

## MATERIALES COMPUESTOS AVANZADOS UTILIZADOS PARA EL BLINDAJE LIGERO DE VEHÍCULOS

### ADVANCED COMPOSITES USED FOR LIGHT ARMOUR OF VEHICLES

Oscar Arteaga<sup>1</sup>, Mauricio Cruz<sup>2</sup>, Euro Mena<sup>3</sup>, Danilo Zambrano<sup>4</sup>, William Bonilla<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Universidad de Fuerzas Armadas ESPE - Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Quijano y Ordoñez y Marques de Maenza s/n.

e-mail: <sup>1</sup>obarteaga@espe.edu.ec, <sup>2</sup>mjcruz@espe.edu.ec, <sup>3</sup>ermenam@espe.edu.ec, <sup>4</sup>vdzambrano@espe.edu.ec, <sup>5</sup>wmbonilla@espe.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 9 (15)

#### RESUMEN

En el presente artículo se analizan los materiales compuesto de matriz polimérica reforzada con fibra utilizados en blindajes ligeros tanto flexibles como rígidos, sus mecanismos de absorción de energía y su resistencia al impacto balístico.

El artículo destaca las tecnologías del vidrio S, aramida, HMWPE, PBO y PIPD; fibras de alto rendimiento actuales y futuras utilizadas en aplicaciones para la protección balística corporal y de vehículos, se describe y comparan sus propiedades, sus aplicaciones, ventajas y limitaciones, así como de la influencia de factores ambientales extremos. Asimismo, se describe y compara las propiedades de las resinas utilizadas para blindajes ligeros de material compuesto.

#### Palabras clave

*Materiales compuestos, fibras de alto rendimiento, blindaje, protección balística.*

#### ABSTRACT

This paper analyzes the fiber-reinforced polymer matrix composites used in both flexible and rigid light armors, their energy absorption mechanisms, and their resistance to ballistic impacts. Technologies such as S glass, aramid, HMWPE, PBO and PIPD are highlighted fibers. Existing and future high-performance fibers are described in applications for human and vehicle protection against ballistics. Properties, applications, advantages, limitations and the influence of extreme environmental factors are depicted and compared to finally contrast the properties of the resins used for light composite armors.

#### Keywords

*Composite materials, high-performance fibers, armor, ballistic protection.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Se puede afirmar que hasta mediados del siglo XX, los únicos materiales utilizados para la protección balística, eran: el acero, utilizado en blindajes de vehículos militares de combate, barcos de guerra y cascos para personas; y el hormigón armado, empleado como protección de instalaciones militares fijas, edificios, búnkeres, etc. Sin embargo, en las últimas décadas, los avances en el desarrollo de armas y municiones de gran capacidad de penetración, así como la necesidad de que los sistemas militares modernos sean cada vez más rápidos, más ágiles y más móviles, han supuesto la imposibilidad de los materiales tradicionales de protección balística, afrontar con éxito estas nuevas amenazas y requerimientos [1].

Como consecuencia de lo anterior se ha producido un aumento en la demanda de nuevos materiales para la protección tanto de personas como de vehículos frente al impacto de proyectiles y explosiones, y se ha dado lugar al concepto moderno de blindaje compuesto, el mismo que incluye distintas capas de diferentes materiales con propiedades específicas que buscan optimizar pesos y costos. Es así que, materiales compuestos con fibras de alto rendimiento se han desarrollado para la protección tanto de personas como de vehículos. Por ejemplo, tejidos de fibras son utilizados tanto como blindaje blando para la protección de personas o como refuerzos en materiales compuestos de matriz polimérica rígida para el blindaje liviano de vehículos 4x4 [1]-[2].

Los materiales compuestos pueden utilizarse para la producción de blindajes de dos maneras distintas:

- Como blindaje principal en aplicaciones en las que no se requiere una protección muy elevada pero el peso

del blindaje es sumamente importante. Tal es el caso de chalecos ligeros y cascos que protegen impacto de munición tipo bala o fragmentos.

Como placa posterior de un blindaje capaz de proteger personas y vehículos frente a impactos de gran poder de penetración. En este caso el material compuesto actúa bien sea como sistema de retención de fragmentos o bien sea como liner para retener metralla procedente de la perforación del blindaje principal en el caso de blindajes de acero o de otros materiales de alta dureza.

La resistencia de la protección al impacto balístico de los materiales compuestos utilizados en aplicaciones de blindaje se evalúa normalmente en función de dos parámetros básicos [2]:

- (a) un nivel crítico de velocidad del proyectil o de energía cinética del proyectil (generalmente conocido como el "límite balístico") por debajo del cual ninguna perforación completa de la armadura se lleva a cabo, y
- (b) un grado en el que la resistencia del material al impacto balístico se ve comprometida en los sistemas de blindaje que están parcialmente penetrados o cuya superficie de impacto está dañado por el proyectil.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Mecanismos de absorción de energía de los composites

La cantidad de energía absorbida por las fibras depende en gran medida de su deformación a la rotura, como se muestra en la figura 1a. [2]. Por lo tanto, se requiere una estera de fibra con alta resistencia y alto alargamiento a la rotura para absorber la energía a través de la deformación plástica y el estiramiento de las fibras.

La deformación en una fibra es igual a la velocidad de impacto dividido para la velocidad sónica de la fibra (Ecuación 1) [3].

$$\epsilon = \frac{V}{c} \quad Ec.1$$

donde,

- δ- deformación
- V- velocidad de impacto
- c- velocidad sónica de la fibra

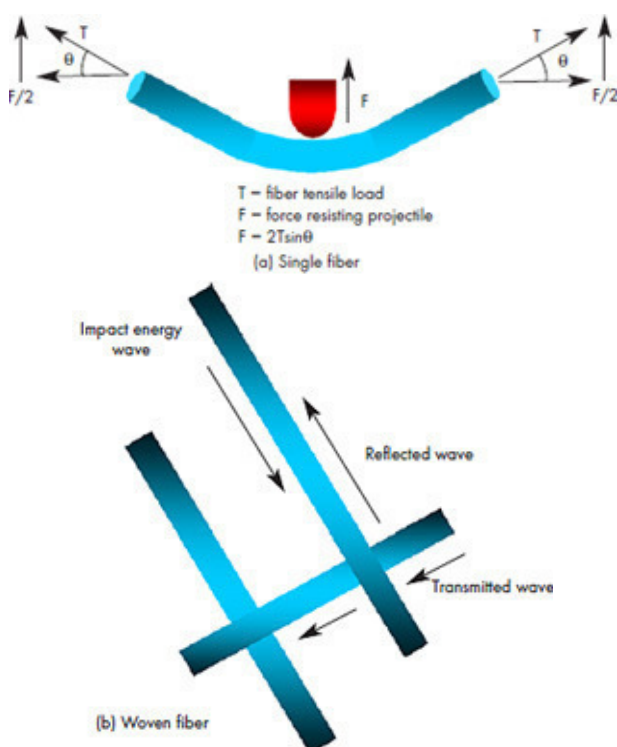


Figura 1. Mecanismo de absorción de energía de la fibra [2]

La velocidad sónica, a su vez, está relacionado con el módulo de elasticidad de la fibra, como se muestra en la Ecuación 2 [1]. Entonces un mayor módulo de elasticidad resulta en que la onda de la energía de impacto viaja más abajo en la longitud de la fibra, debido a una mayor velocidad sónica, y, por lo tanto, un mayor volumen de fibra absorbe la energía del proyectil.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad Ec.2$$

donde,

- E- módulo de elasticidad
- ρ- densidad de la fibra

En la Figura 1b, se muestra como una estera de fibra tejida, es eficaz en la absorción de la carga de impacto mediante la dispersión de la energía a través de la red de fibras. Una vez que las fibras se impregnan en la matriz de resina, su capacidad de deformarse puede verse obstaculizada, y como consecuencia, se puede absorber menos energía.

En los materiales compuestos con matriz polimérica reforzada con fibra, el proceso de fractura se considera que ocurre en dos etapas:

Impacto de alta velocidad que causa compresión localizada del material compuesto, y posteriormente cizallamiento de las fibras y desprendimiento de la resina, como se representan en la figura 2a. Una vez que el proyectil ha desacelerado, el material compuesto se deforma causando estiramiento de la fibra y separación o deslaminación en capas del material compuesto, como se muestra en la figura 2b [2].

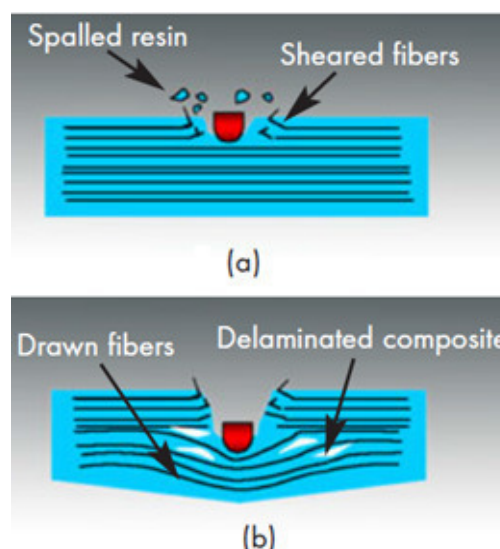


Figura 2. Mecanismos de absorción de energía en materiales compuestos de matriz polimérica reforzado con fibra [2]

Para reducir la deslaminación del material compuesto y limitar los daños solo en una zona pequeña de la matriz, se puede utilizar tejidos de fibra en tres dimensiones [4]. Sin embargo, esto puede resultar también en un incremento en el daño de la fibra debido a una disminución en la resistencia a la compresión después de impacto balístico, y por lo tanto en menor capacidad de resistencia balística.

### Fibras de alto rendimiento

Las fibras de alto rendimiento son un nuevo tipo de fibra, las mismas que, para limitar su deformación, deben poseer una alta rigidez y resistencia. La rigidez de estas fibras es causada por el grado en que los enlaces químicos están alineados a lo largo del eje de la fibra, para lograr la transferencia de la tensión a lo largo de la fibra.

Entre estas fibras se incluyen: vidrio S, aramida, polietileno de alto peso molecular, polibenzobisoxazol, polipiridobisimidazole y fibra de carbono [5].

Para reducir la deslaminación del material compuesto y limitar los daños solo en una zona pequeña de la matriz, se puede utilizar tejidos de fibra en tres dimensiones [4]. Sin embargo, esto puede resultar también en un incremento en el daño de la fibra debido a una disminución en la resistencia a la compresión después de impacto balístico, y por lo tanto en menor capacidad de resistencia balística.

Estas fibras pueden ser tejidas en diferentes configuraciones para proporcionar diversos grados de rendimiento y flexibilidad, algunas de estas configuraciones se ilustran en la figura:

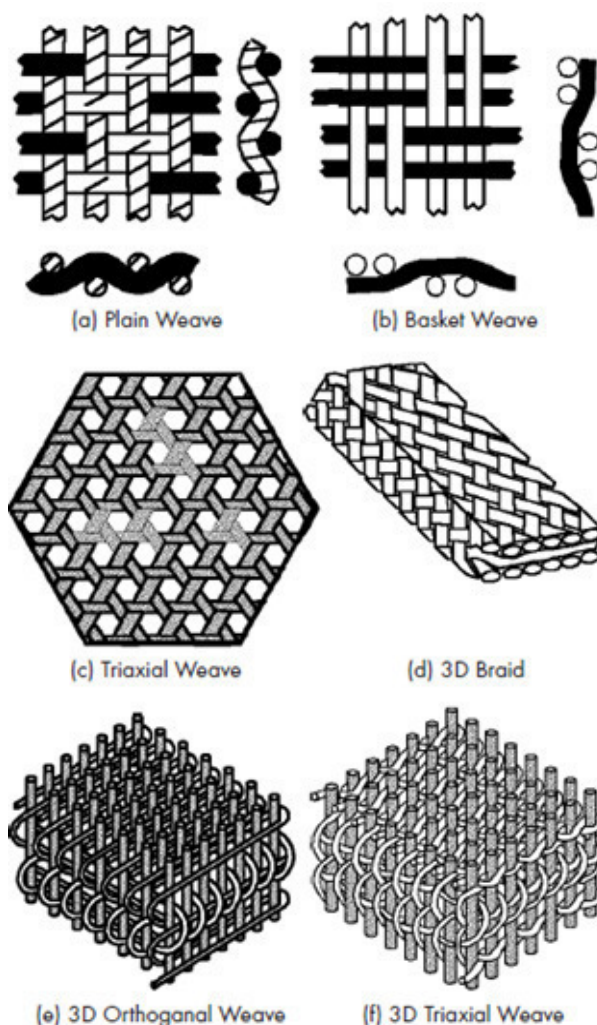


Figura 3. Estructuras de las fibras tejidas [6]

La mayoría de los materiales compuestos reforzados con fibras para aplicaciones de blindaje de vehículos ligeros, consisten en estructuras en configuraciones de tejido unidireccional, llano, o básquet, donde las capas de fibras unidireccionales pueden ser rotados 90° con respecto a las capas adyacentes para crear un tejido de capa cruzada.

Generalmente, tejiendo las fibras no se mejora la resistencia a la penetración de los materiales compuestos, debido a que las fibras están confinadas por la resina y la energía no puede ser transferida eficazmente a las fibras adyacentes. Sin embargo, las fibras tejidas como estructuras

3D, permiten limitar la deslaminación y así mejorar el rendimiento multi-hit del material compuesto [7].

Los materiales compuestos reforzados con fibras de alto rendimiento pueden ser utilizados en la producción de armaduras para la protección de vehículos 4x4 y el rendimiento del blindaje no sólo depende de las propiedades de la fibra y del material de la matriz, sino también de la estructura de la fibra, de su volumen, de la compatibilidad de la fibra con la resina, y de los aditivos.

### **Fibra de vidrio-S**

La fibra de vidrio-S, compuesta de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), y magnesio ( $\text{MgO}$ ), se caracteriza por una resistencia que es más o menos 35 a 40% mayor que la de la fibra de vidrio-E [8].

La fibra de vidrio S-2, que es una fibra revestida, aunque tiene un costo significativamente mayor que la fibra de vidrio-E, se ha convertido en una fibra muy utilizada en aplicaciones de resistencia a la penetración debido a su mayor resistencia, lo que garantiza un mayor rendimiento por unidad de peso.

Fibras de vidrio S-2 se fabrican comercialmente en filamentos con diámetros de 5 a 13 micras y estas mechas se venden bajo el nombre comercial ZenTron. Los productos de vidrio S-2 se utilizan en gran medida en industria de la defensa y aeroespacial, mientras que los productos ZenTron han encontrado aplicaciones en la industria automotriz y la industria de artículos deportivos [8].

Comparadas con las fibras de aramida, las fibras de vidrio S-2 generalmente tienen un rendimiento balístico semejante, a un costo más bajo, pero con mayor peso. La fibra de vidrio S-2 se puede utilizar a temperaturas elevadas

de hasta aproximadamente  $1380^\circ\text{F}$ , tiene buena resistencia a la fatiga y a la humedad y una velocidad de fluencia baja, pero puede ser susceptible a la rotura por fluencia [9].

### **Aramida**

Las fibras de aramida al principio se emplearon en forma de tejidos utilizándolas como blindajes flexibles, sin embargo, su problema es la excesiva deformación que presentan frente al impacto de una bala, es decir una deformación muy grande del blindaje que ocasiona daño al cuerpo de la persona. Por tal motivo, pronto se utilizó el tejido de fibra de aramida como refuerzo de materiales poliméricos, principalmente poliéster o vinil éster, de tal manera que se tiene un blindaje rígido en el que el polímero simplemente proporciona la cohesión y reduce drásticamente el trauma [10].

En estos blindajes rígidos de poliéster o vinil éster reforzados con fibra de aramida la resistencia a impacto la ofrece casi con exclusividad la fibra, por lo que, se contenido es muy alto, típicamente por encima del 80% en volumen, de tal manera que la matriz polimérica apenas contribuye a la resistencia a impacto.

Las fibras de aramida fueron introducidas comercialmente por primera vez por DuPont bajo el nombre comercial de Kevlar. Existen otras empresas que también producen fibras de aramida con los nombres comerciales de Twaron y Technora.

La estructura primaria de las fibras de aramida se muestra en la figura 4. Durante los últimos años se han añadido modificadores a la cadena principal de la fibra para mejorar su capacidad de protección, lo que ha permitido que en la actualidad se disponga de varios tipos de fibra de aramida. Kevlar 29, Kevlar 49,

Kevlar 129 y Kevlar KM2, son las fibras de aramida DuPont que se han utilizado más en aplicaciones de blindaje. Es así que, los primeros chalecos antibalas usados por personal militar eran de Kevlar 29, mientras que los chalecos Interceptor que actualmente usan por los soldados en Irak y Afganistán son de fibra de Kevlar KM2 [10].

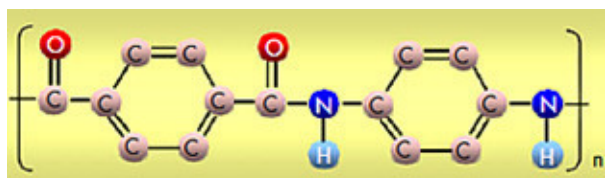


Figura 4. Estructura química de la aramida [10]

Las fibras de aramida presentan una disminución de la resistencia a la tracción cuando se expone al calor o la humedad. A temperaturas superiores a 180°C, se produce una pérdida de resistencia  $\leq 20\%$  [10]. Se han observado pérdidas de resistencia  $\leq 5\%$  en condiciones de alta humedad y temperatura ambiente y  $\leq 10\%$  bajo condiciones de agua caliente, sin embargo; la degradación de la resistencia parece ser reversible. El rango de temperatura de operación va desde -215°C hasta 160°C, con un inicio de degradación térmica que ocurre alrededor de 450°C [11].

Ambientes fuertemente ácidos y alcalinos también atacan a las fibras de aramida. Estas fibras tienen buena resistencia a la fatiga, bajas velocidades de fluencia y son menos susceptibles a la rotura por fluencia que las fibras de vidrio S-2. Por naturaleza las fibras de aramida no se unen bien a las resinas, por lo que suelen ser químicamente revestidas con anterioridad a su incorporación en los materiales compuestos [11].

### **Polietileno de alto peso molecular**

La aparición de la fibra de polietileno de alto peso molecular (HMWPE, por sus siglas en inglés) supuso una nueva revolución en el diseño de blindajes

con materiales compuestos. Esta fibra comercializada con el nombre de Spectra por la empresa Honeywell y, Dyneema por la empresa holandesa DSM, ofrece unas prestaciones balísticas superiores a la fibra de vidrio S-2 y de aramida, y tiene la densidad más baja de todas las fibras que se utilizan actualmente para aplicaciones en blindaje ligeros [5].

El HMWPE es un polímero de etileno con una elevada masa molecular, que se diferencia del material convencional de polietileno por su alta resistencia cuando se utiliza en condiciones extremas. El material es altamente resistente a los corrosivos, puede soportar impacto balístico incluso a temperaturas criogénicas, repele completamente la humedad y no es conductor. Asimismo, el HMWPE es más silencioso que los metales y prácticamente no sufre desgaste, debido a su bajo coeficiente de fricción [10].

Sus limitaciones incluyen la susceptibilidad a la fluencia y la mala resistencia a la compresión. Tienen una temperatura de procesamiento máxima de 120°C, lo que limita la elección de los materiales para la matriz a los termoestables de baja temperatura de curado o resinas termoplásticas [12].

### **Polibenzobisoxazol**

Las fibras de polibenzobisoxazol (PBO) son el resultado de la investigación de la Fuerza Aérea de los EE.UU. durante la década de 1980, cuando buscaban el desarrollo de una fibra más fuerte que las aramid. La estructura química del PBO se basa en una estructura de varilla rígida como la que se muestra en la figura 5.

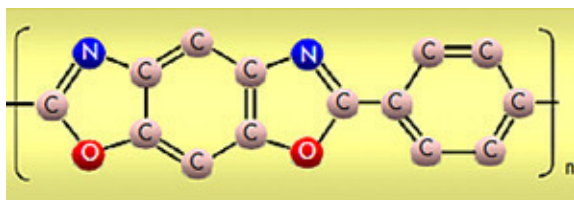


Figura 5. Estructura Química del PBO [10]



Figura 6. Estructura química del M5 [10]

Las fibras de PBO tienen propiedades de muy alta resistencia a la tracción y mejor resistencia a la penetración que las fibras de HMWPE, pero igual que las fibras de HMWPE, tienen baja resistencia a la compresión. La temperatura de descomposición de las fibras de PBO es de aproximadamente 550°C, en comparación a los 450°C para fibras de aramida [5].

Una fibra de PBO que actualmente se encuentra en el mercado es el Zylon, que en las pruebas ha mostrado que sufre degradación cuando se somete a fuerzas de tracción a temperaturas elevadas y humedad, y cuando se expone a luz ultravioleta [13]. Pérdida del 40% en su resistencia, se produce a una temperatura de 80°C y una humedad relativa del 80%. Investigaciones llevadas a cabo sobre la degradación de las fibras PBO han determinado que este fenómeno está relacionado con su método de fabricación [14].

### Polipiridobisimidazole

La fibra de polipiridobisimidazole (PIPD) denotada como M5 es una fibra de alto rendimiento desarrollado originalmente por Akzo Nobel y producida actualmente por Magellan Sistemas Internacional (Magallanes). La fibra M5 se basa en una estructura de varilla rígida y la unidad de repetición del polímero se ilustra en la figura 6. [15]

La estructura cristalina del M5 es diferente a la de todas las otras fibras de alta resistencia, debido a que las fibras típicas M5 cuenta con unión covalente en la dirección de la cadena principal, pero también cuenta con hidrógeno unido a la red en las dimensiones laterales [14].

Las fibras M5 tienen un módulo de elasticidad promedio de 310 GPa, (aproximadamente 95% más alto que las fibras de carbono) y, una resistencia a la tracción promedio de 5,8 GPa, valor semejante al de las fibras de PBO (como Zylon) y superior a las de aramida (como el Kevlar o Twaron) [15]. Además, debido al fuerte enlace con el hidrógeno intermolecular, su resistencia a la compresión se mejora significativamente sobre el de las fibras de PBO. Su temperatura de descomposición es de aproximadamente 530°C, que es cercana a las fibras de PBO [5].

### Resinas

Las resinas para blindajes livianos con material compuesto de matriz polimérica reforzada con fibras, pueden ser tanto termoplásticas como termoestables. En general, los termoplásticos ofrecen una mayor resistencia al impacto, pero carecen de la resistencia térmica y química de los termoestables, por lo que, los termoplásticos tienen solo un uso limitado en los sistemas militares de blindaje de componentes para la protección balística de personas [16].

Por otro lado, los blindajes para vehículos ligeros consisten principalmente en

materiales compuestos reforzados con las fibras de alto rendimiento analizadas en este artículo, junto con una resina termoestable como: epoxi, poliéster, éster de vinilo, o resina fenólica [17].

Epoxi, poliéster y éster de vinilo son los materiales principales de las resinas utilizadas en materiales compuestos de grado balístico para vehículos, mientras que las resinas fenólicas se utilizan en aplicaciones que requieren el control del fuego, el humo y la toxicidad. Por lo tanto, en los materiales compuestos para blindaje se utiliza una de las tres resinas termoestable para la protección balística y una placa posterior con resina fenólica para proteger contra el fuego, el humo y la toxicidad [17].

Los epóxidos proporcionan las mejores características estructurales de todas las resinas, y están disponibles en una amplia gama de formulaciones. Tienen excelentes propiedades mecánicas y una buena adhesión a numerosos materiales, pero requieren altas temperaturas de procesamiento para alcanzar un alto nivel de calidad. Poliésteres y ésteres de vinilo son de bajo costo, de fácil procesamiento y con propiedades mecánicas superiores al promedio, pero tienen baja resistencia a la compresión. Como resultado de esta deficiencia, normalmente son relegados a aplicaciones no estructurales [18].

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el objetivo de determinar el material más adecuado para el blindaje liviano de vehículos, se evalúa el rendimiento balístico de las fibras poliméricas de alto rendimiento, con respecto a su capacidad para [5]:

- absorber localmente la energía cinética del proyectil, y
- esparcir de forma rápida la energía absorbida antes de que se alcancen las condiciones locales para la falla.

En términos simples, la capacidad de las fibras de alto rendimiento para absorber energía por unidad de masa, está relacionada con la resistencia a la rotura de la fibra y la deformación hasta la rotura de la fibra, mientras que la capacidad de las fibras para esparcir la energía está gobernada por su velocidad sónica, que se define en términos de su módulo de elasticidad axial, y su densidad.

Un resumen de las propiedades clave de las fibras de alto rendimiento más comúnmente utilizadas para protección balística de vehículos, se presenta en la Tabla 1, donde se observa que las fibras de PBO presentan la mayor resistencia a la rotura, mientras que la fibra de vidrio S tiene la mayor deformación y densidad.

TABLA 1 Propiedades mecánicas típicas de las fibras de alto rendimiento [12]

Fiber type	Failure strength (GPa)	Failure strain	Axial modulus (GPa)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Aramid	2.8-3.2	0.015-0.045	60-115	1390-1440
HMWPE	2.8-4.0	0.029-0.038	90-140	970-980
LCP	2.7-2.9	0.033-0.035	64-66	1400-1420
PBO	5.4-5.6	0.024-0.026	270-290	1540-1560
PIPD	3.9-4.1	0.011-0.013	320-340	1690-1710
Nylon	0.06-0.08	1.5-2.5	1.0-1.5	1070-1170
S-glass	4.64-4.66	0.053-0.055	82-92	2470-2490

En la figura. 7, se muestran los dos parámetros que definen el rendimiento balístico para el mismo conjunto de fibras de alto rendimiento.



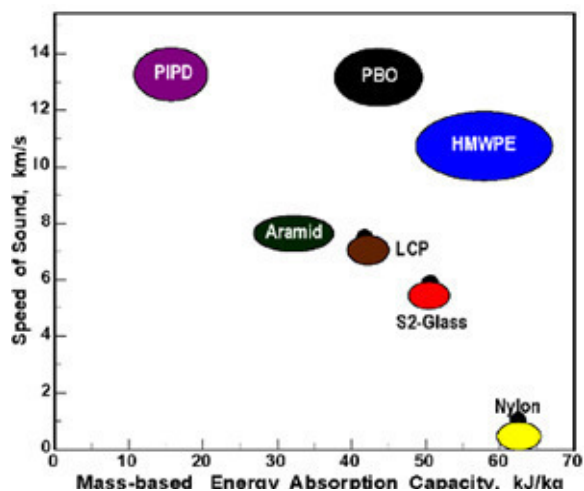


Figura 7. Velocidad sónica vs. Capacidad de absorción de energía para varias fibras de alto rendimiento [12]

Si bien los resultados mostrados en la figura 7 revelan claramente un alto potencial balístico de las fibras de alto rendimiento, sin embargo; la plena utilización de este potencial en la fabricación de materiales compuestos de grado balístico para blindaje de vehículos, constituye un enorme reto debido a que la selección del material más adecuado depende de muchos factores como: la estructura y arquitectura del tejido, el tipo de fibra, la densidad superficial, la fricción fibra-proyectil, el tipo de matriz polimérica, las condiciones de procesamiento y fabricación de los materiales compuestos, la forma, la masa y las propiedades mecánicas del proyectil a ser detenido, etc.

Las fibras de aramida y HMWPE típicamente se utilizan como tejidos para armaduras flexibles corporales o como refuerzos en materiales compuestos para aplicaciones de blindaje rígidos, mientras que el vidrio S-2 se utiliza comúnmente en aplicaciones de blindaje rígido para vehículos ligeros. Las fibras de PBO no se han utilizado para aplicaciones militares, y las M5 todavía están en etapas de desarrollo.

La figura 8a, muestra que los tejidos de fibra Spectra 1000 proporcionan

un rendimiento balístico superior con un peso más ligero que el Kevlar 29, mientras que la figura 8b, muestra que la fibra Spectra 1000 ofrece un mayor nivel de protección con el mismo grosor que el Kevlar 29 hasta aproximadamente 18 mm, donde el nivel de protección proporcionado por las dos fibras es aproximadamente igual. En espesores superiores a 18 mm el Kevlar 29 supera al Spectra 1000 en términos de rendimiento balístico [16].

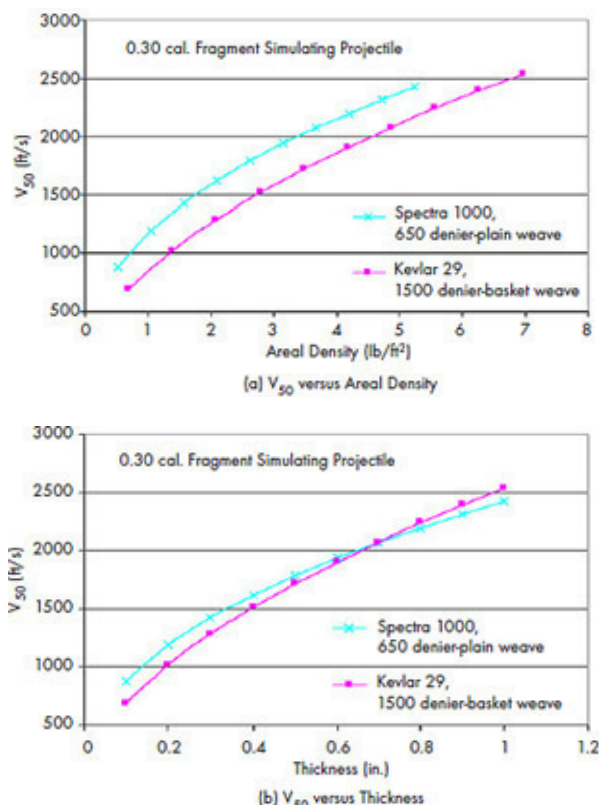


Figura 8. Comparación del rendimiento balístico ( $V_{50}$ ) de las fibras Kevlar 29 y Spectra 1000 [16]

Adicionalmente, la posible liberación de productos químicos tóxicos son preocupaciones relacionadas con los materiales compuestos. Los métodos de procesamiento, tales como moldeo por transferencia de resina, requieren materiales de resina que tengan bajas viscosidades con el fin de que el producto terminado tenga una porosidad baja y, por lo tanto, un buen rendimiento. En el caso de materiales de mayor

viscosidad, como los epoxis, se utilizan altas temperaturas de procesamiento y/o aditivos para producir la baja viscosidad requerida para el procesamiento. Sin embargo, las altas temperaturas de procesamiento conllevan costos más altos y también pueden limitar la selección de fibra, mientras que los aditivos pueden producir subproductos tóxicos.

Las ventajas y desventajas de rendimiento, facilidad de procesamiento, y costos de las resinas, se resumen en la Tabla 2 para las tres resinas estructurales. En la mayoría de las aplicaciones, de blindaje, las resinas de éster de vinilo han sustituido a las resinas de poliéster, ya que son similares en muchas propiedades, pero con el beneficio adicional de tener propiedades mecánicas superiores.

TABLA 2 Comparación de las resinas termoestables [18]

Resina	Ventajas	Desventajas
Poliéster	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo</li> <li>• Fácil de procesar</li> <li>• Buena resistencia química</li> <li>• Buena resistencia a la humedad</li> <li>• Rápido tiempo de curado</li> <li>• Curado a temperatura ambiente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inflamable</li> <li>• Humo tóxico tras la combustión</li> <li>• Propiedades mecánicas promedio</li> </ul>

Éster de vinilo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo</li> <li>• Fácil de procesar</li> <li>• Baja viscosidad</li> <li>• Curado a temperatura ambiente</li> <li>• Resistente a la humedad</li> <li>• Buenas propiedades mecánicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inflamable</li> <li>• Libera humo en la combustión</li> </ul>
-----------------	--	--

Epoxi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excelentes propiedades mecánicas (superior a los ésteres de vinilo)</li> <li>• Buena resistencia química</li> <li>• Buena resistencia al calor</li> <li>• Buenas propiedades adhesivas con un gran variedad de sustratos</li> <li>• Resistente a la humedad</li> <li>• Variedad de composiciones disponibles</li> <li>• Buena resistencia a la fractura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costoso</li> <li>• Requiere altas temperaturas de procesamiento para conseguir buenas propiedades</li> </ul>
-------	---	---

#### 4. CONCLUSIONES

Los materiales compuestos de matriz polimérica reforzada con fibras de alto rendimiento proporcionan los medios para producir tejidos ligeros para armaduras de los vehículos blindados livianos.

La disponibilidad de diferentes fibras de alto rendimiento y resinas junto con la

capacidad para acoplarse permite una alta versatilidad en el diseño de blindajes ligeros de materiales compuestos.

El rendimiento de las armaduras reforzadas con fibra no sólo depende de las propiedades de la fibra y del material de resina, sino también de la estructura de la fibra, del volumen de fibra, de la compatibilidad de la fibra con la resina y de los aditivos.

El rendimiento balístico de blindajes rígidos para vehículos livianos, fabricado con matriz polimérica reforzada con fibra se atribuye en gran medida a las fibras, por la que maximizar el volumen de la fibra en un material compuesto utilizando la estructura de tejido de rendimiento superior, optimizará el rendimiento balístico del composites. La mayoría de las armaduras de material compuesto tienen volúmenes de fibra superior al 80%.

Los agentes aglutinantes que ayudan a la unión de las fibras con las resinas pueden influir en la resistencia a la penetración del material compuesto. Los aditivos se introducen principalmente para aumentar la resistencia a la fractura del material compuesto. Para este propósito normalmente se utilizan los termoplásticos y los materiales de goma.

## 5. REFERENCIAS

- [1] M. Grujicic, P.S. Glomski, T. He, G. Arakere, W.C. Bell, B.A. Cheeseman. Material modeling and ballistic-resistance analysis of armor-grade composites reinforced with high-performance fibers. *Journal of Materials Engineering and Performance*, ASM International, USA; 2009.
- [2] Paul Hogg. Composites for ballistic applications. *Journal of Composites Processing*, Department of Materials Queen Mary, London; 2003.
- [3] M. Jacobs, J. Van Dingenen. Ballistic protection mechanisms in personal armour. *Journal of Materials Science* 36, Springer; 2001.
- [4] Bruce Fink, Ahmed Monib, John Gillespie, Jr. Damage tolerance of thick-section composites subjected to ballistic impact. *Army Research Laboratory, USA*; 2011.
- [5] Doetze Sikkema, Maurits Northolt, Behnam Pourdeyhimi. Assessment of new high-performance fibers for advanced applications. *Mrs. Bulletin. USA*; 2003.
- [6] F. Ko, A. Geshury. *Textile Preforms for Composite Materials Processing*. Advanced Materials and Processes Information Analysis Center, USA; 2002.
- [7] Richard Lane. High performance fiber for lightweight armor. *Amptiac volume 9, number 2. USA*; 2005.
- [8] Michael Kinsella, Dennis Murray, David Crane, Mechanical properties of polymeric composites reinforced with high strength glass fibers. USA.
- [9] Frederick Wallenberger, PPG Industries, Inc. *Introduction to Reinforcing Fibers*. ASM Handbook, Volume 21: Composites, USA; 2001.
- [10] Karl Chang, E.I. Du Pont de Nemours & Company, Inc. *Aramid fibers*. ASM Handbook, Volume 21: Composites, USA; 2001.
- [11] M. Grujicic, A. Hariharan, B. Pandurangan, C.-F. Yen, B.A. Cheeseman, Y. Wang, Y. Miao, and J.Q. Zheng. Fiber-level modeling of dynamic strength of Kevlar KM2 ballistic fabric. ASM International,

USA; 2011.

[12] M. Grujicic, G. Arakerea, T. Hea, W.C. Bell, B.A. Cheesemanb, C.-F. Yenb, Scott. A ballistic material model for cross-plyed unidirectional ultra-high molecular-weight polyethylene fiber-reinforced armor-grade composites. *Materials Science and Engineering*. Elsevier. USA; 2008.

[13] Toyobo Co., Ltd. PBO fiber Zylon. Technical Information. 2001.

[14] Davies, A. R. Bunsell, E. Chailleux. Tensile fatigue behaviour of PBO fibres. *Journal of Materials Science*, Springer Science, Francia; 2010.

[15] Philip M. Cunniff, Margaret A. Auerbach. High performance "M5" fiber for ballistics / structural composites. U.S. Army Soldier and Biological Chemical Command, USA.

[16] Twisdale Lawrence A., Frank Robert A., Lavelle, Francis M. *Airmobile Shelter Analysis, Volume II*, Defense Technical Information Center, USA; 1994.

[17] David M. Spagnuolo, Eugene Napadensky, Tomoko Sano, James P. Wolbert. Investigation of basalt woven fabrics for military applications. Army Research Laboratory, USA; 2011.

[18] Bruce K. Fink, Emanuele F. Gillio, Geoffrey P. McKnight, John W. Gillespie Jr., Suresh G. Advani, Rushad F. Eduljee, Karl R. Bemetch. Co-Injection resin transfer molding of vinyl-ester and phenolic composites. Army Research Laboratory, USA; 2000.

## 6. BIOGRAFÍA



<sup>1</sup>Oscar Arteaga, Ingeniero Mecánico, con estudios de posgrado en Autotrónica, Tecnología de la Información y Comunicación, Gestión de Energías y Diseño Mecánico. Profesor Titular Agregado 1 del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE Extensión Latacunga.



<sup>2</sup> Mauricio Cruz, nació en Latacunga, Ecuador, Es ingeniero Automotriz, Diplomado en Autotrónica, Diplomado en Gestión del Aprendizaje Universitario, Docente Tiempo Parcial en la Escuela Politécnica del Ejército desde 2009. Imparte servicios de asesoramiento y capacitación en mecánica básica y manejo de software CAD.



<sup>3</sup>Euro Mena, nacido en el Cantón Quevedo - Los Ríos - Ecuador, Graduado de Ingeniero Automotriz en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.



<sup>4</sup> Víctor Danilo Zambrano León, nació en la ciudad de Quito, Ecuador. Es Ingeniero Automotriz, Máster en Sistemas Automotrices, Máster en Gestión de la Producción, estudios de posgrado en

Autotrónica, Docente tiempo completo, Director de la Carrera de Ingeniería Automotriz del Departamento de Energía y Mecánica de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE.



<sup>5</sup>William Bonilla, nació en Salcedo Provincia de Cotopaxi en Ecuador. Es Ingeniero Mecánico en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Riobamba, dispone estudios de Posgrado en Gestión de Energías. Pertenece al

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” extensión Latacunga.

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

Fecha recepción	25 mayo 2016
Fecha aceptación	14 agosto 2016

