

Estudio de la secuencia de fabricación para obtener propiedades óptimas en composites de tejidos híbridos kevlar-carbono

Influence of the stack orientation and sequence of hybrid kevlar-carbon fabric for properties optimization



Jorge Ayllón-Pérez¹, Juana Coello-Sobrino^{1,2}, Alberto Martínez-Martínez¹, Valentín-Miguel Eguía^{1,2}

¹ UCLM. Instituto de Desarrollo Regional. Avda. España, s/n - 02006 Albacete.

² UCLM. Escuela de Ingenieros Industriales de Albacete. Avda. España, s/n - 02006 Albacete.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7821> | Recibido: 23/09/2015 • Aceptado: 17/12/2015

ABSTRACT

Hybrid reinforced composites present a wide range of mechanical properties that it cannot be obtained with an only type of reinforcement. Thus, that kind of materials has recently aroused great interest for industrial applications. Particularly, Kevlar-carbon plies are strongly appreciated in nautical applications where resin degradation plays a critical role. In this work, different hybrid Kevlar-carbon vinyl ester resin laminates were carried out varying the sequence and the orientation Kevlar-carbon plies. With these plies and by using different cure conditions, composites were obtained what allowed us to optimize thermic and mechanical properties of the parts obtained. Maximum values of the mechanical properties were obtained for all types of laminates after a cured cycle at room temperatures and post-cured treatment at 100°C during 3 hours room temperature. Likewise, it has been proved that the configuration of the laminates according to different orders of the involved layers influences greatly those properties.

• **Keywords:** Composites, Kevlar-Carbon, laminates, vinyl ester.

RESUMEN

Los materiales compuestos híbridos presentan un amplio rango de propiedades mecánicas que no pueden ser obtenidas con un solo tipo de fibra, por lo que han despertado un gran interés en aplicaciones industriales. Concretamente los laminados Kevlar-carbono presentan un gran interés en aplicaciones náuticas, donde la degradación de la resina muestra un papel importante. En este trabajo se han fabricado distintos tipos de laminados híbridos Kevlar-carbono con resina vinilester de elevada resistencia a la corrosión salina, variando la secuencia y orientación de las capas de tejido kevlar-carbono. Sobre los laminados fabricados se han llevado a cabo diferentes ciclos de curado, que han permitido optimizar las características térmicas y mecánicas de cada uno de estos composites laminados. Los resultados demuestran que las propiedades mecánicas son máximas tras un ciclo de curado de 24 horas a temperatura ambiente y postcurado a 100°C durante 3 horas en todos los laminados. Asimismo se ha comprobado que la ordenación de las capas presenta una gran influencia sobre las propiedades mecánicas de los laminados.

Palabras clave: Composites, Kevlar-Carbon, laminados, vinil éster.

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos laminados ofrecen una solución alternativa al diseño de materiales convencionales en términos de resistencia específica y rigidez, ya que permiten reducir en gran medida el peso de los materiales.

Otra gran ventaja de estos materiales es la gran flexibilidad que presentan en el diseño, ya que sus propiedades físicas, mecánicas y resistencia química pueden diseñarse seleccionando la matriz, fibra, orientación de la fibra, y aditivos que mejoran la unión de la interfase fibra matriz. Una variable adicional que permite ajustar las propiedades a una determinada aplicación es la hibridación, considerándose un material compuesto híbrido como aquél que contiene dos o más tipos de fibra en una misma matriz. Estos materiales ofrecen un amplio rango de propiedades mecánicas que no pueden ser obtenidas con un solo tipo de fibra, por lo que han despertado un gran interés en aplicaciones industriales.

Son numerosos los trabajos publicados sobre *composites* híbridos, con combinaciones de fibras de refuerzo, tales como carbono/kevlar, carbono/vidrio, vidrio/Kevlar, etc. La mayoría de ellos están dirigidos al estudio de materiales compuestos reforzados con capas de fibras unidireccionales de cada uno de los materiales. Chensong y Ian [1] optimizan el diseño de diferentes composites híbridos fabricados con láminas de fibra de vidrio y carbono unidireccionales, comprobando que el comportamiento a flexión es óptimo para un volumen de fibra de vidrio de 63,29%, y 47,8% de fibra de carbono. Reis [2], demuestra que los composites con refuerzo unidireccional ofrecen alta resistencia y rigidez en las direcciones predeterminadas, pero la resistencia al impacto se ve disminuida en gran medida principalmente por la delaminación. Kim [3] mediante ensayos de impacto a baja velocidad, estudia la capacidad de deformación y modo de fractura de composites de fibra de polietileno y fibra de vidrio tratada superficialmente con silanos en una matriz de vinilester, comprobando que dicho tratamiento mejora la adhesión fibra matriz retrasando por tanto la fractura de estos materiales híbridos por delaminación. A su vez, demuestran que la secuencia de las capas influye de forma muy significativa sobre la energía de impacto.

Imielinska [4] estudia la resistencia al impacto de composites híbridos fabricados con resina epoxi y láminas de fibra de vidrio y aramida, sometidos a distintas condiciones de humedad. Los resultados demuestran que en estos materiales el principal mecanismo de fallo es la débil unión interfacial producida entre la fibra de aramida y la resina epoxi. En este sentido, Wang y col [5], realizan varios estudios sobre composites híbridos Kevlar-Carbono

3D epoxi. Estos autores demuestran que al aplicar un tratamiento superficial de oxidación anódica a la superficie de las fibras se mejora de forma significativa la unión interfacial fibra matriz, obteniéndose de este modo un importante incremento de la resistencia a flexión del composite híbrido. Posteriormente, Wang y col [6], llevan a cabo un estudio sobre las propiedades mecánicas y físicas de composites híbridos con el mismo tejido 3D Kevlar-carbono y resina bismaleamida, consiguiendo mejorar la resistencia a flexión de este composite con respecto al de matriz epoxi. Estos autores, comprueban que los tejidos híbridos presentan mejor comportamiento frente al impacto que las fibras unidireccionales. Sin embargo, las aplicaciones de estos tejidos están principalmente restringidas al desarrollo aeroespacial y a aplicaciones biomédicas debido al elevado coste de la producción de refuerzos 3-D [7].

Los tejidos híbridos 2-D presentan buenas propiedades mecánicas, siendo su coste de producción mucho más reducido que el de los tejidos 3D. A su vez, se reduce la mano de obra en el proceso de fabricación del material híbrido, con respecto a la fabricación de materiales a partir de tejidos de diferentes fibras. Este hecho hace que estos tejidos, cada vez sean más demandados, principalmente en la industria naval en la que se requiere elevada resistencia y buen comportamiento frente al impacto. Estas características pueden optimizarse mediante la utilización de composites híbridos Kevlar-Carbono con buena resistencia a la corrosión salina.

La resina vinilester presenta una elevada resistencia, durabilidad, estabilidad térmica, y resistencia a la corrosión. Marouani [8] lleva a cabo un estudio comparativo del comportamiento de composites carbono-epoxi y carbono-vinilester en distintas condiciones de humedad, comprobando que la resina vinilester presenta mejor comportamiento frente a la degradación en estas condiciones que la resina epoxi.

Banna [9] estudia la degradación en medio ácido de la resina viniléster con fibra de vidrio, demostrando que la resistencia química de esta resina es muy superior a la epoxi y poliéster.

En este trabajo, se ha llevado a cabo el estudio de composites híbridos Kevlar-carbono con resina viniléster, fabricados mediante Lay-up. Se han fabricado tres tipos de laminados variando la secuencia de las capas de tejido Kevlar-carbono y el contenido de carbono final en el composite. El objetivo es evaluar el comportamiento del compuesto, desde el punto de vista estructural, en función de las diferentes secuencias de capas posibles. Por tanto, queda fuera del alcance del trabajo aspectos más específicos como la resistencia a impacto biaxial [10, 11] o la evaluación de la unión fibra matriz mediante diversos ensayos como el de flexión de viga corta (short-beam test), empleados para evaluar la resistencia in-

terlaminar (interlaminar shear strenght, ILSS) [12]. De esta manera, el comportamiento del material en función de la secuencia de capas se ha evaluado a partir de ensayos de flexión, dureza y resiliencia.

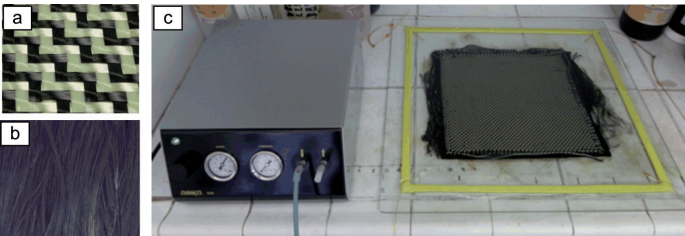


Figura 1: Refuerzos utilizados. a) Tejido híbrido Kevlar-carbono. b) Tejido de fibra de carbono unidireccional, c) Detalle del sistema de curado a temperatura ambiente

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. MATERIALES

La matriz utilizada ha sido una resina vinilester comercial, basada en epoxi bisfenol A, CRYSTIC VE676T, fabricada por Scott Bader con octoato de cobalto como catalizador y peróxido de metil-etil-cetona como acelerador de curado. El catalizador se ha añadido en una proporción de un 2%, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

El refuerzo utilizado para la fabricación de los distintos laminados ha sido Tejido híbrido kevlar/carbono, sarga 2x2 de 215 g/mm², formado por fibra de aramida de 200 Tex y carbono de 3K. También se ha utilizado Tejido de carbono unidireccional de 50K y 600 g/mm². La Figura 1a y 1b muestra el detalle de los refuerzos utilizados.

2.2. FABRICACIÓN DE LOS LAMINADOS

Se han fabricado tres tipos de laminados mediante la técnica de moldeo por contacto a mano o lay-up en paneles de 300 x 300 mm² con un espesor aproximado de 1,5-1,7 mm, variando la secuencia y la orientación de las distintas capas de refuerzo utilizadas. La disposición de las capas utilizadas para cada uno de los laminados aparece en la Tabla 1.

El proceso de polimerización y curado del material compuesto se llevó a cabo a temperatura ambiente durante 24 horas, siendo necesario realizar el curado durante las 3 primeras horas en condiciones de vacío (Figura 1c). Tras el proceso de curado a temperatura ambiente se realizó un tratamiento de postcurado a 60,

Laminados	Nº capas	Tejido	Ángulo capa	Densidad r (g/cm³)	V _{refuerzo} (%)	V _{matriz} (%)	V _{huecos} (%)
TKCs [0/+45]s	1	K-C ^a	0°	1,284	36,19	60,99	2.82
	2	K-C	+45°				
	3	K-C	+45°				
	4	K-C	0°				
TKC [0, 45, 0, 45]	1	K-C	0°	1,2952	36.89	59,16	3.95
	2	K-C	+45°				
	3	K-C	0°				
	4	K-C	+45°				
TKC/CU [0, 0, 0]	1	K-C	0°	1,3196	48.62	44,73	6.65
	2	CU ^b	0°				
	3	K-C	0°				
^a Tejido tipo Sarga 2x2 Kevlar-Carbono.							
^b Tejido de fibra de Carbono Unidireccional							

Tabla 1: Distribución de capas de tejido y características físicas de los laminados fabricadosambiente

80 y 100°C, con el fin de determinar la temperatura óptima de postcurado.

Para caracterizar cada uno de los laminados fabricados, inicialmente se determinó la densidad del composite, ρ_c , mediante el método gravimétrico de inmersión, descrito en la norma UNE-EN ISO 1183-1. Este método está basado en la diferencia de peso aparente de las diferentes muestras estudiadas en aire y agua y es función de la densidad del líquido de inmersión a 23 °C, ρ_L y de las masas aparentes de la muestra en aire y líquido de inmersión, m_{CA} y m_{CL} , respectivamente, Ecuación (1).

$$\rho_c = \frac{m_{CA} \rho_L}{m_{CA} - m_{CL}} \quad (1)$$

Mediante la Ecuación (2), se ha determinado el volumen de huecos obtenido en cada uno de los laminados a partir de la densidad teórica del composite, ρ_{ct} y la densidad determinada experimentalmente, ρ_c .

$$V_h = \left(\frac{\rho_{ct} - \rho_c}{\rho_{ct}} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

El ensayo se realizó sobre 5 muestras similares de cada uno de los laminados fabricados, determinándose la densidad media para cada uno de ellas.

2.3. ANÁLISIS TÉRMICO

Mediante la técnica de análisis termogravimétrico TG/DTA se ha estudiado la estabilidad térmica y degradación de los composites fabricados tanto en atmósfera inerte como oxidante. Los ensayos se efectuaron desde temperatura ambiente hasta 1000°C en un equipo TG-DTA EXSTAR 6000 de *Seiko Instruments Inc.* con una velocidad de calentamiento de 10°C/min.

La temperatura de transición vítrea y el grado de curado del material se determinaron mediante ensayos de calorimetría diferencial de barrido, DSC, realizados a la misma velocidad de calentamiento.

2.4. ENSAYOS DE FLEXIÓN

Los ensayos de flexión bajo carga en tres puntos se realizaron de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 14125, utilizándose una máquina de flexión Zwick, modelo Roell Z0.5 con una célula de carga de 500 N. La definición de la velocidad de ensayo fue de 1 mm/min hasta la determinación del módulo de flexión. Posteriormente, el ensayo se continuó con una velocidad de 5 mm/min. Estas condiciones son representativas de la evaluación de flexión en condiciones estáticas de aplicación de las cargas y se corresponden con las condiciones en las que los fabricantes definen las propiedades de los materiales suministrados.

De acuerdo al tipo de refuerzo la norma define los laminados TKCs y TKC, como tipo II, y el laminado TKC/CU como Tipo IV, siendo la geometría del ensayo para cada uno de ellos la definida en la norma.

El ensayo se ha realizado sobre cinco muestras de cada uno de los laminados fabricados de 80 mm de longitud, 15 mm de anchura y el espesor del laminado. Para cada muestra se ha determinado la tensión de flexión, σ_f , el módulo de flexión, E_f , y la deformación unitaria asociada, ϵ_f , de acuerdo a las ecuaciones (3 a 5) en las que F_{max} es la máxima fuerza soportada antes de la fractura, L es la longitud entre apoyos, b y h corresponden respectivamente a la anchura y espesor de los laminados, respectivamente. D es

el máximo desplazamiento en el ensayo antes de la rotura y la pendiente en la zona lineal del registro fuerza-desplazamiento.

$$\sigma_f = \frac{3F_{max}L}{2bh^2} \quad (3)$$

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \left(\frac{\Delta F}{\Delta S} \right) \quad (4)$$

$$\epsilon_f = \frac{6Dh}{L^2} \quad (5)$$

2.5. ENSAYO DE IMPACTO Y ENSAYO DE DUREZA

Los ensayos de impacto se han realizado de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 179-1, utilizando un péndulo tipo Charpy, J. Bot, con una energía nominal de 10 J. Las dimensiones de las probetas son de 10 mm de anchura x 80 mm de longitud, siendo el espesor el determinado por el proceso de fabricación para cada laminado. Para la realización del ensayo las probetas sin entalla se han colocado de acuerdo a la posición definida en la norma como f-n, que indica que el impacto se aplica en la cara ancha de la probeta y es perpendicular al plano del refuerzo.

Para determinar la dureza del material compuesto se ha utilizado la norma UNE 2039-2:1987. Se ha utilizado la escala Rockwell M, por lo que la carga aplicada es de 980.7 N y el penetrador es una bola de acero de diámetro 6.35 mm.

3. RESULTADOS

Tras la realización de ensayos previos se comprobó que el porcentaje de resina vinilester mínimo para conseguir una completa mojabilidad del tejido Kevlar-Carbono estudiado, y por tanto unas características óptimas del material fabricado era de aproximadamente un 60%, siendo ligeramente inferior para el tejido unidireccional de carbono. Contenidos inferiores dieron lugar a zonas de fibra seca en los laminados y muy bajas propiedades a tracción, por lo que los tres laminados estudiados se fabricaron con dichos porcentajes de fibra y resina.

Los resultados de densidad obtenidos para cada uno de los laminados aparecen reflejados en la Tabla 1, junto con los porcentajes en volumen, V (%), de fibra, resina y volumen de huecos.

Los valores obtenidos para los laminados TKCs y TKC lógicamente son prácticamente los mismos, ya que presentan las mismas capas de refuerzo, pero con distinta ordenación. Las pequeñas diferencias que se producen se deben al proceso de fabricación, ya que al tratarse de un proceso manual, es muy difícil realizar dos laminados exactamente iguales. El laminado TKC/CU presenta una densidad ligeramente superior, debido a su mayor contenido de refuerzo y principalmente mayor contenido de fibra de carbono, de mayor densidad que el Kevlar.

El volumen de huecos determinado mediante la ecuación 2, es mayor cuanto mayor es el contenido de fibra. Estos resultados son comparables a los obtenidos por Guermazi [13], que determina el volumen de huecos para diferentes laminados fabricados mediante Lay-up de epoxi y fibra de carbono.

3.1. ENSAYOS ANÁLISIS TÉRMICO. DSC Y TGA

Los valores de la temperatura de transición vítrea, T_g y el grado de curado para cada uno de los ciclos aparecen en la Tabla 2. Los resultados demuestran que tras un ciclo de curado a temperatura ambiente durante 24 horas y un postcurado de 2 horas a 100 °C la resina está totalmente reticulada, siendo la energía de curado

obtenida tras este proceso prácticamente nula. En estas condiciones el material presenta una T_g de 96,3 °C lo que garantiza la utilización de estos materiales hasta dicha temperatura.

Los resultados de los ensayos termogravimétricos, realizados en atmósfera inerte y oxidante aparecen reflejados en la Tabla 2.

En atmósfera oxidante el material compuesto presenta una estabilidad térmica hasta los 300°C. A partir de esta temperatura comienza la degradación de la resina, que se solapa con la degradación del Kevlar iniciada a 400°C, finalmente la fibra de carbono comienza su degradación a 600°C. Estos resultados son similares a los obtenidos por Eder [14], que estudia la degradación térmica de la resina vinilester con diferentes aditivos. La degradación de la resina y el Kevlar aparecen solapadas en el rango de temperaturas de 400 a 500 °C, por ello mediante esta técnica no se ha podido determinar directamente el porcentaje en peso de Kevlar y resina existente en los distintos laminados.

3.2. ENSAYOS DE FLEXIÓN EN TRES PUNTOS

Con objeto de comprobar la influencia de la temperatura de postcurado sobre el comportamiento a flexión, en el que la matriz presenta una gran influencia, se han realizado ensayos sobre muestras curadas 24 horas a temperatura ambiente y con postcurados a 60 y 100 °C. Los valores de resistencia máxima y módulo de flexión determinados de acuerdo a las ecuaciones (3 a 5) para las diferentes temperaturas de postcurado aparecen representados en la Figura 2a y 2b. En el estudio a flexión del laminado TKC [0/45/0/45], al ser un laminado asimétrico, se ha comprobado la influencia de la colocación de la probeta, designando las muestras como TKC A al laminado [0/45/0/45] y TKC B [45/0/45/0], en función de que la capa de tejido inferior, y por tanto sometida al esfuerzo máximo a tracción, es la orientada a 45° y 0° respectivamente.

Los resultados demuestran que al aumentar la temperatura de postcurado, y con ello el grado de reticulación de la resina, tanto

	Atm. inerte (N ₂)		Atm. aire		Curado	T _g (°C)	x _{Curado} (mJ/mg)
	T _{deg} (inicio)	T _{deg} (fin)	T _{deg} (inicio)	T _{deg} (fin)			
Resina vinilester	300°C	500°C	300°C	450°C	Temp. amb (20°C)	33.6	-25.1298
					Postcurado 60°C 3h	76.5	-4.251
					Postcurado 80°C 3h	94.5	-2.95793
					Postcurado 100°C 3h	96.3	≈ 0
Fibra de Carbono	-	-	600°C	800°C	-	-	-
Fibra de Kevlar	400°C	600°C	400°C	600°C	-	-	-

Tabla 2: Temperaturas de transición vítrea, T_g , y energía de curado, x_{Curado} , para los distintos ciclos de curado de la resina; temperatura de degradación de los refuerzos utilizados y de la resina, T_{deg}

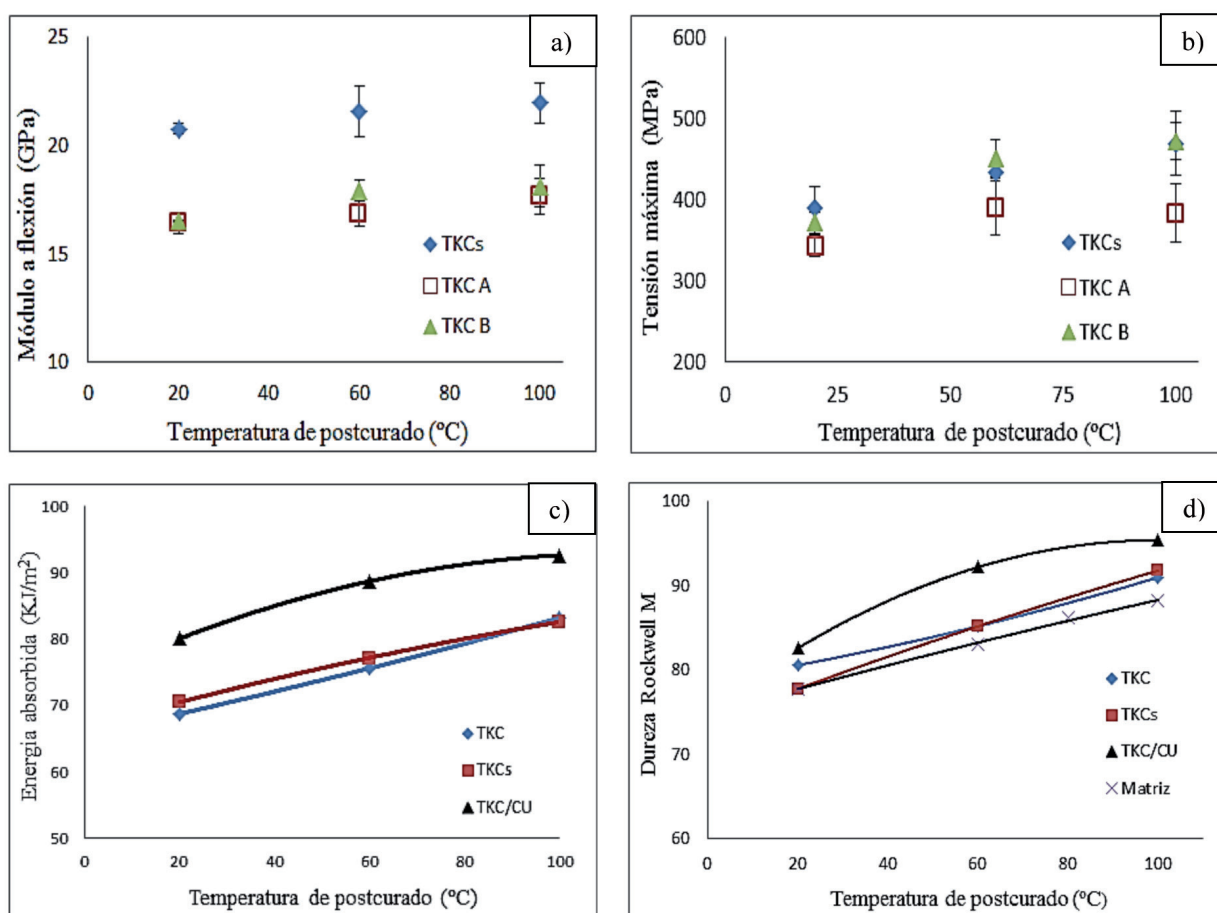


Figura 2: a) Variación del módulo a flexión, b) Variación de la resistencia a flexión, c) Variación de la resiliencia, d) Variación de la dureza, de los distintos laminados con la temperatura de postcurado

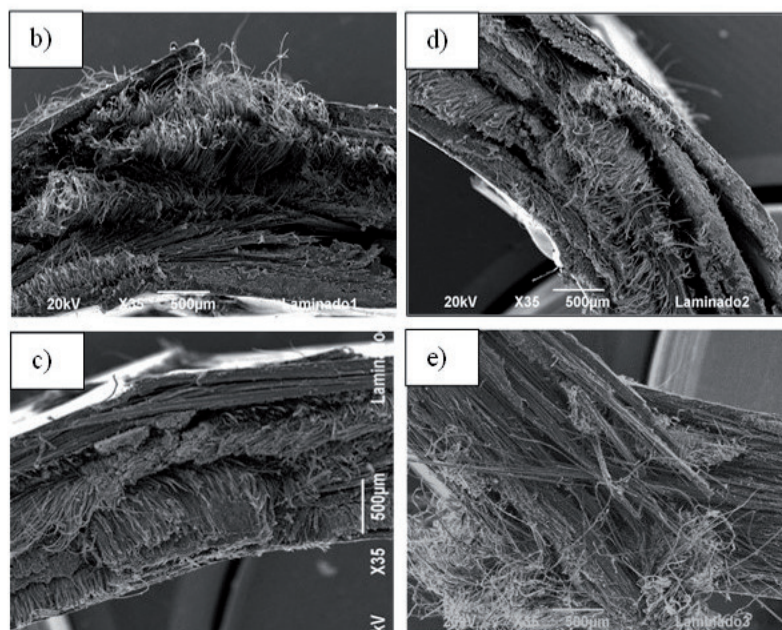
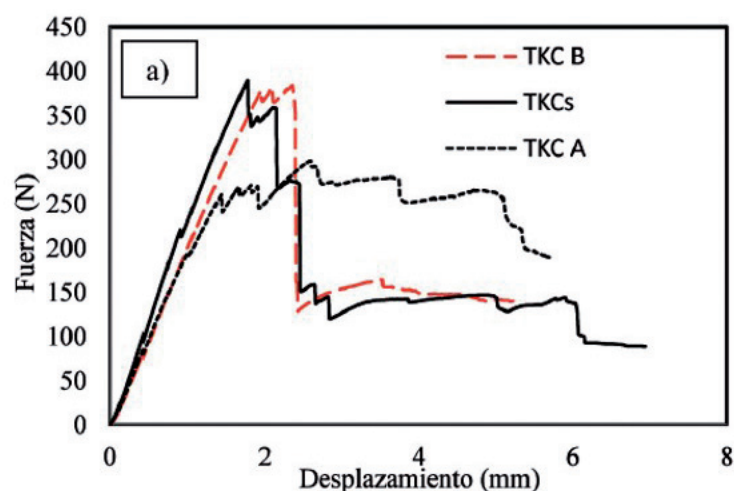


Figura 3. a) Curvas fuerza-deformación. b-d) detalle de las micrografías SEM de la superficie de fractura de diferentes laminados ensayados a flexión. b) Laminado TKCs, c) laminado TKC-A d) laminado TKC-B, e) laminado TKC/CU

el módulo como la resistencia a flexión se incrementan, siendo mucho más significativo el incremento producido en la tensión máxima. Estos resultados corroboran la influencia del grado de curado de la resina, principalmente cuando ésta es sometida a esfuerzos de compresión. En el caso del módulo la influencia es muy pequeña debido a que la rigidez del material compuesto viene dada principalmente por el refuerzo.

En la Figura 3a aparecen las curvas fuerza-desplazamiento de los laminados curados a 100 °C. En ellas se observa que los lami-

nados TKCs y TKC B muestran un comportamiento muy similar, prácticamente lineal hasta la fractura, característico de un material frágil, lo que nos indica que en ambos casos se produce la fractura de la fibra de carbono sometida a tracción. A su vez, se observa un tramo final en forma de zigzag que indica la existencia de diferentes mecanismos de fallo antes de la fractura total del material.

El laminado TKC A presenta mayor deformación y una curva característica de un material más dúctil, siendo la tensión de rotura inferior a la de los dos laminados anteriores. En este laminado, la capa de tejido sometida a tracción está formada por fibras orientadas a +45/45°, y por tanto el componente principal que soporta dichos esfuerzos es la interfase fibra-matriz, cuya resistencia a tracción es muy inferior a la de las fibras. La interfase se va deteriorando de forma progresiva durante el ensayo, lo que queda reflejado en la gráfica en la que se observa que la fuerza disminuye progresivamente hasta la fractura, produciéndose ésta a mayor deformación.

A su vez, se observa que en ambos casos los valores son inferiores a los obtenidos en el laminado TKCs donde las capas externas, sometidas a tracción y compresión son las orientadas a 0°, y por tanto éstas soportan los máximos esfuerzos, produciéndose la fractura a mayor carga.

El estudio morfológico de la superficie de fractura realizado mediante análisis microestructural SEM avala los resultados anteriores. Si se compara el modo de fractura producida en los distintos laminados ensayados, Figura 3b-e, se observa que los laminados TKCs y TKC/CU (Figura 3b y e) presentan una fractura frágil. En ambos casos, la fractura se inicia con un agrietamiento de la resina en la zona de compresión, a continuación se produce una delaminación de las distintas capas como consecuencia del fallo de la interfase y de forma inmediata se produce la fractura frágil de las fibras de carbono en la zona de tracción. De igual modo, el laminado TKC A, Figura 3c, presenta también una fractura frágil, producida en la cara sometida a tracción de las fibras orientadas a 0°. Sin embargo, las muestras TKC B, presentan una fractura dúctil, iniciada por la fractura de las fibras en la superficie de compresión, seguida de una delaminación entre las distintas capas, y fractura final por deterioro de la interfase, Figura 3d.

Estos modos de deformación, justifican los descensos de fuerza

observados en la curvas de fuerza desplazamiento, comentados previamente, lo que demuestra la gran importancia que presenta la interfase fibra-matriz, así como la disposición de las diferentes capas en este tipo de laminados. Reis [2], demuestra que en materiales laminados con resina epoxi los modos de deformación son similares.

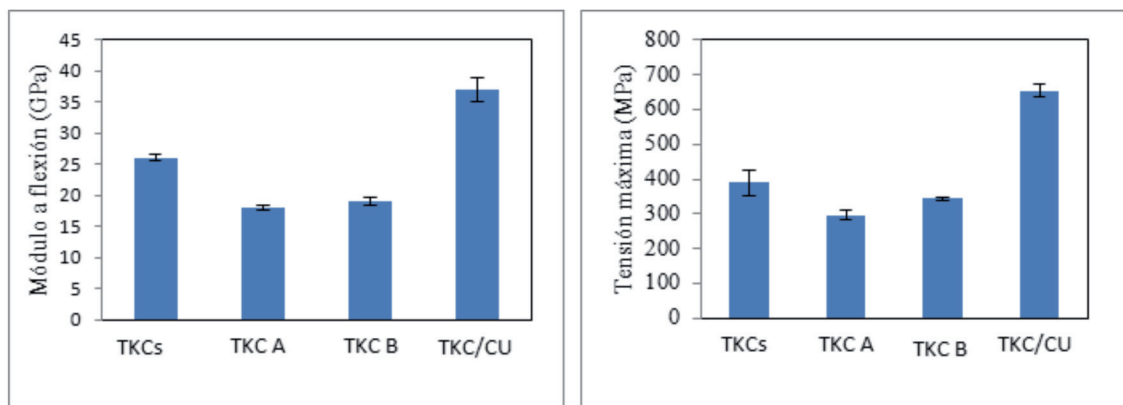


Figura 4: Módulo a flexión y tensión máxima para las cuatro configuraciones de laminados (separación entre apoyos 64 mm).

Estos resultados demuestran la gran importancia que presenta la secuencia y orientación de las capas en un laminado en relación a la direccionalidad de los esfuerzos en servicio.

Para comparar los tres tipos de laminados se realizaron ensayos fuera de norma para los laminados TKC y TKCs postcurados a 100°C, en los que se utilizó una separación entre apoyos de 64 mm. Los resultados aparecen representados en la Figura 4.

Como puede observarse en la Figura 4 el laminado TKC/CU en la dirección ensayada presenta mayor módulo elástico y tensión máxima, esto es debido lógicamente a que el refuerzo unidireccional de fibra de carbono presenta mayor rigidez y mayor tensión máxima que las dos láminas de tejido Kevlar-Carbono a las que sustituye.

3.3. RESISTENCIA AL IMPACTO Y DUREZA

En la Figura 2c aparecen representados los valores de resiliencia de cada uno de los laminados en función de la temperatura de postcurado, obtenidos mediante el ensayo Charpy.

Si se comparan los laminados TKCs y TKC, se observa que la secuencia de colocación de las distintas capas de refuerzo no presenta influencia sobre la energía absorbida en la fractura. Sin embargo, existen importantes diferencias en el modo de fractura producida, ya que al igual que ocurría en los ensayos de flexión, cuando las fibras orientadas a $\pm 45^\circ$ se encuentran en la cara sometida a esfuerzos de tracción se produce mayor deformación, en este caso los esfuerzos son soportados por la interfase. En este caso la rotura producida es parcial ya que el Kevlar evita la fractura total y frágil característica de la fibra de carbono.

El laminado TKC/CU, presenta una resistencia al impacto un 18% superior a la obtenida en los laminados TKCs y TKC, en los que las dos capas de tejido Kevlar-carbono interiores son sustituidas por una de carbono. Estos resultados demuestran que el refuerzo central de fibra de carbono, presenta mejor comportamiento frente a la energía absorbida que el tejido Kevlar-carbono. Sin embargo, al estudiar la fractura producida en este laminado se observa una fractura totalmente frágil frente a la fractura parcial comentada anteriormente en los laminados con menor contenido en carbono.

Los resultados de dureza obtenidos sobre las muestras curadas a temperatura ambiente y postcuradas a 60 y 100 °C, aparecen representados en la Figura 2d, en la que se observa que a 100 °C se alcanzan los valores máximos de dureza, como consecuencia de que las muestras están totalmente reticuladas. En cuanto a los diferentes laminados, se observa que en todos los casos los valores de dureza son del mismo orden que los de la matriz, lo que demuestra la importancia de la matriz ante esfuerzos de compresión.

4. CONCLUSIONES

Se ha determinado que tras un ciclo de curado a temperatura ambiente durante 24 horas y un postcurado a 100 °C la resina vinilester alcanza sus características óptimas, presentando una T_g de 96,3°C. En estas condiciones de curado los diferentes laminados fabricados presentan valores máximos de dureza, tensión a flexión y resiliencia.

La secuencia de apilamiento de las capas de tejido Kevlar-Carbono influye de forma significativa sobre las propiedades a flexión, siendo máximas en el caso del laminado TKCs, que presenta una tensión máxima a flexión un 20% superior al laminado TKC A. Sin embargo, en el laminado TKC A la deformación producida hasta la fractura es superior a la del resto de laminados, lo que hace que esta configuración sea seleccionada para aplicaciones en las que se requiere mayor deformación, y menor resistencia.

El refuerzo unidireccional de fibra de carbono, utilizado en el laminado TKC/CU incrementa el modulo y la tensión máxima a flexión un 30% y 40%, respectivamente con respecto al laminado TKCs. Siendo el incremento de los valores de resiliencia menor, de un 18%, debido a la elevada fragilidad de la fibra de carbono.

En los ensayos de impacto, la fractura producida en el laminado TKC/CU es totalmente frágil. En el resto de laminados se produce una fractura parcial, debido a la ductilidad del Kevlar, evitándose de este modo las fracturas catastróficas producidas sobre materiales frágiles.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Chensong D, Ian JD. "Optimal design for the flexural behaviour of glass and carbon fibre reinforced polymer hybrid composites". *Mater. Des.* 2012. Vol.37. p.450-457. (DOI: [10.1016/j.matdes.2012.01.021](http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.021))
- [2] Reis PNB, Ferreira JAM, Antunes FV, et al. "Flexural behaviour of hybrid laminated composites". *Compos. Pt. A-Appl. Sci. Manuf.* 2007. Vol.38-6. p.1612-1620. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.11.010>)
- [3] Kim JK, Man-Lung S, Min-Seok S, et al. "Effect of hybrid layers with different silane coupling agents on impact response of glass fabric reinforced vinylester matrix composites". *Polymer.* 2001. Vol.42-17. p.7455-7460. (DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00246-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00246-4))
- [4] Krystyna I, Laurent G. "The effect of water immersion ageing on low-velocity impact behaviour of woven aramid-glass fibre/epoxy composites". *Compos. Sci. Technol.* 2004. Vol.64(13-14). p.2271-2278. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.03.002>)
- [5] Wan YZ, Lian JJ, Huang Y, et al. "Two-step surface treatment of 3D braided carbon/Kevlar hybrid fabric and influence on mechanical performance of its composites". *Mater. Sci. Eng. A.* 2006. Vol.429(1-2). p.304-311. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.05.084>)
- [6] Wan YZ, Wang YL, He F, et al. "Mechanical performance of hybrid bismaleimide composites reinforced with three-dimensional braided carbon and Kevlar fabrics". *Compos. Pt. A-Appl. Sci. Manuf.* 2007. Vol.38-2. p.495-504. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.02.021>)
- [7] Wan YZ, Wang YL, Huang Y, et al. "Moisture absorption in a three-dimensional braided carbon/Kevlar/epoxy hybrid composite for orthopaedic usage and its influence on mechanical performance". *Compos. Pt. A-Appl. Sci. Manuf.* 2006. Vol.37-9. p.1480-1484. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.09.009>)
- [8] Marouani S, Curtil L, Hamelin P. "Ageing of carbon/epoxy and carbon/vinylester composites used in the reinforcement and/or the repair of civil engineering structures". *Compos. Pt. B-Eng.* 2012. Vol.43-4. p.2020-2030. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.001>)
- [9] Banna MH, Shirokoff J, Molgaard J. "Effects of two aqueous acidic solutions on polyester and bisphenol A epoxy vinyl ester resins". *Mater. Sci. Eng. A.* 2011. Vol.528. p.2137-2142. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.049>)
- [10] Jeremy Gustin, Aaran Joneson, Mohammad Mahinfalah, et al. "Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites". *Composite Structures.* 2005. Vol.69. p.396-406. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.07.020>)
- [11] P.N.B. Reis, J.A.M. Ferreira, P. Santos, et al. "Impact response of Kevlar composites with filled epoxy matrix". *Composite Structures.* 2012. Vol.94. p.3520-3528. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.05.025>)
- [12] T. Duvis, C. D. Papaspyrides, T. Skourlis. "Polyamide coating on carbon fibres and potential application in carbon/kevlar/epoxy hybrid composites". *Composites Science and Technology.* 1993. Vol.48. p.127-133. (DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0266-3538\(93\)90128-4](http://dx.doi.org/10.1016/0266-3538(93)90128-4))
- [13] Guermazi N, Haddar N, Elleuch K, et al. "Investigations on the fabrication and the characterization of glass/epoxy, carbon/epoxy and hybrid composites used in the reinforcement and the repair of aeronautic structures". *Mater. Des.* 2014. Vol.56. p.714-724. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.043>)
- [14] Éder JS, Vagner RB. "Luffa cylindrica fibres/vinylester matrix composites: Effects of 1,2,4,5-benzenetetracarboxylic dianhydride surface modification of the fibres and aluminum hydroxide addition on the properties of the composites". *Compos. Sci. Technol.* 2013. Vol.82. p.76-83. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.04.012>)