

Víctor Fierro(1)(3), Francisco Agüera(1)(2)(4), Nelson Alvarez Villar(1)(2), Matías Kowal(1), Daniel Aquino(1).

(1) CITEFA, Departamento Ciencia y Técnica de Materiales (DEIMAT). (2) Universidad de la Marina Mercante (UdeMM-DICyT).

(3) E.S.T, Escuela Superior Técnica del Ejército Argentino. (4) Universidad Tecnológica Nacional-FRBA

Análisis de falla de un vástago de regulación de un compresor industrial*

Resumen

Se analizan las causas que originaron la rotura, en tres partes, de un vástago de regulación de la cámara de compresión de un compresor de gas natural, instalado en una estación de bombeo en línea de un gasoducto localizado en la Patagonia.

El elemento objeto del estudio falló por fatiga, hecho llamativo ya que trabaja normalmente en modo de compresión. En este trabajo se analiza, la presencia de defectos previos a la rotura que pudieran haber dado origen a la misma, la calidad de los materiales y la existencia de esfuerzos directos o resultante de estos que expliquen el modo de falla.

Se emplearon técnicas fractográficas de bajo y altos aumentos, se realizaron controles dimensionales, de dureza, metalográficos y de composición química.

Palabras clave: Fractura, análisis de falla.

1. Introducción

En la industria de extracción de gas natural se utilizan compresores para elevar la presión del gas que se dirige por las cañerías de conducción. La compresión del gas se produce en una cámara a través de pistones. Esta compresión provoca, en operación normal, un aumento de la temperatura de la cámara e inmediaciones. Parte del calor generado se disipa al ambiente llegando a un estado de equilibrio. La temperatura alcanzada depende entonces de la razón de compresión y de la temperatura ambiente. Pero esta última cambia de acuerdo a la estación del año. Es por esto que en las estaciones cálidas es necesario disminuir la razón de compresión pues de otra manera se alcanzarían temperaturas de funcionamiento que dañarían los componentes del equipo. Para ello la cámara posee un pistón de regulación que establece el volumen de la cámara de compresión. En operación normal este pistón permanece fijo en su posición. Esta posición se altera solo dos veces al año durante una parada, al

llegar la estación cálida y al llegar la estación fría.

En este trabajo se analiza el vástago del pistón regulador del volumen de compresión, de la cámara de compresión de un equipo compresor de gas, que falló en servicio. El elemento en cuestión es el n° 3 en el esquema de conjunto de la Figura 1. Éste fija la posición de la cabeza del pistón y de este modo regula el volumen de la cámara de compresión. La cabeza del pistón tiene aros partidos (n° 12) que ajustan contra la pared de la cámara. Además el vástago lleva una empaquetadura de sellos (n° 5,7,8,9 y 10) que impiden el escape de gas hacia el exterior. El vástago enrosca en el cabezal (n° 4) y lleva una contratuerca (n° 11). Sobre esta contratuerca no hay especificaciones de torque. El diámetro de la cabeza del pistón es 14 pulgadas. La cabeza del pistón está sometida nominalmente a compresión entre 3 y 11 Kg/cm² siendo la frecuencia de compresión de 1000 ciclos por minuto. El elemento fallado trabajó aproximadamente un año habiéndose efectuado dos ajustes de

* Trabajo presentado en el Congreso CONAMET/SAM 2006 - Universidad de Chile, Santiago de Chile.

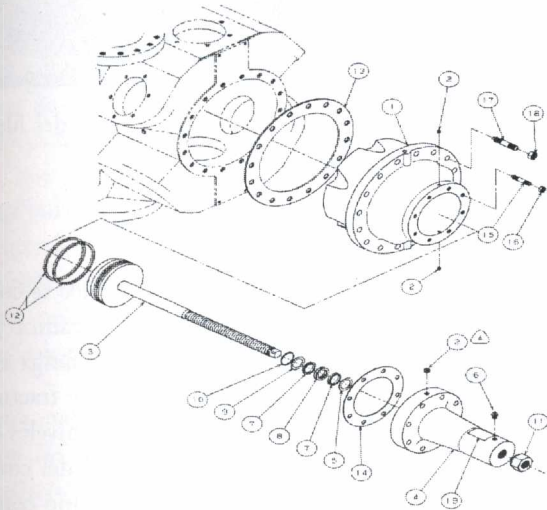
posición, en ese período, con una variación en la posición de operación de alrededor de 6 a 7 filetes de rosca del vástago.

2. Procedimiento Experimental

Se realizó un control dimensional del vástago mediante un proyector

Se practicó un análisis metalográfico macroscópico, utilizando un trozo del vástago extraído de una zona lejana a la fractura. El mismo se seccionó longitudinalmente, se rectificó y se atacó con ácido clorhídrico al 50% en ebullición. En las Figuras 3A y B se muestran el macroataque que reveló un fibrado axial que no copia el borde del filete. El roscado ha sido generado mediante herramientas de corte y no por laminación.

PARTS LIST
VVCP OUTER HEAD ASSEMBLY



H52504A, REV. B

Figura 1: Esquema de despiece del pistón de regulación de volumen de cámara.

El vástago se recibió con dos fracturas en la parte roscada, (Figura 2A y B). En la región lisa del vástago había marcas circunferenciales de escasa profundidad correspondientes a los sellos.

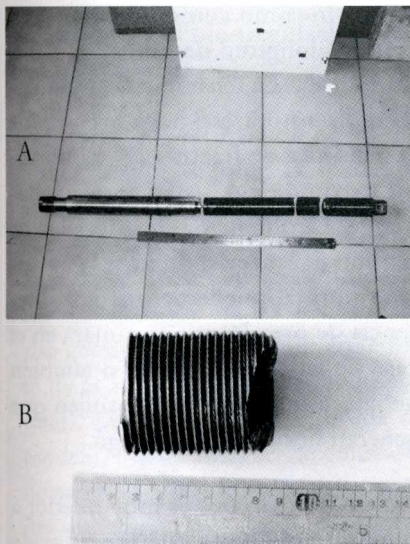
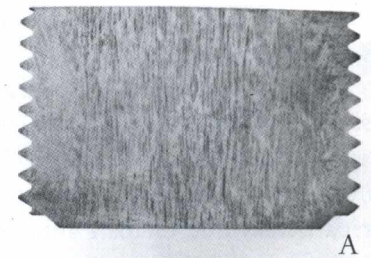


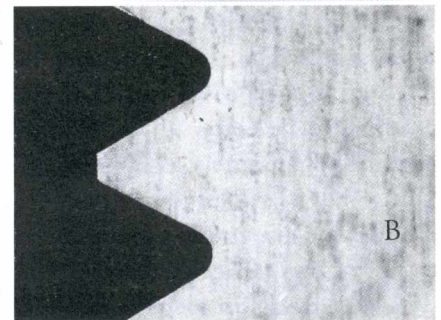
Figura 2: A) Vástago en el estado de recepción; B) Detalle del fragmento central fracturado

de perfiles resultando una rosca de 2 pulgadas, 8 hilos por pulgada, 5/64 de pulgada de profundidad de filete y ángulo de filete de 55°. Al realizar una prueba de volteo en un torno se detectó una deformación de 1 mm (máximo) en la zona cercana a la reducción de diámetro, (Figura 2A) indicado por la flecha.

Se determinó la composición química por método espectrométrico. Según se aprecia en la tabla 1 corresponde a un acero AISI-SAE 4140.



A



B

Figura 3: A) Macroataque (ac. Clorhídrico 50%); B) Detalle del corte del fibrado en el filete.

La metalografía microscópica del vástago reveló que se trata de un acero relativamente limpio con un contenido de inclusiones clasificado como tipo "A" (sulfuros) serie fina entre 1 y 2 según ASTM E 45-02.

Tabla 1. Composición química, % en peso, el resto es Fe.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
% en peso	0,29	2,86	0,89	0,017	0,031	0,89	0,08	0,19

La microestructura corresponde a martensita revenida con cementita globalizada. Normalmente en este tipo de acero se obtiene esta microestructura por temple y luego revenido largo con temperatura alta (671°C mínimo).

La dureza medida fue de HRC=31 en concordancia con la microestructura relevada. A partir de ella se estima una resistencia a la tracción de aproximadamente 980MPa.

De las dos fracturas una tenía brillo metálico y principio de oxidación (Fractura II) y la otra, perpendicular al eje del vástago, tenía depositado un residuo negruzco con finas partículas metálicas (Fractura I), ver Figura 2B. Para retirar este residuo grasoso y las partículas que estaban adheridas magnéticamente fue necesario lavar tres veces la superficie en una limpiadora ultrasónica. Las superficies de fractura se observaron con una lupa estereoscópica Leica Wild M8 con iluminación rasante. Las fotos correspondientes a la superficie de Fractura I, muestran un típico patrón de fatiga, Figura 4. El origen está ubicado en la raíz de un filete de la rosca. Presenta una zona inicial transversal al eje del vástago donde se aprecian a simple vista marcas de playa correspondientes al avance de la fisuración por fatiga. La fisuración por fatiga avanza luego con marcas de playa menos notables hasta provocar una reducción de sección transversal del orden del 80%. Finalmente aparece una tercera región cuyo plano está inclinado aproximadamente a 45° respecto del eje del vástago y que corresponde al colapso plástico final generado por la reducción de sección resistente por debajo de lo tolerable.

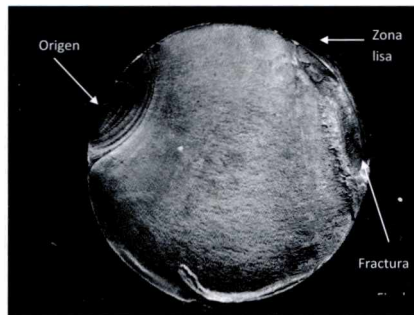


Figura 4: Superficie de Fractura I limpia con iluminación rasante, 2x.

En la Figura 4 se aprecia también la aparición de una zona de fractura lisa en la región final de la fractura del filete, que corresponde a una zona fatigada en el filete siguiente. El análisis detallado del origen de fisura muestra que no hay rayaduras, muescas, ni otros defectos macroscópicos iniciadores de fisuración por fatiga, más allá de la existencia de concentración de tensiones natural de la raíz del filete de rosca. La gran reducción de sección resistente previa al colapso final indica una solicitación con bajas cargas y alto número de ciclos a la falla. La presencia de gran cantidad de partículas metálicas adheridas a la superficie de fracturas señala que el componente trabajó en fatiga con un R negativo (tracción-compresión). El problema de fatiga probablemente es generalizado ya que en el filete inmediato a la superficie de Fractura I se encontró fisuración en la base, Figura 5.

El análisis detallado por microscopía electrónica de barrido confirmó lo establecido por la fractografía óptica para la Fractura I y descartó la Fractura II como causal de la falla al corroborar en ella una sobrecarga.

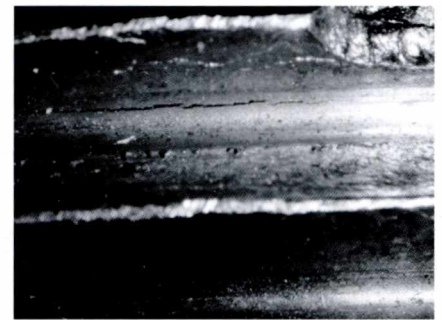


Figura 5: Fisura en la base del filete siguiente a la Fractura I.

3. Resultados y Discusión

En base a los análisis previos se consideró un cálculo de mecánica de fractura para evaluar si la fatiga encontrada en la superficie de fractura I produjo la fractura a los niveles de tensión de trabajo normal del componente. Para este fin se tomó como factor intensidad de tensiones crítico $K_{IC} = 105 \text{ MPam}^{1/2}$ para el material. Se lo estimó en un 15% más que los máximos hallados en bibliografía [1] que correspondían a un acero tipo SAE 4140 en estado templado y revenido con menor temperatura de revenido (482°C). Se consideró al elemento como cilindro roscado [2], con una longitud de fisura por fatiga de 39 mm. La tensión en el momento de la rotura estimada a partir de la mecánica de fractura [2] da un valor máximo de 42 MPa aproximadamente. La obtención de este valor de tensión en tracción durante la operación normal puede ocurrir por diferencia de presión con la cámara en el caso de sellos no estancos o también debido a fenómenos de pandeo que generan flexión en el vástago.

Por cierto, ese valor es muy inferior a la tensión de rotura estática estimada para este material (980 MPa). Por otra parte, si bien el límite de fatiga del material base SAE 4140 para el va-

lor de dureza dado está en torno a los 400MPa, éste cae bruscamente para elementos entallados [3]. Con una concentración de tensiones de 2,2 se encuentra alrededor de 200MPa [3]. Para una rosca mecanizada la concentración de tensión se eleva a 5-6 con lo que haría descender el límite de fatiga aún más, probablemente por debajo de 100MPa. Dada la frecuencia de operación del elemento y el tiempo que estuvo en operación, cumplió una vida de aproximadamente 5 millones de ciclos, en concordancia con lo estimado a partir del nivel de tensión calculado a la rotura y al límite de fatiga estimado.

Una mención especial merece el hecho de fatigarse a R negativo. Las tensiones de tracción causantes del fenómeno fueron probablemente generadas por el pandeo del vástago. Este pandeo sería anterior al evento de la fractura como lo indicarían las características de las marcas dejadas por las empaquetaduras en el trozo liso. El pandeo puede provenir de problemas en la fabricación del vástago, problemas en el montaje o eventualmente en el uso (regulaciones del volumen de cámara).

Para realizar la estimación de las tensiones actuantes sobre la rosca que generaron la fatiga, se realizó un cálculo por elementos finitos. Se utilizó un modelo axilimétrico bidimensional del vástago, Figura 6A, con un alto grado de densificación en la parte de la rosca (22.087 elementos en total). Las condiciones de borde del modelo, Figura 6B y C, se colocaron de acuerdo a la posición del vástago durante el servicio; y con el objetivo de obtener una distribución de tensiones en los filetes, según la bibliografía de referencia [4]. El análisis fue

realizado considerando el material elástico lineal, isotrópico y homogéneo, partiendo de las dimensiones

medidas del vástago. Para el cálculo se utilizó el programa de elementos finitos ALGOR.

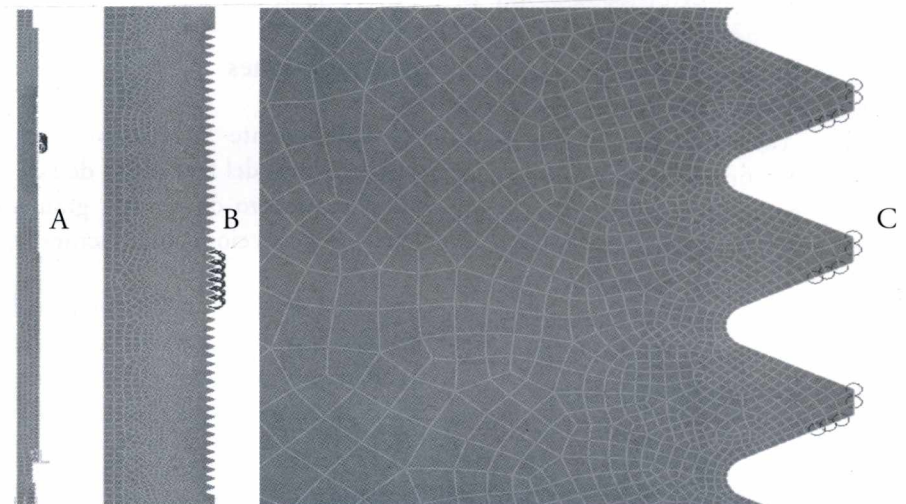


Figura 6: A) Modelo axilimétrico del vástago con sus respectivas condiciones de contorno y carga; B) Sección modelada de la rosca y ubicación de las condiciones de bordes; C) Condiciones de borde sobre los filetes de rosca.

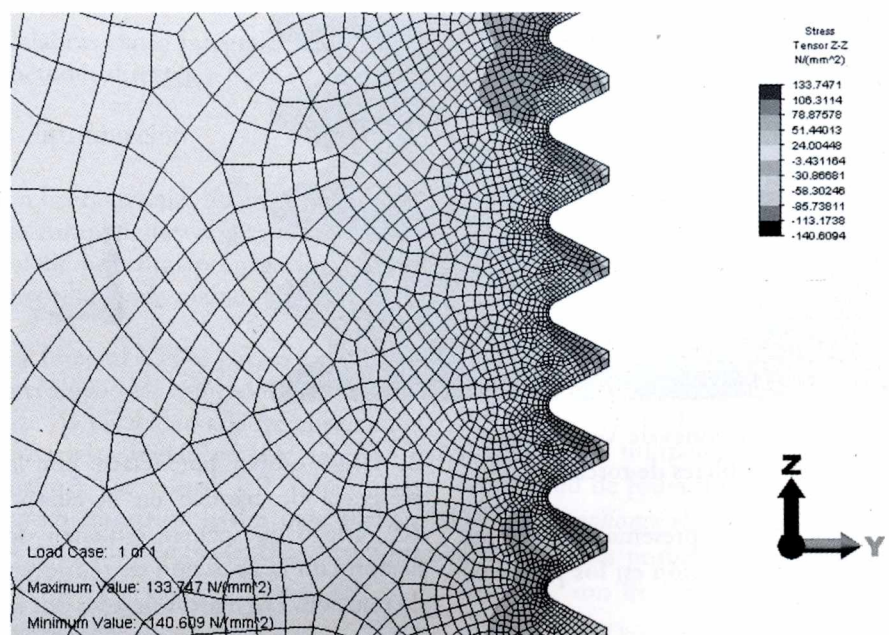


Figura 7: Tensiones Axiales en los primeros filetes de rosca

Para la condición de succión del equipo compresor, se observa que las tensiones normales al plano transversal del vástago tienen un valor promedio de 17 MPa en la zona central (área clara de la Figura 7). Mientras que en la raíz de los

filetes se produce una alta concentración de tensiones, llegando a un valor máximo de 133,75 MPa en el primer filete, Figuras 7 y 8. Esta máxima tensión, es aproximadamente un 15 % mayor que el obtenido por la bibliografía de referencia [5]; asegurándose un resultado conservativo. Los valores calculados por el método de elementos finitos se corresponden en líneas generales con los presentados por las bibliografías de referencia. Esto fortalece la bondad del modelo de cálculo, tanto en la elección del mallado como en la colocación de las condiciones de borde y cargas.

Estos valores y la concentración que produce el tener una rosca fabricada por corte confirman el desarrollo de fatiga, con niveles de tensiones aplicadas muy bajos.

4. Conclusiones

El componente se fracturó como consecuencia del fenómeno de fatiga de alto número de ciclos y gran reducción de sección (sup. fractura I).

El material base resulta adecuado para el uso, presentando buenas características metalúrgicas (composición, inclusiones, microestructura).

empaquetadura de los sellos indican que este problema estuvo presente prácticamente desde el comienzo de la operación del equipamiento. El maquinado por corte de la rosca del vástago disminuyó la vida a la fatiga agudizando el problema.

El resultado del modelo de elementos finitos y la estimación del límite de fatiga para la rosca fabricada por corte, confirmaron el desarrollo del problema a tensiones de operación normal. La laminación de las roscas es lo indicado en equipamiento sometido a fatiga aún en aquellos elementos aparentemente "inertes".

Referencias

1. ASM Handbook Volume 19 Fatigue and Fracture, segunda impresión 1997, ASM International, pags. 621-622.
2. ASM Handbook Volume 19 Fatigue and Fracture, segunda impresión 1997, ASM International, pags. 994-995.
3. ASM Atlas of Fatigue Curves , H. E. Boyer editor, 1986, pags. 91-93.
4. ROGER CAZAUD, "Fatigue of Metals"; 1953, Chapman & Hall Ltd.
5. RUDOLPH E. PETERSON, "Stress Concentration Factors"; 1973, John Wiley and Sons, Inc.

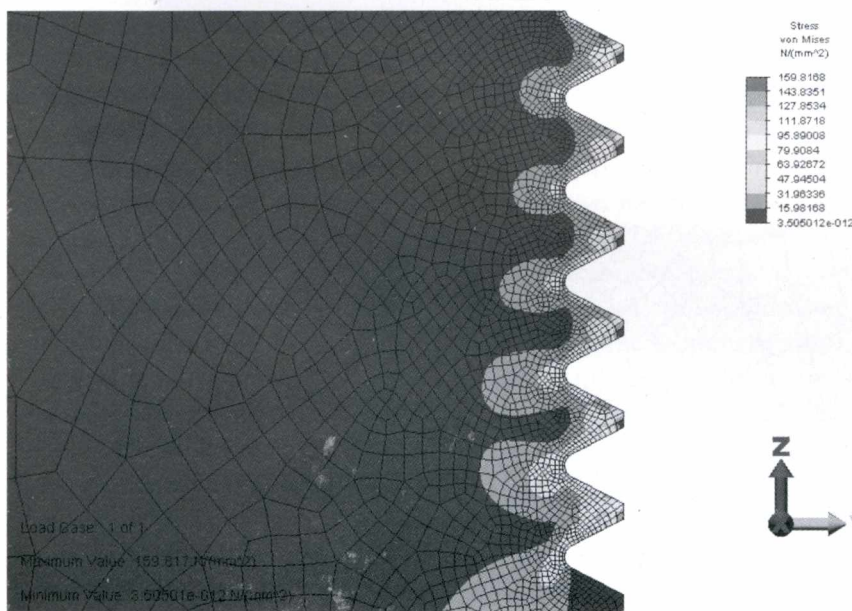


Figura 8: Tensiones de Von Mises en los primeros filetes de rosca.

En la tabla 2 se presentan los valores máximos de tensión en los primeros filetes de rosca.

La fatiga estuvo potenciada por la presencia de pandeo en el cuerpo del vástago que genera esfuerzos de flexión con la aparición de tensiones de tracción. Las marcas dejadas por la

Filete	1	2	3	4	5	6
Tensión (MPa)	133,75	77,8	59,5	49,0	41,7	35,77