

Efecto de la presencia y orientación de una masa excéntrica en la forma del frente de una fisura de un eje rotatorio

L. Rubio Ruiz de Aguirre, L. Montero García, B. Muñoz Abella, P. Rubio Herrero

(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid
lrubio@ing.uc3m.es

Los ejes son elementos imprescindibles en las máquinas rotatorias. Con frecuencia, y dados los esfuerzos a los que están sometidos, pueden sufrir el fenómeno de la fatiga debido a las tensiones fluctuantes que los afectan. La presencia de un defecto o una irregularidad de material o geométrica pueden dar lugar al fallo catastrófico por crecimiento de fisuras debido a la fatiga. Con frecuencia los ejes adicionalmente presentan otro tipo de defectos: desequilibrios y desalineaciones, que pueden alterar su normal comportamiento tanto si hay presencia de fisuras como si se trata de ejes intactos. En este trabajo se ha estudiado el efecto que tiene la presencia de una masa excéntrica, que simula un desequilibrio, en el crecimiento de las fisuras. En concreto se ha estudiado el efecto que tiene la posición de la masa excéntrica respecto de la fisura, en el crecimiento de la fisura, tanto en forma del frente como en la orientación. Para llevar a cabo este estudio se han ensayado ejes entallados previamente para favorecer el crecimiento. Con el fin de simular el desequilibrio se han dispuesto masas excéntricas con distintas posiciones angulares. Se demuestra como la presencia y la localización de la excentricidad afectan al crecimiento de las fisuras tanto en la forma que adopta el frente de la fisura como en la orientación que adquiere durante su crecimiento.

1. INTRODUCCIÓN

Los fallos en máquinas rotativas se producen habitualmente por la presencia y propagación de fisuras de fatiga en sus componentes. La importancia que tiene la seguridad y los costes derivados de los fallos en maquinaria ha empujado a los investigadores en el campo de la detección de daño a analizar el comportamiento de componentes mecánicos con defectos.

Los ejes, que son uno de los componentes más importantes de las máquinas, trabajan en rotación y están sometidos fundamentalmente a esfuerzos de flexión y torsión. Esta forma de sollicitación, unida a otros factores, puede dar lugar al fallo por la propagación de fisuras de fatiga. En ocasiones los ejes, adicionalmente, trabajan en situaciones de desalineamiento y/o desequilibrio, cuyos efectos son difíciles de separar de los provocados por las fisuras. Estos desequilibrios pueden estar asociados a la presencia de masas excéntricas.

Cuando un eje fisurado gira, la fisura que contiene se abre y se cierra a lo largo de un giro en lo que se conoce como mecanismo de “breathing”. Este comportamiento dinámico ha sido estudiado por diversos autores numérica y analíticamente [1-3], en general considerando una situación ideal de equilibrio.

El comportamiento dinámico de un eje fisurado depende de la posición y tamaño de las fisuras [4,5] que contiene y de la presencia o no de un desequilibrio adicional [6-8]. La forma con que se propaga una fisura de fatiga, y como consecuencia la forma que adquiere el frente, puede estar influenciada, entre otras razones, por la presencia y orientación de una masa excéntrica. En esta comunicación presentamos un estudio experimental de la forma que toma el frente de la fisura durante su propagación cuando una masa excéntrica se sitúa en distintas posiciones angulares respecto de la fisura (o de la entalla).

2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Para analizar el efecto descrito en párrafos anteriores se dispone de un dispositivo experimental para el estudio del comportamiento dinámico de ejes fisurados. Este banco de ensayos, que se muestra en la figura 1, está provisto de un sistema de adquisición de datos por sensores de proximidad láser que permiten medir las órbitas descritas por el eje. La disposición del eje es la conocida en la bibliografía como “Jeffcott Rotor” o “Eje de Laval” [6] que consiste en un eje biapoyado en sus extremos y sometido a un carga concentrada en su sección central representada por un disco (figura 2).



Figura 1. Banco de ensayos de ejes giratorios

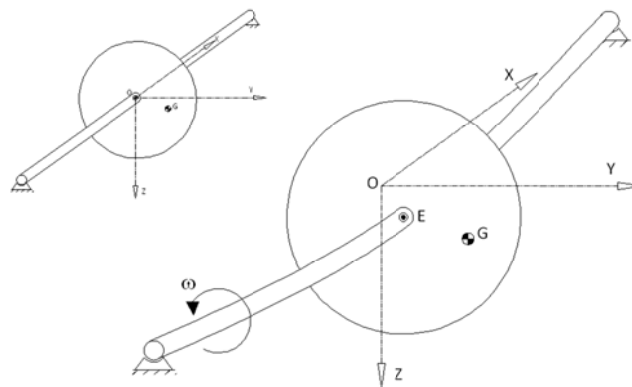


Figura 2. Jeffcott rotor

El sistema permite analizar el comportamiento de los ejes en condiciones dinámicas, y en concreto en este caso, el comportamiento de ejes fisurados.

En este trabajo, el banco de ensayos se ha utilizado fundamentalmente como medio para hacer propagar fisuras de fatiga en ejes previamente entallados. Las características del banco permiten disponer ejes de distintas longitudes y diámetros, y permiten variar la velocidad de giro.

Los ensayos llevados a cabo han consistido en el ensayo hasta rotura por fatiga de ejes previamente entallados. Las características de los ejes (figura 3) son: longitud del eje $L=900\text{ mm}$, diámetro del eje $D_e=20\text{ mm}$ y posición de la fisura $L_f=L/2$. Los ejes son de aluminio con unas propiedades de Módulo de Elasticidad $E=72\text{ GPa}$ y coeficiente de Poisson $\nu=0.3$. Por lo que respecta a la velocidad a la que se han llevado a cabo los ensayos, se ha llegado a una

velocidad máxima de $p=1.2$, donde p es la razón entre la velocidad de giro del eje Ω y su velocidad crítica V_c .

En estos ensayos se han considerado entallas grandes de valores de $\alpha=a/D$ (donde a es la profundidad de la fisura) de 0.4 y 0.5.

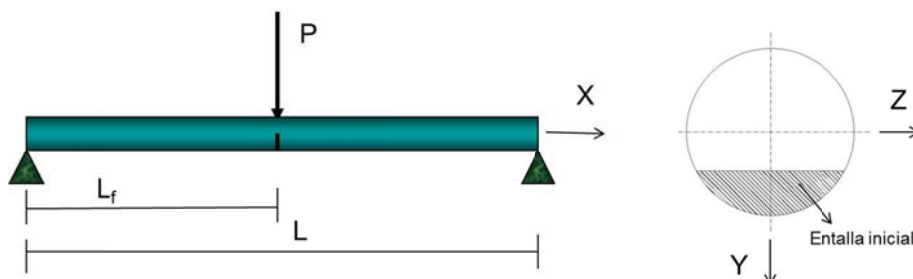


Figura 3. Disposición del eje

Para conseguir la propagación de las fisuras de fatiga, como se ha indicado, los ejes se entallaron previamente con un espesor de entalla de 0.4 mm (figura 4).



Figura 4. Entalla previa realizada a los ejes

El efecto de la orientación de la excentricidad se analizó mediante la realización de los ensayos incorporando al dispositivo una masa excéntrica en el disco del denominado "Jeffcott rotor". El diseño del disco permitió modificar la orientación de la masa excéntrica respecto de la posición de la entalla mediante inserción de masas en los huecos del disco que se muestran en la figura 5.

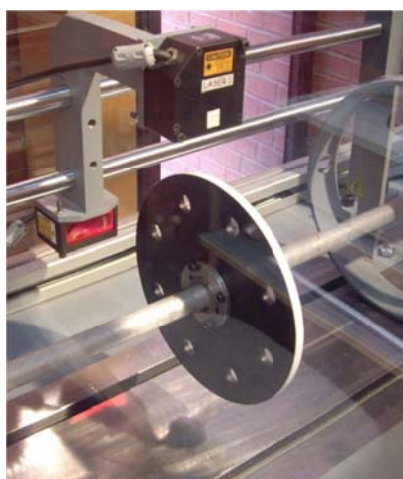


Figura 5. Disco sobre el que se disponen las masas excéntricas

Los datos de la masa excéntrica son los siguientes: $m_e=200gr$ y $e=80mm$. La orientación de la masa excéntrica se ha tomado en relación con la entalla/fisura eligiéndose los siguientes ángulos $\theta=0^\circ; 45^\circ; 90^\circ$ (figura 6).

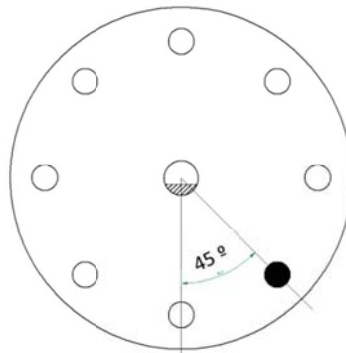


Figura 6. Posibilidades de disposición de las masas excéntricas respecto de la entalla/fisura

3. COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LOS EJES ROTATORIOS CON EXCENTRICIDAD

3.1. Estado tensional en un eje intacto a lo largo de un giro

Cuando un eje gira es posible observar como un punto cualquiera del mismo presenta variaciones cíclicas de su estado tensional que se repiten en cada vuelta. Esto es debido a que ese punto en ciertos momentos del giro estará en la zona de tracción del eje y por lo tanto presentará tensiones positivas, y en ciertos momentos se encontrará en zona de compresión con lo que presentará tensiones negativas. Como es conocido, la alternancia de tensiones positivas y negativas puede dar lugar al fenómeno de rotura por fatiga cuando hay una presencia de un defecto o de una irregularidad geométrica o de material del eje. Como ejemplo de esta situación se muestra la figura 7, donde se presenta el estado tensional de un punto interior de un eje giratorio durante una vuelta. Se observa como en el caso en el que no se considera la presencia de una masa excéntrica se produce un ciclo de tensiones (línea continua).

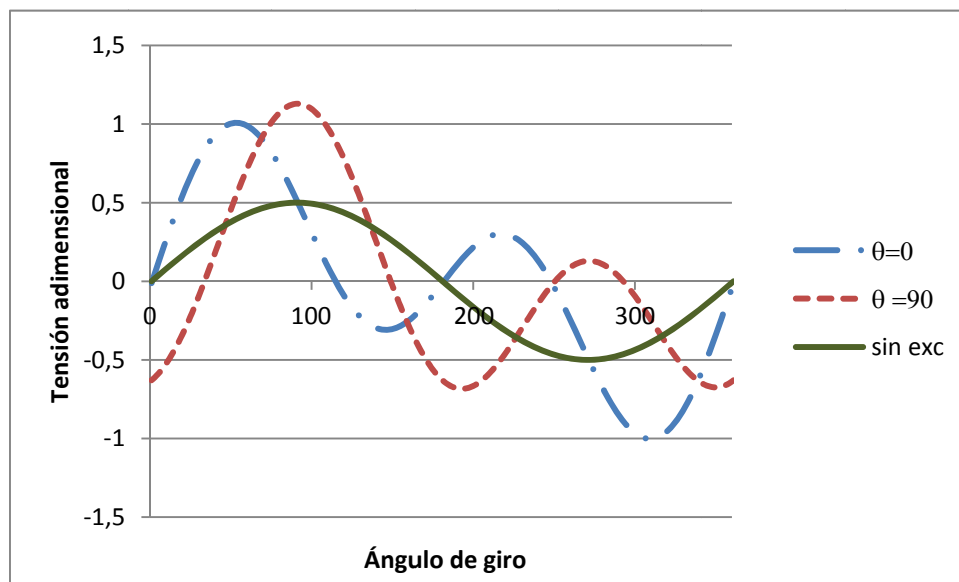


Figura 7. Tensiones fluctuantes en un eje intacto con y sin excentricidad

En condiciones ideales de funcionamiento, la alternancia de tensiones se mantiene según lo explicado previamente. Sin embargo, como se ha indicado en apartados anteriores, la mayoría de los ejes rotatorios no funciona en condiciones ideales, presentando a menudo desequilibrios y desalineamientos. Cuando se considera una masa excéntrica para simular un desequilibrio (como la indicada en la figura 6), el resultado del estado tensional en el mismo punto que en el caso de eje ideal, es el que se muestra en misma figura en líneas discontinuas. De las tres gráficas mostradas se puede detectar que en el primero de los

casos se produce una única alternancia de tensiones mientras que en los otros dos casos, cuando se consideran dos posiciones de la excentricidad, para una vuelta del eje se producen hasta 4 fluctuaciones de tensión, por lo que cabe esperar una modificación en el fenómeno de fatiga y la posible rotura del eje debida a la misma.

3.2. Análisis de las órbitas de un eje fisurado a lo largo de un giro

El análisis del comportamiento de un eje puede realizarse mediante el estudio de las órbitas descritas por una sección del eje. En concreto, en un eje fisurado se pueden estudiar las órbitas de la sección que contiene a la fisura. Estas órbitas pueden dar una información muy detallada de las fisuras que contiene un eje. En concreto para los ensayos realizados en este trabajo las órbitas son las que se muestran en la figura 8. En esta gráfica se pueden observar las órbitas descritas por la sección de la fisura para una profundidad de fisura inicial de 0.5 y para distintos valores del ángulo de excentricidad.

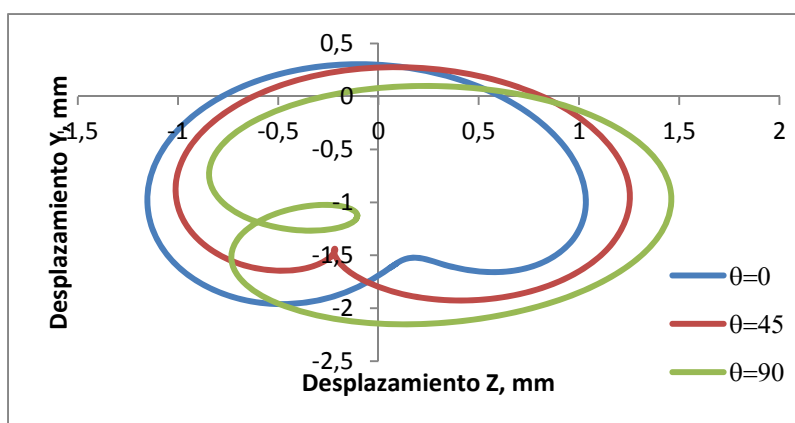


Figura 8. Órbitas descritas por los ejes con una masa excéntrica con tres orientaciones

Las gráficas mostradas permiten ver que a medida que la excentricidad modifica su posición respecto de la fisura inicial alejándose de la misma, se produce un desplazamiento de las órbitas hacia la derecha. Asimismo se observa un giro de la órbita de aproximadamente 90° en sentido horario para el caso de excentricidad más rotada respecto de la fisura.

4. RESULTADOS

Como se ha mencionado en apartados anteriores, se han llevado a cabo ensayos de rotura por fatiga de ejes previamente entallados en su sección central en los que se ha dispuesto una masa excéntrica con distintas orientaciones respecto de la entalla inicial. Las posiciones de la masa excéntrica se corresponden con las indicadas en la figura 6. La figura 9 muestra el caso de la propagación de la fisura a partir de la entalla cuando el ángulo de la excentricidad con la entalla es de 0°. En este caso se puede considerar que el crecimiento es prácticamente paralelo a la entalla a la vista de las playas de fatiga hasta el último frente, momento en el que se produjo la rotura. El ángulo formado finalmente es de aproximadamente 10°. Se observa además, que el frente cambia pasando de ser recto a ligeramente elíptico. Este resultado se observa con mayor facilidad en las medidas realizadas sobre los ejes ensayados (figura 9b), con el vídeo-microscopio de medición 2D “Swift Duo” del que se dispone.

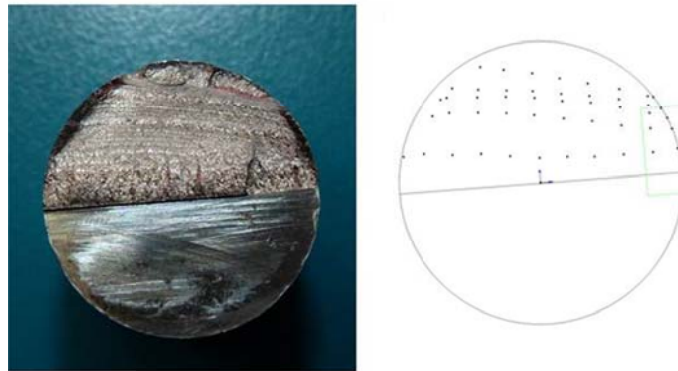


Figura 9. Propagación de una fisura $\alpha=0.5$, $\theta=0^\circ$

Cuando el ángulo que forma la masa excéntrica con la entalla pasa a ser de 45° (figura 10), la propagación de la fisura es muy diferente. Se produce un crecimiento de la fisura de una manera irregular observándose una primera playa de fatiga con una forma marcadamente elíptica y que va cambiando la forma hasta acabar siendo prácticamente recta en el último frente antes de producirse la rotura.



Figura 10. Propagación de fisura para $\theta=45^\circ$

Este efecto se mantiene, y se acentúa, cuando la excentricidad se dispone formando un ángulo con la entalla inicial de 90° como puede observarse en el figura 11.

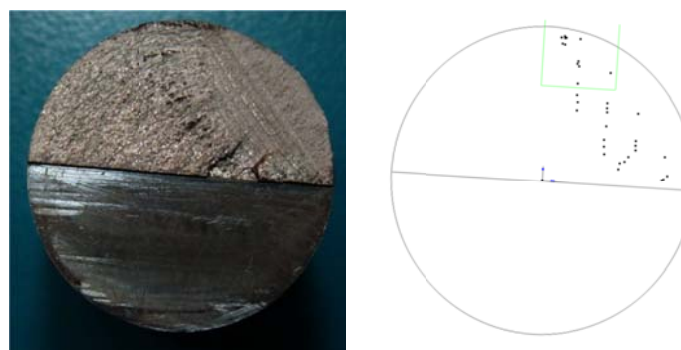


Figura 11. Propagación de fisura para $\theta=90^\circ$

En este caso, la forma elíptica del crecimiento es aún más pronunciada y la inclinación del último frente antes de la rotura es mayor que en los casos anteriores (30° y 55° , respectivamente).

Asimismo se ha realizado un ensayo para ejes con entallas ligeramente más pequeñas ($\alpha = 0.4$) y con excentricidad dispuesta igualmente a 90° , encontrándose resultados muy similares al caso de $\alpha = 0.5$ (figura12). Se observa que el extremo de la forma elíptica del frente en el borde del eje coincide con el mismo punto del eje con entalla de 0.5.

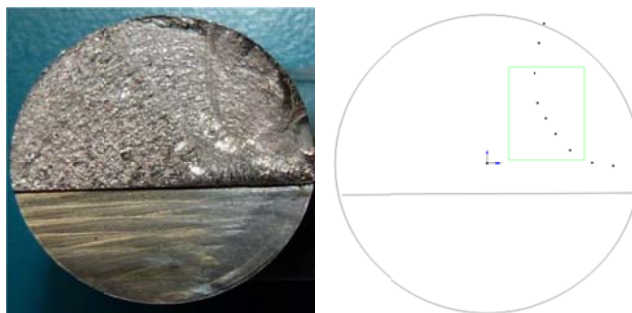


Figura 12. Propagación de la fisura para una entalla de $\alpha=0.4$ y $\theta=90^\circ$

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se muestran los resultados alcanzados tras la realización de ensayos de rotura por fatiga de ejes giratorios que presentan una excentricidad. En concreto se analizan las diferencias que se observan en la superficie de rotura de los ejes cuando la excentricidad que presenta el eje modifica su orientación respecto de la posición inicial coincidente con la fisura inicial o la entalla.

Se ha observado que a medida que la excentricidad se aleja en posiciones angulares respecto de la fisura, la forma que presenta el frente de la fisura es más elíptica y forma un mayor ángulo con respecto al frente inicial de la fisura. En concreto se ha observado que para una posición relativa de 0° , la fisura se propaga prácticamente paralela al frente inicial de la fisura y con una forma con muy bajo grado de elipticidad. Para una posición de 45° la fisura crece formando inicialmente una fisura elíptica “abierta” que tiende a hacerse recta al final del ensayo cerca del fallo final del eje. Para una posición de 90° , la fisura crece igualmente en forma elíptica, con mayor índice de elipticidad, tendiendo, al igual que en el caso anterior, al frente recto al final del ensayo. Existe una diferencia adicional entre estos dos casos y es la inclinación del frente final del ensayo pasándose de un ángulo de inclinación de 10° a una inclinación máxima para el caso de $\theta=90^\circ$ de 55° , con una situación intermedia de 30° para el caso de $\theta=45^\circ$.

Los resultados experimentales alcanzados ponen de manifiesto el efecto que la presencia de una masa excéntrica y su orientación tienen en la forma que presenta el frente de una fisura de fatiga y en la forma en la que se propaga. Se ha observado que este efecto se produce en paralelo con ciertas modificaciones encontradas en las características de las órbitas descritas por la sección fisurada en cada caso. Se puede concluir que estos fenómenos son consecuencia del estado tensional generado por la presencia de la masa excéntrica que induce cambios en la fatiga a la que está sometido el eje.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la financiación para la realización de este trabajo al *Ministerio de Economía y Competitividad* a través del proyecto DPI2009-13264.

7. REFERENCIAS

- [1] C.A. Papadopoulos. *The strain energy release approach for modeling cracks in rotors: A state of the art review*, Mechanical Systems and Signal Processing, 22 (4) (2008), 763-789.
- [2] T.H. Patel, A.K. Darpe. Influence of crack breathing model on nonlinear dynamics of a cracked rotor, Journal of Sound and Vibration, 311 (2008), 953-972.
- [3] N. Bachschmid, P. Pennacchi, E. Tanzi. *Some remarks on breathing mechanism, on non-linear effects on slant and helicoidal cracks*, Mechanical Systems and Signal Processing, 22, (2008) 879-904.
- [4] A.K. Darpe. *A novel way to detect transverse surface crack in a rotating shaft*, Journal of Sound and Vibration 305, (2007), 151-171.
- [5] L. Rubio, J. Fernández-Sáez. *A new efficient procedure to solve the nonlinear dynamics of a cracked rotor*, Nonlinear Dynamics, (pendiente de publicar).
- [6] R. Gasch. *Dynamic behaviour of the Laval rotor with a transverse crack*, Mechanical Systems and Signal Processing, 22, (2008) 790-804.
- [7] J.J. Sinou. *Experimental response and vibrational characteristics of a slotted rotor*, Commun Nonlinear Sci Numer Simulat, 14, (2009), 3179 -3194.
- [8] L. Cheng, N. Li b, X. Chen, Z. He. *The influence of crack breathing and imbalance orientation angle on the characteristics of the critical speed of a cracked rotor*, Journal of Sound and Vibration 330, (2011), 2031 -2048.