

## COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIALES COMPUESTOS PARA APLICACIONES EN PALAS DE AEROGENERADORES DE POTENCIA

J.E. Perez Ipiña \*, A.A. Yawny \*\*, A. Buschizazzo \*\*\*, E. Mikkelson\*\*\*

\* U.N. Comahue / CONICET. Buenos Aires 1400. (8300) Neuquén, Argentina.  
pipina@uncoma.edu.ar

\*\* CAB CNEA / CONICET

\*\*\* IMPSA WIND

### RESUMEN

*Se determinaron las propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de vidrio empleados en la construcción de palas de aerogeneradores de gran potencia por parte de la empresa IMPSA Wind. Se realizaron ensayos de laboratorio tanto estáticos como de fatiga. En el primer caso se determinaron las propiedades de resistencia en las distintas variantes de orientaciones y combinaciones de capas, incluyendo:*

- a) *Módulos de Elasticidad E1 y E2 en tracción y compresión*
- b) *Módulos de Corte G12, G13, G23.*
- c) *Resistencias a tracción y compresión en las diferentes orientaciones.*
- d) *Resistencias al corte intralaminar.*
- e) *Resistencias al corte interlaminar*

*Los ensayos de fatiga correspondieron a diferentes relaciones de carga máxima y mínima (load ratio R) para elaborar Diagramas de Vida a Amplitud Constante (CAL) que puedan luego ser utilizados en estrategias de evaluación de daño en el proyecto. Se realizaron también ensayos estáticos y de fatiga ( $5 \cdot 10^6$  ciclos) en escala 1:1 sobre una pala de 26,2 m de longitud y se midieron cargas, desplazamientos y deformaciones de las palas.*

Palabras-clave: materiales compuestos, aerogeneradores, propiedades mecánicas.

### INTRODUCCIÓN

Distintos aspectos económicos y ambientales provocarán que la humanidad tenga que volcarse cada vez más al uso intensivo de las fuentes renovables de energía. Las energías renovables enfrentan el desafío de pasar de ser una alternativa para países ecológicamente sensibles, a ser una opción real para enfrentar la amenaza que el encarecimiento de los hidrocarburos plantea para la economía mundial.

En lo concerniente a energía eólica, podemos mencionar que en la última década se ha verificado un crecimiento sostenido del 29% anual en la potencia instalada mundial en la última década (40,000 MW total instalados). Pronósticos de mercado estiman un crecimiento del 20% anual (entre 8,000 MW y 12,000 MW) con un mercado potencial superior a los US\$ 10,000 Millones de dólares anuales. A partir de que el precio del petróleo superó los U\$S 40 por barril, los costos de generación eléctrica con energía eólica se volvieron también competitivos frente a la generación a partir de hidrocarburos <sup>(1)</sup>.

La construcción de aerogeneradores de gran potencia requiere de estructuras importantes, sometidas a complejas condiciones de servicio. Además, muchos de sus grandes componentes estructurales están contruidos con materiales no convencionales, como es el caso de las palas del rotor que se hacen principalmente de materiales compuestos con matriz polimérica termorrígida (polyester / epoxy).

Estos materiales deben poseer propiedades mecánicas aceptables de manera de cumplir con las condiciones de trabajo a las que serán sometidos. Dadas las características anisotrópicas de los mismos, el número de parámetros necesarios para una completa descripción del comportamiento es mayor que los necesarios en materiales estructurales convencionales (p. ej. en aleaciones metálicas): los mecanismos responsables de la rotura en tracción y compresión son diferentes y resultan en resistencias a la rotura también diferentes; la resistencia a esfuerzos de corte, problemas de delaminación, el pandeo localizado de fibras y la variedad de constantes elásticas, ilustran sobre la complejidad del problema. Hay que tener en cuenta además, que los mecanismos operativos y las propiedades resultantes son fuertemente dependientes del proceso de fabricación, de la relación fibra / matriz, de la orientación de las fibras, del tipo y combinación de capas individuales. Además, también juegan un papel importante los diferentes diseños del compuesto de acuerdo a los esfuerzos a que está sometido en cada sector de una pala, el comportamiento de los adhesivos empleados, etc. Aquí también los mecanismos de falla son variados y dependen de las variables de proceso, del tipo de esfuerzos aplicados (tracción, compresión, corte, fatiga tracción-tracción, fatiga tracción-compresión, impactos, etc.).

El objetivo general del trabajo realizado fue avanzar en el conocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales empleados en la construcción de palas de aerogeneradores de gran potencia (1 MW o mayores) por parte de la empresa

IMPISA WInd, la realización de ensayos de homologación de las correspondientes palas y la correlación entre las propiedades medidas en laboratorio y las magnitudes medidas en los ensayos de prototipos.

## MATERIAL Y MÉTODO

El material empleado en la realización de las probetas es tela de vidrio E, en diferentes arquitecturas, cosidas (stitched), con una matriz de resina poliéster ortoftálica, de una compañía argentina, que lo desarrolló para esta aplicación. Las telas son unidireccionales, biaxiales, biaxiales con mat, y triaxiales, de peso y arquitectura convencional para este tipo de aplicación.

Los ensayos de laboratorio en cupones provistos por IMPISA (estáticos y fatiga) así como los procedimientos utilizados en cada caso se resumen a continuación:

- ensayos de tracción siguiendo la norma ASTM D3039-2000 (2006) <sup>(2)</sup>, Figura 1.
- ensayos de compresión de acuerdo a la norma ASTM D3410-2003 <sup>(3)</sup>, Figura 2.
- ensayos de corte de acuerdo a la ASTM D7078-2005 <sup>(4)</sup>; Figura 3.
- ensayos de corte interlaminar según ASTM D2344-2000 (2006) <sup>(5)</sup>, Figura 4.
- ensayos de fatiga ( $R > 0.1$ ) de acuerdo a ASTM 3479 (2002) <sup>(6)</sup>; Figura 5.

Los cupones ensayados, tanto en sentido longitudinal como transversal, tenían las siguientes configuraciones:

- $0^\circ + 90^\circ + \text{mat}$
- $0^\circ + 90^\circ$
- $\pm 45^\circ$
- $\pm 45^\circ + 90^\circ$
- $\pm 45^\circ + \text{mat}$

Los procedimientos de ensayos de prototipo (estático y fatiga) fueron desarrollados específicamente para las palas de 26,2 m, fueron llevados a cabo en la planta de la empresa sobre dispositivos, instrumentación y palas construidas por IMPISA, y consistieron en una base rígida que soporta la pala en voladizo, con posibilidad de ubicar la pala en diferentes posiciones, Figura 6. Las palas estuvieron instrumentadas con medidores de deformación por fibra óptica compensados por temperatura (24 a lo largo de la pala, pegados sobre las caras interiores de las cáscaras).



Figura 1: Ensayo de tracción hasta la falla en una probeta.

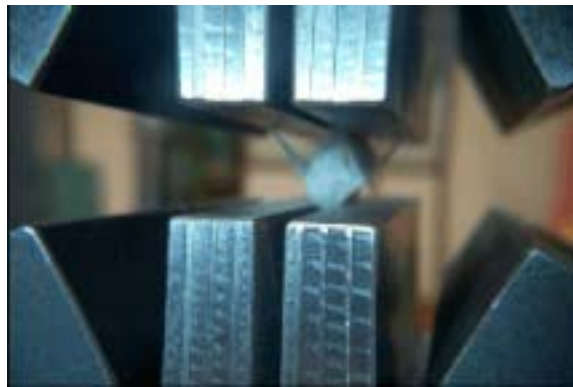


Figura 2: Ensayo de compresión hasta la falla en probeta (*gage length*  $\cong$  15 mm)



Figura 3: Ensayo de corte.

Para el ensayo estático a plena escala (EEPE) y de fatiga a plena escala (EFPE) la pala se colocó de forma tal de producir flexión *flapwise* pura, esto es, que las fuerzas aplicadas tienen una dirección perpendicular a la cuerda del perfil aerodinámico de la pala.



Figura 4: Ensayo de corte interlaminar.



Figura 5: Ensayo de fatiga.

La aplicación de la carga para el EEPE fue realizada mediante cargas concentradas en distintos puntos de la misma, (Figura 6) y fue aplicada mediante malacates accionados manualmente. En el caso del EFPE, la carga fue aplicada mediante una masa excéntrica rotando aproximadamente a la primera frecuencia natural de la pala, y la amplitud de la oscilación era controlada mediante el acercamiento de la frecuencia de rotación del excéntrico al valor de la primera frecuencia natural en el sentido *flapwise*. Esto es, la pala oscila a la misma frecuencia natural en el sentido *flapwise*. Esto es, la pala oscila a la misma frecuencia de giro del excéntrico y se acerca (o se aleja) al valor de la resonancia si necesita aumentar (o disminuir) la amplitud de deflexión. La Figura 7 muestra la pala con el sistema de excitación y un detalle de este último. El EFPE comprendió  $5 \times 10^6$  ciclos con valores de desplazamientos que ocasionarían un daño por fatiga equivalente al que ocurriría en 25 años de operación. El espectro de cargas aplicadas sobre la pala durante su vida, debido a los vientos y a otras reacciones de

la estructura de la máquina, fue aproximado mediante simulación numérica del software FAST v5.1 y procesado para obtener un diagrama tipo *rainflow* de los espectros de carga. Por otro lado, fue estimada la resistencia a la fatiga de la pala como un todo considerando a sus líneas de pegado internas como el componente más susceptible a fatiga y como el que gobierna la falla de la pala por fatiga. Posteriormente, y a partir de estos cálculos fue aplicada la regla de Palmgren-Miner para estimar el daño por fatiga. (7, 8, 9)



Figura 6: Ensayo estático a plena escala.



Figura 7: Ensayo de fatiga a plena escala. Sistema excitador montado sobre la pala.

## RESULTADOS

### Resultados ensayos estáticos de laboratorio

Las Tablas I a IV muestran los resultados de los ensayos estáticos de tracción, compresión, corte y corte interlaminar respectivamente

Tabla I. Ensayos de tracción

Cupón	Tela	Descripción	Dirección carga	Masa [kg/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{\max}$ [MPa]	$\epsilon_{\max}$ [ $\mu\epsilon$ ]	E [GPa]	$\nu$
2L3a	U-1140	0° + 90° + mat	Long.	1265	876	27542	36	0.27
2T3a	U-1140	0° + 90° + mat	Transv.	1265	31.5	20673	12.4	0.09
1T3a	ELPB-567	0° + 90°	Transv.	617	38.8	-	9.8	0.12
4S3a	EBX-802	± 45°	Simétrica	802	133.5	-	11.8	0.61
P525	ETTX-1169	± 45° + 90°	Long.	1169	535.3	25730	24.9	0.45
P526	ETTX-1169	± 45° + 90°	Transv.	1169	212.6	21137	16.9	0.12
P527	EBX-802	± 45°	Simétrica	802	149	22977	13.7	0.63
P530	EBX-602 M300	± 45° + mat	Simétrica	602 + 300 (mat)	123	20434	11.4	0.48
P531	EBX-602 M300	± 45° + mat	Simétrica	602 + 300 (mat)	94.1	18648	10.5	0.46
P535	U-1140	0° + 90° + mat	Long.	1265	1044	25927	44.4	0.26
P536	U-1140	0° + 90° + mat	Transv.	1265	33.3	12829	10.6	0.04
P537	ELPB-567	0° + 90°	Long.	617	588	21555	29.5	0.29
P538	ELPB-567	0° + 90°	Transv.	617	42.4	25032	10.1	0.1
P539	U-1140	0° + 90° + mat	Long.	1265	743	21726	38.2	0.22
P540	U-1140	0° + 90° + mat	Transv.	1265	35.3	13814	11.8	0.1

Tabla II. Ensayos de compresión

Cupón	$\sigma_{\max}$ [MPa]	$\epsilon_{\max}$ [ $\mu\epsilon$ ]	E [GPa]	$\nu$
P 525	419	19955	25.6	0.44
P526	253	16246	19.5	0.27
P527	126	16640	13.7	0.6
P530	166	22339	12.5	0.48
P531	179	27696	11	0.44
P535	497	11964	40.8	0.27

P536	85.4	10594	9.7	0.09
P537	259	9067	30.1	0.32
P538	139	12435	13.1	0.09
P539	502	13033	38.8	0.26
P540	140	11678	15	0.09

Tabla III. Ensayos de corte

Cupón	$\tau_{\max}$ [MPa]	$\gamma_{\max}$ [ $\mu\epsilon$ ]	G [GPa]	$\tau_{0.2}$ [MPa]	$\gamma_{0.2}$ [ $\mu\epsilon$ ]
1T3a	49.8	678726	3.01	34.1	13620
2T3a	53.6	28582	4.12	42.2	12535
2L3a	75.4	982410	4.19	43.8	12537
4S3a	209	26000	9.73	164	18922
P525	198	34066	7.42	139	20785
P526	199	37709	7.83	109	16400
P527	240	24871	10.3	*	*
P530	191	27030	7.83	155	22273
P531	199	32524	7.32	163	24149
P535	73.9	970438	4.61	42.5	11145
P536	55.3	22966	5.1	48.5	11784
P537	82.5	316198	3.9	42.4	13046
P538	64.2	43639	3.88	40.6	12408
P539	79.4	412450	4.45	44.2	11862
P540	52.3	25374	4.54	38.7	10630

Tabla IV. Ensayos de corte interlaminar

Cupón	F sbs [MPa]	Cupón	F sbs [MPa]
2L3a	51.7	P531	26.9
2T3a	13.9	P535	63.1
1T3a	16.7	P536	12.8
4S3a	30.9	P537	53.6
P525	43.4	P538	15.7
P526	32.6	P539	54.5
P527	37.4	P540	14.1
P530	26.1		

### Resultados de ensayos de fatiga en laboratorio

En la Figura 8 se muestra una curva tipo S-N ( $\sigma_{\max}$ : tensión máxima; Nf: número de ciclos a la rotura) para el caso de material compuesto constituido por dos capas de EBX-602 (fibras a +/-45°) y dos capas de ELPB-567 (fibras unidireccionales con algunas hebras de fibras a 90°) intercaladas. La relación de cargas corresponde a la situación R = 0.1 (las flechas para los puntos con  $\sigma_{\max} = 150$  MPa indican que las probetas no llegaron a rotura para el número de ciclos representado en la figura).

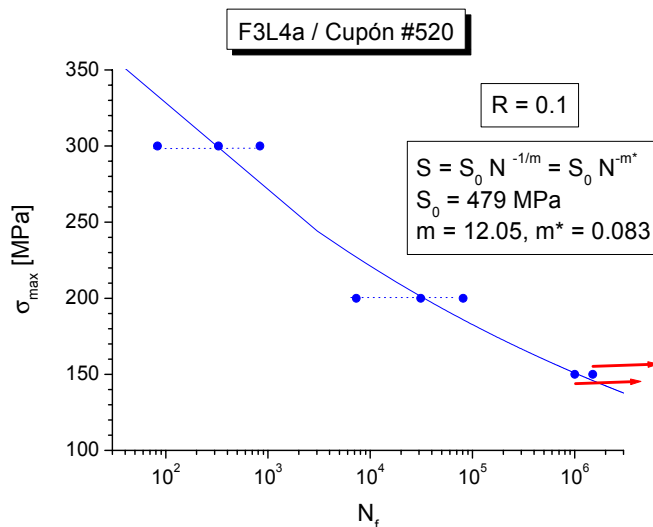


Figura 8: Curva S-N resultante de ensayos de fatiga en probetas.

### DISCUSIÓN

Los resultados de los ensayos estáticos de laboratorio fueron satisfactorios tanto en lo que respecta al adecuado funcionamiento de dispositivos e instrumentación ya que se verificaron que las componentes de flexión en los mismos estaban por debajo de los valores máximos admisibles, así como los valores de resistencias y constantes elásticas dieron valores similares o superiores a los esperados.

El tipo de ajuste representado en la Figura 8 será utilizado para la obtención de los valores de tensión correspondientes a distinto número de ciclos a la rotura para distintos valores de la relación de carga R. De esta manera se podrán construir diagramas de vida a amplitud constante (CAL) que luego podrán ser utilizados para el diseño o verificación de hipótesis de diseño <sup>(8)</sup>.

Es oportuno mencionar aquí algunas de las dificultades asociadas a la obtención de datos confiables para la vida en fatiga de probetas obtenidas a partir de cupones. En primer lugar, y para un cierto valor de R, tenemos el número mínimo de

probetas por condición de ensayo (para cada nivel de tensión en nuestro caso). La experiencia indica que un número cercano a 10 ensayos por condición sería el adecuado. Por otro lado, y sobre todo en probetas de material con elevado contenido de fibras unidireccionales, la interacción de la fatiga con las mordazas resulta en fallas aceleradas, determinadas por la interacción probeta – mordaza, dando como resultado ensayos no-válidos para la caracterización de la vida a la fatiga del material. La construcción de un diagrama CAL para un dado material requiere la consideración como mínimo 3 a 5 valores de R y estas consideraciones dan una idea del volumen de ensayos asociados a la obtención de estos diagramas.

Los resultados de los ensayos estáticos a plena escala verificaron satisfactoriamente lo predicho por el modelo numérico de la pala, en la etapa de proyecto. Dicho modelo utiliza como datos de base las propiedades del material estimadas a partir de los resultados de los ensayos en probetas aquí presentados. En algunos puntos de la pala se encontraron discrepancias del 15% del valor de deflexión esperado cuando es aplicada una carga conocida. En este sentido debe considerarse que el proceso de laminación a mano puede incluir importantes desviaciones de las propiedades del material conformado causadas por: variaciones de la proporción de resina y fibra de vidrio, desalineación de las fibras, temperatura de curado heterogénea, etc.

El ensayo estático de prototipo confirmó que las tensiones y los desplazamientos de las palas se correspondieron con los calculados y, además, soportó los esfuerzos impuestos en el ensayo sin que se produjeran daños.

El ensayo de fatiga a plena escala en sentido *flapwise* fue concluido sin producir fallas funcionales o catastróficas, según norma IEC 61400-23 <sup>(9)</sup>, que imposibiliten la homologación de la pala.

Al momento de presentar el presente trabajo, no fue completamente procesada la gran cantidad de información obtenida durante el ensayo de fatiga de los sensores de deformación.

## CONCLUSIONES

Se determinaron las propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de vidrio empleados en la construcción de palas de aerogeneradores de gran potencia. Los resultados fueron verificados mediante ensayos estáticos y de fatiga de palas en escala real (26,2 m de longitud).

Los resultados de los ensayos estáticos a plena escala verificaron satisfactoriamente lo predicho por el modelo numérico de la pala, en la etapa de proyecto. Dicho modelo utiliza como datos de base las propiedades del material estimadas a partir de los resultados de los ensayos en probetas aquí presentados.

El ensayo de fatiga a plena escala en sentido *flapwise* fue concluido sin producir fallas funcionales o catastróficas, según norma IEC 61400-23.

*AGRADECIMIENTOS: A Iván Korin, Julio Moroni, César Larrainzar, Eduardo Benotti del Laboratorio de Propiedades Mecánicas de UNComa, Hugo Soul, Pablo Riquelme y Raúl Stuke del CAB-CNEA, y al Personal de IMPSA Wind.*

*Nota: la información técnica volcada en el presente trabajo es propiedad de la empresa IMPSA y no puede ser utilizada sin su autorización explícita.*

## REFERENCIAS

1. E. Guiñazú Desarrollos de Grandes Equipamientos, en Taller Ciencia e Ingeniería de Materiales para la Industria. SAM Asociación Argentina de Materiales. Neuquén, junio 2005.
2. ASTM D3039-2000 (2006, Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM Book of Standards Vol 15:03, 2006.
3. ASTM D3410-2003, Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading. ASTM Book of Standards Vol 15:03, 2006.
4. ASTM D7078-2005, Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method, ASTM Book of Standards Vol 15:03, 2006.
5. ASTM D2344-2000 (2006), Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates, ASTM Book of Standards Vol 15:03, 2006.
6. ASTM 3479 (2002), Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM Book of Standards Vol 15:03, 2006.
7. Feebary G. and Musial W., *Determining Equivalent Damage Loading for Full-Scale Wind Turbine Blade Fatigue Test*. 19º Simposio de energía eólica de ASME, Enero de 2000, Reno, Nevada.
8. Standard IEC TS 61400-1, Wind Turbine Generators Systems – Part 1: . IEC, 2001.
9. Standard IEC TS 61400-23, Wind Turbine Generators Systems- Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades. IEC, 2001.

## MECHANICAL BEHAVIOR OF COMPOSITE MATERIALS FOR APPLICATIONS IN LARGE EOLIC GENERATORS

J.E. Perez Ipiña \*, A.A. Yawny \*\*, A. Buschizazzo \*\*\*, E. Mikkelson\*\*\*

\* U.N. Comahue / CONICET. Buenos Aires 1400. (8300) Neuquén, Argentina.  
pipina@uncoma.edu.ar

\*\* CAB CNEA / CONICET

\*\*\* IMPSA WIND

### ABSTRACT

The mechanical properties of materials made up of main polymer matrix reinforced with glass fibers were determined for its use in the construction of rotor blades of wind generators of large power. The results were verified by means of static and fatigue tests of blades in 1:1 scale (27 m span). The studies included static and fatigue tests of specimens made from coupons of composite material provided by the company IMPSA, manufacturer of the eolic generators. In the first case the resistance properties were determined in the different variants of orientations and combinations of litters, including:

- a) Modules of Elasticity E1 and E2 in tensile and compression,
- b) Shear Modules G12, G13, G23,
- c) Tensile and compression strengths in the different orientations,
- d) Resistances to the intralaminar shear,
- e) Resistances to the interlaminar shear.

The dynamic tests included tests of fatigue for different relationships of maximum to minimum load ratio (R) in order to elaborate Diagrams of Constant Amplitude Life (LIME) that then can be used in strategies of evaluation of damage in the project. There were carried out static tests and of fatigue ( $10^5$  cycles) in scale 1-1 blade, and loads, displacements and deformations of the blades were measured.

key words: composite materials, wind generators, mechanical properties.