

ANÁLISIS DE FALLA DE TUBOS DE HORNO DE PIROLISIS PRODUCCIÓN DE ETILENO

Pablo Fazzini ^{a,c}, Nicolás di Mauro ^a, José Luis Otegui ^{a,b}, Agustín Volpe ^d

^aGie S.A.-Área Análisis de Falla

^bDivisión Soldadura y Fractomecánica ñ INTEMA ñ Universidad Nacional de Mar del Plata

^cDepartamento de Ingeniería Mecánica ñ Universidad Nacional de Mar del Plata

^dDow Argentina, Complejo Bahía Blanca

E-mail: fazzini@giemdp.com.ar

Palabras clave: petroquímica, degradación en servicio, fisuras, aptitud para el servicio.

Resumen: Se presenta el análisis de las características y causas de fisuras aparecidas en tuberías que conducen gases crackeados en plantas petroquímicas. Las fisuras se ubicaban en zonas aledañas a acometidas de derivaciones utilizadas para instrumentos de control y medición. En un caso, por el niple se inyecta vapor para evitar posibles obturaciones en el instrumental. En otro caso, el niple forma parte de un circuito de vapor. En todos los casos el análisis fractográfico reveló que las fisuras iniciaban desde la superficie interna y propagan intergranularmente, por mecanismos de degradación en servicio por fatiga y shock térmico, asociados a un daño localizado en la fase más susceptible de la microestructura del material. Pudo constatarse la influencia de las condiciones de temperatura y velocidad de flujo en la inyección de vapor en la iniciación de fisuras. Se proponen acciones correctivas, tanto de variables operacionales como modificaciones al diseño.

1 INTRODUCCION

Las fallas que dan lugar a este estudio se ubican en los tubos que conducen los gases crackeados a la salida de 3 de los 10 hornos identificados como F1002, F1004 y F1005 de una planta petroquímica ubicada en la provincia de Bs. As. [1]. Este análisis tiene como objetivos principales identificar el o los mecanismos actuantes que causaron las fallas prematuras; determinar las causas que crearon las condiciones para que este mecanismo generara las fallas y evaluar posibles acciones para prevenir la repetición del problema.

Cada grupo de tubos recibe el nombre de Horno, el conjunto de estos hornos se encuentra consolidado en una sola estructura. Cada Horno resulta de las sucesivas uniones de tubos de menor diámetro, ya sea mediante uniones ϕ Y ϕ , o las uniones de múltiples tubos (**Fig. 1**). En esa figura se señala el sector donde se registraron las fallas. Por debajo de las piezas afectadas está la unión soldada a la pieza colectora superior. A la salida del horno, el gas crackeado ingresa a un intercambiador, donde se aprovecha su calor para la producción de vapor.

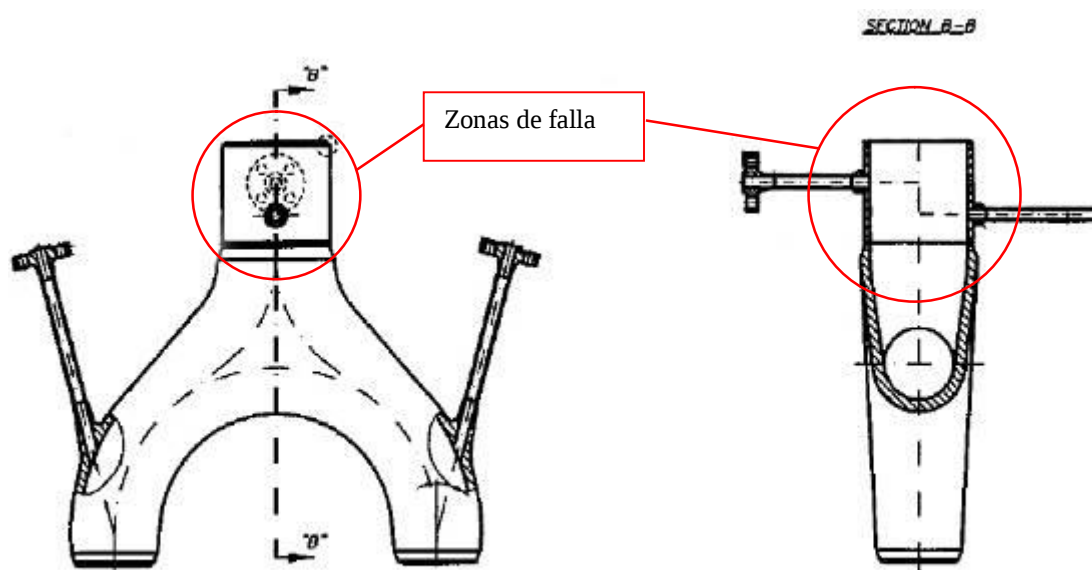


Fig. 1: esquema de zona de falla

El equipo funciona de manera intermitente, realizando una corrida alternada con un decoquizado. La operación de decoquizado se efectúa haciendo circular aire con vapor por dentro de los tubos, para limpiar los depósitos internos (quemándolos). Durante la operación de decoque, la temperatura se mantiene en valores similares a los de operación del equipo. En la **Tabla 1** se resumen los tiempos de operación de los diferentes hornos.

Horno	Fecha de Instalación	Tiempo de Corrida [Hrs.]	Fecha aproximada de falla	Cantidad de Decoques	Material del Niple
F-1002	Ago-2006	10600	Nov-2007	12	20Cr 32 NiNb
F-1004	May-2006	11300	Sep-2007	13	20Cr 32 NiNb
F-1005	May-2005	20000	Ene-2008	20	20Cr 32 NiNb

Tabla 1: Fechas de falla y tiempos de operación de los hornos

Las siguientes condiciones de operación son:

- Temperatura de salida del gas craqueado: aprox. 850 °C (Niple de 106)
- Presión de salida del gas craqueado: aprox. 0,5 Kg./cm²
- Temperatura de salida de la inyección de vapor: aprox. 180 °C (Conex de 16)
- Presión de salida de la inyección de vapor: aprox. 0,5 Kg. /cm².

Los tubos, de 106 de diámetro interno, están contruidos en acero (20 Cr, 32 NiNb) [2], de 255 mm de longitud y 12 mm de espesor. Dentro de los posibles mecanismos de daño se barajan las siguientes hipótesis:

- Fatiga
- Fisuración asistida por el medio:
 - Corrosión intergranular
 - Corrosión bajo tensiones
- Carburización

2 EVALUACIÓN DE LAS ZONAS DE FALLA

El niple presenta dos acometidas de 33.5 mm de diámetro externo, ubicadas diametralmente opuestas y con una separación longitudinal de aproximadamente 85 mm. Estas acometidas se utilizan para la medición de presión y temperatura de la salida de gases craqueados. Las fisuras se encuentran en la zona aledaña al niple utilizado para medir presión (**Fig.2**). Por la acometida utilizada para la medición de presión, se hace circular un caudal bajo de vapor para evitar de este modo posibles obturaciones en el instrumental. La temperatura del vapor inyectado ronda los 180°C.



Fig. 2: fisuras en las zonas aledañas a los niples de medición de presión.

La secuencia de fotos de la Fig. 2 revelan el daño encontrado en los hornos F1002, F1004 y F1005 respectivamente. Del lado externo, se identifican algunas fisuras en la acometida de presión. Del lado interno, se encontraron severas fisuras radiales en la acometida y grupos de fisuras circunferenciales paralelas, aguas debajo de la acometida. Se puede observar en las figuras que algunas de ellas son pasantes, que se pueden correlacionar con las fisuras internas.

Para determinar las características fractográficas de la fisura del F1005 se indujo la fractura de la pieza. Se pudo constatar que la fisura se inicia desde la superficie interna. La **Fig. 3** muestra ambas superficies de fractura. Las superficies presentan una capa de residuos oscuros, posiblemente el mismo que se intenta limpiar mediante el decoquizado (**A** en fig. 3). Esto indica que el equipo estuvo operando con la fisura pasante. Solo los extremos de la fisura presentan un aspecto mas limpio, en los lugares donde no circulo gas (**B** en fig. 3). En uno de los extremos se indica un sector brillante, que corresponde a la fractura inducida. Las marcas que se abren en abanico desde la superficie interior indican la dirección de avance de la propagación de la grieta (river patterns) [3]. Su intersección permite identificar el sitio aproximado de iniciación del daño (**C** en fig. 3).

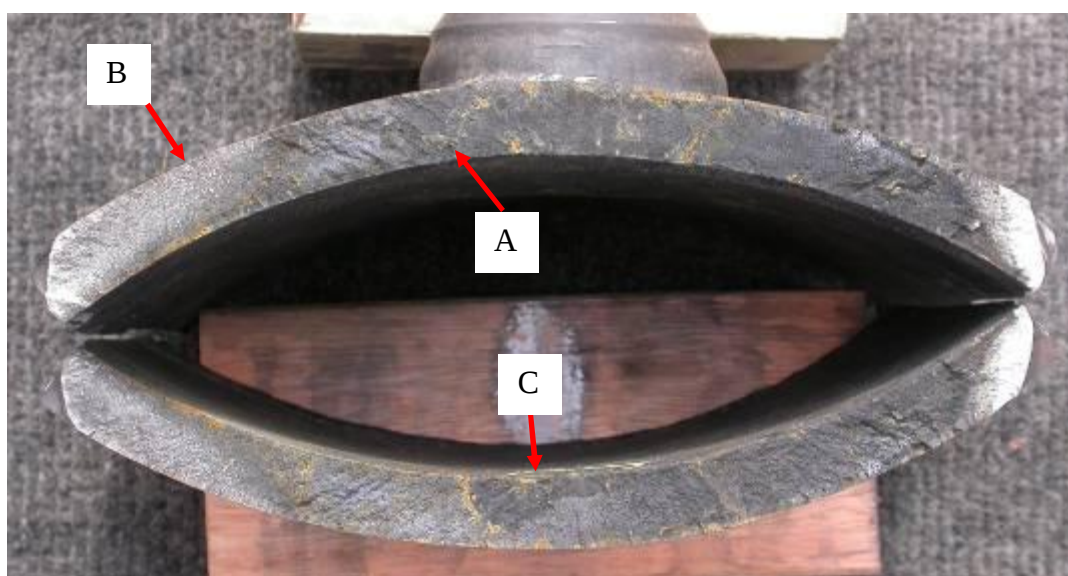


Fig. 3: Superficie de fractura en horno F1005. Indicaciones de sectores característicos de la fisura

Se realizó el análisis micrográfico de la superficie de fractura del Horno F1005 (extremo de la figura) y de las fisuras del horno F1002, siguiendo los lineamientos de las normas ASTM [4,5].

En la **Fig. 4**, podemos ver un sector de la traza de propagación de la fisura de la Fig. 3, donde se distingue su característica intergranular. Se aprecia además contenido de precipitados en bordes de grano. La **Fig. 5** muestra la propagación a través del espesor de algunas de las fisuras que se presentaban el horno F1002. Todas las fisuras inician desde el lado interno y propagan de manera intergranular, aunque en la zona de iniciación esto no es claro.

La **Fig. 6** compara el estado de la microestructura en una zona cercana a la superficie interna y en el seno del material respectivamente. Las diferencias son contundentes: se aprecia claramente la formación de precipitados y un borde de grano ensanchado. Se midió el ancho de la banda de material que ha sufrido carburización y precipitación: varía entre los 1.4 y 1.6 mm (Horno F1002).

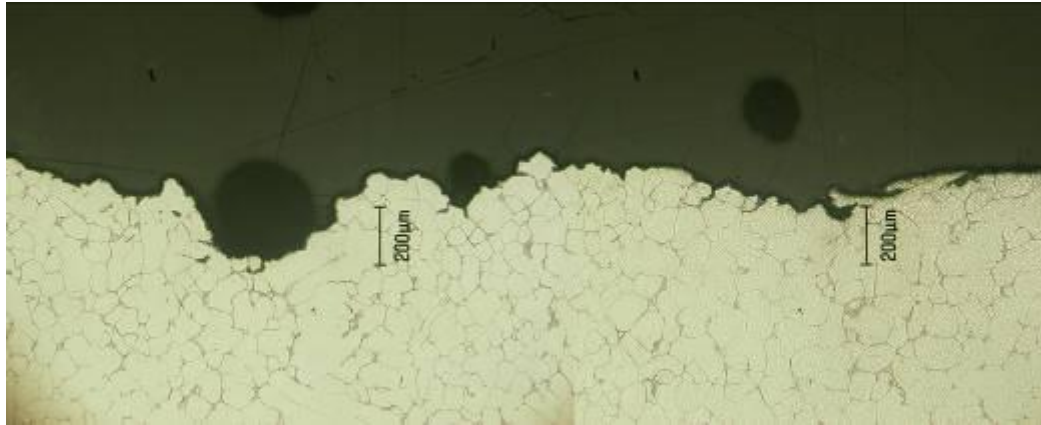


Fig. 4: Micrografía de sección transversal de la fractura en horno F1005

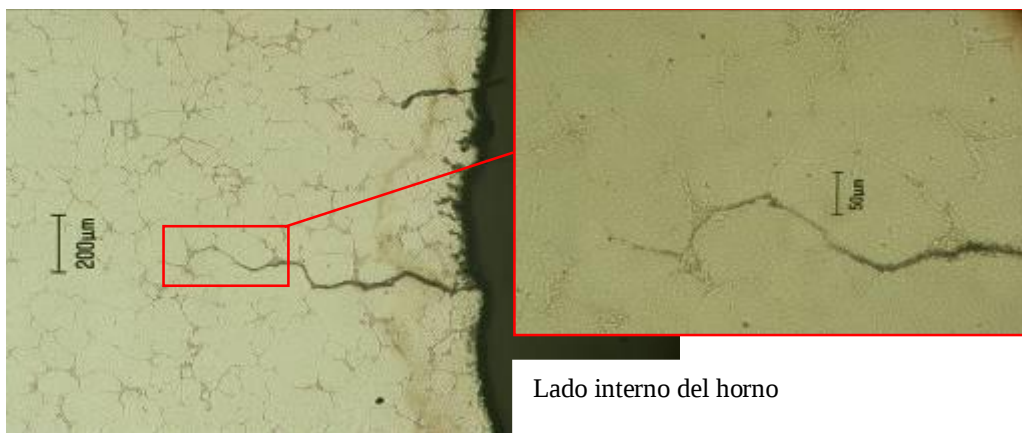


Fig. 5: Micrografía de sección transversal de la fractura en horno F1002

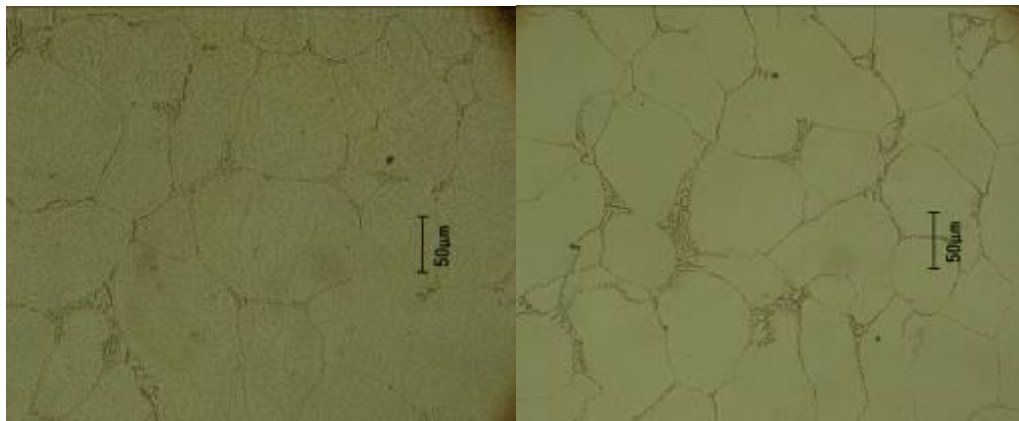


Fig. 6: Microestructura en el borde y en el seno del material respectivamente

Se estableció la composición química del material del tubo de 106 mediante análisis por espectrometría de chispa. Los resultados se resumen en la **Tabla 2** donde se incluyen además los valores informados por el proveedor en sus análisis químicos de control de calidad. Como se mencionó anteriormente, se trata de una aleación de alto contenido de cromo y Níquel. El método utilizado es sumamente preciso para aleaciones ferríticas, pero se considera *semicuatitativo* para aceros inoxidables austeníticos. Por esto, se complementó el análisis con microsonda EDAX, cuyos resultados se comentan en el apartado siguiente.

Fuente	Elementos							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
AQ	0.1	0.6	0.4	<0.1	<0.1	16	27	0.2
Especificación	0.139	0.57	1.03	0.012	0.005	20.98	32.76	0.04

Tabla 2: Composición Química nominal y del ensayo.

El ensayo de tracción se realizó sobre el material de los tubos. La muestra fue obtenida del Horno F1005 y los resultados obtenidos se resumen en la **Tabla 2**. El material mostró una Tensión de Rotura y un alargamiento bajos. El fabricante informa para una aleación similar, una tensión de Rotura de 470 Mpa y un alargamiento del 8%.

	Probeta Nro.1
Alargamiento (%)	2
Estricción (%)	4
Tensión de Fluencia (MPa)	290
Tensión de Rotura (MPa)	310

Tabla 3: Valores obtenidos del ensayo de tracción

Para verificar el modo de propagación de las fisuras y realizar análisis químicos locales se recurrió al microscopio electrónico de barrido (SEM) y el análisis por microsonda EDAX. Las probetas analizadas fueron tomadas de la muestra de la Fig. 3, incluyendo la probeta metalográfica de la Fig. 4. La **Fig. 7** (X300) muestra dos sectores de la superficie de fractura donde claramente se aprecia su carácter intergranular. Podemos ver en ellas algunas fisuras entre los granos.

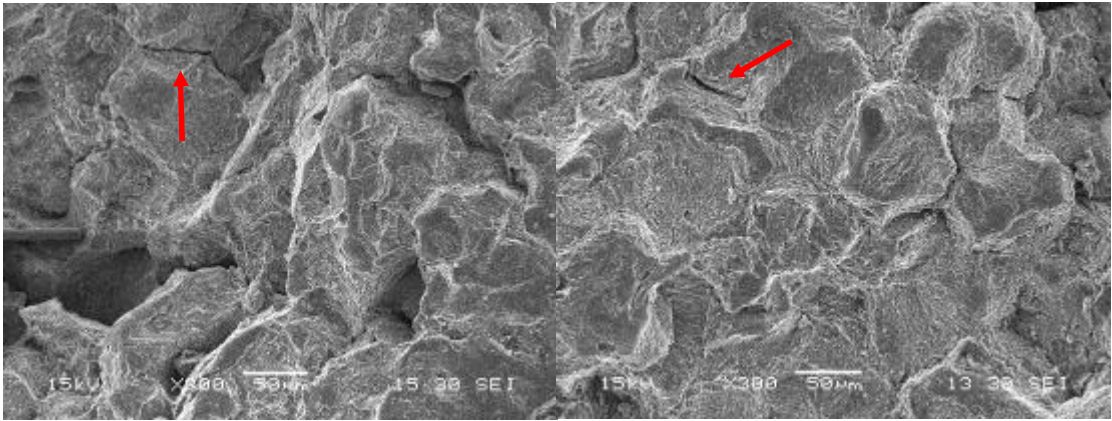


Fig. 7: propagación intergranular de la fractura

Se realizaron análisis químicos localizados en las zonas aledañas a una fisura secundaria de la Fig. 4 en dos sectores señalados mediante un rectángulo y una línea (**Fig. 8 a**). En particular, se buscó analizar las variaciones en el contenido de Cromo. El resultado del microanálisis del área indicada por el rectángulo se muestra en el espectro del sector **B** de la Fig. 8. En el área señalada, ubicada en el centro del grano, vemos que el contenido de Cromo es del 19.5%, prácticamente en el porcentaje global de la aleación (20% Cr). Sin embargo, el Níquel aparece como bajo, 23.5 % respecto del 32% global de la aleación.

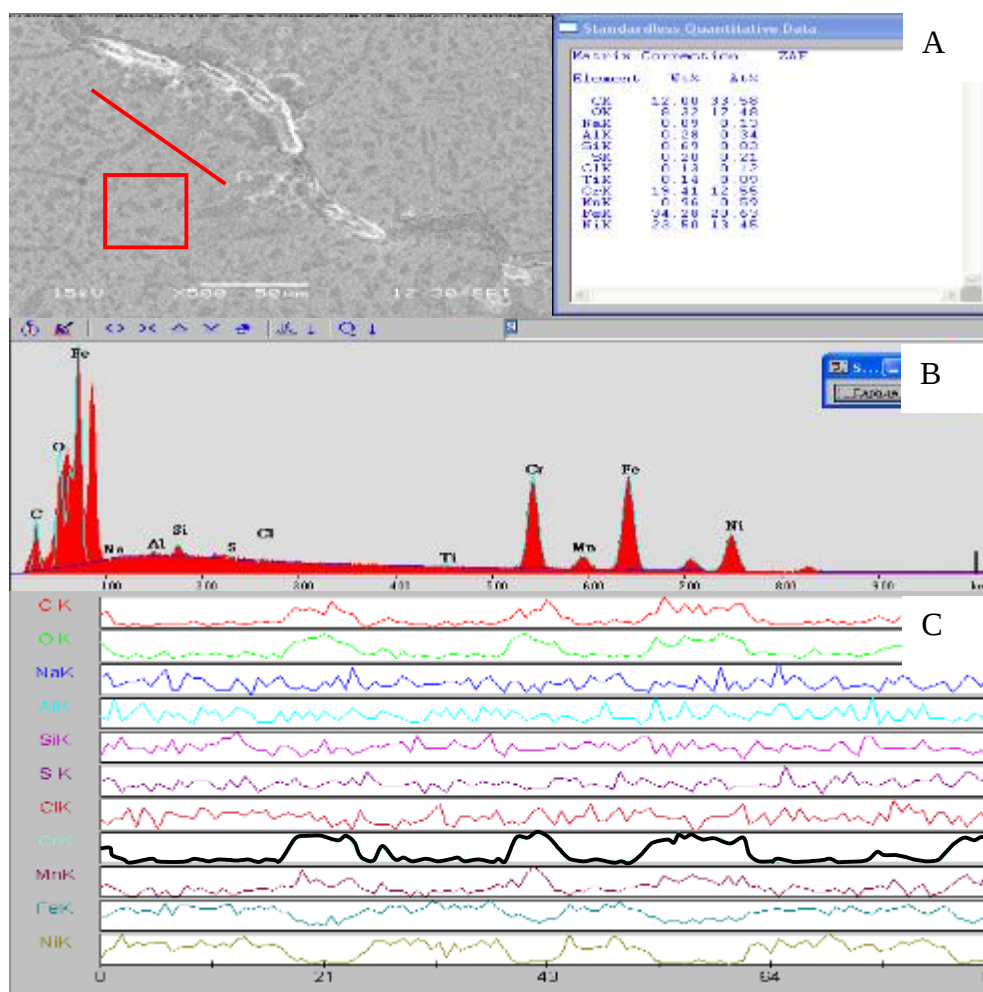


Fig. 8: Microanálisis químico en fisura secundaria

Para verificar la variación del contenido de Cromo desde el centro de un grano al centro de otros, se efectuó el microanálisis a lo largo de una línea. El espectro resultante se muestra en el sector C de la Fig.8. En ese grafico se presentan los contenidos de los elementos seleccionados en función de la distancia entre los puntos elegidos (inicio y final de la recta). Podemos ver como el contenido de Cromo presenta picos alternados. Estos picos corresponden a incrementos del contenido de cromo cada vez que la línea cruza por un carburo de cromo. Si se observa el espectro correspondiente a las distancias entre 54 y 64 (banda alrededor del borde de grano) se puede ver claramente como aumenta el contenido de Cromo y Carbono, y disminuye el de Fe y Ni.

Para complementar el análisis químico efectuado, se relevó la composición de un área significativa de la superficie externa e interna (**Fig. 9 a y b** respectivamente) de una muestra del niple. Se observó como el análisis sobre la superficie externa arrojó valores de composición que corresponden prácticamente a los nominales (20% Cr, 32% Ni), mientras que sobre la superficie interna, se encontró un porcentaje de Ni mucho mas bajo, y un elevado contenido de Cr.

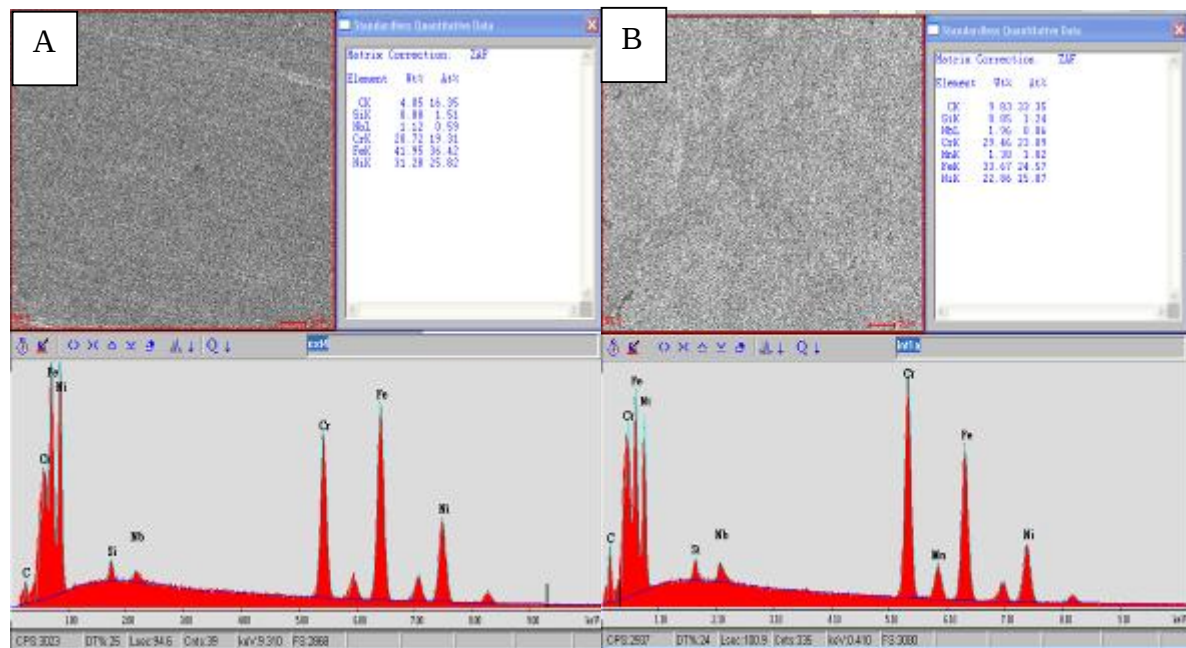


Fig. 9: Micro análisis en superficie (a) externa, (b) interna.

3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Validación de las hipótesis de trabajo

En las micrografías efectuadas se pudo apreciar el carácter intergranular de la propagación de las fisuras, indicativo de un mecanismo de degradación en servicio asociado a un daño localizado en alguna fase susceptible de la microestructura del material. Las mismas responden a un mecanismo de fisuración asistido por el medio (EAC): más precisamente acotado a Corrosión Bajo Tensiones o Corrosión Intergranular.

En las superficies de fractura analizadas en microscopio electrónico pudo constatarse la naturaleza preponderantemente intergranular de la propagación. Puede **descartarse la propagación de fisuras por fatiga**, dado la ausencia de evidencia de estriaciones o beach marks sobre las superficies.

3.2 Mecanismos de degradación compatibles con la morfología observada

3.2.1 CORROSIÓN BAJO TENSIONES [6]

Corrosión bajo tensiones (stress corrosion cracking, SCC) es un fenómeno de propagación de fisura tiempo-dependiente, que ocurre cuando se reúnen tres condiciones:

- la aleación es susceptible al mecanismo específico de SCC,
- se expone a un ambiente agresivo específico,
- el componente está sometido a tensiones de tracción por encima de un cierto nivel umbral.

El mecanismo de corrosión bajo tensión en aceros inoxidables determina la aparición de fisuras si estos se exponen a un ambiente de pH alto y el metal está sometido a altas tensiones. El examen metalográfico de un material fallado por este mecanismo revela fisuras intergranulares ramificadas.

Los casos reportados en la literatura normalmente se atribuyen a condiciones anormales en la química del agua, llevando a la acumulación de químicos en las líneas de vapor. Las tensiones de servicio más las tensiones residuales, en combinación con las condiciones agresivas, producen SCC localizado.

Las aleaciones de Fe-Ni-Cr que conducen gas craqueado estudiadas en la literatura corresponden a intercambiadores de calor. Se encontró que tienen una alta susceptibilidad a sufrir SCC intergranular en dos medios:

- Vapor de alta pureza a temperatura.
- Oxígeno.

El ataque está generalmente relacionado con la formación de precipitados en los bordes de grano y no está completamente entendido. Los casos más estudiados corresponden a los siguientes medios:

- **Vapor puro oxigenado:** a mayor contenido de O_2 mayores velocidades de propagación de fisuras. Se han observado problemas de SCC en tubos de etileno con contenidos de 8 ppm de O_2 o más.
- **Cloruros:** aún con pequeños contenidos de Cl^- en el vapor, en las interfases agua ñ vapor la concentración de iones Cl^- en contacto con las superficies puede aumentar varios ordenes de magnitud, pudiendo alcanzar concentraciones suficientes para la iniciación y propagación de fisuras por SCC, especialmente en rendijas o entallas en las superficies.

3.2.2 CORROSIÓN INTERGRANULAR

Este tipo de corrosión, que se lo conoce también como Ataque de Borde de Grano o Sensitización, se caracteriza por el ataque de una banda angosta de material a lo largo de los límites de grano.

La Corrosión Intergranular es causada por la precipitación de carburos de cromo en los bordes de grano. Si un acero austenítico es mantenido en rango de temperatura de entre 550- 800 °C, se forman carburos que contiene cromo, hierro y carbono en los bordes de grano. El contenido de cromo en los carburos puede ser muy elevado, de hasta el 70%, mientras que el contenido de cromo en la aleación es del 20%. Dado que el cromo es un átomo grande con una velocidad de difusión pequeña, una banda angosta de material alrededor de los carburos se vuelve pobre en cromo, tanto que sus propiedades resistentes a la corrosión disminuyen. Si el acero en estas condiciones es expuesto a un medio agresivo, las regiones empobrecidas en cromo son atacadas, y el material a lo largo del borde de grano se corroe y desaparece. El resultado es que los granos quedan sueltos y pueden salirse de la superficie del material, y en algunos casos solo quedan unidos por interferencia mecánica. La resistencia y rigidez del material se pierde.

El riesgo de Corrosión Intergranular puede ser minimizado reduciendo el contenido de carbono libre en la aleación. Esto puede ser realizado de dos maneras:

1. Disminuyendo el contenido de carbono
2. Estabilizando el acero, aleando con elementos (titanio, niobio) que formen carburos de cromo más estables.

Muchos aceros para alta temperatura, que contiene contenidos de carbono relativamente altos para incrementar su resistencia, son sensibles a la corrosión intergranular si se utilizan en medios acuosos o son expuestos a condensados.

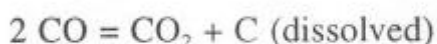
3.2.3 CARBURIZACIÓN [7]

Los tubos de hornos de procesos petroquímicos son normalmente diseñados para soportar períodos extensos de tiempo mediante los procedimientos de la norma API 530, que tiene en cuenta el espesor de pared requerido para soportar la presión interior y los efectos del medio ambiente, tanto químicos como por temperatura. Se requiere un buen comportamiento mecánico de las aleaciones cuando son sometidas a temperaturas de alrededor de 1000 °C, esto es, en el rango donde el daño por termofluencia o Creep es la principal causa de la limitación de la vida útil del equipo.

La exposición de estas aleaciones durante períodos prolongados de tiempo a altas temperaturas produce una importante cantidad de cambios microestructurales entre los que se encuentra la precipitación de carburos. Los tubos de hornos en plantas productoras de etileno son normalmente construidos por centrifugado de fundición y diseñados para soportar el principal mecanismo de daño, que es la carburización.

Si la aleación es expuesta a gases que contengan carbono, en la forma de CO, CO₂ o CH₄ etc., puede enriquecerse en carbono. El grado de carburización esta gobernado por el nivel de carbono y de oxígeno en el gas y por la temperatura y composición de la aleación. El carbono que migra a la aleación conduce a la formación de carburos, principalmente carburos de cromo.

Las reacciones químicas que pueden originar la disolución del carbono a partir de hidrocarburos son:



En los tres casos el C disuelto ingresa en el metal, produciendo carburización selectiva. Las fisuras pueden producirse en el material fragilizado, aún con bajas tensiones de operación, por efecto de las tensiones residuales de fabricación. La carburización puede ser detectada por métodos no destructivos basados en la variación de la permeabilidad magnética que la carburización produce en el acero.

En las muestras analizadas pudo constatar, que la superficie externa de los niples presenta un magnetismo casi inexistente, mientras que en superficie interna es mucho mas marcado. Es importante destacar que las aleaciones inoxidables austeníticas se supone son no magnetizables.

La carburización tiene como consecuencia la fragilización del acero inoxidable. La formación de redes de carburo de cromo resulta en la generación de zonas empobrecidas en cromo que ven reducida su resistencia a la oxidación. La resistencia a los ciclos térmicos se ve reducida y, dado que la carburización conduce a un incremento de volumen, existe el riesgo de fisuración.

La carburización puede ocurrir a temperaturas relativamente bajas (400-800°C). El ataque se caracteriza por la pulverización de la superficie del acero en contacto con el gas, debido a la ruptura de la capa protectora y la difusión del carbono al seno del material que conduce ala formación de carburos en borde de grano ya mencionada

El Cromo, Níquel y Silicio son aleantes que mejoran la resistencia de la aleación a la carburización. En la selección del material es necesario considerar tanto la carburización como la mejora de propiedades mecánicas con el incremento de carbono en la aleación. En general, los aceros

inoxidables auténticos son los que mejor toleran un incremento del carbono para mejorar las propiedades mecánicas sin comprometer la aleación a mecanismos de degradación.

3.3 Aspectos constructivos y operativos

La orientación radial de las fisuras del lado interno en la acometida de presión del F1002 y del F1005, permite minimizar en ese caso la influencia de cargas importantes de piping. La propagación de la fisura principal del F1005 deja claro que las cargas longitudinales son en este caso preponderantes.

El origen de las tensiones necesarias para la iniciación y propagación de fisuras pueden relacionarse a problemas derivados de la inyección de vapor a baja temperatura, que posiblemente provoque shock térmico sobre la superficie.

El análisis de la superficie de fractura del ensayo de tracción evidenció superficie con características de fractura frágil, brillante, con escasa deformación plástica. Se observó la ausencia de contracción lateral. El alargamiento esperado para un material de este tipo es de al menos un 6%, con una tensión de rotura que suele superar los 450 Mpa. Estas diferencias entre las propiedades esperadas y las encontradas se justifican por la degradación en servicio del componente. La misma precipitación de carburos de cromo que facilitó la iniciación y propagación de fisuras intergranulares, es responsable de esta pérdida de propiedades.

En servicio, el componente se ve sometido a dos mecanismos que degradan sus propiedades. Por un lado, la alta temperatura de funcionamiento, conduce a la formación de precipitados en bordes de grano. Los precipitados que se forman, presentan un estado de menor energía, por esto, desde el punto de vista termodinámico, su formación es favorable. Mediante el agregado de aleantes adecuados se intenta controlar este fenómeno, reduciendo su velocidad. Por otro lado, la difusión de carbono en la red de la aleación, favorece aun más la formación de estos precipitados. Estos dos fenómenos, juntos o separados, degradan las propiedades de la aleación. Las variaciones en composición entre ambas superficies (Fig. 9a y b), confirman el accionar de mecanismos de degradación en servicio.

Existen otros dos mecanismos, esta vez de fisuración en servicio, que pueden afectar la integridad del componente. Se describió anteriormente el mecanismo de Corrosión Bajo tensiones y el de Corrosión Intergranular. Para que el SCC actúe necesita de un cierto nivel de tensiones, de un medio corrosivo y de una susceptibilidad del material. La **Corrosión Intergranular** necesita solo de un medio corrosivo y de un material susceptible, considerándose este último el mecanismo mas probable.

En el caso que se analiza, se disponía de un material susceptible, debido a la degradación por temperatura o carburización. La inyección de vapor a través de la acometida utilizada para medir presión aportó las condiciones faltantes para que se desarrollen los mecanismos de agrietamiento: un medio Corrosivo y Tensiones Mecánicas. Las fisuras de los niples se encuentran localizadas casi exclusivamente del lado de la inyección de vapor, alrededor de la acometida, o aguas debajo de esta. Queda de este modo recalcada la influencia de dicha inyección en el tipo de daño observado.

Si bien la utilización de un acero inoxidable con aleantes que dificulten aun más la formación de precipitados en borde de grano (como por ejemplo aleaciones 25 Cr - 35 Ni o 35 Cr - 45 Ni), tendrá como resultado una vida mayor en servicio, cabe destacar que si no se elimina la causa identificada como raíz en este análisis (tensiones térmicas por la inyección de vapor) es de esperar que se repita el mismo tipo de falla.

Para reducir el riesgo de repetición de este tipo de falla se recomienda:

1. *Incrementar la temperatura del vapor inyectado.* De esta manera se disminuye la magnitud del shock térmico.
2. *Modificar el diseño de la acometida de vapor.* El caudal de gases que circula empuja el vapor inyectado sobre una de las caras del niple, aguas abajo del punto de inyección. Si pudiera colocarse la inyección de vapor sobre el centro del caño y, mejor aun, orientado en la dirección del flujo, probablemente se reduciría el número de moléculas de vapor que impacten sobre la superficie del niple o, al menos, se demorará este impacto, dando el tiempo suficiente para que la temperatura del vapor inyectado se eleve. Básicamente se trataría de un tubo de Pitot, pero con el orificio orientado en la dirección del flujo.
3. *Evitar la Formación de Condensado.* Si, por problemas operativos, se inyecta vapor con condensado, se acelera el mecanismo de fisuración.

4 CONCLUSIONES

Se analizaron las características y causas de fisuras aparecidas en tres tubos de convección, horno F1002, F1004 y F1005 que conducen gases crackeados. Los tubos, de 106 de diámetro interno, están contruidos en acero (20 Cr, 32 NiNb), de 255 de longitud y 12 mm de espesor.

Todas las fisuras se encuentran en la zona aledaña al niple utilizado para medir presión. Por este se hace circular un caudal bajo de vapor a 180°C para evitar de este modo posibles obturaciones en el instrumental. Se pudo constatar que las fisuras inician desde la superficie interna y propagan intergranularmente.

Se determinó la composición química del material mediante análisis por espectrometría de chispa y microsonda EDAX. La misma presenta composición nominal en los sectores no dañados.

Se comparó el estado de la microestructura en una zona cercana a la superficie interna y en el seno del material. Se apreció claramente la formación de precipitados y un borde de grano ensanchado. Pudo medirse el ancho de la banda de material que ha sufrido carburización y precipitación. La misma varia entre los 1.4 y 1.6 mm (horno F1002).

Se efectuó el microanálisis a lo largo de una línea. Pudieron verse presenta picos alternados en el contenido de Cromo correspondientes a carburo de cromo. El espectro correspondiente a la banda alrededor del borde de grano indica claramente un aumento el contenido de Cromo y Carbono, y disminución del Fe y Ni.

Se realizó un ensayo de tracción sobre el material de los tubos. El material mostró una Tensión de Rotura y un alargamiento bajos. El fabricante informa para una aleación similar, una tensión de Rotura de 470 Mpa y un alargamiento del 8%, mientras que se obtuvo una Tensión de Rotura de 310 Mpa y un alargamiento de tan solo el 2%. Estas diferencias entre las propiedades esperadas y las encontradas se justifican por la degradación en servicio del componente

Se confirmaron las características de propagación Intergranular mediante Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), indicativo de un mecanismo de degradación en servicio asociado a un daño localizado en alguna fase susceptible de la microestructura del material.

Se disponía de un material susceptible, debido a la degradación por temperatura o carburización. La inyección de vapor a través de la acometida utilizada para medir presión aportó las condiciones

faltantes para que se desarrollen los mecanismos de agrietamiento: un medio Corrosivo y Tensiones Mecánicas.

5 REFERENCIAS

- [1] Informe Técnico GIE 7301-02-08 análisis de falla de tubos de horno F1002, F1004, F1005 en planta de producción de etileno.
- [2] Life Assessment and inspection techniques in reformer furnaces, Rob J. Gommans, Gommans Metallurgical Services, Stevensweert, NL, 2002.
- [3] ASM HANDBOOK, Fractography, Vol. 12. Pages: 12, 370, 397.
- [4] ASTM, E3-01, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens,
- [5] ASM HANDBOOK, Metallography and Microstructures, Vol. 9. Pages: 33, 63, 66.
- [6] ASM HANDBOOK, Failure Analysis and Prevention, Vol. 11. Pages: 215-217
- [7] ASM HANDBOOK, Failure Analysis and Prevention, Vol. 11. Pages: 271-273