

# Fabricación y Validación a la Respuesta Balística de Compuestos Epoxi/Kevlar

Daniel Leiva-Palomera<sup>1</sup>, MARÍA Fernández -Abreu<sup>2</sup>, José Valin-Rivera<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Pontificio Universidad Católica de Valparaíso, Chile. Email: daniel.leiva@pucv.cl

## Resumen

En este trabajo se definió la metodología de fabricación de placas de 250x156x3 [mm] por laminación manual de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzado con 3 tejidos de kevlar balístico 29 con un apilamiento de 2 gramajes. Para predecir la respuesta como material antibala; se realizó un ensayo de resistencia al impacto balístico del material compuesto y del material de refuerzo sin matriz, en un campo de tiro certificado, utilizando un arma de aire comprimido calibre 5,5[mm] y un arma de fuego tipo pistola modelo CZ 75B calibre 9[mm]. Se realiza el análisis macro y las mediciones de los traumas ocasionados a los materiales después de cada impacto (realizando 3) en cada una de las placas. Observamos delaminación interior; fractura frágil/desgarro de la fibra y eliminación de la matriz

**Palabras clave:** material compuesto, kevlar, epoxi, balística, laminación manual.

## Abstract

In this study, the manufacturing methodology of 250x156x3 [mm] plates were determined through manual lamination of polymer matrix composite materials reinforced with three layers of ballistic Kevlar 29 fabric, with a stacking of two weights. To predict the response as a ballistic material, a ballistic impact resistance test was conducted on the composite material and the matrix-free reinforcement material, at a certified shooting range. This involved using a compressed air gun with a caliber of 5.5 [mm] and a CZ 75B model 9 [mm] pistol. Macro analysis and measurements of the traumas caused to the materials after each impact (3 impacts were conducted on each plate) were conducted. Interior delamination, brittle fracture/tearing of the fiber, and matrix removal were observed

**Keywords:** Composite material, Kevlar, Epoxy, Ballistics, Manual Lamination.

## 1 Introducción

Los blindajes balísticos que son utilizados actualmente son multicapa, suelen fabricarse con una capa frontal de material cerámico, seguida de un material compuesto y en algunos casos, con una capa posterior de metal dúctil (Tasdemirci, 2012; Monteiro, 2014). El material cerámico, de naturaleza poco flexible y dura, cumple la función de deformar y erosionar la punta del proyectil, además de absorber la mayor parte de la energía cinética del proyectil, convirtiéndola en energía de fractura a través de un mecanismo dinámico de fragmentación (Wilkins, 1978). Sin embargo, las cerámicas tienen baja resistencia a la flexión, se agrega una capa posterior de material compuesto para dar ductilidad a la estructura del blindaje, absorbiendo una cantidad importante de energía, reteniendo fragmentos del proyectil y la capa de material cerámico. El metal

dúctil, como una aleación de aluminio, absorbe la energía restante a través de la deformación plástica (Yadav, 2003; Rahbek, 2017; Msyseeless, Goldsmith, Virostek, & Finnegan, 1987)

La combinación de resina epoxi con fibras de Kevlar tiene buenos resultados en usos de recubrimientos como fuselaje de aeronaves militares de grandes exigencias. Las fibras de Kevlar son muy ligeras y tienen una rigidez y una resistencia a la tensión muy altas, y son estas propiedades las que hacen que estas fibras sean útiles para fabricar chalecos que se utilizan para la protección contra armas de bajo calibre. Las fibras de Kevlar muestran una baja adherencia con la mayoría de las matrices poliméricas, observándose valores bajos de resistencia al corte interlaminar (Chawla, 2012). Este comportamiento no es una desventaja cuando dichos compuestos se utilizan en

aplicaciones que requieren alta resistencia al impacto, como el blindaje balístico, porque la facilidad de delaminación de estos compuestos puede ser una ventaja desde el punto de vista de la tenacidad y disipación de energía mecánica.

### 1.1 Hipótesis.

- Las placas fabricadas de materiales compuestos de matriz polimérica reforzado con 3 apilamientos de 2 gramajes diferentes de tejidos de kevlar balístico 29, bajo un ensayo de resistencia al impacto balístico, permitirá validar su respuesta como material antibala.

### 1.2 Objetivo general.

- Fabricar y validar la respuesta balística de compuestos epoxi/kevlar.

### 1.3 Objetivos específicos.

- Diseñar un material compuesto de matriz epoxi con refuerzo de Kevlar balístico.
- Definir el proceso de fabricación por laminación manual del material compuesto con matriz epoxi reforzado por 3 apilamientos de 2 gramajes diferentes de tejidos de kevlar balístico 29.
- Evaluación de la respuesta balística de las placas del material compuesto fabricado.

## 2 Metodología:

### 2.1 Materiales utilizados:

- Resina epóxi 172:

La resina epoxi 172 utilizada para el presente estudio como matriz polimérica base de los materiales compuestos reforzados con fibra tejida de Kevlar, debido a sus propiedades de baja densidad y especial para el trabajo con fibras tejidas de variados tipos incluida la de aramida.

**Tabla 1. Propiedades de la resina epóxi 172**

Propiedades Resina epoxi 172.	
Proporción de mezcla a peso	1A+2B (resina a endurecedor)
Pot life	15 min a 25[°C]
Condiciones de curado	24 horas a temperatura ambiente o 5 horas a 60 [°C]
Viscosidad de mezcla	350-650 [centipoise]
Densidad de la mezcla	1057 [gramos/litro]
Resistencia a la flexión	1138 [Kg/cm <sup>3</sup> ]
Resistencia a la compresión.	1250 [Kg/cm <sup>3</sup> ]
Resistencia a la tracción.	779[Kg/cm <sup>3</sup> ]
Dureza.	85 Shore A
Transición vítrea.	85[°C]

Fuente: Fibratec.

- Tejido de Kevlar 29 balístico:

El refuerzo utilizado es fibra tejida de kevlar 29, tipo de tejido tafetán como se muestra en la figura 1, el tejido es de 3000 denier tipo balístico de la cual se utilizó 2 gramajes diferentes; uno de 400[g/m<sup>2</sup>] y el segundo de 460[g/m<sup>2</sup>].

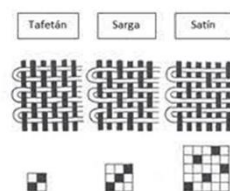


Figura 1. Tipos de tejidos Fuente: (Gdeon).

**Tabla 2. Propiedades del Kevlar 29.**

Propiedad	Kevlar 29	Kevlar 49	Kevlar 129
Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	1,44	1,44	1,47
Diámetro de la fibra [μm]	12	12	12
Módulo de Young [Gpa]	83	131	79
Resistencia a la tracción [Gpa]	3,6	3,6-4,1	3,4
Alargamiento a la rotura [%]	4,0	2,8	2,0

Fuente: (Lorente. & Dpto. ingeniería de materiales y fabricación, 2007)

- Desmoldante 27:

El desmoldante 27 de la marca Fibratec utilizado para el presente estudio fue escogido debido a ser una cera microcristalina con alto contenido de carnauba y su utilización especial para el trabajo con moldes de acero y fibras.

- Herramientas de corte, moldeo y medición:
  - Tijeras para cortar Aramida.



Figura 1. Tijera. Fuente: Autor.

- Moldes de acero.



Figura 2. Molde. Fuente: Autor.

- Prensa hidráulica.



Figura 3. Prensa hidráulica. Fuente: Autor.

- Herramientas de desmoldeo como destornillador, llaves allen, espátulas.
- Pie de metro digital.



Figura 4. Pie de metro digital. Fuente: Autor.

- Porta placas.



Figura 5. Porta placas. Fuente: Autor.

## 2.2 Proceso de laminación:

Apilamiento de los tejidos: Los tejidos de Kevlar se apilaron en una configuración de 2 gramajes diferentes según tabla 3.

**Tabla 3. Tabla de apilamiento de las placas.**

Apilamiento de las placas.		
Capas	Placa 0	Placa A
Resina	No	Epoxi
Capa A	Kevlar 460	Kevlar 460
Resina	No	Epoxi
Capa B	Kevlar 460	Kevlar 460
Resina	No	Epoxi
Capa C	Kevlar 400	Kevlar 400
Resina	No	Epoxi

Fuente: Autor

En la siguiente figura 6 se demuestra el diseño del proceso de fabricación del compuesto.

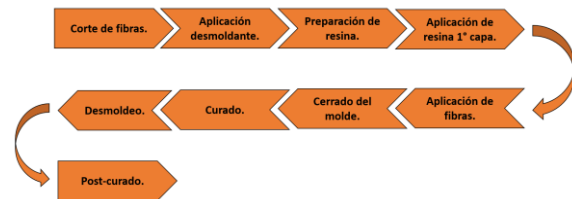


Figura 6. Proceso de fabricación. Fuente: Autor.

- Corte de los tejidos: Se dimensionan la cantidad de tejidos necesarios respecto las medidas del molde.
- Aplicación de desmoldante: Se aplican 3 capas de desmoldante según instrucciones del fabricante.
- Preparación de resina: Se prepara la resina a utilizar considerando un margen extra de esta manera evitando posibles vacíos.
- Aplicación de la primera capa de resina: se aplica una capa de resina para evitar un vacío en la cara inferior de la placa.
- Aplicación de las fibras: Las fibras se van aplicando intercalado con una capa de resina utilizando un rodillo burbujero de laminación de fibras el cual nos ayuda a realizar un compuesto sin delaminaciones.
- Cerrado del molde: al cerrar el molde se realiza de una manera continua evitando dejar la mayor cantidad de aire.
- Curado: Se utilizó el moldeo por compresión en una prensa hidráulica manual para consolidar los laminados de una manera uniforme en toda su fase por 24 horas a temperatura ambiente.
- Desmoldeo: se procede a realizar el desmoldeo de manera cuidadosa utilizando los pernos de desmoldeo.
- Postcurado: Luego del desmoldeo se realiza un postcurado en un horno de aire forzado a 60° por 4 horas.

## 2.3 Ensayo de impacto balístico:

A partir de la norma NTMD-0225-A3; se adecua el ensayo con la intención de realizar la validación de el compuesto como material balístico, donde:

1. Realizar 3 disparos por placas de 250X156 [mm], separados entre si a 50 [mm] y de los bordes de las placas a 19 [mm]. Las placas son sujetadas por el porta placas del ítem 3.2 y colocadas a una distancia de 5 [m].
2. Utilizar un arma de fuego tipo pistola modelo CZ 75B según figura 7 y el proyectil mostrado en la figura 22, de la marca Federal de calibre 9 [mm] Luger

full metal jacket de 124[grain] con una velocidad de 1150 [fps] y energía de 493,5 [J] el cual corresponde para realizar las pruebas a un blindaje IIA.



Figura 7. Pistola CZ 75B calibre 9 [mm]. Fuente:

#### 2.4 Cálculo densidad superficial:

La densidad superficial en un blindaje se refiere a la cantidad de masa por unidad de área que está distribuida sobre la superficie del material compuesto. Para calcular la densidad superficial ( $\sigma$ ), puedes usar la siguiente Ecuación (1):

$$\sigma = \frac{m}{A} \left[ \frac{Kg}{m^2} \right] \quad (1)$$

#### 2.5 Cálculo de la fracción volumétrica:

Para el cálculo de la fracción volumétrica se utiliza el peso de fibra para representar la proporción volumétrica de un componente en relación con el volumen total del material compuesto. En este trabajo se utiliza el método teórico de la Ecuación (2), similar al utilizado por Ahmed y Vijayarangan (2008).

En otras palabras, es la fracción del volumen total que está ocupada por un componente específico, como fibras tejidas, en comparación con el volumen total del material compuesto.

$$v_f = \frac{\frac{\omega_j}{x_j}}{\frac{\omega_j}{x_j} + \frac{\omega_m}{x_m}} \quad (2)$$

Donde  $v_f$  es la fracción volumétrica de las fibras del laminado;  $\omega_j$  son el peso de las fibras de Kevlar y  $\omega_m$  de la matriz, respectivamente. Mientras que,  $x_j$  y  $x_m$  son las densidades fibra de kevlar y matriz, respectivamente.

Análisis macro: Se realizaron mediciones y observaciones de las placas después de cada impacto para evaluar delaminación, fractura y eliminación de la matriz.

### 3 Resultados

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

#### 3.1 Porta placas:

El porta placas balístico fabricado es capaz de afirmar hasta 10 placas de forma correcta está diseñado como una prensa la cual tiene 6 pernos de sujeción para garantizar que se mantenga en su lugar al momento del impacto.



Figura 8. Porta placa. Fuente: Autor.

#### 3.2 Proceso de laminado:

Durante la consolidación de este material compuesto se puede apreciar visualmente que su interfaz está consolidada, es decir en una sola pieza sin delaminaciones ni fisuras. Pero cabe destacar que se deben descartar 1 [cm] de todos los márgenes, para desprejar cualquier anomalía del moldeo del kevlar en esta parte y tener una placa en su totalidad operativa.



Figura 9. Porta placa. Fuente: Autor.

#### 3.3 Impacto balístico rifle de aire comprimido PCP

Previamente al ensayo balístico a realizar con arma de fuego, se realiza una prueba de impacto de proyectil de plomo impulsado por un rifle de aire precomprimido a 5 [m] de distancia con ángulo de 90° con una energía teórica de 43 [J]. Se realizaron 3 impactos de los cuales 1 proyectil traspasa la placa. Según se visualizo fue producto de falta de resina en esa zona.

Según figura 10 luego de los 3 impactos observados a contraluz se aprecia delaminación interior debido a las ondas expansivas de los impactos.

Según las figuras 11 y 13. Los 2 impactos realizados en secciones aceptables de la placa resistieron el proyectil generando un pequeño daño superficial en la capa de la

resina principal y en su reverso se observa un desprendimiento de partículas las que son proyectadas a gran velocidad de la capa posterior de resina.

En la figura 12 se aprecia el impacto que tuvo resultado pasante donde el desprendimiento de resina es en la parte frontal donde impactó el proyectil y en su reverso se aprecia el desgarro de la fibra a diferencia de los otros dos impactos donde fue retenido, causando un desprendimiento de resina en la cara frontal y por el reverso un daño generado por las ondas expansivas que genera el proyectil.



Figura 10. Impacto balístico PCP vista general. Fuente: Autor.



A - Vista frontal



B- Vista posterior

Figura 11. Impacto balístico número 1. Fuente: (Autor).



A - Vista frontal



B - Vista posterior

Figura 12. Impacto balístico número 2. Fuente: (Autor).



A - Vista frontal



B - Vista posterior

Figura 13. Impacto balístico número 3. Fuente: (Autor).

### 3.4 Pruebas de impacto balístico:

Para el ensayo balístico se realizó en un campo de tiro abierto como se muestra en la figura 14 a una temperatura de 28°, con viento en calma, utilizando un arma de fuego tipo pistola modelo CZ 75B 9[mm] como se muestra en la figura 7.

El ensayo realizado consta de 3 impactos por cada placa del compuesto en estudio. Para lo que se marcaron las placas con anterioridad con tres puntos guías distantes entre cada uno a una distancia de 50 [mm] y separación mínima del borde de +19[mm] como indica la norma NTMD-0225-A3. Y la distancia de la placa al punto de disparo de 5 [m], utilizando un medidor laser a un ángulo de 90° para demarcar la distancia entre el tirador y la placa, para capturar las imágenes del ensayo se utilizó un trípode de 135 [cm] en conjunto con una cámara canon EOS rebel T6 realizando videos de cada impacto obteniendo imágenes para su análisis de los videos.



Figura 14. Montaje de campo de tiro Fuente: Autor.

#### 3.4.1 Macro análisis de las placas ensayadas.

Tabla 4. respuesta del ensayo de resistencia balística.



Ensayo resistencia balística			
Placa 0	Disparo 01	Disparo 02	Disparo 03
Pasante	Si	No	Si
Diámetro perforación	-	-	-
Diámetro del trauma	-	-	-
Placa A 01			
Pasante	Si	Si	Si
Diámetro perforación	16,31	13,55	16,32
Diámetro del trauma	31,5	38,5	32,46
Placa A 02			
Pasante	Si	Si	Si
Diámetro perforación	14,13	9,76	11,78
Diámetro del trauma	38,31	37,4	35,22
Placa A 03			
Pasante	Si	Si	Si
Diámetro perforación	12,67	12,68	11,20
Diámetro del trauma	39,61	29,62	33,6
Placa A 04			
Pasante	Si	Si	Si
Diámetro perforación	14,33	13,1	14,97
Diámetro del trauma	37,3	39,4	36,2
Placa A 05			
Pasante	Si	Si	Si
Diámetro perforación	14,4	14,2	13,6
Diámetro de trauma	35,5	33,9	39,26

Fuente: Autor.

Se selecciona para el análisis del trauma ocasionado por el impacto del proyectil en cada uno de los 3 disparos en las placas A 02, 04, 05.

En el análisis de la macrofractura se observa que los daños provocados tanto en la entrada como en la salida del proyectil son similares en todas las placas de los compuestos.

En la figura 15, se observa en las 3 placas, todos los traumas ocasionados en la entrada del proyectil de manera visual similares en el trauma de perforación y sus valores según tabla 4.

En la figura 16, se destaca el trauma ocasionado en la salida de cada proyectil (3) en las 3 placas de tipo fractura frágil por la zona delaminada alrededor de cada uno y el arrastre de las fibras hacia el exterior.



Figura 15 Impacto balístico Placa A 02, 04, 05  
vista frontal Fuente: Autor.



Figura 16 Impacto balístico Placa A 02, 04, 05  
vista posterior Fuente: Autor.

En la figura 17. Se destaca en una de las placas (A04), el trauma de salida de uno de los 3 disparos antes mostrados en la figura 16 de la parte posterior de la placa A04. Con amplitud se observa las características de fractura frágil con forma de araña de un tamaño  $\pm 5$  [mm].



Figura 17 Impactos balísticos placa A04 parte trasera Fractura de matriz Fuente: Autor.

Al observar las placas ensayadas a contraluz, en la figura 18, se observa delaminación interior provocado por el trauma generado, lo que nos habla de fractura frágil en estos compuestos.



Figura 18 Impacto balístico Placa A 02, 04, 05  
vista contraluz Fuente: (Autor).

La tabla 4 se muestran los valores de las medidas de los 3 diámetros de perforación de entrada y salida (mismo valor) del proyectil y de los traumas de entrada y salida ocasionados por los disparos en las 5 placas ensayadas.

### 3.5 Análisis macro trayectoria del proyectil

En la figura 19 se observa el corte transversal en una placa sin ensayar, se puede observar que las capas de laminación del compuesto no presentan delaminaciones, falta de adherencia ni falta de resina. La placa utilizada para realizar un macro análisis de fractura fue A 02. Donde se aprecia la trayectoria del proyectil balístico, el cual deja daños creados por la energía con la que impacto (aproximadamente 493,5 [J]) y sus ondas expansivas. En la figura 20 podemos apreciar extensas delaminaciones en todas sus capas alrededor del impacto con un diámetro aproximado de 38[mm], en la entrada del proyectil se puede apreciar una forma tipo V donde inicia la trayectoria de la bala, en la sección demarcada con un círculo se aprecia la ruptura de la matriz y fibra, al momento de la salida del proyectil se destaca el desgarro de la fibra de kevlar y por lo tanto también de la matriz.

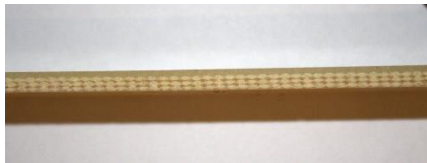


Figura 19. Perfil de fase del compuesto. Fuente: Autor.

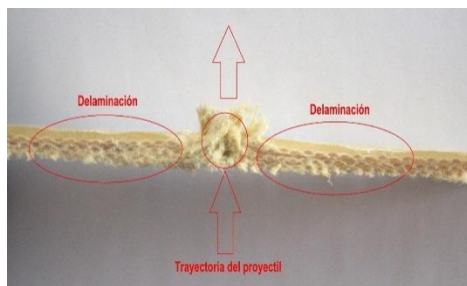


Figura 20. Perfil de trayectoria del compuesto. Fuente: Autor.

Calculo densidad superficial y del porcentaje de fibra en la matriz.

La densidad superficial es la densidad por área de un cuerpo compuesto por más de un material o gramajes diferentes como es en este caso su unidad de medida es  $[Kg/m^2]$ .

Para realizar el cálculo de  $v_f$  se utilizaron los siguientes datos de la tabla 5 remplazados en la Ecuación (2).

Tabla 5. Características del compuesto.

Características del compuesto												
Placa	Tipo de refuerzo	N° de capas	Espesor refuerzo [mm]	Espesor compuesto [mm]	Área superficial [m²]	Peso [Kg]	Densidad superficial [ $\frac{Kg}{m^2}$ ]	Wm [g]	Pm [ $\frac{g}{cm^3}$ ]	Wj [g]	Pm [ $\frac{g}{cm^3}$ ]	Fracción volumétrica [%]
0	Tejido	3	1	-	0,039	0,0485	1.244	-	-	48,5	1,44	100
A01	Tejido	3	1	2,65	0,039	0,133	3,41	84,5	1,051	48,5	1,44	29,52
A02	Tejido	3	1	2,83	0,039	0,133	3,41	84,5	1,051	48,5	1,44	29,52
A03	Tejido	3	1	3	0,039	0,139	3,56	90,5	1,051	48,5	1,44	28,12
A04	Tejido	3	1	3	0,039	0,136	3,49	87,5	1,051	48,5	1,44	28,80
A05	Tejido	3	1	2,8	0,039	0,133	3,41	84,5	1,051	48,5	1,44	29,52

Fuente: Autor.

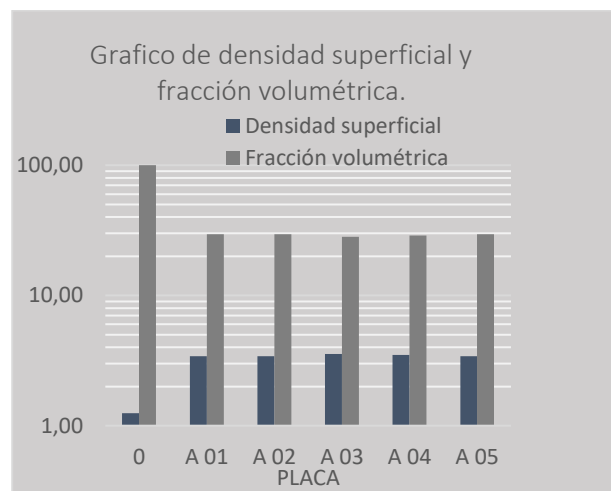


Figura 16. Gráfico de densidad superficial y fracción volumétrica. Fuente: Autor.

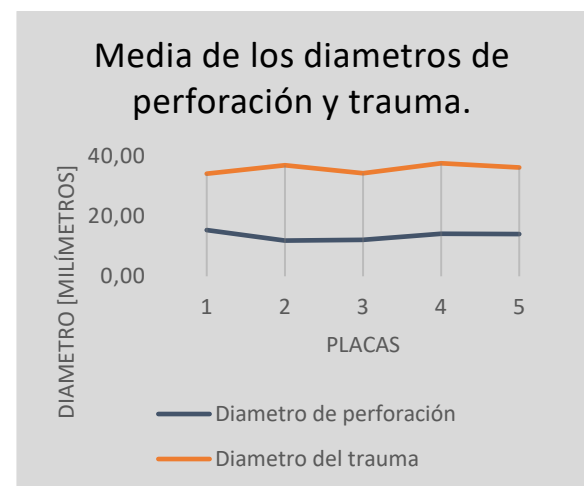


Figura 17. Medida de los diámetros de perforación y trauma. Fuente: Autor.

A partir de la tabla 5 y en el gráfico de barra figura 17, se puede observar que los valores de densidad superficial y fracción volumétrica de los compuestos A01, A02, A03, A04 y A05 son similares con una

desviación  $\pm 0,56[\frac{kg}{m^2}]$  y  $\pm 0,06\%$  respectivamente; lo que confirma que la fabricación de las 5 placas fue homogénea y validándose el comportamiento balístico similar en todas las placas.

### 3.5.1 Análisis del proyectil

El proyectil de 9[mm] Full Metal Jacket su significado es bala de metal con un encamisado de otro metal como lo es cobre en este caso.

La bala que se muestra en las Figuras 21, corresponde a un de los proyectiles después de haber sido impactado con una placa. En la que se observa visualmente aplastamiento en la punta/deformación plástica provocada por el impacto con el material. Lo que nos indica que la estructura del refuerzo absorbió energía del impacto, ofreciendo resistencia al daño del proyectil. Se puede comparar con la bala de la figura 22 la cual no fue percutada.

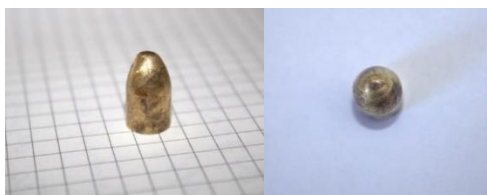


Figura 21. Cabeza de bala 9[mm] después del impacto.  
Fuente: Autor.



Figura 22. bala 9[mm]. Fuente: Autor.

## 4 Conclusiones.

- Se lograron fabricar por laminación manual 5 placas compuestas por resina epoxi y kevlar balístico 29 con apilamientos de 2 capas de 460 y otra de 400 gramos, sin presentar delaminaciones visibles ni grietas o fisuras.
- El porta placas fabricado garantizó una sujeción firme en el ensayo de impacto balístico con el proyectil.
- Todas las placas ensayadas fueron completamente perforadas por el proyectil.

- La deformación plástica en la punta de la provocada por el impacto con el material compuesto nos indica la resistencia ofreciendo al daño del proyectil.
- La ligera deformación de la punta del proyectil impactado en el material compuesto nos demuestra la absorción de energía de impacto en el trayecto del trauma.
- La absorción de energía al impacto del compuesto con proyectiles de plomo de calibre 5,5[mm] fue de 43 [J]
- Según el análisis macroestructural después del impacto balístico en las placas del compuesto epoxi/kevlar se observó desprendimiento de resina en la parte posterior, delaminación interior; fractura frágil/desgarro de la fibra y eliminación de la matriz.

### 4.1 Recomendaciones:

- Se debe considerar en el proceso de fabricación:
- Utilizar rodillo antiespuma en el moldeado del material.
- En el cálculo de la resina considerar mayor cantidad a la necesaria para evitar espacios vacíos/burbujas de aire.
- Colocar las placas dentro del molde o dispositivo durante el postcurado.

### 4.2 Trabajo futuro.

- Rediseño del porta placas que garantice mayor altura y recolecte el proyectil después del impacto.
- Diseñar, fabricar y caracterizar de resina epoxi/tejido de kevlar con mayor número de capas y gramajes.
- Determinar el comportamiento como material balístico según norma.

## 5 Referencias

El estilo de las citas utilizado a lo largo del texto es APA. El orden de las referencias coincide con el orden de aparición de las citas en el texto.

- [1] Tasdemirci, A. (Junio de 2012). ScienceDirect. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734743X11001953>
- [2] Monteiro, S. (03 de Diciembre de 2014). Springer Link. Obtenido de Springer Link: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-014-2678-2>



[3] Wilkins, M. (1978). Semantic scholar. Obtenido de Semantic scholar:  
<https://www.semanticscholar.org/paper/Mechanics-of-penetration-and-perforation-Wilkins/3f0759b915fcfb5bbc249288d37c76c1abd51e4b>

[4] Yadav, S. (Mayo de 2003). ScienceDirect. Obtenido de ScienceDirect:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734743X02001227>

[5] Rahbek, D. (enero de 2017). ScienceDirect. Obtenido de ScienceDirect:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X16302421>

[6] Msyseless, M., Goldsmith, W., Virostek, S., & Finnegan, S. (Junio de 1987). ASME Digital Collection. Obtenido de ASME Digital Collection:  
<https://asmedigitalcollection.asme.org/appliedmechanics/article-abstract/54/2/373/388690/Impact-on-Ceramic-Targets?redirectedFrom=fulltext>

[7] Chawla, K. (2012). Composite Materials science and Engineering. Springer.