

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE ÁLABES DE TURBINA DE MATERIAL COMPUESTO

Sergio A. Oller^a, Liz G. Nallim^b, Sergio H. Oller.^c

^a INIQUI – CONICET - Facultad Ingeniería, Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia
5150 Salta – Argentina Tel/Fax: +54-3874258615 - E-mail: sergio.oller@conicet.gov.ar

^b INIQUI – CONICET - Facultad Ingeniería, Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia
5150 Salta – Argentina Tel/Fax: +54-3874258615 - E-mail: lnallim@unsa.edu.ar

^c UPC –CIMNE – Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Universidad
Politécnica de Cataluña, c/. Gran Capitan s/n, Campus Nord (UPC) Barcelona –España
Tel/Fax: +34-934017401 - E-mail: sergio.oller@upc.edu

Palabras Claves: Material compuesto, Fibra de carbono, Elementos finitos.

Resumen: La aplicación de materiales compuestos en la industria automotriz y aeronáutica, así como en las diversas ramas de la ingeniería ha crecido notablemente en las últimas décadas. Esta situación ha impulsado un importante esfuerzo para analizar el comportamiento de componentes estructurales derivados de ellos. Los materiales compuestos ofrecen ventajas únicas sobre sus contrapartes metálicas, pero también presentan problemas complejos y desafiantes para analistas y diseñadores. Los materiales compuestos laminados se utilizan principalmente en aplicaciones donde la relación rigidez- peso o resistencia-peso resultan críticas. Como ventaja adicional, la configuración del laminado, es decir: la orientación de las fibras, espesor de las capas, secuencia de apilamiento, geometrías del refuerzo (fibras largas continuas, cortas, partículas), fracción de volumen del refuerzo, se puede adaptar para reducir su peso sin poner en peligro su rendimiento, o mejorar la eficacia sin aumentar su peso. Esto se puede lograr a través de un proceso de optimización del diseño del material.

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados, en este trabajo se analiza y compara el comportamiento de los álabes de un rotor de turbina conformados con material compuesto laminado. Se toma como base para el estudio paramétrico la rigidez y el estado tensional producido por la carga hidráulica aplicada en los álabes del rotor de una turbina axial. Para el análisis se considera el dispositivo mecánico de material compuesto de matriz epoxi reforzada con fibras de carbono, variando el ángulo de orientación de las fibras y la secuencia de apilamiento de manera de lograr la mayor rigidez con el menor peso. Para el análisis se utiliza el código de elementos finitos explícito “Compack Aero (CIMNE-Quantech 2008), que permite trabajar con piezas conformadas en materiales compuestos con una cinemática de grandes deformaciones y desplazamientos.

En el estudio que se ha realizado demuestra la importancia que tiene la orientación de las fibras en un material compuesto. Para ello se comparan los estados de tensión máxima y las rigideces en un álabe constituido por una matriz polimérica reforzada con fibras de carbono según tres orientaciones distintas ($\pm 45^\circ$, $0^\circ/45^\circ$ y $0^\circ/90^\circ$). La simulación numérica del álabe de material compuesto, se hace a partir de una formulación basada en la teoría de mezclas generalizada anisótropa, que puede consultarse en las fuentes (Oller A. Sergio et al. (2010), Rastellini F. (2008), Oller S. (2003)).

1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo muestra las diferencias de tensiones y deformaciones que ocurren en el rotor de una turbina, fabricado en fibra de carbono, cuando se varían los ángulos de orientación de las mismas. Para ello se toma como punto de partida de la turbina fluvial presentada por los autores (ver [Figura 1](#)), cuyo diseño compacto (1m de diámetro), su condición de flujo axial, y su baja inercia debido a su conformación en materiales compuestos, le confieren la particularidad de funcionamiento en los lechos fluviales, evitando la necesidad de grandes movimientos de tierras y costosas mega-construcciones civiles ([Oller et al. 2010](#)).

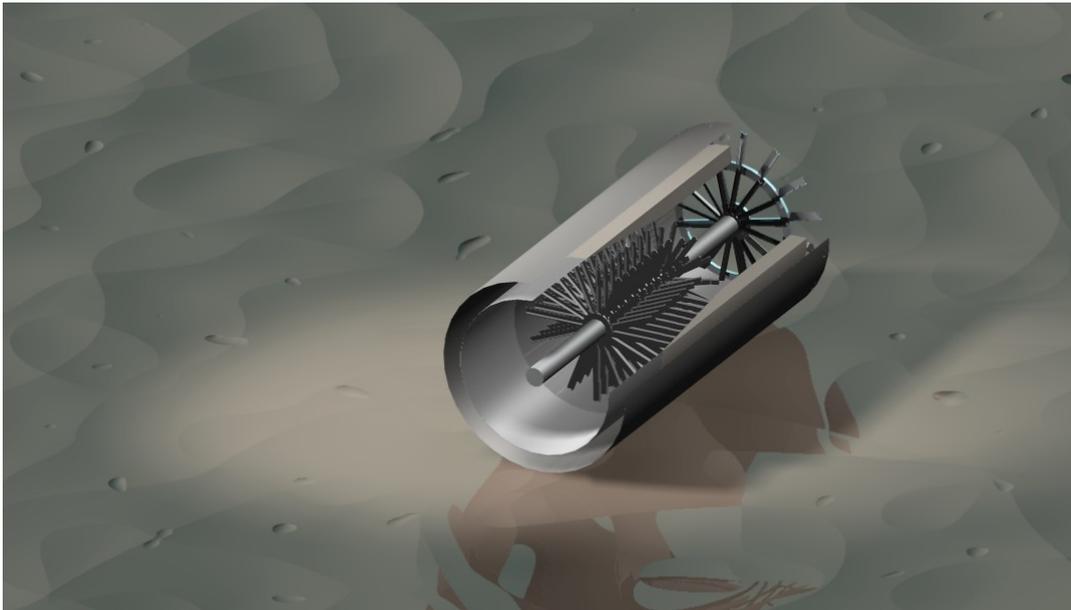


Figura 1. Sección de turbina fluvial de paso, con flujo axial

2 OPTIMIZACIÓN EN LA ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS

La turbina propuesta y su importancia, el porqué de la necesidad de su desarrollo, la comparativa entre su diseño en acero en materiales compuestos, ha sido tratada en [Oller et al. 2010](#) y por ello, ahora se plantea el desafío de elegir la composición óptima del material compuesto. Para este propósito se simula el rotor, bajo carga de impacto hidráulico, en tres conformados distintos, 2 de ellos con configuración ortogonal de fibras $0^{\circ}/90^{\circ}$ respecto a la dirección de la carga, $\pm 45^{\circ}$ respecto a la dirección de la carga, y el no-ortogonal $0^{\circ}/45^{\circ}$ también respecto a la dirección de las cargas; todas ellas durante un Δt de 0,2s. Para ello se utiliza un código de elementos finitos ([Zienkiewicz, Taylor, 1991](#)) explícito: Compack-Aero ([CIMNE and Quantech, 2008](#)), el cual aplica la teoría de mezclas ([Oller S., 2003](#)) para cada nodo de la malla. Ésta, compuesta por 11680 elementos triangulares de lámina ([Flores, F.G., Oñate E., 2007](#)) ([Figura 2](#)) deriva de una geometría ([Figura 3](#)) con 29 álabes con un perfil alar de ángulo de ataque 0° ([Figura 4](#)), y recibe una carga de 1162N (eje Y: transversal al rotor) repartida entre los 5722 nodos ([Figura 5](#)).

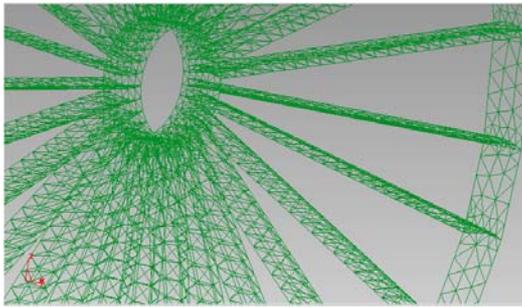


Figura 2. Detalle de la malla de elementos finitos

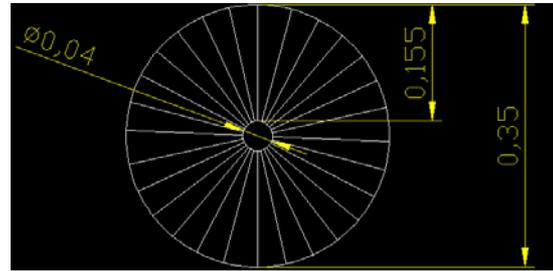


Figura 3. Geometría del rotor de la turbina expresada en m

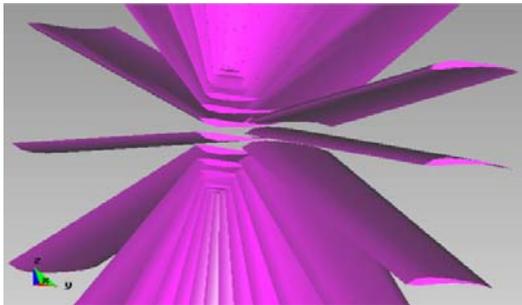


Figura 4. Perfil alar de los álabes

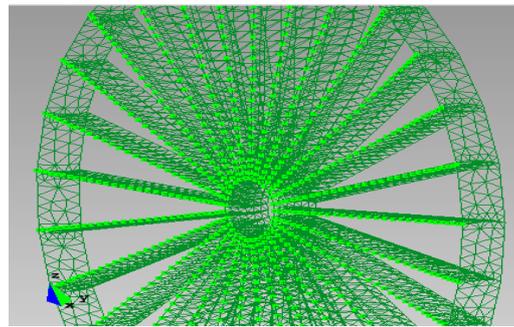


Figura 5. Carga uniforme sobre el rotor de la turbina

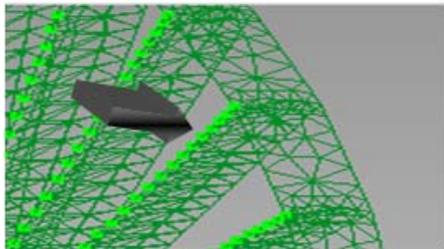


Figura 6. Dirección de la carga en el eje Y

Cabe destacar que en todos los casos de orientaciones de fibra, se usará un apilamiento de 6 capas de material compuesto de 0.3mm cada una de ellas, dando como resultado un laminado de espesor total de compuesto $e=1.8\text{mm}$. En el caso de los álabes, son láminas que envuelven un alma volumétrica de espuma sin resistencia estructural. Es decir, almas usadas únicamente para copiar las formas y dimensiones correctas del material compuesto, como por ejemplo poliuretano expandido. El material compuesto que se utiliza en esta simulación, se compone a través de la teoría de mezclas previamente citada. Uno de sus componentes es matriz epoxi isótropa de densidad $\rho = 1200 \text{ Kg/m}^3$, y módulo elástico $E = 4 \times 10^9 \text{ Pa}$, con un coeficiente de Poisson $\nu = 0.353$. El material de refuerzo es de fibra de carbono, cuya densidad es $\rho = 1800 \text{ Kg/m}^3$, el módulo de elasticidad $E = 242.1 \times 10^9 \text{ Pa}$ y el coeficiente de Poisson $\nu = 0.22$. Las propiedades de conjunto del compuesto obtenido resultan en forma implícita a través de la utilización de la teoría de mezclas (Rastellini et al, 2008).

Los modelos de electos finitos han sido generados con el preprocesador del programa ComPack-Aero (CIMNE-Quantech 2008), basado en la tecnología GiD desarrollada por CIMNE. Esta herramienta permite generar las mallas de elementos finitos e indicar los ejes locales en ángulos de Euler para luego describir la orientación del refuerzo de fibra respecto de los ejes locales en cada capa del laminado compuesto.

3 SIMULACIONES NUMÉRICAS DE LOS ÁLABES DE LA TURBINA

A continuación se resume el resultado obtenido para los álabes, por tres compuestos diferentes. Se detallan algunas ventajas e inconvenientes.

3.1 Fibras orientadas a +/- 45° respecto a la dirección de la carga.

3.1.1 Tensiones

Tal y como es de esperar, se generan tensiones de tracción en los bordes de ataque de los álabes colindantes al anillo interno (Figura 7), y tensiones de compresión en la parte posterior del anillo solidario al eje (Figura 8).

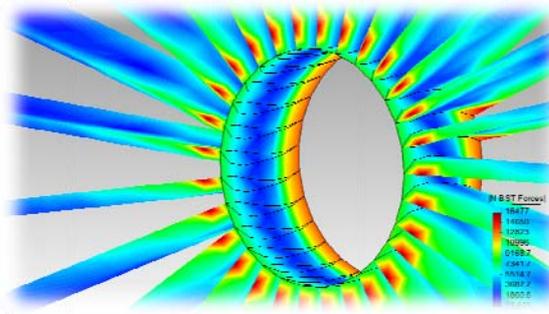


Figura 7. Detalle de la concentración de tensiones de tracción en el frente de ataque de los álabes

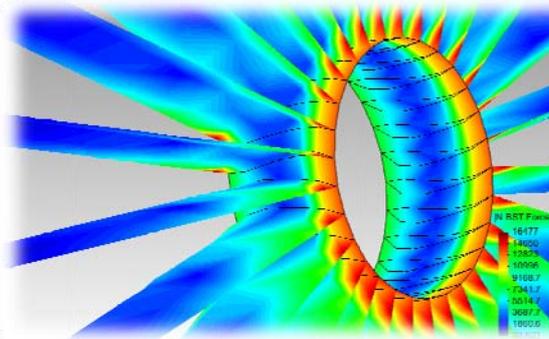


Figura 8. Detalle de las tensiones de compresión en la cara posterior del rotor

Las tensiones máximas alcanzadas en el compuesto, no superan nunca los 16477Pa, quedando lejos, todavía, la resistencia límite en la que se inicia la falla en el compuesto.

3.1.2 Desplazamientos

El valor máximo alcanzado de desplazamiento es de 0.0006m (0.6mm) en el anillo externo (ver Figura 9), el cual mantiene el comportamiento dentro de un orden de magnitud aceptable para el trabajo que se le solicita a la estructura dentro de la máquina. Estos resultados son

equivalentes al mismo rotor conformado en acero, puede verse en la referencia [Oller et al. 2010](#).

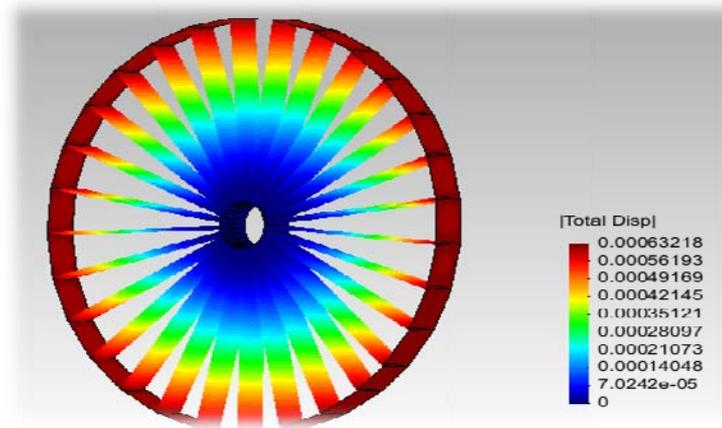


Figura 9. Máximas deformaciones (0.6mm) obtenidas en el anillo externo del rotor

3.2 Fibras orientadas a $0^\circ/45^\circ$ respecto a la dirección de la carga.

3.2.1 Tensiones

Para la orientación de fibras a 0° y 45° , la estructura genera tensiones de 30974 Pa ([Figura 10](#)), situándonos en un valor con el doble de magnitud que en el caso en que las fibras tienen una orientación ortogonal de $\pm 45^\circ$ respecto al eje de la carga.

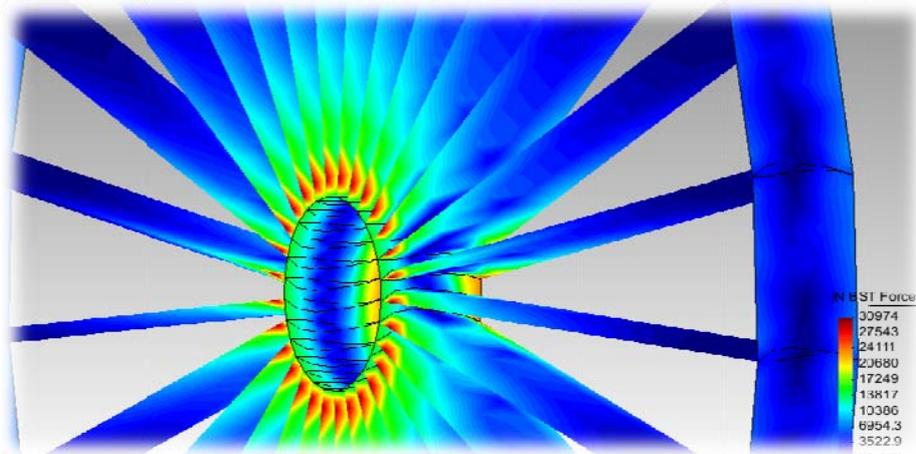


Figura 10. Máxima concentración de tensiones en los bordes de ataque de los álabes

3.2.2 Desplazamientos

Los desplazamientos máximos se producen en el anillo externo del rotor de 0.00019m (0.19mm), tal y como muestra la [Figura 11](#). De estos resultados se desprende que esta orientación del refuerzo forma una estructura más rígida que la anterior, mientras que las tensiones duplican los valores alcanzados con fibras de $\pm 45^\circ$.

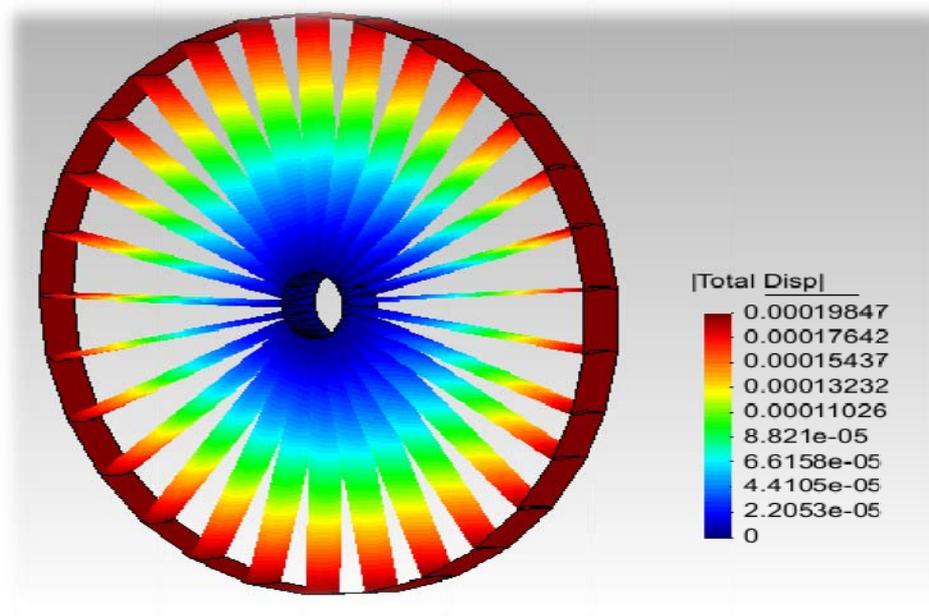


Figura 11. Máximas deformaciones (0.19mm) en el anillo externo del rotor.

3.3 Fibras orientadas a $0^\circ/90^\circ$ respecto a la dirección de la carga.

3.3.1 Tensiones

En este caso obtenemos tensiones de 28958 Pa cercanas al no ortogonal $0^\circ/45^\circ$ (Figura 12), distribuidas en una superficie más extensa (comparar con la Figura 10).

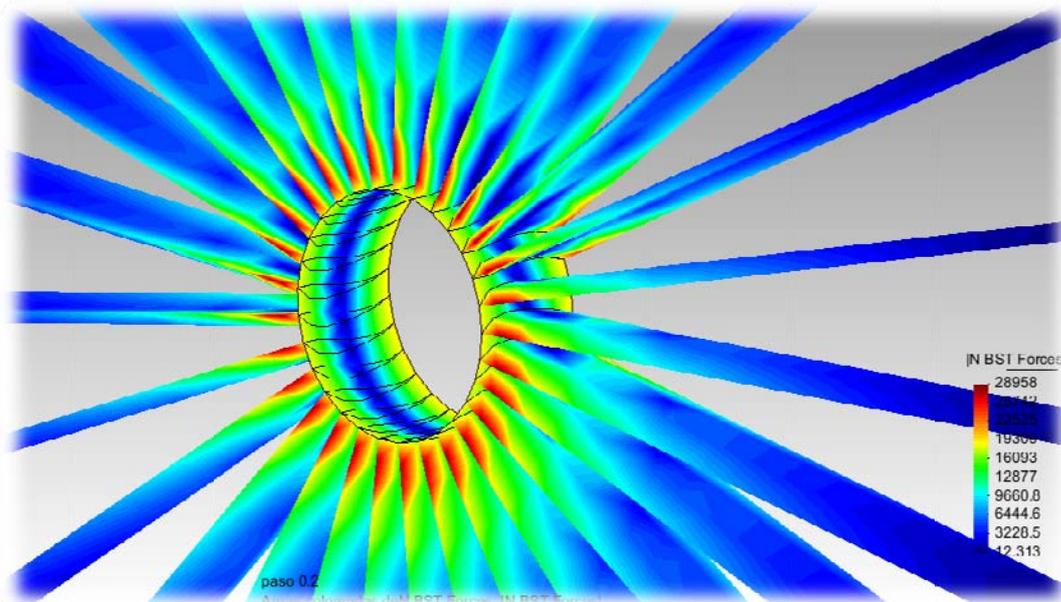


Figura 12. Tensiones generadas en un área más amplia de los bordes de ataque de los álabes

3.3.2 Desplazamientos

La concentración de los mayores desplazamientos concuerdan, como en los anteriores casos en la zona del anillo externo del rotor. Éstos son muy bajos, encontrándose sus valores en el orden de los 0.00023m (0.23mm), confirmando una importante rigidez de los álabes.

4 CONCLUSIONES

Pese a que Campack-Aero trabaja con modelos constitutivos de daño, rotura, etc. no es interés de este trabajo entrar en dicho campo debido a que se está haciendo un estudio orientado exclusivamente al diseño. Por lo tanto, para este estudio elástico lineal se analiza el campo tensional, y se verifica que no supere en ningún caso el criterio simple de barrera de Rankine (Oller S. 2003), estableciendo como resistencia límite de comparación en este criterio la tensión del material compuesto en el punto de integración numérica $\sigma_c = 1.88 \times 10^9 Pa$, valor de resistencia del material compuesto, obtenido mediante la teoría de mezclas (ver [Ecuación 1](#)). El hecho que nos encontremos en un nivel de tensiones tan lejano a la rotura ([Figura 13](#)), permite elegir como material conformador al compuesto más rígido ([Figura 14](#)), que en este caso es matriz reforzada con fibras de carbono dispuestas en una orientación de 0° en 3 capas intercaladas con otras 3 capas con orientaciones de fibras a 45° respecto a la dirección de la carga.

$$\sigma_c = (K_m \times \sigma_m) + \sum_{i=1}^{i=n} (K_{f_i} \times \sigma_{f_i}) \quad (1)$$

Donde:

σ_c = Resistencia límite del compuesto

K_m = Participación volumétrica que ocupa la matriz dentro del compuesto

σ_m = Resistencia límite de la matriz

K_f = Participación volumétrica que ocupan las fibras en la orientación $i^{\text{ésima}}$ dentro del compuesto

σ_f = Resistencia límite de las fibras

Este trabajo el estudio previo ([Oller et al. 2010](#)), en el que se analizó la conveniencia del uso de un rotor constituido por un material compuesto, respecto del mismo diseño conformado en acero. Así pues, queda en línea futura la incorporación de los parámetros fluido-dinámicos, mediante un acoplamiento en stagger entre un código de CFD ([FLUENT](#)) y el código de Compack-Aero, dando como resultado, un completo estudio estructural y fluido mecánico de este rotor turbínico de 35cm de diámetro, conformado en matriz epoxi reforzada con fibras de carbono con 6 capas intercaladas entre 0° y 45° y espesor total de 1.8mm.

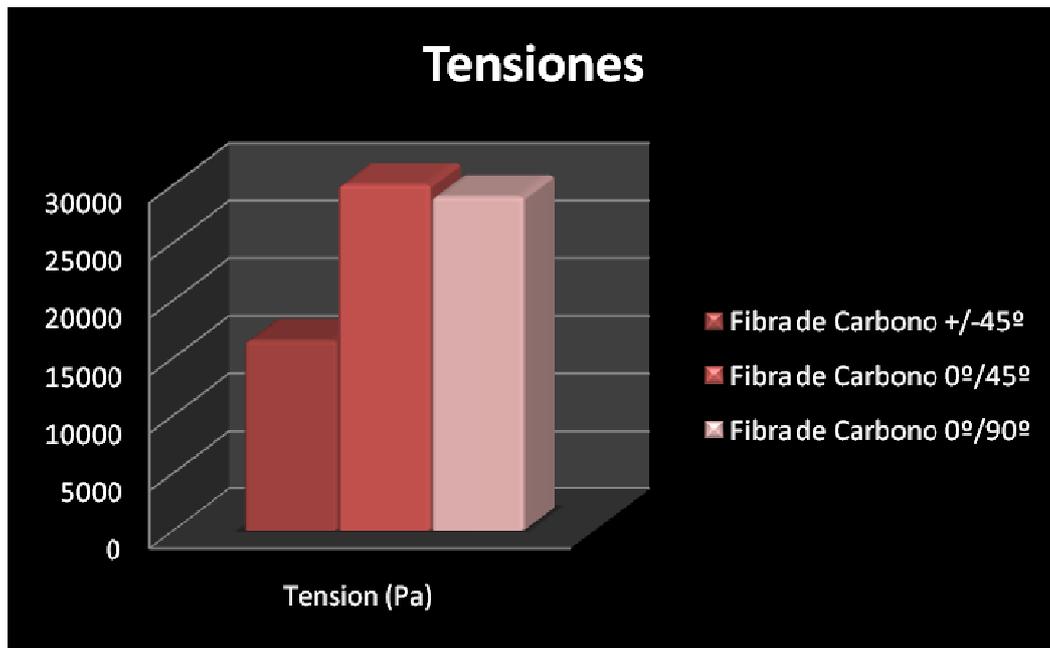


Figura 13



Figura 14

REFERENCIAS

1. Oller A. Sergio A., Nallim Liz G., Oller Sergio H. “*Diseño de un rotor de turbina hidroeléctrica conformada en materiales compuestos de matriz reforzada con fibras de carbono*”. II Congreso de Ingeniería Mecánica, San Juan, Argentina, Noviembre 2010. Trabajo completo aceptado para su publicación.
2. Zienkiewicz, O. C., Taylor, L.R., *The finite element method*, McGraw-Hill, London, England 1991
3. CIMNE and Quantech. ComPack-Aero. Innovative finite element methods for non linear analysis of composite structures, Explicit finite element, code developed by CIMNE & Quantech ATZ. www.cimne.com www.quantech.es . 2008
4. Oller S. (2003) *Simulación Numérica del comportamiento Mecánico de los Materiales Compuestos*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería Barcelona, I.S.B.N.: 84-95999-24-2.
5. Flores, F.G., Oñate E.,(2007). *A rotation-free shell triangle for the analysis of kinked and branching shells*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 69 (7), pp. 1521-1551.
6. Rastellini, F., Oller, S., Salomon, O., and Oñate, E., (2008). *Composite materials non-linear modeling for long fiber reinforced laminates: Continuum basis, computational aspects and validations*. Computers and Structures 2008, 86(9):879-896
7. ANSYS.Inc. FLUENT, Computational Fluid Dynamics <http://www.fluent.es/>

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las siguientes instituciones, por el soporte económico obtenido para esta investigación: Proyecto AECID (A/024063/09), España; Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), España; Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), España; Aula-CIMNE de la Universidad Nacional de Salta, Argentina; Consejo Nacional de Investigación Científica y Técnica (CONICET) de Argentina y al Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa), Argentina.