadas formas, pero su clasificación generalmente se basa en uno de los tres siguientes factores:

1. Naturaleza de la sustancia corrosiva. La corrosión puede ser clasificada como húmeda o seca, para la primera se requiere un líquido o humedad mientras que para la segunda, las reacciones se desarrollan con gases a alta temperatura.
2. Mecanismo de corrosión. Este comprende las reacciones electroquímicas o bien, las reacciones químicas.
3. Apariencia del metal corroído. La corrosión puede ser uniforme y entonces el metal se corroe a la misma velocidad en toda su superficie, o bien, puede ser localizada, en cuyo caso solamente resultan afectadas áreas pequeñas.

La clasificación por apariencia, uniforme o localizada, es muy útil para una discusión preliminar que en caso de requerirse en forma más completa, necesita del establecimiento de las diferencias entre la corrosión localizada de tipo macroscópico y el ataque microscópico local.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

En el ataque microscópico, la cantidad de metal disuelto es mínimo y puede conducir a daños muy considerables antes de que el problema sea visible.

Los diferentes tipos de corrosión se presentan en el figura No.35 y se esquematizan en la figura No. 36, a continuación se enuncia cada una de estas formas.

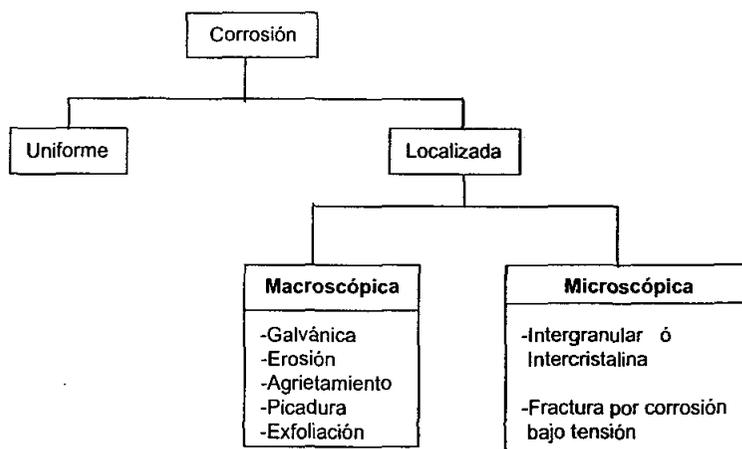


Figura No.35 Las diferentes formas de corrosión

Macroscópica

Corrosión uniforme

El ataque uniforme sobre grandes áreas de una superficie metálica (Fig. No. 36b) es la forma más común de la corrosión y puede ser húmeda o seca, electroquímica o química, siendo necesario seleccionar los materiales de construcción y los métodos de protección como pintura, para controlarla.

Por otra parte, la corrosión uniforme es la forma más fácil de medir, por lo que las fallas inesperadas pueden ser evitadas simplemente por inspección regular.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

Corrosión galvánica

La corrosión galvánica (Fig. No. 36c) se presenta, cuando dos metales diferentes en contacto o conectados por medio de un conductor eléctrico, son expuestos a una solución conductora. En este caso, existe una diferencia en potencial eléctrico entre los metales diferentes y sirve como fuerza directriz para el paso de la corriente eléctrica a través del agente corrosivo, de tal forma que el flujo de corriente corroe uno de los metales del par formado.

Mientras más grande es la diferencia de potencial entre los metales, mayor es la probabilidad de que se presente la corrosión galvánica debiéndose notar que este tipo de corrosión sólo causa deterioro en uno de los metales, mientras que el otro metal del par casi no sufre daño.

El metal que se corroe recibe el nombre de metal activo, mientras que el que no sufre daño se le denomina metal más noble.

La relación de áreas entre los dos metales es muy importante, ya que un área muy grande de metal noble comparada con el metal activo, acelerará la corrosión, y por el contrario, una mayor área del metal activo comparada con el metal noble disminuye el ataque del primero.

La corrosión galvánica a menudo puede ser reconocida por el incremento del ataque junto a la unión de los metales, como se indica en la figura No. 36c y este tipo puede ser controlado por el uso de aislamientos o restringiendo el uso de uniones de metales cuando ellos forman diferencias de potencial muy grande en el medio ambiente en el que se encuentran. La diferencia de potencial puede ser medida, utilizando como referencia la serie galvánica de los metales y aleaciones que se presentan más adelante, en la serie de los potenciales tipo (standard) de óxido de reducción.

Otro método para reducir la corrosión galvánica, es evitar la presencia de grandes áreas de metal noble con respecto a las de metal activo.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

Corrosión por erosión

Cuando el movimiento del medio corrosivo sobre la superficie metálica incrementa la velocidad de ataque debido a desgaste mecánico, este recibe el nombre de corrosión por erosión. La importancia relativa del desgaste mecánico y la corrosión, es a menudo difícil de establecer y varía grandemente de una situación a otra, y el mecanismo de la erosión generalmente se atribuye a la remoción de películas superficiales protectoras, como por ejemplo, películas de óxido formadas por el aire, o bien, productos adherentes de la corrosión.

La corrosión por erosión, generalmente tiene la apariencia de picaduras poco profundas de fondo terso, como se ve en la figura No.36d, y el ataque puede presentar también una distribución direccional debido al camino seguido por el agente agresivo cuando se mueve sobre la superficie del metal. La corrosión por erosión prospera en condiciones de alta velocidad, turbulencia, choque, etc., y frecuentemente se observa en impulsores de bombas, agitadores y en codos y cambios de dirección de tuberías. Los líquidos con suspensión conteniendo partículas sólidas duras pueden igualmente causar este tipo de problema.

La corrosión por erosión puede ser evitada por cambios de diseño o por selección de materiales más resistentes.

La corrosión por cavitación y desgaste (fretting) son formas especiales de la corrosión por erosión. La primera es causada por la formación y colapso de burbujas de vapor en la superficie del metal. Las altas presiones producidas por este colapso pueden disolver el metal, remover las partículas protectoras, etc.

La corrosión por desgaste (fretting) ocurre cuando las piezas de metal se deslizan una sobre la otra, causando daño mecánico a una o ambas piezas (Fig. No.36e) y el deslizamiento es generalmente un resultado de la vibración.

La corrosión se cree que juega uno de los siguientes papeles: el calor de la fricción oxida el metal y a continuación el óxido se desgasta, o bien, la remoción mecánica de las partículas protectoras de óxido, o los productos de la corrosión resultantes, dan

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

como resultado la exposición de superficies limpias del metal al medio agresivo, en tal forma que el fenómeno corrosivo se acelera.

La corrosión por deslizamiento se atenúa utilizando materiales de construcción más duros, empleando lubricación o bien incrementando la fricción hasta un punto tal en que el deslizamiento es imposible.

Corrosión por agrietamiento

Las condiciones ambientales en una grieta, pueden con el tiempo volverse muy diferentes de las existentes en una superficie limpia y abierta, por lo que un medio ambiente muy agresivo puede desarrollar y causar corrosión en las grietas (Fig. No.36f). Las grietas o hendiduras generalmente se encuentran en los empaques traslapes, tornillos, remaches, etc., y también pueden formarse por depósitos de suciedad, productos de la corrosión y raspaduras en las películas de recubrimiento.

Generalmente se atribuye a los siguientes factores:

- a) Cambios de acidez en la grieta o hendidura.
- b) Escasez de oxígeno en la grieta.
- c) Desarrollo de iones diferentes en la hendidura.
- d) Agotamiento de Inhibidor en la grieta.

Al igual que todas las formas de corrosión localizada, la corrosión por agrietamiento no ocurre en todas las combinaciones metal-agente corrosivo, y algunos materiales son más susceptibles para producirla que otros, como por ejemplo aquéllos que dependen de las películas protectoras de óxido formadas por el aire para adquirir su resistencia a la corrosión, tal y como sucede con el acero inoxidable y el titanio. Estos materiales pueden ser aleados para mejorar su resistencia y el diseño deberá hacerse de tal manera, que se reduzcan las hendiduras, tratando de mantener las superficies limpias para combatir este tipo de corrosión.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

Corrosión por picadura

La corrosión por picadura se presenta por la formación de orificios en una superficie relativamente inatacada y las picaduras pueden tener varias formas (Fig.No. 36g).

La forma de una picadura es a menudo responsable de su propio avance, por las mismas razones mencionadas en la corrosión por agrietamiento, es decir, una picadura puede ser considerada como una grieta o hendidura formada por si misma.

Para reducir la corrosión por picadura se necesita una superficie limpia y homogénea por ejemplo, un metal homogéneo y puro con una superficie muy pulida deberá ser generalmente, mucho más resistente que una superficie que tenga incrustaciones defectos o rugosidad.

La corrosión por picadura es un proceso lento que puede llevarse meses y años antes de ser visible, pero que naturalmente, causará fallas inesperadas. El pequeño tamaño de la picadura y las minúsculas cantidades de metal que se disuelven al formarla hacen que la detección de ésta sea muy difícil en las etapas iniciales.

La limpieza de la superficie y la selección de materiales conocidos, resistentes a la formación de picaduras en un medio ambiente determinado, es generalmente el camino más seguro para evitar este tipo de corrosión.

Corrosión por exfoliación

La corrosión por exfoliación y *disolución selectiva* es una corrosión subsuperficial que comienza sobre una superficie limpia, pero se esparce debajo de ella y difiere de la corrosión por picadura en que el ataque tiene una apariencia laminar. Capas completas de material son corroídas (Fig. No. 36h) y el ataque es generalmente reconocido por el aspecto escamoso y en ocasiones ampollado de la superficie. Al final del ataque, una muestra tiene la apariencia de un mazo de barajas en el cual algunas de las cartas han sido extraídas. La corrosión por disolución selectiva se produce al efectuarse la remoción de uno de los elementos de una aleación siendo el ejemplo más común la eliminación del zinc en aleaciones de cobre-zinc, conocido con el nombre de

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

dezincificación. Este fenómeno corrosivo produce un metal poroso (figura 36i) que tiene propiedades mecánicas muy pobres y obviamente el remedio a este caso es el empleo de aleaciones que no sean susceptibles a este proceso.

Microscópica

Corrosión intergranular o intercrystalina

Para entender este tipo de ataque es necesario considerar que cuando un metal fundido se cuela en un molde, su solidificación comenzó con la formación de núcleos al azar, cada uno de los cuales crece en un arreglo atómico regular para formar lo que se conoce con el nombre de granos o cristales.

El arreglo atómico y los espaciamientos entre las capas de los granos, son los mismos en todos los cristales de un metal dado; sin embargo, debido a la nucleación al azar, los planos de los átomos en las cercanías de los granos no encajan perfectamente bien y el espacio entre ellos recibe el nombre de límite de grano. Si se dibuja una línea de 2.5 cm de longitud sobre la superficie de una aleación, esta deberá cruzar aproximadamente 1000 límites de grano, éstos son a veces atacados preferencialmente por un agente corrosivo y el ataque se relaciona con la segregación de elementos específicos o por la formación de un compuesto en el límite. La corrosión generalmente ocurre, porque el agente corrosivo ataca preferencialmente el límite de grano o una zona adyacente a él que ha perdido un elemento necesario para tener una resistencia a la corrosión adecuada.

En un caso severo de corrosión intercrystalina, granos enteros se desprenden debido a la deterioración completa de sus límites (Fig. No. 36j), en cuyo caso, la superficie aparecerá rugosa y se sentirá rasposa debido a la pérdida de los granos.

El fenómeno de límite de grano que causa la corrosión intercrystalina, es sensible al calor por lo que la corrosión de este tipo, es un subproducto de un tratamiento térmico como la soldadura o el relevado de esfuerzos y puede ser corregido por otro tipo de tratamiento térmico o por el uso de una aleación modificada.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

Fractura por corrosión bajo tensión

La acción conjunta de un esfuerzo de tensión y un medio ambiente corrosivo, dará como resultado en algunos casos, la fractura de una aleación metálica. La mayoría de las aleaciones son susceptibles a este ataque, pero afortunadamente el número de combinaciones aleación – corrosivo que causan este problema, son relativamente pocas. Sin embargo, hasta la fecha, este es uno de los problemas metalúrgicos más serios. Los esfuerzos que causan las fracturas provienen de trabajos en frío, soldadura, tratamiento térmicos, o bien, pueden ser aplicados en forma externa durante la operación del equipo.

Las fracturas pueden seguir caminos Inter Cristalinos o trans cristalinos (Fig. No. 36k) que a menudo presentan una tendencia a la ramificación.

Algunas de las características de la corrosión de fractura por tensión, son las siguientes:

- a) Para que esta corrosión exista, se requiere un esfuerzo de tensión.
- b) Las fracturas se presentan quebradizas en forma macroscópica, mientras que las fallas mecánicas de la misma aleación, en ausencia de un agente corrosivo específico, generalmente presentan ductibilidad.
- c) La corrosión por esfuerzos depende de las condiciones metalúrgicas de la aleación.
- d) Algunos medios ambientes específicos, generalmente causan fractura en una aleación dada. El mismo medio ambiente no causa fracturas en otras aleaciones.
- e) La corrosión por esfuerzo puede ocurrir en medios ambientes considerados no agresivos para una aleación dada, por ejemplo la velocidad de corrosión uniforme es baja hasta que se presenta una fractura.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

f) Largos periodos de tiempo, a menudo años, pueden pasar antes de que las fracturas sean visibles, pero entonces al presentarse, se propagan rápidamente con el resultado de una falla inesperada.

g) La corrosión por esfuerzo, no está completamente entendida en la mayoría de los casos; sin embargo, en la actualidad se dispone de muchos datos para ayudar al ingeniero a evitar este problema.

Para combatir la corrosión de fracturas por tensión, es necesario realizar el relevado de esfuerzo o seleccionar un material más resistente.

El término de fragilización por hidrógeno se confunde frecuentemente con la corrosión de fractura por tensión, debido a que el hidrógeno desempeña una función en algunos casos de ésta y para distinguir la fragilización por hidrógeno de la corrosión de fractura por tensión, es conveniente juzgar los siguientes conceptos:

a) La fractura debido al hidrógeno introducido en el metal sin corrosión de éste, por ejemplo, en la protección catódica, no es definitivamente corrosión de fractura por tensión.

b) La fractura debido al hidrógeno producida por una alta velocidad de corrosión uniforme como en el decapado, tampoco es corrosión de fractura por tensión porque no se necesita tener un esfuerzo mientras el hidrógeno se produce y la fractura se presenta posteriormente cuando la tensión es aplicada después de la reacción corrosiva con liberación de hidrógeno.

c) Cuando el hidrógeno se produce por corrosión local en una fractura o picadura sobre un metal sometido a esfuerzo de tensión y resulta una propagación en la fractura, entonces sí se considera que la corrosión pertenece al tipo de corrosión de fractura por tensión.

La corrosión por fatiga, es una forma especial del tipo de corrosión de fractura por tensión y se presenta en ausencia de medios corrosivos, debido a esfuerzos cíclicos repetidos. Estas fallas son muy comunes en estructuras sometidas a vibración continua.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

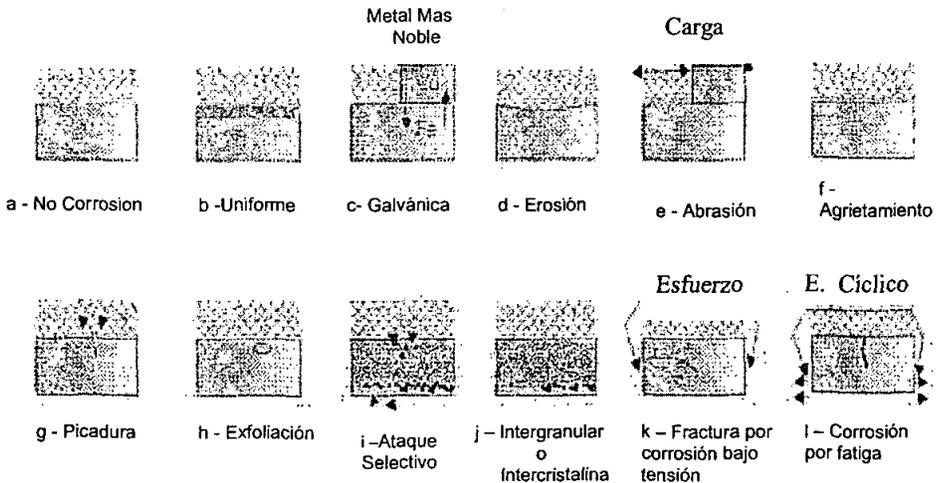


Fig. 36. Corrosión de Metales

La corrosión por fatiga, se incrementa naturalmente con la presencia de un medio agresivo, de tal forma que el esfuerzo necesario para producir la corrosión por fatiga, se reduce en algunas ocasiones hasta la mitad del necesario, para producir la falla en aire seco (Fig. No. 36 I).

Los métodos para evitar la corrosión por fatiga, necesitan prevenir la fractura producida por ésta desde el principio, ya que es muy difícil detener la propagación de las fracturas, una vez que se inician.

De lo indicado anteriormente, se ve la necesidad de reconocer en primer lugar, las diferentes formas en las que se presenta la corrosión para así tomar medidas pertinentes que permitan establecer los métodos correctivos para atenuarla, los cuales son mejor comprendidos si se conoce la teoría de la corrosión.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

4.2.3. Aceros para tuberías^(5,6)

En la Industria petrolera se han venido utilizando los siguientes aceros para tuberías para transporte de gas y petróleo y estos son: Aceros al carbono, aceros de baja aleación, aceros inoxidables. Los materiales ferrosos deben cumplir los requerimientos establecidos en la sección 3 del estándar NACE MR0175-92.

Es aceptable utilizar aceros al carbono y de baja aleación siempre que no tengan durezas superiores a 22 HRC, y deben de contener menos del 1% de Ni, si son deformados en frío deberán ser relevados los esfuerzos por medio de tratamiento térmico, este tratamiento se aplicara además cuando el material haya sido tratado térmicamente (recocido, normalizado, normalizado y revenido, templado-revenido) También es aceptable los aceros forjados siempre y cuando su dureza no sea mayor a 187 HRB como máximo. En cuanto a aceros de baja aleación, correspondientes a la serie 41XX (Cr-Mo) son aceptables hasta con una dureza máxima de 26 HRC, siempre que sean templados y revenidos. Es recomendable tener un especial cuidado en la composición química y el tratamiento térmico cuando estos aceros vayan a ser usados en medios ricos en sulfuro de hidrógeno.

Hacia el final de los años 70's surgió un grupo de aceros y que su aplicación práctica se enfocó en la fabricación de aceros de alta resistencia y baja aleación denominados en sus siglas en inglés como HSLA. Durante el desarrollo de estos aceros fueron relacionados con la fabricación de tuberías, y el mercado de tuberías de gran diámetro han proporcionado el mayor impulso para el rápido desarrollo tecnológico. Necesidades recientes reflejan una creciente demanda por aún mayores resistencias a la corrosión en medios amargos y una tendencia hacia aplicar aceros de más alta resistencia con límites de fluencia de 550 MPa hasta 690 MPa.

Con la aparición de la tecnología de laminación controlada de aceros microaleados ha tenido un alto grado de refinación alcanzado por la mayoría de las compañías productoras de acero. Las nuevas tecnologías de fabricación de aceros proporcionan excelentes medios para la producción masiva de aceros de bajo carbono y bajo nitrógeno que ofrecen nuevas posibilidades para el diseño de nuevas aleaciones: por ejemplo aceros microaleados del tipo, niobio-titanio, niobio-titanio-vanadio y niobio-boro.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

4.2.4. Efecto de los aleantes en los aceros HSLA⁽⁶⁾

C. Históricamente el carbono ha sido considerado como el elemento más efectivo en aumentar la resistencia de los aceros. Sin embargo, este resulta negativo en otras propiedades como son: tenacidad, ductilidad y soldabilidad por mencionar algunas. La reducción en el contenido de carbono produce un incremento en la energía interna, así como incrementar la soldabilidad. Los bajos contenidos de carbono también producen beneficios como un incremento en la resistencia al agrietamiento inducido por hidrógeno, aumento de la ductilidad en caliente en la región baja de la austenita, de aceros conteniendo elementos microaleantes.

N. Ha quedado bien establecido que el nitrógeno libre N_f , esto es, el nitrógeno que no está combinado en la forma de nitruros, es extremadamente perjudicial a la tenacidad del acero.

Desde los procesos de laminación en caliente, laminación controlada o cualquier otro proceso termomecánico, debe especificarse un bajo contenido de nitrógeno libre en el planchón de origen. Un contenido total de nitrógeno bajo es aún más importante para las zonas afectadas térmicamente y el metal de aporte donde los ciclos térmicos producen una alta relación de nitrógeno libre a total. Además de mantener el contenido de nitrógeno bajo es usual combinar este con elementos que forman nitruros estables a altas temperaturas y de ese modo reducir la cantidad de nitrógeno libre a niveles estables.

Ti. El Ti es un elemento con una alta afinidad por el nitrógeno con el cual forma nitruros estables a altas temperaturas. Además de su efecto positivo en la reducción del contenido de N libre en el acero, los precipitados de TiN resultantes tienen una influencia adicional. La energía de impacto y la curva de la apariencia de fractura en función de la temperatura de prueba de las zonas afectadas por el calor de granos gruesos son refinadas por la adición de pequeñas cantidades de titanio, por que aún a picos muy altos de temperatura las partículas de TiN no son disueltas y por lo tanto, ellas sirven para controlar el crecimiento de la austenita. Resultando el Ti como un tratamiento de tecnología estándar para el control del tamaño de grano en zonas afectadas térmicamente en la producción de aceros soldables de grado estructural.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

Nb. Cuando se tiene un bajo contenido de C, la mayor parte de Nb estará en solución sólida. Además de esta consideración si el nitrógeno disponible está combinado con el titanio, mayores cantidades de Nb pueden ser disueltas a la temperatura del líquido reflejando la mayor solubilidad de los NbC en contra de los Nb(C,N). El Nb refina el tamaño de grano, el cual es el único mecanismo para mejorar la resistencia y la tenacidad al mismo tiempo, es usado el proceso de laminación termomecánica.

V. Tuberías típicas de grados X-70 utilizaban cerca de 0.10% de carbono con V adicionado para alcanzar los niveles de resistencia requeridos vía endurecimiento por precipitación. Para estos aceros el mecanismo predominante de endurecimiento involucraba la precipitación de VN en la ferrita. El beneficio potencial del V en el procesado a alta temperatura puede ser considerado como mínimo y en algunos casos no es conveniente económicamente hablando, se agrega para mantener la cantidad total de microaleantes en un equivalente, quizás en niveles máximos de 0.08-0.1%.

Otros elementos.

Otros elementos que se usan como reforzadores, pero a través de un mecanismo de endurecimiento por solución sólida. Su efecto en las propiedades de grados de aceros soldables inicia con la sustitución del C por Mn. Una alta relación de Mn/C proporciona una mayor tenacidad con la misma resistencia. Dando por resultado que el Mn es el elemento más usado en el reforzamiento de los aceros HSLA. Otro elemento endurecedor por solución sólida es el Cu que es un elemento muy efectivo en la prevención para la formación de hidrógeno debido a que forma una película protectora, además de ser un efectivo endurecedor por solución sólida.

Inclusiones no-metálicas.

Las inclusiones son partículas de material ajeno a la matriz metálica, y por lo general son usualmente compuestos, tales como: óxidos, sulfuros, silicatos o aluminio-silicatos. Estas se forman en distintas etapas del proceso tales como: fusión, desoxidación, operaciones de transferencia del metal líquido, añadido de los aleantes, solidificación y enfriamiento. Estas, son el producto de la reacción del O, el S y el N con los elementos

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

aleantes que integran el acero principalmente con los desoxidantes agregados. Son capaces de originar fallas en un material o provocar que su vida útil de las herramientas con que son trabajados disminuya, y también pueden ser provocada la disminución en las propiedades mecánicas y su resistencia a la corrosión.

4.2.5. Clasificación general de las tuberías

Son diversas las asociaciones e institutos que norman las características de las tuberías, entre ellas se pueden mencionar las siguientes: ASTM, AISI, API, siendo las más referenciadas. En el caso de las tuberías para el campo petrolero y líneas de transmisión, por lo general estas están cubiertas por las especificaciones de la API (American Petroleum Institute). Las tuberías para transmisión de gas o productos de petróleo pueden ser soldadas o sin soldar, y estas se producen en una amplia gama de tamaños y dimensiones. Este tipo de tuberías están normadas por los estándares como :API 5L, 5LS, 5LU y 5LX. A su vez, existe una subdivisión en tuberías para perforación, retención y conducción, todas de acuerdo a las especificaciones reguladas como: 5A, 5AC y 5AX.

4.2.6. Especificaciones API

2B Tubo de placa soldada para la construcción de plataformas de perforación.

5A Tubo de acero soldado o sin soldar para perforación, protección o conducción de pozos de gas o petróleo.

5AC Tubos de acero soldado o sin soldar con un rango de resistencia a la cedencia restringido para protección o conducción en pozos de gas o petróleo.

5AX Tubos de acero sin soldar de alta resistencia para la perforación, protección o conducción en pozos de gas y petróleo.

5L Tuberías de acero soldado o sin soldar para la transmisión de gas o petróleo.

5LS Tuberías de acero soldado en espiral para la transmisión de gas o petróleo.

5LU Tuberías de acero soldado o sin soldar de ultra-alta resistencia (> 100 ksi) para la transmisión de petróleo o gas.

5LX Tuberías de acero soldado o sin soldar de alta resistencia (60 - 100 ksi) para la transmisión de gas o petróleo.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

4.2.7. Especificaciones para Rayos X^(17,18)

Kilovoltaje: Se denomina así al voltaje aplicado entre el Ánodo (+) y el Cátodo (-) del bulbo de Rayos X. Cuando se aumenta la diferencia de potencial entre ánodo y cátodo, los electrones se aceleran a mayor velocidad y se produce una radiación más penetrante. La radiación más penetrante es de una longitud mas corta. Como regla general, se debe utilizar el menor kilovoltaje posible para lograr el mayor contraste radiográfico.

Miliamperaje: Se llama así a la corriente formada por los electrones que se aceleran desde el cátodo al ánodo. También se le denomina corriente del bulbo y es del orden de unos cuantos miliamperes (mA). Se utiliza en nuestros equipos radiográficos un máximo de 2 mA. Cuando se aumenta la corriente del filamento éste se pone a mayor temperatura y emite más electrones incrementando así la corriente del bulbo. A mayor miliamperaje, el haz de radiación aumenta de intensidad, o sea que contiene más fotones pero su poder de penetración no cambia.

Exposición: Es la cantidad de energía radiante que emite un bulbo y es proporcional al miliamperaje y al tiempo que el bulbo está en operación.

Ejemplo: Un bulbo trabaja durante 2 minutos con una corriente de 2 miliamperes, rinde una exposición de $(2 \text{ mA}) (2 \text{ min}) = 4 \text{ mA/min}$

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

4.3 Procedimiento Experimental

El objetivo es la determinación de las principales causas que provocaron el deterioro del ducto.

El trabajo comienza con un ducto cuyo periodo en servicio fue de al menos veinte años y que proviene de la plataforma petrolera Akal Lima. Dicho ducto presenta daños por corrosión en diversas partes, que van desde ligeros hasta severos. Se describe a continuación los métodos de inspección con sus respectivos equipos.

Prueba No Destructiva, Rayos X.

-Sistema para toma de radiografías mediante Rayos-X marca: Pantak Seifert de 300 KV (Direccional). Exposición: 100 KV, 8 mA /min. Película AGFA D4

Análisis químico cuantitativo mediante espectrometría:

-Analizador portátil por Espectrometría de Emisión Óptica (OES), en modo aire o argon para identificar, analizar y clasificar metales, marca: Spectro, modelo Spectrotest

Análisis cualitativo vía luz monocromática (LM)

-Microscopio óptico con luz monocromática (LM) marca: Olympus con objetivos que variaron desde 100X, 200X y hasta 600X aumentos o ampliaciones.

Microscopía electrónica de barrido (SEM).

-Microscopio electrónico de barrido (SEM) marca Jeol con capacidad para la realización de análisis puntuales o microanálisis.

En las figuras 37 a) y b) se muestran dos aspectos del ducto en el estado de llegada, se observa una región dañada en la unión del tubo recto con el codo. La región está encerrada en un círculo y en ella se alcanza a apreciar la falta de material provocado por algún fenómeno de corrosión aun no determinado.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

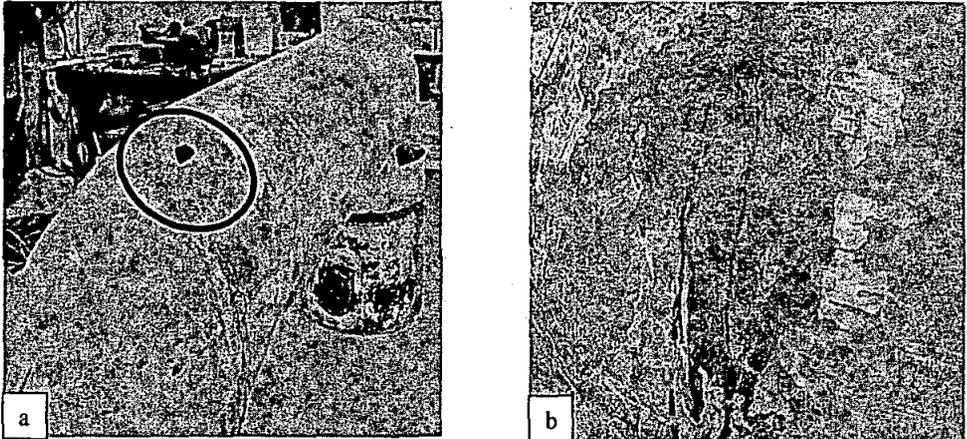


Figura 37 a) Fotografía del ducto mostrando la región del codo en donde se observó la corrosión más severa. b) Zona del codo en donde se aprecia una forma de corrosión generada por el medio ambiente.

4.3.1 Desarrollo

Con base en la información anterior, se procederá a determinar las causas principales que provocaron el deterioro del ducto, para ello, se plantearon las siguientes hipótesis.

- a) Si el ducto estuvo acoplado o en contacto directo con otro material metálico, la corrosión observada se debe a un fenómeno conocido como par galvánico.
- b) Si el ducto de acero no estuvo acoplado o en contacto directo con ningún otro material, la corrosión observada se debe presumiblemente a una corrosión generada por el medio ambiente.

4.3.2 Inspección Visual

El análisis se inició con una minuciosa inspección visual, se reporto mediante fotografías que resaltan los daños o defectos del ducto.

Algunos de los daños que se identificaron a simple vista fueron en la región señalada en la figura 37 a) mediante un círculo.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

4.3.3. Producción y evaluación de Réplicas Metalográficas en Campo

Las muestras bajo estudio fueron tomadas a partir de la pieza proporcionada y mostrada en la figura 37 a) y b).

Los estudios metalográficos realizados sobre estas piezas se llevaron a cabo mediante la técnica de obtención de réplicas metalográficas de acuerdo a la norma ASTM-E 1351-01 que consiste básicamente en lo siguiente. En copiar la microestructura del material que se desea evaluar y en el proceso de copiado se utiliza una gel de acetato la cual es emulsificada con acetona, y por tensión superficial la lámina se adhiere al metal, interactuando con éste y copiando su microestructura, ver figura 38.

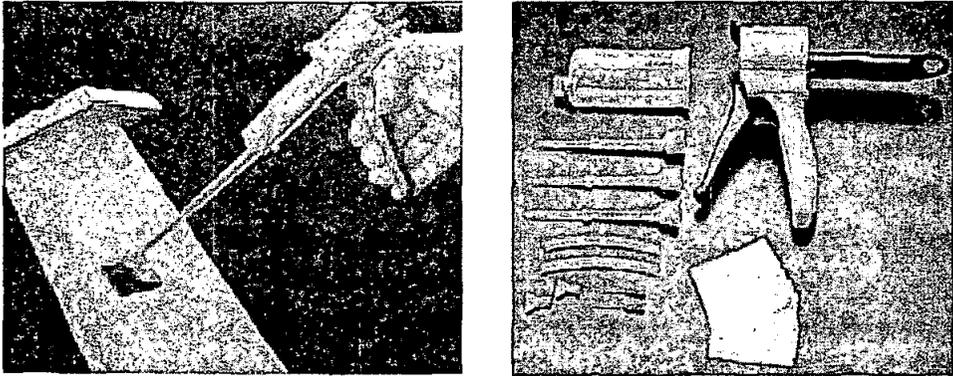


Fig. 38. Material y técnica Utilizado para hacer Réplicas Metalográficas en Campo.

Aplicación de la Técnica de Réplica Metalográfica

Desbaste grueso

El desbaste grueso se realizó mediante la aplicación de un lijado superficial con un esmeril, con tamaño de grano 80. Una vez que la superficie se encontró libre de capas de pintura, o capas superficiales de óxido, se procedió a efectuar un desbaste fino. Ver figura 39.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

Desbaste fino

El desbaste fino, se realizó mediante el uso de lijas sucesivas con los siguientes tamaños de grano: 120, 180, 240, 320, 400, 600 y hasta 1000. Este desbaste se realizó con una herramienta tipo "motor tool", con las lijas mencionadas.

Pulido

Una vez finalizado el desbaste, se procedió a pulir la pieza. Para el pulido se utilizó la misma herramienta usada para el desbaste fino, pero con paños de pulido y como agente abrasivo se usó pasta de diamante con tamaños de grano desde $9\ \mu\text{m}$, $3\ \mu\text{m}$, $1\ \mu\text{m}$. En ocasiones el pulido se realizó usando una suspensión de alúmina con tamaños de partícula desde $3.0\ \mu\text{m}$ hasta $0.1\ \mu\text{m}$. Entre cada operación de pulido, se realizó una limpieza superficial para no contaminar el nuevo paño con una pasta con granos de mayor tamaño. La limpieza se realizó utilizando algodón y etanol de grado analítico.

Ataque

Finalizado el pulido, se efectuó una limpieza exhaustiva de la superficie con etanol, para retirar cualquier residuo de pasta de diamante o suspensión de alúmina. Una vez finalizada la limpieza se procedió a efectuar el ataque químico. En este caso el reactivo de ataque empleado fue el Nital 4. Se sobreatacaron las muestras para obtener réplicas de buena calidad. El ataque con Nital, se realizó aplicando un flujo constante del reactivo sobre la superficie con una piceta.

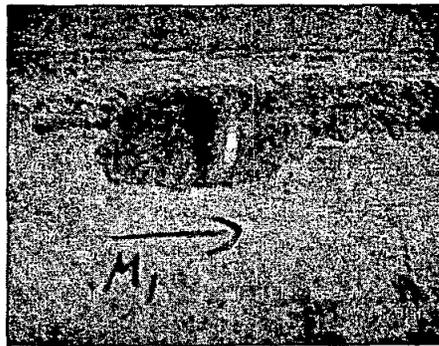


Figura 39. Secuencia de la metalografía en campo hasta llegar al acabado espejo

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

Técnica de Replica

Una vez finalizado el ataque, y retirado el reactivo con etanol, se procedió a colocar algunas gotas de gel en la superficie metálica, ésta se colocó sobre la superficie previamente atacada. La réplica se dejó secar durante al menos 15 minutos sobre la superficie. Una vez seca la réplica, se procedió a retirar la misma y colocarla sobre un "portaobjetos". En este caso se utilizaron réplicas que de origen traen un adhesivo en su parte posterior y traen además un aluminizado que facilita la observación en el microscopio.

4.3.4. Inspección Radiográfica con Rayos-X en Campo

Con ésta técnica se inspeccionaron las 2 uniones de soldadura, para ver si se encontraban grietas. La otra posibilidad era encontrar grietas ramificadas a partir del orificio del defecto reportado en la figura 35a.

4.3.4.1 Producción de Rayos X, (Fig. 40).

El tubo de Radiación o tubo de Rayos X esta constituido esencialmente por una ampolla de vidrio en cuyo interior se coloca el cátodo y el ánodo.

El ánodo que está constituido por un bloque de un metal que sea buen conductor del calor, generalmente Cobre, en el cual se dispone adecuadamente una placa de metal de alto punto de fusión (tungsteno), conectado al polo positivo del circuito de alta tensión, de forma variable y con una inclinación de 20° a 30° con respecto a la dirección del eje del haz de electrones que provienen del cátodo.

A esta ampolla se le ha extraído el aire hasta alcanzar un grado de vacío del orden de 0.01 a 0.001 mm/Hg.

El filamento (cátodo) formado por un hilo generalmente de tungsteno, el cual llevado a una temperatura suficiente, emite electrones. La cantidad de electrones emitidos depende de la temperatura alcanzada por el filamento, temperatura que puede ser regulada variando la intensidad de la corriente de alimentación de este filamento, este haz de electrones que se origina en el filamento y que va desde el cátodo al ánodo crea un paso de corriente cuya intensidad en miliamperios (mA). Este valor de la intensidad depende la intensidad de la radiación emitida por el tubo ya que ésta a su

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

vez es función del flujo de electrones. El tubo de rayos X que se ha descrito, pertenece al tipo de tubos, que se utilizan en la radiografía industrial.

Cuando los electrones chocan en el blanco de tungsteno, el frenado brusco, hace que la parte de su energía se transforme en Rayos X. Solo el 2% de la energía consumida por el bulbo se convierte en radiación el 98% restante se convierte en calor.

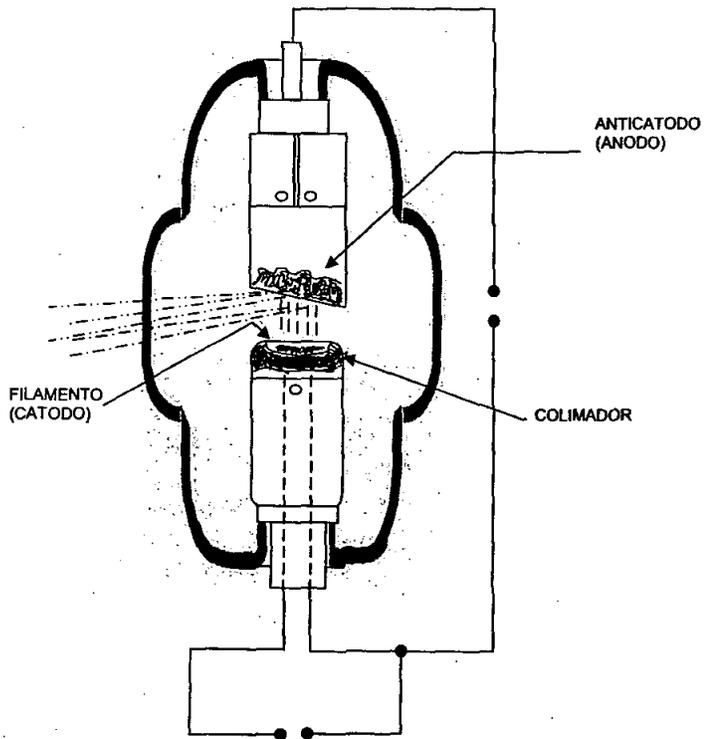
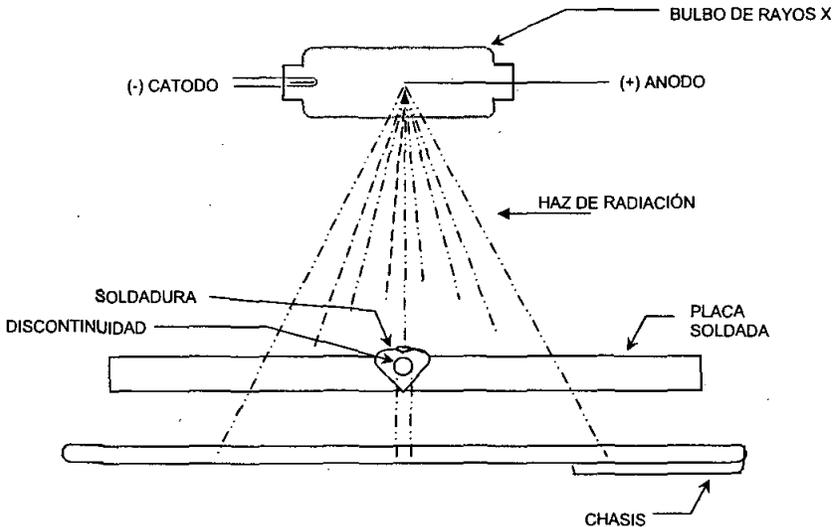


FIG. 40 TUBO DE RAYOS X

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.



41. INSPECCIÓN RADIOGRAFICA MEDIANTE RAYOS X

El procedimiento radiográfico

La inspección radiográfica es una técnica de examinación no destructiva, que emplea radiación de alta energía para penetrar los materiales y rendir una imagen del estado de sanidad interna en una película sensible a la radiación.

El procedimiento radiográfico consta de las cinco etapas siguientes: (Fig. 42):

Emisión

Se debe disponer de una fuente de radiación que tenga un poder de penetración apropiado para el material y el espesor radiográfico. Se usan bulbos de rayos X, cuya radiación es uniforme, a diferencia de los radioisótopos, que emiten Rayos Gamma y su radiación es dispersa, afectando la calidad de la radiografía.

Interacción

La radiación penetra en el material y se atenúa, dependiendo del espesor atravesado de tal manera que cuando hay una discontinuidad o una disminución de espesor, la

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

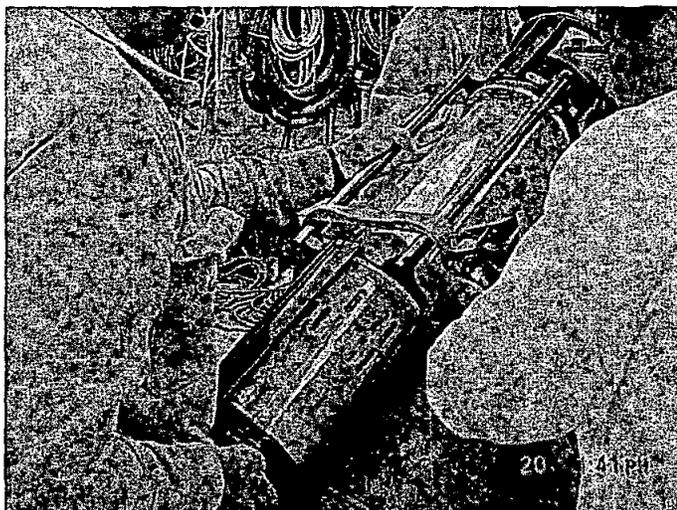
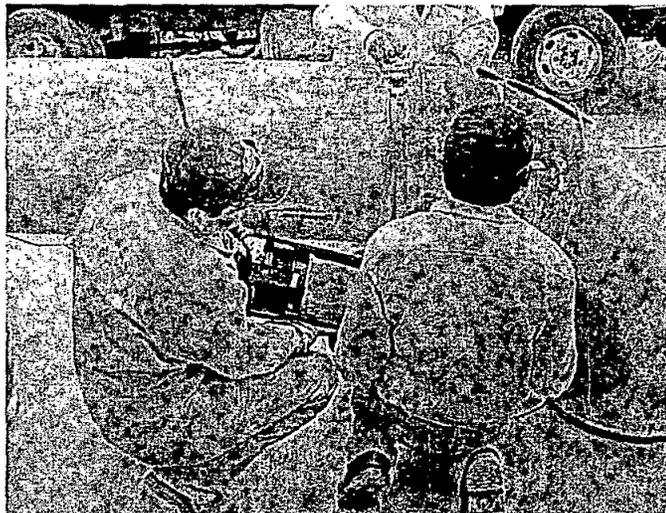


Figura 41A). Sistema para toma de radiografías mediante Rayos-x, marca: Pantak Seifert de 300 KV (Direccional). Exposición: 100 KV, 8 mA /min. Película AGFA D4

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

radiación pasa con mayor intensidad en esos puntos. Después de atravesar la soldadura el haz de radiación no es uniforme, sino que está estructurado según la condición interna de la soldadura.

Detección

La radiación que atraviesa la soldadura, contiene la información y se detecta en película sensible a la radiación. Entre más radiación recibe una cierta área, más oscura resulta en la radiografía definitiva. La película va dentro de una funda llamada chasis.

Representación

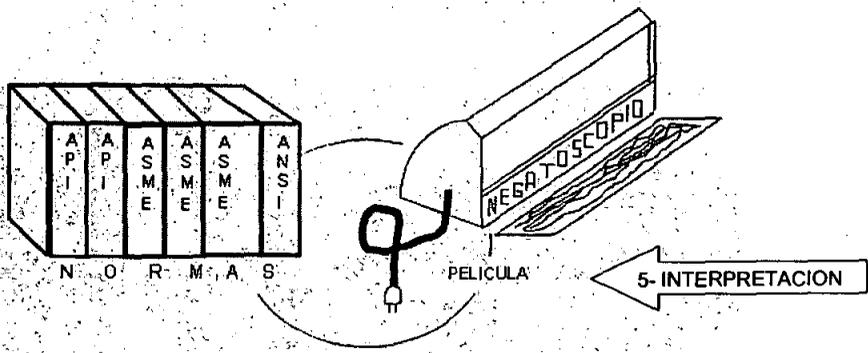
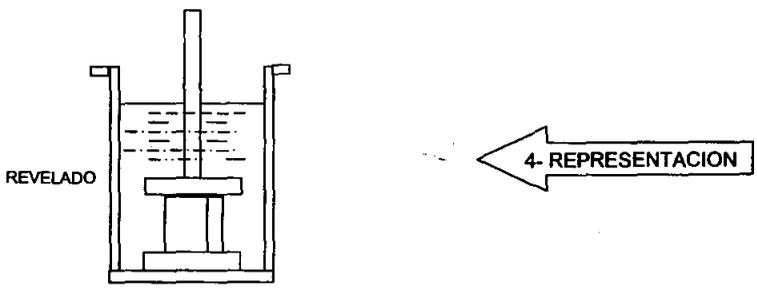
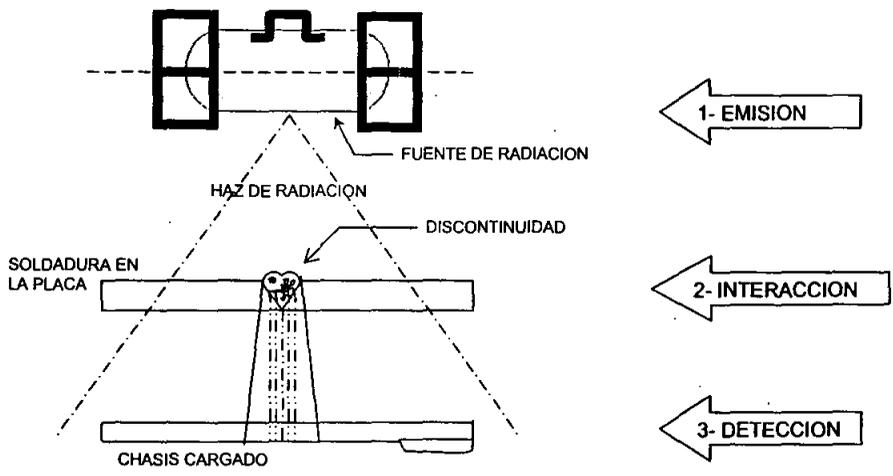
Cuando la película radiográfica recibe radiación cambia su apariencia física, de manera que para obtener la imagen radiográfica, la película expuesta a la radiación se somete a un proceso de revelado con soluciones químicas, y así la imagen queda en forma visible permanente.

Interpretación (Fig. 44)

La radiografía se observa ante un negatoscopio para detectar, clasificar y medir cada una de las discontinuidades. Se les compara con límites de aceptabilidad establecido en las diversas normas donde este involucrada la inspección radiográfica. La interpretación de la soldadura se juzga como Dentro o Fuera de norma.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

42. PROCESO RADIOGRAFICO



Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

4.3.5. Análisis químico cuantitativo vía Espectro

Se realizaron análisis químicos sobre el tubo, y sobre el codo. Se efectuaron los análisis mediante un espectrómetro de emisión óptica de marca SPECTRO, figura 43 a través de la técnica de arco y chispa (Arc & Spark) usando detectores tipo CCD (Detectores por Carga Acoplada)que convierten la luz que reciben en "píxeles", arreglados en ensambles que permiten capturar todo un rango del espectro producido por la excitación de las muestras metálicas y separar miles de líneas analíticas, con mucha precisión; cada una de ellas asociada con un elemento químico en particular, que opera con excitación con arco eléctrico en aire o así como también con excitación por chispa en atmósfera de argón.

Los resultados de dichos análisis se muestran en las tablas 4.4.1 y 4.4.2. y corresponden a los valores promedio obtenidos en el análisis de tres muestras representativas de cada sección.

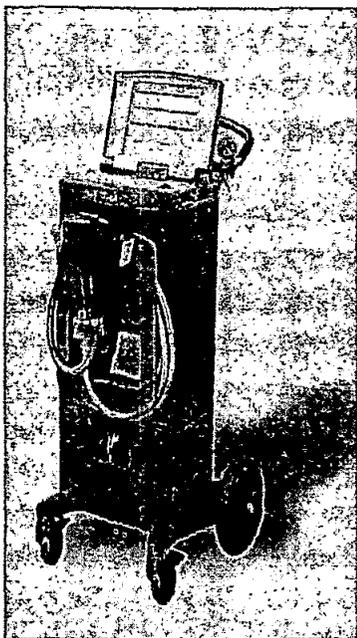


Figura 43.
Espectro de Emisión Óptica

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

4.3.6. Análisis cualitativo vía Luz Monocromática

Las imágenes obtenidas mediante la técnica de réplicas metalográficas (figura 45 a – d) mostraron algunos aspectos de poca relevancia. Se trata de un acero para tubería sin costura cuya norma es ASTM A335 grado 7. La figura 45. b) y c) muestran las réplicas obtenidas en la parte externa y en la dirección longitudinal del tubo. Se observa que la microestructura del acero del tubo consiste predominantemente de pequeños granos de ferrita (áreas blancas) con una ligera dispersión de finos carburos, los cuales no se alcanzan a resolver claramente. La figura 45 d) corresponde a la réplica realizada en la parte externa y dirección longitudinal del codo. Esencialmente se observa la misma microestructura que en el tubo, es decir, granos finos de ferrita y algunos carburos dispersos en la matriz. En todas las réplicas se observó la presencia de inclusiones redondeadas del tipo de sulfuro de manganeso.

Estas microestructuras son coincidentes con las reportadas en la literatura para este tipo de aceros lo cual indica que al menos el acero utilizado en la construcción de este dispositivo es el adecuado.

4.3.7. Análisis vía Microscopía Electrónica de Barrido

Algunas muestras de las secciones tubo-codo fueron observadas mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido, esto con el propósito de observar la morfología de los defectos presentes en la superficie de las secciones.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

4.4 Resultados y Discusión

4.4.1 Inspección Visual.

- Exfoliación o descascaramiento o delaminación del material debido a la fuerte agresividad del medio, se observa que son relativamente profundas, detalle en la figura 37 b.
- Manchas de óxido en distintas regiones del ducto.
- Regiones con áreas porosas y daños inducidos por el ambiente y que dieron origen a la destrucción parcial del componente, que se puede apreciar con todo detalle en la figura 37 b.
- No se encontraron Grietas en el metal base ni en el cordón de soldadura.

4.4.2. Producción y evaluación de Replicas Metalográficas en Campo

Tratamiento de la Réplica

Una vez obtenidas las réplicas se procedió a observarlas directamente en el microscopio óptico para verificar que la superficie fue copiada satisfactoriamente. El microscopio utilizado fue un microscopio de campo con aumentos no mayores a 100X. En algunos casos fue necesario metalizar las réplicas para incrementar el contraste en la misma.

Cotejando los resultados obtenidos con la literatura se determino que se trata de un acero ASTM A 335 GRADO 7.

La microestructura obtenida fue; granos equiaxiados de ferrita (α) con la presencia de algunos carburos de forma poligonal y algunas inclusiones (MnS), Fig. 45.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

4.4.3. Inspección Radiográfica con Rayos X en Campo

Se realizó la prueba con el equipo Rayos X del cual, las características de este equipo son; Marca: Pantak Seifert, Capacidad de tensión: 200 KV, Capacidad de corriente: 5 mA, Diámetro del foco emisor: 2,5mm.

Utilizando un negatoscopio, se pudo observar mejor las fallas. Este aparato genera una luz muy potente, que se utiliza para ver con mejor definición las fallas y defectos, ver Fig. 44 se observaron alrededor de 10 placas, realizadas con equipos de Rayos-X en las que NO se encontraron fallas de los siguientes tipos: Fisuras, Socavados, Rechupes, Falta de penetración en soldadura manual, o exceso de poros en soldaduras. Solo se observa la falta del material. Que es la zona corroída del ducto.

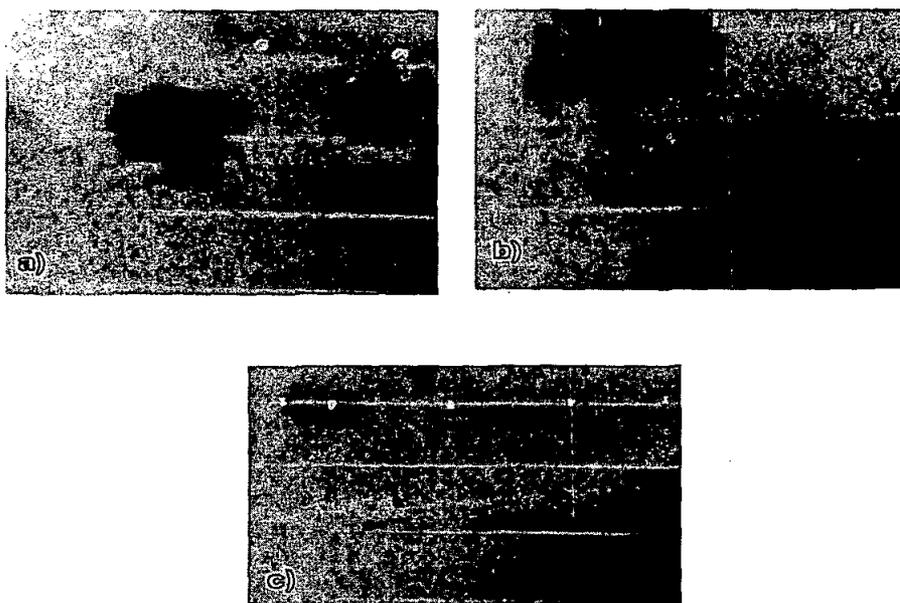


Figura 44. a) Radiografía de la zona corroída del ducto en donde se observa una carencia del material (mancha negra), lo cual produce la formación de una hendidura en la superficie de la muestra. b) la zona más oscura de esta radiografía se debe a la falta de material ocasionada por la corrosión. c) Con excepción de las zonas antes mencionadas, no se encontró además otro tipo de corrosión. No se encontró ningún tipo de grieta, poro o cualquier otra indicación relevante.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

4.4.4. Análisis químico cuantitativo vía Espectro

Los resultados de dichos análisis se muestran en las tablas 4.4.1 y 4.4.2. y corresponden a los valores promedio obtenidos en el análisis de tres muestras representativas de cada sección.

Muestra: Tubo

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.1673	0.1790	0.846	0.0066	0.0181	0.0205	0.0438	0.0146	0.0454	0.0054
Cu	Nb	Ti	V	Pb	Fe				
%	%	%	%	%	%				
0.0115	0.0002	0.0026	<0.0000	0.0056	98.6				

Tabla 4.4.1 Valores promedio de % en peso, tres análisis químicos realizados en la región del tubo recto.

Muestra: CODO

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0.1574	0.1448	0.783	0.0107	0.0195	0.0189	0.0437	0.0098	0.0463	0.0054
Cu	Nb	Ti	V	Pb	Fe				
%	%	%	%	%	%				
0.0104	0.0001	0.0023	< 0.0000	0.0056	98.7				

Tabla 4.4.2 Valores promedio de % en peso, tres análisis químicos realizados en la región del codo 90°.

Cotejando estos resultados con la literatura consultada se determinó que se trata de un acero ASTM A 335 GRADO 7.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

4.4.5 Análisis cualitativo vía Luz Monocromática

Cotejando los resultados obtenidos con la literatura se determino que se trata de un acero ASTM A 335 GRADO 7.

La microestructura obtenida fue; granos equiaxiados de ferrita (α) con la presencia de algunos carburos de forma poligonal y algunas inclusiones (i), Fig. 45.

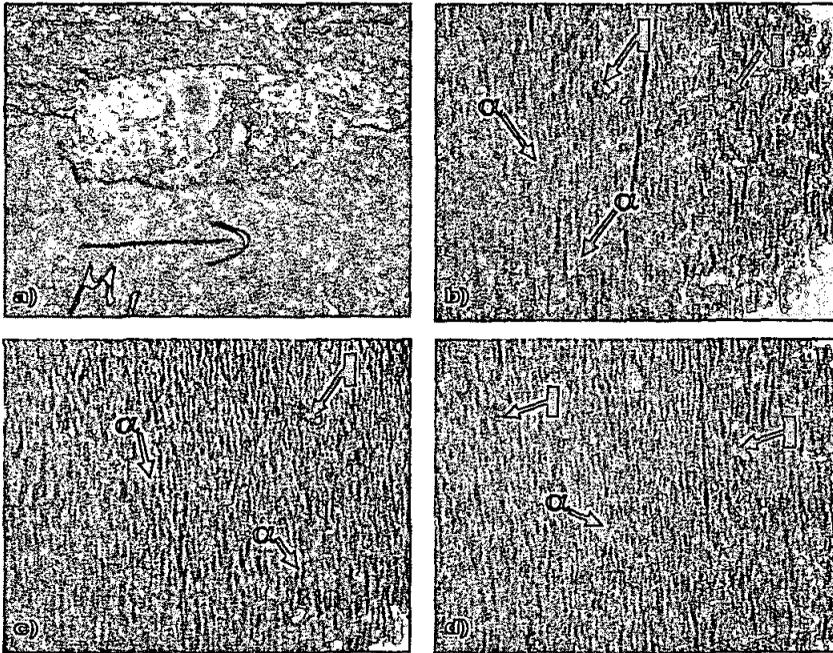


Figura 45 Microestructuras obtenidas mediante la técnica de réplicas metalográficas. a) superficie pulida y atacada con Nital I, b), c) y d) granos equiaxiados de ferrita (α) con la presencia de algunos carburos de forma poligonal y algunas inclusiones (i)

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

4.4.6 Microscopia Electrónica de Barrido

Algunas muestras de las secciones tubo-codo fueron observadas mediante la técnica de microscopia electrónica de barrido, esto con el propósito de observar la morfología de los defectos presentes en la superficie de las secciones, la figura 46 muestra el aspecto general que se encontró en la superficie del tubo a 35 mil aumentos. Se observan algunas protuberancias claras y oscuras. Esto se debe a los óxidos presentes, que toman esta coloración por efecto del haz de rayos x que inciden sobre la muestra, principalmente los microanálisis indican una presencia masiva de oxido de fierro. El patrón de microanálisis se obtuvo en una región superficial en la zona clara. Se observa la presencia de óxidos de fierro principalmente, hay trazas de Si y Ca que que tal vez estén formando parte del óxido. Hay trazas también de S y Cl las cuales por ser pequeñas se pueden considerar despreciables.

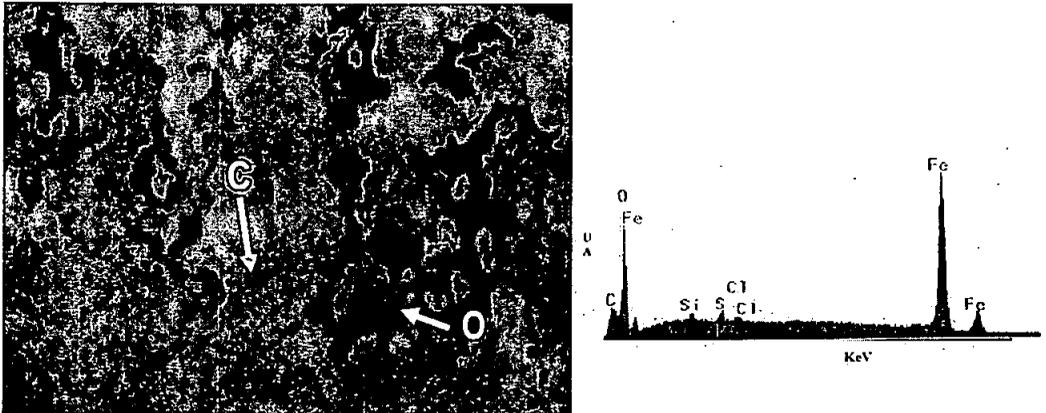


Figura 46. Región superficial del tubo observada mediante microscopia electrónica de barrido y su correspondiente patrón de microanálisis obtenido.

La figura 46. corresponde a la sección de la parte interna del tubo a 150 mil aumentos, no es muy clara la resolución ya que es una región rica en carbón y azufre y no es factible enfocar claramente, por que estos productos reaccionan con el haz de rayos-x que incide sobre la región de la muestra. En el patrón de microanálisis obtenido en esta región de la cara interna del tubo, se observa la presencia de S y C esto es subproductos del tipo carbonáceo, y se observan trazas de óxido de fierro.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

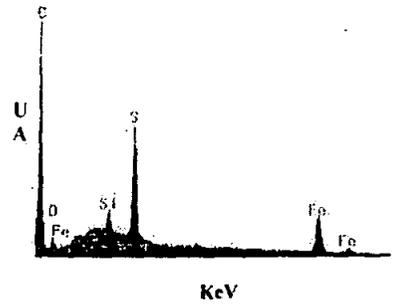
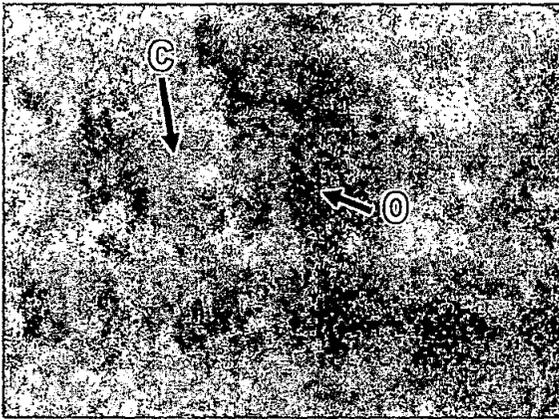


Figura 47. Región superficial del tubo observada mediante microscopía electrónica de barrido y su correspondiente patrón de microanálisis obtenido.

Los patrones de microanálisis de la figura 47. corresponden a las regiones clara y oscura representadas en la fotografía de las figuras 48 como C, O, S, Si, Fe respectivamente. En estos se aprecia la presencia abundante de Fe, el cual se encuentra en forma de fase ferrítica. Así mismo se puede observar la existencia de carbón y azufre, ambos en una cantidad hasta cierto punto considerable, sin embargo no son indicativos de la existencia de corrosión ambiental.

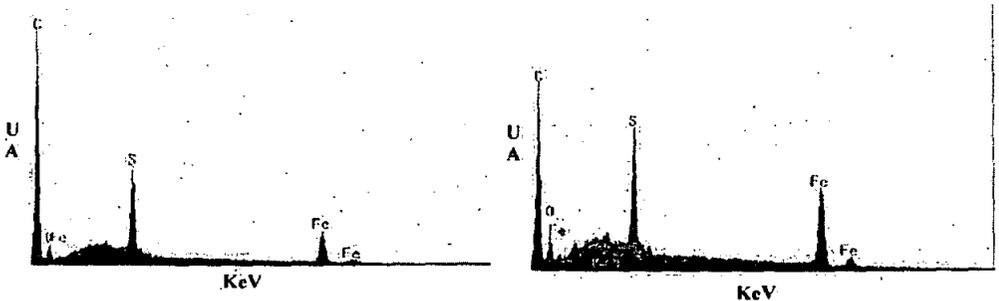


Figura 48. Patrones de microanálisis obtenidos en las regiones claras (C) y oscuras (O) al interior del tubo. En ambos se observa la presencia de Carbono y Azufre, y el Oxido de Hierro no es tan marcado como en la sección externa del tubo.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

4.5 CONCLUSIONES

- Se determinó que el material bajo estudio y del que está hecho el ducto (tubo recto y codo de 90 °) corresponde a un acero A335 grado 7 ASTM. Este tipo de acero se utiliza en la fabricación de tubos para trabajo a alta temperatura y en donde son posibles las operaciones de construcción, por soldadura de arco.
- El ambiente marino no fue la causa principal del deterioro del ducto ya que no se encontraron elementos que fueran indicativos de este fenómeno, encontrándose únicamente trazas de Si, Ca, S y Cl.
- Como ya se mencionó en el segundo punto, el ducto en su totalidad está fabricado de acero A335 grado 7 lo cual indica que el fenómeno de corrosión observado no se debe a la formación de una celda galvánica producto de la unión de dos materiales distintos. Sin embargo y puesto que el ambiente marino tampoco fue el agente que produjo la corrosión, se especula que sí hubo la formación de una celda galvánica pero con algún otro dispositivo o elemento (quizás estructural) hecho de un material distinto al del ducto y que estaba cerca o en contacto con éste.
- El ensayo no destructivo mediante radiografía industrial por rayos X no presenta dificultades ante los materiales metálicos, es Apto para la detección de fallas internas permitiendo además la caracterización de las mismas. Nos da un registro de la imagen obtenida, ofreciendo la posibilidad de observar defectos internos y la observación de piezas de espesor mayor a los 100 mm. Sin embargo aún en la actualidad, los RX, es un ensayo caro, portátil y peligroso para el operador debido a las radiaciones a las que puede quedar expuesto.

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

4.6 Referencias

1. CORROSIÓN . Revista de divulgación Técnica y Científica de la Asociación Mexicana de Ingenieros en Corrosión A.C. (1991).
2. L.A. De Vedia, Boletín técnico Conarco, No. 2, febrero, pp.2-3. (1988).
3. K. Yamada, in "HSLA Steels-Technology and applications". Ed. M. Korchynsky, ASM, Metals Park/Ohio. pp. 129-140. (1984).
4. NACE. Standards Book, Vol. 2, Eds. H.Buist, E. Feldhusen, B. Fatseas, Houston, TX, USA. (1992).
5. NACE. Corrosion Engineer's, References Book, Ed. Robert Baboian. 3a. eds. (2002).
6. K. Yamada, in "HSLA Steels-Technology and applications". Ed. M. Korchynsky, ASM, Metals Park/Ohio. pp. 129-140. (1984).
7. H. Baumgardt, H. de Boer and F. Heisterkamp. en "Niobium" ed. H. Stuart, TMS of AIME, Warrendale. pp. 883-915. (1984)
8. Takechi, H. In Proc. Vehicle Design and Components-Materials Innovation and A Technology, 5th IAVD Conference .Ed. Dorghman, M.A. (1990).
9. F. Paredes and W.W. Mize, Oil and Gas Journal, vo.I 53. p.p. 99 – 101. (1954).
10. Technicals practices comitee. "NACE glossary of corrosion related terms". Houston (1986).

Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

11. Annual book of ASTM standards. "Standard terminology relating to corrosion and corrosion testing. G15. vol.03.02 (1991).
12. Alberto Valdés, Raymundo Case, Marjorie Ramirez and Augusto Ruiz, Corrosion 98. paper 22.
13. Russel D. Kane and Michael S. Cayard, Materials Performance. pp. 48 – 54, july 1999.
14. ASTM Standard E-1351-01 Production and evaluation of field metallographic replicas.
15. ASTM Standard E 112 – 96 Methods for determining average grain size.
16. ASTM Standard E 407 Practice for microetching metals and alloys.
17. ASM Handbook Volume 9, *Metallography & Microstructures*, Edited by George F. VanderVoort.
18. ASME sección V. (Artículo 2) Examinación Radiográfica (2002).
19. NMX-025-1996 Requisitos para equipo de Radiografía Industrial, Parte 2 (Operación).
19. M.Guerrero, L. Martinez, XI Congreso Internacional de Investigación en Materiales, P-20-14, 2002.

Reporte 1. Aseguramiento de la calidad de los aceros usados para transporte de hidrocarburos amargos, en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

Figura 1. Porción de un tubo con costura longitudinal y región del mismo en donde se debe realizar la extracción de las barras para el ensayo de susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno.

Figura 2. Barras de acero X-52 obtenidas a partir de la tubería bajo estudio. El mismo procedimiento se realizó sobre la muestra X-60.

Figura 3. Diagrama esquemático del aparato utilizado durante la prueba. En él se muestra el arreglo del reactor junto con otros dispositivos auxiliares.

Figura 4. Diagrama esquemático del aparato utilizado durante la prueba. En él se muestra el arreglo del reactor junto con otros dispositivos auxiliares.

Figura 5. Diagrama esquemático en donde se muestra la forma de seccionar las barras para la obtención de los cupones.

Figura 6. Método de medición de las grietas escalonadas en la prueba de susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno.

Figura 7a). Micrografías de las microestructuras, Acero grado XA-52 (100x).

Figura 7b). Acero grado X-60 (100x).

Figura 8a) Micrografía de SEM mostrando una vista general de la microestructura bifásica de ferrita y perlita presente en el acero de la muestra X52.

Figura 8b) Espectro de microanálisis mostrando los elementos constituyentes del acero

Figura 9a) Micrografía de SEM en donde se muestra una amplificación de la región perlítica observada en el acero de la muestra X52.

Figura 9b) Espectro de microanálisis mostrando los elementos presentes en esta región.

Figura 10. Fotografía de microscopía óptica mostrando los efectos (picaduras) de la agresividad del medio de prueba utilizado en los aceros bajo estudio.

Figura 11. Fotografía de microscopía óptica en donde se observan picaduras debido a la agresividad del medio de prueba, así como una grieta. La cual también fue generada por efecto del medio de prueba.

Reporte 2. Detección de la causa que origino la falla de la soldadura de la estructura del helipuerto de la plataforma petrolera costa fuera, Akal Nova.

Figura 12. Clasificación de las diferentes aleaciones de aluminio, en base a los elementos aleantes constituyentes.

Figura 13. Técnicas y tipos de soldadura mediante las cuales se pueden hacer uniones de piezas de aluminio.

Figura 14. Vista transversal de la unión de dos placas de aluminio. El cordón de soldadura presenta en su interior porosidad excesiva.

Figura 15. Vista transversal típica de un cordón de soldadura el cual presenta falla debida al agrietamiento por efecto del proceso de solidificación.

Figura 16. Espectros obtenidos de los microanálisis realizados sobre las muestras bajo estudio.

Figura 17. Diagrama de equilibrio de fases y porción del diagrama en donde se muestra la región de la estabilidad eutéctica correspondiente al sistema Mg – Si.

Figura 18. Macrografía de las piezas fracturadas en donde resaltan aspectos importantes tales como la presencia de poros y de inclusiones.

Figura 19. Espectrogramas obtenidos de los microanálisis realizados sobre diversas partes de las muestras fracturadas: a) Metal base, b) Poro, c) Interior del poro, d) Inclusión.

Reporte 3. Análisis de la falla de un cojinete deslizante proveniente de una flecha para turbina de gas, ubicada en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Bravo.

Figura 20. Clasificación de los cojinetes y tipos de cojinetes de uso más común, a) de casquillo completo o buje, b) de casquillo partido, c) de bolas, d) de rodillos cilíndricos e) de rodillos cónicos y f) de agujas.

Figura 21 Clasificación de los cojinetes de acuerdo al tipo de carga que soportan.

Figura 22. Desembalaje del cojinete del tipo deslizante (3 piezas) en donde los elementos de fricción se encuentran señalados por las flechas.

- Figura 23. Fotografía de los elementos constituyentes del cojinete, en donde se muestran las zonas dañadas, así como las diferentes direcciones de referencia.
- Figura 24. Observación a bajos aumentos del sustrato del cojinete, el cual presenta algunas trazas de elementos tales como: Al, Ni, Si, Mn, sin observar la presencia de elementos aleantes como Cr, V, Co, etc.
- Figura 25. Detalle de la microestructura presente en el sustrato del cojinete bajo estudio en la dirección a) longitudinal y b) transversal.
- Figura 26. Fotografías de microscopia óptica mostrando la interfase sustrato/recubrimiento a) vista panorámica, b) detalle de la interfase.
- Figura 27. Fotografías tomadas sobre la superficie del recubrimiento, y en donde se puede apreciar la morfología tanto de la matriz (zona oscura) como de las partículas de compuesto intermetálico.
- Figura 28. Micrografías y espectro de un microanálisis tomados sobre el recubrimiento del cojinete bajo estudio, a) panorámica del recubrimiento en donde se alcanzan a apreciar rayas entre cruzadas, b) detalle de la zona rayada (mayor aplicación).
- Figura 29. Fotografía de SEM, mostrando las regiones del recubrimiento que presentan daño severo y daño por deformación plástica.
- Figura 30. Se muestra una micrografía a mayor amplificación de una región oscura.
- Figura 31. Presencia de Si.
- Figura 32. Diversas morfologías y espectros de microanálisis de las partículas encontradas en las regiones del recubrimiento (babbit) con daño severo.
- Figura 33. Zona dañada del recubrimiento en donde se aprecia la presencia de partículas de impurezas y sus correspondientes patrones de microanálisis.
- Figura 34. Gráfica de esfuerzo deformación correspondiente al ensayo de tensión realizado sobre el material del sustrato (acero) del cojinete bajo estudio. a) Probeta de tensión fracturada. b) Superficies de fractura de la probeta mostrada en el inciso a.

Reporte 4. Determinación del tipo de corrosión, que presentaba un ducto y transportaba gas amargo en la plataforma petrolera costa fuera, Akal Lima.

Figura 35. Diagrama de las diferentes formas de corrosión.

Figura 36. Corrosión de Metales.

Figura 37. a) Fotografía del ducto mostrando la región del codo en donde se observó la corrosión más severa. b) Zona del codo en donde se aprecia una forma de corrosión generada por el medio ambiente.

Figura 38. Material y técnica utilizado para hacer Replicas Metalográficas en campo.

Figura 39. Secuencia de la metalografía en campo hasta llegar al acabado espejo.

Figura 40. Tubo de Rayos X.

Figura 41. Inspección radiográfica mediante Rayos X.

Figura 41A) . Sistema para toma de radiografías mediante Rayos-x, marca: Pantak Seifert de 300 KV (Direccional). Exposición: 100 KV, 8 mA /min. Película AGFA D4.

Figura 42. Proceso Radiográfico

Figura 43. Espectro de Emisión Óptica.

Figura 44. Radiografías observadas con ayuda del negatoscopio.

Figura 45. Microestructuras obtenidas mediante la técnica de réplicas metalográficas. a) superficie pulida y atacada con Nital I, b), c) y d) granos equiaxiados de ferrita (a) con la presencia de algunos carburos de forma poligonal y algunas inclusiones (i)

Figura 46. Región superficial del tubo observada mediante microscopia electrónica de barrido y su correspondiente patrón de microanálisis obtenido.

Figura 47. Región superficial del tubo observada mediante microscopia electrónica de barrido y su correspondiente patrón de microanálisis obtenido.

Figura 48. Patrones de microanálisis obtenidos en las regiones claras (C) y oscuras (O) al interior del tubo. En ambos se observa la presencia de Carbón y Azufre, y el Oxido de Hierro no es tan marcado como en la sección externa del tubo.

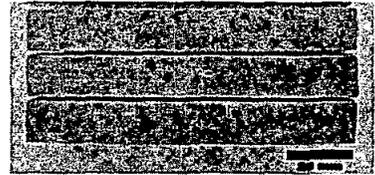
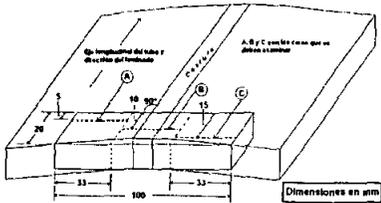


Figura 1. Porción de un tubo con costura longitudinal y región del mismo en donde se debe realizar la extracción de las barras para el ensayo de susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno.

Figura 2. Barras de acero X-52 obtenidas a partir de la tubería bajo estudio. El mismo procedimiento se realizó sobre la muestra X-60.

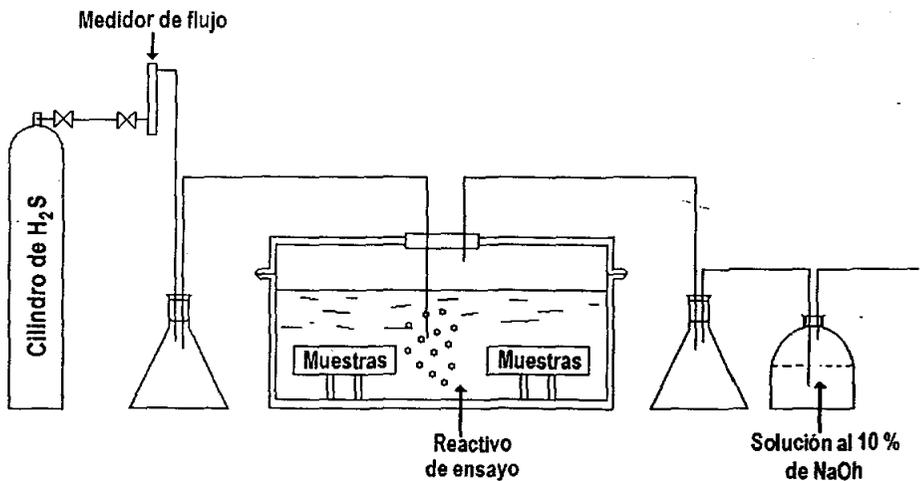


Figura 3. Diagrama esquemático del aparato utilizado durante la prueba. En él se muestra el arreglo del reactor junto con otros dispositivos auxiliares.

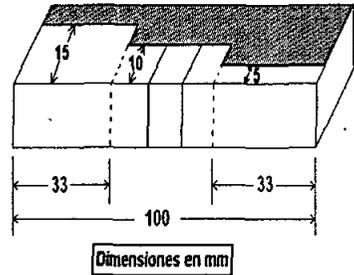
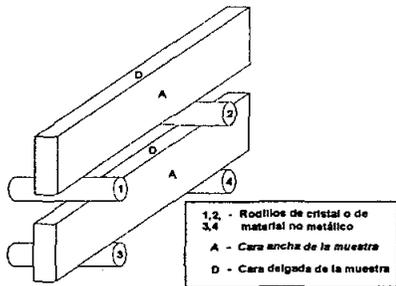


Figura 4. Diagrama esquemático del aparato utilizado durante la prueba. En él se muestra el arreglo del reactor junto con otros dispositivos auxiliares.

Figura 5. Diagrama esquemático en donde se muestra la forma de seccionar las barras para la obtención de los cupones.

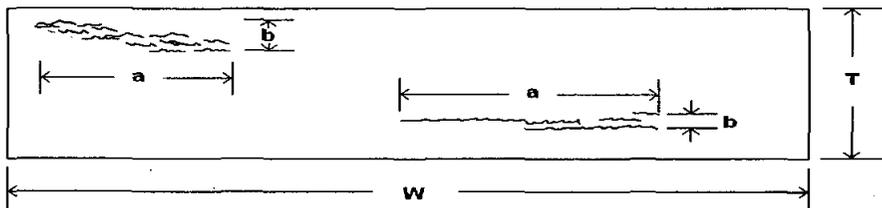


Figura 6. Método de medición de las grietas escalonadas en la prueba de susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrógeno.

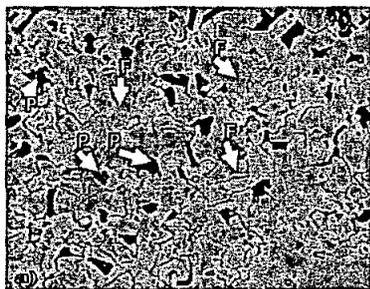


Figura 7a). Micrografías de las microestructuras Observada, acero grado XA-52 (100x).

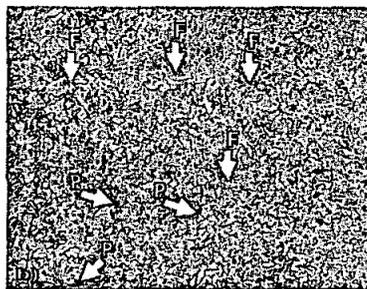


Figura 7b) Micrografías de las microestructuras observada Acero grado X-60 (100x).

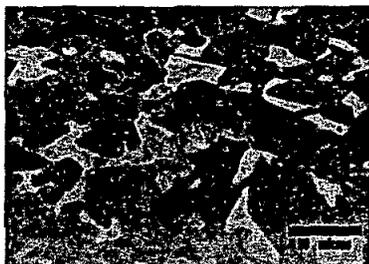


Figura 8a) Micrografía de SEM mostrando una vista general de la microestructura bifásica de ferrita y perlita presente en el acero de la muestra X52

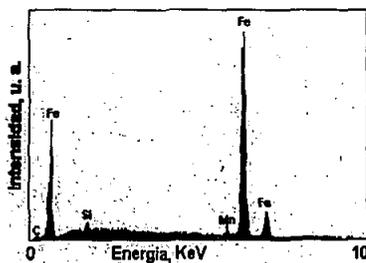
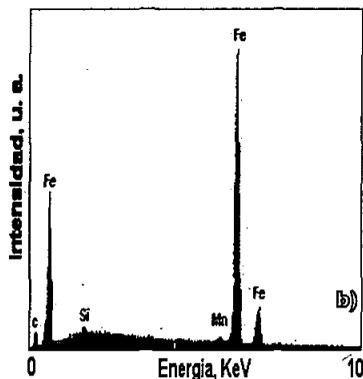


Figura 8b) Espectro de microanálisis mostrando los elementos constituyentes del acero.



Figura 9a) Micrografía de SEM en donde se muestra una amplificación de la región perlítica observada en el acero de la muestra X52.



9b) Espectro de microanálisis mostrando los elementos presentes en esta región.

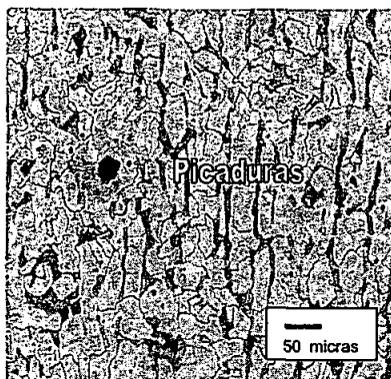


Figura 10. Fotografía de microscopía óptica mostrando los efectos (picaduras) de la agresividad del medio de prueba utilizado en los aceros bajo estudio.

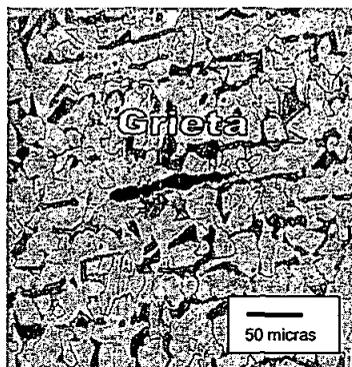


Figura 11. Fotografía de microscopía óptica en donde se observan picaduras debido a la agresividad del medio de prueba, así como una grieta La cual también fue generada por efecto del medio de prueba.

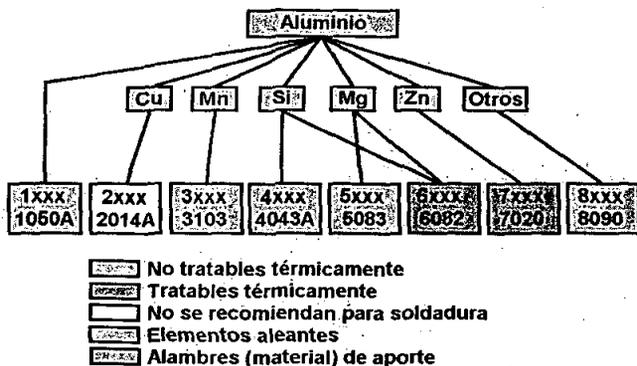


Figura 12. Clasificación de las diferentes aleaciones de aluminio, en base a los elementos aleantes constituyentes.

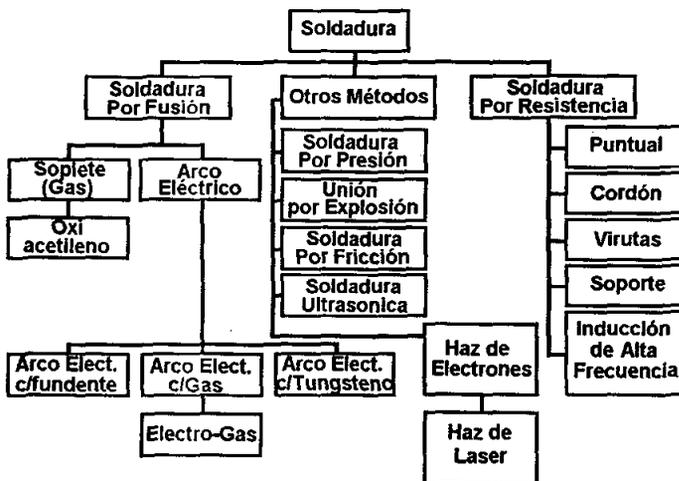


Figura 13. Técnicas y tipos de soldadura mediante las cuales se pueden hacer uniones de piezas de aluminio.

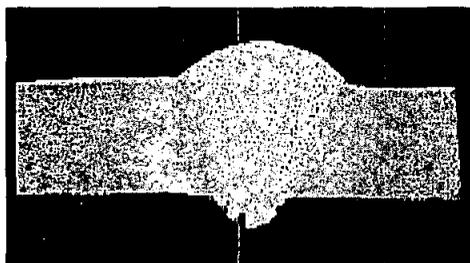


Figura 14. Vista transversal de la unión de dos placas de aluminio. El cordón de soldadura presenta en su interior una porosidad excesiva

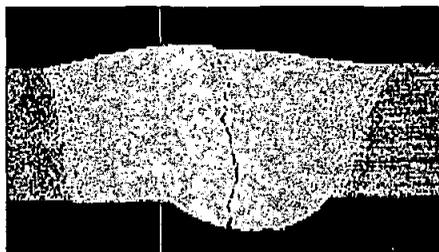


Figura 15. Vista transversal típica de un cordón de soldadura el cual presenta falla debida al agrietamiento por efecto del proceso de solidificación.

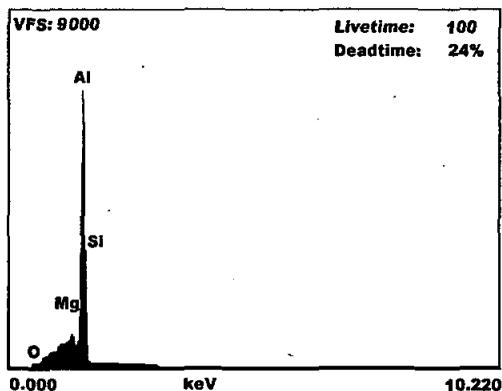
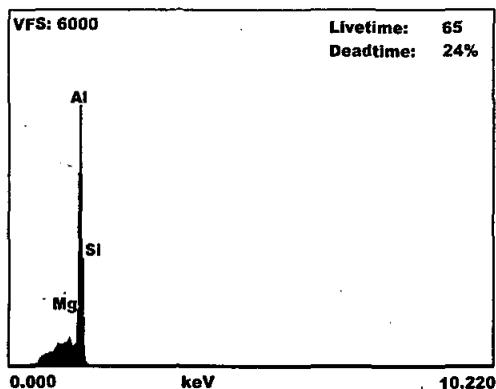


Figura 16. Espectros obtenidos de los microanálisis realizados sobre las muestras bajo estudio

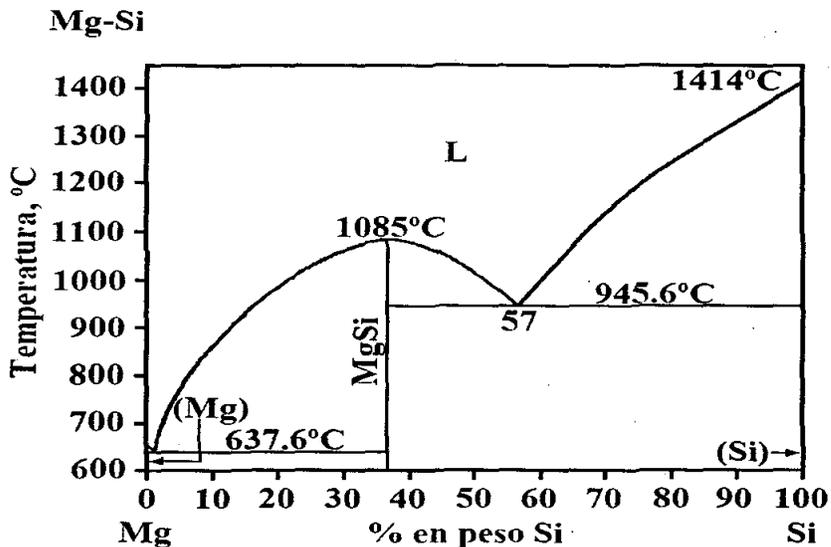


Figura 17. Diagrama de equilibrio de fases y porción del diagrama en donde se muestra la región de estabilidad eutéctica (α +MgSi) correspondiente al sistema Mg-Si.

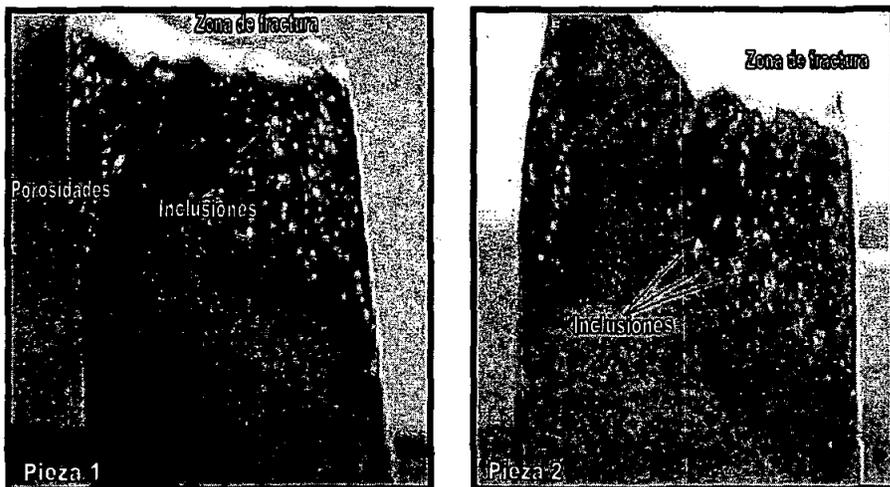


Figura 18. Macrografías de las piezas fracturadas en donde se resaltan aspectos importantes tales como la presencia de poros y de inclusiones.

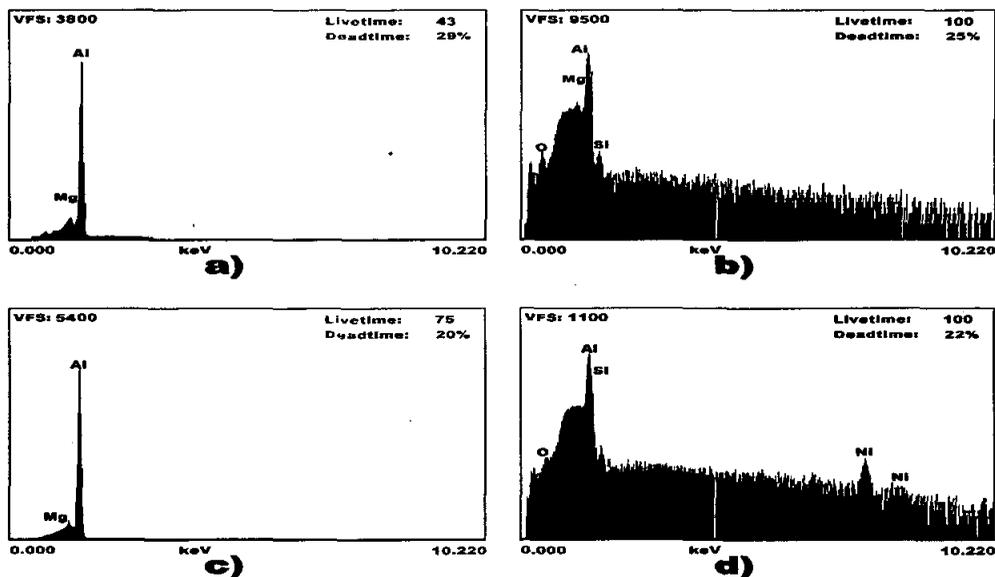


Figura 19. Espectrogramas obtenidos de los microanálisis realizados sobre diversas partes de las muestras fracturadas: a) Metal base, b) poro, c) interior del poro y d) inclusión.

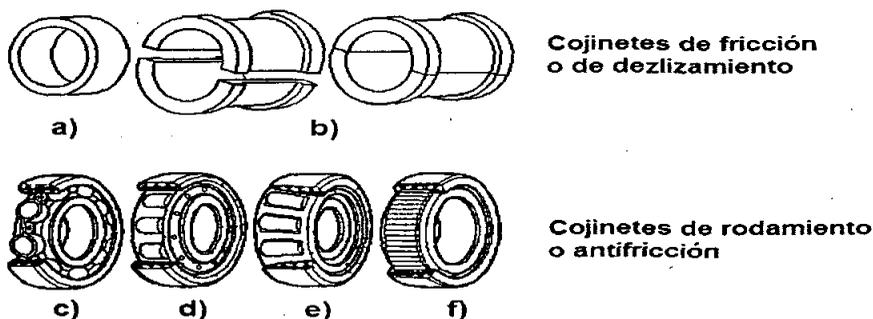


Figura 20. Clasificación de los cojinetes y tipos de cojinetes de uso más común, a) de casquillo completo o buje, b) de casquillo partido, c) de bolas, d) de rodillos cilíndricos, e) de rodillos cónicos y f) de agujas.

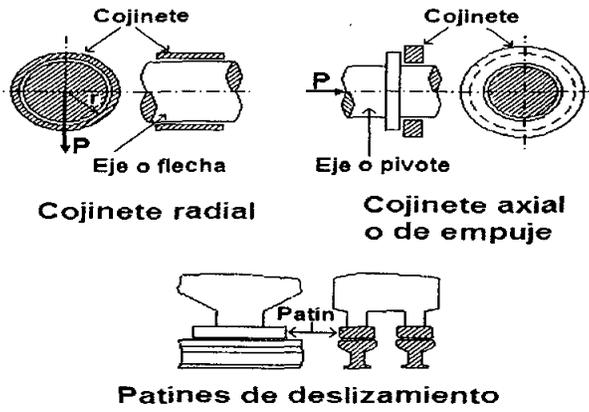


Figura 21. Clasificación de los cojinetes de acuerdo al tipo de carga que soportan.

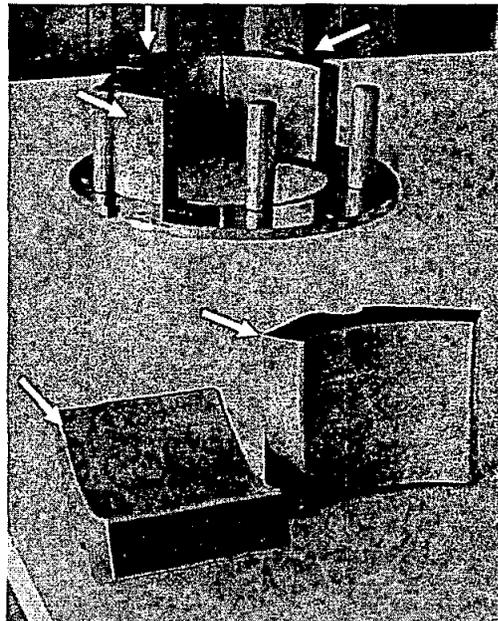


Figura 22. Desensamblaje del cojinete del tipo deslizante (pieza 3), en donde los elementos de fricción se encuentran señalados por las flechas.

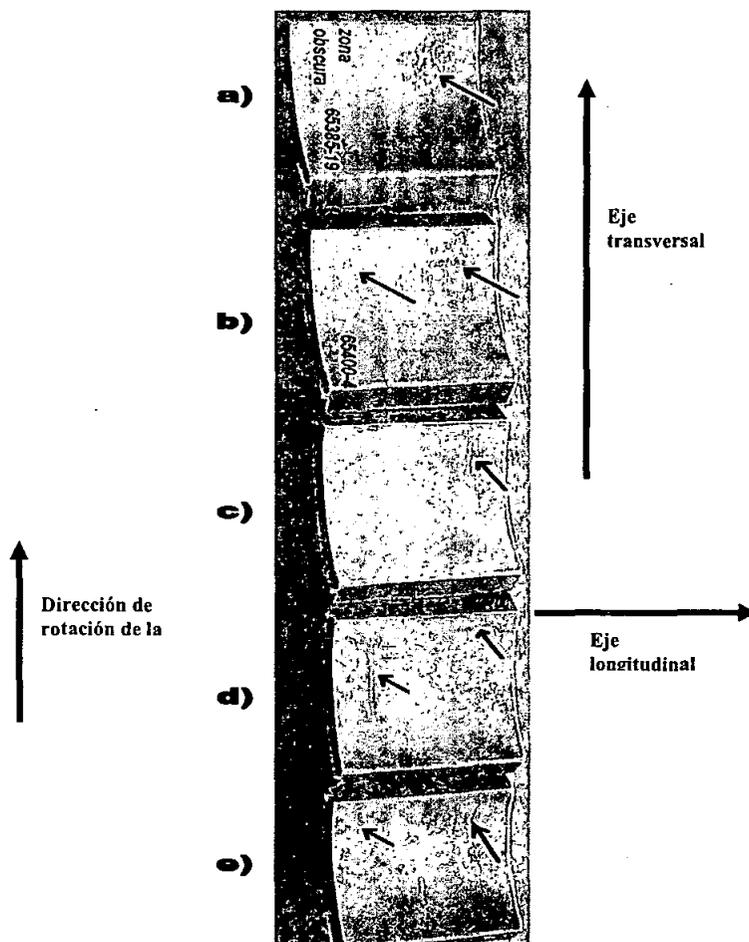


Figura 23. Fotografía de los elementos constituyentes del cojinete, en donde se muestran las zonas dañadas, así como las diferentes direcciones de referencia.

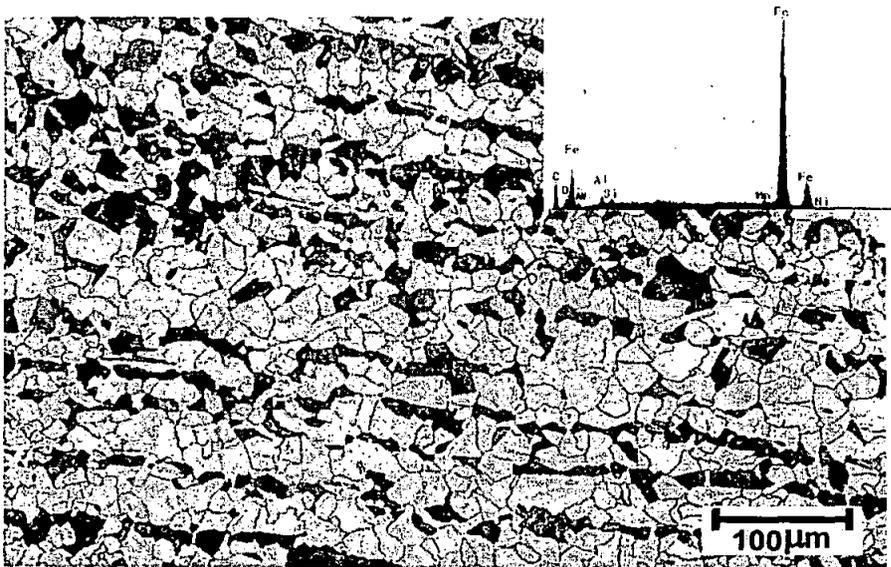


Figura 24. Observación a bajos aumentos, del sustrato del cojinete, el cual presenta algunas trazas de elementos tales como Al, Ni, Si y Mn, sin observarse la presencia de elementos aleantes.

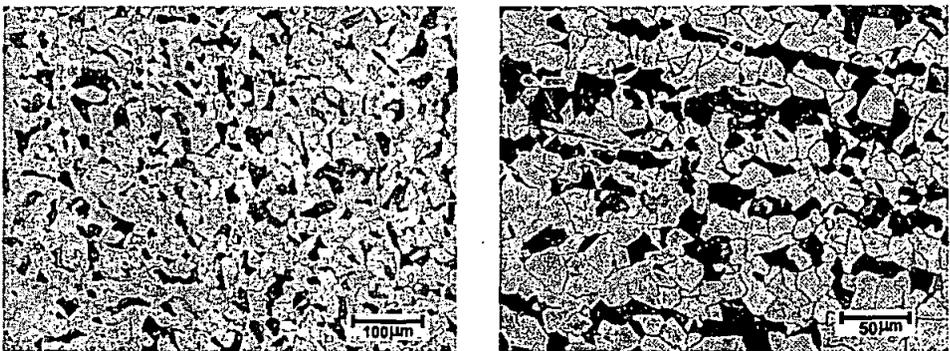


Figura 25. Detalle de la microestructura presente en el del sustrato del cojinete bajo estudio, en la dirección a) longitudinal y b) transversal.

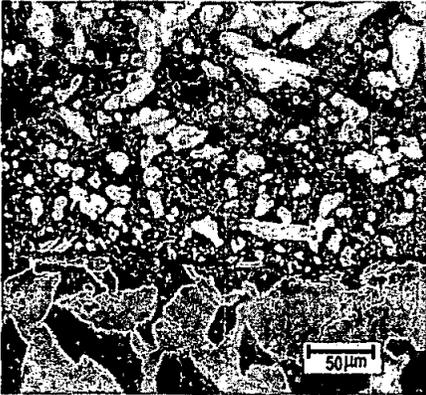


Figura 25. Detalle de la microestructura en el del sustrato del cojinete bajo estudio En la dirección a) longitudinal b) transversal

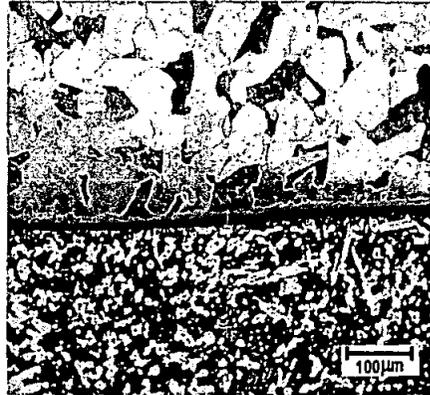


Figura 26. Fotografías de microscopía óptica presente mostrando la interfase sustrato/recubrimiento a) vista panorámica b) detalle de la interfase.

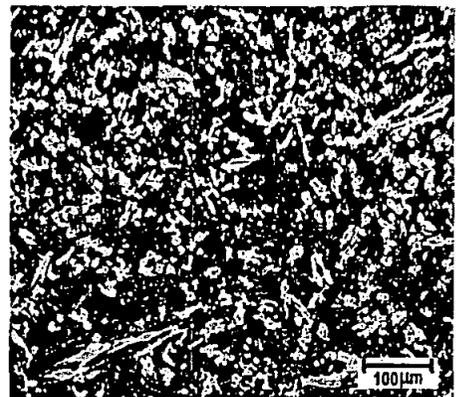
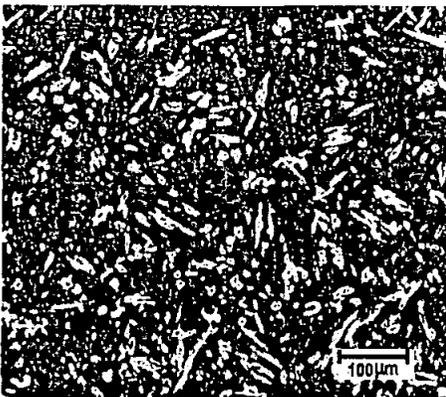


Figura 27. Fotografías tomadas sobre la superficie del recubrimiento, y en donde se puede apreciar la morfología tanto de la matriz (zona oscura) como de las partículas de compuesto intermetálico.

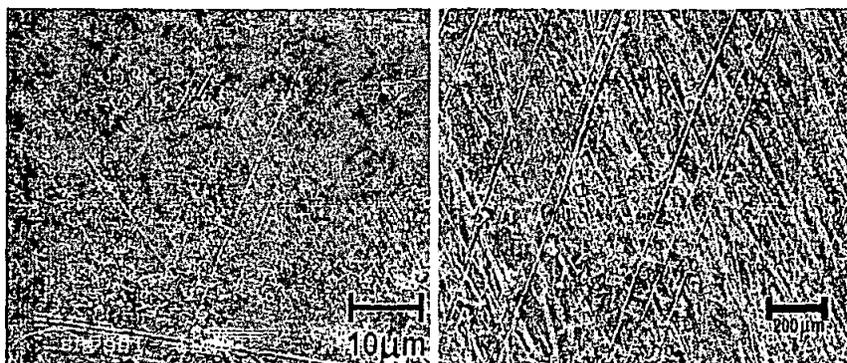


Figura 28. Micrografías y espectro de microanálisis tomados sobre el recubrimiento del cojinete bajo estudio, a) panorámica del recubrimiento en donde se alcanzan a apreciar rayas entrecruzadas, b) detalle de la zona rayada (mayor amplificación).

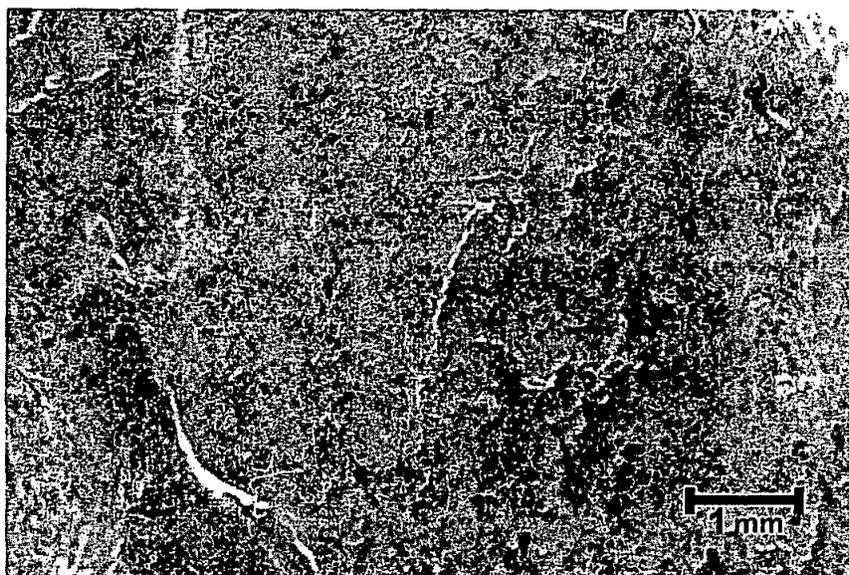


Figura 29. Micrografías de SEM, mostrando las regiones del recubrimiento que presentan daño severo y daño por deformación plástica.

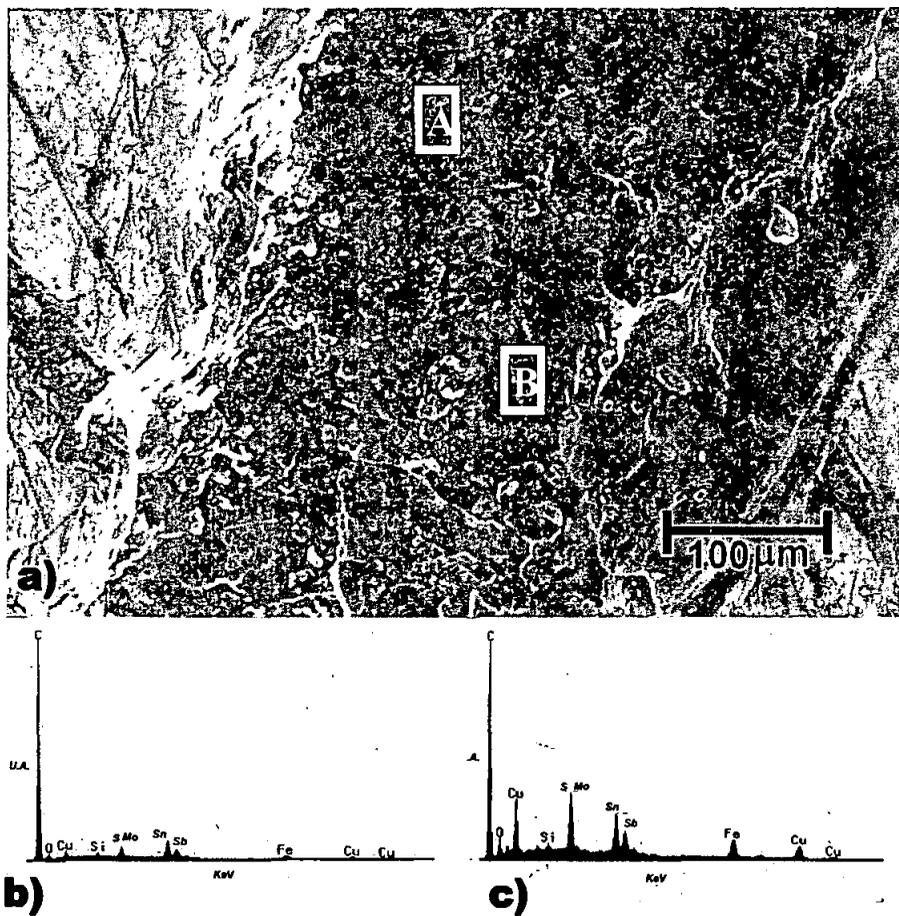


Figura 30. Se muestra una micrografía a mayor amplificación de una región oscura.



Figura 31. Presencia de Si.

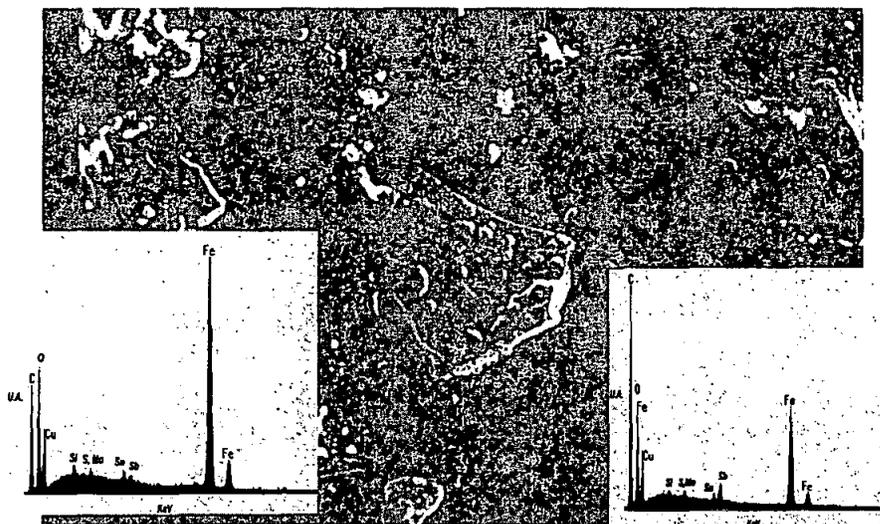


Figura 32. Diversas Morfologías y espectros de microanálisis de las partículas encontradas en las regiones del recubrimiento (babbit) con daño severo.

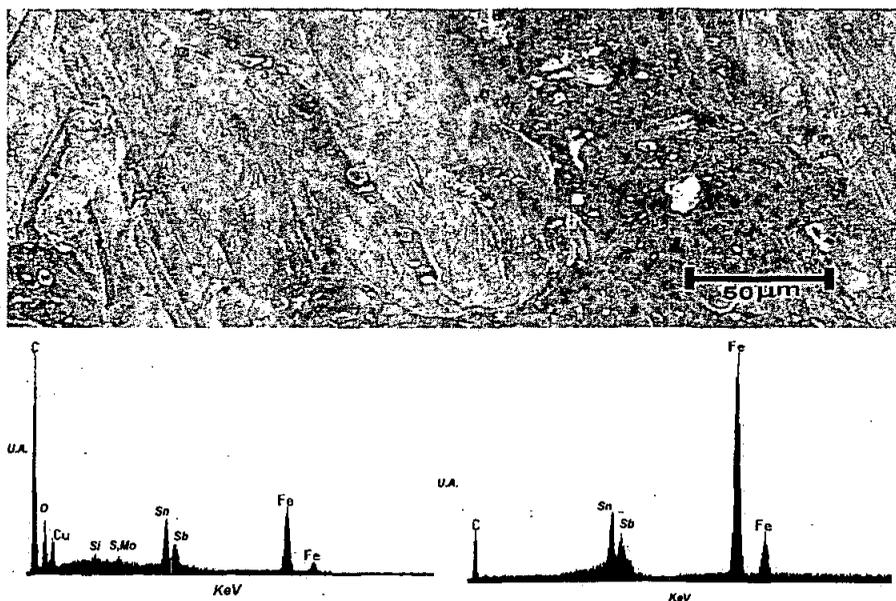


Figura 33. Zona dañada del recubrimiento en donde se aprecia la presencia de partículas impureza y sus correspondientes patrones de microanálisis.

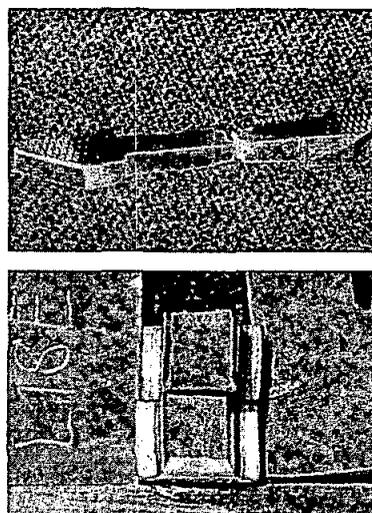
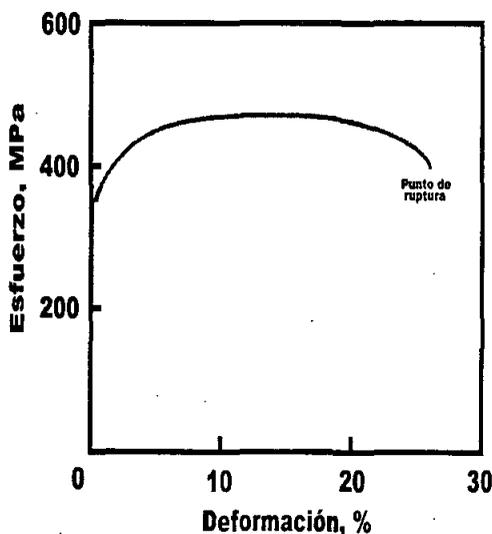


Figura 34. Gráfica de esfuerzo-deformación correspondiente al ensayo de tensión realizado sobre el material del sustrato (acero) del cojinete bajo estudio. a) Probeta de tensión fracturada b) Superficies de fractura de la probeta mostrada en el inciso a).

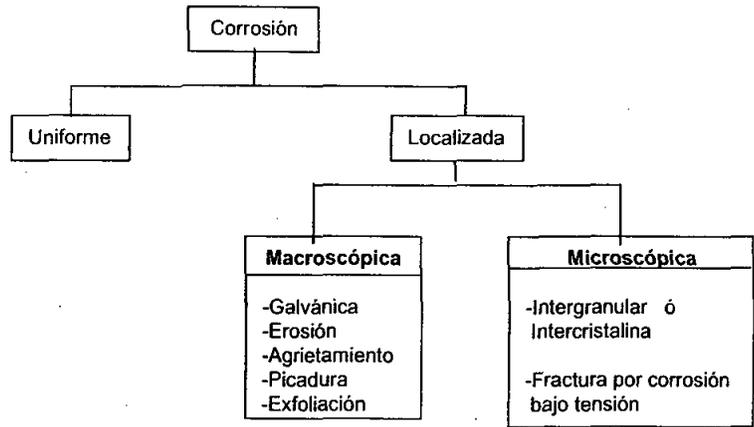


Figura No.35 Las diferentes formas de corrosión

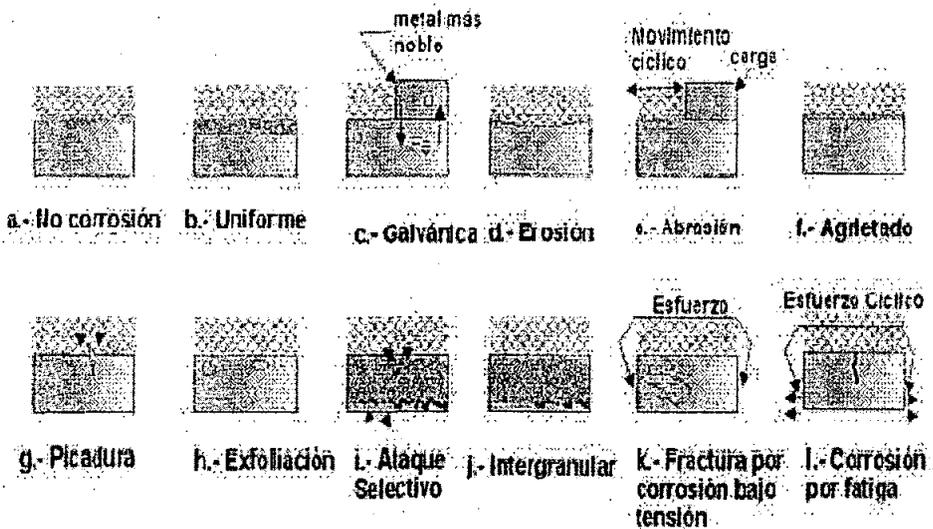


Figura 36. Corrosión de Metales

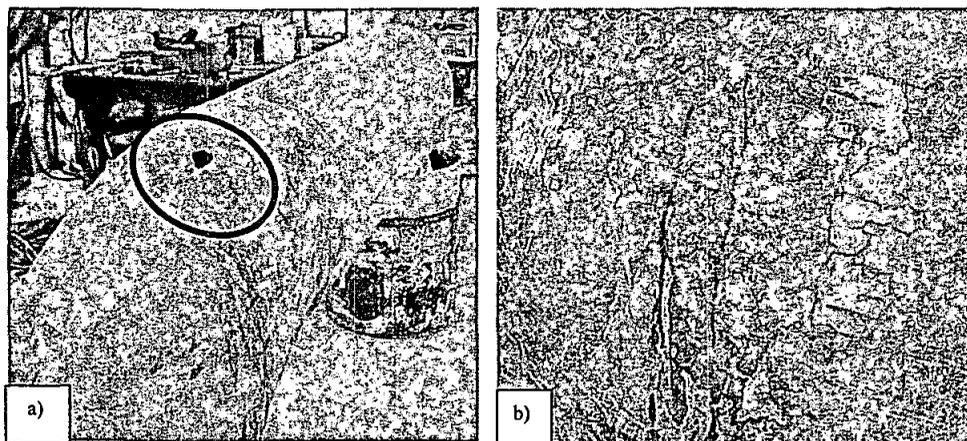


Figura 37 a) Fotografía del spool mostrando la región del codo en donde se observó la corrosión más severa. b) Zona del codo en donde se aprecia una forma de corrosión conocida como exfoliación.

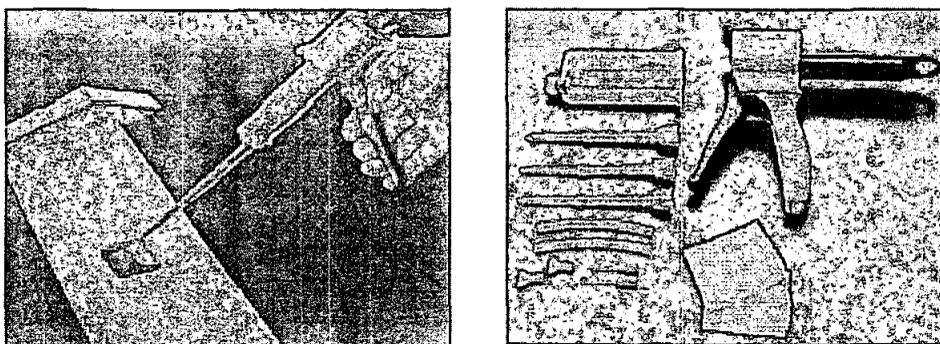


Figura 38. Material y técnica Utilizado para hacer Replicas Metalográficas en Campo.

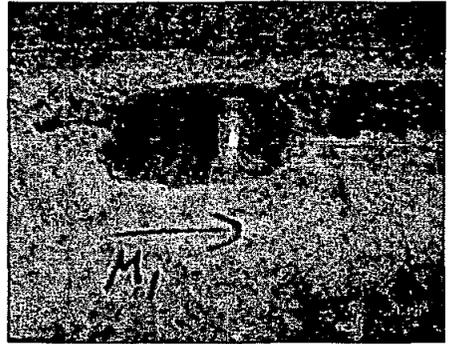


Figura. 39. Secuencia de la metalografía en campo hasta llegar al acabado espejo.

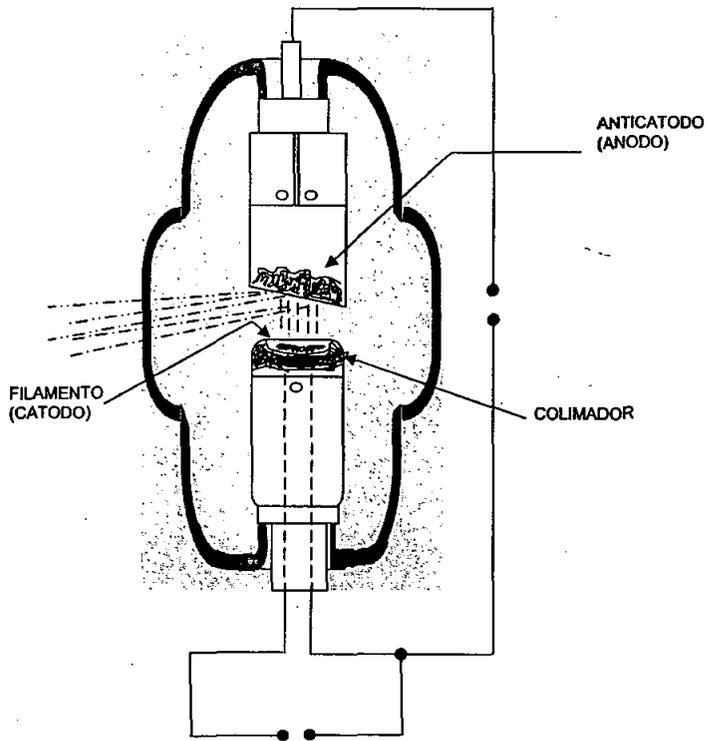


FIG. 40 TUBO DE RAYOS X

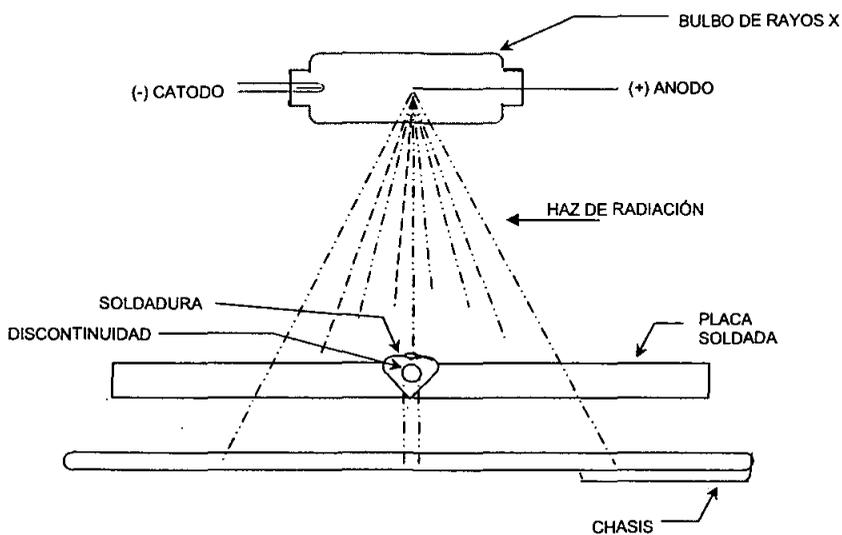


Figura 41. Inspección Radiográfica
Mediante Rayos X

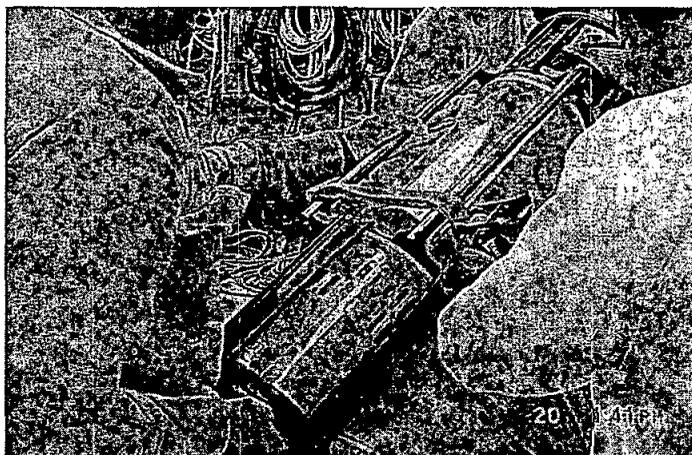
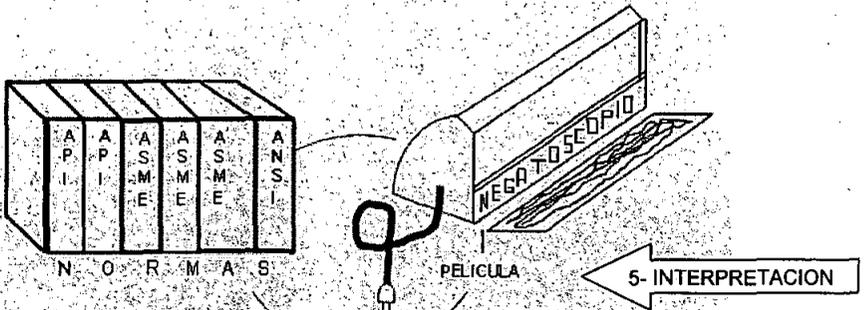
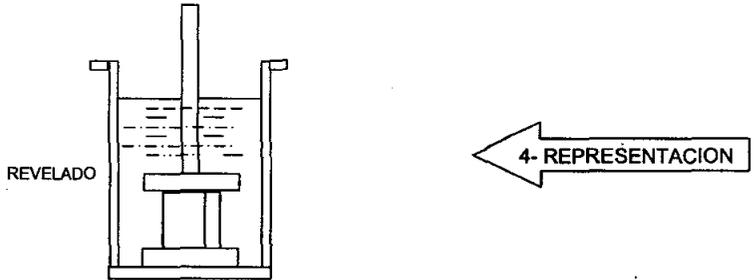
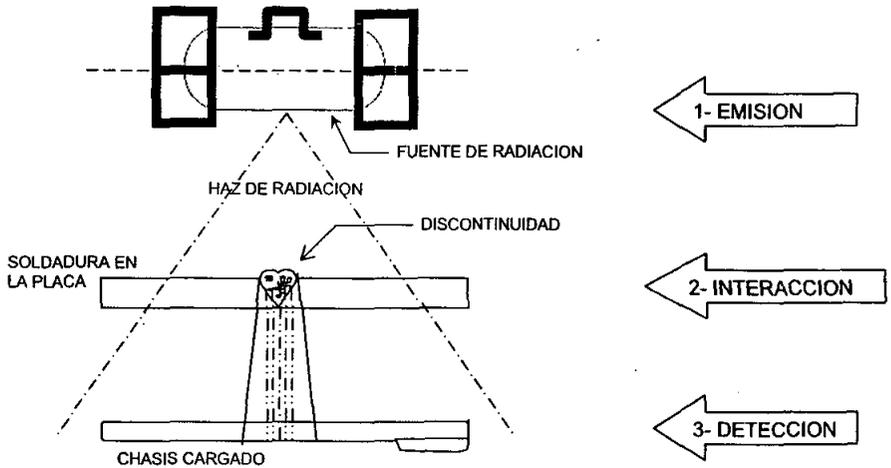


Figura 41 A). Sistema para toma de radiografías mediante Rayos-x, marca: Pantak Seifert de 300 KV (Direccional). Exposición: 100 KV, 8 mA /min. Película AGFA D4

42. PROCESO RADIOGRAFICO



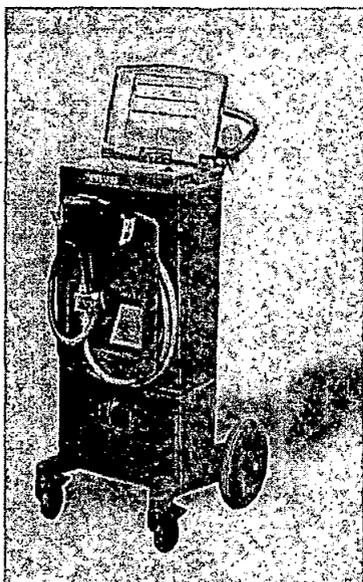


Figura 43. Espectro de Emisión Óptica

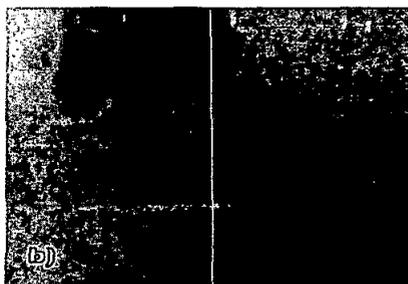
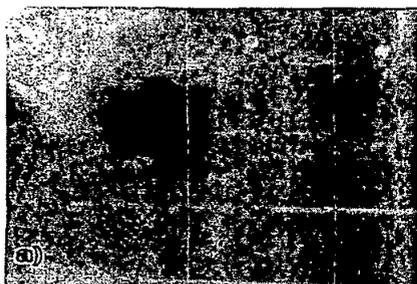


Figura 44. a) Radiografía de la zona corroída del ducto en donde se observa una carencia del material (mancha negra), lo cual produce la formación de una hendidura en la superficie de la muestra. b) la zona más oscura de esta radiografía se debe a la falta de material ocasionada por la corrosión. Con excepción de las zonas antes mencionadas, no se encontró además otro tipo de corrosión. No se encontró ningún tipo de grieta, poro o cualquier otra indicación relevante

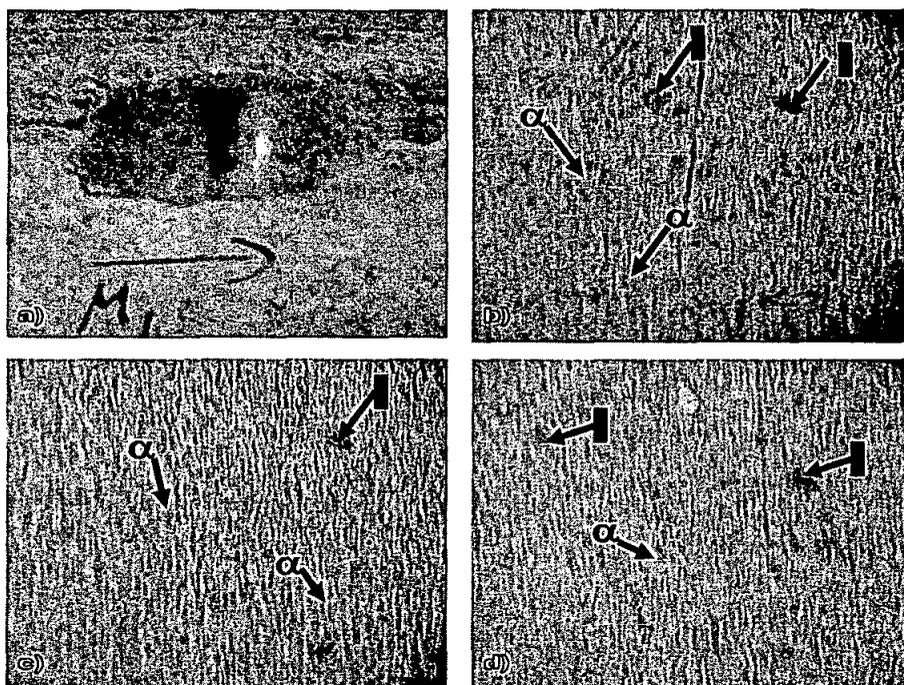


Figura 45. Microestructuras obtenidas mediante la técnica de réplicas metalográficas. a) superficie pulida y atacada con Nital I, b), c) y d) granos equiaxiados de ferrita (α) con la presencia de algunos carburos de forma poligonal y algunas inclusiones (i)

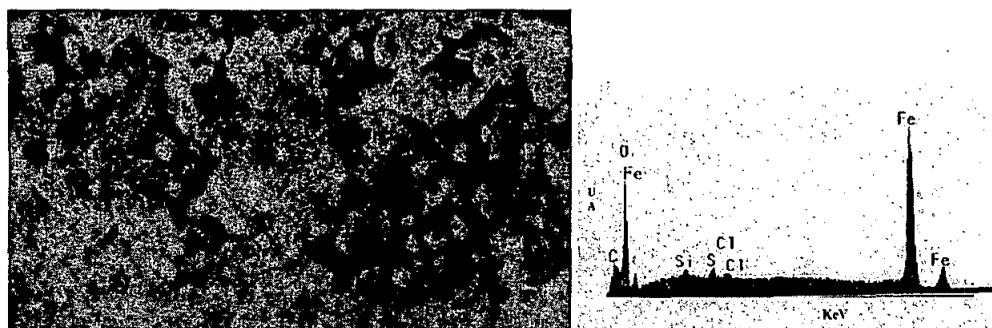


Figura 46. Región superficial del tubo observada mediante microscopía electrónica de barrido y su correspondiente patrón de microanálisis obtenido.

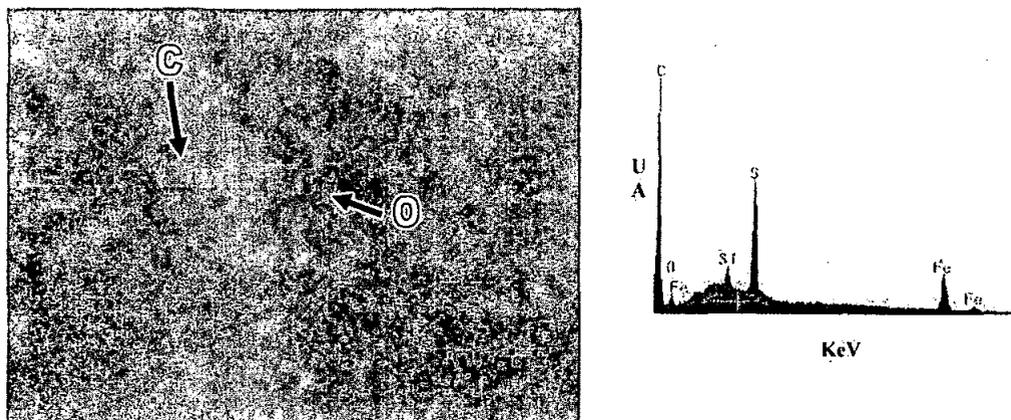


Figura 47. Región superficial del tubo observada mediante microscopía electrónica de barrido y su correspondiente patrón de microanálisis obtenido.

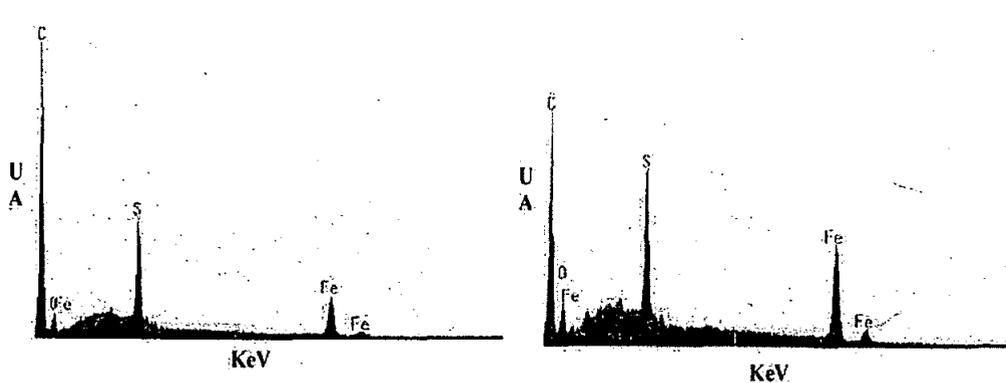


Figura 48. Patrones de microanálisis obtenidos en las regiones claras (C) y oscuras (O) al interior del tubo. En ambos se observa la presencia de Carbón y Azufre, y el Oxido de Hierro no es tan marcado como en la sección externa del tubo.

