

SOBRE EL USO DE MODELOS DE RESISTENCIA DE MATERIALES Y MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS EN EL DISEÑO DE PALAS DE AEROGENERADOR

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

Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales
Universidad de Sevilla
Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla, España.
canas@esi.us.es

Palabras clave: Palas aerogenerador, resistencia materiales, elementos finitos, materiales compuestos.

Resumen: *La gran esbeltez de las palas de aerogenerador posibilita el uso de una formulación basada en las hipótesis de Resistencia de Materiales (RM) como alternativa al uso del Método de los Elementos Finitos (MEF). En el presente trabajo se realiza un estudio comparativo de estas dos herramientas de cálculo (RM de desarrollo propio y MEF) en lo referente a limitaciones de uso, manejabilidad, fiabilidad y en la capacidad de abordar las comprobaciones exigidas por la normativa vigente.*

1.- INTRODUCCIÓN

El gran auge que en la actualidad presenta el uso de la energía eólica, ha supuesto un importante desarrollo de este sector energético y una progresiva mejora de los diseños. Existe una tendencia clara al uso de aerogeneradores con mayores potencias, lo que conlleva palas con envergaduras también mayores. La necesidad de índole práctica de mantener el peso de las palas por debajo de ciertos valores, conduce a procesos de diseño cada vez más ajustados. Las limitaciones de peso y también, en gran medida los condicionantes de rigidez, hacen casi obligado el uso de materiales compuestos, bien sea fibra de vidrio, bien sea fibra de carbono, en la fabricación de este tipo de estructuras.

Las dos herramientas que se utilizan en el diseño de palas son programas basados en el Método de los Elementos Finitos (MEF) o en la formulación de Resistencia de Materiales (RM). Los basados en el MEF ofrecen una gran potencia de cálculo y flexibilidad suficiente para abordar este tipo de problemas con materiales de comportamiento no isótropo. Por su parte, el uso de herramientas basadas en la formulación de RM se viene produciendo con éxito¹, debido a la gran esbeltez que presentan las palas lo que hace que sean válidas las hipótesis simplificadoras de RM.

El objeto de este trabajo la comparación de estas dos herramientas en el diseño de palas. En concreto se han aplicado al diseño una de 21.6 m de envergadura, fabricada con fibra de vidrio y resina vinilester, cuyo prototipo ha sido sometido a ensayo, obteniéndose medidas para verificar los resultados de ambos modelos.

2.- CONSIDERACIONES PREVIAS

La discretización del modelo MEF, con elementos tipo lámina, se ha desarrollado en base a tres criterios. En primer lugar se ha discretizado la pala en tramos, para recoger el cambio de la sección a lo largo de la dirección longitudinal de la pala. Posteriormente, en el sentido transversal, en cada tramo, se ha dividido en elementos para reproducir la forma de cada sección. Como paso final se han introducido nuevos elementos allí donde, aún no cambiando la geometría, sí lo hace la disposición de laminados. En la figura 1(a), se muestra un esquema de la configuración tridimensional del modelo.

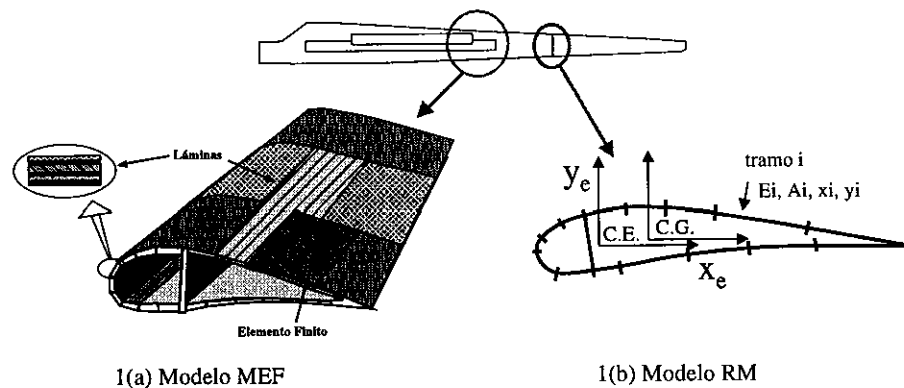


Figura 1. Discretización de la pala.

En RM la pala se modela como una viga en voladizo constituida por tramos longitudinales de sección constante (sección media en cada tramo). Cada sección está formada por tramos rectos (ver figura 1(b)) que recogen la geometría y disposición de los laminados (propiedades equivalentes del laminado). Al tratarse de materiales no isotrópicos, la inclusión del concepto de centro elástico^{1,2} es de gran ayuda, pues desacopla los efectos de tracción y flexión, simplificando intuitivamente el comportamiento de la pala y operativamente los cálculos. Las coordenadas del centro elástico d_x y d_y se obtienen en función de los momentos estáticos m_{zi} y m_{yi} , del área A_i del elemento i , y del módulo de elasticidad equivalente del laminado E_i :

$$d_x = \frac{1}{\sum_{i=1}^{elem} E_i \cdot A_i} \cdot \sum_{i=1}^{elem} E_i \cdot m_{zi} \quad d_y = \frac{1}{\sum_{i=1}^{elem} E_i \cdot A_i} \cdot \sum_{i=1}^{elem} E_i \cdot m_{yi} \quad (1)$$

3.- PROCESO DE DISEÑO

Las prescripciones impuestas tanto por los fabricantes como por las normativas específicas de diseño de palas (particularmente en este trabajo se ha seguido la norma

alemana *Germanischer Lloyd*³, GL), establecen condicionantes en deformación, tensión, estimación de vida a fatiga, frecuencias naturales de vibración, flecha y análisis de inestabilidades. Por ello se tratará cada uno de estos aspectos, analizándose el modo en que cada herramienta (MEF y RM) aborda dichos temas y qué ventajas e inconvenientes en precisión, fiabilidad y consumo de tiempo presentan.

3.1.- Deformaciones

La normativa empleada en este trabajo, establece un límite del valor de la deformación en la dirección de la fibra de 0.458% (para fibra de vidrio, laminado a mano). En las palas, generalmente más del 80% de las láminas son unidireccionales y colocadas longitudinalmente. Esto deja, a efectos prácticos, la comprobación de dicha limitación a la del valor de las deformaciones en el sentido longitudinal de la pala, valor único que recoge el modelo de RM (deformación normal longitudinal).

En número comparativamente menor que las unidireccionales (0°), se suelen incluir láminas con diversas orientaciones de las fibras: $\pm 45^\circ$ para los esfuerzos de cortadura a nivel de laminado y 90° para los esfuerzos a nivel de laminado transversales a la dirección de la pala, láminas que por supuesto también deben cumplir los criterios de la norma. El modelo RM no tiene capacidad para estimar el valor de estas deformaciones lo que es significativo dado que la parte inicial del proceso de diseño de la pala se realiza con dicho modelo. Es por tanto necesario establecer la comprobación de estas deformaciones con el modelo de elementos finitos en la fase final de comprobación del diseño de la pala. Hay que indicar que es plausible que se puedan producir violaciones de la limitación de las deformaciones admisibles en estas láminas en la zona próxima a la raíz (donde el modelo de RM no es de aplicación), pero ello no altera significativamente la validez del diseño realizado dada la escasa significación que alteraciones en esta láminas tienen en el peso total de la pala.

3.2.- Tensiones

La norma GL establece como criterio de resistencia, el cumplimiento para todos los casos de carga prescritos, de: $S \leq R_k / \gamma_{ma} = R_d$, donde S es la tensión en cualquier punto de la pala, y R_d la resistencia de diseño que resulta de minorar la resistencia del material R_k , con un coeficiente de seguridad γ_{ma} . Por lo tanto, esta restricción supone que se debe acotar la máxima tensión en cada sección. Por las características de este tipo de estructuras, la tensión longitudinal suele ser la predominante, por lo que a efectos prácticos bastaría con acotar dicha tensión. En el MEF, S se puede calcular a nivel de laminado o lámina y en RM sólo como la tensión máxima de cada laminado equivalente.

El modelo MEF, permite realizar un análisis a nivel de lámina con consideración de todas las componentes de tensión y la posibilidad de emplear criterios de fallo a primera lámina. Esta capacidad de análisis resulta conveniente para la comprobación de un diseño determinado, sin embargo requiere una labor de posproceso demasiado compleja para ser aplicada al análisis de un número elevado de modificaciones como requiere el

diseño. En cualquier caso, un análisis a nivel de lámina implica el empleo de un modelo de degradación para la obtención de un diseño ajustado.

La determinación de R_k , en ambos modelos, se ha realizado de forma experimental, con ensayos de tracción sobre los laminados. Ahora bien, dado que el número de laminados diferentes que se presentan en una pala puede ser muy elevado y que su configuración va cambiando en el proceso de diseño, resulta inviable ensayarlos todos. La solución aquí adoptada ha sido la obtención de una correlación experimental, en base a los resultados de una serie de ensayos sobre laminados tipo, con las secuencias de apilado más frecuentes, que relaciona la resistencia de un laminado con las de las láminas que lo componen, lo que se expresa matemáticamente como:

$$\sigma_{adm i} = \frac{\sum_n \sigma_{adm n} \cdot esp_{ni}}{esp_i} \quad (2)$$

donde $\sigma_{adm i}$ es la resistencia del laminado i , $\sigma_{adm n}$, la de cada material (tipo de lámina), esp_{ni} el espesor del material n en el laminado i y esp_i el espesor del laminado i .

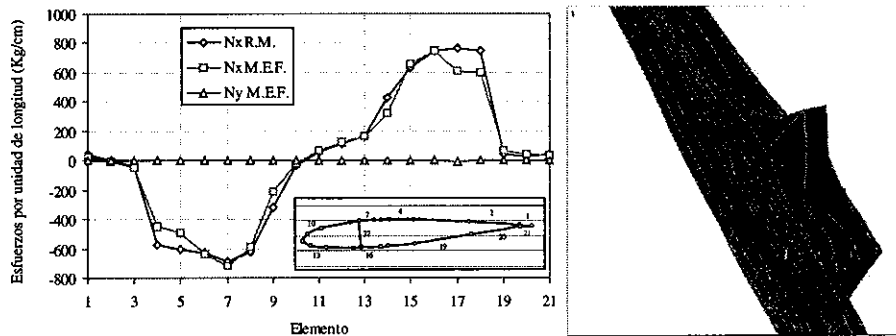


Figura 2. Comparación tensional en una sección. Figura 3. Primer modo de pandeo.

En la figura 2 se representa para cada elemento de una sección (esquema en la parte inferior derecha) la integral de las tensiones longitudinales en el espesor por unidad de longitud para ambos modelos (Nx RM y Nx MEF) y la correspondiente en dirección transversal para el MEF (Ny MEF), apreciándose un buen acuerdo en la tensión normal longitudinal (Nx RM y Nx MEF), con compresiones en la zona superior del perfil (elementos del 1 al 10) y tracción en el resto y el pequeño valor de las tensiones normales transversales (Ny MEF) lo que justifica el haber despreciado estas tensiones.

3.3.- Cálculo de vida a fatiga

Para el cálculo de la vida a fatiga, se ha seguido el procedimiento simplificado de la norma³, que utiliza los valores tensionales máximos para un caso de carga específico,

con los que se construye una curva S/N aproximada y a partir de ésta el diagrama de Goodman correspondiente, aplicándose finalmente un criterio de daño acumulado. Este procedimiento sería aplicable para ambos modelos, aunque su uso eficiente requiere de una rutina que en este caso se ha implementado para el modelo RM.

3.4.- Deflexiones y frecuencias naturales

Para completar la salida de resultados del modelo RM, se generó un modelo de barras que se resuelve mediante cálculo matricial. Cada barra posee seis grados de libertad en cada extremo (tres giros y tres desplazamientos) estando la primera barra empotrada. Las propiedades asignadas a cada barra son la media de las propiedades de sus secciones extremas. Así se obtiene la deformada de la pala para cada caso de carga.

Con la distribución de peso en la pala y usando el método de Rayleigh para sistemas discretos, son fácilmente calculables las frecuencias naturales de vibración en las dos direcciones de interés, la de sustentación (*Flap*) y arrastre (*Lag*). La evaluación de estos resultados en el modelo MEF es asequible, aunque con un tiempo de cálculo mayor.

Los valores de los desplazamientos máximos se requieren para cumplir las restricciones de rigidez de la norma, que están relacionadas con la prevención del choque de las palas con otras partes del aerogenerador. Por otro lado, es conveniente limitar los desplazamientos para reducir en lo posible las pérdidas aerodinámicas por deflexión de las palas, evitándose así la realización de un cálculo aeroelástico.

3.4.- Inestabilidades

Dado que la flexión es la forma de trabajo habitual de las palas, es preciso considerar la abolladura de los laminados. Este estudio, por su carácter tridimensional, debe hacerse mediante el MEF, evaluándose las cargas de pandeo así como los modos asociados (ver figura 3). Este análisis representa por tanto una de las limitaciones del modelo de RM. Para este cálculo, se optó por el procedimiento indicado en la GL, de realizar un análisis lineal, con un coeficiente de seguridad en la carga de pandeo de 1.25.

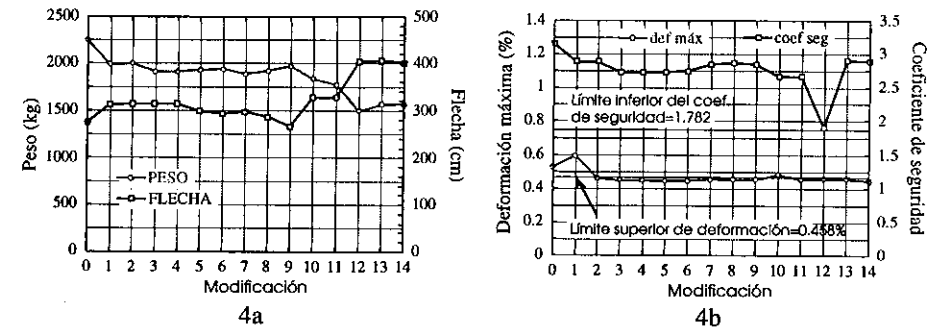


Figura 4. Evolución de las variables de diseño.

3.5.- Evolución de las variables durante el proceso de diseño

Haciendo uso de los modelos desarrollados, se ha optimizado la configuración de laminados de una pala de 21.6 m de envergadura, disminuyendo su peso total (figura 4a) cumpliendo las restricciones que marca la norma. Como se aprecia en la figura 4b, la deformación longitudinal, ha sido una variable crítica durante el diseño. El coeficiente de seguridad (fig. 4b), que se obtiene como el mínimo cociente R_d/S que se produce en la pala, se ha mantenido con un margen mayor respecto a la cota establecida por la norma.

4.- VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL

Se han realizado ensayos de flexión sobre un prototipo a escala real del diseño final de la pala (figura 5). Para ello, se colocaron bandas extensométricas longitudinales a lo largo de toda la envergadura en dos grupos: uno en la parte superior del perfil (a compresión), y otro en la inferior (a tracción). En la figura 6a se muestra la disposición de las bandas. Adicionalmente, se midieron los desplazamientos en diversos puntos.



Figura 5. Vistas del dispositivo del ensayo de flexión (cortesía DESA).

La figura 6b, pone de manifiesto la similitud de las predicciones de los modelos numéricos y de las medidas experimentales. Es también remarcable que un gran porcentaje de la pala (salvo los dos extremos) se mantiene en unos niveles de deformación longitudinal similares, lo que es indicativo de una buena distribución de los laminados. En la figura 7 se muestra la deformada de ambos modelos junto con la del ensayo para dos niveles de carga, de denominación 25% y 50%. El ajuste de los resultados de ambos modelos entre sí y con las medidas experimentales es satisfactorio.

Los resultados experimentales de las frecuencias naturales son 2.12 y 4.07 Hz para las direcciones de *Flap* y *Lag* respectivamente. El modelo MEF predice para estos mismos modos de vibración, valores de 2.23 y 3.65 Hz, mientras que los resultados obtenidos con el modelo RM son 2.35 y 4.00 Hz, mostrándose un acuerdo aceptable.

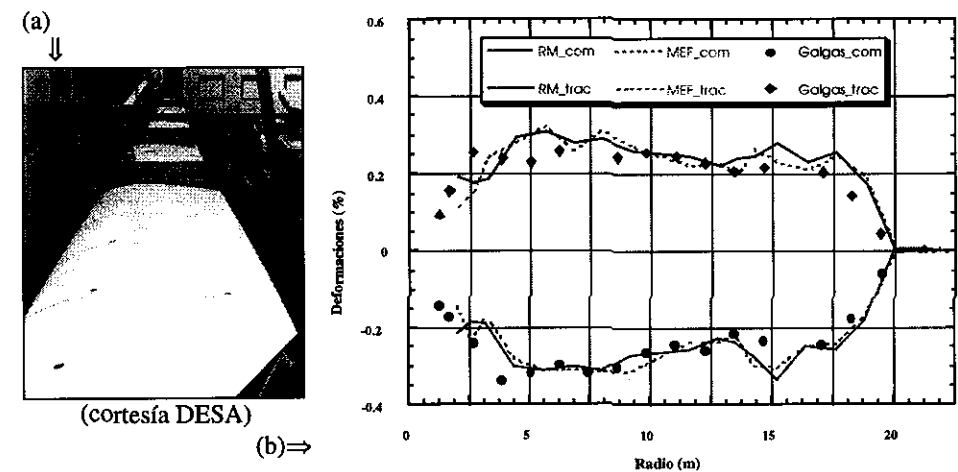


Figura 6. (a) Colocación de las bandas (b) comparación de los resultados.

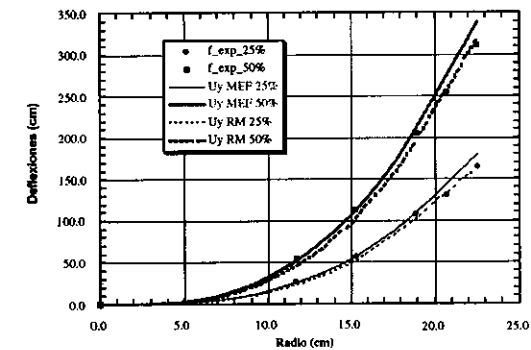


Figura 7. Comparación de las deflexiones experimentales, RM y MEF.

5.- CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han desarrollado y utilizado dos modelos (RM y MEF) para el análisis de palas de aerogenerador. Se han usado para el diseño, sujeto a la norma GL de una pala de 21.6 m de envergadura, optimizando su configuración para obtener el mínimo peso. El diseño se ha validado con ensayos sobre un prototipo a escala real.

El trabajo desarrollado ha puesto de manifiesto la conveniencia del uso combinado de los dos modelos en el proceso de diseño de la pala. Por su facilidad operativa, el modelo RM es una herramienta más simple y ágil para tomar en consideración el estudio de las

necesarias y numerosas modificaciones en la configuración de los laminados para un diseño a mínimo peso. Este proceso realizado con elementos finitos resultaría muy lento (por el posprocesado de los resultados y en la implementación de las modificaciones). En cualquier caso, se ha puesto de manifiesto que la precisión obtenida en los estudio de la resistencia y rigidez con las cargas consideradas es similar con ambos modelos.

Ahora bien, existen cuestiones no abordables con el modelo RM. Una de ellas es la consideración de los fenómenos de inestabilidad (abolladura local de los paneles a compresión), cuestión que ha sido analizada con el MEF. La otra cuestión concierne a la zona de agarre de la pala, donde las hipótesis en que se basa el modelo de RM hacen inviable la aplicación de los resultados obtenidos con él. El uso del MEF permite un diseño adecuado sin necesidad del sobredimensionamiento que típicamente se realiza en modelos de RM, por desconocimiento del estado tensional real.

Existe adicionalmente una ventaja del uso del modelo simplificado de RM. Este modelo permite al diseñador la necesaria familiarización con los efectos cualitativos que producen las diferentes modificaciones que se pueden realizar en orden a mejorar una determinada propiedad, típicamente rigidez y resistencia con bajo peso. Esta cuestión es de crucial importancia en el diseño de estructuras de materiales compuestos donde los grados de libertad para el diseñador son muy elevados frente a los que aparecen con el uso de materiales isotrópicos.

6.- AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha realizado con la financiación de Desarrollos Eólicos S.A.

7.- BIBLIOGRAFIA

1. B. Paluch. "A Software for Design and Calculation of Wind Turbine Composite Rotor Blades". European Community Wind Energy Conf. 8-12 March, pp 559-562, 1993.
2. P. Swider & J. Lacroix. "Parametric Optimization of Composite Structures: Application to Alpine Skies". Communications in Numerical Methods in Engineering, Vol. 13, 139-149 (1997).
3. Germanischer Lloyd, Rules & Regulations, IV Non-Marine Technology: Part I- Wind Energy, 1993.
4. B.S. Johansen, H. Lilholt & A. Lystrup. "Wingblades of Glass Fibre Reinforced Polyester for a 630 kW Winturbine". ICCM3, Paris. Ed A R Bunsell et al, Pergamon, Oxford, Vol. 2, pp 1355-1367, 1980.
5. G. Eckold. "Design and Manufacture of Composite Structures". Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, England, 1994.
6. AENOR, ENV 61400-1:1995, Sistemas de Generación de Energía Eléctrica por Turbinas Eólicas. Parte 1: Requisitos de Seguridad.
7. A.T.V. Composite Rotor Blades: Blade ATV 21, Technical Information, 1995.
8. ANSYS, Swanson Analysis System, Inc.