

Flexibilidad de ejes rotativos con fisuras semielípticas

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

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

Las máquinas rotatorias, tales como turbinas, bombas, rotores o compresores, son unos de los componentes más frecuentemente utilizados en la industria de responsabilidad. Uno de los tipos de fallo más importante que habitualmente sufren estos elementos está relacionado con la aparición y propagación de fisuras de fatiga debidas a las tensiones combinadas de torsión y flexión fluctuantes a las que se ven sometidos. La aparición de una fisura afecta al comportamiento dinámico del eje produciendo una reducción de su rigidez, que depende del tamaño y de la forma del defecto. La mayoría de los estudios consideran fisuras con frente recto, sometidas esfuerzos de flexión y son menos frecuentes en la bibliografía los dedicados a fisuras de frente semielíptico, aunque es este tipo de fisuras el que se presenta en ejes reales. Otro aspecto a tener en cuenta en la dinámica de ejes fisurados es el estado de la fisura durante el giro del eje. Una simplificación no realista consiste en considerar la fisura siempre abierta, pero cuando un eje gira se producen para cada instante diferentes estados tensionales que en parte del frente de fisura son de tracción (zona abierta de la fisura) y en otra parte son de compresión (zona cerrada de la fisura), de forma que el aumento de flexibilidad en la sección fisurada es función, entre otras cosas, del ángulo de giro. Para modelar el mecanismo de apertura-cierre descrito algunos autores han utilizado funciones más o menos complejas, en las que se tiene en cuenta la profundidad de la fisura pero no su forma.

En este trabajo se ha desarrollado un modelo numérico cuasiestático que ha permitido obtener, en primer lugar, el grado de apertura de la fisura para cada instante durante un giro del eje y, posteriormente, las expresiones de los coeficientes de flexibilidad en la sección fisurada, en ambos casos en función del ángulo de giro y de las características de la fisura, profundidad y forma.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La mayor parte de los fallos en servicio de las máquinas rotatorias de responsabilidad (turbinas, bombas, rotores y compresores) están relacionados con la aparición y el crecimiento de fisuras de fatiga en uno de sus elementos constitutivos principales: los ejes. Estos elementos están sometidos a esfuerzos de flexión y torsión que producen tensiones variables a lo largo del tiempo. Como es sabido, en cualquier elemento mecánico, las fisuras de fatiga se inician en zonas con defectos y se propagan principalmente como consecuencia de las tensiones cíclicas debidas a los esfuerzos a los que se ven sometidos durante su funcionamiento. La presencia de fisuras en un elemento mecánico provoca un aumento de la flexibilidad local del elemento, que depende del tamaño y la forma del defecto, produciéndose cambios en su comportamiento estático y dinámico, que se traducen en el incremento de los desplazamientos y disminución de las frecuencias de vibración, entre otros [1]. Por otra parte, la mayoría de los estudios que se pueden encontrar en la literatura consideran fisuras con frente recto, sometidas esfuerzos de flexión y son menos frecuentes en la bibliografía los dedicados a fisuras de frente semielíptico [2], aunque es este tipo de fisuras el que se presenta en ejes reales.

Otro aspecto que hay que tener en cuenta en la dinámica de ejes fisurados es el estado de la fisura durante el giro del eje, una simplificación no realista consiste en considerar la fisura siempre abierta [3-4], sin embargo cuando un eje gira la fisura se abre y se cierra alternativamente dependiendo de si se encuentra sometida a esfuerzos de tracción o de

compresión. Este mecanismo de apertura y cierre de la fisura se denomina 'breathing' [5] y como consecuencia del mismo el problema del comportamiento del eje se convierte en no lineal.

En este trabajo se presenta el estudio numérico cuasiestático de un eje con fisura semielíptica sometido a flexión pura, a partir del cual se ha determinado para cada ángulo de giro, y en función de las características del defecto (tamaño y forma), los valores de la flexibilidad del eje y el grado de apertura de la fisura.

2. MODELO NUMÉRICO DEL EJE FISURADO

Se ha desarrollado un modelo tridimensional numérico mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF) utilizando el código comercial ABAQUS/Standard [6].

Como se ha explicado, para abordar de manera simplificada el estudio del comportamiento de los ejes fisurados y la obtención de la flexibilidad, la mayoría de los autores consideran que las fisuras de fatiga en un eje presentan frente recto. Aunque esta hipótesis es válida y conduce a resultados conservadores, no representa la realidad de los ejes giratorios fisurados, en los que la fisura presenta un frente aproximadamente elíptico (figura 1).

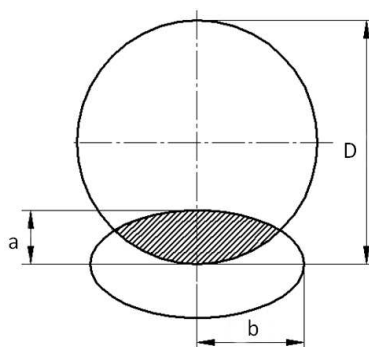


Figura 1. Geometría transversal de la fisura de frente semielíptico

Los parámetros característicos de la fisura elíptica son los siguientes:

- Longitud característica de la fisura (α).

$$\alpha = \frac{a}{D} \quad (1)$$

- Factor de forma de la fisura (β).

$$\beta = \frac{a}{b} \quad (2)$$

$\beta=1$ se corresponde con una fisura de frente semicircular y $\beta=0$ de frente recto.

El elemento modelado es un eje de aluminio de longitud $L=900$ mm y diámetro $D=20$ mm, módulo de elasticidad $E=72$ GPa, coeficiente de Poisson $\nu=0.33$ y densidad $\rho=2800$ kg/m³, el cual contiene una fisura transversal en su sección central. El eje se encuentra biapoyado y está sometido a dos cargas concentradas $F=100$ N, que se aplican a una distancia $d=223$ mm de los extremos del eje (figura 2), de manera que, en la sección fisurada, se tiene un estado de flexión pura.

En cuanto a la profundidad de la fisura, se han simulado distintos valores de α , que varían desde 0.1 hasta 0.5 en intervalos de 0.1, mientras que el factor de forma β varía entre 0.0 y 1.0 en intervalos de 0.25.

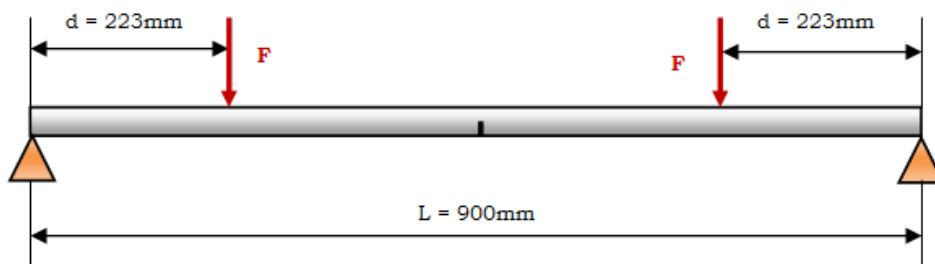


Figura 2. Esquema del eje fisurado

Para simular la rotación del eje se ha realizado un estudio cuasiestático de diferentes posiciones de giro. En la figura 3 se pueden ver cómo varían algunas de las posiciones angulares (Φ) consideradas en el modelo desarrollado.

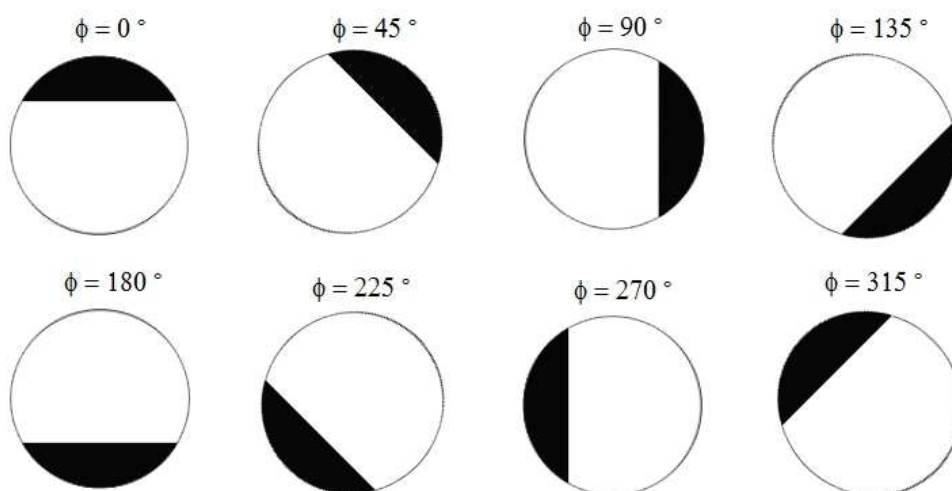


Figura 3. Posiciones angulares de la fisura durante un giro completo

Para simular la sección fisurada se ha definido un contacto entre las dos superficies correspondientes a las caras libres de la misma, para evitar que cuando la fisura se encuentre en estado cerrado una de las caras de la fisura penetre en la otra. El contacto entre ambas superficies está caracterizado, por una parte, por el comportamiento tangencial, con coeficiente de rozamiento infinito y, por otra parte, por el comportamiento normal, para el que se ha elegido el modelo 'Hard Contact', que permite que las superficies no transmitan presión de contacto a menos que los nodos de una de las superficies estén en contacto con la otra, es decir, permite la separación de las superficies después del contacto.

En lo que respecta al mallado del modelo, para determinar el tamaño óptimo de la malla de cálculo, se ha realizado un análisis previo, disminuyendo el tamaño de la misma hasta observar una convergencia de los resultados.

La barra ha sido discretizada mediante elementos hexaédricos estructurados de integración reducida, debido a que han presentado mejor comportamiento durante el análisis. Por último, hay que reseñar que en la zona de la fisura se ha utilizado mayor densidad de malla que en el resto del eje. En la figura 4 se puede observar el detalle de la malla en la sección fisurada, en los planos transversal y longitudinal, respectivamente.

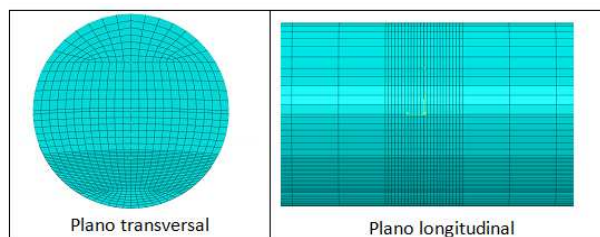


Figura 4. Detalle de la malla en la sección fisurada

3. RESULTADOS

A partir de los modelos numéricos desarrollados se han obtenido dos tipos de resultados diferentes. Los primeros están orientados a estudiar el mecanismo de apertura y cierre de la fisura a lo largo de un giro del eje, y los segundos se han utilizado para analizar la variación de la flexibilidad local del eje en la zona de la fisura durante el mismo periodo.

3.1. Mecanismo de apertura-cierre de la fisura

El estudio del mecanismo de apertura y cierre de la fisura tiene como objetivo determinar qué zona de la sección fisurada se encuentra abierta a lo largo del giro del eje. En la figura 5 se puede ver un ejemplo de los resultados obtenidos en la que se muestra la representación de la sección fisurada para una fisura $\alpha=0.5$ y $\beta=0.5$, la zona negra se corresponde con la porción de la sección que se encuentra abierta para cada ángulo de giro.

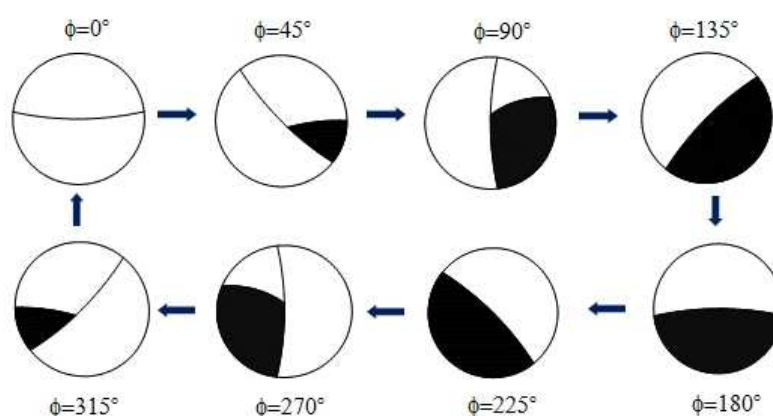


Figura 5. Apertura de la fisura (zona negra) para un eje con una fisura con $\alpha=0.5$ y $\beta=0.5$ en un giro completo

A partir de estas imágenes se ha medido, mediante métodos gráficos, el porcentaje de sección fisurada abierta respecto a la sección total del eje a lo largo de un giro completo.

Es importante destacar que a lo largo del giro del eje son especialmente importantes las zonas de transición en las que la fisura deja de estar completamente abierta o completamente cerrada. En este sentido, en la literatura se puede encontrar que la mayoría de los autores modelizan la transición entre fisura completamente abierta y fisura completamente cerrada mediante una función trigonométrica o como una función escalón [7].

En este trabajo se ha considerado que la fisura se abre y se cierra de forma gradual, ya que estos intervalos de transición son especialmente importantes en el fenómeno de crecimiento de la fisura. Por ello, en las zonas problemáticas mencionadas anteriormente se han

utilizado intervalos de ángulo de giro más pequeños que en el resto de la rotación. En total se han simulado en torno a 400 modelos diferentes.

En la figura 6 se muestran los valores de porcentaje de fisura abierta respecto a la sección transversal total del eje, obtenidos para todos los casos de α y β simulados. En cada gráfica se muestran únicamente los valores para medio giro (de 0° a 180°), ya que se ha supuesto un eje sin ningún tipo de desequilibrio, y por lo tanto el intervalo entre 180° y 360° es simétrico del anterior.

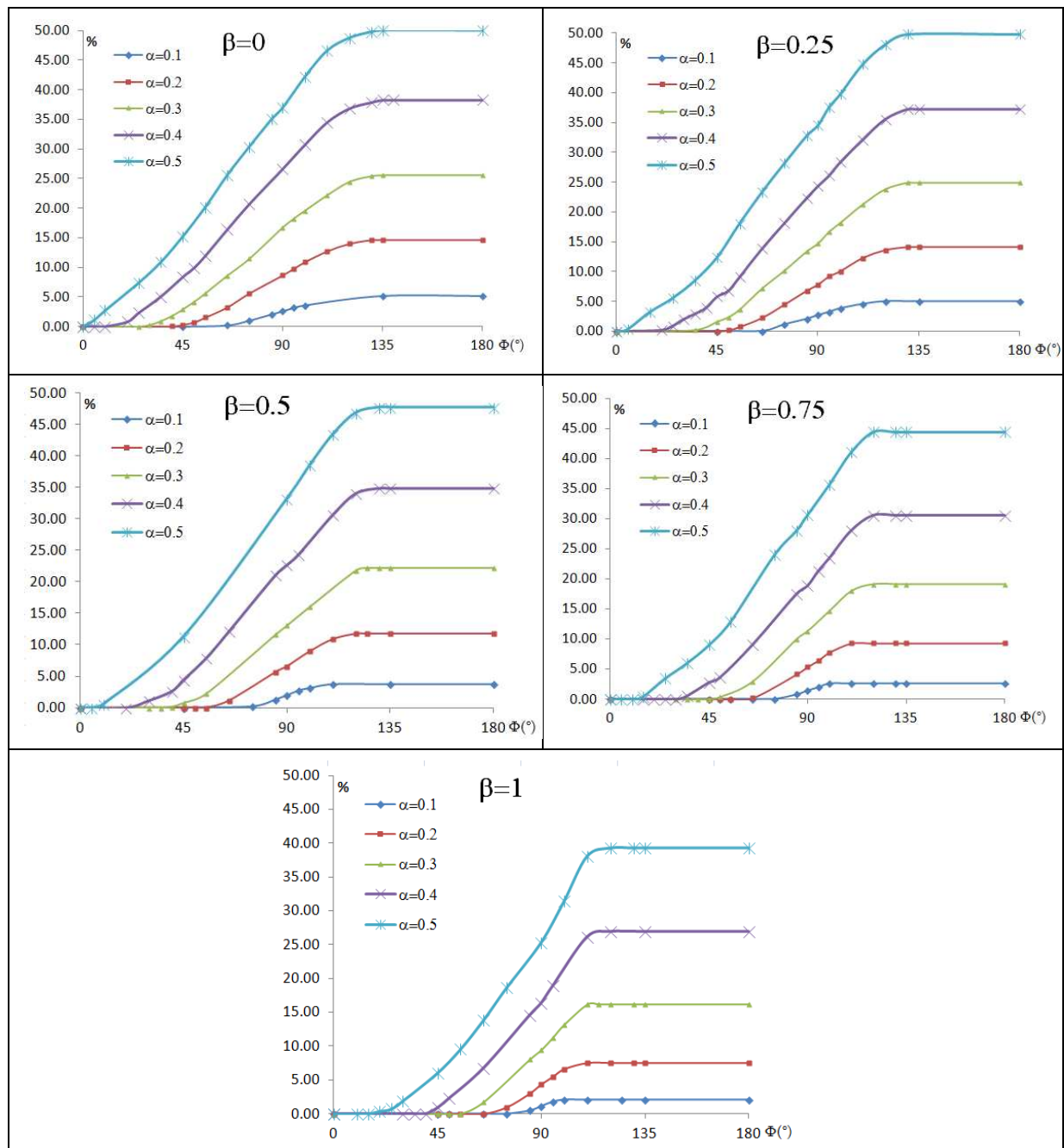


Figura 6. Porcentaje de apertura de la fisura respecto de la sección transversal total a lo largo de medio giro

En las gráficas que componen la figura 6 se puede observar que, como es lógico, para un mismo valor de β , la apertura de la fisura en todo el recorrido crece con la profundidad de la misma y, por otra parte, para un valor de α fijo, la apertura es más pequeña a medida que aumenta el valor de β .

Como se ha explicado anteriormente, es muy importante determinar con la mayor exactitud posible el momento en el que la fisura se abre o se cierra, ya que el tiempo que permanece completa o parcialmente abierta influye en las tensiones de fatiga a las que se sometido el eje.

En la tabla 1 se muestra el porcentaje de ángulo de giro respecto a una rotación completa en el que la fisura se encuentra parcial o totalmente abierta para cada uno de los casos estudiados:

%	$\beta=0$	$\beta=0.25$	$\beta=0.5$	$\beta=0.75$	$\beta=1$
$\alpha=0.1$	0.30	0.30	0.20	0.08	0.08
$\alpha=0.2$	0.50	0.48	0.30	0.26	0.20
$\alpha=0.3$	0.64	0.52	0.48	0.38	0.26
$\alpha=0.4$	0.70	0.62	0.56	0.48	0.42
$\alpha=0.5$	0.72	0.70	0.66	0.56	0.52

Tabla 1. Porcentaje de ángulo de fisura abierta respecto al total de un giro

A la vista de los datos de la tabla 1, la fisura se encuentra más tiempo abierta a lo largo de un giro completo cuanto más recto es el frente y mayor es la profundidad.

3.2. Flexibilidad del eje fisurado

La flexibilidad local adimensional del eje fisurado en la sección de la fisura (λ), para cada ángulo de giro Φ , se ha calculado mediante la ecuación 3).

$$\lambda(\phi) = \frac{\delta_f(\phi)}{\delta_{nf}} \quad (3)$$

siendo δ_f el desplazamiento del eje fisurado para cada ángulo de giro y δ_{nf} el desplazamiento en la misma sección de un eje sin fisura.

En la figura 7 se muestran los resultados obtenidos. Como en el caso anterior, sólo se muestran las gráficas en el intervalo entre 0° y 180° . En estas gráficas se puede observar que, para un mismo valor de β , la flexibilidad en todo el recorrido crece con la profundidad del defecto. No podía ser de otra manera, ya que el área resistente decrece a medida que aumenta la profundidad de la fisura. Y, por otra parte, para un valor de α fijo, la flexibilidad disminuye a medida que aumenta el valor de β .

Además, también se puede ver que, independientemente de los valores de α y β , la flexibilidad prácticamente no varía respecto de la del eje intacto hasta que el ángulo de giro se encuentra en torno a los 50° .

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un estudio cuasiestático del comportamiento de un eje rotatorio fisurado sometido a flexión pura.

Se ha desarrollado un modelo de elementos finitos del eje que ha permitido determinar cómo influye la profundidad y forma de la fisura en el mecanismo de apertura y cierre de la misma y en la flexibilidad del eje a lo largo de una vuelta completa de funcionamiento.

Los resultados obtenidos permitirán, por una parte, predecir la influencia del 'breathing' en el valor del Factor de Intensidad de Tensiones y en el fenómeno de crecimiento de la fisura; y, por otra parte, el conocimiento de la flexibilidad a lo largo de una rotación completa posibilitará conocer la órbita que describiría el eje en condiciones de giro cuasiestáticas.

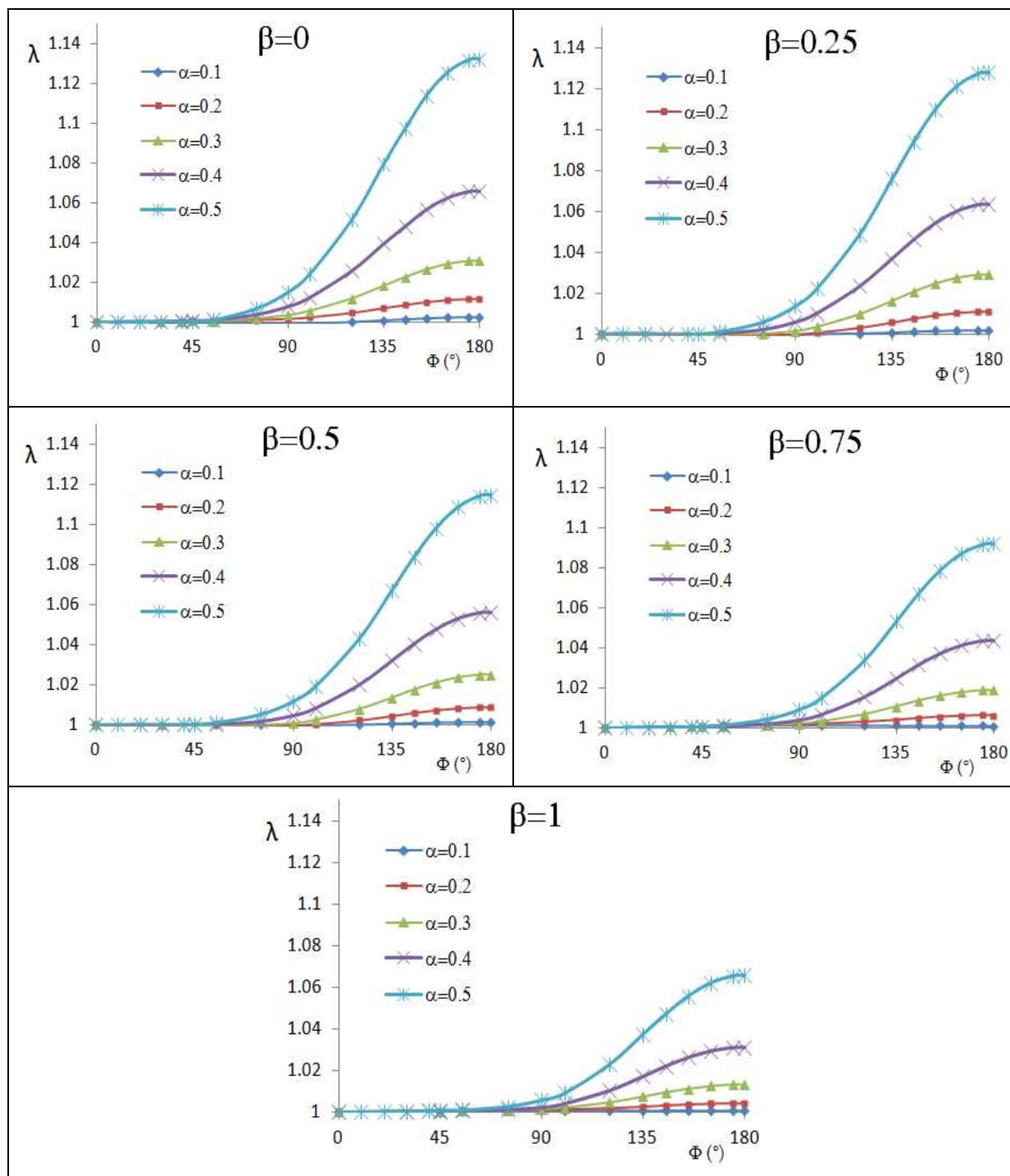


Figura 7. Variación de la flexibilidad adimensional a lo largo de medio giro

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad por el apoyo para este trabajo a través del Proyecto DPI2009-13264.

5. REFERENCIAS

- [1] G. Sabnavis et al. *Cracked shaft detection and diagnosis: a literature review*. The Shock and Vibration Digest, 36 (2004), 287-296.
- [2] C.S. Shin et al. *Experimental and finite element analyses on stress intensity factors of an elliptical surface crack in a circular shaft under tension and bending*. Int. J. Fracture, 129, (2004), 239-264.
- [3] C.A. Papadopoulos, A.D Dimarogonas, *Coupled longitudinal and bending vibrations of a rotating shafts with an open crack*, Journal of Sound and Vibration, 117 (1987), 81-93.
- [4] C.A. Papadopoulos, A.D Dimarogonas, *Coupled longitudinal and bending vibrations of a cracked shaft*, Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design, 110 (1988), 1-8.
- [5] R. Gasch, *A survey of the dynamic behavior of a simple rotating shaft with a transverse crack*, Journal of Sound and Vibration, (1976), C178-6.
- [6] ABAQUS *Theory Manual, Version 6.7*, Dassault Systèmes Inc. (2007).
- [7] 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 (2008), 763-789.