



## MATERIAL COMPUESTO vs ACERO EN EL CONFORMADO DE UN ROTOR DE TURBINA HIDROELÉCTRICA – VENTAJAS EN SU UTILIZACIÓN

SERGIO A. OLLER ARAMAYO<sup>1</sup>, LIZ G. NALLIM<sup>1</sup>, SERGIO OLLER MARTÍNEZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Salta  
INQUI – CONICET – Facultad Ingeniería  
Av. Bolivia 5150 Salta – Argentina

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Cataluña  
UPC-CIMNE – Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería  
c/ Gran Capitán s/n, Campus Nord (UPC) Barcelona – España

*(Recibido 5 de mayo de 2011, revisado 18 de agosto de 2011, para publicación 25 de agosto de 2011)*

**Resumen** – En este trabajo se presenta el diseño estructural de un rotor de turbina hidroeléctrica empleando materiales compuestos. El diseño consiste en la selección de laminados formados por láminas de matriz reforzada con fibras de carbono teniendo en cuenta su disposición, orientación, secuencia de apilamiento, espesor y número de capas. Conseguido el diseño del material y su aplicación en el rotor, se presenta la modelación numérica de la estructura mediante elementos finitos [1], simulando asimismo la presión aplicada sobre los álabes y el comportamiento del rotor frente a dichas acciones (tensiones generadas y límites en el diseño). El objetivo es conseguir un rotor de muy baja inercia rotacional que posea la cualidad de ser energéticamente eficiente pese a las bajas velocidades de flujo con las que deberá funcionar. El empleo del material compuesto mencionado optimiza el comportamiento de una turbina que actualmente está siendo estudiada por los autores para aplicaciones de paso fluvial sin represas, donde es muy importante aprovechar al máximo la energía cinética del fluido. La simulación de la respuesta mecánica se realiza empleando un programa en elementos finitos: ComPack-Aero [2], desarrollado por CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería), en Barcelona (España). La simulación permite realizar el análisis de las tensiones y resistencias a roturas en la estructura del rotor conformado en material compuesto. También se analiza el comportamiento del mismo rotor conformado en acero y se comparan los resultados referidos a la rigidez y los estados tensionales del rotor conformado en material compuesto laminado, considerando distintas secuencias de apilamientos de láminas. Los resultados obtenidos permiten construir una comparativa de datos para valorar si la elección de un rotor conformado en material compuesto es viable dentro de estas condiciones de trabajo.

**Palabras clave** – Hidro-turbina axial, rotor, material compuesto, elementos finitos.

### 1. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento hidroeléctrico suele hacerse a partir del concepto de embalsar agua para aumentar su energía potencial y transformarla en energía eléctrica mediante máquinas tradicionales (turbinas Pelton [3], Francis [4], Kaplan [4], etc.). En este trabajo se propone utilizar una turbina de paso axial que permite el aprovechamiento de la energía cinética del cauce fluvial.

La energía cinética en los ríos ( $V = 2 \text{ m/s}$ ) no es comparable a la energía potencial que genera un salto de agua de 80 metros de altura, y la solución propuesta en estas turbinas es conseguir una baja inercia rotacional gracias a la utilización de materiales compuestos.

**Turbina hidroeléctrica realizada con materiales compuestos.** El rotor que se analiza en el presente trabajo pertenece a la turbina fluvial de flujo axial que se muestra en la Fig. 1, cuyo diseño está actualmente en desarrollo por los autores de este trabajo.

Su diseño compacto, su condición de flujo axial y su baja inercia rotacional debido a la conformación con materiales compuestos, le confieren la capacidad de funcionamiento en lechos fluviales de baja velo-

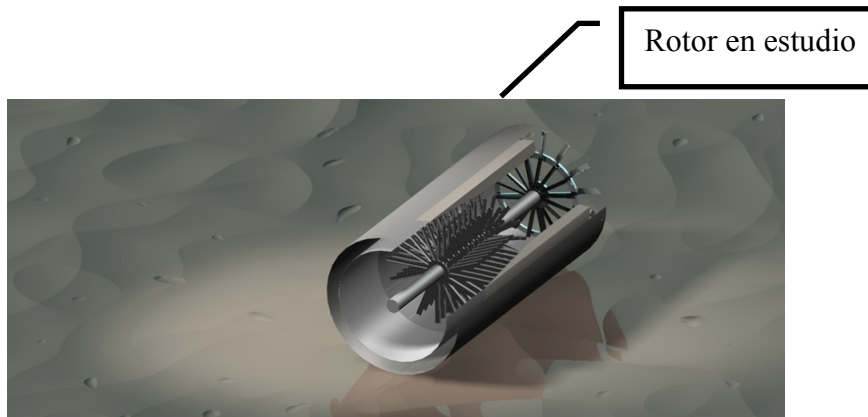


Fig. 1. Diseño esquemático de la turbina de paso para aprovechamiento energético en cauces fluviales.

idad, evitando la necesidad de grandes movimientos de tierras y costosas construcciones civiles para embalsar agua.

En este trabajo se presenta el prediseño del rotor turbínico, con la finalidad de establecer la viabilidad de la utilización de materiales compuestos laminados en estas aplicaciones.

La utilización de materiales compuestos en la industria automotriz y aeronáutica, así como en diversas ramas de la ingeniería, ha crecido notablemente en las últimas décadas. Esta situación ha dado un importante impulso al análisis del comportamiento de componentes estructurales constituidos con materiales compuestos. 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, situación importante a tener en cuenta en las partes rotantes de las turbinas axiales, pues en estas máquinas es muy importante el aumento de rigidez y resistencia con disminución de masa. 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 pueden adaptar para reducir el peso sin poner en peligro el rendimiento o, de igual manera, mejorar la eficacia sin aumentar el peso. Esto puede lograrse 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 hidrodinámica 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, en el cual las variaciones del ángulo de orientación de las fibras y de la secuencia de apilamiento permiten obtener una mejor rigidez y resistencia con un menor peso. Para el análisis mecánico se utiliza el código de elementos finitos explícito "Compact" que, adecuadamente tratado, permite estudiar el rotor conformado con material compuesto laminado. También se utiliza en este análisis un código de elementos finitos para el estudio del problema fluido-dinámico en el rotor, "Kratos Multi-Physics" [5], que permite obtener el estado de presiones y velocidades en cada punto de los álabes del rotor. Aunque en este trabajo se presenta, principalmente, el detalle del análisis mecánico del rotor de la turbina, la obtención de las acciones sobre el mismo ha sido posible gracias al acoplamiento entre los códigos Compact y Kratos. Así, se introduce el fluido en la cámara axial de la turbina y se obtiene con Kratos la distribución de presiones y velocidades, que luego son exportadas al programa Compact para analizar el comportamiento mecánico del rotor constituido por laminados de matriz reforzada con fibras unidireccionales. El acoplamiento mencionado se realiza por el procedimiento de *staggered* [12], es decir se soluciona cada uno de los problemas a la vez con la información complementaria transportada del otro problema (ver sistema implementado en la Fig. 2)

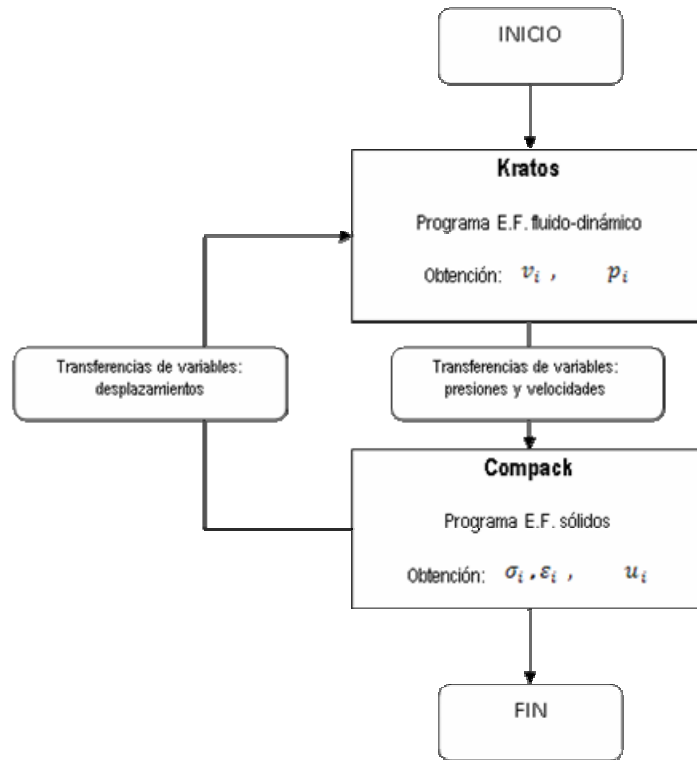


Fig. 2. Diagrama de flujo de la interacción entre los programas de elementos finitos de sólidos y fluidos.

La simulación numérica del álabe de material compuesto se hace a partir de una formulación basada en la teoría de mezclas generalizada programada en elementos finitos anisótropa que puede consultarse en [13,14].

Este trabajo se centra en el análisis de la estructura del rotor de la turbina constituido en material compuesto laminado mediante el código Compack, y es parte de un trabajo más general que estudia el flujo interno en la turbina mediante un prototipo en escala reducida, complementado con un código de fluido-dinámica Kratos (CFD), que permite obtener la distribución de presiones y velocidades en el interior de la turbina y en particular permite obtener las acciones sobre los álabes del rotor. Los detalles del estudio fluido dinámico no se incluyen en este trabajo y están en proceso de publicación.

## 2. CÁLCULO DE PRESIONES SOBRE EL ROTOR DE LA TURBINA

El objetivo de este apartado es mostrar, en forma simplificada, las presiones que actúan sobre el rotor de la turbina como consecuencia del flujo del agua. Dichas presiones son consecuencia de la oposición de la estructura del rotor, a la velocidad del fluido (agua en este caso). Dicha presión provoca dos sollicitaciones en el rotor:

- Carga 1: Fuerzas de rotación aplicadas sobre las superficies de los álabes provocadas por la diferencia de presiones entre las superficies superior e inferior del álabe (ver Fig. 3), obtenidas mediante un código de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para obtener la velocidad de rotación, los ángulos de ataque correctos de cruce de álabes, diagramas de presiones sobre las superficies alares, etc.

Detalles de este estudio serán publicados en otro trabajo dedicado exclusivamente a la fluido dinámica de la máquina.

- Carga 2: Fuerzas provocadas por las presiones aplicadas directamente sobre el borde de ataque del álabe, que provocan la deformación del mismo y tienden a romper el rotor en dirección per-

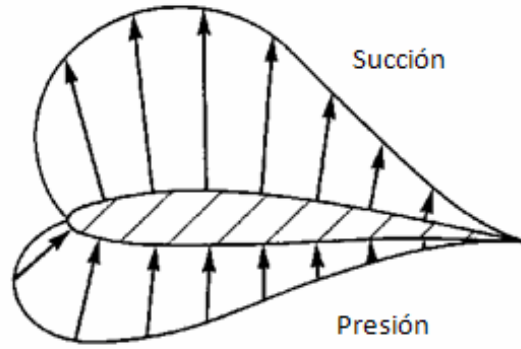


Fig. 3. Distribución simplificada del perfil de presiones de un álabe.

pendicular al plano del rotor. Esta acción se estudia y analiza en este trabajo mediante el programa de elementos finitos ComPack-Aero.

A continuación se presenta la ecuación de Prandtl [6], la cual permite obtener como resultado la velocidad del cauce fluvial a una altura determinada sobre el lecho de un río. En el caso desarrollado en este trabajo se ha adoptado 1m de altura sobre el fondo del cauce del río Pilcomayo (Argentina), tal que en la zona de emplazamiento tiene una profundidad del lecho  $h = 2.00$  m, una pendiente  $S_b = 0.002$ , una velocidad en superficie  $v_{\text{superficie}} = 2.1$  m/s y una viscosidad cinemática  $\nu = 1.01 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s. Considerando la aceleración de la gravedad  $g = 9.8$  m/s<sup>2</sup>, se obtiene la velocidad de admisión a una altura  $z = 1.00$  m sobre el lecho donde se emplazará la turbina, mediante la siguiente expresión de Prandtl:

$$v_{\text{lecho}} = u_{\text{adimensional}} \left[ \left( \frac{1}{0.4} \right) \cdot \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \right] = 2.073 \text{ m/s} \quad (1)$$

donde  $u_{\text{adimensional}} = \sqrt{g \cdot h \cdot S_b}$ ,  $z_0 = 0.11 \frac{\nu}{u_{\text{adimensional}}}$

Una vez obtenida la velocidad del agua en el cauce a  $z = 1.00$  m con tirante de agua  $h = 2.00$  m, se obtiene la presión cinemática existente a esa profundidad, mediante la siguiente expresión:

$$p_{\text{lecho}} = \rho v_{\text{lecho}}^2 = 4.238 \times 10^3 \text{ Pa} \quad (2)$$

donde  $\rho$  es la densidad del fluido y  $v_{\text{lecho}}$  es la velocidad del cauce a una altura  $z = 1.00$  m sobre el lecho. Posteriormente, el flujo pasa por diversos apéndices mecánicos tales como tubos venturi [7], bombas compresoras, etc., donde se producen cambios de presión y cuyo cálculo ajustado a realidad excede al objetivo del trabajo que aquí se presenta. No obstante, y para resolver el pre-diseño del rotor de la turbina con material compuesto, objeto de este trabajo, se utiliza la presión calculada en la entrada del rotor de la turbina  $p_{\text{turbina}} = 1.724 \times 10^5$  Pa, luego de superar las sucesivas cámaras de compresión (bombeos axiales) y el efecto Venturi provocados en la máquina. De aquí, se obtiene en forma simplificada una fuerza en la superficie  $A_{\text{ataque-álabe}} = 2.325 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup> del borde de ataque de cada álabe del último rotor (turbina), donde la presión es más alta que en los otros rotores de la máquina. De esta manera se obtiene la fuerza  $F_{\text{rotor}}$  (3) que actúa sobre el rotor con  $n_{\text{alabes}}$  y que permite analizar el comportamiento estructural del mismo, tanto se conforme en materiales compuestos como en acero.

$$F_{\text{Rotor}} = p_{\text{turbina}} \cdot (n_{\text{alabes}} \cdot A_{\text{ataque-álabe}}) = 1.162 \times 10^3 \text{ N} \quad (3)$$

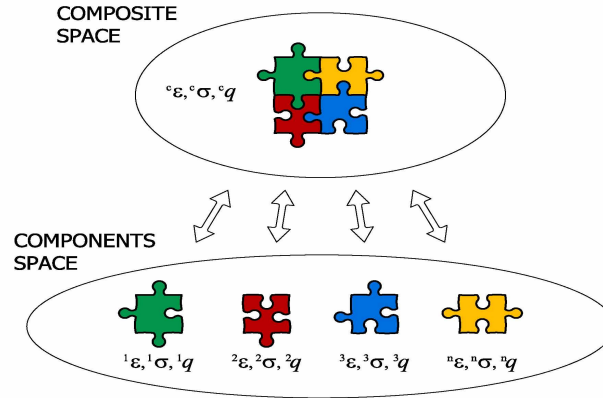


Fig. 4. Teoría de mezclas entendida como un modelo constitutivo implícito, resultante de la interacción de varios modelos constitutivos.

### 3. FORMULACIÓN UTILIZADA PARA SIMULAR EL COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ REFORZADO CON FIBRAS DE CARBONO

La regla clásica de mezclas, o la teoría de mezclas, trata los materiales compuestos utilizando un enfoque fenomenológico basado en la mecánica de medios continuos en la macro-escala. El comportamiento mecánico de los materiales compuestos se obtiene a partir de las ecuaciones constitutivas de sus componentes, siendo posible incluir el comportamiento no-lineal (elasticidad, daño, plasticidad, etc.) de cada uno de los componentes. Este enfoque representa una mejora sustancial en comparación con otras formulaciones existentes desarrolladas para estudiar el comportamiento de materiales compuestos. Otra ventaja de la teoría de mezclas radica en la posibilidad de utilizar todos los procedimientos existentes formulados para materiales simples para modelar el comportamiento de los componentes del un compuesto.

La forma clásica de la teoría de mezclas ha sido originalmente desarrollada por Trusdell y Toupin en 1960 [8]. Ésta considera que en un punto del material compuesto, sus componentes interactúan de acuerdo a las siguientes hipótesis: (i) cada volumen infinitesimal del compuesto contiene un número finito de componentes de material, (ii) la contribución de cada componente al comportamiento global del compuesto es proporcional a su participación volumétrica, (iii) todos los componentes están sometidos a la misma deformación, (iv) el volumen de cada componente es significativamente menor que el volumen compuesto.

En el caso de deformaciones pequeñas, la tercera de las hipótesis mencionadas se puede escribir como (Fig. 4):

$${}^c \boldsymbol{\varepsilon} = {}^1 \boldsymbol{\varepsilon} = {}^2 \boldsymbol{\varepsilon} = \dots = {}^k \boldsymbol{\varepsilon} = \dots = {}^n \boldsymbol{\varepsilon}$$

donde,  ${}^c \boldsymbol{\varepsilon}$  es la deformación del compuesto y  ${}^k \boldsymbol{\varepsilon}$  la deformación del  $k$ -ésimo componente.

Según la segunda hipótesis y el concepto de aditividad de la densidad de energía interna, la tensión en el compuesto puede ser calculada como la suma proporcional de cada componente, en función de la correspondiente participación volumétrica [8,9]; así, el estado tensional en un punto del sólido se obtiene mediante la siguiente expresión:

$${}^c \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}^S \boldsymbol{\varepsilon}^e = \sum_{k=1}^n k \cdot {}^k \boldsymbol{\sigma} = \sum_{c=1}^n k \cdot {}^k \mathbf{C}^S \cdot {}^k \boldsymbol{\varepsilon}^e \quad (4)$$

siendo  ${}^k \mathbf{C}^S$  el tensor constitutivo secante del componente  $k$ -ésimo, cuya participación volumétrica se define como,

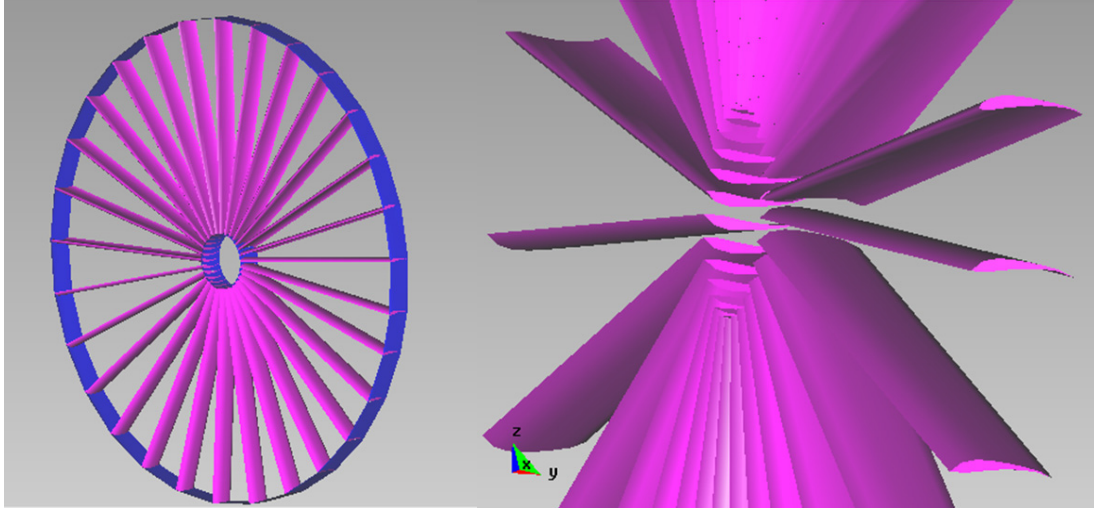


Fig. 5. a) Vista del rotor de la turbina. b) Detalle del perfil alar de los álabes.

$$k_k = \frac{dV_k}{dV_0}, \text{ con } \sum_{k=1}^n k_k = 1 \quad (5)$$

Para una explicación más detallada sobre la teoría de mezclas para materiales compuestos, se aconseja consultar las referencias [9] y [10]

#### 4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL ROTOR DE LA TURBINA.

En este apartado se realiza el análisis de la estructura del rotor de la turbina mediante la técnica de elementos finitos (programa ComPack-Aero). El material compuesto de matriz reforzada con fibras se simula numéricamente mediante la teoría de mezclas presentada anteriormente, mientras que para el acero se utiliza un modelo constitutivo isótropo. En todo momento se ha tratado de mantener ambos materiales dentro de los límites de comportamiento elástico, cuidando que en ningún punto de la estructura se superen las resistencias de inicio de daño en ningún componente del compuesto o en el acero.

##### 4.1. Geometría y condiciones de contorno del rotor

El rotor consta de un anillo interno solidario al eje de la turbina y un anillo externo usado para darle mayor rigidez estructura, tal como se muestra en la Fig. 5. Los 29 álabes constan de perfil alar con un ángulo de ataque que inicialmente se ha considerado de  $0^\circ$ .

En la Fig. 6 se muestran las dimensiones del rotor que empleadas para la generación de la malla de elementos finitos.

A partir de las dimensiones del rotor se genera una malla de 11.680 elementos finitos triangulares de lámina (elementos de lámina libre de rotación [11]), con 5.722 nodos (Fig. 7).

Una vez generada la malla se aplican las restricciones de movimiento a los nodos correspondientes al anillo interno a efectos de representar la unión solidaria al eje de la turbina. Asimismo, se aplican sobre todos los bordes de ataque de los 29 álabes la fuerza puntual de 1.162 N calculada en la Sección 2, creando así una carga repartida proporcional que simula la presión hidráulica sobre el rotor (Fig. 8).

Luego de realizada la descripción geométrica, la generación de la malla de elementos finitos y la aplicación de las condiciones de contorno, se lleva a cabo la caracterización de los materiales a utilizar. Concretamente, y de acuerdo a lo indicado anteriormente, se utilizan dos materiales (compuesto y acero) y se comparan las respuestas estructurales de cada caso.

A continuación se describen los detalles correspondientes a la modelación con cada material y los resultados obtenidos.



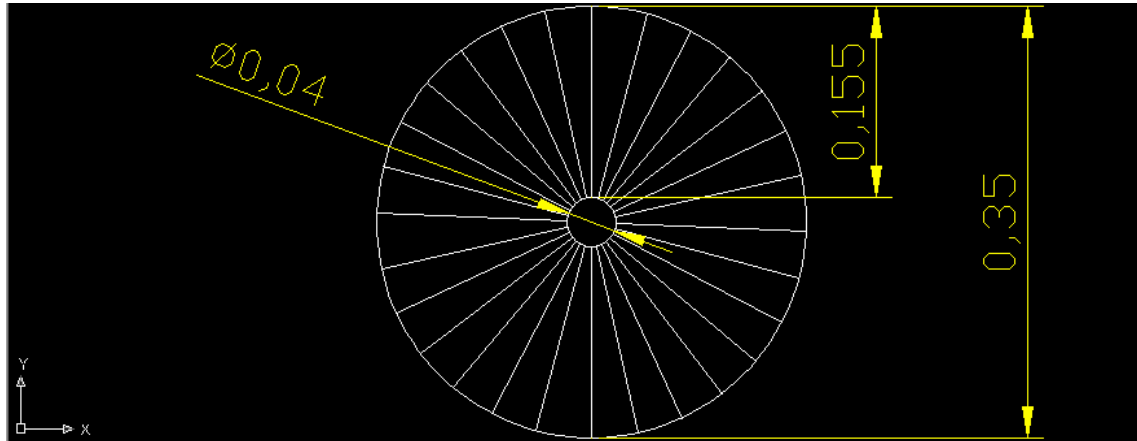


Fig. 6. Dimensiones del rotor en unidades del sistema internacional SI (m).

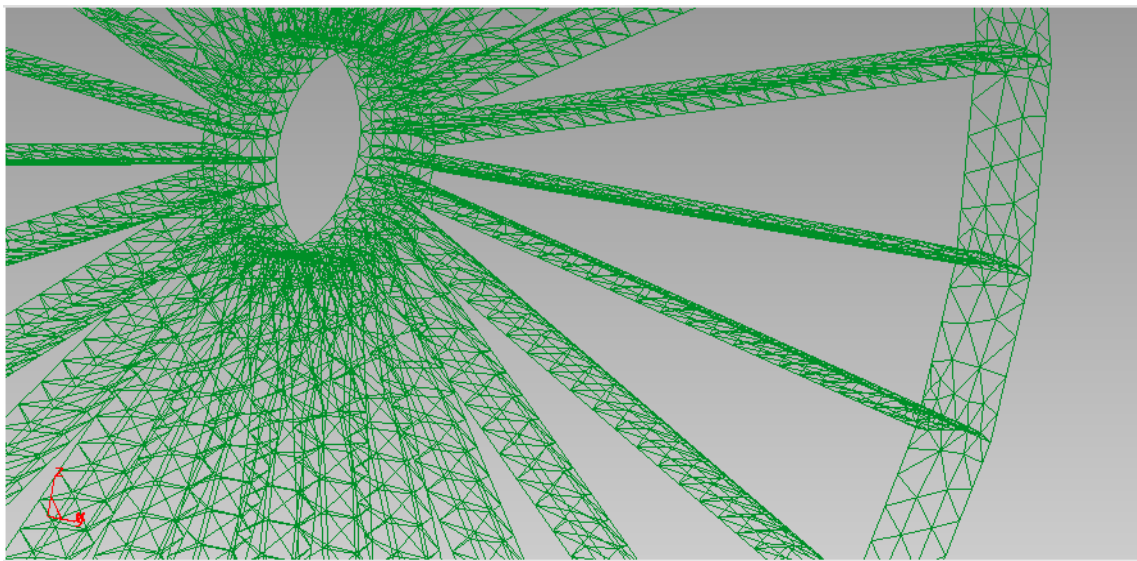


Fig. 7. Parte de la malla de elementos finitos del rotor.

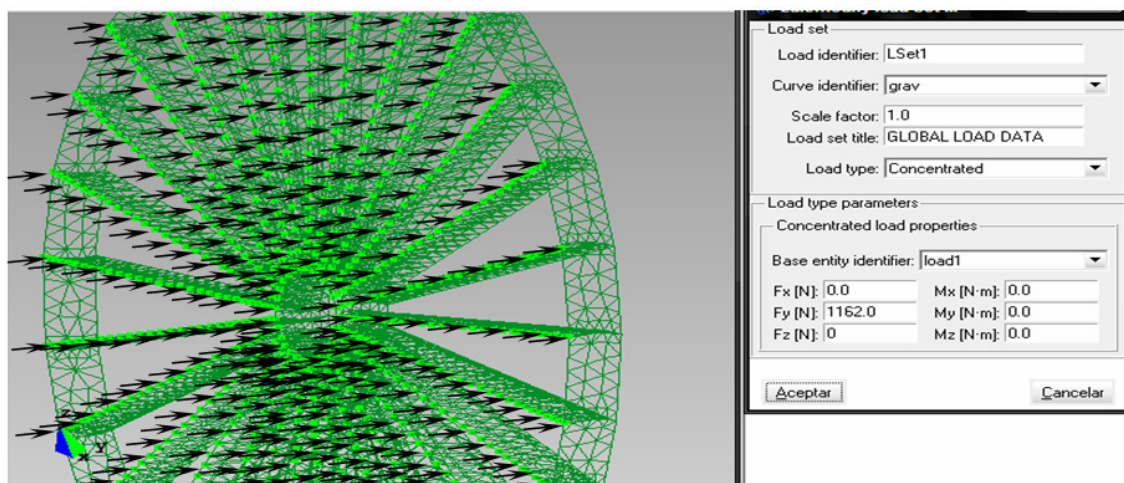


Fig. 8. Aplicación de las cargas en el frente de ataque de los álabes.

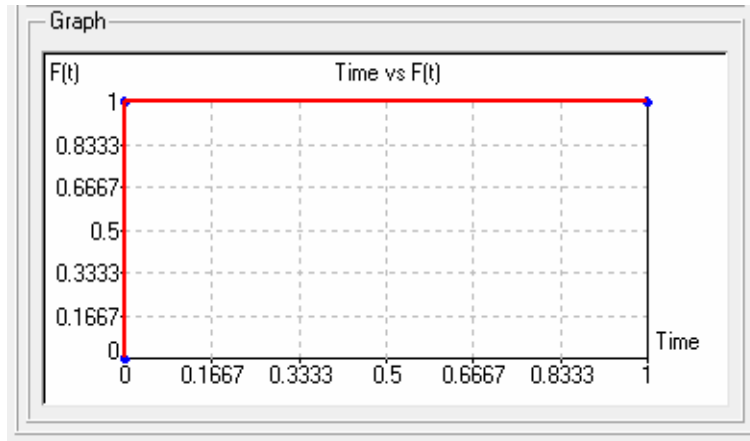


Fig. 9. Curva Fuerza vs. Tiempo.

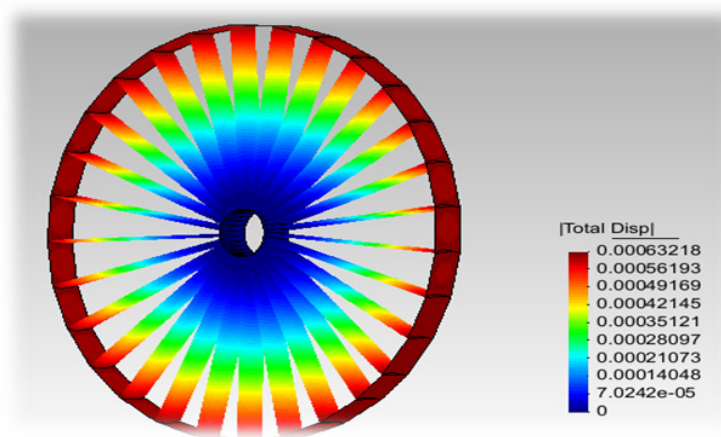


Fig. 10. Desplazamientos de los puntos del rotor de material compuesto.

#### 4.2. Simulación n°1: material compuesto con fibras orientadas a 45°

En esta simulación se emplea un material compuesto laminado de espesor  $t = 1.8$  mm. En el caso de los álabes, son láminas que envuelven un alma volumétrica de espuma sin resistencia estructural. Es decir, las almas son utilizadas únicamente para copiar las formas y dimensiones correctas del material compuesto. El material compuesto empleado en esta simulación se compone a través de la teoría de mezclas previamente citada. Uno de sus componentes es matriz epoxy isótropa de densidad  $\rho = 1200$  kg/m<sup>3</sup>, y módulo elástico  $E = 4.0 \times 10^9$  Pa, con coeficiente de Poisson  $\nu = 0.353$ . El material de refuerzo es fibra de carbono, cuyas características son densidad  $\rho = 1800$  kg/m<sup>3</sup>, módulo de elasticidad  $E = 242.1 \times 10^9$  Pa y coeficiente de Poisson  $\nu = 0.22$ . Con estos dos componentes se conforma un apilado de 6 capas de espesor  $e = 0.30$  mm, con fibra orientadas  $\pm 45^\circ$ . Las propiedades de conjunto del material compuesto obtenido resultan en forma implícita a través de la utilización de la teoría de mezclas.

Con respecto a la duración temporal de la simulación, se aplica la carga durante 0,1 s con una curva Fuerza *versus* Tiempo de acción casi instantánea (Fig. 9), es decir que con  $T = 1 \times 10^{-5}$  s se tiene el 100% de la carga aplicada sobre el rotor.

El análisis de los resultados obtenidos mediante la simulación permite observar que el máximo desplazamiento se consigue en el anillo externo con valores máximos de  $6.3 \times 10^{-4}$  m (0.63 mm) a 0.1 s después de la aplicación de la carga (Fig. 10).



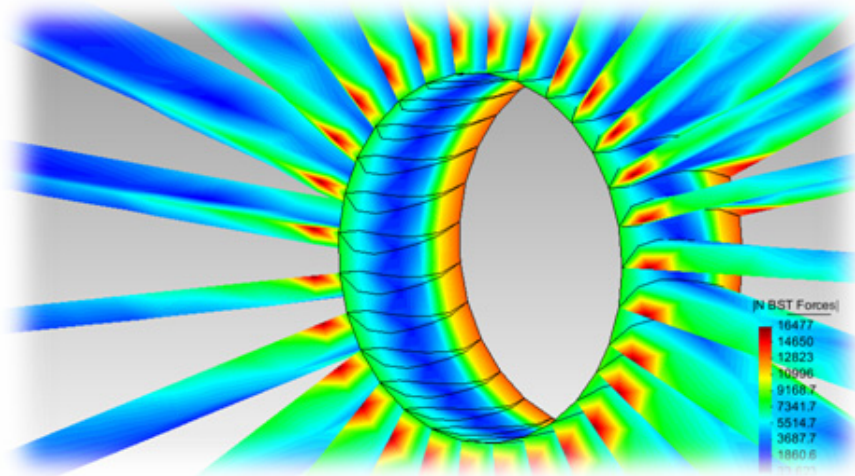


Fig. 11. Magnitud de tensiones del rotor de Material Compuesto.

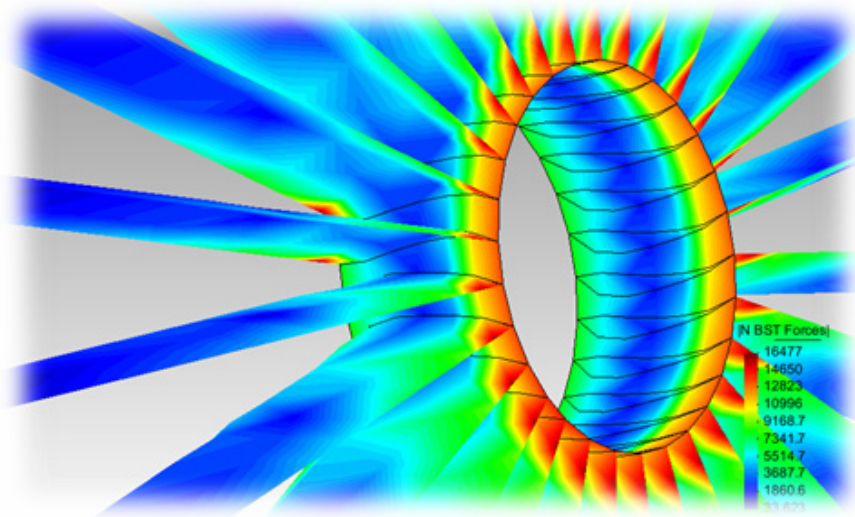


Fig. 12. Detalle de las concentraciones de tensiones del rotor de Material Compuesto.

Otro resultado que interesa conocer está relacionado con el estado tensional de la pieza, y para el caso del material compuesto, se alcanzan tensiones de  $\sigma = 16477$  Pa (Fig. 11) por tracción en la cara delantera del rotor, concretamente en los bordes de ataque de los álabes situados en la cercanía del anillo solidario al eje y, de la misma magnitud por compresión en la parte posterior del rotor. (Fig. 12).

#### 4.3. Simulación n° 2: material acero

En esta simulación el material se compone de una lámina de acero de espesor  $e = 1.2$  mm, sin almas volumétricas con resistencias adicionales. Las características mecánicas de este material isotrópico son densidad  $\rho = 7850$  kg/m<sup>3</sup>, módulo de elasticidad  $E = 210.0 \times 10^9$  Pa y coeficiente de Poisson  $\nu = 0.3$ . Se utiliza este material tanto en los álabes como en los anillos. Con respecto a los parámetros temporales, se utilizan las mismas curvas que en el apartado 4.2

En cuanto a los resultados de la simulación se puede observar que el máximo desplazamiento se consigue en el anillo externo con valores máximos de  $6.5 \times 10^{-5}$  m (0.06 m) a 0.1 s después de la aplicación de la carga (Fig. 13).

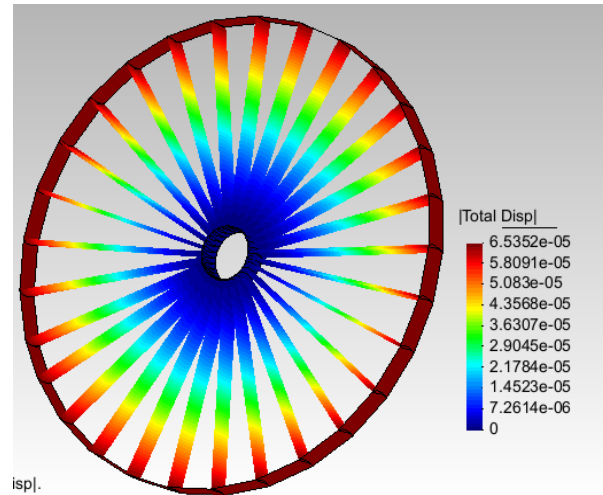


Fig. 13. Desplazamientos de los puntos del rotor de acero.

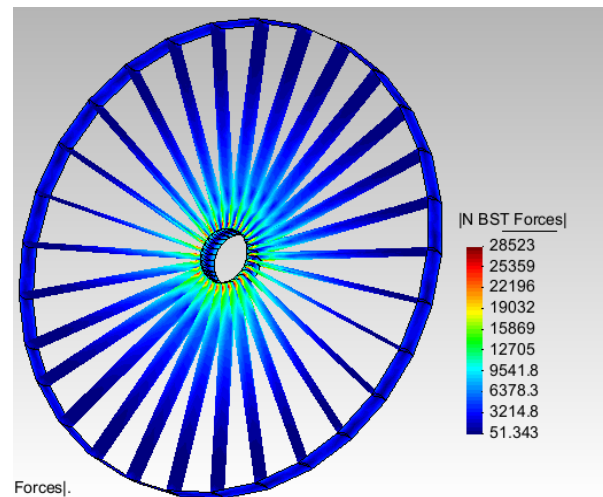


Fig. 14. Magnitud de tensiones del rotor de acero.

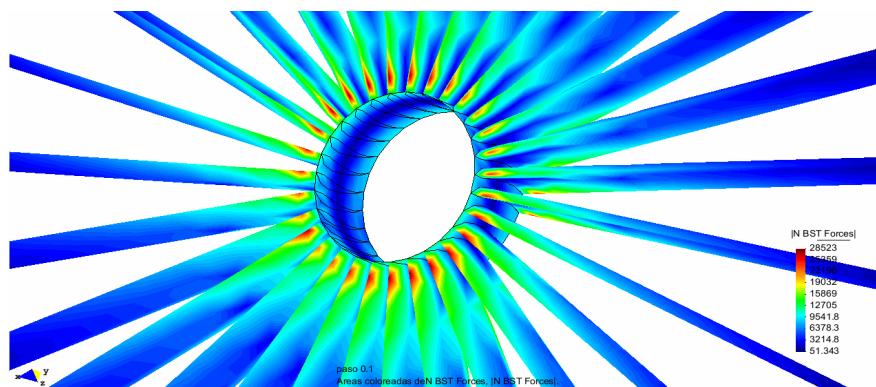


Fig. 15. Detalle de las concentraciones de tensiones del rotor de acero.

En relación al estado tensional de la pieza de acero, se observa que se alcanzan tensiones  $\sigma = 28523$  Pa (Fig. 14) en los bordes de ataque pertenecientes a los álabes y situados en la cercanía del anillo solidario al eje (Fig. 15).

## 5. INERCIAS

Uno de los principales objetivos que se espera lograr con el rotor aquí estudiado es mejorar el rendimiento de la turbina axial propuesta por los autores (ver Fig. 1), y ello se consigue disminuyendo en forma notable la inercia del rotor y, por consiguiente, el par que necesita para poder arrancar.

La disminución de la inercia es posible gracias a la utilización del material compuesto, en este caso constituido por láminas de matriz reforzada con fibras de carbono.

El material compuesto de 1.8 mm de espesor se compone de una matriz con densidad  $\rho_{matriz} = 1200 \text{ kg/m}^3$ , en este caso con una proporción del 60%, y 40% de fibra de carbono con densidad  $\rho_{fibra} = 1800 \text{ kg/m}^3$ . Considerando la teoría de mezclas presentada en la Sección 3, se obtiene la densidad del compuesto  $\rho_{compuesto} = 1440 \text{ kg/m}^3$ . Teniendo en cuenta dicha densidad y el volumen del rotor de compuesto  $V_{Rotor-compuesto} = 4.991 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ , se obtiene la masa del rotor  $m_{Rotor-compuesto} = 0.719 \text{ kg}$ , de donde resulta una inercia rotacional de  $I_{Rotor-compuesto} = 0.022 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Con esta inercia se obtiene que el par necesario para el arranque o puesta en marcha es de  $\text{Par}_{Arranque-Rotor-Compuesto} = 100.7 \text{ N}\cdot\text{m}$ .

Para el caso del rotor de acero de 1.2 mm de espesor, los cálculos son análogos y teniendo en cuenta una densidad de acero de  $\rho_{acero} = 7850 \text{ kg/m}^3$  y un volumen de  $V_{acero} = 3.327 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ , se obtiene una masa de  $m_{Rotor-Acero} = 2.612 \text{ kg}$ , una inercia de  $I_{Rotor-Acero} = 0.08 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$ . De esto resulta un par de arranque o puesta en funcionamiento  $\text{Par}_{Arranque-Rotor-Carbono} = 365.9 \text{ N}\cdot\text{m}$ , es decir 3,63 veces mayor que el par de arranque que necesita el rotor construido con material compuesto (Fig. 16).

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se realiza un análisis estructural del pre-diseño del rotor de una turbina hidráulica de paso. Se comparan los resultados obtenidos con la utilización de material compuesto y también con acero. De este estudio comparativo resulta que el material compuesto constituye una opción muy válida pues, en cuanto a resistencia trabaja a tensiones más bajas (12053 Pa menos, casi la mitad de los valores registrados por el acero) como se observa en la Fig. 17; y con rigideces ubicadas dentro de las tolerancias aceptables para este tipo de maquinaria (Fig. 18). Además, tiene la gran ventaja que la inercia rotacional del rotor de material compuesto es 3.6 veces más baja que la del rotor hecho con acero (ver Fig. 16), haciendo posible una máquina con mejores rendimientos, mayor facilidad de arranque a bajas velocidades de flujo y más ligera para su manipulación (reparaciones, mantenimientos, transportes, etc.).

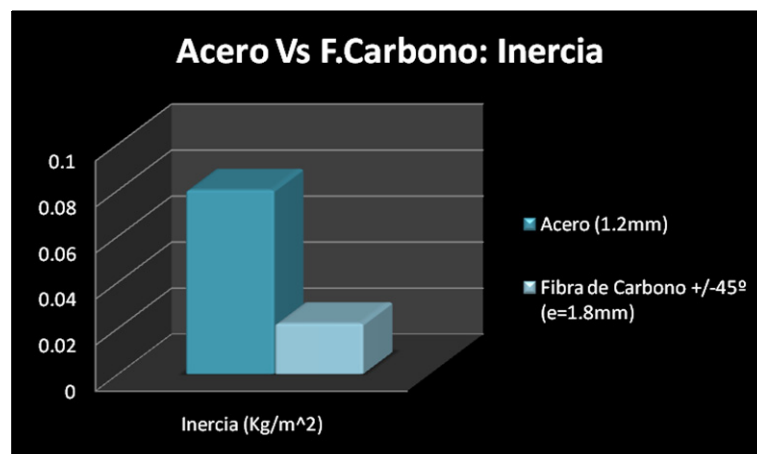


Fig. 16. Comparativa de inercias entre el rotor de acero y el de material compuesto.

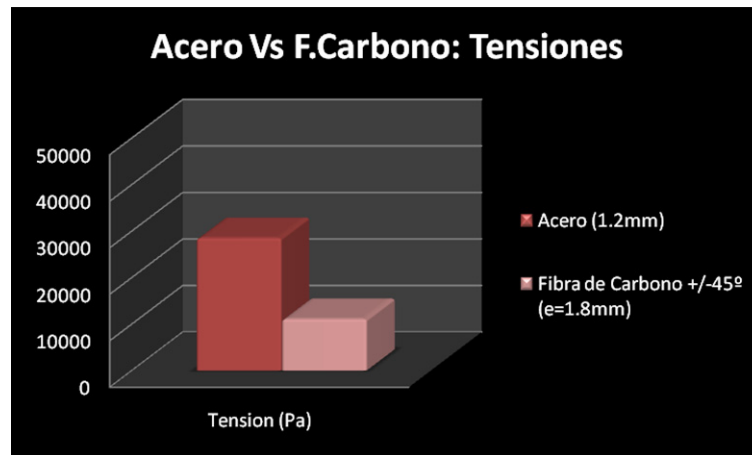


Fig. 17. Comparativa de tensiones entre el rotor de acero y el de material compuesto.

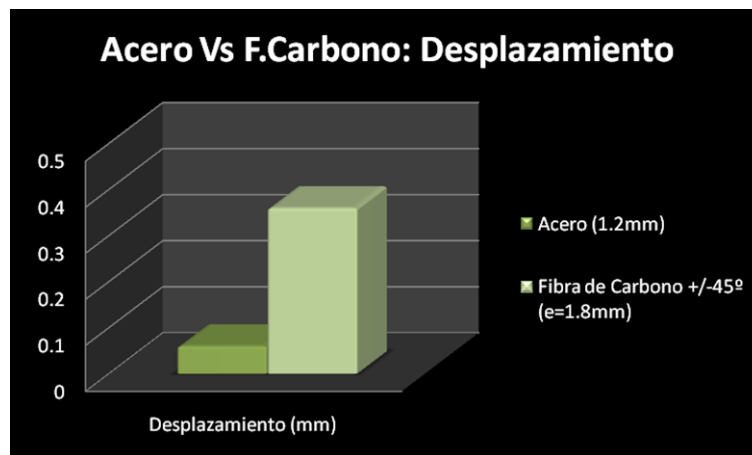


Fig. 18. Comparativa de deformaciones entre el rotor de acero y el de material compuesto.

## 7. LÍNEAS FUTURAS

El trabajo aquí presentado corresponde a una de las partes de una investigación más amplia, la cual incluye los desarrollos en la parte fluido-dinámica mediante CFD (*Computational Fluid Dynamics*) del rotor de turbina aquí expuesto. De esta forma, se realizará un estudio acoplado débil unidireccional (fluido-sólido), mediante un procedimiento en *stagger* entre la simulación mediante CFD del diagrama de presiones fluido-dinámicas en las superficies alares de los álabes y el proceso mecánico de comportamiento de la turbina simulado mediante un código de elementos finitos. Así, se analiza el comportamiento fluido-dinámico y luego se introduce mediante el *stagger*, a través de una comunicación informática de datos entre los dos códigos, todas las presiones nodales alares en el código mecánico para el mismo instante de tiempo  $\Delta t$ . De esta forma se conseguirá una simulación completa entre dos campos distintos: la fluido-dinámica, simulada mediante el código Kratos (CFD), y el campo estructural, cuyo comportamiento se analiza mediante el código de elementos finitos ComPack-Aero.

Asimismo puede consultarse en [15] el estudio sobre la optimización en la conformación del material compuesto, con estudios en distintas orientaciones de las fibras de carbono.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las siguientes instituciones, por el soporte económico obtenido para esta investigación: 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; Proyecto AECID (A/024063/09), España.

## REFERENCIAS

- [1] Zienkiewicz, O.C., Taylor, L.R., *The finite element method*, McGraw-Hill, London, England (1991)
- [2] 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](http://www.cimne.com); [www.quantech.es/QuantechATZ/Stampack.html](http://www.quantech.es/QuantechATZ/Stampack.html). 2008
- [3] Agar, D., Rasi, M., “On the use of a laboratory-scale Pelton wheel water turbine in renewable energy education”, *Renewable Energy*, **33**, 1517–1522 (2008)
- [4] Kumar, P., Saini, R.P., “Study of cavitation in hydro turbines — A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 374–383 (2010)
- [5] CIMNE. “Kratos Multi-Physics”, General Finite Elements Multiphysics code. <http://www.cimne.com/kratos/> (2005-now)
- [6] Durana Moitaa, R., Matosa, H.A., Fernandes, C., Nunes, C.P., Pinhob, M.J., “Dynamic modelling and simulation of a heated brine spray system”, *Computers and Chemical Engineering*, **33**, 1323–1335 (2009)
- [7] Giddings, D., Azzopardi, B.J., Aroussi, A., Pickering, S.J., “Absolute measurement of pneumatically conveyed powder using a single long throat venture”, *Powder Technology*, **172**, 149–156 (2007)
- [8] Trusdell, C., Toupín, R., *The classical field theories, Handbuch der physic iii/I*, Edition, Springer-Verlag, Berlin, Germany (1960)
- [9] Car, E., Oller, S., Oñate, E., “An anisotropic elasto-plastic constitutive model for large strain analysis of fiber reinforced composite materials”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **185**(2-4), 245-277 (2000)
- [10] Car, E., Oller, S., Oñate, E., “A Large Strain Plasticity for Anisotropic Materials – Composite Material Application”, *International Journal of Plasticity*, **17**(11), 1437-1463 (2001)
- [11] Flores, F., Oñate, E., “A rotation-free shell triangle for the analysis of kinked and branching shells”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **69**(7), 1521-1551 (2007)
- [12] Ferziger, J., Perić, M., *Computational methods for fluid dynamics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (2002)
- [13] Oller, S., *Análisis y cálculo de estructuras de materiales compuestos*, CIMNE, Barcelona, España (2002)
- [14] Rastellini, F., Oller, S., Salomón, O., Oñate, E., “Composite material non-linear modelling for long fibre-reinforced laminates. Continuum basis, computational aspects and validations”, *Computers and Structures* **86**, 879-896 (2008)
- [15] Oller, S.A., Nallim, L.G., Oller, S.H., “Estudio comparativo de la respuesta estructural de álabes de turbina de material compuesto”, *Mecánica Computacional*, Volume XXIX. Number 75. Advanced Analysis in Steel and Composite Structures. Buenos Aires, Argentina (2010)

## COMPOSITE MATERIAL vs STEEL IN A HIDRO-ELECTRICAL ROTOR AXIAL TURBINE

**Abstract** – This paper shows the structural design of a composite water current turbine rotor by the finite elements method (FEM) [1]. The mechanical and geometrical parameters involved in the design of this fiber reinforced composite material are fiber orientation, number of layers, stacking sequence and laminate thickness. The results are generated through the simulations in a FEM code about the rotor behavior (stresses and strains) under applied water pressures. The main purpose is to achieve a very low inertia rotor, because it is applied in

an axial water flow turbine currently in study by the authors, where it is important to take the maximum advantage of the kinetic energy. The FEM simulation is engineered by CIMNE's (International Center for Method in Engineering) software: ComPack-Aero [2] in Barcelona (Spain). To complete the analysis, the stiffness and the state of stress of the composite rotor is compared with results corresponding to a steel one. So in that way it is possible to select the best option to use in this turbine rotor.

**Keywords** – Axial Hidro-Turbine, Rotor, Composite Material, Finite Elements.