

Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Simulación numérica de un álabe de una turbina eólica de 600 W aplicando la norma IEC 61400-2

Numerical simulation of a 600 W wind turbine blade applying the IEC 61400-2 standard

Paulina Marín Téllez*, Víctor López Garza, Juan Felipe Soriano Peña, Gilberto González Avalos, Gerardo Javier Marín Téllez, Adrián Santibáñez Maldonado

Para citar este artículo: Marín Téllez P, López Garza V, Soriano Peña JF, González Avalos G, Marín Téllez GJ, Santibáñez Maldonado A (2024). Simulación numérica de un álabe de una turbina eólica de 600 W aplicando la norma IEC 61400-2. *Ciencia Nicolaita* 90: 105-116.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.742>

Historial del artículo

Recibido: 17 de agosto de 2023

Aceptado: 17 de noviembre de 2023

Publicado en línea: abril 2024



Ver material suplementario



***Correspondencia de autor:** 1214884f@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Simulación numérica de un álabe de una turbina eólica de 600 W aplicando la norma IEC 61400-2

Numerical simulation of a 600 W wind turbine blade applying the IEC 61400-2 standard

Paulina Marín Téllez*, Víctor López Garza, Juan Felipe Soriano Peña, Gilberto González Avalos, Gerardo Javier Marín Téllez, Adrián Santibáñez Maldonado

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica

Resumen

En el presente trabajo, se muestra la simulación numérica realizada mediante software de elemento finito (FEA), para un álabe de una turbina eólica de baja potencia de acuerdo con la norma IEC 61400-2. El álabe se diseñó para una turbina de 600 W y se fabricó de un material compuesto de fibra de vidrio con resina epoxi. Las cargas de diseño aplicadas se calcularon de acuerdo con la metodología de cargas simplificadas descritas en la norma. Se desarrolló una metodología para la simulación numérica que consta de las siguientes etapas: modelado del álabe en 3D, definición del material compuesto, definición de la estructura del sándwich, mallado, definición de las condiciones de frontera y carga, análisis de convergencia de malla y análisis de resultados.

La simulación numérica muestra que el álabe es capaz de soportar las cargas estructurales bajo las condiciones de operación, cumpliendo así con la normativa. Los desplazamientos y deformaciones fueron mínimos para la mayoría de las hipótesis de carga; los esfuerzos de Von Mises y el criterio de Tsai-Wu indicaron que la región del soporte presentó los mayores desafíos estructurales.

La simulación numérica es una herramienta muy útil que proporciona una evaluación preliminar del comportamiento del álabe, parámetros necesarios para realizar ajustes previos a la manufactura y para la realización de las pruebas estructurales. Además, permite ahorrar recursos en tiempo y costos.

Palabras clave: simulación, turbina eólica, álabe.



Abstract

In the present work, the numerical simulation carried out by means of finite element software (FEA), for a blade of a low power wind turbine in accordance with the IEC 61400-2 standard is shown. The blade was designed for a 600 W turbine and was made of a fiberglass composite material with epoxy resin. The applied design loads were calculated according to the simplified load methodology described in the standard. A methodology was developed for numerical simulation consisting of the following stages: 3D blade modeling, definition of the composite material, definition of the sandwich structure, meshing, definition of boundary and load conditions, analysis of mesh convergence and analysis of results.

The numerical simulation shows that the blade is capable of supporting the structural loads under the operating conditions, thus complying with the regulations. Displacements and deformations were minimal for most loading hypotheses; Von Mises efforts and the Tsai-Wu criterion indicated that the support region presented the greatest structural challenges.

Numerical simulation is a very useful tool that provides a preliminary evaluation of the behavior of the blade, provides necessary parameters to make adjustments prior to manufacturing and to carry out structural tests. In addition, it saves resources in time and costs.

Keywords: simulation, wind turbine, blade.

Introducción

El uso de energías no renovables para la generación de electricidad conlleva graves consecuencias para el medio ambiente, mientras que las fuentes de energías renovables presentan múltiples beneficios, como competitividad en sus costos, mayor confiabilidad, y la creación de empleos, pero sobre todo reduce la contaminación, ayudando así a mejorar la salud pública (Renewable Energy Policy Network, 2019).

En 2021, el 28% de la generación de electricidad a nivel mundial provino de fuentes renovables y por primera vez en la historia el 10% de este porcentaje fue por medio de la energía solar y la energía eólica. Esta última se ha convertido en la segunda fuente de energía renovable durante la última década, lo cual se ha visto reflejado en su rápido crecimiento tanto en la tierra como en el mar (REN21, 2022).

Los álabes son un componente fundamental en una turbina eólica; la fatiga en estos puede generar problemas que disminuyen el rendimiento del aerogenerador, acelerando su proceso de degradación y disminuyendo su eficiencia, lo anterior puede provocar graves accidentes (GWEC, 2019; REN21, 2022). Para prevenir que los álabes de un aerogenerador fallen

dentro de su vida útil (entre 20 y 25 años), es necesario realizar pruebas estáticas y de fatiga, con la finalidad de verificar su utilidad (AWEA, n.d.).

Aunque existen diversos estándares a nivel internacional para la evaluación y certificación de las turbinas de viento de baja potencia y todos sus componentes, estos se encuentran basados en la Norma IEC 61400-2 que es la más aceptada y empleada. Dicha norma trata de la seguridad, del aseguramiento de la calidad y la integridad de la ingeniería; especifica los requisitos para la seguridad de los aerogeneradores pequeños (AP), incluyendo el diseño, la instalación y el mantenimiento, así como la explotación en condiciones externas específicas. Su propósito es fijar un nivel apropiado de protección contra daños por riesgos causados en estos sistemas durante su vida útil (IEC 61400-2 “Wind Turbines - Part2: Design Requirements of Small Wind Turbines”, 2015).

El poder realizar una simulación numérica del álabe bajo las cargas estructurales marcadas por la normativa internacional, previo a su manufactura, permite una evaluación preliminar del álabe, además de reducir costos y tiempo, asimismo, brinda criterios necesarios para la manufactura. En este trabajo, se realizó la simulación de un álabe empleando la Teoría

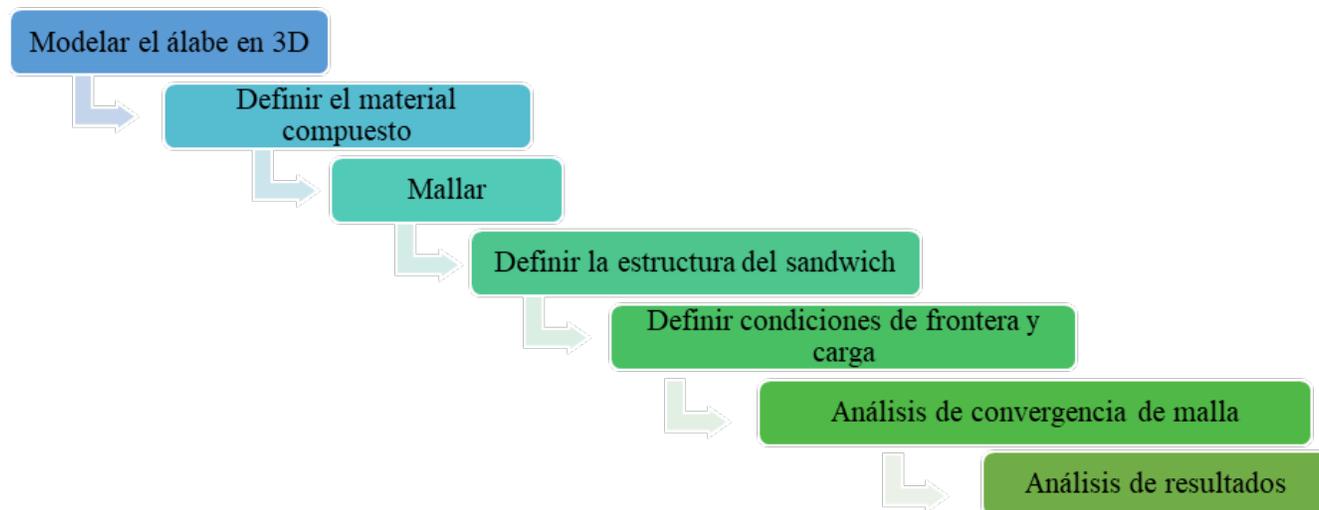


Figura 1. Metodología de simulación numérica.

del Elemento Pala, que integra las fuerzas dadas por la interacción de álabe con el fluido para cada sección radial, obteniendo una fuerza total resultante. El diseño del perfil aerodinámico se obtuvo del software TIMEO, para una turbina de 600 W con una velocidad específica de 6 m/s, una velocidad en la punta de la pala de 12.5 m/s² y se seleccionó perfil NACA 4412, obteniéndose un radio de 0.95m y una cuerda máxima de 0.215 m.

Metodología

Este trabajo parte de la hipótesis que es posible realizar una simulación numérica estructural de un álabe de una turbina eólica de acuerdo con la norma IEC 61400-2 para evaluar la capacidad del álabe de soportar las cargas estructurales de diseño previo a la manufactura. La metodología utilizada para la simulación numérica consta de 7 pasos (Figura 1), iniciando con el modelo 3D del álabe con base en los parámetros geométricos obtenidos del diseño mediante programas de elemento finito. El segundo paso es asignar el material al modelo, definiendo correctamente las propiedades para lograr un comportamiento realista. En el tercer paso se selecciona el tipo de malla, el tipo y número de celdas, así como el grado de refinamiento.

Posteriormente, se define la estructura del sandwich, seleccionado la orientación de cada capa de material, para continuar con la selección correcta de las condiciones de frontera para aplicar las cargas calculadas de acuerdo con la norma IEC 61400-2. En el análisis de convergencia de malla los principales factores a verificar son: el esquinamiento y la relación de aspecto y este es un indicador de la estabilidad y exactitud de los cálculos numéricos. Finalmente se analizan los resultados para verificar la congruencia con el comportamiento esperado.

Modelado

Utilizando el software SolidWorks se modeló el aspa como una superficie hueca dividida en 10 secciones, la zona de unión raíz-soporte y el soporte como se muestra en la Figura 2.

Material

Se utilizó fibra de vidrio con resina epoxi y los valores de las propiedades fueron tomados de la literatura (Brondsted *et al.*, 2005; Tabla 1).

Malla

El mallado del álabe se realizó en un software de simulación por elemento finito (ANSYS), usando el método de triángulos debido a que el aspa es hueca y

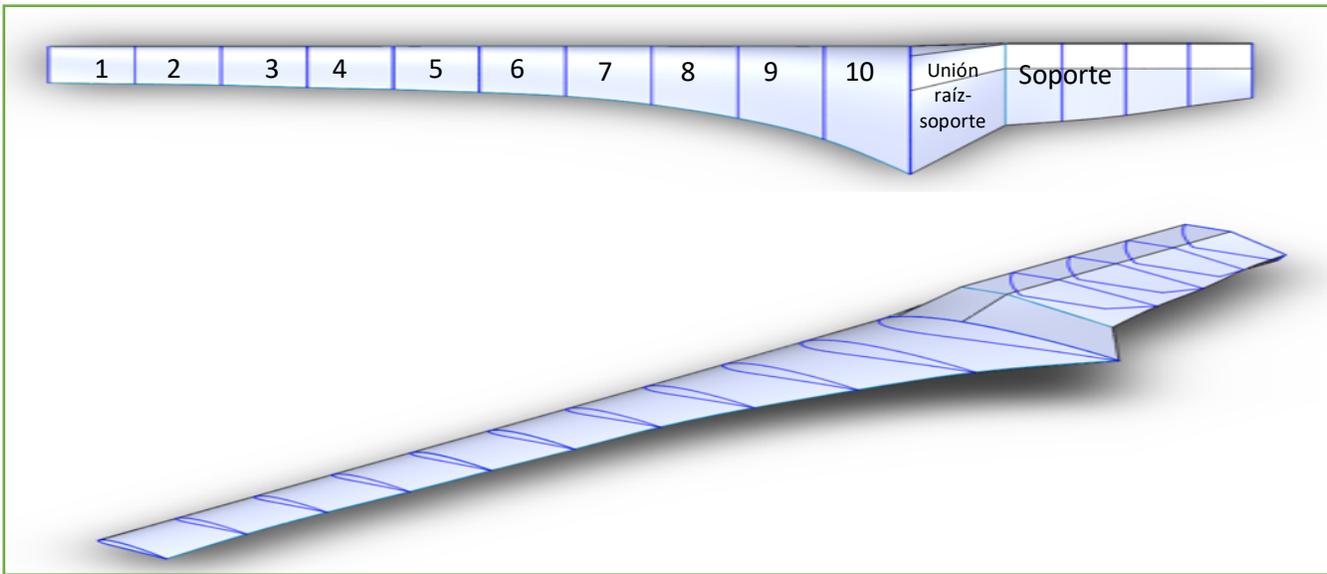


Figura 2. Modelado 3D del álabe como superficie hueca.

fue modelada como una superficie. Se empleó el mapeo de malla en todas las caras, con un tamaño promedio de elemento de 6 mm y aplicando un refinamiento en las secciones mostradas en la **Figura 3**, y la malla se muestra en detalle en la **Figura 4**.

Para la malla del álabe, se generó un solo tipo de elemento, triángulos con 3 nodos, respecto a la cali-

dad de la malla cumple con los requerimientos mínimos de calidad, tal como se muestra en la **Tabla 2**. Parámetros como la relación jacobiana, la desviación paralela, el factor de deformación y la longitud característica no se aplican para el tipo de elemento presente.

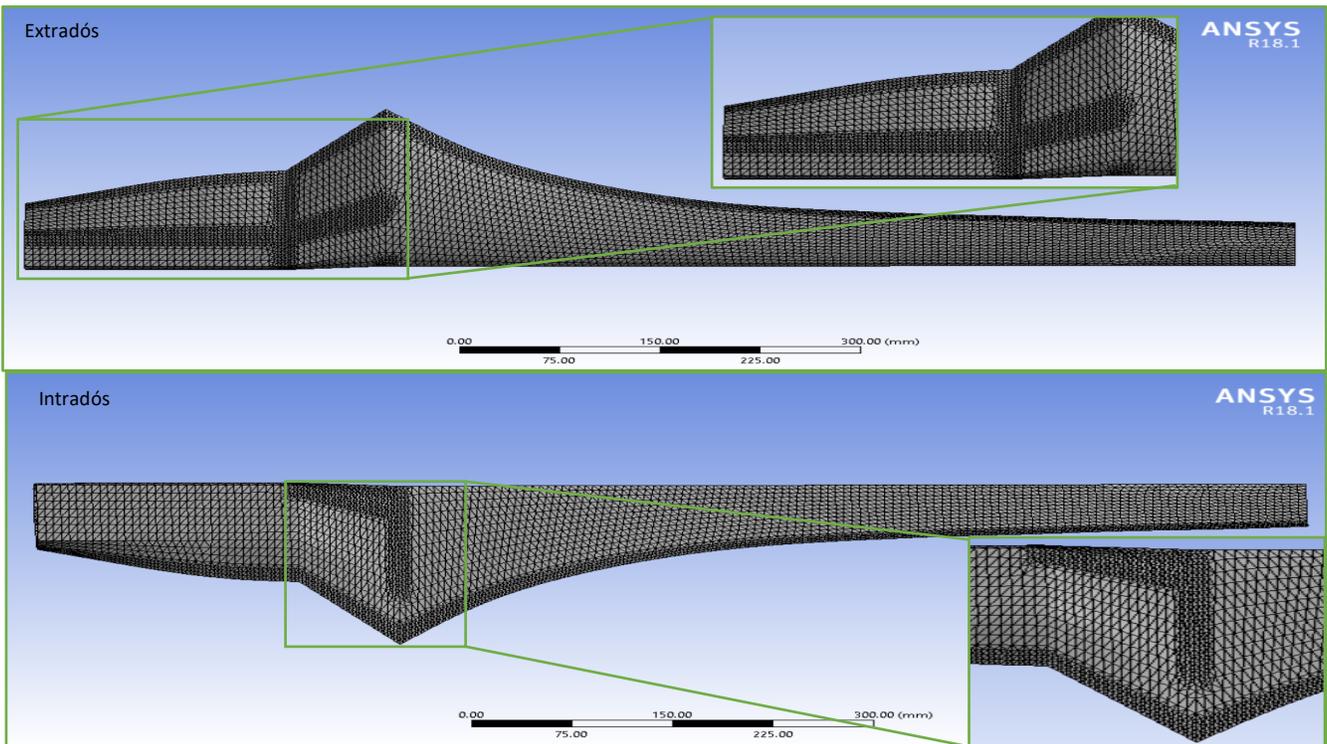


Figura 3. Mallada del extradós y del intradós del álabe.

Tabla 1. Propiedades de la fibra de vidrio con resina epoxi.

Propiedad	Unidireccional	
Densidad (kg/m ³)	1900	
Coefficiente de Poisson	0.26	
Módulo de Young (GPa)	Dirección X	8.3
	Dirección Y	8.3
	Dirección Z	39
Módulo cortante (GPa)	4.1	
Resistencia a la tensión (MPa)	Dirección X	1062
	Dirección Y	31
	Dirección Z	31
Resistencia a la compresión (MPa)	Dirección X	610
	Dirección Y	118
	Dirección Z	118

Estructura compuesta

Se realizó la simulación en el módulo para materiales compuestos ANSYS Composite PrePost (ACP), ya que proporciona las herramientas necesarias para el análisis de estructuras compuestas en capas. El álabe ya se había manufacturado previamente por lo que se tomaron esos mismos parámetros para simular la estructura del sándwich (Gómez, 2012). Se tomó un espesor de 1 mm por capa y se orientaron todas las capas en la dirección de la envergadura, definiendo 3 capas para la región roja y 2 capas para la región azul, tal como se muestra en la **Figura 5**. En la **Figura 6** se

Tabla 2. Parámetros de la calidad de malla.

Parámetro	Promedio	Calidad
Tamaño de malla (mm)	6	-
Tipo de elemento	Tri3	-
Número de nodos	7955	-
Número de elementos	15836	-
Relación de aspecto	1.6735	Muy bien
Calidad ortogonal	0.83342	Muy bien
Esquinamiento	0.24549	Muy bien
Calidad de elemento	0.83398	Muy bien
Ángulo de esquinamiento máximo	85.009°	Muy bien

ilustra la configuración de las capas del álabe, siendo 3 capas para el extradós y 3 capas para el intradós.

Cargas y condiciones de frontera

La norma IEC 61400-2 indica 3 formas para determinar las cargas de diseño en un aerogenerador: metodología de cargas simplificadas, modelo de simulación y modelo de carga a escala real. En este trabajo se empleó la metodología de cargas simplificadas, la cual indica un conjunto limitado de hipótesis de carga y de configuraciones con fórmulas sencillas y condiciones externas simplificadas. Las hipótesis de carga que se evaluaron fueron: A) operación normal, B) orientación, C) Error de

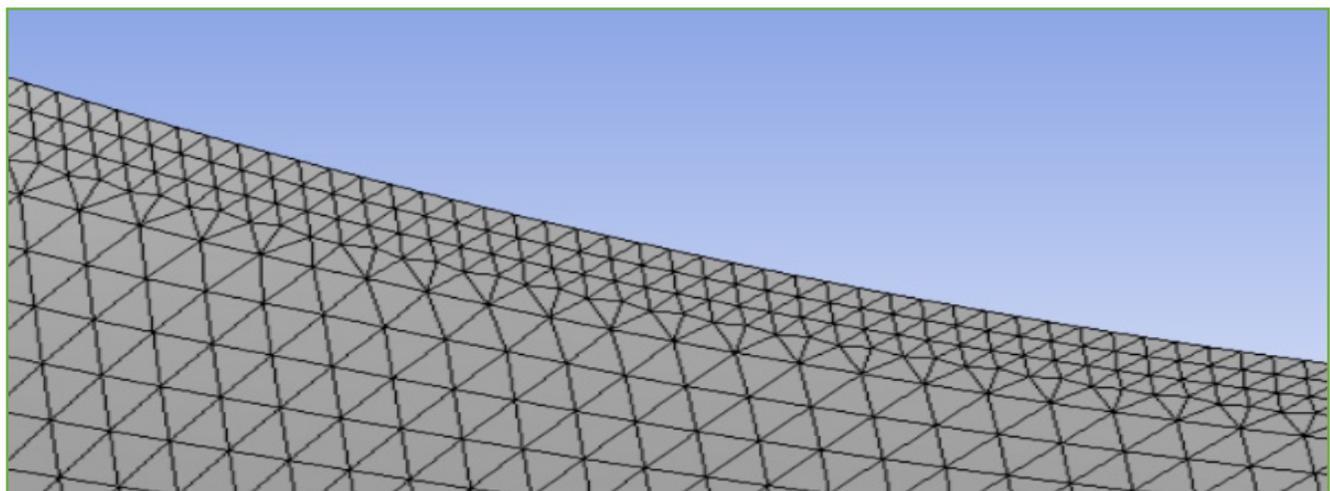


Figura 4. Detalle de la malla del álabe.

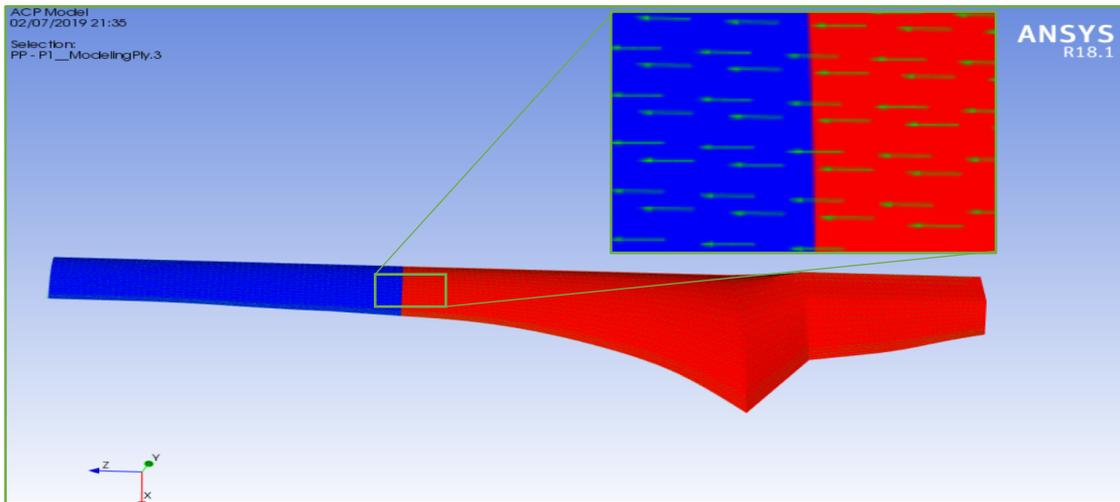


Figura 5. Orientación de las capas del álabe.

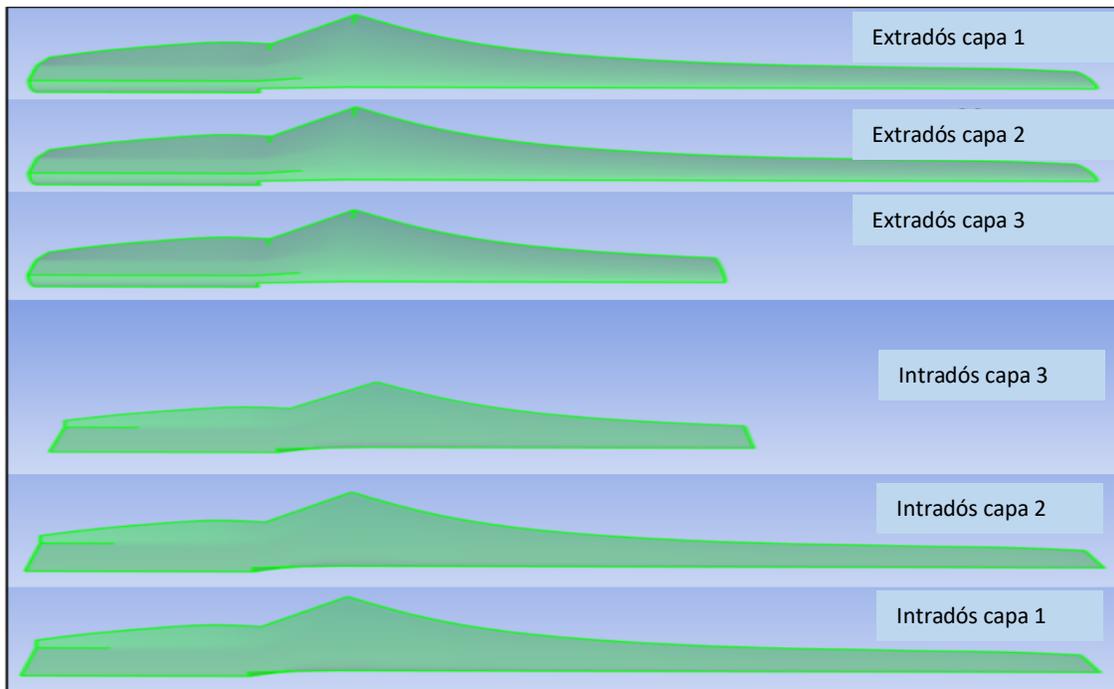


Figura 6. Esquema de las capas del álabe.

orientación, D) Empuje máximo, E) Velocidad de rotación máxima, F) Cortocircuito en la conexión a la carga, G) Carga extrema del viento, H) Inmovilización con carga del viento y exposición máxima.

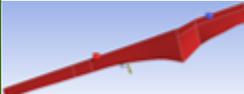
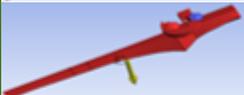
Las condiciones de frontera incluyendo los valores de fuerzas y momentos para cada hipótesis de carga se muestran en la **Tabla 3**. Para las condiciones de frontera se tomaron en cuenta: la fuerza ejercida por la gravedad que se muestra en amarillo, los soportes

fijos son las áreas marcadas en azul y en rojo se muestran las fuerzas y momentos para cada hipótesis de carga.

Análisis de convergencia de malla

Es necesario realizar un análisis de convergencia de malla para obtener resultados precisos con el menor costo computacional. En la **Figura 7**, se muestra el análisis de convergencia de malla donde para el

Tabla 3. Valores calculados para cada hipótesis de carga.

Hipótesis de operación		Valor calculado	Condiciones de frontera
A	Operación normal	$\Delta F_{zB}=35.743 \text{ N}$	
		$\Delta M_{xB}=18.416 \text{ Nm}$	
		$\Delta M_{yB}=76.349 \text{ Nm}$	
B	Orientación	$M_{yB}=38.986 \text{ Nm}$	
C	Error de orientación	$M_{yB}=0.018 \text{ Nm}$	
D	Empuje máximo	$F=41.157 \text{ N}$ $M_{yB}=0.018 \text{ Nm}$	
E	Velocidad de rotación máxima	$F_{zB}=17.871 \text{ N}$	
F	Cortocircuito en la conexión a la carga	$M_{xB}=28.307 \text{ Nm}$	
G	Carga extrema del viento	$M_{yB}=8.415 \text{ Nm}$	
		$F=258.9533 \text{ N}$ $M_{yB}=16.7 \text{ Nm}$	
H	Inmovilización con carga del viento y exposición máxima	$F=86.317 \text{ N}$	

tamaño de malla de 0.9 mm, 0.8 mm y 0.7 mm el porcentaje de variación del esfuerzo está por debajo del 5% para las últimas 3 mallas. La malla convergió con 399, 588 nodos y 798,624 elementos.

Resultados

Desplazamiento total

Como es de esperar, para todas las hipótesis de carga es en la punta donde se tiene el mayor valor para el desplazamiento y aproximadamente en la mitad del álabes correspondiente a la unión del soporte y la raíz

los desplazamientos tienden a cero. La **Figura 8** muestra los valores obtenidos del desplazamiento total por hipótesis de carga. La hipótesis G con carga F_{x-eje} presenta el mayor desplazamiento, seguida de la hipótesis de carga A con carga M_y y por la hipótesis de carga B con carga M_y . El menor desplazamiento se presentó en la hipótesis de carga A con carga F_{zB} , seguida por la hipótesis de carga E con carga F_{zB} y por la hipótesis de carga C con carga M_y . En general los desplazamientos son muy pequeños para la mayoría de las hipótesis de carga, exceptuando la hipótesis de carga G con carga F_{x-eje} y la hipótesis de carga A con carga M_y .

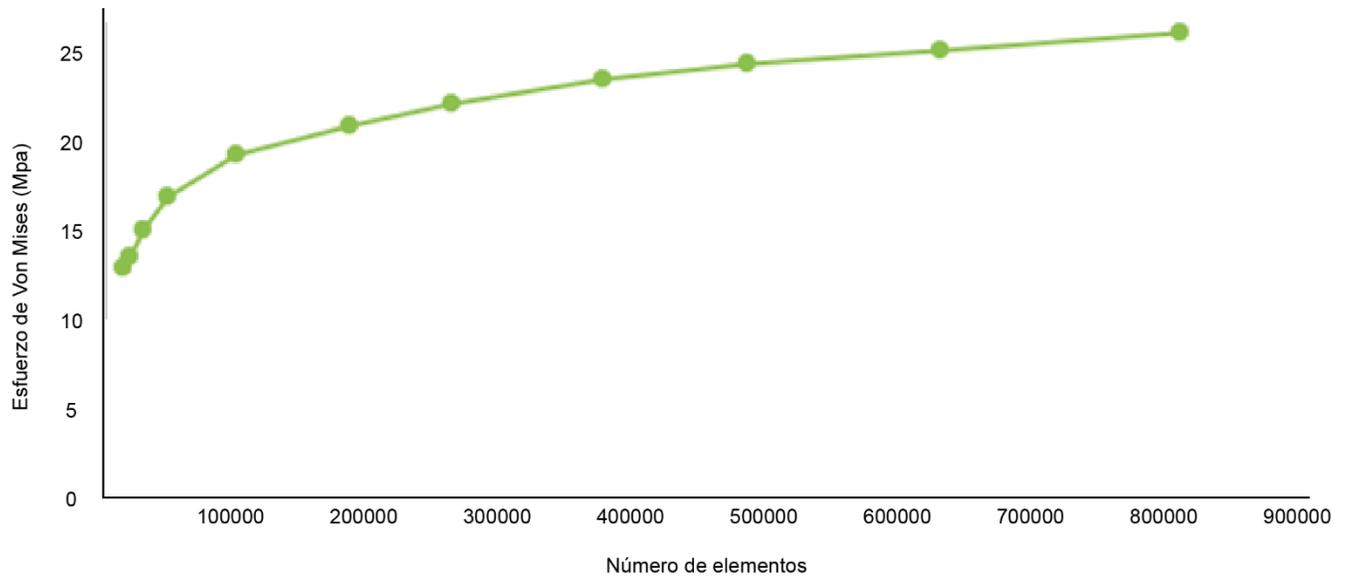


Figura 7. Convergencia de malla.

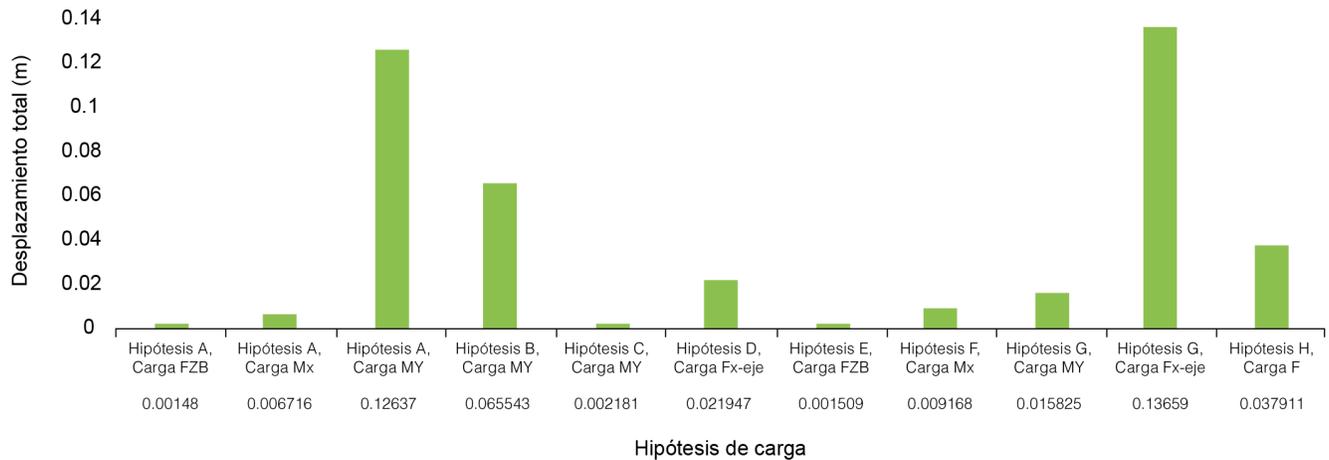


Figura 8. Desplazamiento total por hipótesis de carga.

Desplazamiento direccional

En todas las hipótesis de carga los valores más altos de desplazamiento direccional se dan en la zona de la punta tanto para el extradós como para el intradós. La **Figura 9** muestra los valores obtenidos del desplazamiento direccional por hipótesis de carga.

La hipótesis de carga A con carga M_y presenta el mayor desplazamiento direccional, seguida de la hipótesis de carga G con carga F_{x-eje} y por la hipótesis de carga B con carga M_y . El menor desplazamiento se presentó en la hipótesis de carga E con carga F_{ZB} , seguida por la hipótesis de carga A con carga F_{ZB} y por la hipótesis de carga C con carga M_y . En general los desplazamientos direccionales son muy pequeños para todas las hipótesis de carga.

Esfuerzo de Von Mises

Las **Figuras 10** y **11**, muestran los valores para el esfuerzo de Von Mises por capa del álabe para el extradós y el intradós, respectivamente, para cada hipótesis de carga. Los esfuerzos en el extradós son mucho mayores en comparación con los del intradós. La primera capa del extradós en la zona de la raíz es la que presenta los mayores esfuerzos de todo el álabe, mientras que los menores se presentan en el intradós en la primera capa en la zona de la punta. También podemos observar que los esfuerzos en la zona de la raíz son mucho mayores que en la zona de la punta para el extradós y el intradós.

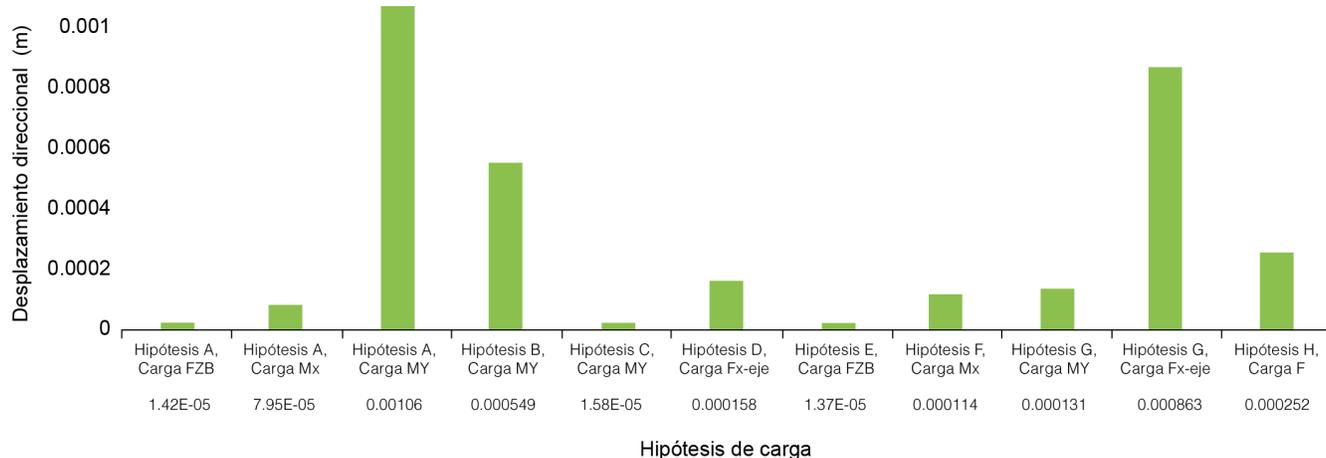


Figura 9. Desplazamiento direccional por hipótesis de carga.

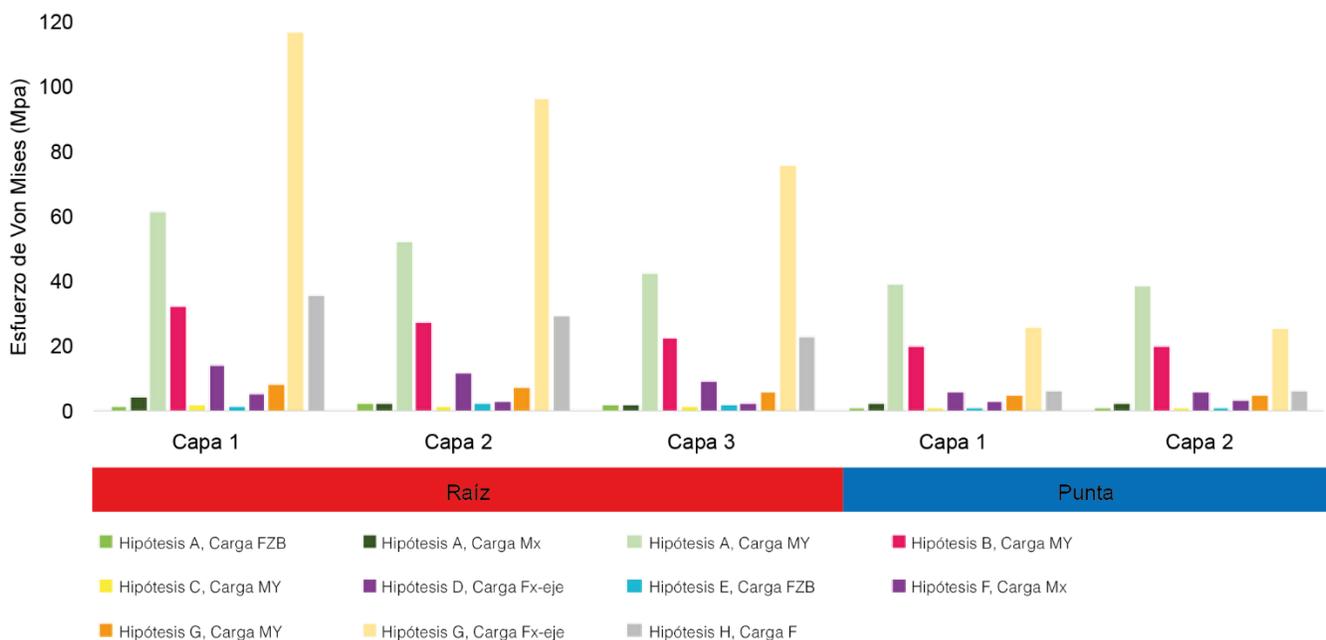


Figura 10. Esfuerzos de Von Mises por capa en el extradós para cada hipótesis de carga.

Tanto en el extradós como en el intradós, la hipótesis con los valores de esfuerzo más altos es la hipótesis de carga G con carga F_{x-eje} , seguida de la hipótesis de carga A con carga M_y . Ambas hipótesis se encuentran en la zona de la raíz.

Criterio de Tsai-Wu

El criterio de Tsai-Wu es uno de los más utilizados en códigos de elementos finitos comerciales, ANSYS lo implementa debido a su simplicidad y a que predice satisfactoriamente el fallo de los materiales compuestos en múltiples casos (Sebastián, 2016). La

Figura 12, muestra los valores para el criterio de Tsai-Wu del álabe para cada hipótesis de carga, encontrando que para todas ellas el valor mayor se da en la zona del soporte del álabe, donde se une con la raíz.

La hipótesis de carga G con carga F_{x-eje} presenta el mayor desplazamiento direccional, seguida de la hipótesis de carga A con carga M_y y por la hipótesis de carga B con carga M_y . El menor desplazamiento se presentó en la hipótesis de carga F con carga FZB, seguida por la hipótesis de carga A con carga FZB y por

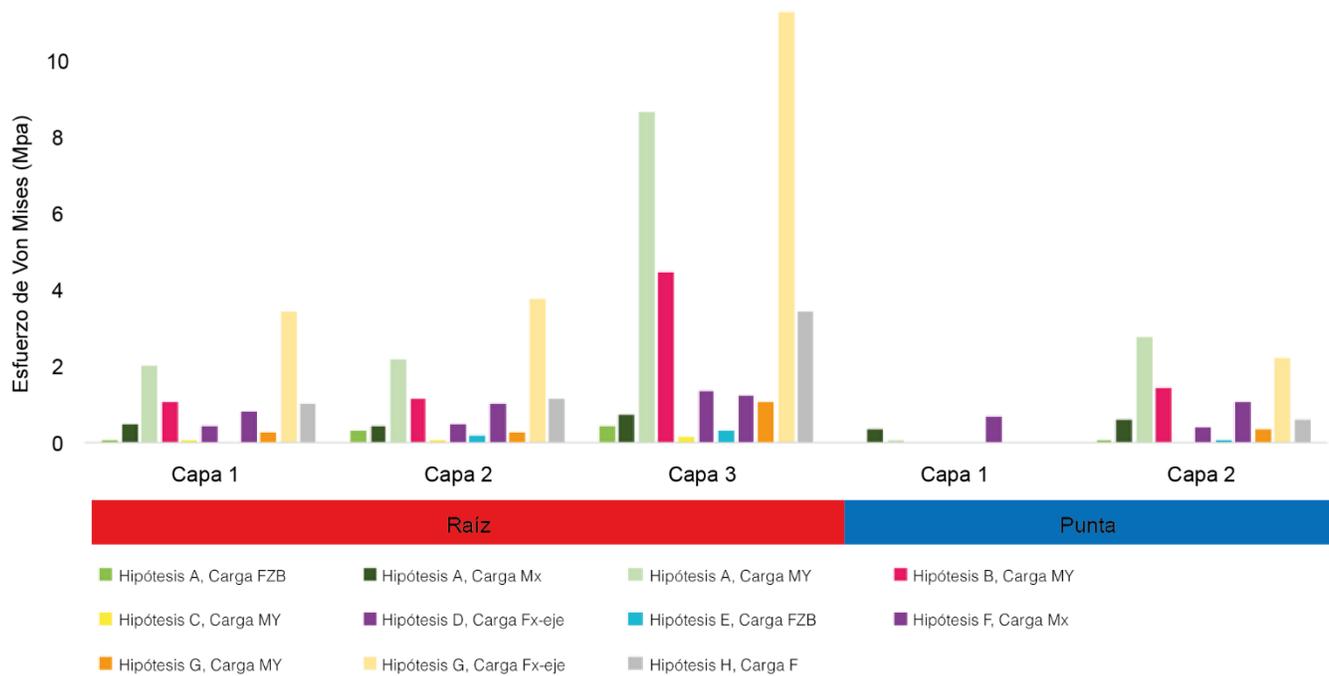


Figura 11. Esfuerzos de Von Mises por capa en el intradós para cada hipótesis de carga.

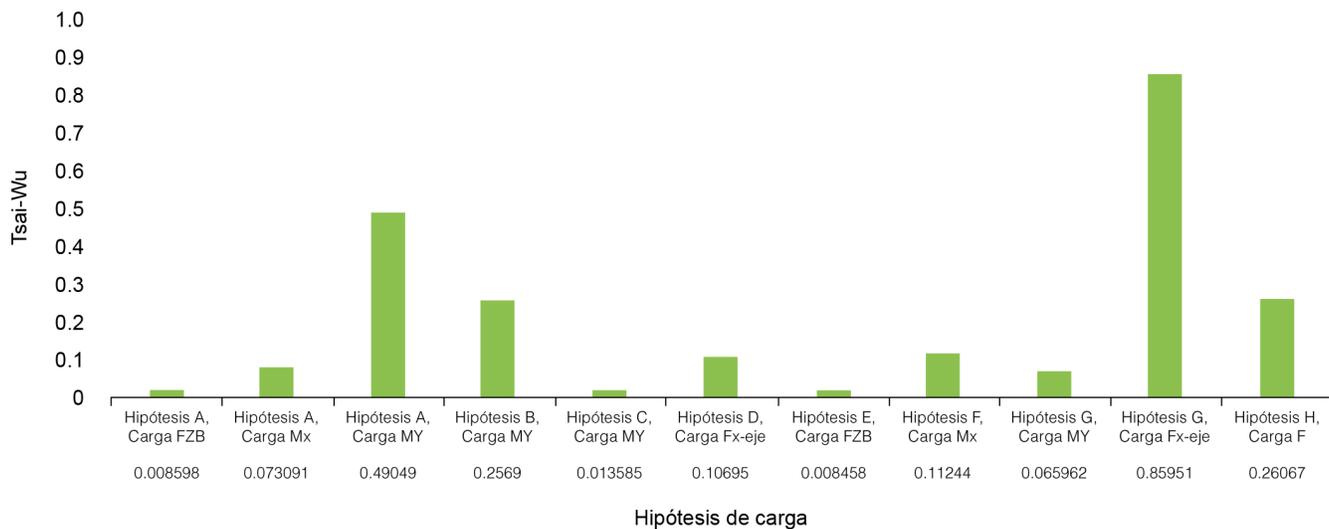


Figura 12. Criterio de Tsai-Wu para cada hipótesis de carga.

la hipótesis de carga C con carga MY. En todas las hipótesis de carga, el valor de Tsai-Wu es menor que 1, por lo que el álabe no presentará fallos estructurales.

Conclusiones

De acuerdo con los valores de esfuerzos y microdeformaciones obtenidos mediante la

simulación de elemento finito, el álabe es capaz de soportar las cargas estructurales a las que será sometido en funcionamiento. Realizar una simulación numérica bajo las cargas estructurales marcadas por la normativa internacional previo a su manufactura, posibilita una evaluación preliminar de su comportamiento, indicándonos si se necesitan modificaciones previo a la manufactura, reduciendo así recursos en costos y tiempo. Además, nos presenta

parámetros necesarios tanto para la manufactura como para las pruebas estructurales necesarias para garantizar un funcionamiento seguro durante su vida útil.

Referencias

- AWEA (n.d.) (2020). AWEA | American Wind Energy Association. The Voice of Wind Energy. Retrieved August 23, 2020, from <https://www.awea.org/>
- Brøndsted P, Lilholt H, Lystrup A (2005). Composite Materials for wind power turbine blades. Annual Review of Materials Research 35(1): 505-538. doi:10.1146/annurev.matsci.35.100303.110641
- Gómez EY (2012). Diseño y manufactura del hub y álabes de una turbina de viento. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- GWEC (2019). GWEC Global Wind Report 2019. <https://gwec.net/wp-content/uploads/2020/08/Annual-Wind-Report-2019-digital-final-2r.pdf>
- IEC 61400-2 (2015). "Wind Turbines - Part2: Design requirements of small wind turbines".
- REN21. (2022). Renewables 2022.
- Renewable Energy Policy Network. (2019). *Renewables 2019 Global Status Report*. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28496/REN2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttp://www.ren21.net/cities/wp-content/uploads/2019/05/REC-GSR-Low-Res.pdf>
- Sebastián EC (2016). Análisis de criterios de fallo para materiales compuestos. 118. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/72577/CASTILLO> - Análisis de criterios de fallo para materiales compuestos.