

## ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ DE FISURA EN EXTREMO DE EJE Y ACOUPLE DE UN GENERADOR ELÉCTRICO DE ALTA POTENCIA

Bilmes, Pablo<sup>a</sup>; Llorente, Carlos<sup>a,b</sup>; Echarri, Juan Manuel<sup>a</sup>; Echarri, Tomás<sup>c</sup>; Martínez, Angel<sup>a</sup>; Zuzulich, José<sup>a</sup>; Saralegui, Gustavo<sup>c</sup>.

<sup>a</sup>Laboratorio de Investigaciones de Metalurgia Física (LIMF), Facultad de Ingeniería UNLP, La Plata 1900, Argentina; <sup>c</sup>UIDET Ingeniería Aplicada en Mecánica y Electromecánica (IAME); <sup>b</sup>CICPBA- Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. Bs. As.

E-mail: [juanmanuel.echarri@ing.unlp.edu.ar](mailto:juanmanuel.echarri@ing.unlp.edu.ar)

**Palabras claves:** *Análisis de falla, fretting corrosion, fretting fatigue, fatiga torsional, rotor de generador.*

Se efectuó un análisis de falla y de causa raíz sobre el rotor de un generador eléctrico de alta potencia de combustible dual gas-gasoil, que presentó fisuración por fatiga torsional en su extremo (región de cambio de sección y acople), luego de 30.000 horas de servicio. El generador de 307 MW – 3000 rpm posee un rotor (eje de 400 mm Ø) fabricado en un acero grado propietario del tipo ASTM A470, *Class 7* de alta templabilidad. Las fallas por fatiga bajo un estado de cargas torsional de este tipo de componentes representan un 10 a un 25% de las roturas en los equipos rotativos y su estudio normalmente involucra aspectos relacionados del conjunto estructura-propiedades-procesamiento-desempeño de la ciencia e ingeniería de los materiales. A su vez el trabajo de relevamiento de antecedentes (diseño, fabricación, servicio, etc.) implica una convergencia en las áreas de conocimiento involucradas: análisis de fallas metalúrgicas, proyecto de máquinas y motores, mecanismos de daño en materiales, entre otros. Se reportó que el sistema de control del equipo manifestó en servicio un alto nivel de vibraciones no admisible para continuar con la operación. En primera instancia, y durante la parada del equipo para inspección, se detectó mediante inspección visual y ensayo de tintas penetrantes la presencia de fisuras oblicuas al eje del rotor. La región de la falla se corresponde con la zona de unión acople-eje unida mediante fijación por interferencia, mientras que la fisuración propagó sobre dos planos de fractura a 45° grados respecto del eje del rotor. Sobre esta zona adyacente al radio de acuerdo, donde se inició la fisuración, se evidenció un severo daño por *fretting corrosion*.

Una vez extraída la región fisurada del eje luego de la aplicación de diversos ensayos no destructivos (tintas penetrantes, ultrasonido *phased array*, etc.) se procedió a la apertura de las fisuras y a la caracterización e identificación de los mecanismos de daño presentes mediante análisis macrográficos, fractográficos, microscopía electrónica de barrido analítica, análisis químicos y ensayos mecánicos. Se reconoció que a partir del daño por *fretting corrosion*, se generaron microfisuras de fatiga que propagaron debido a las tensiones de servicio por un mecanismo de *fretting fatigue*. La propagación de las fisuras por fatiga en dos planos ortogonales y a 45° del eje longitudinal reveló una inversión en el estado de cargas, sólo justificable por vibraciones torsionales (la propagación principal alcanzó las tres cuartas partes del área de la sección transversal del eje, mientras que la fisura secundaria se desarrolló de forma incipiente a una profundidad no mayor a los 10

mm) que se adjudicaron a una resonancia torsional propia de la dinámica del sistema. A partir de estas últimas se consideró que se generaron los micromovimientos necesarios entre las partes del acople para la promoción de *fretting-corrosion* y a partir de este del *fretting fatigue* que produjo la fisuración por fatiga torsional de bajas tensiones nominales y alto número de ciclos.

## INTRODUCCIÓN

En materia de generación de energía eléctrica, y particularmente en generadores de alta potencia se ha trabajado en los últimos años en la producción de sistemas con mayor potencia de entrega. Los equipos de generación de alta potencia, sin embargo, tienen una limitación principal debido a la elevada inercia de los elementos de transmisión de movimiento que deberán ser cada vez más grandes. Los ejes de estos generadores operan bajo un rango amplio de condiciones de servicio, entre los que se encuentran atmósferas y temperaturas extremas. Así mismo estarán sujetos a una variedad de cargas que en general pueden resumirse a tensión, torsión, compresión, flexión o combinación de estas y a su vez en presencia de vibraciones [15,17] que serán de magnitud mayor en tanto más grande sea el componente rotante.

La presencia de vibraciones torsionales relacionadas a fluctuaciones en la red, o la falta de controles y sistemas de amortiguación en adición con sitios sensibles en el conjunto par eje-acople, que en presencia de una unión por interferencia derivan en la generación de daño superficial por *fretting*, son una causa estudiada de las fallas por fractura de los ejes de los generadores. La falla por fatiga se inicia en las regiones más vulnerables del componente donde se encuentran actuantes esfuerzos dinámicos, concentradores de tensión (que pueden ser de naturaleza mecánica o metalúrgica) o una combinación de ambos. Las tensiones elevadas por efecto de estos concentradores involucran elementos tales como filetes, radios de encuentro poco generosos, espigas o chaveteros, ajustes por interferencia defectuosos, mala terminación o rugosidad de maquinado, etc. Desde el punto de vista metalúrgico los concentradores de tensión se los define como fenómenos de fisuración por temple, corrosión localizada, inclusiones no metálicas de gran tamaño, partículas de segunda fase frágiles y defectos de soldadura [18].

Desde 1970 en adelante se han detectado diversas fallas frecuentemente localizadas en la región del acople asociadas a una fractura por fatiga iniciada con un daño superficial por *fretting* que, a su vez, en la mayoría de los casos acusaron la presencia de vibraciones torsionales (ver figura 1).

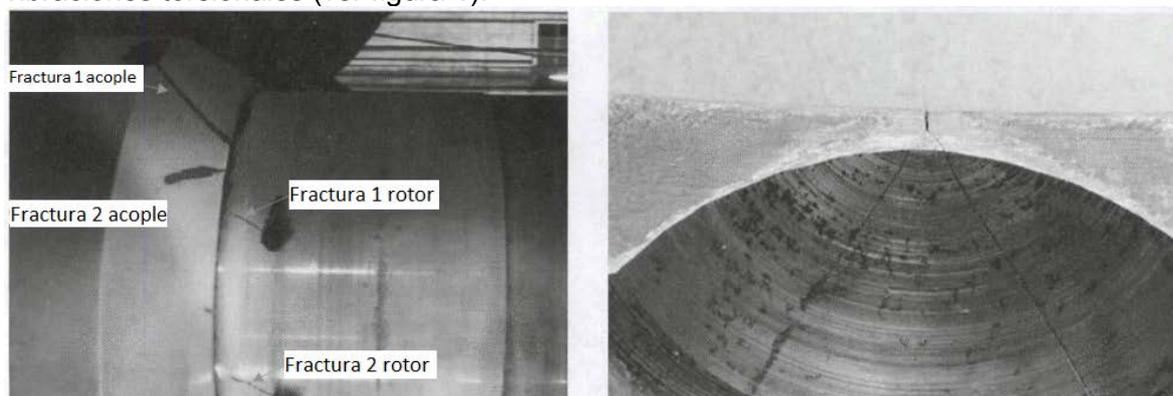


Figura 1. Falla por fractura por fatiga en un eje y acople de generador de energía., “*Coupled torsional vibration and fatigue damage of Turbine Generator Due to Gird Disturbance*”. Chao Liu y Col. Beijing, China. 2014.

La literatura vuelca una extensa revisión de casos de falla tanto para ejes de generadores de alta como de baja potencia, el punto en común en la mayoría de los casos es la existencia de una fractura por fatiga iniciada por *fretting* (en algunos casos asistido por corrosión) en donde se expone la debilidad en regiones del eje donde existen cambios de sección y juntas de tipo estacionaria con ajuste por interferencia. En la figura 2 se muestra la inspección visual de un caso de falla de un eje de un generador diésel con el plano de fractura por fatiga desarrollado en más del 70% de su sección hasta la rotura catastrófica del ligamento remanente, en la imagen de la izquierda se aprecia a su vez (indicado en verde) el inicio de la fractura. El plano de propagación de la fractura está relacionado con la presencia de esfuerzos de torsión con una disposición de  $45^\circ$  respecto al eje del elemento [14]. Una forma menos frecuente pero estudiada es la fractura por fatiga en presencia de cargas torsionales con inversión en el sentido de giro o aplicación de la carga. Cuando la carga cambia de dirección se forman dos fracturas a  $45^\circ$  respecto a la dirección longitudinal del eje [20]. La figura 3 muestra un eje con una fractura por fatiga torsional con inversión en el sentido de giro iniciada en las marcas circunferenciales (daño por *fretting*) [19]. Siempre que exista este tipo de patrón, y el elemento no tenga asignado en servicio una inversión de cargas, se está en presencia de vibraciones torsionales [18,20].



Figura 2. Eje del generador y acople con evidencia de una fractura por fatiga torsional. Craighead, I.A. and Gray, T.G.F. (2004) Investigation of diesel generator shaft and bearing failures.

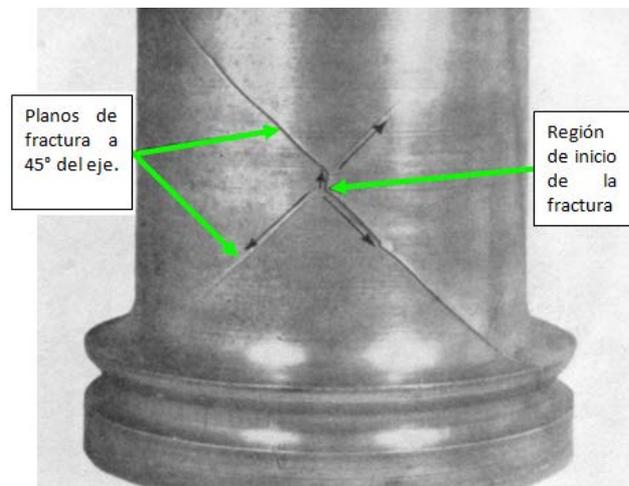


Figura 3. Fractura en X (patrón estrella) debido a la presencia de inversión de cargas torsionales. "Fatigue Failures, With Special Reference to Fracture Characteristics", G. A. Cottell, M.Sc., A.I.M. 2004 ASM International.

El presente trabajo está basado en el Análisis de Causa Raíz de fisuración de un extremo del eje de un generador de 307 MW – 3000 rpm por un mecanismo de fretting-fatiga con un estado de cargas de vibraciones torsionales.

## DESARROLLO Y ESTUDIOS REALIZADOS

Se realizaron las siguientes acciones y estudios:

- Análisis macrográficos y fractográficos en parte y contraparte desgastadas y fisuradas (junta eje-acople).
- Análisis metalográfico para revelar limpieza inclusionaria del acero, microestructura y durezas del eje y del acople.

- Análisis químico del acero del eje y del acople mediante espectrómetro de emisión óptica.
- Ensayos mecánicos de tracción e impacto sobre el material del eje.

### Inspección del desarrollo de la fisura

Una vez definido mediante END el desarrollo de la fisura, se procedió al corte axial del eje para luego exponer la superficie de fractura. En la figura 4 se aprecia tanto en el eje como en el acople el patrón de fractura donde la flecha verde señala el plano principal de propagación tanto en el eje como en el acople. En estas zonas se evidencia un severo daño por *fretting corrosion*, el cual tiene las mismas características topográficas de daño en parte y contraparte de lo que fue la junta estacionaria ajustada con interferencia. Se aprecia tanto en parte y contraparte (eje y acople) la presencia de un plano principal de propagación de fractura a 45° del eje longitudinal del elemento y, a su vez, un plano de desarrollo incipiente de fractura por fatiga ortogonal al principal característico de un estado de cargas con esfuerzos torsionales reversibles.

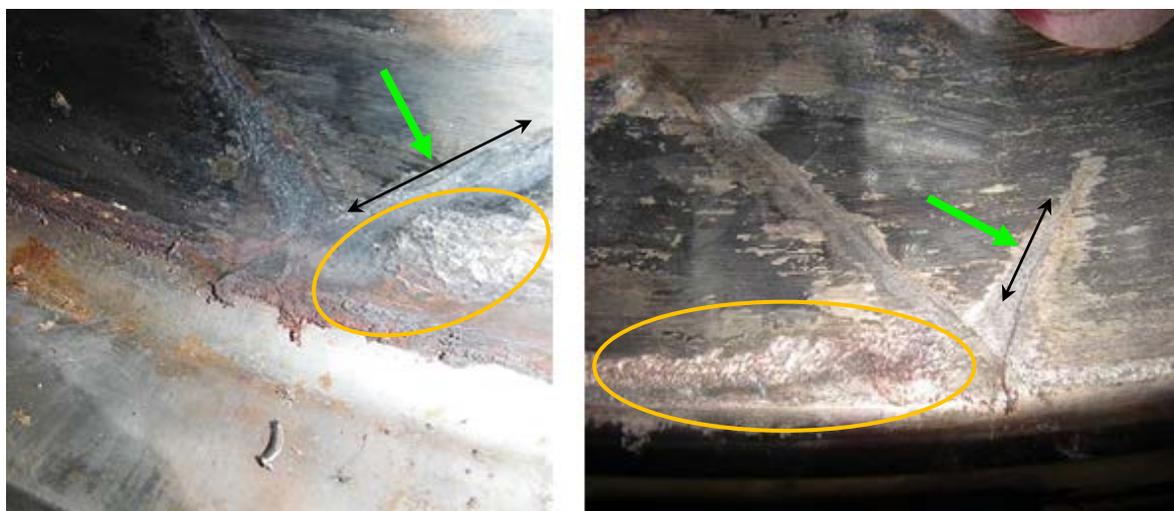


Figura 4. Fisuración del eje (izq.) y del acople (der.) antes de la apertura de las superficies de fractura. Las fisuras se señalan con flechas verdes (con el plano de fractura principal señalado en negro) y el daño por *fretting* se encuentra contorneado en naranja.

### Fractografía

En la figura 5 se muestra cómo la apertura de la fisura expuso la fractura con el patrón característico de una propagación por fatiga, donde las *Ratchet Marks* son señaladas junto con las *Beach Marks* en verde y el origen de la fractura se delimita en naranja. A la derecha se muestra ampliada (vía SEM) la región de origen de la fractura donde se puede apreciar un severo daño por *fretting* (superficie del eje) y por otro lado las marcas de avance del plano de fractura concéntricas en el inicio de la falla.

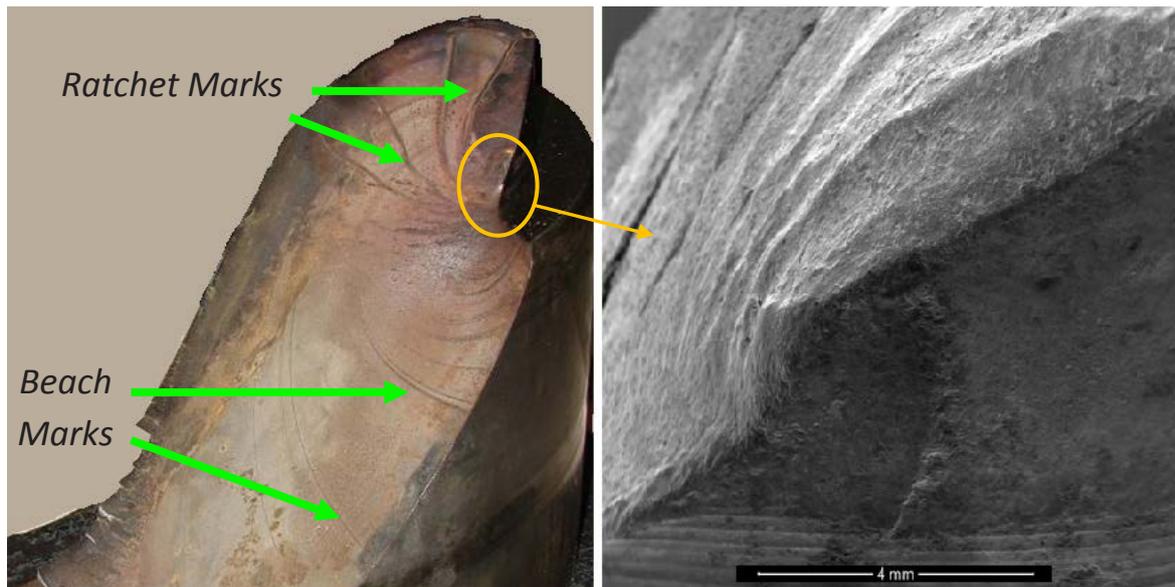


Figura 5. Izq: Superficie de fractura del eje donde aprecia el patrón de fractura por fatiga. Y se señala el inicio de la fractura en naranja. Der: Imagen SEM donde se aprecia la región de origen de fractura.

### Daño por *fretting*

En la figura 6 se observa una sección de eje que presenta daño por *fretting*, en la imagen de la derecha se pueden observar vía SEM las marcas de mecanizado y la deformación producto de los micro-movimientos presentes en la junta estacionaria, a la vez que una fisura (señalada en verde) atraviesa la imagen desde la región con *fretting* hacia la zona donde aún subsiste la rugosidad del mecanizado.

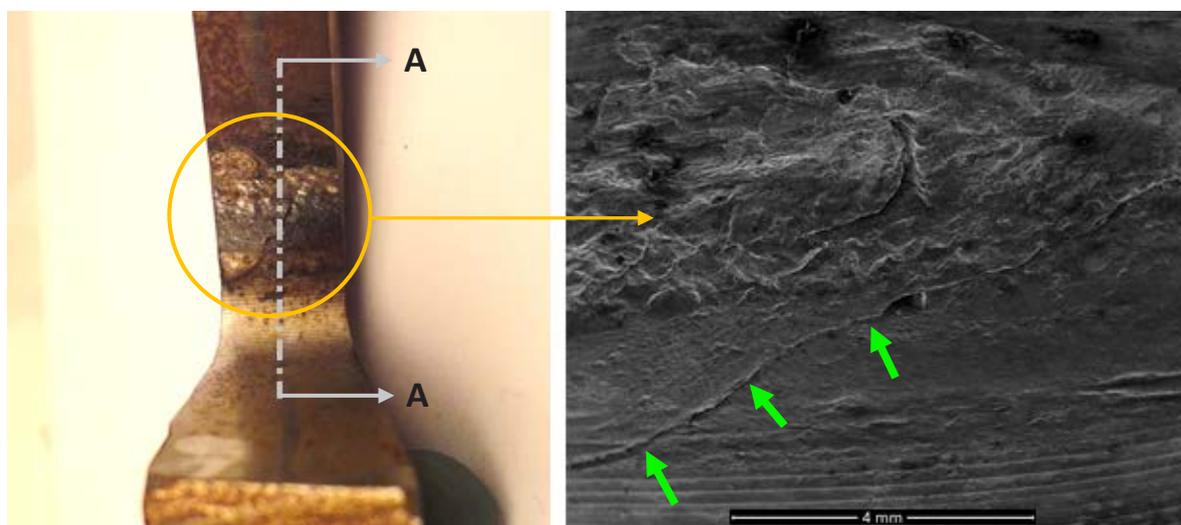


Figura 6. Visualización de la superficie afectada por fretting vía SEM. En la imagen de la derecha se pueden observar las marcas de maquinado y la deformación En la imagen de la izquierda se señala el corte realizado para la vista transversal del daño por fretting.

Asimismo en la figura 6 se visualiza el corte A-A que será presentado como micrografía transversal al daño por *fretting* visualizándose severas alteraciones (figura 7), en las

cuales se observan deformaciones que con una profundidad del orden de los 200  $\mu\text{m}$ , intrusiones de partículas de desgaste “debris” correspondientes al acero del eje y del acople, juntamente con óxidos y posiblemente restos de lubricante.

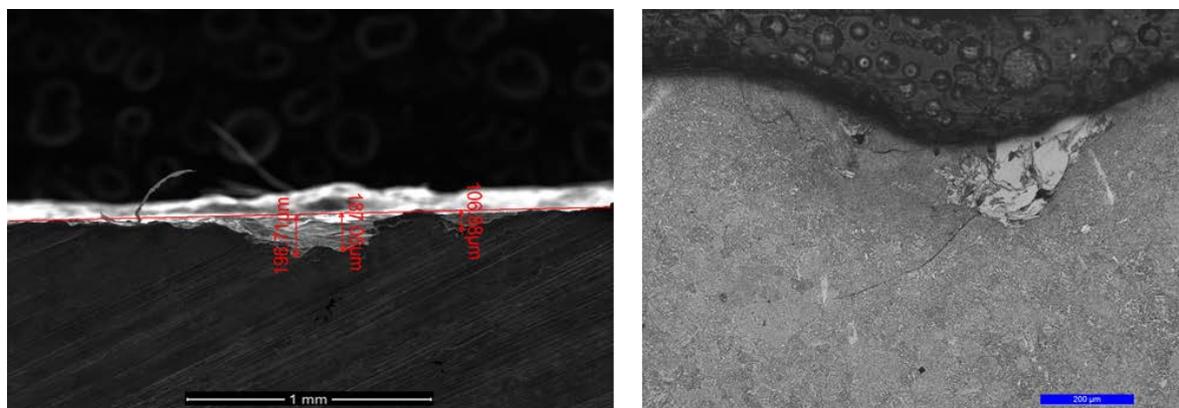


Figura 7. Vista del corte en sección A-A señalada en la figura 6. El daño por fretting se evidencia con una profundidad del orden de las 2 décimas de milímetro. La micrografía de la imagen derecha muestra la presencia de metal de la contraparte así como un severo daño por deformación.

### Análisis químico

En tabla 1 se presenta la composición química del acero del eje y del acople. El material del eje es un acero grado propietario del tipo ASTM A470, *Class 7* equivalente a EN SEW 555 26NiCrMoV14-5 / SEW 555 26NiCrMoV11-5, 1.6957 / 1.6948.

Por otro lado el acero del acople se corresponde con un acero del tipo AISI 4340 equivalente a DIN 1.6562, 40NiCrMo7-3.

Tabla 1: Composición química del acero del eje y del acople

	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Al (%)
Eje	0,25	0,09	0,20	1,70	3,93	0,34	0,0128	0,0015	0,036	0,044
Acople	0,42	0,12	0,61	0,80	1,81	0,24	0,0111	0,0058	0,119	0,008

### Microestructura y propiedades mecánicas

El acero del eje presenta una fina microestructura de martensita revenida con una dureza promedio de 320 HV<sub>10</sub>. Su limpieza inclusionaria es muy buena. Mientras que el acero del acople presenta una fina microestructura de martensita revenida con una dureza promedio del 279 HV<sub>10</sub>. Estas características del material son las adecuadas para este tipo de aplicación y servicio (ver tabla 2).

Tabla 2: Propiedades mecánicas del acero del eje (ASTM E8).

	Tensión de rotura (MPa)	Tensión de fluencia (MPa)	Alargamiento (%)	Charpy (J) (ASTM E23)
Promedio	908	788	19,86	158

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y MODELO DE DAÑO

En general el fenómeno de desgaste por *fretting* se da como mecanismo de daño en dos superficies en contacto bajo presión y ajuste estacionario (con o sin interferencia) con la presencia de cargas cíclicas o movimientos relativos de extremadamente baja amplitud con alta localización de deformación por corte (se producen microsoldaduras, entre dos superficies que no se desplazan relativamente entre sí, aunque pueden vibrar y microdeslizarse, y por ende soldarse, desgarrarse y microdesgastarse) [16]. Estos rasgos propios del mecanismo de daño han sido denominador común en los trabajos de revisión y casos emblemáticos abordados por la literatura [7,14,18,19]. A su vez el desgaste adhesivo se puede identificar por cambios generados a nivel superficial de los materiales en contacto (Fig. 7); pudiendo promover una disminución de dureza (por revenido) o la fragilidad del material con la aparición de microfisuras que podrían crecer por fatiga (el *fretting* corrosión no sólo anula el límite de fatiga del material sino que baja su desempeño a esta sollicitación).

El efecto más pernicioso del daño por *fretting corrosion* es que puede conducir a *fretting Fatigue* (fracturas por fatiga debido a *fretting*). En el caso de ejes las mismas pueden ser de tipo flexional, torsional o combinadas. Las fracturas de fatiga torsional están típicamente orientadas a 45 grados respecto a la dirección axial, mientras que las flexionales a 90 grados. Si hay dos planos de fractura a 45 grados en un eje cuya carga nominal no cambia de dirección (el caso bajo estudio), esto es un indicador de vibraciones torsionales (Fig. 4 y 5).

Las vibraciones torsionales son oscilaciones en la deformación angular de un rotor a lo largo del su eje. En general la dinámica del rotor es la superposición de la respuesta libre (ausencia de excitación) a una condición inicial y la respuesta forzada a una excitación externa. En el primer caso la oscilación es periódica y decae con el tiempo debido a la disipación. En el último la oscilación es una transformada de la fuente de excitación y se presenta la amplificación dinámica de la deformación (resonancia) si el espectro de excitación contiene frecuencias próximas a las naturales del sistema y realiza trabajo sobre los modos de deformación asociados a éstas.

En sistemas lineales amortiguados, si la fuente de excitación es de carácter periódico entonces la respuesta también lo será. Las causas de torques periódicos reportadas en la literatura [10,11] son:

- Fenómenos periódicos en el escurrimiento fluido.
- Desalineamiento, provoca una excitación sincrónica (1X) y armónicos (fundamentalmente 2X).
- Acoplamiento flexo-torsional.

Un mecanismo de acoplamiento flexo-torsional se origina en el torque requerido para igualar la variación de la cantidad de movimiento angular provocada por trayectorias no circulares del centro geométrico de cualquier sección del rotor (orbitas). Otra forma de acoplamiento se presenta en rotores con simetrías menores que la axial sometidos a fuerzas radiales, a raíz de la variación del torque necesaria para atravesar los planos de simetría con el rotor flexionado. Dada la naturaleza no lineal del acoplamiento provoca una excitación sincrónica (1X) y armónicos (2X, 3X, etc.).

Las fuentes de excitación aperiódicas pueden concebirse como una distribución de excitaciones impulsivas en el tiempo y la respuesta es la superposición de las oscilaciones libres correspondientes. Las causas de torques impulsivos reportadas en la literatura [10,11] son:

- Sincronización deficiente y cambios de carga súbitos en la red.
- Arranque, parada y pruebas.
- Contacto rotor-estator.
- 

Una situación de importancia, no contemplada en los casos anteriores, es la respuesta auto excitada. Esta ocurre cuando una excitación estática provoca la interacción oscilatoria entre componentes de la máquina, modificando las características dinámicas del sistema. En particular el fenómeno de adherencia-deslizamiento (*stick-slip*) provocado por el micro-deslizamiento en acoples o la actuación de frenos puede provocar un espectro compuesto por la frecuencia fundamental del deslizamiento relativo, armónicos y sub-armónicos.

Es importante destacar que a diferencia de las vibraciones de flexión (o laterales), las cuales transfieren energía a los soportes, las vibraciones torsionales se amortiguan básicamente a través de la disipación interna del material y debido a la presencia de acoples mecánicos. En consecuencia el amortiguamiento modal en torsión es de un orden de magnitud menor que en flexión [11], ocasionando que la respuesta transitoria se atenúe más lentamente, permitiendo la superposición de modos flexión-torsión oscilatorios por un lapso prolongado, y amplificando las oscilaciones en régimen estacionario.

## CONCLUSIONES

- La fisuración del eje es típica de una fractura por fatiga torsional de bajas tensiones nominales y alto número de ciclos (la zona de propagación de fatiga con *Beach Marks* ocupa una superficie de más de 300 mm de extensión), desarrollada desde el radio de acuerdo del eje. La fisuración propagó sobre dos planos de fractura a 45 grados respecto de la línea central del eje.
- Se asume que a partir del daño por *fretting corrosion* y en el radio de acuerdo del eje; la concentración de tensiones allí producida fue suficiente para promover microfisuras de fatiga que propagaron debido a las tensiones de servicio (por un mecanismo de *fretting fatigue* ocasionado por *fretting corrosion*).
- La prevención o mitigación del *fretting* se logra eliminando o reduciendo las vibraciones, los microdeslizamientos (aumentando la presión de contacto o el ajuste entre las partes siempre y cuando se asegure con ello la inmovilidad), introduciendo tensiones residuales compresivas en ambas superficies en contacto, incrementando las durezas superficiales por tratamientos termoquímicos de endurecimiento (nitruración, etc.), y utilizando lubricantes *antifretting*.

## REFERENCIAS

- [1] *Failure Analysis and Prevention*, ASM Handbook, Volume 11, 2002, ASM International.  
[2] C. Chin, "Torsional fatigue of turbine-generator shafts owing to network faults". IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib, Vol. 143, No -5, 1996.

- [3] Chao Liu, “*Coupled Torsional Vibration and Fatigue Damage of Turbine Generator Due to Grid Disturbance*”. ASME, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol.136/062501-1, 2014.
- [4] Craighead, I.A. and Gray, T.G.F. (2004) “*Investigation of diesel generator shaft and bearing failures*”. *Journal of Multi-Body Dynamics, Proceedings of the IMechE, Part K*, 218 (3). pp. 153-158. ISSN 1464-4193.
- [5] Thoma Brown, “*Torsional Fatigue Failures, Identification, Diagnosis and Prevention*”, *UpTime Mag*, oct/nov 2014.
- [6] G. A. Cottell, M.Sc., A.I.M. “*Fatigue Failures, With Special Reference to Fracture Characteristics*”. *The British Engine Technical Reports, F.R. Hutchings and P.M. Unterweiser, Ed., American Society for Metals*, 1981.
- [7] M. Zamanzadeh, “*A Re-Examination of Failure Analysis and Root Cause Determination*”. Matco Associates, Pittsburgh, Pennsylvania, 2004.
- [8] *Fatigue and Fracture*, ASM Handbook, Volume 19, ASM International.
- [9] *Fatigue and Fracture: Understanding the Basics*, F. C. Campbell, 2012 ASM International.
- [10] *Rotordynamics*, A. Muszynska, 2005 CRC Press.
- [11] *Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics*, D. E. Bently et al, Bently Pressurised Bearing Press.