



II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica

Análisis de Falla del Vástago de un Compresor, aplicando Simulación Computacional a partir de un modelo de Elementos Finitos Estudio de Vibraciones y Fatiga

H. Sanzi y M. Kowal

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Haedo
París 532 Haedo (1706) Buenos Aires Argentina
E-mail tecsaing@tecsaing.com.ar

RESUMEN

En el ámbito de las instalaciones de gas natural, tales como plantas compresoras y estaciones de medición o regulación, funcionan "Elementos Mecánicos" de pequeña o mediana magnitud, que deben ser diseñados correctamente para asegurar durante el servicio, a partir de un adecuado mantenimiento y control, una operación segura a lo largo de su vida útil.

En algunos tipos de compresores, debido a la cercanía de fuentes de cargas cíclicas, la presión del gas puede transmitir pulsaciones de baja amplitud y alta frecuencia, por lo que estos elementos estarán sometidos a tensiones cíclicas acentuadas en aquellas zonas donde se presentan concentraciones estructurales, tales como uniones roscadas, ahusamientos, cambios de espesores, entre otros. En estos casos, los materiales que se encuentran operando en estas condiciones, están expuestos a posibles mecanismos de daño, que pueden acortar su vida útil y eventualmente causar la falla, dependiendo de su calidad y resistencia.

Los principales mecanismos de falla en este tipo de componentes, son las vibraciones y la fatiga, acentuadas a través de un inadecuado diseño desde el punto de vista dimensional y resistivo e intensificados cuando pueden actuar sobre la propagación de defectos previos, introducidos durante la fabricación de la pieza o iniciarse durante el servicio como consecuencia de alcanzar niveles de exigencia no contemplados en la etapa de diseño.

En el presente trabajo, se presentan los principales resultados que fueron obtenidos de un estudio de integridad, realizado sobre el vástago roscado de un compresor rotativo, consecuencia de su rotura durante el servicio, en donde se ha analizado principalmente la influencia dinámica del componente y su resistencia a la fatiga a través del planteo de un modelo tridimensional de Elementos Finitos.

Palabras claves: Bomba, Vibraciones, Elementos Finitos

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se analiza la falla producida en el vástago de regulación de un equipo compresor de gas que opera en una planta compresora.

Para determinar la causa de la falla se realizaron diferentes estudios, tales como control dimensional y visual, análisis químicos, ensayos de dureza, metalografías, estudios fractomecánicos y un análisis de integridad estructural, incluyendo fatiga y vibraciones, utilizando técnicas computacionales a partir del Método de Elementos Finitos.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de dicho estudio con el objeto de determinar las posibles causas que originaron la falla.

2. GEOMETRIA DEL VÁSTAGO, DATOS DEL MATERIAL Y CARGAS PRESENTES

En la Figura 1, se presenta un esquema del despiece del componente, que fue tomado del manual del equipo, y en donde se muestra la disposición del vástago que sufrió la falla, el cual esta identificado con el número "3".

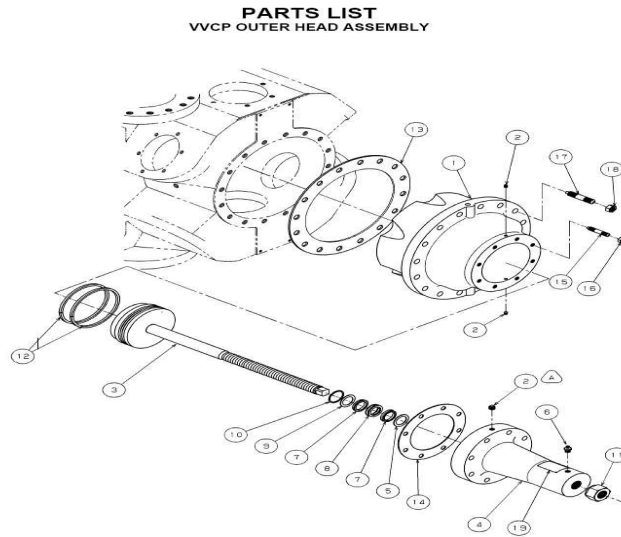


Figura 1: Despiece del equipo compresor

La finalidad del vástago es la de fijar la posición de la cabeza del pistón y de este modo regular el volumen de la cámara de compresión. La cabeza del pistón, de 14 pulgadas de diámetro, tiene aros partidos (Posición 12), los cuales se ajustan contra la pared de la cámara. El vástago lleva una empaquetadura de sellos (Posiciones 5, 7, 8, 9 y 10) que impiden el escape del gas hacia el exterior. Finalmente, el vástago se enrosca en el cabezal (Posición 4) y se ajusta mediante una contratuerca (Posición 11).

Las principales dimensiones fueron tomadas de dicho manual y de otras obtenidas por medición en el laboratorio, como es el caso de la rosca que fue realizada con un calibre y un proyector de perfiles. Se confirmó el tipo de material del vástago mediante un análisis de su composición química, a través de un Espectrómetro, siendo del tipo SAE 4140. En la Tabla I, se indican los elementos encontrados:

Tabla 1: Composición Química del Material

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
% en Peso	0,41	0,89	0,29	0,02	0,03	0,89	0,08	0,19

H. Sanzi y M. Kowal

Las presiones actuantes sobre la cabeza del pistón, son de 3 Kg/cm^2 en la succión, y 11 Kg/cm^2 en la descarga, mientras que la frecuencia del ciclo de compresión es de 1000 rpm.

El compresor, desde su puesta en operación, funcionó alrededor de 10.000 horas, que resultan en un tiempo de funcionamiento del orden de los 60×10^7 de ciclos.

3. CARACTERIZACION DEL VÁSTAGO FRACTURADO

Las diferentes partes fracturadas del vástago y su identificación, se muestran en la Figura 2. La primera superficie de fractura (F1) esta ubicada entre las partes identificadas como P-2 y P-3, y la segunda superficie de fractura (F2) esta ubicada entre P-3 y P-4. El corte entre P-1 y P-2, se corresponde con un mecanizado realizado en taller para el envío del conjunto de partes al laboratorio para realizar los ensayos que caracterizan al material.

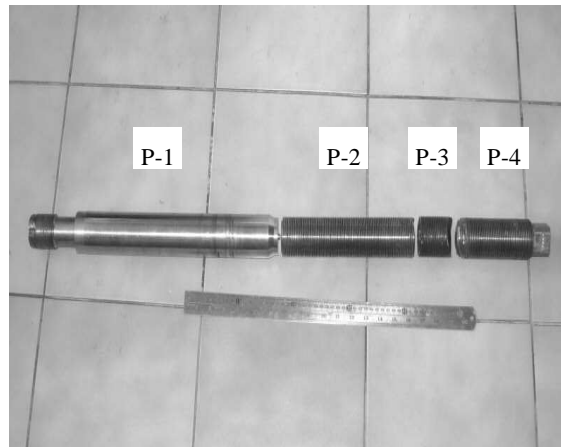


Figura 2: Reconstrucción del vástago y zonas de fractura.

La parte P-1 presenta marcas circunferenciales profundas sobre uno de sus lados, del orden de los 0,2-0,3 mm, Figura 3, mientras que sobre el lado opuesto no se detectan marcas. Dichas marcas, se corresponden con la ubicación de la empaquetadura de sellos y se produjeron durante el servicio por efecto de rozamiento.

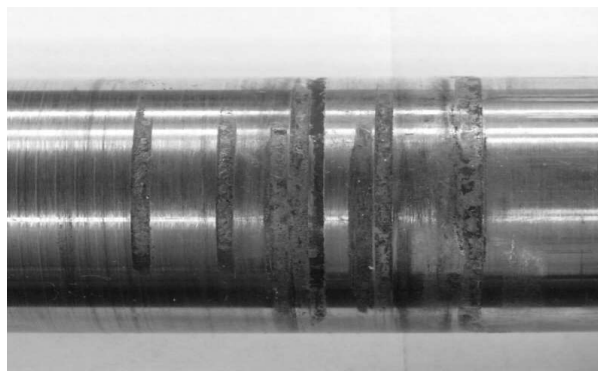


Figura 3: Detalle de las marcas circunferenciales

H. Sanzi y M. Kowal

El aspecto de las superficies de fractura F1 y F2 es de naturaleza diferente, Figuras 4 y 5. La superficie F1 tiene un residuo negrozco con partículas en toda su extensión, mientras que la superficie F2 presenta un brillo metálico y un principio de oxidación. Por otro lado, en ambas partes de la superficie F1, se aprecian las “Marcas de Playa” debido al efecto de la fatiga

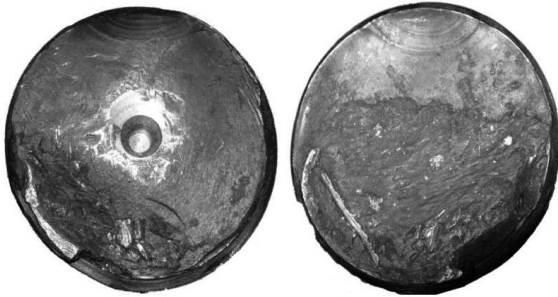


Figura 4: Superficie F1 (P-2 y P-3)

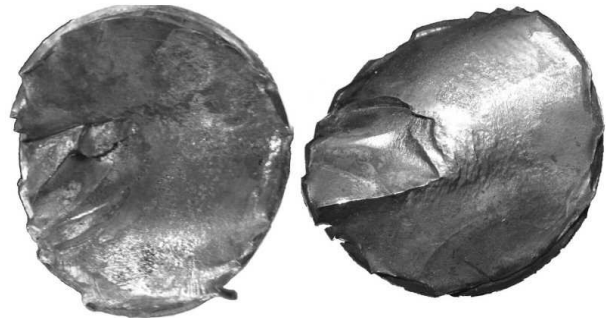


Figura 5: Superficie F2 (P-3 y P-4)

Por otro lado, una inspección sobre el vástago detectó una desalineación transversal del mismo que alcanza a un máximo de 1 mm en la zona inmediata a la reducción del diámetro, Figura 6 señalado con flecha blanca. Esto nos lleva a deducir que el vástago se encontraba deformado durante su operación final, antes de la rotura, pero no contamos con la información sobre el valor inicial.

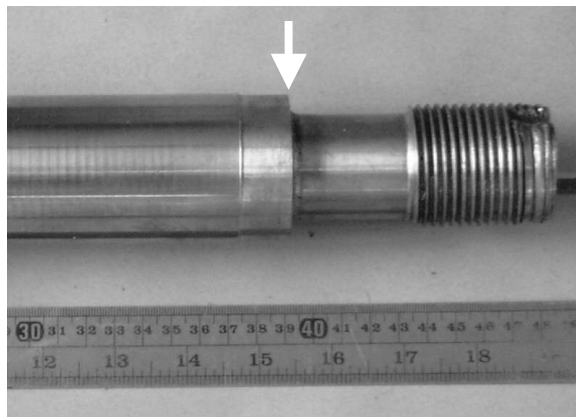


Figura 6: Deformación transversal máxima.

4. ENSAYOS DE LABORATORIO Y REVISION DEL DISEÑO

Se realizaron diferentes ensayos de laboratorio sobre el material, con el objeto de evaluar las posibles causas de la falla, a saber:

- Medición de dureza y estimación de la resistencia a tracción
- Metalografía macroscópica y microscópica
- Fractografías

H. Sanzi y M. Kowal

Análisis de Falla del Vástago de un Compresor, aplicando Simulación Computacional a partir de un modelo de Elementos Finitos
Estudio de Vibraciones y Fatiga

De los estudios realizados se desprende que:

- Las observaciones tanto microscópicas como macroscópicas de la zona de fractura, permitieron determinar el tipo de material del vástago (calidad, tratamientos térmicos, etc) y conocer y evaluar el proceso de fabricación de la rosca, siendo ambos adecuados para las condiciones de servicio a las cuales se encuentra sometida la pieza.
- Del análisis fractográfico, la reducción de la sección resistente previa al colapso final fue muy importante (80%). Esto indica una buena ductilidad del material y verifica su correcta selección.
- Con respecto a la morfología de la zona de fractura, se puede decir que se corresponde con la que presenta una típica propagación por fatiga mecánica, causada por cargas cíclicas procedente de Flexión Alternativa.

Adicionalmente, con objeto de evaluar el adecuado diseño del vástago, se realizaron los siguientes estudios:

- Determinación de las tensiones máximas axiales alcanzadas en la zona de la rosca [1,6,7], y compararla con la admisible del material. En todos los casos se encontraron valores admisibles.
- Estudio de inestabilidad [6,7] sobre el vástago, para determinar su carga crítica, el cual demostró que dicha carga es lo suficientemente elevada para descartar este fenómeno.
- Estudio fractomecánico en el filete de la rosca [3,4,6,10], para determinar la carga máxima que se debe aplicar sobre el vástago, para propagar una fisura de dimensiones determinadas, lo cual demostró que dicha carga sería muy elevada o las dimensiones de la fisura original, a partir de la cual la misma se propagaría es ciertamente improbable.
- Análisis de fatiga (predictivo) [2,4,5,6,8,10], para determinar los ciclos admisibles operativos, el cual demostró que el máximo nivel alcanzado no es suficiente para provocar la falla por fatiga del vástago.

De dichos estudios se asegura que el diseño del vástago cumple adecuadamente para las condiciones normales de servicio para el cual fue diseñado.

5. HIPOTESIS DE FALLA

A partir de los resultados obtenidos, tal como se comentaron en los puntos anteriores, se llevó a cabo un análisis estructural del vástago para determinar su comportamiento, especialmente en la zona roscada, considerando un desplazamiento de su extremo, en la dirección transversal. Posteriormente se determinarían las frecuencias propias del vástago, con el objeto de compararlas con la que resulta de su funcionamiento.

Para el análisis estático, considerando la simetría geométrica y de cargas del vástago respecto a su plano medio, se plantea medio modelo tridimensional de elementos finitos, incluyendo su rosca, colocando las condiciones de borde que se corresponden con las de simetría, es decir, restricción de desplazamientos transversales a dicho plano y de giros respecto al eje longitudinal del vástago. En la Figura 7 se presenta el modelo conformado por 68.750 elementos del tipo "Sólido".

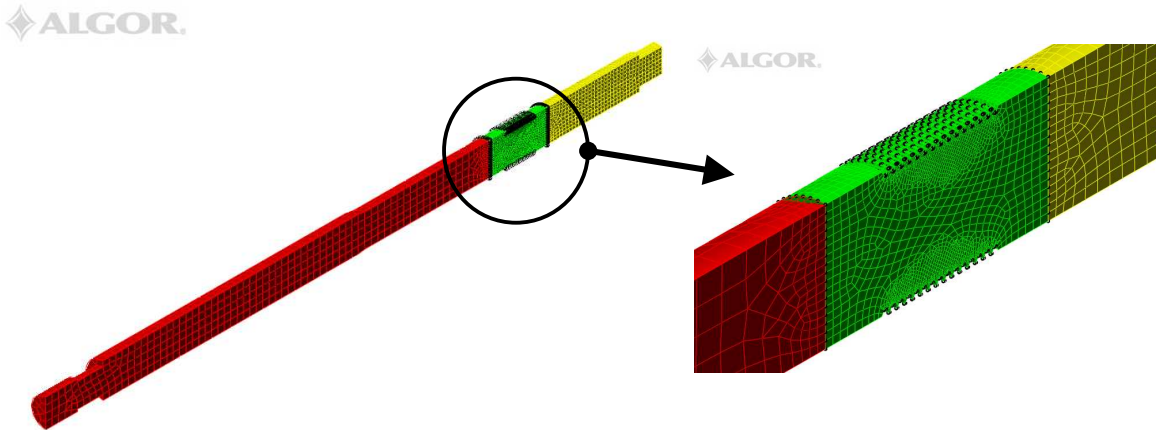


Figura 7: Modelo de Elementos Finitos Tridimensional

Del análisis, se determina el máximo desplazamiento transversal que produce una tensión axial necesaria para alcanzar el inicio de la fatiga, actuando simultáneamente la presión de succión. Dicho valor es de 0,3 mm, Figura 8.

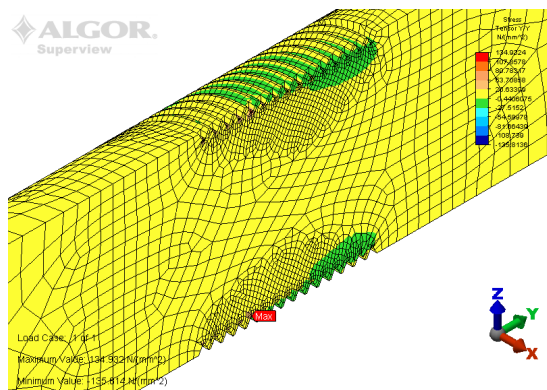


Figura 8: Estado Tensional en la zona de la rosca cuando se aplica un desplazamiento transversal de 0.3 mm, en el extremo del vástago

H. Sanzi y M. Kowal

Análisis de Falla del Vástago de un Compresor, aplicando Simulación Computacional a partir de un modelo de Elementos Finitos
Estudio de Vibraciones y Fatiga

Para el análisis de frecuencias, se considera el modelo completo, con el objeto de encontrar los modos no simétricos de vibración, teniendo en cuenta la frecuencia de impulsión del equipo, de 1000 rpm / 60 min = 16.66 Hz. La frecuencia más baja del vástago es de 258.5 Hz para el primer modo simétrico, por lo cual se desprende que las frecuencias propias del elemento estructural están alejadas de la excitación. En la Figura 9 se presentan solo el Primer Modo de Vibración.

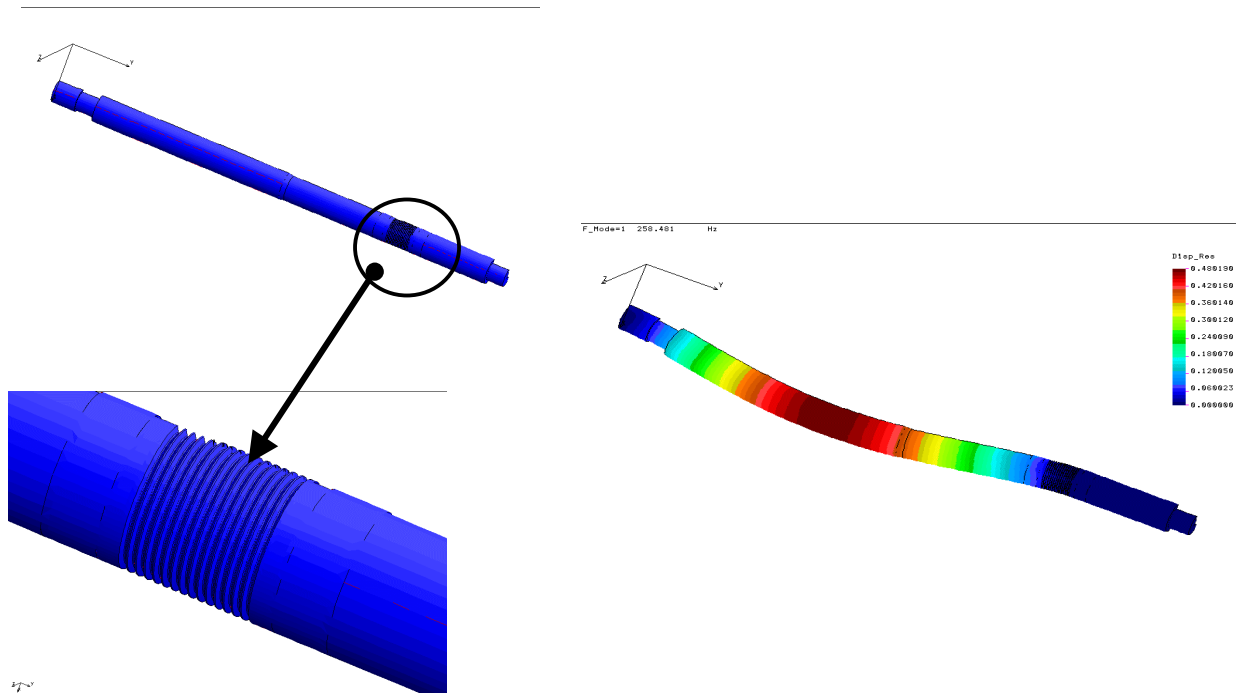


Figura 9: Primer Modo de Vibración del Vástago

Adicionalmente, se ha verificado, que incorporando el resto de los elementos estructurales que conforman la cadena cinemática, la frecuencia propia atribuible al vástago, resulta superior a la de funcionamiento.

6. CONCLUSIONES Y DISCUSION DE RESULTADOS

En este trabajo se presentaron los resultados obtenidos de un estudio de Integridad Estructural, realizado ante la rotura aparente, después de una primera inspección in situ, de un vástago roscado de un equipo compresor, por efectos de fatiga o vibraciones.

De una primera inspección sobre el vástago, se detectó una desalineación transversal del mismo del orden del milímetro, en la zona inmediata a la reducción del diámetro, respecto a su extremo.

Previo al análisis de falla, se realizaron diferentes ensayos de laboratorio sobre la pieza fracturada, que permitieron confirmar la calidad del material y verificar el adecuado dimensionamiento o diseño del vástago.

Posteriormente, se presenta una hipótesis de falla, aplicando Simulación Computacional a partir del Método de Elementos Finitos, con el objeto de:

H. Sanzi y M. Kowal

Análisis de Falla del Vástago de un Compresor, aplicando Simulación Computacional a partir de un modelo de Elementos Finitos
Estudio de Vibraciones y Fatiga

- 1.- Evaluar el estado tensional del vástago, en especial la zona de rosca, frente a un desplazamiento impuesto en el extremo del mismo, del orden del milímetro
- 2.- Encarar un estudio de frecuencias, para verificar que las mismas se encuentran alejadas de la frecuencia de impulsión del equipo, para descartar la posibilidad de resonancia y eventualmente pequeños vibraciones que puedan provocar efectos de fatiga.

De los estudios realizados, se concluye que:

- ✓ La presencia de una desalineación en el cuerpo del vástago, del orden de las 3 décimas de milímetros, fueron suficientes para generar esfuerzos de flexión alternativa, desarrollando tensiones de tracción cuya magnitud, permitieron alcanzar el límite de fatiga del material.
- ✓ La frecuencia propia más baja del vástago esta lo suficientemente alejada de la de excitación del equipo, por lo cual se descarta mecanismos de falla por vibraciones.
- ✓ La implementación de técnicas de cálculo de Elementos Finitos, ha proporcionado resultados con un grado aceptable de exactitud, que permitieron tomar decisiones y encarar rápida y eficazmente la solución del problema, proponiendo una modificación en el diseño y controles durante la operación en otros compresores similares instalados en la planta, con el objeto de evitar fallas futuras en el mismo.

7. REFERENCIAS

- [1] G. Haviland, Designing with Threaded Fasteners, Mechanical Engineering, 1983.
- [2] H.O. Fuchs, Metal Fatigue in Engineering, 1980.
- [3] D. Broek, Elementary Engineering Fracture Mechanics, 1982.
- [4] ASM Handbook Volume 19, Fatigue and Fracture, 1997.
- [5] H. E. Boyer, ASM Atlas of Fatigue Curves, 1986.
- [6] J. E. Shigley, C. R. Mischke, R. G. Budynas, Mechanical Engineering Design, McGraw Hill, 2003.
- [7] P. A. Stiopin, Resistencia de Materiales, Editorial MIR, 1976.
- [8] R. Cazaud, Fatigue of Metals, 1953.
- [9] ALGOR Finite Element Design Software, Algor Inc., 1998.
- [10] Rudolph E. Peterson, Stress Concentration Factors, 1973

H. Sanzi y M. Kowal

Análisis de Falla del Vástago de un Compresor, aplicando Simulación Computacional a partir de un modelo de Elementos Finitos
Estudio de Vibraciones y Fatiga