

Estudio mediante elementos finitos del diseño de la reparación de las palas de un aerogenerador

J.C. Marín, A. Barroso, F. París, J. Cañas

Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales. Escuela Superior de Ingenieros.
Universidad de Sevilla., España.

RESUMEN

El objeto de este trabajo es el diseño de la reparación a aplicar sobre las palas de un aerogenerador que presentan un daño aparente. En base a estudios previos para detectar las razones que motivaron los daños, los cuales pusieron de manifiesto la influencia del estado tensional localizado en la zona afectada, se pretende conseguir que la reparación modifique dicho estado tensional para evitar que se reproduzca el daño observado. Para este propósito se han analizado distintas configuraciones modificadas mediante modelos de elementos finitos, estudiándose la influencia de diversos parámetros sobre el estado tensional local, y su efecto en la estimación de vida a fatiga. Finalmente, se aborda la forma de materializar en la práctica las reparaciones modeladas propuestas.

J. INTRODUCCIÓN

El estudio de los daños detectados (ver figura 1) en las palas de un aerogenerador de 300 Kw (Marín et al. 2007) puso de manifiesto que la concentración de tensiones debida a la geometría de esquina reentrante que presentaban las palas en la zona del daño jugaba un papel importante en su generación. Por ello, a la hora de plantear el diseño de una reparación adecuada, es conveniente que ésta además de coser las fisuras existentes en las palas dañadas, relaje convenientemente el estado tensional para prevenir fallos del mismo tipo del ocurrido.

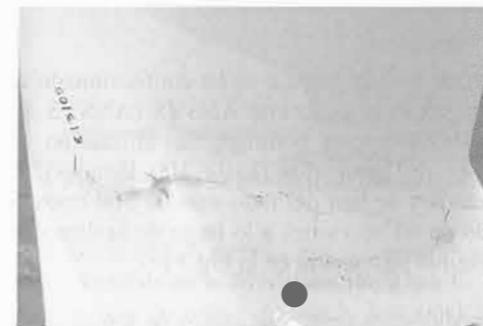


Fig. 1- Localización de los daños.

Con objeto de disminuir el estado tensional en la zona donde se ha observado el fallo, en primer lugar se analizará la influencia que sobre el estado tensional, y por consiguiente sobre una mejora de la vida a fatiga, tiene una variación en la geometría local del concentrador en la transición raíz - zona aerodinámica. El análisis de la modificación de dicho concentrador se va a realizar de modo local.

Utilizando un modelo de elementos finitos de la pala, se probarán dos configuraciones que tratan de suavizar la geometría de concentrador antes mencionada mediante la

inclusión de una superficie triangular "rellenando" la esquina. Se analizará por una parte la influencia del tamaño del triángulo y por otra la influencia de la cantidad de laminas umdlre c?nales en el lamado de dichos triángulos. Finalmente se abordará la forma de matenahzar en la practica las modificaciones anahzadas, y cómo incorporar dichas ideas en la reparación de las palas afectadas.

2.- INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DEL CONCENTRADOR

El efecto de concentrador es local y está directamente relacionado con el radio de acuerdo de la esquina. El aumento del radio de acuerdo a lo largo de la zona de unión entre la tapa y la raíz, reduciría el estado tensional local. Utilizando un modelo de elementos finitos de la pala, se han probado dos configuraciones que tratan de suavizar la geometría de la misma. En la Fig. 2 se muestra un detalle de la zona de estudio en su concepción original, en sus versiones modificadas 1 y 2.

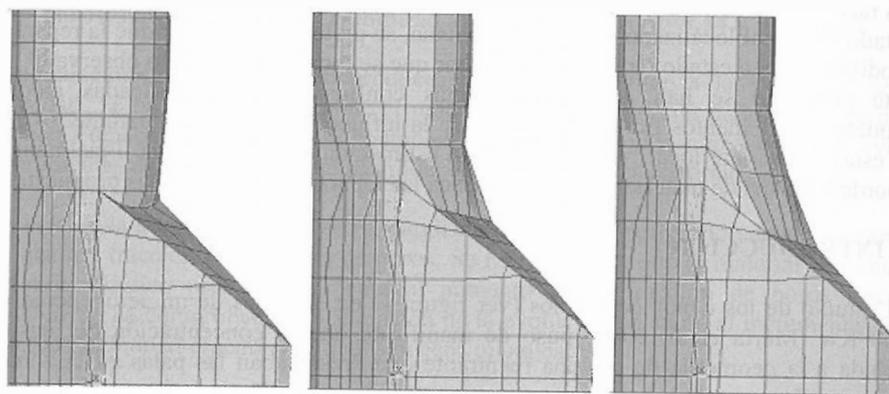


Fig. 2: a) Geometría original, b) modificación 1, c) modificación 2

El modelo numérico con la geometría original se describe en detalle en el apartado 2.1. Y las diferentes modificaciones en los apartados 2.2 y 2.3 respectivamente.

2.1.- Geometría original. Modelo MEF.

Para los distintos análisis que se van a realizar en este trabajo se ha confeccionado un modelo de elementos finitos de la pala utilizando el programa ANSYS (ANSYS 8.0 2003), empleándose elementos lámina (shell99) que permiten la utilización de materiales ortótropos y definir la estructura de laminados (hasta 100 láminas). El modelo consta de 5380 nodos, 2027 elementos y se han definido más de 500 tipos de laminados diferentes. La pala se ha dividido en 64 secciones a lo largo de la dirección longitudinal. El modelo con la geometría original se muestra en la Fig.3 (a).

Los nodos de la primera sección tienen impedidos los desplazamientos de forma que la pala queda empotrada en su extremo de raíz. El único caso de carga considerado para este análisis es el denominado N1.0 (Gerrnanisher Lloyd J999), que es un caso de carga de producción normal de potencia y con el que se realizan las verificaciones de vida a fatiga.

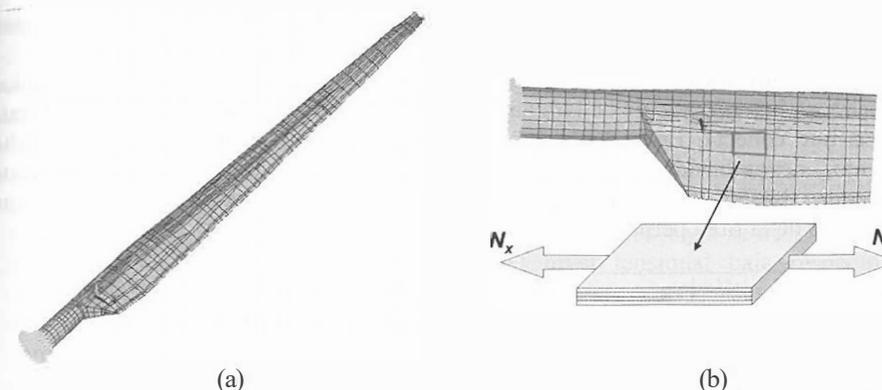


Fig. 3: (a) Modelo de elementos finitos de la pala (original), (b) esquema de los esfuerzos normales longitudinales N_x .

Se realizó un análisis estático de primer orden (sin considerar grandes desplazamientos). Los resultados a tomar como base para la comparación de las distintas configuraciones consideradas son los esfuerzos normales longitudinales por unidad de longitud N , (ver Fig. 3(b)). Los resultados de N , obtenidos para el caso de carga N1.0 y la geometría original de la pala se muestran en la Fig. 4, que corresponde a la cara de tracción del modelo, donde se han observado los daños, siendo esta zona el lugar donde aparecen los valores máximos de N , en toda la pala para el caso de carga analizado.

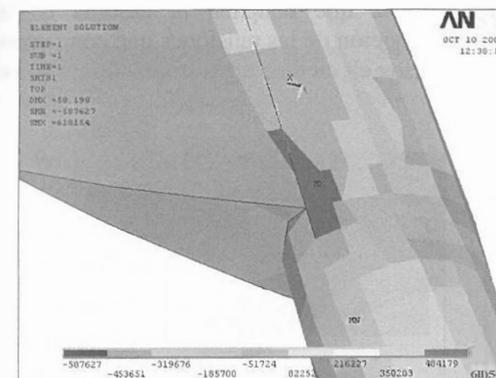


Fig. 4: N_x en la configuración original.

Hay que resaltar que cuantitativamente hablando, los valores de N , sólo son representativos a efectos de comparar con mallas similares, dado que el valor nominal teórico de N , en la zona muy próxima a la esquina reentrante es infinito y que el valor obtenido es dependiente de la discretización que se haga en el entorno de dicha esquina. Se aprecia también cómo la zona del borde de salida no transmite cargas significativas en comparación con la zona del borde de ataque.

2.2.- Análisis de la Modificación Tipo 1

Con objeto de relajar el estado tensional en la zona de influencia del concentrador se introducirá un triángulo lateral de material resistente que suavice la esquina reentrante (ver Fig. 2 (a) y (b)) en la zona donde se ha formado la grieta. Esta modificación va acompañada de la modificación de los elementos que conectan la raíz con la tapa. Concretamente, la modificación del modelo original ha consistido en: la creación de los elementos que conforman los triángulos laterales, la redefinición de los elementos de

tapa que contactan con la raíz, y la modificación de los laminados en los elementos adyacentes al elemento lateral triangular en la dirección longitudinal.

Con el fin de que el elemento triangular introducido tenga un comportamiento mecánico adecuado, se le ha dotado de un laminado similar al existente en los elementos de la raíz con los que conecta. En la tabla I se describe la secuencia del laminado de dicho elemento, denominándose MAT una lámina de fibra cortada y aleatoriamente distribuidas, NUFF una lámina unidireccional y BIAX el conjunto de dos láminas con direcciones de la fibra perpendiculares entre sí ($\pm 45^\circ$).

lámina	gramaje (g/m^2)
1 MAT	200
3 NUFF (0°)	1450
1 BIAX ($\pm 45^\circ$)	300
3 NUFF (0°)	1450
1 BIAX ($\pm 45^\circ$)	300
6 NUFF (0°)	1450
1 MAT	400

Tabla 1: laminado del elemento triangular.

La geometría de la tapa se modifica para adecuarse a la geometría de los triángulos laterales y además el laminado de la tapa se modifica para hacerlo más resistente y prevenir la aparición de la fisura que se ha observado en las palas inspeccionadas entre la tapa y la raíz. Los resultados de N_x obtenidos para el caso de carga N1.0 y la geometría modificada I se muestran en la Fig. 5(a), donde se puede observar que la modificación realizada produce dos efectos sobre el estado tensional, por una parte la reducción del nivel de tensiones sobre la zona que ocupaba la esquina en la configuración original, y por otra parte la redistribución de las tensiones que comienzan a pasar a través del triángulo introducido hacia los elementos adyacentes al mismo en dirección longitudinal.

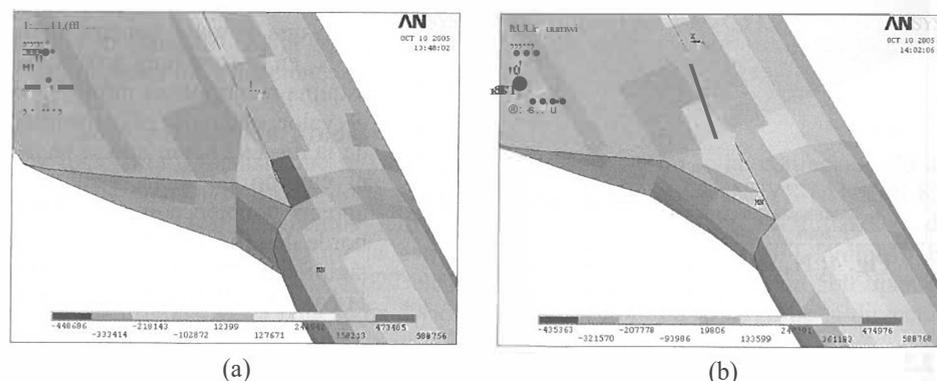


Fig. 5: Esfuerzos N_x , a) en la configuración 1, b) en la configuración 2.

2.3.- Análisis de la Modificación Tipo 2

Al igual que en la configuración modificada 1, el objeto de esta segunda modificación también es relajar el estado tensional en la zona de influencia del concentrador mediante la introducción de un triángulo de material resistente que suavice la esquina reentrante (ver Fig. 2 (a) y (c)). La única diferencia entre ambas modificaciones reside

en la dimensión del triángulo a emplear, que es mayor en esta configuración modificada 2. La estructura del laminado de los elementos que conforman el triángulo responde a la descrita en la tabla I. Al igual que en el caso anterior, la geometría de la tapa se modifica para adecuarse a la geometría de los triángulos laterales, modificando también el laminado de la tapa para hacerlo más resistente.

Los resultados de N_x obtenidos para el caso de carga N1.0 y la geometría modificada 2 se muestran en la Fig. 5(b). De la observación de las figuras 4 y 5 se desprende que en la zona donde se encontraba la esquina, el nivel tensional baja respecto a la configuración original y a la configuración modificada 1. Por otra parte, la redistribución de las tensiones que pasan a través del triángulo introducido hacia los elementos adyacentes al mismo en dirección longitudinal es aún más eficiente que en la configuración 1.

3.- VALORACIÓN DE RESULTADOS

A efectos de evaluar cuantitativamente el estado tensional de la configuración original y realizar las correspondientes comparaciones con las configuraciones modificadas, hay que puntualizar que, para que los resultados del modelo de elementos finitos sean representativos hay que alejarse de la esquina reentrante con objeto de que los valores tensionales estén regularizados, y por tanto no estén afectados por la discretización del modelo. Por otra parte, es razonable que los valores de N_x a tener en cuenta estén en el entorno de la zona donde se han observado los daños durante la inspección visual. En vista de los dos comentarios precedentes se van a tomar en consideración los valores de N_x en el entorno de la zona representada en la Fig. 6(a).

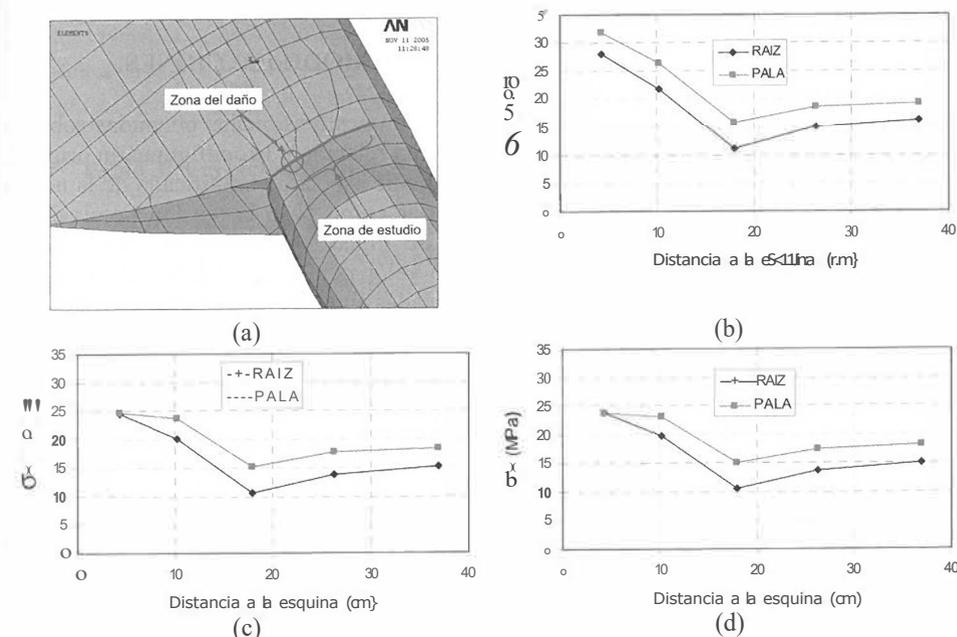


Fig. 6: a) Localización de las zonas de estudio y del daño; evolución de las tensiones b) configuración original, c) configuración 1, d) configuración 2.

En las figuras 6 (b, c, d) se representa la evolución de la tensión media longitudinal a_x ($\sigma_x = N_x / t$, siendo t el espesor del laminado) a lo largo de la zona de estudio para las distintas configuraciones. El valor de N_x es un valor promedio a lo largo del lado del elemento, por lo cual en las figuras dicho valor para cada elemento se ha asociado al centroide del mismo. Asimismo, se han representado las evoluciones correspondientes a los elementos de uno y otro lado de la línea de estudio, que se denominan RAIZ (elementos del lado de la raíz) y PALA (elementos del lado de la zona aerodinámica). Es preciso puntualizar que el fallo observado se localiza en el lado de la zona aerodinámica (PALA).

De las figuras anteriores se desprenden las siguientes observaciones:

- Aunque la evolución cualitativa de las tensiones en los elementos a uno y otro lado de la línea de estudio (RAIZ y PALA) son similares, la diferencia de espesor entre los laminados de dichos elementos (corroborada durante la inspección de las palas (Marín et al. 2007)) genera un nivel tensional más elevado en los elementos del lado de la zona aerodinámica (PALA) que en los elementos del lado de la raíz.
- La evolución de las tensiones en la configuración original evidencia cuantitativamente la presencia de un concentrador de tensiones. La introducción de los triángulos en las configuraciones modificadas atenúa dicha concentración, reduciendo a su vez el valor de la tensión sobre la zona dañada.
- Conforme nos alejamos del concentrador, la distribución de tensiones no se ve afectada significativamente en las configuraciones modificadas.
- El nivel tensional encontrado en la zona alejada del concentrador se ajusta razonablemente al valor de la tensión nominal que se obtiene en dicha zona con un modelo de Resistencia de Materiales (Cañas et al. 1999).

4.- ESTIMACIÓN DE VIDA A FATIGA EN LAS MODIFICACIONES.

Con objeto de valorar la repercusión de las variaciones tensionales obtenidas sobre la vida a fatiga de las configuraciones modificadas en relación a la configuración original, se va a utilizar el procedimiento de cálculo mediante espectro simplificado de la norma Germanisher Lloyd. Para ello se va a considerar como base la tensión nominal que origina el fallo por fatiga en un periodo de cinco años (correspondiente a la configuración original) y se va a afectar dicho valor por el decremento tensional que produce cada una de las configuraciones modificadas en el punto objeto de estudio.

Dentro de la zona de estudio (ver Fig. 6(a)) se ha tomado el centroide del segundo elemento como punto objeto de este análisis, dado que en él se reúnen las características antes mencionadas: está suficientemente alejado de la esquina y el daño observado se localizaba en el entorno de dicho punto. En la tabla 2 se muestran los resultados de dicho análisis, tanto el decremento tensional entre las configuraciones modificadas y la original, como el incremento de vida que supone respecto de la vida de 5 años tomada como referencia para la configuración original. Los resultados de la Tabla 2 muestran la mejora en la vida a fatiga que se consigue con las modificaciones realizadas, observándose que el incremento en vida crece, como era esperable, con el tamaño del triángulo.

Configuración	Δ tensiones en MPa y (%)	A vida (años)
Modificación 1	-2.73 (10.33 %)	4.8
Modificación 2	-3.37 (12.75 %)	6.6

Tabla 2: Variación tensional y vida.

4.1.- Estudio paramétrico

Con objeto de investigar la influencia de la configuración de los laminados empleados sobre el incremento de vida a fatiga, se han analizado variaciones sobre las dos configuraciones modificadas que consisten en aumentar o disminuir respectivamente el número de láminas unidireccionales presentes en los laminados involucrados en la modificación. La configuración de referencia del laminado es la descrita previamente en la tabla 1. Concretamente, se han analizado variaciones de ± 2 y ± 4 láminas de unidireccionales NUFF (1450 g/m²) en ambas configuraciones, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 3, donde se observa que el incremento del número de láminas de NUFF provoca un aumento del incremento de vida, siendo la variación algo más acusada cuando se eliminan láminas de NUFF respecto del laminado de referencia en comparación con la variación cuando se añaden láminas. Así mismo, como se vió anteriormente, el mayor incremento de vida se conseguía con el tamaño mayor del triángulo, ahora además se comprobaba la mayor influencia de este efecto en la vida a fatiga en comparación con la variación del laminado estudiado.

Configuración		Laminado de ref. -4	Laminado de ref. -2	Laminado de ref.	Laminado de ref. +2	Laminado de ref. +4
Modificación 1	σ_{cr} (MPa)	-2.46	-2.61	-2.73	-2.82	-2.89
	σ_{vida} (años)	4.2	4.6	4.8	5.1	5.3
Modificación 2	σ_{cr} (MPa)	-3.03	-3.22	-3.37	-3.48	-3.58
	σ_{vida} (años)	5.6	6.1	6.6	6.9	7.2

Tabla 3: Variación tensional y de vida para las variaciones de laminado.

Otro parámetro analizado ha sido la secuencia del laminado de la tapa, mostrando los resultados que la variación en vida producida por la reducción del número de láminas unidireccionales no resulta significativa, lo que viene a indicar que aunque es precisa la presencia de láminas unidireccionales, no es necesario un elevado número de ellas.

5.- MATERIALIZACIÓN DE LAS MODIFICACIONES DE LA GEOMETRÍA DEL CONCENTRADOR

Dado que los resultados expuestos en el apartado anterior corresponden a modelos de la pala no dañada, es preciso clarificar cómo se procedería en la práctica a la materialización de dichas modificaciones. Puesto que las modificaciones, suponen la adición de una superficie triangular en la zona del concentrador, hay que garantizar la continuidad estructural de dicha pieza con el resto de la pala. Esta continuidad se puede conseguir dando a las láminas del triángulo unas dimensiones mayores a las del propio triángulo para permitir el pegado sobre la superficie de la pala (ver Fig.7a).

Dado que el laminado que conforma el triángulo contiene un considerable número de láminas, la forma adecuada de construir el laminado requiere que cada lámina tenga contacto directo con la superficie de la pala, lo cual lleva a que cada lámina deba sobrepasar a la anterior en una determinada longitud de solape en toda su periferia (véase Fig. 7(b)). De esta forma se asegura una transmisión progresiva de cargas desde la pala a la superficie triangular de manera que ésta cumpla adecuadamente su función resistente.

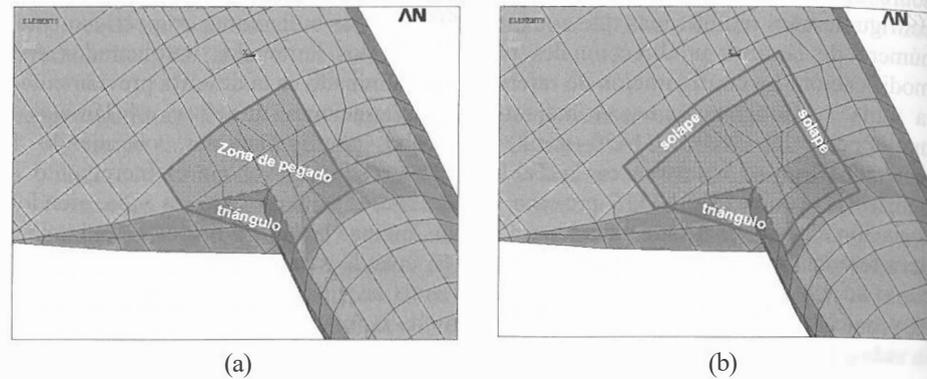


Fig. 7. a) Esquema de la configuración del refuerzo. b) Detalle de los solapes.

6.- CONCLUSIONES

Con objeto de diseñar una reparación adecuada se ha analizado la influencia que tiene sobre el estado tensional, y consecuentemente sobre la vida a fatiga de la pala, la geometría del concentrador que aparece en la transición de la raíz a la zona aerodinámica de la pala, encontrándose que la inclusión de una superficie triangular "rellenando" la esquina que genera la concentración de tensiones, alivia significativamente el estado tensional en la zona donde se ha observado el fallo y proporciona una mejora en la estimación de la vida a fatiga de la pala. Se ha observado que el tamaño del triángulo es el parámetro predominante en el comportamiento de este tipo de refuerzo, por lo cual los mayores incrementos en vida obtenidos corresponden al triángulo de mayor tamaño, siendo las variaciones en vida asociadas al número de láminas unidireccionales de un nivel inferior. Cabe destacar por último que todos los estudios realizados sobre modificaciones tienen como base un modelo de pala sin daños, por lo que este hecho debe tomarse en consideración a la hora de extrapolar estos resultados a palas dañadas. En cualquier caso, la idoneidad de la reparación propuesta habrá de ser verificada mediante la observación y control del comportamiento de las palas reparadas durante un periodo de tiempo representativo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos TRA2005-06764 y TRA2006 08077 (MEC) y los proyectos de excelencia TEP-1207 y TEP-02045 de la Junta de Andalucía.

REFERENCIAS

- ANSYS 8.0 (2003), Swanson Analysis System, Inc.
 CAÑAS J., MARÍN J.C., BARROSO A., PARÍS F. (1999) Sobre el uso de modelos de Resistencia de Materiales y modelos de Elementos Finitos en el diseño de palas de aerogenerador en *MATCOMP 99*, Benalmadena (Málaga), España, pp.271-278.
 GERMANISHER LLOYD (1999) Rules and Regulations IV - Non Marine Technology, Part I - Wind Energy, Germanischer Lloyd.
 MARÍN J.C., BARROSO A., PARÍS F., CAÑAS J. (2007) Estudio de los daños por fatiga en palas de aerogenerador. *Anales de Mecánica de la Fractura*, Vol.2, pp.581-586.