

Análisis de la vida residual de un conjunto industrial ventilador-eje para extracción de gases, en contexto de riesgo y sustentabilidad

Gareca, Edith¹; Antequera, Teresa¹ y Tolabín, Edmundo.²

(1) *Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy.*
agareca@gmail.com; tessantequera@gmail.com.

(2) *Empresa Tolabin Consulting, Ingeniería y Servicios END.*
etolabin@gmail.com

RESUMEN

La operación de equipos industriales sometidos a altas cargas mecánicas y térmicas de elevadas temperaturas, requiere de estrategias que combinan seguridad y confiabilidad con aspectos económicos. En este contexto, la evaluación periódica del estado de los equipos de la planta es fundamental para la toma de decisiones relacionadas con funcionamiento, reparación y/o reemplazo de dichos equipos. En estos casos, se encuentran involucrados la confiabilidad operacional y la seguridad que se establecen en programas de mantenimiento basados en análisis de riesgo y la evaluación de la vida residual a través de las herramientas brindadas la ingeniería de materiales. Las bases de este análisis son las inspecciones periódicas de equipos críticos tales como hornos, ventiladores, molinos y enfriadores, que permiten detectar en forma predictiva, degradaciones del material que pueden comprometer la integridad de estos equipos. En este trabajo se expone el programa de control desarrollado durante un periodo prolongado de operación del conjunto ventilador-eje del sistema de extracción de gases de un horno de cemento que derivó en la previsión de reemplazo, luego de haber determinado la aproximación del fin de vida en servicio.

ABSTRACT

The operation of industrial equipment subjected to high mechanical loads and high temperature thermal loads requires strategies that combine safety and reliability with economic aspects. In this context, the periodic evaluation of the plant equipment is essential in order to make decisions regarding operation, repair or replacement such equipment. When operational reliability and safety are involved, they should be a established maintenance program based on risk analysis and the evaluation of residual life through the materials engineering tools. The bases of this analysis are the periodic inspections of critical equipment such as kilns, fans, mills and coolers, which allow the predictive detection of material degradations that can compromise the equipment integrity. In this work, the control program developed during a prolonged period of operation of the fan-shaft assembly of the gas extraction system of a cement kiln is exposed, Analysis led to the forecast of replacement, after having foreseen the end of the fan-shaft assembly service life

Palabras claves: Control- Equipos -Confiabilidad operacional- Vida residual

Keywords: Control – Equipment – Operational reliability – Residual life

1. INSTRUCCIONES

Los equipos industriales que operan a altas temperaturas, con elevada carga mecánica y un gran número de revoluciones presentan alta criticidad en su operación y mantenimiento, por lo cual se les deben realizar controles periódicos para determinar el nivel de integridad y confiabilidad de funcionamiento. Este es el caso de extractores de gases calientes de un horno de Clinker conformado por un conjunto ventilador-eje de acero. Debido a las exigentes condiciones de servicio, la vida útil

prevista, en general sufre modificaciones que deben ser relevadas para prever el recambio del citado conjunto antes de su colapso catastrófico. En el caso del ventilador, los parámetros que permiten determinar el estado de degradación son el cambio de la microestructura, la presencia de microfisuras en zonas cercanas a las soldaduras, la pérdida de espesores de alabes y paredes laterales y la dureza. En relación al eje, construido en acero forjado, se controla el desgaste en zonas de alojamiento de rodamientos, la presencia de fisuras internas, el estado de la superficie y la dureza. A

través del tiempo de operación habitualmente se aplica un programa de mantenimiento y control programado de manera de lograr un funcionamiento eficiente del equipo. En este sentido la concepción del mantenimiento en las últimas décadas, ha evolucionado desde la acción meramente reactiva a la aplicación de criterios de riesgo y confiabilidad, adquiriendo un mayor énfasis en la misión de mantener los equipos o activos en la máxima disponibilidad, a fin de poder garantizar una producción continua (Aguilar Otero, 2010). Este cambio responde a diversos factores, entre ellos, la disponibilidad de nuevos aceros, diseños mucho más complejos, una conciencia creciente de la conexión entre mantenimiento y calidad del producto y un requerimiento cada vez mayor de alcanzar un alto rendimiento de la producción y control de costos (Hung, 2009). Las expectativas sobre los resultados del mantenimiento y control son hoy en día mucho mayores, lo cual ha llevado a la utilización de técnicas de avanzada con conceptos novedosos que permiten romper los paradigmas tradicionales en todo su contexto. Se trata de aplicar controles y acciones de mantenimiento que incluyan cada uno de los factores antes mencionados para lograr la reducción de las averías imprevistas y tiempos de reparación, prolongar la vida útil del equipo, reducir costos de mantenimiento y contribuir a mejorar la calidad y cantidad de los productos (Moubray, 2000), en un contexto de seguridad y cuidado del ambiente. En este trabajo se expone el programa de control desarrollado durante un periodo prolongado de operación del conjunto ventilador-eje, que derivó en la previsión de reemplazo al haber determinado la aproximación del fin de vida en servicio, mediante la utilización de técnicas de la Ingeniería de Materiales. El aporte de este trabajo permitió establecer la importancia de incluir estas técnicas asociadas a criterios de confiabilidad en el mantenimiento de equipos industriales, ya que un activo físico debe operar en un contexto de sustentabilidad (Hung,2009). Esto, teniendo en cuenta que el tiempo requerido para lograr un nuevo equipo constituye un factor altamente incidente dado que debe ser fabricado con tecnología de avanzada para lograr un conjunto con alta calidad de aceros y balanceo dinámico, existiendo muy pocos centros de fabricación.

2. DESARROLLO

2.1 Componentes de Estudio

2.1.1 Descripción general

El objeto de estudio es un conjunto Eje-Ventilador. Como se planteó en el punto anterior, pertenece al sistema de ventilación de gases de un horno de producción de Clinker y, por lo tanto, extrae gases calientes trabajando a temperaturas de entre 300 y 550°C. Su instalación data del año 1997. El conjunto opera a 1000 rpm y tiene un peso total de 4,5 Tn. El peso del ventilador es de 1,5 Tn, con un diámetro de 2,5 m. En las Fig. 1, 2 y 3 se presentan los esquemas de estos componentes y en las Fig 4 y 5, fotografías de los álabes del ventilador y zona de acople del eje.

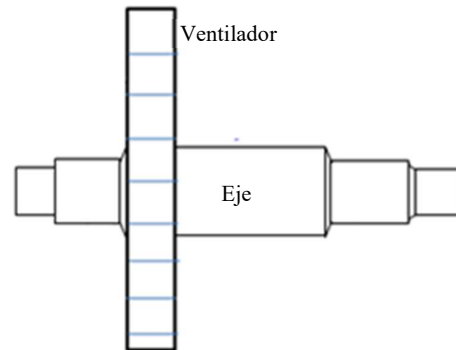


Figura 1: Esquema del conjunto de Eje y Ventilador.

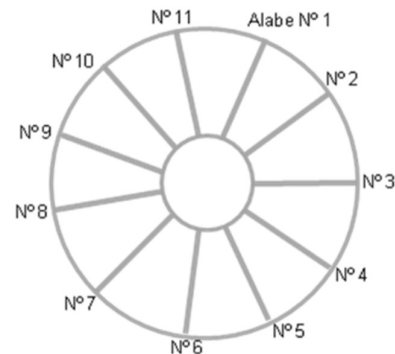


Figura 2: Esquema del ventilador, con numeración de álabes

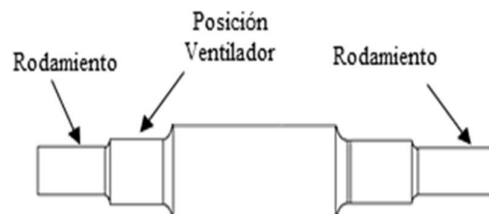


Figura 3. Esquema del eje. Se destaca la posición del ventilador



Figura 4. Fotografía de los álabes del ventilador. Se puede observar parte de la carcaza.



Figura 5. Fotografía del eje. Se puede observar el acople del ventilador.

2.1.2. Calidad de los aceros de cada componente

El acero del ventilador es del tipo estructural, ASTM A36. Se trata de un acero al carbono, de buena ductilidad, soldabilidad y aceptable resistencia mecánica. Su composición química responde al detalle de la siguiente tabla:

Tabla 1. Composición química del acero del ventilador (% en peso)

C	Mn	Si	P	S	Al
0.18	0.62	0.33	0.016	0.021	0.029

El acero del eje es SAE 4120, forjado con tratamiento térmico de temple y revenido. Su dureza es de 320 HB. El acero es adecuado para una pieza que se encuentra destinada a trabajo mecánico de transmisión de potencia a altas revoluciones. Su composición química responde al detalle de la siguiente tabla:

Tabla 2. Composición química del acero del eje (% en peso)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
0.21	0.86	0.29	0.009	0.021	0.55	0.22

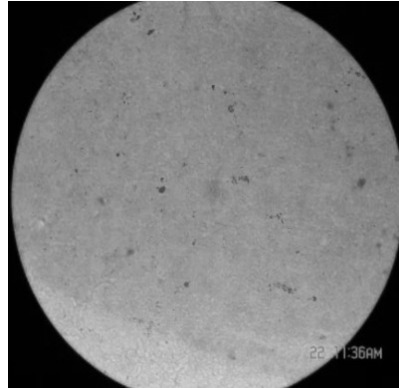
2.2 Evaluación de la integridad del ventilador

2.2.1 Análisis microestructural

En las Fig 6 y 7 se pueden observar el estado microestructural de un álabe del ventilador, correspondiente a los años 2004 y 2011, respectivamente. Comparando estos estados, se

puede apreciar claramente, el aumento de precipitados de microfases. En la Fig. 7, se tiene además, la aparición de microfisuras, comenzando a comprometer la integridad del ventilador,

Figura 6. Microfotografía del álabe N° 5 del



ventilador. Año 2004. Se puede observar una tenue precipitación de microfases tipo carburos.

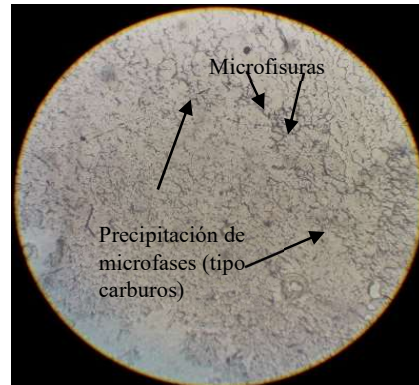


Figura 7. Microfotografía del álabe N° 5. Año 2011.

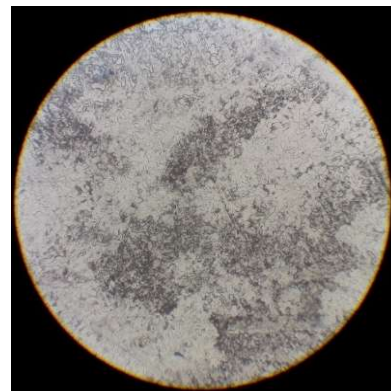


Figura 8. Microfotografía del álabe N° 5. Se puede observar la precipitación intensa de microfases. Año 2018.

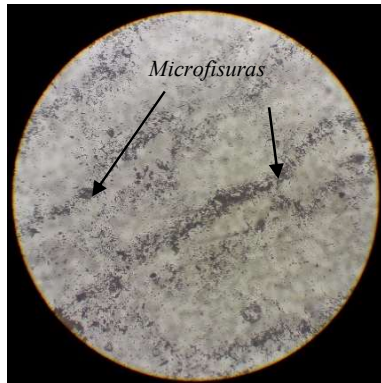


Figura 9. Microfotografía del álabe N° 5. Se observa unión de microfisuras. Año 2018.

El análisis micrográfico muestra claramente como la microestructura va presentando novedades según el paso del tiempo. La precipitación de microfases va en aumento, como también la aparición de microfisuras, con coalescencia. Inicialmente la precipitación de estas microfases pueden endurecer el acero y esto a su vez, compensarse por el ablandamiento de trabajo a alta temperatura. La aparición de microfisuras, al grado de que llegan a unirse, debe ser tenido en cuenta, ya que es el signo más evidente de que la microestructura se encuentra degradada.

2.2.2 Medición de Dureza

Para evaluar el efecto de la fluencia lenta a temperatura (Creep), se realizaron mediciones de dureza en los distintos años en que se llevaron a cabo las inspecciones. Los resultados muestran que la dureza ha disminuido considerablemente con el transcurso del tiempo y la exposición del material a carga y temperatura. Las mediciones de dureza se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de dureza

Año	2004	2007	2011	2018
Dureza HB	187	164	136	120

La pérdida de dureza detectada en alabes del ventilador, es consistente con el desarrollo de creep por efecto del calor y la carga mecánica que soporta este elemento durante prolongados períodos de servicio

2.2.3 Pérdida de espesor de los álabes

Se controló también el espesor de los álabes. En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos para el álabe N° 9, en el período de tiempo de control. Se observa la disminución de espesor, con una reducción de la sección efectiva de casi un 10 %. Esto puede atribuirse a que los álabes presentan

corrosión generalizada con exfoliación en sectores de unión con placas laterales, como puede verse en la Fig. 10

Tabla 3. Medición de espesor. Álabe N° 9.

Año	2004	2007	2011	2018
Espesor (mm)	18	17.7	17.3	16.2

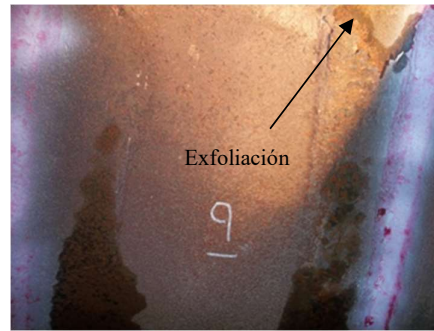


Figura 10. Sector inferior izquierdo del álabe N° 9 con exfoliación

2.3 Vida residual del ventilador

Con la información relevada y recurriendo a la curva de Neubauer, presentada en la Fig. 11, que establece cinco estados de daño a partir de la observación de la microestructura, es posible determinar el desarrollo de la vida en servicio del ventilador.

La forma que presentan las microfisuras, permite situar al material del ventilador en el estadio D, donde se recomienda un reemplazo del material en un tiempo inmediato, debido a que existe el riesgo de que pueda producirse la rotura del componente.

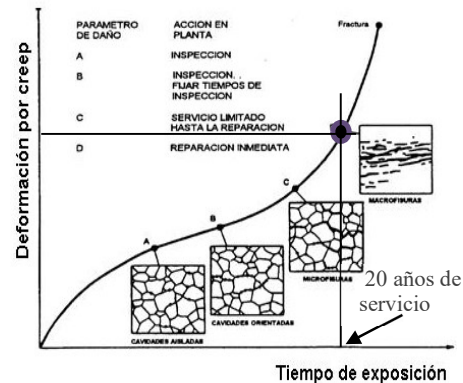


Figura 11. Curva de Neubauer. Progresión de daño por Creep.

2.4 Evaluación de la integridad del eje

Se midieron periódicamente los siguientes parámetros: pérdida de diámetro en alojamiento de rodamiento y presencia de fisuras internas, ambos mediante ultrasonido. Si bien la superficie presentaba alto grado de corrosión por acción de gases calientes, con 300-500 ppm de Cloro, este daño se logró controlar mediante limpieza por arenado. Los valores relevados se presentan en la Tabla 5. También se detectaron fisuras internas a mitad de radio. Algunas de estas fisuras llegaban a una longitud de 45 mm.

Tabla 5. Diámetro de alojamiento de rodamiento

Año	2004	2007	2011	2017
Diámetro (mm)	235	230	227	235

Ante la pérdida de diámetro, en el año 2017 se realizó una reparación colocando un casquillo de acero como suplemento para lograr acoplamiento de rodamiento. Esto justifica el valor de diámetro del año 2017.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Ventilador

La degradación del acero relevada mediante el cambio de la microestructura que alcanzó el estadio D en varios sectores, justifica la previsión de reemplazo. La dureza decreciente observada es consistente en el desarrollo del fenómeno de creep. Factores adicionales, tales como corrosión y pérdida de espesores, también acompañan a la degradación y por ende, a la durabilidad.

Durante el período de control, se produjo el incremento de la producción, basado en procesos de mayor temperatura, que también repercutió en la durabilidad del ventilador.

Finalmente, el nivel de degradación alcanzado por pérdida de espesor y corrosión, determinó un alto grado de criticidad que devino en la previsión de reemplazo, acorde con los requisitos de sustentabilidad y seguridad.

3.2 Eje

La pérdida de diámetro en zona de alojamiento de rodamiento es lógica. La solución adoptada de colocar un suplemento prensado es habitual en operaciones de mantenimiento mecánico. Se trata de un buen indicador de la proximidad de fin de vida útil.

A partir del año 2011 se detectaron situaciones de alta vibración que se atenuaron parcialmente mediante balanceo in situ. Este fenómeno, sumado al incremento de la producción, aceleró la fatiga del eje generando fisuras internas en zona de alojamiento de rodamiento. Esta pérdida de

integridad fue determinante para decidir el reemplazo del eje.

3.4 Reemplazo del conjunto

Los indicadores de degradación relevados tanto en el ventilador como en el eje, condujeron a la decisión de prever el reemplazo del conjunto. Esta decisión se tomó en el año 2017 y terminó de ser concretada en el año 2019. La metodología de control aplicada, en el contexto del riesgo que implica la degradación del equipo y pérdida de funcionalidad, permitió cumplir con todas las etapas previstas en la planificación del mantenimiento y reemplazo de los componentes.

4 CONCLUSIONES

-El mejor indicador de la degradación del ventilador es el cambio de la microestructura, que encuentra en la etapa final (Estadio D de la curva de Neubauer). Se observa un alto grado de precipitación de carburos y alta presencia de microfisuras con coalescencia.

- El ventilador alcanzó el fin de vida útil 3 años antes de lo previsto (25 años). La presencia de alto grado de corrosión con exfoliación de los alabes contribuyó al deterioro.

- La pérdida de resistencia mecánica relevada a través de las mediciones de dureza Brinell corresponden a la evolución del fenómeno de creep.

- El eje sufrió deterioro creciente por las altas exigencias en servicios relacionadas con calor y alta carga mecánica en estado dinámico. En la etapa final de vida útil la aparición de fisuras internas precipitó la decisión de prever la sustitución de esta pieza.

- La metodología aplicada para el seguimiento del comportamiento en servicio del conjunto ventilador-eje resulta eficaz para determinar el estado de vida útil en servicio de este tipo de componentes industriales en contextos de análisis de riesgo basado en confiabilidad y sustentabilidad.

5 REFERENCIAS

- Aguilar Otero, J., R. Torres Arcique and D. Magaña Jimenez. Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia, Educación [en línea, sin mes]*. ISSN 0186-6036, 2010.
- Hung, A. Controles basados en confiabilidad como estrategia para apoyar los indicadores de disponibilidad y paradas forzadas en la Planta

Oscar A. Machado EDC. Ingeniería *Energética* [en línea, Vol XXX, N° Mayo-Agosto]. *Redalyc*. p 12-18, 2009.

Moubray; J. Mantenimiento y Control Centrado en Confiabilidad (Reability –centred Maintenance), 1° Edición en español, Ed. Aldon Ltd. ISBN 09519603-2-3, Madrid. 348 p, 2000.

Velez Mejía, J. El análisis de fallas como una técnica de mantenimiento preventivo, en *Indisa On Line*, N° 5, 2003.

Viswanathan, R. Creep. *Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components*. ASM International, Ohio, p 59-86. 1989.