

EL ANALISIS DE FALLA MECANICA EN PIEZAS. EL CASO: UN RESORTE FUERA DE SERVICIO

**Instituto Mexicano del Transporte
Secretaría de Comunicaciones y Transportes**

**Publicación Técnica No. 11
Querétaro, Qro. 1992**

**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE
SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**

**El análisis de falla mecánica en
piezas. El caso: un resorte fuera de
servicio**

Publicación Técnica No. 11
Querétaro Qro.
1992

EL ANALISIS DE FALLA MECANICA EN PIEZAS

EL CASO: UN RESORTE FUERA DE SERVICIO

RESUMEN

En este trabajo se presenta la metodología, para el análisis de falla en elementos mecánicos tomando en cuenta las características del modelo, las condiciones de la falla y las especificaciones del diseño.

Además se presenta un ejemplo relacionado con un resorte, al cual se le hicieron pruebas de macrografía, metalografía, fractografía, microanálisis y pruebas de dureza.

RECONOCIMIENTOS

Los Doctores Miguel Martínez Madrid y Alejandro Lozano Guzmán elaboraron el presente trabajo. Se agradece todo el apoyo brindado por la Facultad de Química de la U.N.A.M.

CONTENIDO

I.	INTRODUCCION	1
II.	ANALISIS DE FALLA	3
III.	METODOLOGIA GENERAL	4
IV.	MODOS DE FALLA	5
V.	FALLAS POR DISEÑO INADECUADO	6
VI.	EL CASO: UN RESORTE FUERA DE SERVICIO	12
VI.1	DESCRIPCION DE LA MUESTRA	12
VI.2	PRUEBAS REALIZADAS	13
VI.3	COMENTARIOS A LOS RESULTADOS	18
VI.4	CONCLUSIONES DEL ANALISIS	19
VII.	BIBLIOGRAFIA	20

EL ANALISIS DE FALLA MECANICA EN PIEZAS

EL CASO: UN RESORTE FUERA DE SERVICIO

I. INTRODUCCION

Fallas catastróficas en componentes metálicos han sido de importancia notoria y de publicidad sobrada, particularmente cuando existe la pérdida de vida humanas. Un caso típico que ya forma parte de nuestros anales históricos es el hundimiento del Titanic a principios de este siglo. El diseño original del barco no contempló, por desconocimiento, que la placa de acero con la que se construyó el casco se comportaría frágilmente (poca resistencia al impacto) a temperaturas inferiores a la ambiental. Así cuando el Titanic impacta una masa de hielo a una velocidad inclusive inferior a la ordinaria, el casco no resiste dicha carga súbita y se fractura frágilmente.

Una característica típica de una fractura frágil es la poca o nula deformación plástica que experimenta el metal y principalmente, la alta velocidad de propagación de las grietas al momento de sucederse la falla. Obviamente que si el Titanic hubiese impactado una masa equivalente de sólido a temperaturas tropicales, lo extremo que hubiese sucedido es que el barco hubiera tenido que ser "hojalateado y pintado" al término de su travesía. En forma análoga tenemos que barcos de carga en la primera conflagración mundial, se partían prácticamente en dos en aguas árticas, por el sólo oleaje normal en el mar. La causa fue la misma que en el caso del Titanic: comportamiento frágil de las placas de acero.

Otro caso muy famoso y reciente, es el desastre del transbordador espacial Challenger en 1985. La falla de los anillos selladores del sistema de almacenamiento de hidrógeno se debió a una fatiga acelerada de los mismos.

Los diseñadores modernos de equipos se fundamentan en desgracias ajenas pues siempre basan sus elecciones de materiales en las fallas pasadas. De esta forma, estos técnicos diseñan sus equipos o componentes para que no fallen prematuramente y consecuentemente que operen con seguridad, pero sólo bajo condiciones conocidas.

Cuando el diseño de equipo moderno involucra la operación en ambientes severos, el personal de diseño tiene que confrontar muchos problemas complejos al seleccionar y evaluar los materiales, su procesamiento, cargas esperadas y su forma, así como la distribución de los esfuerzos. Componentes en turbinas, reactores, misiles, submarinos, automóviles y en equipos criogénicos pueden estar sujetos a condiciones operativas tales como temperaturas extremas (altas o criogénicas), líquidos o ambientes corrosivos, alto vacío, radiación, fricción, torsión extrema, impactos súbitos y abrasión entre otros. La selección de materiales mandatoriamente puede entonces confinarse a un grupo pequeño de metales de resistencia química extraordinaria; sin embargo la decisión final de selección debe incluir estudios de resistencia mecánica, al desgaste, límites de fatiga y tenacidad antes de efectuar la selección para la conclusión del diseño.

El análisis detallado de fallas previas a las encontradas durante el desarrollo de un prototipo, viene a formar parte de la información vital que el diseñador requiere antes de generar la fabricación en serie de un producto confiable.

Conforme a lo expuesto y gracias al Titanic, los barcos actuales ya no se hunden por su "partición casi total" y los submarinos circulan actualmente por las zonas virtualmente congeladas por períodos superiores a los 6 meses. Inclusive existen barcos especiales de choque "rompe hielos" los cuales "abren brecha" a los transbordadores para su paso libre entre los hielos de los polos.

Los materiales modernos empleados en la aeronáutica son capaces de resistir temperaturas superiores a los 1000° C sin un detrimento sensible en su resistencia mecánica y sin necesidad de contar con secciones que dimensionalmente sean exageradas.

La experiencia obtenida en el diseño de piezas en la actualidad tiene entonces varios fundamentos:

- Eventos previos de materiales no fallados.
- Información recabada por los análisis de falla en componentes análogos.
- Principios químicos, físicos, mecánicos, etc., de operación y de los materiales.

II. ANALISIS DE FALLA

El análisis de falla no es otra cosa sino, el efectuar un diagnóstico del porqué un material ya no puede prestar más el servicio para el que fue destinado.

Esta actividad que es análoga a la de un detective criminalístico, consiste en que al presentarse una falla, se recaba toda la información técnica necesaria sobre las condiciones de operación (el detective investiga los hábitos que tenía la víctima), los detalles operativos mismos de la pieza antes de fallar (el detective establece las actividades de la víctima justo antes del crimen) y las consecuencias que se generan por la falla. Una vez establecida esta información, el analista toma fotografías de la pieza en el lugar "del crimen" y recaba muestras representativas de la misma si ésta no es posible transportarla al laboratorio, o en su lugar traslada la pieza completa para su estudio, lo que sería equivalente a un análisis forense. Nuestro técnico efectúa pruebas específicas tales como análisis químicos, metalográficos, fractográficos, a fin de tipificar el material y el tipo de fractura. Con esta información "califica" al componente y establece si el material encontrado estaba o no "apto" para operar bajo las condiciones encontradas. Una vez establecida esta aptitud y dependiendo del derrotero que vaya teniendo la información recabada, se procede a efectuar estudios de simulación de los hechos para comprobar exactamente como sucedió y los móviles de la falla.

Nuestro técnico a estas alturas ya debe haber establecido al menos 2 hipótesis sobre la causa de la falla. Su misión ahora será el poder validar una de sus varias hipótesis para así esclarecer la culpabilidad y responsabilidad de la falla: el fabricante, (diseñador), el material, el proceso o el operador.

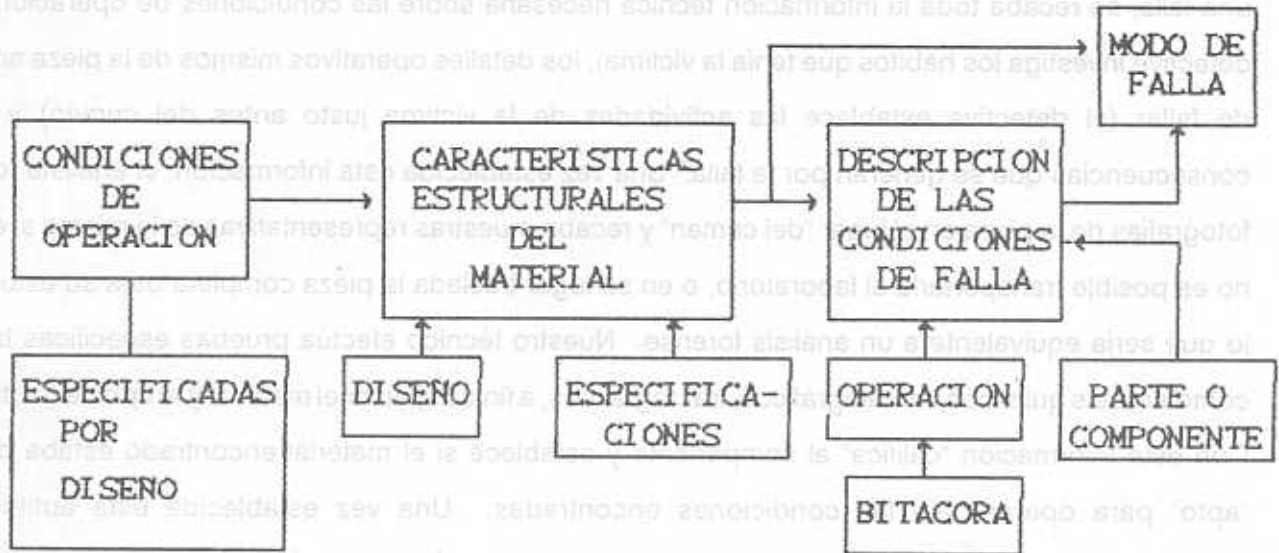
Desde el punto de vista tecnológico se tiene que el técnico debería manejar $n-1$ parámetros con opciones diversas para resultar con sólo un diagnóstico. La labor, como se puede apreciar, es mayúscula y requiere de un vasto conocimiento teórico con una dosis equivalente práctica. El elaborar un análisis de falla de una pieza sin fundamento cierto o incorrecto implica que la generación consecuente en producción de esas piezas seguirán fallando continuamente.

Como podrá dilucidarse fácilmente, la finalidad que se persigue con un análisis de esta naturaleza es eliminar, desterrar y evitar que las fallas que se sigan presentando en los componentes involucrados en un proceso dado.

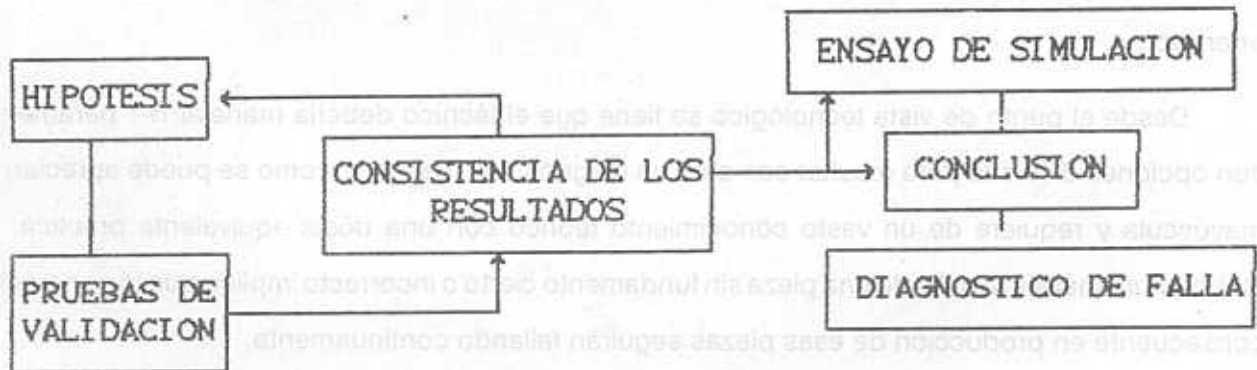
III. METODOLOGIA GENERAL

II. ANALISIS DE FALLA

Tomando como referencia que el objetivo de un análisis de falla es dictaminar la causa de la misma para así establecer responsabilidades y con acciones correctivas resolver el problema, el análisis se debe centrar en el estudio de la información que se recabe en:



Una vez recabada y procesada esta información, se procede entonces de acuerdo al siguiente esquema:



Entre las características estructurales del material y las condiciones de falla se debe establecer la correcta categorización de lo que se llama el modo de falla. En el caso del presente trabajo y a manera ilustrativa, se describen los modos de falla frecuentes en partes o componentes de equipo mecánico.

IV. MODOS DE FALLA

Por falla se puede entender que un componente o un miembro de un equipo no puede cumplir más con su función original de una manera satisfactoria, segura y confiable. La falla ocurre usualmente en forma de:

- a) Fractura
- b) Deformación excesiva
- c) Deterioro

En general las fallas en servicio pueden presentarse por un número ilimitado de causas. Para el equipo mecánico estas pueden dividirse genéricamente en tres categorías.

- 1) Diseño inadecuado. Se puede incluir: esquinas rectas y filosas o zonas con alta concentración de esfuerzos, sujeciones impropias, material erróneo o tratamiento térmico inadecuado; condiciones de operación no previstas y por un análisis de esfuerzos impreciso.
- 2) Fabricación y Procesamiento. Un porcentaje considerable de fallas (50%) se pueden deber a factores metalúrgicos como grietas de temple; tratamiento térmico impropio; defectos de forja, fundición, laminado, etc; inclusiones no metálicas o suciedad excesiva del metal; deformación en frío excesiva y crecimiento anormal de grano. La otra mitad pueden deberse a desalineamientos; defectos de soldadura; maquinado impreciso o ensamble pobre; grietas por desbaste; enderezado en frío excesivo; etc.
- 3) Deterioro ambiental y por servicio. Estas pueden abarcar sobrecargas, ataque químico, desgaste por abrasión, corrosión, difusión y mantenimiento ineficiente entre otras.

El mecanismo de falla usualmente es controlado por una serie combinada de los factores citados y su correcta consideración permitirá establecer un diagnóstico viable. Por ejemplo la

relación entre la carga y los "esfuerzos pico" no son lineales en los casos donde se tienen juntas remachadas en las alas de aeronaves. Así, una falla por fatiga del ala de un avión, que si bien es una falla del material, depende mucho más del diseño y fabricación de la aeronave, que sólo de la elección de la aleación. La prevención de la falla puede lograrse con pequeños cambios de diseño y fabricación, mientras que la selección de una material novedoso o distinto podrá resultar en la multiplicación tanto de fallas similares como de pérdida económica.

V. FALLAS POR DISEÑO INADECUADO

Estas fallas por consideraciones de diseño son el resultado de errores o incompetencia de los diseñadores.

Por ejemplo, en la figura 1, se muestra una falla por fatiga a la flexión, donde un filete agudo interactuó con otro barreno también con cantos agudos generando una alta concentración de esfuerzos y su multiplicación.

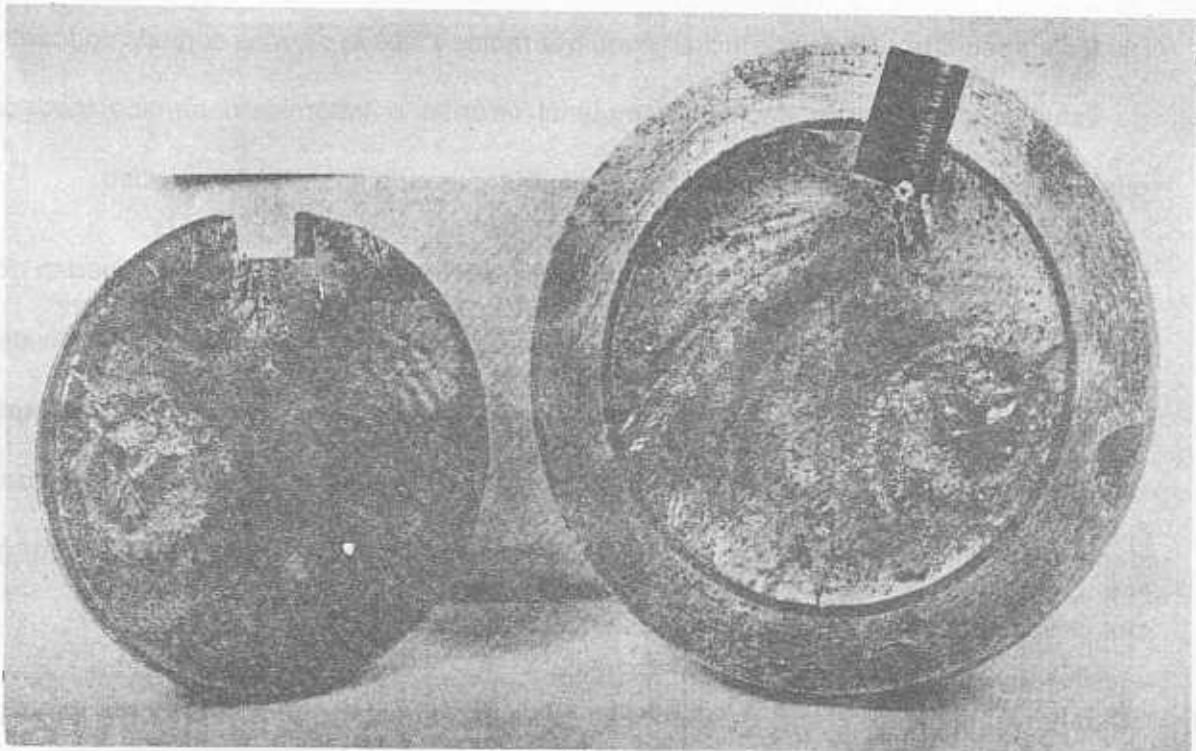


Figura 1. La presencia de una extensiva grieta por fatiga (que creció antes de la fractura frágil final) en una zona "descentrada" claramente indica que la pieza estuvo sujeta a pequeños esfuerzos de doblez durante su servicio.

Se pueden considerar a las variables de procesamiento y fabricación como los factores de mayor importancia en la generación de defectos y cambios metalúrgicos que se generan en la estructura del metal. Cuando los defectos alcanzan un tamaño crítico, su contribución a la falla potencial en forma de fractura frágil o por fatiga es de importancia extrema.

En la figura 2, se muestra una falla producto de defectos de fabricación de tamaño crítico que generó una fractura prematura.

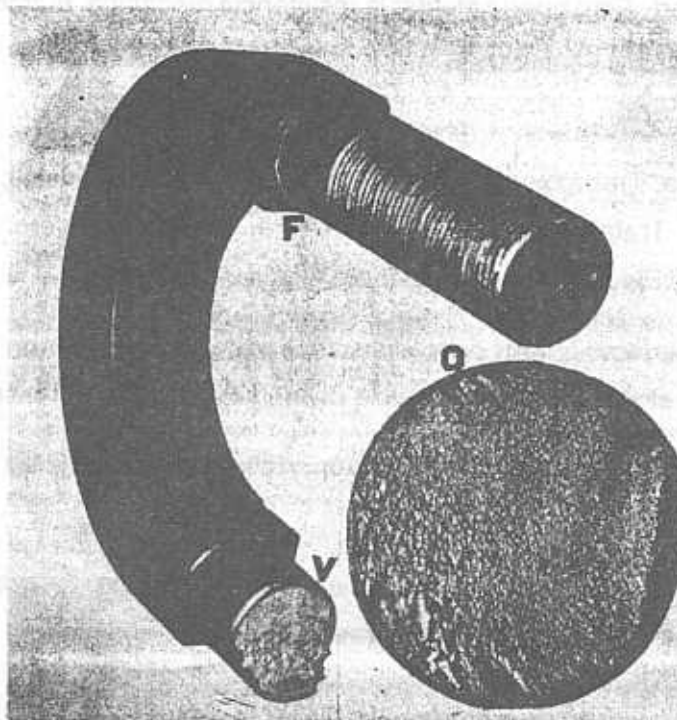


Figura 2. Esta brida de acero SAE 4340 se fracturó con un esfuerzo de sólo 30,000 psi. La fractura se inició en el punto "F", pero la del punto "V" resultó de una carga excéntrica posterior a la falla inicial. El área oscurecida en la sección transversal cerca de "O" contenía despositos o escamas de óxidos ferrosos, lo cual es claramente indicativo de la formación de una grieta durante la fabricación o tratamiento térmico de la brida, lo que causó la fractura frágil durante la aplicación de una pequeña carga estática.

Como se detalla en la Tabla No. 1, cada operación de fabricación pueda inducir esfuerzos residuales, modificar las propiedades mecánicas por trabajado excesivo en frío o desarrollar una multitud de otros efectos localizados tales como microagrietamientos, inclusiones no metálicas, porosidad, fragilización por oclusión de hidrógeno, etc., que pueden ser categorizados como defectos.

**TABLA No. 1. CLASIFICACION DE FALLAS POR DEFECTOS DE FABRICACION
Y SUS TIPOS DE DETERIORO**

Cada una de las operaciones de procesamiento puede alterar todas o parte de las propiedades mecánicas de la pieza, resultando con esto la generación de micro o macrogrietas, o la disminución localizada de la ductilidad. Esto puede afectar la resistencia mecánica, el límite de fatiga, la tenacidad y resistencia a la corrosión de las piezas.

1.- Procesos y Fabricación

- 1.1 Mecánica: Trabajo en frío, estiramiento, doblez, maquinado, pulido, lijado, etc.
- 1.2 Térmica: Tratamiento térmico, soldadura, solidificación, etc.
- 1.3 Química: Electrodeposición, limpieza con ácidos, etc.

2.- Deterioro: Cada ambiente u operación específica requiere de un análisis exclusivo de la acción estructural significativa que limita la utilidad de la pieza en el servicio pretendido.

- 2.1 Mecánica: Abrasión, cavitación, desgaste, crecimiento de defectos por cargas cíclicas, lentas o súbitas, fatiga, etc.
- 2.2 Química: Estabilidad y actividad dependiente de la severidad del medio y de su temperatura. Oxidación, ataque intergranular, difusión, aleación de elementos extraños, carburización, envejecimiento, etc.
- 2.3 Térmica: Cambios metalúrgicos, crecimiento de grano, fusión, etc., dependientes de la temperatura de transformación de fase y la estabilidad de los microconstituyentes con respecto al tiempo y temperatura para el servicio prescrito así como agrietamientos térmicos.
- 2.4 Corrosión: Temperatura, tiempo, esforzamiento simultáneo con el medio, frecuencia de la interacción ambiente-metal, corrosión bajo esfuerzo, corrosión-fatiga, etc.
- 2.5 Daño por Radiación: Influenciado por el tiempo, temperatura e intensidad de la dosificación: así como fragilización.

En muchas aplicaciones, pequeños defectos pueden desarrollarse en críticos, afectando drásticamente la resistencia a la fractura de elementos o piezas (tenacidad). Contrariamente, algunos defectos no afectan materialmente al rendimiento del componente. Para un estado de esfuerzo dado, un tamaño crítico de defecto en el metal estimulará la fractura súbita y frágil. La

presencia concentrada de defectos a otro esfuerzo de menor magnitud, orillará a la generación de agrietamientos con alta deformación plástica, fractura dúctil y menor velocidad de crecimiento de las grietas. (Figura 3).

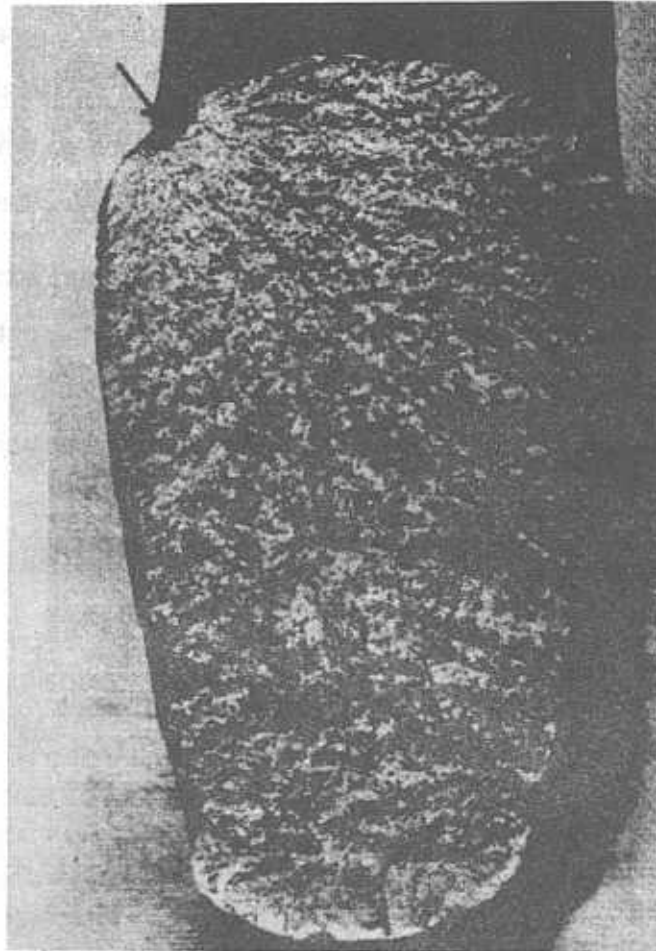


Figura 3. Fractura tipo dúctil de un brazo de una grúa que se inició en un defecto preexistente (ver flecha). Dobleces pequeños de material formado durante el rolado originaron microgrietas diversas las cuales crecieron posteriormente produciendo una fractura de crecimiento lento.

Las fallas debidas al deterioro por el medio donde operan, se presentan en un número indeterminado de formas. En algunos casos, vibraciones no previstas o sobrecargas pueden orillar a fallas prematuras; en otras, cargas cíclicas excesivas cercanas a los límites ingenieriles de diseño pueden conllevar a fallas por fatiga acelerada. Muchas condiciones de servicio abarcan velocidades muy rápidas de calentamiento o enfriamiento, agentes químicos severos, etc.

El deterioro de piezas o componentes durante su servicio en ambientes agresivos, puede generar muchos tipos de desintegración superficial de las mismas; la actividad química o la difusión metálica normalmente afectan la estabilidad del componente. Las piezas siempre están influenciadas por el tiempo, la temperatura y principalmente por la dosificación del medio ambiente y agentes químicos con su operación mecánica. Así se pueden presentar fallas del tipo corrosión bajo esfuerzo o fatiga (Figura 4) cuando aceros inoxidable del tipo 304 están bajo pequeñas cargas de tensión (por ejemplo esfuerzos residuales) o esfuerzos cíclicos en ambientes ricos en iones de cloro (por ejemplo ambientes marinos donde existen altas concentraciones de sal).

En virtud que los factores descritos en la tabla No. 1, tienen unas interacciones harto complejas, para poder desarrollar análisis de falla efectivos es necesario el llevar al cabo un trabajo detectivesco cuidadoso, donde se incluya un exámen meticuloso de la pieza fallada, información y antecedentes sobre composición química, fabricación, rendimiento histórico y condiciones de operación, para su posterior correlación.

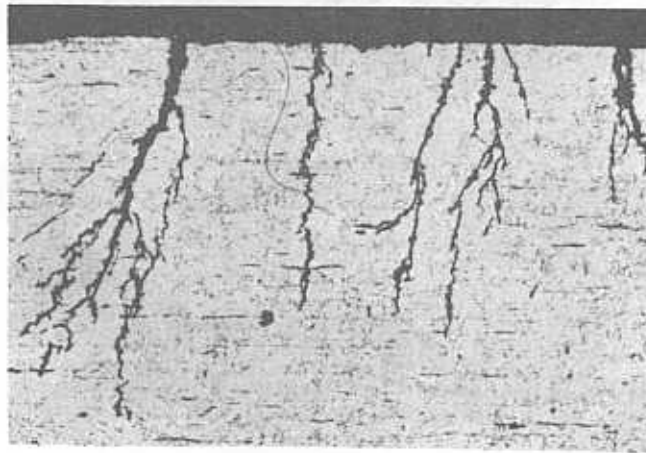


Figura 4. Falla de una junta de expansión de un buque operando en el trópico. Fractura típica de corrosión-fatiga.

Por lo antes citado, el técnico analista o ingeniero encargado de investigar una falla deberá tener extremo cuidado en la naturaleza y secuencia de sus procedimientos de examen, de modo que la evidencia requerida en el análisis no se pierda o contamine por manejo inadecuado o se destruya por una mala preparación de la muestra. Como conclusión se pueden citar 4 áreas de operación para dictaminar las causas de falla, a saber:

- i) Observaciones iniciales: Estudio detallado por inspección visual del componente fallado en el lugar de la falla lo más pronto posible después de ocurrido el siniestro. El registro gráfico como fotos y dibujos son esenciales para su análisis posterior. Un investigador experimentado puede usualmente establecer los modos de falla predominantes es en los componentes. Una interpretación detallada de la falla y de sus alrededores será fundamental.
- ii) Obtención de los antecedentes: El coleccionar todos los datos disponibles sobre especificaciones, dibujos, diseño, ensambles reparaciones, bitácora de servicio y condiciones operativas entre otras, es una actividad mandatoria para la realización de un análisis bien fundamentado. Énfasis especial se debe prestar a los detalles ambientales, incluyendo cargas normales de servicio así como sobrecargas, sobrecalentamientos accidentales, variaciones de temperatura, gradientes de concentración, etc.
- iii) Pruebas de laboratorio: En base a las normas y diseño de las piezas, establecer si el material empleado se ajusta a lo especificado y si las dimensiones de los componentes son las establecidas originalmente. Los estudios complementarios normalmente se llevan al cabo para establecer o corroborar la información recabada (por ejemplo: análisis por R-X de los depósitos de corrosión para establecer el medio ambiente donde operó la pieza). En adición y con el empleo de equipos como microscopios ópticos, estereoscópicos y electrónicos, se deberá realizar un estudio fractográfico completo, para así establecer origen de fractura, tipo/modo de la misma y características relevantes que orillen a análisis adicionales como estudios por microsonda o cuantificación metalográfica por análisis de la imagen.
- iv) Síntesis y Síntesis de la falla: Estableciendo cómo se gestó la falla y complementando la información con lo recabado en 2 y 3 se podrá entonces establecer la causa de la misma, la forma en cómo ocurrió y el diagnóstico resumido de ésta.

En muchas ocasiones será necesario realizar pruebas de simulación que corroboren el diagnóstico establecido. Como ejemplo de lo aquí detallado, y como anexo se incluye el análisis de falla practicado a un resorte de la empresa Compacto.

VI. EL CASO: UN RESORTE FUERA DE SERVICIO

VI.1 DESCRIPCION DE LA MUESTRA

Se recibió un resorte fallado de 9.5 pulgadas de diámetro externo y 5 giros. Con la muestra se adjuntaron las especificaciones del material ASTM A 68 y las dimensiones del resorte.

En la fotografía 5 se muestra una de las secciones del resorte fallado. Nótese que la fractura se presenta a un ángulo aproximado de 45° sobre el eje del metal.

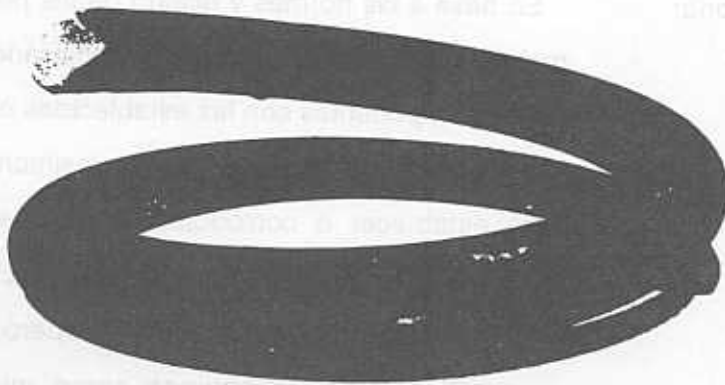


Figura 5 Sección del resorte mostrando la falla.

VI. 2 PRUEBAS REALIZADAS

Macrografía

En las fotografías 6 y 7 se muestran dos aspectos generales de la fractura del resorte. Nótese la presencia de agrietamientos justo en el origen de la falla y sobre la fractura.

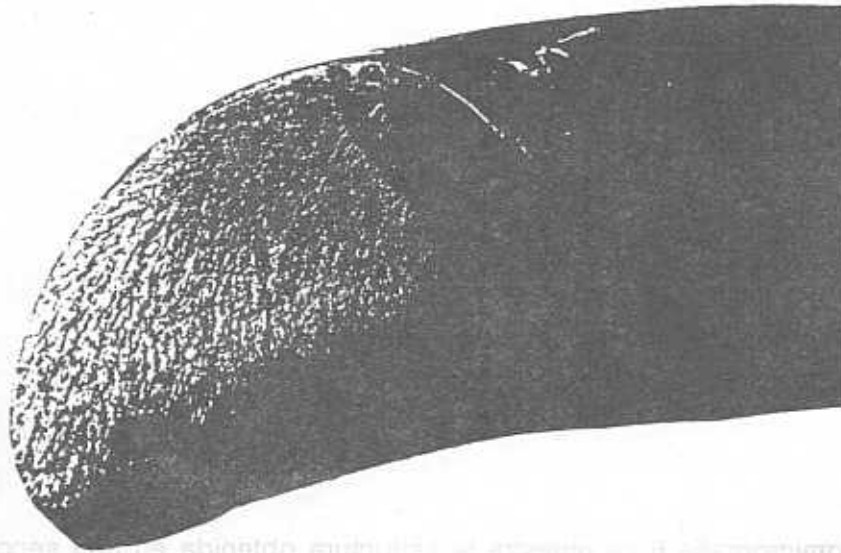


Figura 6 Fractura del resorte.

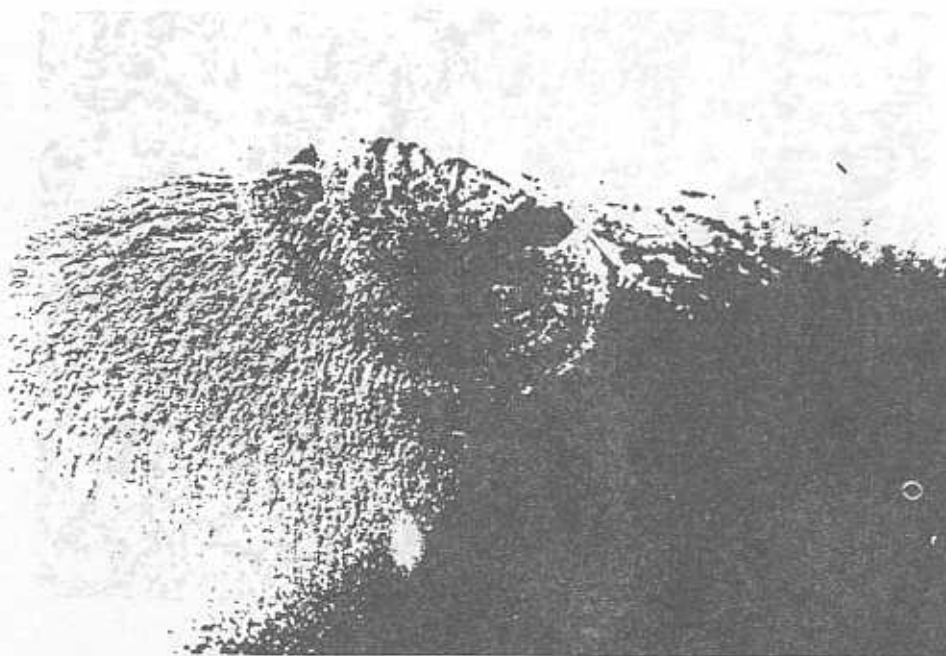


Figura 7 Inicio de la fractura.

Análisis químico cuantitativo

Se practicó un análisis químico cuantitativo por vía húmeda sobre 3 muestras obtenidas aledañas a la fractura principal.

El resultado promedio del análisis fue:

<u>ELEMENTO</u>	<u>%PESO</u>
C	0.48
S	0.029
Si	0.30
Mn	0.80
Cr	0.99
Mo	0.085
Ni	0.170

Metalografía

En la fotomicrografía 8 se muestra la estructura obtenida en una sección longitudinal del resorte, constituida principalmente por martensita revenida e inclusiones elongadas MnS.

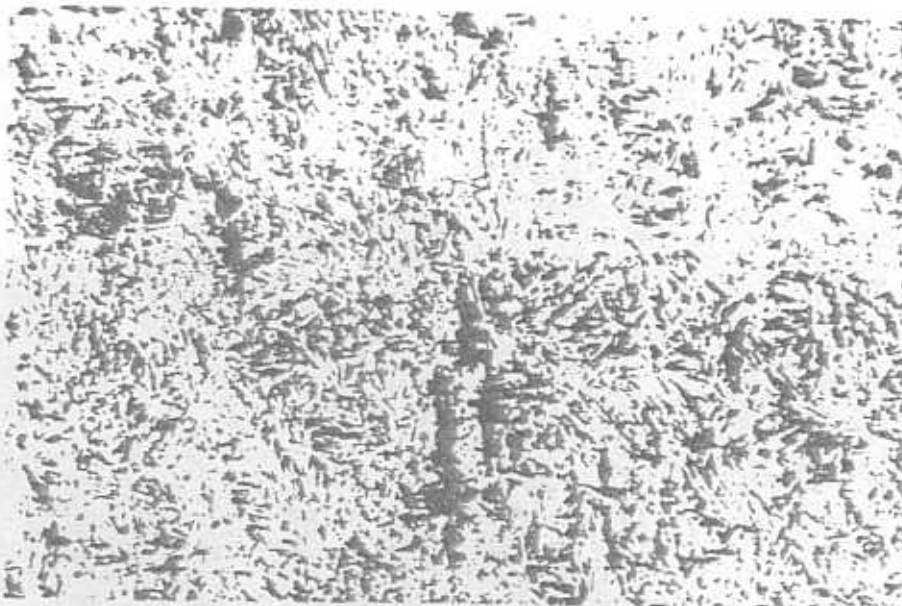


Figura 8 Corte longitudinal 200X.

Fractografía

Empleando un microscopio electrónico de barrido se estudió la superficie de la fractura.

En las fotomicrografías 9 y 10 se muestran aspectos de dicha fractura. Nótese la presencia de poros unidos por agrietamientos y la poca deformación plástica de la matriz.

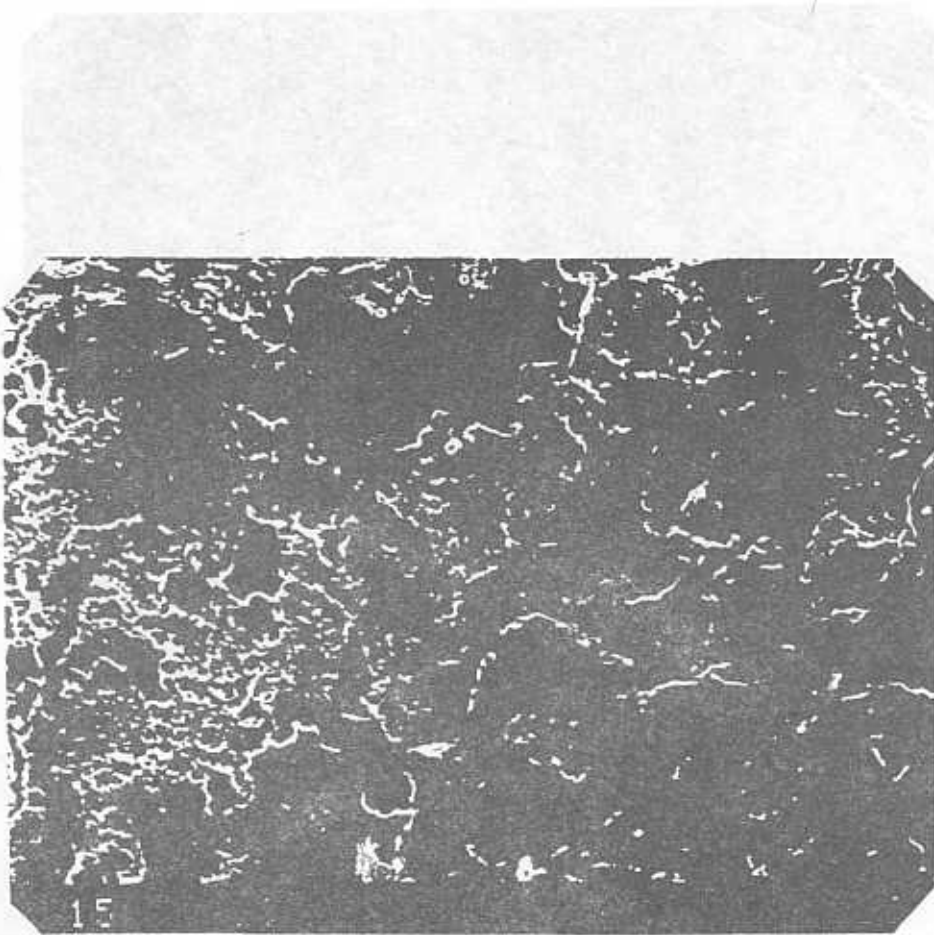


Figura 9 Fractura 600X

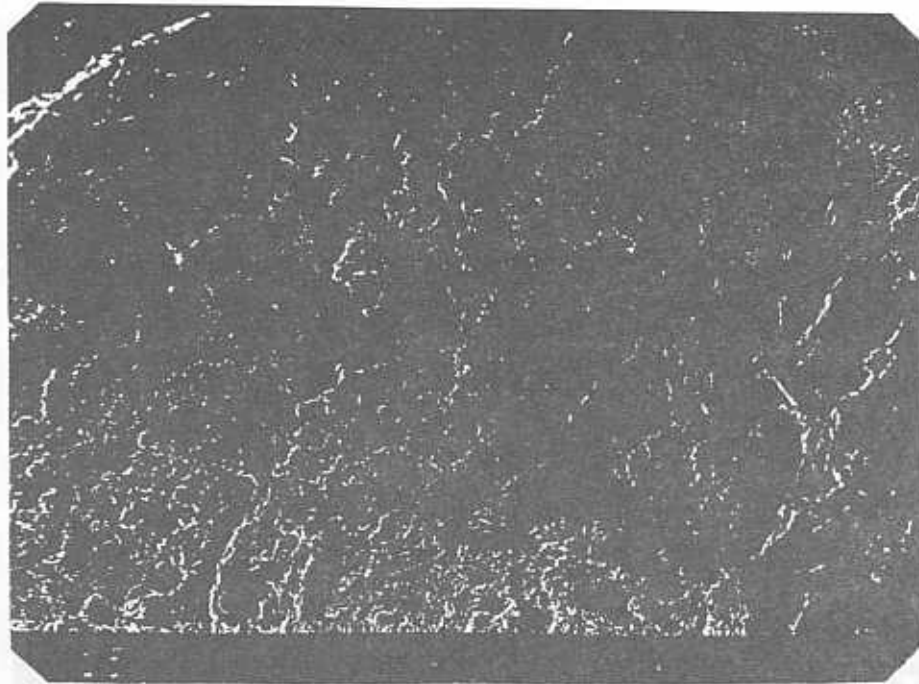


Figura 10 Fractura 300X

En virtud de los resultados obtenidos sobre la superficie de la fractura, se procedió a practicar un corte fino perpendicular al eje de metal sobre la fractura.

En la fotomicrografía 11 se muestra dicha zona. Nótese la presencia excesiva de porosidades con un diámetro mayor a 10 micrómetros. En la micrografía 12, se puede apreciar un acercamiento de dichas porosidades. Nótese la presencia de inclusiones dentro de los poros.

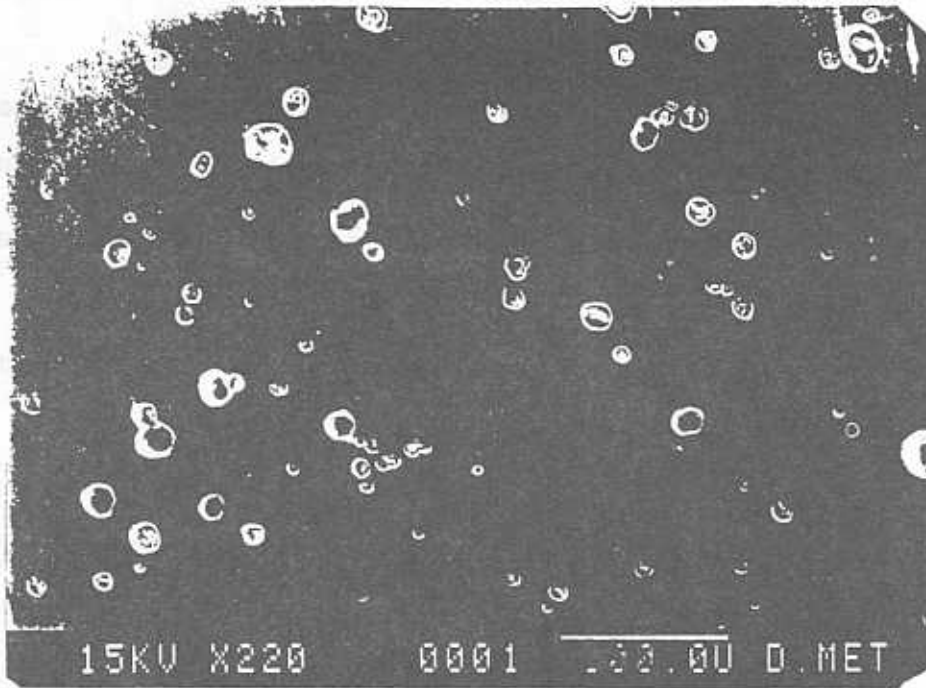


Figura 11 Corte perpendicular de la fractura 220X

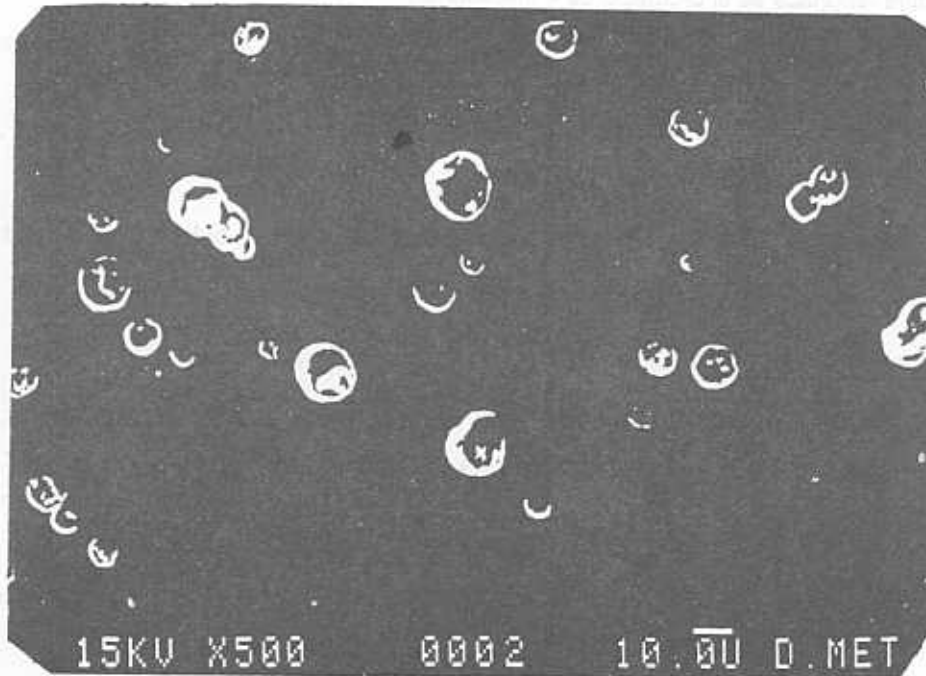


Figura 12 Corte perpendicular de la fractura 500X

Microanálisis

Por medio de la microsonda se practicó un microanálisis por la técnica de energía dispersiva a fin de determinar la naturaleza de las inclusiones asociadas a los poros antes mencionados.

El resultado general obtenido, fue la presencia de Fe en porcentajes en peso mayores al 70% .

Dureza

Se practicó un perfil de durezas en una rodaja transversal obtenida cerca de la fractura principal y sobre la superficie del resorte:

<u>ZONA</u>	<u>DUREZA</u>	
	<u>HRc</u>	<u>HBN</u>
Transversal centro	50	500
Transversal centro 3 mm fuera	49	490
Transversal centro 6 mm fuera	50	500
Transversal centro 12 mm fuera	49	490
Cerca superficie	47	472
Superficie	34-39	350-382

Nota: Cada lectura reportada es el promedio de 4 mediciones.

VI.3 COMENTARIOS A LOS RESULTADOS

Macrografía

La apariencia de la fractura y sus características la ubican como del tipo de Fatiga torsional vibracional.

Análisis Químico Cuantitativo

La composición química obtenida puede corresponder a la de un acero AISi 5152

<u>ELEMENTO</u>	<u>NORMA %PESO</u>	<u>RESULTADO SOBRE RESORTE</u>
C	0.48 - 0.55	0.48
Mn	0.75 - 0.90	0.8
S	0.04	0.029
P	0.04	-
Si	0.02 - 0.35	0.30
Cr	0.09 - 1.20	0.99
Ni	-	0.17
Mo	-	0.085

pero con el Ni y Mo fuera de lo especificado.

Metalografía

La microestructura obtenida está acorde a lo esperado según la norma ASTM A 125-81.

Fractografía

El estudio fractográfico reveló que la fatiga del material se debió seguramente a la coalescencia de porosidades.

Microanálisis

Los resultados obtenidos sugieren que las segregaciones encontradas dentro de las porosidades son del tipo Fex O.

Dureza

Los rangos reportados de dureza coinciden con lo indicado por la norma ASTM A 125-81, sin embargo se encuentran en los límites máximos permisibles.

La heterogeneidad en los valores de dureza superficiales se explica por el revenido efectuado al resorte y a la posible decarburización asociada.

VI. 4 CONCLUSIONES DEL ANALISIS

En base a los resultados obtenidos se sugiere que la falla por fatiga torsional-vibracional se debió a la coalescencia de porosidades del metal. Esto orilló a una falla prematura del resorte.

Se puede establecer que el origen de este exceso de porosidades en metal está en la práctica de decarburización del metal líquido durante la aceración.

La inyección excesiva de oxígeno para bajar la concentración de carburo y la no degasificación normalmente conllevan a la oclusión de oxígeno en el metal solidificado que posteriormente reacciona con el metal presente formando óxidos ferrosos o férricos.

Tal es el caso de las segregaciones encontradas por microanálisis.

VII. BIBLIOGRAFIA

1. Unterweiser P. M. y Cubberly W. H., Case Histories in Failure Analysis, American Society for Metals, U.S.A., 1979.
2. Grover H., "Mechanical and Metallurgical Causes of Failure" *Metals Engineering Quarterly*, Feb. 1963.
3. Croucher T. R., "Delayed Static Failure", *Metals Engineering Quarterly*, Nov. 1984.
4. Larson P. R., Case F.I., "How Failure Occur", *Metal Progress Journal*, Feb. 1964.
5. Dolan T. J., "Analysing Failures of Metal Components", *Metals Engineering Quarterly*, Nov. 1972.
6. Raymond L., Kendall E.G., "Why Titan's Bolis Failed", *Metal Progress*, January 1968.
7. Holshouser W. L., "Failure in aircraft parts made of ultrahigh strength steel", *Metals Engineering Quarterly*, August 1964.



CIUDAD DE MEXICO

Av. Popocatepetl 506 B
Xoco-Benito Juárez
03330 México, D.F.
Tels. 688 76 29
688 76 03
Fax 688 76 08

SAN FANDILA

Km 4 + 000, Carretera
Querétaro-Los Galindo
76700 P. Escobedo, Oro.
Tels. (42) 16 97 77
16 96 46
16 95 97
Fax (42) 16 96 71