

PROCEDIMIENTO PARA LA DETECCIÓN DE GRIETAS EN EJES DE PALA DE AEROGENERADORES

M. Polo, J. Domínguez, J. García-Lomas
 Dpto. de Ingeniería Mecánica y de los Materiales
 E.T.S.I.I. de Sevilla, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092, SEVILLA

Resumen. Se presenta un procedimiento para detectar la existencia de una grieta en los ejes de pala de un aerogenerador, sin que sea necesario desmontar la maquina para el proceso de inspección. El procedimiento es sencillo de aplicar y con costes de inspección bastante reducidos. El método se basa en la variación de las tensiones en la superficie del eje, en una zona cercana a la de inicio de la grieta, al ir creciendo esta. Se analiza numéricamente mediante elementos finitos un modelo del eje y posteriormente se realizan dos ensayos con ejes de pala instrumentados mediante bandas extensométricas, analizando la evolución de las tensiones con la longitud de grieta y la influencia de las condiciones de contorno.

Abstract. A procedure is presented to detect the existence of a crack in the blade shaft of wind power turbine, without it is necessary to dismount the it schemes for the inspection process. The procedure is simple of applying and with quite reduced inspection costs. The method is based on the variation of the stress in the surface of the shaft, in a near area to that of beginning of the crack, when going growing this. It is analysed numerically by means of finite elements. They are carried out tests with two shafts with strain gauges, analysing the evolution of the stress with the crack dimension and the influence of the boundary conditions.

1. INTRODUCCION

El funcionamiento de un aerogenerador esta basado en la variación de la cantidad de movimiento de la masa de aire al atravesar un perfil aerodinámico. Este fenómeno produce en el perfil la aparición de una fuerza resultante, cuya componente en el plano de rotación (fuerza útil) es la que produce el movimiento del rotor de la maquina. Todos los componentes de los aerogeneradores se encuentran sometidos simultáneamente a las acciones del viento y a las derivadas de su propio funcionamiento.

Los esfuerzos resultantes en las palas de los aerogeneradores y a sus ejes son principalmente de tres tipos: peso propio, fuerzas de inercia debidas al movimiento de rotación y las carga de viento. Con respecto a las cargas debidas al viento, las palas se encuentran sometidas a una tensión media debido a la acción de este, y a una tensión alterna debida a la variabilidad en el espacio y el tiempo de la velocidad del viento, además de otros factores como pueden ser el efecto sombra de la torre, la orientación de la maquina con respecto a la dirección del viento y en definitiva todas las faltas de homogeneidad que hay en cualquier proceso real.

También contribuye a la variabilidad de los esfuerzos a los que se encuentran sometidos las palas y sus ejes, el funcionamiento del aerogenerador, ya que este trabaja a potencia constante, por lo que va regulando la posición de las palas en función de la velocidad de viento con la consiguiente variación de los esfuerzos a los que se

encuentran sometidas. Debido al carácter fluctuante de estos esfuerzos sobre los ejes de pala aparecen los problemas asociados a la fatiga. Existen zonas donde los efectos de la fatiga se ven acentuados por la existencia de concentraciones de tensiones debidas a cambio de diámetro del eje, posibles pozos de corrosión que por su efecto entalla pueden ser puntos de inicio de grietas. Estos problemas pueden dar lugar a la nucleación y crecimiento de una grieta por fatiga y conducir al fallo del elemento.

La rotura no prevista de un eje de pala supone un alto coste en reparación de los elementos dañados y un grave riesgo para los operarios que trabajan en el mantenimiento de la planta, por lo que la detección de fallos permite la sustitución del elemento fisurado antes de la fractura, con el consiguiente ahorro en reparación de materiales y de coste de horas no productivas por la falta de previsión del fallo.

El procedimiento desarrollado debe detectar la existencia de una grieta sin que sea necesario desmontar la maquina para el proceso de inspección. Debe ser sencillo de aplicar y con el mínimo coste posible. El método se basa en la variación de las tensiones en la superficie del eje, en una zona cercana a la de inicio de la grieta, al ir creciendo esta.

El problema principal para la detección de dichas grietas es su lugar de inicio, ya que se encuentra en una zona inaccesible (Fig. 1), por lo que es inviable el uso de métodos tradicionales como la inspección visual, líquidos penetrantes, ultrasonidos, etc. El objetivo

fundamental es desarrollar un procedimiento para detectar los ejes de pala que están agrietados con tiempo suficiente para su sustitución antes de la fractura.

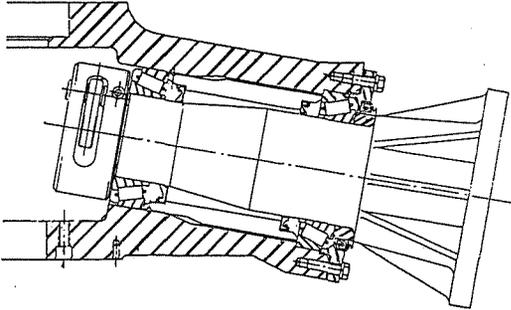


Fig. 1. Eje de pala montado en su alojamiento

2. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO.

El procedimiento para la detección de grietas desarrollado se basa en la reducción de tensiones en los puntos cercanos a los de inicio de grieta al ir creciendo esta. El método para la detección de grietas en el eje de pala consiste en la instrumentación de dicho eje mediante galgas extensométricas situadas en su superficie, en las proximidades de los puntos en los cuales pueden aparecer grietas, y medida de las tensiones en las galgas ante una carga dinámica. La existencia de una grieta hará que la tensión en las bandas disminuya respecto a la producida cuando no existe grieta.

Los aspectos principales a determinar de este método son los puntos que se tomaran como referencia para medida de las tensiones, el número de bandas que será necesario instalar para cubrir la zona de posible inicio de grietas y los puntos de aplicación de la carga.

2.1 Fundamentos del método

La configuración del eje de pala instrumentado ha quedado fijada en tres bandas situadas a 30mm del radio de acuerdo y con la disposición de la Fig. 2.

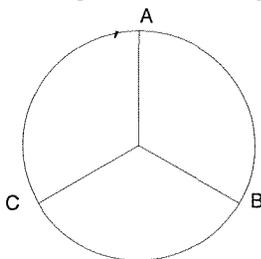


Fig. 2. Disposición final de las bandas.

El criterio que determine la existencia o no de una grieta debe ser independiente de los esfuerzos aplicados sobre el eje de pala, debido a que no se conocen las acciones resultantes en el momento de la inspección. Para que el criterio elegido sea independiente de los esfuerzos sobre

el eje, debe depender exclusivamente de la geometría del eje y de la disposición de las galgas para que sea constante mientras no exista grieta, y en cambio varíe con la variación de la geometría que se produce al aparecer una grieta.

Para expresar las medidas de las bandas se ha tenido en cuenta que cualquier momento M aplicado sobre el eje de pala se puede descomponer según dos ejes perpendiculares, en M_x y M_y de esta forma las tensiones medidas en las bandas se pueden expresar como:

$$\sigma_A = a_1 \cdot M_x + a_2 \cdot M_y \quad (1)$$

$$\sigma_B = b_1 \cdot M_x + b_2 \cdot M_y \quad (2)$$

$$\sigma_C = c_1 \cdot M_x + c_2 \cdot M_y \quad (3)$$

Donde los coeficientes a_i , b_i y c_i dependen de las características geométricas de la sección y de la posición de las bandas

Una vez fijadas las bandas, los coeficientes correctores tienen unos valores que vendrán dados en función de la precisión en el posicionado de dichas bandas, y son desconocidos.

A la hora de elegir el criterio óptimo se ha buscado más de una expresión para aumentar la fiabilidad del procedimiento. Se han obtenido tres relaciones entre las medidas de las bandas que dan lugar a las tres condiciones que se deben cumplir en el procedimiento de detección del fallo.

Para obtener dichas relaciones se han considerado tres sistemas de referencia y se han expresado las tensiones medidas en las bandas, debidas a un momento M , en cada uno de estos sistemas, obteniéndose tres expresiones que dependen únicamente de parámetros geométricos. Las expresiones obtenidas han sido las siguientes: Caso 1

La galga A está orientada longitudinalmente con el eje Y. Las ecuaciones (1), (2) y (3) se pueden escribir como:

$$\sigma_A = a_{11} \cdot M_{x1} \quad (4)$$

$$\sigma_B = b_{12} \cdot M_{x1} + b_{21} \cdot M_{y1} \quad (5)$$

$$\sigma_C = c_{12} \cdot M_{x1} + c_{21} \cdot M_{y1} \quad (6)$$

Eliminando M_{x1} y M_{y1} en las ecuaciones (4), (5) y (6) se obtiene:

$$\frac{\sigma_B}{\sigma_A} - S_A \cdot \frac{\sigma_C}{\sigma_A} = t_A \quad (7)$$

donde :

$$S_A = \frac{b_{21}}{c_{21}} \quad \text{y} \quad t_A = \frac{c_{21} \cdot b_{12} - b_{21} \cdot c_{12}}{a_{11} \cdot c_{21}} \quad (8)$$

En los otros dos casos, los ejes se definen de forma que el eje Y este orientado longitudinalmente con las bandas B y C respectivamente. Operando de forma semejante al primer caso se obtienen las expresiones siguientes:

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_B} - S_B \cdot \frac{\sigma_C}{\sigma_B} = t_B \quad (9)$$

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_C} - S_B \cdot \frac{\sigma_B}{\sigma_C} = t_C \quad (10)$$

Las ecuaciones (7), (9) y (10) relacionan las tensiones medidas en las galgas con datos geométricos, por tanto se tienen unas relaciones entre las galgas, de valor constante. Se dispone de un sistema de 3 ecuaciones con 6 incógnitas $\mathbf{X} = \{S_A, t_A, S_B, t_B, S_C, t_C\}^T$. Estas ecuaciones son las que definen el criterio para predecir la existencia de grieta.

Todos los datos que intervienen en las ecuaciones son conocidos excepto los correspondientes a los coeficientes introducidos para tener en cuenta los posibles errores en la posición de las galgas. Para determinar estos coeficientes ha sido necesario desarrollar un programa de optimización que calcule los coeficientes una vez colocadas las bandas. A partir de las señales de estas.

2.2 Análisis Numérico

Las posiciones teóricas son las correspondientes a una distancia de 30mm desde el radio de acuerdo y centradas entre dos nervios. Para la determinación de esta posición se realizó un análisis numérico mediante elementos finitos. El modelo reproducido numéricamente, corresponde a la geometría simplificada de un eje de pala Fig. 3. Las simplificaciones realizadas reducen la complejidad del modelo y el tiempo de procesado sin afectar a los resultados. Se modela solo la mitad del eje aprovechando la simetría en la geometría y en las cargas.

Para la obtención de las tensiones en función de la longitud de la grieta ha sido necesaria la elaboración de modelos con distintas longitudes de grieta. La profundidad en cada uno de los casos es aproximadamente 10mm mayor que el anterior hasta alcanzar el espesor del eje.

El último modelo representa una grieta que ha sobrepasado el espesor del eje. La parte fundamental del modelo es la zona del concentrador de tensiones, en el radio de acuerdo del eje, donde además se han modelado las grietas de distintos tamaños.

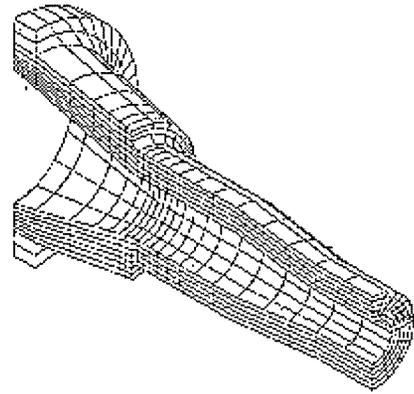


Fig. 3. Modelo numérico del eje de pala.

Se emplea el programa ABAQUS con elementos 3D con 20 nodos, situados en los vértices del elemento y en los puntos intermedios de las aristas y 3 grados de libertad por nodo. La solución adoptada para el modelado de la grieta ha sido el uso de elementos *singulares*. Éstos son una degeneración de los elementos isoparamétricos regulares, presentando la ventaja de contener en sus funciones de forma el comportamiento singular en tensiones con $1/\sqrt{r}$. Para obtener la singularidad deseada a partir de un elemento isoparamétrico cuadrático se desplazan sus nodos intermedios hacia la posición de 1/4 en las caras perpendiculares al frente de grieta.[1],[2],[3].

En función de los resultados obtenidos en el análisis numérico se ha definido como posición más sensible a la reducción de las tensiones, los puntos situados a una distancia aproximada de 30 mm desde el radio de acuerdo, ya que es el punto donde mayores variaciones se observan en todas las posiciones.

2.3 Optimización

Las ecuaciones (7), (9) y (10) se cumplen solo en el caso en el que la posición de las galgas este perfectamente definida. En cualquier caso se pueden expresar de la forma siguiente:

$$f_1(\mathbf{X}) \equiv \frac{\sigma_B}{\sigma_A} - S_A \cdot \frac{\sigma_C}{\sigma_A} - t_A = 0 \quad (11)$$

$$f_2(\mathbf{X}) \equiv \frac{\sigma_A}{\sigma_B} - S_B \cdot \frac{\sigma_C}{\sigma_B} - t_B = 0 \quad (12)$$

$$f_3(\mathbf{X}) \equiv \frac{\sigma_A}{\sigma_C} - S_B \cdot \frac{\sigma_B}{\sigma_C} - t_C = 0 \quad (13)$$

Para calcular los coeficientes correctores es necesario resolver un problema de optimización debido a que el sistema es indeterminado. Dicha optimización debe minimizar los errores en las ecuaciones. Para ello y teniendo en cuenta que en la lectura de las galgas también influyen los errores propios de medición de

estas y del sistema de adquisición, y por ello no todas las medidas darían los mismos coeficientes, se han tomado 10 valores de amplitudes de las señales de las bandas, y se han sustituido en las ecuaciones, para que los coeficientes obtenidos sean unos valores promedios entre distintas medidas de las bandas.

Para que los coeficientes hagan mínimas f_1 , f_2 y f_3 a la vez y para que el signo de los valores de las funciones en cada caso no influya, se ha minimizado la suma de las funciones al cuadrado. La función objetivo a minimizar quedaría de la forma siguiente:

$$\sum_{i=1}^{i=10} [f_1(\mathbf{X})^2 + f_2(\mathbf{X})^2 + f_3(\mathbf{X})^2] \quad (14)$$

donde el subíndice i indica el conjunto de valores de las galgas tomado como medida. El problema a optimizar sería el siguiente:

Determinar el \mathbf{X} que hace

$$\text{Min} \left(\sum_{i=1}^{i=10} [f_1(\mathbf{X})^2 + f_2(\mathbf{X})^2 + f_3(\mathbf{X})^2] \right) \quad (15)$$

Una vez obtenidos los coeficientes se introducen en las ecuaciones de las relaciones entre galgas (11), (12) y (13). Se obtienen los valores $f_1(\mathbf{X})$, $f_2(\mathbf{X})$ y $f_3(\mathbf{X})$ y a partir de ellos se puede determinar la existencia de una grieta. Los valores exactos de $f_1(\mathbf{X})$, $f_2(\mathbf{X})$ y $f_3(\mathbf{X})$ son iguales a 0, luego las diferencias con este valor ideal determinarían la existencia de una grieta.

3. COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL

Los métodos experimentales empleados han consistido en la realización de dos ensayos con ejes de pala instrumentados mediante bandas extensométricas, analizando la evolución de las tensiones con la longitud de grieta y la influencia de las condiciones de contorno.

En ambos ensayos se ha generado y crecido una grieta simulando el proceso de agrietado que sufren los ejes en su funcionamiento real. El ensayo del primer eje de pala tiene como objetivos, estimar la velocidad de crecimiento de la grieta, comparar los resultados obtenidos con los del análisis numérico y analizar la evolución de las tensiones en las bandas al ir creciendo la grieta, determinando así la sensibilidad del método, en las condiciones del ensayo en el laboratorio.

El segundo ensayo se ha realizado con el objeto de confirmar y mejorar los resultados obtenidos en el primer ensayo y contrastar la sensibilidad del procedimiento de detección de grietas.

Los ensayos han consistido en la generación y propagación de una grieta en el eje de pala mediante

flexión cíclica a partir de una entalla realizada en la superficie del eje. La carga aplicada con forma de onda senoidal se ha estimado mediante la curva S-N del material del eje de pala.

La historia de carga de este tipo de ensayo ha consistido en la aplicación de una carga dinámica durante un determinado número de ciclos y parada para la realización del ensayo estático. Este ensayo estático ha consistido en aplicar al eje de pala una carga puntual a una distancia de 300 mm de la brida, de forma que se produjera un momento flector en la zona de la entalla, y medir las tensiones en todas las bandas, al ir aplicando esta carga en distintas posiciones relativas a la entalla. De esta forma se ha ido controlando la evolución de las tensiones en todas las bandas.

A partir de la historia de carga del ensayo se ha representado la evolución de la grieta frente al número de ciclos en la siguiente curva de crecimiento Fig.4:

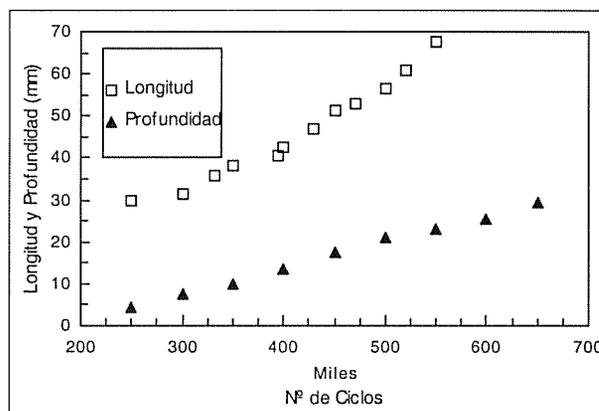


Fig. 4. Evolución de las dimensiones de la grieta con el número de ciclos

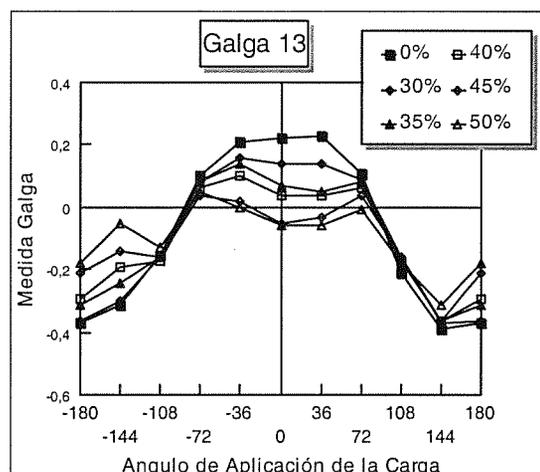


Fig.5. Evolución de la medida en una galga.

Los primeros datos representados en la Fig. 4 son para 210000 ciclos que se corresponden con los de la primera replica tomada. Los datos relativos a las dimensiones de

la grieta son los totales incluida la entalla, tanto en la longitud superficial como en la profundidad.

En la Fig. 5 se representa gráficamente la evolución de las medidas de una galga, en las distintas posiciones de aplicación de la carga, para las distintas longitudes de grieta. Los valores representados son los correspondientes a unas longitudes de grieta aproximadamente iguales al 30, 35, 40, 45 y 50% de la longitud de fractura. La longitud de fractura se ha definido como el valor medio de las longitudes finales de las grietas en los ejes fracturados ya estudiados.

En las gráficas se ha representado los valores de las bandas normalizados, es decir se han dividido los valores correspondientes a las bandas ϵ por un valor de referencia ϵ_0 que corresponde al valor máximo de todas las bandas, en función del punto de aplicación de la carga para las longitudes de grieta y la entalla. Como el estudio de los resultados se basa en la comparación de las medidas de las bandas para las distintas longitudes de grieta, la normalización de los valores no afecta a dicho análisis.

Con el fin de analizar el número mínimo de galgas necesarias, sus posiciones y los ángulos de aplicación de las cargas más eficaces se montó un conjunto de galgas como el señalado en la Fig. 6.

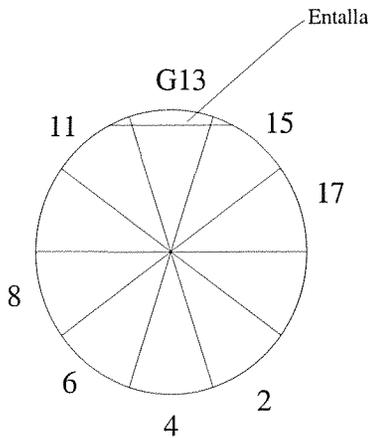


Fig.6. Distribución de las bandas con respecto a la entalla.

En la gráfica correspondiente a la galga 13, Fig. 5 que esta situada justo por encima de la entalla, se puede apreciar que en esta banda los resultados de la reducción de tensiones son apreciables desde una longitud de grieta muy pequeña, y que existe una gran diferencia de una medida a otra. Además existe disminución de las tensiones debida a la entalla comparando sus valores iniciales con los de las demás galgas.

Las bandas 11 y 15 son las adyacentes a la banda 13, y están situadas aproximadamente a 36° del centro de la entalla, son las siguientes en las cuales se empieza a

apreciar la reducción de las tensiones, esta reducción es perfectamente apreciable a partir de una grieta de aproximadamente el 25% de la longitud de fractura, llegando a ser bastante importante para grietas mayores.

También se observa que así como en las bandas que están situadas cercanas a la grieta van disminuyendo las tensiones, en las bandas opuestas a estas, bandas 2, 4 y 6 se produce un ligero aumento de las tensiones que ira incrementándose al ir creciendo la grieta. Esto es debido a una redistribución de las tensiones. Como consecuencia del crecimiento de la grieta la sección efectiva del eje se va reduciendo y la línea neutra se desplaza, dando lugar a una nueva distribución de las tensiones.

4. APLICACIÓN DEL MÉTODO

En primer lugar se ha realizado el ajuste de los coeficientes correctores. Para ello se han tomado 10 lecturas de las señales de las bandas agrupadas de 3 en 3 (aproximadamente a 120°) y se le ha aplicado el criterio de optimización. Una vez obtenidos los valores de los coeficientes se analiza la evolución de los parámetros del control del daño (f_1 , f_2 y f_3) con la longitud de la grieta. Es decir se analizan los valores de f_1 , f_2 y f_3 que al crecer la grieta tendrán valores diferentes de los teóricos.

Los resultados correspondientes se recogen en las gráficas de las figuras siguientes. En estas gráficas se representa un valor cuadrático medio de los parámetros de daño correspondiente a cada grupo de tres galgas, cuando la carga se aplica según el ángulo de posición de la galga indicada.

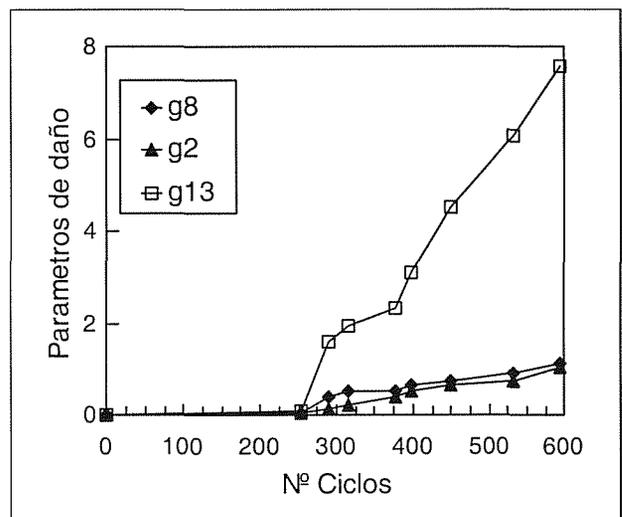


Fig. 7 Valor cuadrático medio de los parámetros de daño en las galgas 8, 4 y 13.

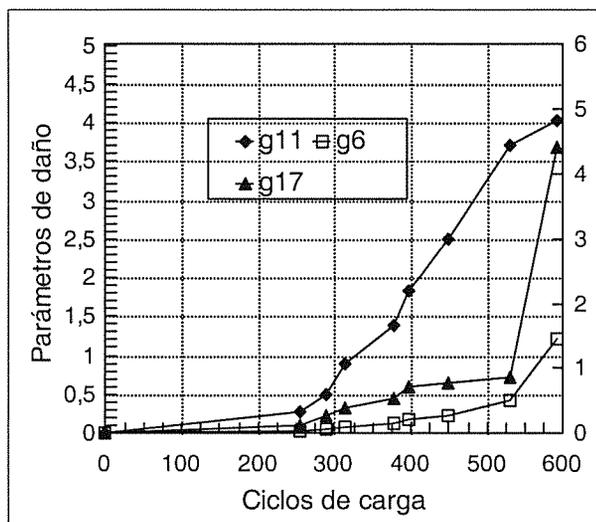


Fig.8 Valor cuadrático medio de los parámetros de daño en las galgas 11, 6 y 17

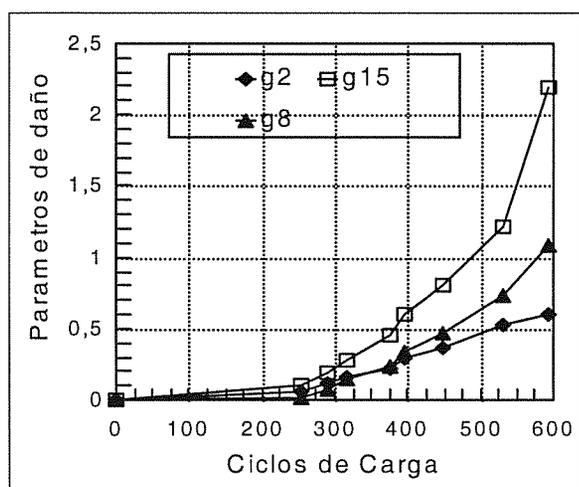


Fig.9 Valor cuadrático medio de los parámetros de daño en las galgas 8, 2 y 15.

5. CONCLUSIONES.

Como conclusiones de los resultados obtenidos, se puede afirmar que, empleando tres galgas extensométricas formando aproximadamente 120° , y empleando el valor cuadrático medio de los parámetros de daño se detecta perfectamente la aparición de una grieta. En cuanto al ángulo de aplicación de la carga en las inspecciones periódicas, debe de ser, el de la posición de cada una de las tres galgas. Además de dar buenos resultados, simplifica la operación de inspección, pues no es necesario medir ángulos. La posición longitudinal de las bandas sobre el eje de pala es a 30mm desde el cambio de diámetro del eje en

dirección a la brida. También se puede observar en las figuras 7, 8 y 9 que zona donde aparece la grieta es la comprendida entre las dos gráficas de mayor valor del parámetro de daño o coincide con la gráfica de mayor valor.

Con respecto a la longitud de grieta que sería detectable influye mucho el punto de inicio de la grieta con respecto a la localización de las bandas. La grieta sería detectable en el peor de los casos a partir de una longitud aproximadamente igual al 30% la longitud de fractura. En la mayoría de los casos se detecta cuando su longitud es aproximadamente igual al 25%.

A la hora de determinar el tiempo entre inspecciones es necesario determinar la vida a fatiga del eje de pala una vez detectada la grieta. Para ello es necesario conocer la curva de velocidad de crecimiento de grieta, y los esfuerzos a los que se encuentra sometido.[4]. A partir de la expresión de la velocidad de crecimiento y con los histogramas de momentos se calcula la vida a fatiga del eje. Una vez obtenido el incremento de longitud de grieta por hora de viento medio, se puede obtener el tiempo necesario para que la grieta crezca la longitud necesaria para que se produzca el fallo. En el caso de que se detectara con una longitud aproximada al 30% de la longitud de fractura el tiempo disponible para la sustitución del eje sería de 3 meses.

6. REFERENCIAS

- [1] Gerstle, W.H. and Abdalla, J.E. "Finite Element Meshing Criteria for Cracks Problems, Fracture Mechanics Twenty-first Symposium" ASTM STP 1074, pp 509-521 (1990).
- [2] Carpintieri, A. "Propagation of Surface Cracks Under Cycling Loading, Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures" Elsevier Science Publisher Ltd. (1994).
- [3] Banks-Stills, L. and Sherman, D. "On a Quarter-Point Three-Dimensional Finite Elements in Linear Elastic fracture Mechanics" Int. Journal of Fracture 41, pp 177-196. (1989).
- [4] Polo, M. "Procedimiento para la Detección de Grietas en Ejes de Pala de Aerogeneradores". Proyecto Fin de Carrera. 1996