

*Artículo original sobre tesis doctoral*

# Blindaje liviano opaco compuesto

## Composite Opaque Light Armor

*Carlos Horacio Scala<sup>(1)</sup>*

<sup>(1)</sup>Facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de la Matanza.

[carloshscala@gmail.com](mailto:carloshscala@gmail.com)

### **Resumen:**

La constante evolución de las armas de fuego, requieren distintas técnicas y formas de detención de los proyectiles cuyas velocidades pueden alcanzar hasta los 1500 m/s, lo cual hace un elemento mortal para los seres vivos. El estudio realizado en esta tesis doctoral, está abocado y enfocado a constituir un blindaje innovador que presente características balísticas de excelencia, pero que a su vez sea un elemento liviano que permita su traslado con facilidad cuando se encuentre montado sobre los vehículos que va a proteger. Para la constitución de este blindaje polimérico, se pensó en el estudio del comportamiento del poliuretano expandido reforzado con fibras de carbono (HM), fibras de vidrio tipo (E) y fibras de poliamida de marca comercial que Kevlar (49). Las principales características buscadas para este blindaje, es la liviandad y alta eficiencia en la detención de los proyectiles balísticos hasta niveles RB3 según lo dispuesto por las normas del R.E.N.A.R. ahora (A.N.Ma.C.) MA-01 y MA-M02. Una posible solución a este problema es aplicar una matriz con características poliuretánicas, que proteja la fibras y a su vez le otorgue un armado estructurado al blindaje para poder colocar el mismo en la autoparte que corresponda.

**Abstract:**

The constant evolution of firearms requires different techniques and forms of stopping the projectiles whose speeds can reach up to 1500 m/s, which makes them a deadly element for living beings. The study carried out in this doctoral thesis, is aimed at and focused on constituting an innovative armor that presents ballistic characteristics of excellence, but that in turn is a light element that allows it to be easily moved when it is mounted on the vehicles that it is going to protect. For the constitution of this polymer armor, it was considered the study of the behavior of expanded polyurethane reinforced with carbon fibers (HM), glass fibers type (E) and commercial brand polyamide fibers than Kevlar (49). The main characteristics sought for this armor is lightness and high efficiency in stopping ballistic projectiles up to RB3 levels as provided by the R.E.N.A.R. now (A.N.Ma.C.) MA-01 and MA-M02. A possible solution to this problem is to apply a matrix with polyurethane characteristics, which protects the fibers and in turn provides a structured reinforcement to the armor to be able to place it on the corresponding auto part.

**Palabras claves:** *Blindaje, poliuretano, Kevlar, carbono, fibra de vidrio.*

**Key Word:** *Armor, polyurethane, Kevlar, carbon, fiberglass.*

**Colaboradores:** *Ing Ariel Ebrecht.*

### III. MATERIALES Y MÉTODOS.

#### I. CONTEXTO

Industria armamentista. Tesis doctoral desarrollada para la protección balística aplicada en vehículos policiales y civiles con nivel de resistencia 3 (RB3). Estudios realizados en la FIUBA, FIUNLZ y FIE.

#### II. INTRODUCCIÓN

La protección balística [1] en los seres humanos contra proyectiles de armas de fuego, es un desafío constante en los tiempos actuales en que vivimos. El desarrollo armamentista, crece a pasos agigantados colocando en el mercado legal e ilegal, armas portátiles de puño que disparan proyectiles cuyos calibres, alcanzan velocidades que oscilan entre los 280 m/s, hasta los 800 m/s e inclusive mayores, es decir que se desplazan en una atmósfera distinta a la O.A.C.I. (atmósfera donde la temperatura ambiente es de 15 °C, la presión atmosférica es de 1013,2

mbar y una presión de 1,225 kg/m<sup>2</sup>) que además permite alcanzar velocidades subsónicas y supersónicas con tan solo variar la cantidad de pólvora, la forma del proyectil y tipo de pólvora utilizada en la proyección de los mismos. Uno de los problemas observados, es la ausencia de una doctrina que avale un desarrollo científico sobre blindajes basados en materiales compuestos, sobre todo con matrices conformadas por polímeros del tipo poliuretánico.

Actualmente en las fuerzas de seguridad, llámese fuerzas policiales tanto municipales como federales, muchas de las protecciones balísticas existentes, se encuentran confeccionadas en fibras poliaramídicas desnudas, es decir una placa sobre otra cosida, lo cual no existe una correcta aglomeración del material protector y al mismo tiempo se produce una gran absorción de humedad ambiente y por inclemencias climáticas. Esta humedad, ocasiona que la fibra aramídica Kevlar (49); muy higroscópica por cierto; se comience a degradar con el paso del tiempo, produciendo acumulación de moléculas de agua entre las tramas de las telas y por ende disminuyendo el coeficiente de fricción tela-proyectil que es fundamental para la detención del mismo.

#### Poliol SD441.

El polioliol, es uno de los elementos necesarios para la conformación de una espuma poliuretánica [2]. Uno de los polioliols existente en el mercado mundial es el SD441(fig:1) [3], el cual es fabricado también por la empresa Huntsman, y presenta las siguientes características:

Poliol SD441	
Apariencia	color ámbar
Peso Molecular	550
OH	440
Funcionalidad	4,3
Peso equivalente	127
Viscosidad cps a 25°C	5500
Gravedad específica a 25°C	1.08

Tabla 1: Datos técnicos del polioliol SD441.

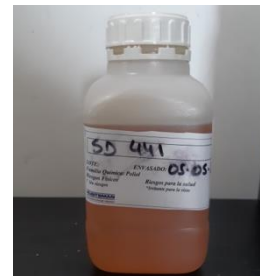


Figura 1: Polioliol SD441.

#### Rubinate 5005/SUPRASEC 5005, isocianato para sistemas de poliuretanos.

El Rubinate 5005 (fig:2), es un isocianato difenilmetano polimérico utilizado junto con una resina formulada para producir espumas rígidas de poliuretano. Es un líquido marrón oscuro con un olor levemente aromático fabricado y distribuido por la empresa Huntsman [3]. El Rubinate 5005 (tabla:2) es uno de los componentes de los sistemas de poliuretanos que se usa en la producción de poliuretano aislante de alta eficiencia. Dicho material, es apto para ser usado en procesos tales como el sprayado, inyección, laminación continua y en bloque.

CARACTERISTICA	VALORES
Peso equivalente isocianato	133
Contenido NCO (%)	30,2-31,5
Acidez (ppm HCl)	50-250
Viscosidad (25° C)	170-250 cps
Gravedad específica (25° C)	1,23
Punto de inflamación (medido en Copa Cleveland)	218° C
Presión de vapor a 25° C, mm Hg máximo	$1 \times 10^{-4}$

Tabla 2: Datos técnicos del isocianato Rubinate 5005.

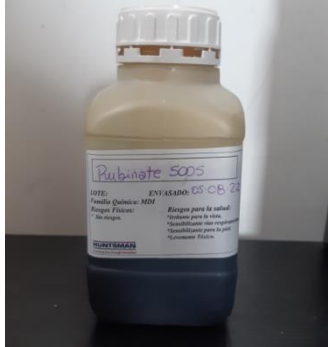


Figura 2: Isocianato Rubinate 5005.



Figura 3: Fibra de carbono (HM).

### Fibras de Kevlar (49).

El Kevlar (49) (fig:4), es una fibra de aramida de alta resistencia a la tracción longitudinal y térmica [5]. Presenta un alto módulo de elasticidad pero una rotura dúctil (tabla:4), distintos a las fibras de carbono que son de rotura frágil. Las fibras de Kevlar (49) son las que mejores prestaciones presentan para ser embebidas por matrices poliuretánica por su capacidad de adherencia.

### Fibra de Carbono (HM).

Son fibras ligeras y fuertes con excelente resistencia química. Las propiedades mecánicas de estas fibras, se encuentran determinadas por la configuración atómica de las cadenas de carbono y sus conexiones que son similares a la estructura cristalina del grafito [4]. Las propiedades de la fibra de carbono (tabla:3), dependen de la materia prima y del proceso utilizado para su fabricación. Existen dos materias primas principales para la fabricación de las fibras de carbono:

- a. El Poliacrilonitrilo (PAN).
- b. La brea.

Las fibras de carbono (HM) (fig:3), brindan mejores características a la fatiga de los materiales compuestos, que las fibras de vidrio por ser más rígidas, además la fatiga estática es menor que en otras fibras reforzadoras.

Propiedades de la fibra de carbono (HM).	
Diámetro de la fibra	8 $\mu$
Conductividad térmica	80 W/m K
Alargamiento de la ruptura	1
Coefficiente de Expansión Térmica - Longitudinal	$-1,3 \times 10^{-6} K^{-1}$
Coefficiente de Expansión Térmica - Transversal	$+25 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
Conductividad Térmica	$105 Wm^{-1} K^{-1}$
Densidad	1,83 g/cm <sup>3</sup>
Resistencia a la tracción	2,7 GPa
Módulo de tracción longitudinal	370 GPa

Tabla 3: Propiedades de la fibra de carbono (HM).

Propiedades del Kevlar (49)	
Densidad	1,44 g/cc
Resistencia a la tracción máxima	3000 MPa
Alargamiento a la rotura	3620 MPa
Módulo de tracción	2,4 %
Módulo de Poisson	0,36
Tenacidad	112 GPa
Capacidad de calor específico	1,42 J/g-°C
Conductividad térmica	0,0400 W/m-K
Temperatura máxima de uso	177°C

Tabla 4: Datos técnicos del Kevlar (49).



Figura 4: Fibras de aramida Kevlar (49).

### Fibra de vidrio tipo (E) Roving 600.

La fibra de vidrio Roving 600 [6], se fabrica a partir de una mezcla de arena, piedra caliza y otros compuestos oxidados (fig:5). El principal componente químico es el sílice (46% - 75% )  $\text{SiO}_2$ . Si se controla el proceso de fabricación, se puede obtener distintos tipos de fibras de vidrio, entre ellas la fibra tipo (E) (tabla:5).

Propiedades de la fibra de vidrio (E) Roving 600	
Conenido de relleno	1,80 g/cc
Contenido de fibra	47 %
Fuerza de tracción	390 MPa
Espesor	50 $\mu$
Alargamiento a la rotura	2,2 %
Módulo de tracción	21,5 GPa
Fuerza flexible	585 MPa
Módulo de flexión	18,7 GPa
Coficiente de Poisson	0,17
Impacto Charpy sin muescas	14,5 J/ $\text{cm}^2$
Punto de fusion	220°C

Cuadro 5: Datos técnicos de la fibra de vidrio (E).



Figura 5: Fibra de vidrio (E).

### Matriz poliuretánica.

La urea o carbamida es un compuesto orgánico, que tiene como base a isocianatos y polioles [7], y se representa con la fórmula química  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ . En cada una de las formulaciones realizadas (tabla:6), se tomaron las temperaturas ambientales con que se encontraban los fluidos (poliol e isocianato) al momento de hacer la mezcla, y una vez unidos estos componentes, se obtuvieron los tiempos y temperaturas de gelado (curado) y los tiempos y temperaturas que duró cada reacción. Las partes en peso de las formulaciones fueron las siguientes:

Pp Polioli	Pp Iso	Pp Total	Polioli [g]	Isocianato [g]	Formulación
100	100	200	2,5	2,5	1
110	100	21	2,62	2,38	2
120	100	220	2,73	2,27	3
130	100	230	2,82	2,18	4
150	100	250	3	2	5
100	110	210	2,38	2,62	6
100	130	230	2,18	2,82	7
100	150	250	2	3	8

Tabla 6: Partes en pesos de isocianato y polioli.

Una vez determinada la formulación correcta de la matriz poliuretánica (tabla:6), se procedió a la fabricación de las placas compuestas reforzadas con las diferentes fibras mencionadas. Para ello se utilizó un molde de aluminio (fig:6), el cual consta de una placa superior o tapa y una parte inferior o base. Este molde se calienta a 40 °C en un horno convectivo, para el secado del desmoldante previamente impregnado.

Mediante la regla de las mezclas [8], se determinan los pesos y los volúmenes de la matriz poliuretánica y de las tres fibras reforzadoras.

$$m_{Tc} = \delta_f V_f + \delta_M V_M$$

donde:

- $m_{Tc}$ : masa total del material compuesto.
- $\delta_f$  : densidad de la fibra reforzadora.
- $\delta_M$  : densidad de la matriz.
- $V_f$  : volumen de la fibra reforzadora.
- $V_M$  : volumen de la matriz.

### Fabricación de placas compuestas.

F r = 50 % (fibra reforzadora)

M = 50 % (Matriz)

$$P_{Tfk} = V_{Tfk} \cdot \delta_{fk}$$

$P_{Tfk}$  : peso total de la fibra de Kevlar

La cantidad de láminas biaxiales para un 50% de fibra será de :

$$C_{Lfk} = \frac{P_{Tfk}}{P_{medido}}$$

llamando a  $P_{medido}$  el peso obtenido en una balanza de precisión de una lámina biaxial de fibra de Kevlar y  $C_{Lfk}$  la cantidad de láminas para un 50 % de refuerzo de matriz. Las dimensiones del molde utilizado son:

Dimensiones	Medidas
Ancho pared interior	19,4 cm
Alto pared interior	19,4 cm.
Profundidad	5 mm

Tabla 7: Dimensiones del molde.



(a) Placa macho.

(b) Placa hembra.

Figura 6 : Molde para fabricar las placas compuestas.

### Proceso de curado de la probeta balística.

Una vez terminado el armado del sándwich (telas reforzadoras y la matriz poliuretánica) (fig:7), se coloca la tapa del molde metálico (fig:6), es decir la parte denominada macho.

Esta tapa ejercerá una cierta presión superficial sobre el compuesto, permitiendo una mejor distribución de la matriz y ayudando a la eliminación de las burbujas de aire que permanezcan en el tramado de la tela. Una vez que se tapó la probeta conformada, se procede a introducirla en la prensa marca " CARVER" (fig:8) la cual permite aplicar una presión sobre las paredes externas del molde, tanto en la parte superior como en la base del mismo, conjuntamente con una cierta temperatura que ayudará a la gelificación de la matriz polimérica.



(a) Matriz PUI.

(b) Fibra de Kevlar (49).

Figura 7: Placa compuesta FKPU1.



Figura 8: Prensa para gelado de la matriz poliuretánica.

## IV. RESULTADOS Y OBJETIVOS.

Las reacciones obtenidas durante las ocho formulaciones practicadas (fig:9), mostraron temperaturas bajas durante la reacción exotérmica, prácticamente similares a las temperaturas ambientes (fig:11), con tiempos de curado largos en el orden de 60 minutos o superiores dependiendo de los porcentajes en peso de cada uno de sus componentes. Las muestras obtenidas (fig:10), presentan una mayor rigidez y dureza como así también morfologías ovoides y esféricas en sus poros, con tamaños de áreas aceptables en el orden de los  $600 \mu m^2$  (tabla:8).

Los volúmenes obtenidos en cada una de las formulaciones, presentan una disminución del espumado entre el 40 % y el 50 % con respecto a las combinaciones desarrolladas con polioles de otras marcas comerciales, como ser el Rubitherm 14404 y el polioliol de colada 15000, además una prolongación en el tiempo de curado de la matriz, remarcando que este alargamiento del transiente, aparece cuando se trabaja con el polioliol SD441, lo cual es beneficioso desde el punto de vista de la fabricación del material compuesto laminado, ya que permite una mejor distribución de la mezcla poliuretánica entre las fibras de

las telas reforzadoras, por ende una mejor adherencia entre ellas.

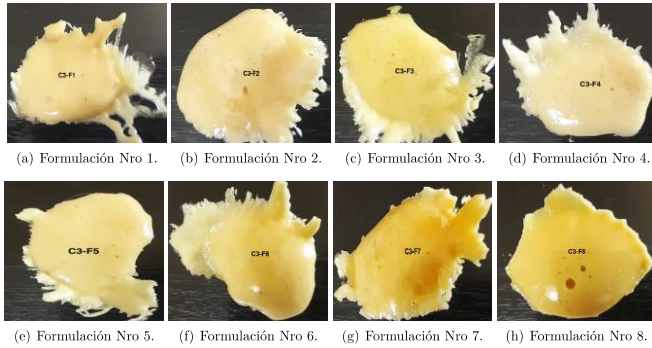


Figura 9: Espumado de las ocho formulaciones.

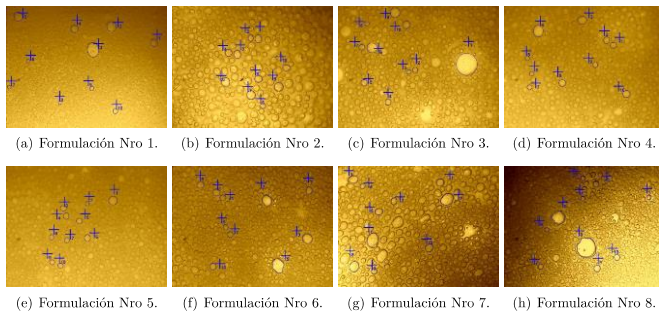


Figura 10: Vista microscópica de las formulaciones.

El conjunto de las temperaturas y tiempos de curado de cada formulación, muestra curvas con morfologías similares, a pesar de la variación en peso del polioli e isocianato (fig:12).

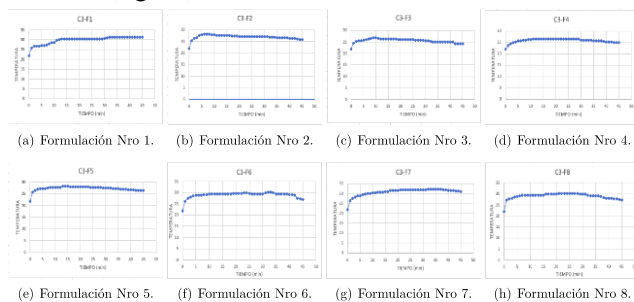


Figura 11: Curvas de temperaturas de curado de las ocho formulaciones.

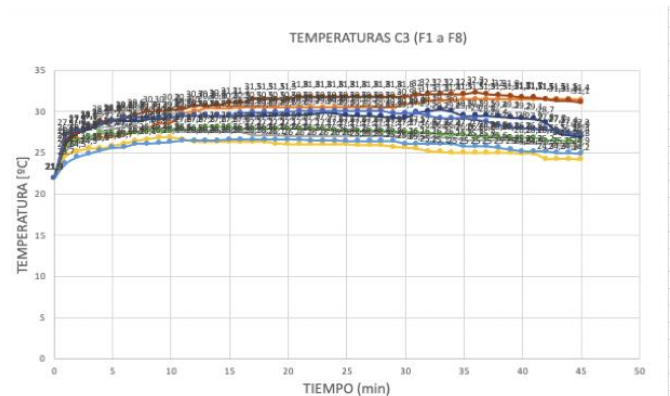


Figura 12: Comparación de las curvas de temperaturas en función del tiempo de curado de la matriz.

La homogeneidad que presentan estas formulaciones, es producto de la calidad y tipo de polioli e isocianato utilizado. Con respecto a la (fig:10 (b)) es la que presenta una mejor distribución de los alveolos, constituyendo una estructura homogénea comparada con el resto de las formulaciones, debido a que no se observan alveolos que se destacan por su excesivo tamaño tal es el caso de la (fig:10 (h)). Por otra parte la consistencia estructural que presenta esta subcombinación, es más sólida que las anteriores ya que el compuesto no se desgrana ni se rompen sus celdas al simple tacto, si no más bien todo lo opuesto.

Formulaciones	Promedios de las Areas [ $\mu\text{m}^2$ ]
1	637,4
2	658,1
3	1089
4	567,1
5	413,2
6	788,8
7	918,9
8	944,4

Tabla 8: Tamaños promedios de los alveolos.

Una vez que se seleccionó la formulación con la que se confeccionará el material compuesto, se comenzó con el armado de los mismos, utilizando diferentes telas reforzadoras como se explicó anteriormente. El resultado obtenido, condujo al material designado como FKPU1 (fig:13), FVPU1 (fig:13) y FCPU1 (fig:13), cuyo acrónimo determina el tipo de fibra reforzadora utilizada y el nombre de la composición de la matriz aglomerante.



Figura 13: Placa reforzada con fibra de Kevlar (49).



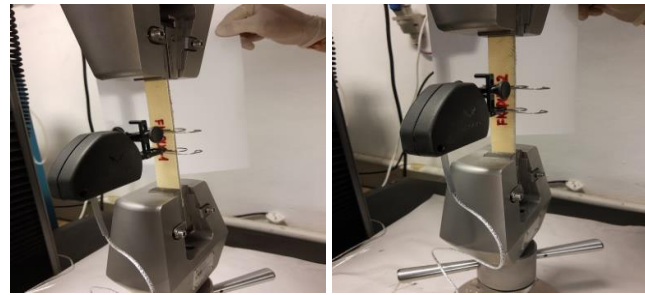
Figura 14: Placa reforzada con fibra de vidrio (E).



Figura 15: Placa reforzada con fibra de carbono (HM).

### Obtención de las constantes ingenieriles mediante ensayo de tracción uniaxial.

Considerando al material compuesto estudiado como si fuese un material cuasi-isotrópico, debido a la orientación de las fibras bidireccionales que actúan como reforzadoras [9] se practicaron los ensayos de tracción uniaxial (según las normas ASTM 3039/3039D) [10] [11] en los tres especímenes, con la finalidad de obtener algunas constantes ingenieriles de utilidad. El ensayo de tracción que se practicó inicialmente en el compuesto FKPU1 con extensómetro (fig:17), el cual permitió obtener la tensión máxima elástica y la tensión máxima de ruptura del material compuesto conjuntamente con el módulo de elasticidad longitudinal [13] (tabla:9).



(a)

(b)

Figura 16: Ensayo de tracción de una probeta FKPU1.

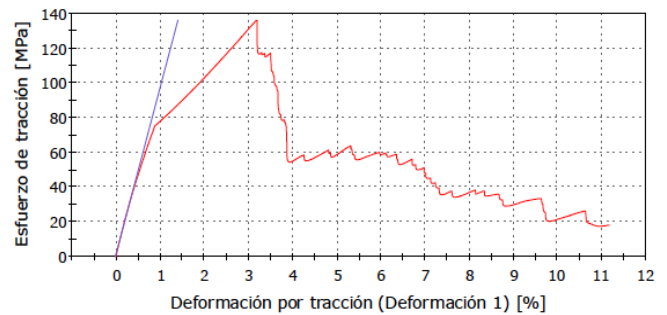


Figura 17: Curva tensión-deformación obtenida del ensayo de tracción de la probeta FKPU1.

DATOS	VALORES
PROBETA	FKPU1
MÓDULO DE YOUNG [MPa]	9606,09
CARGA MÁXIMA [N]	9053,84
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN [MPa]	135,99
DEFORMACIÓN MÁXIMA [mm/mm]	0,032
DEFORMACIÓN A LA ROTURA [%]	3,195

Tabla 9: Datos ingenieriles obtenidos del ensayo de tracción de la probeta FKPU1.



Figura 18: Vista frontal de la probeta FKPU1 ensayada.



Figura 19: Vista lateral de la probeta FKPU1 ensayada.



### Obtención de las constantes ingenieriles mediante ensayo de tracción uniaxial FCPU1.

El segundo ensayo de tracción, se llevó a cabo en una probeta cuyo espécimen que tiene una composición FCPU1, utilizando extensómetro (fig:20).

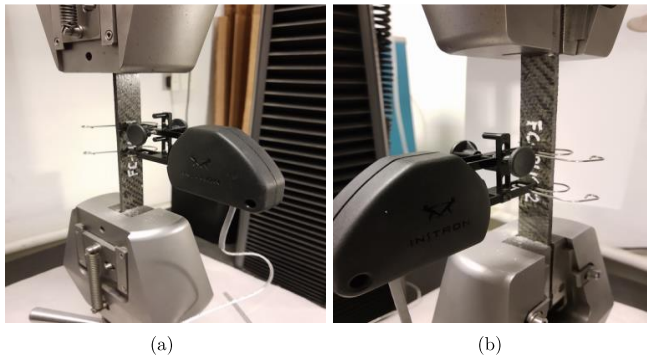


Figura 20: Ensayo de tracción de una probeta FCPU1.

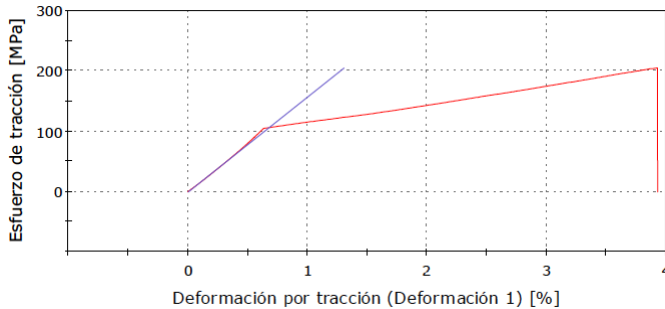


Figura 21: Curva tensión - deformación obtenida del ensayo de tracción de la probeta FCPU1.

DATOS	VALORES
PROBETA	FCPU1
MÓDULO DE YOUNG [MPa]	15683,76
CARGA MÁXIMA [N]	14717,35
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN [MPa]	204,20
DEFORMACIÓN MÁXIMA [mm/mm]	0,039
DEFORMACIÓN A LA ROTURA [%]	3,923

Cuadro 10: Datos ingenieriles obtenidos del ensayo de tracción de la probeta FCPU1.



Figura 22: Vista frontal de la probeta FCPU1 ensayada.



Figura 23:

Figura 4.109: Vista lateral de la probeta FKPU1 ensayada.

### Obtención de las constantes ingenieriles mediante ensayo de tracción uniaxial FVPU1.

El tercer ensayo de tracción, se llevó a cabo en una probeta de composición FVPU1 con extensómetro (fig:24).

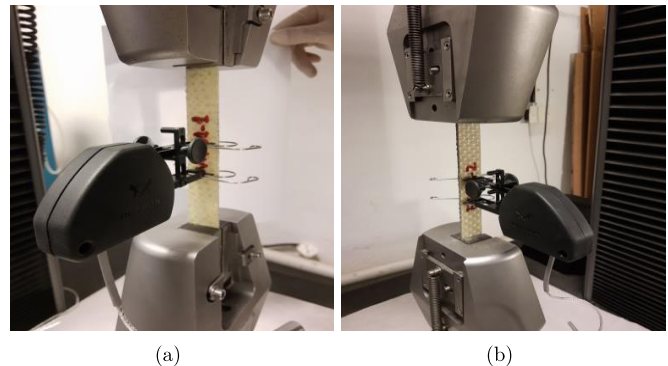


Figura 24: Ensayo de tracción en probeta FVPU1.

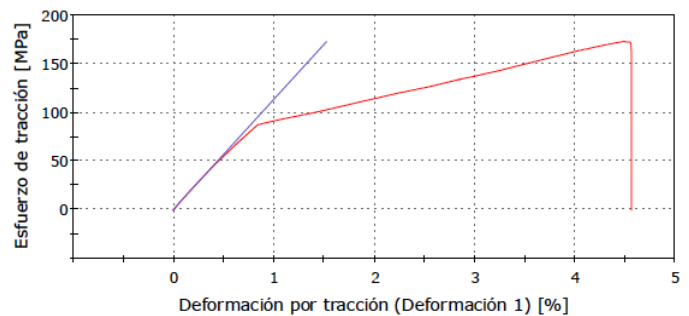


Figura 25: Curva tensión - deformación obtenida del ensayo de tracción de la probeta FVPU1.

DATOS	VALORES
PROBETA	FVPU1
MÓDULO DE YOUNG [MPa]	11246,74
CARGA MÁXIMA [N]	11884,95
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN [MPa]	172,52
DEFORMACIÓN MÁXIMA [mm/mm]	0,045
DEFORMACIÓN A LA ROTURA [%]	4,559

Cuadro 11: Datos ingenieriles obtenidos del ensayo de tracción de la probeta FVPU1.



Figura 26: Vista frontal de la probeta FVPU1 ensayada.



Figura 27: Vista lateral de la probeta FVPU1 ensayada.

### Simulación de impacto balístico sobre el blindaje (3XFCPU1+3XFK- PU1+3XFVPU1).

#### Resultados de la simulación:

Los resultados obtenidos durante las diferentes sesiones de tiro, efectuadas con proyectiles calibres 9mm, .357 Mg y .44 Mg todos ellos de alta velocidad (fig:28), fueron representados mediante simulaciones numéricas a través del software ANSYS 2022 R1 bajo licencia de la Facultad de Ingeniería de Lomas de Zamora [14], idóneo para el análisis de elementos finitos, permitiendo comparar los valores obtenidos de la realidad con los valores obtenidos de las diferentes simulaciones numéricas.

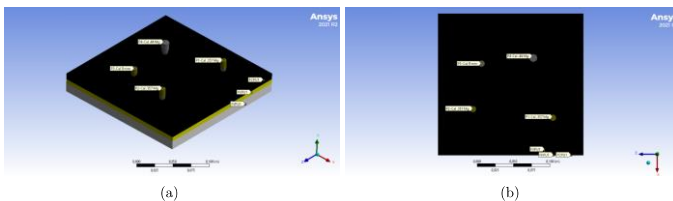


Figura 28: Impactos balísticos cal 9mm, .357 Mg y .44 Mg.

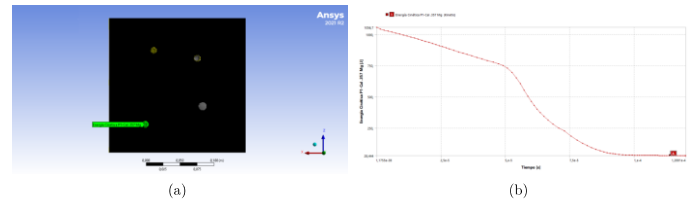


Figura 29: Energía cinética disipada (P1-Cal .357 Mg).

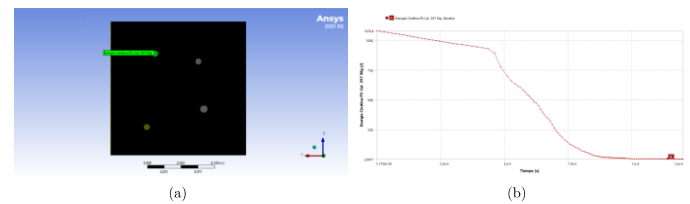


Figura 30: Energía cinética disipada (P2-Cal .357 Mg).

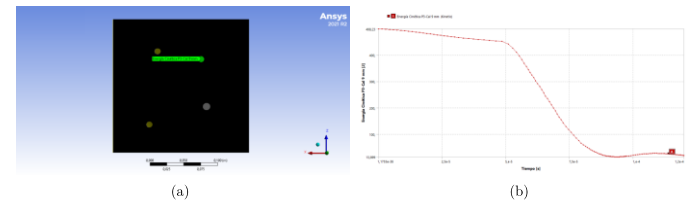


Figura 31: Energía cinética disipada (P3-Cal 9 mm).

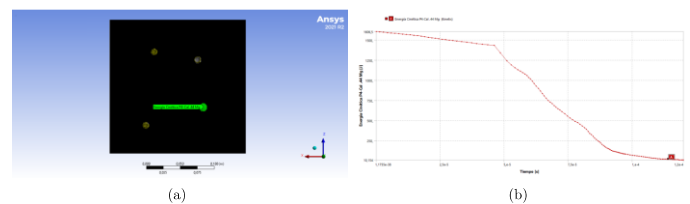


Figura 32: Energía cinética disipada (P4-Cal .44 Mg).

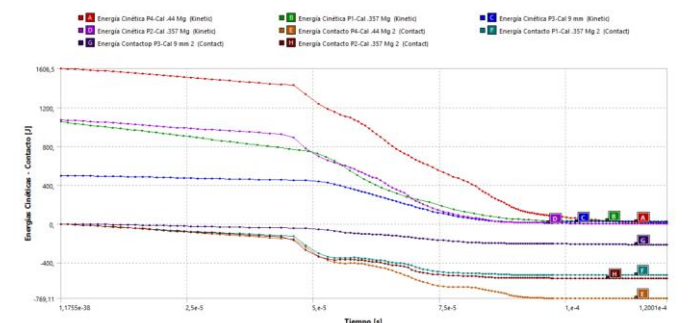


Figura 33: Unificación de los gráficos comparativos de energías de los proyectiles utilizados.

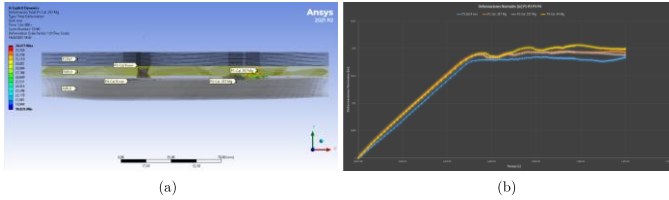


Figura 34: Deformaciones de los proyectiles disparados.

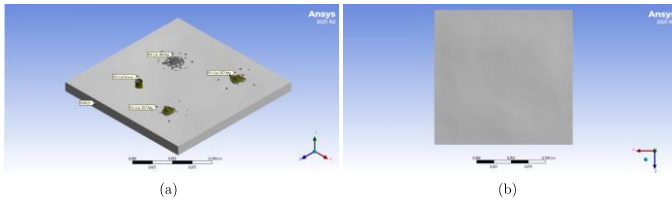


Figura 35: Vistas de las deformaciones normales (P1-Cal .357 Mg) (P2-Cal .357 Mg) (P3-Cal 9 mm) (P4-Cal .44 Mg) .

Proyectil	Calibre	EC <sub>entrada</sub> [J]	EC <sub>salida</sub> [J]	EC <sub>absorbida</sub> [J]	EC <sub>contacto</sub> [J]
P1	.357 Mg	1056,7	28,44	1028,26	769,11
P2	.357 Mg	1078,6	2,64	1075,96	561,1
P3	9 mm	499,23	13,89	485,34	528,82
P4	.44 Mg	1606,5	10,15	1596,35	214,54

Cuadro 12: Valores de las energías obtenidas de las simulaciones numéricas sobre la composición (3XF CPU1 + 3XFKPU1 + 3XFVPU1).

**Simulaciones balísticas de la especie (3XF CPU1 + 3XFKPU1 + 3XFVPU1).**

Según ensayos balísticos realizados anteriormente de manera individualmente sobre cada especie, se determinó que la composición más eficaz será aquella conformada por tres placas de F CPU1, más tres placas de FKPU1, más tres placas de FVPU1 (fig:36). Esta determinación, se concluyó además de los estudios realizados sobre los impactos balísticos individuales, sobre la performance que tiene cada una de las telas que refuerzan a este blindaje. En primera instancia, el carbono (HM), interviene con el proyectil actuando de manera más rígida disipando en un amplio porcentaje la energía cinética con la que llega éste al blindaje, transformando dicha energía en energía disipada en forma de ondas de choque que se trasladan

por el material compuesto (fibras) desde el punto de impacto hacia los extremos de la placa, donde se encuentran las condiciones de contorno tipo Dirichlet.

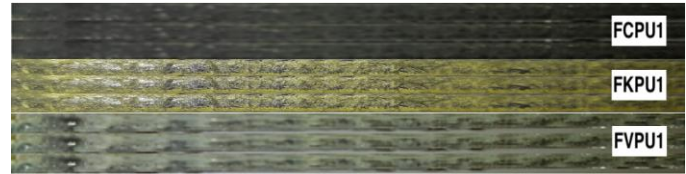


Figura 36: Orden de las placas que conforman el paquete balístico.

Realizados los disparos en el correspondiente “potro de tiro” en el laboratorio de ensayos balísticos de la Facultad de Ingeniería del Ejército Argentino, se obtuvieron las velocidades de impacto de cada uno de los proyectiles, a través de un instrumento de medición de velocidades llamado cronógrafo, el cual en el momento en que el proyectil cruza el primer sensor infrarrojo, activa un temporizador, y cuando cruza el segundo sensor lo desactiva, con lo cual conociendo la distancia de separación de éstos y mediante una computadora interna, se puede obtener la velocidad de desplazamiento del proyectil (tabla:13). De esta manera se registran las velocidades de impacto de cada proyectil, lo que permite obtener la energía de desplazamiento de los mismos, ya que se conoce de manera muy precisa la masa de cada uno.

Nro	Vo [m/s]	Penetración	Resultados	Calibre	Obs	Nivel
1	368	Negativo	Ok	9x19	Baja Vel	RB2
2	448	Negativo	Ok	.357 Mg JSP	Alta Vel	RB2
3	446	Negativo	Ok	.357 Mg JSP	Alta Vel	RB2
4	439	Negativo	Ok	.44 Mg	Alta Vel	RB3

Tabla 13: Velocidades registradas de los proyectiles.

**Ensayos balísticos y análisis de daños de la composición (3XF CPU1 + 3XFKPU1 + 3XFVPU1).**

Se practicaron cuatro disparos sobre el blindaje conformado, de los cuales dos de ellos fueron realizados con proyectiles calibre .357 Mg, uno con calibre 9 mm y uno con calibre .44 Mg (fig:37). Los dos primeros, impactaron con velocidades similares, y los daños observados en los orificios de entrada mantuvieron áreas de dimensiones también similares. El disparo con calibre 9 mm, presentó una cavidad permanente mayor a las que

se apreciaron en los calibres .357 Mg y la superficie de impacto del calibre .44 Mg, produjo fisuras en el material del tipo radial, debido a que este proyectil, no posee un encamisado de latón, lo que produce una deformación mayor en el mismo, por ende una superficie de contacto mayor que la del resto de los proyectiles utilizados.

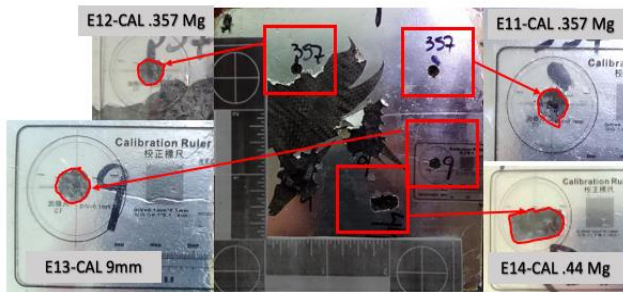


Figura 37: Orificios de entrada de los proyectiles calibres .357 Mg, 9 mm y .44 Mg en la especie FCPU1.

Daños similares, se observaron en la superficie de la placa compuesta conformada con fibras de carbono (HM), pero la diferencia es que las zonas dañadas son más grandes a las que se observaron en los orificios de entrada. Esto se debe a que el proyectil a medida que va ingresando en la placa compuesta, se va desestabilizando y disminuyendo la energía cinética.

Los orificios de salida, presentan desprendimiento de material compuesto (FCPU1) (fig:38) debido a que esta especie tiene una rigidez y fragilidad mayor a las que presenta la fibra de Kevlar (49) y la fibra de vidrio tipo (E).



Figura 38: Orificios de salida de los proyectiles calibres .357 Mg, 9 mm y .44 Mg en la especie FCPU1.

Los impactos de entrada en la especie FKPU1, también fueron de morfologías similares a las observadas en la especie FKPU1, es decir en la placa conformada con Kevlar (49).

Dicho compuesto, tiene la propiedad de envolver sus fibras alrededor del proyectil producto de su rotación y así disminuir esta velocidad, la cual utiliza para estabilizarse giroscópicamente, de esta manera se produce una desestabilización produciendo el aumento de la superficie de contacto de éste con la superficie blindada.

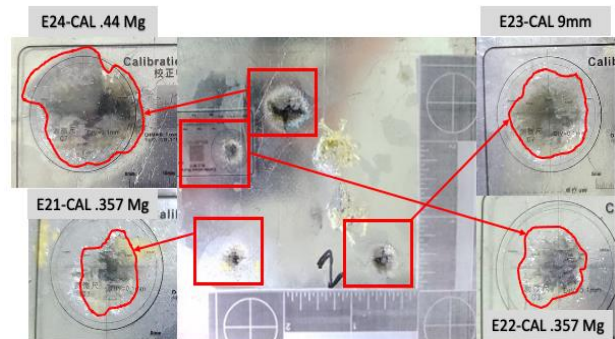


Figura 39: Orificios de entrada de los proyectiles calibres .357 Mg, 9 mm y .44 Mg en la especie FKPU1.

Respecto de los orificios de salida de los proyectiles en la especie FKPU1, los mismos produjeron más desprendimiento de matriz poliuretánica que de la fibra poliaramídica, esto demuestra que esta especie es menos rígida que la composición FCPU1.

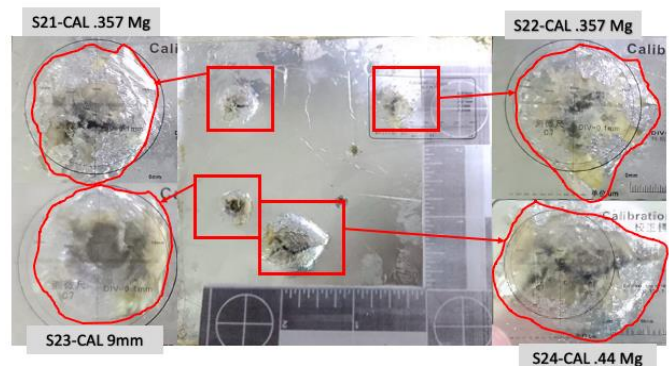


Figura 40: Orificios de salida de los proyectiles calibres .357 Mg, 9 mm y .44 Mg en la especie FKPU1.

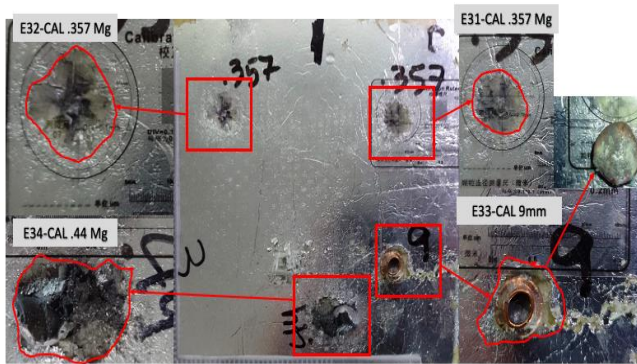


Figura 41: Orificios de entrada de los proyectiles calibres .357 Mg, 9 mm y .44 Mg en la especie FVPU1.

Finalmente en la superficie correspondiente a la tercera y última especie (FVPU1), se aprecian penetraciones en la cara anterior, pero no hay orificios de salida, lo cual permite afirmar que el blindaje compuesto (BLOC) es “APTO” para niveles de protecciones balísticas RB3.



Figura 42: Salida de los proyectiles calibres .357 Mg, 9 mm y .44 Mg en la especie FVPU1. (Fuente propia).

Los objetivos encaminados a desarrollar un blindaje innovador del tipo poliuretánico, fueron alcanzados ampliamente, puesto que el mismo cumplió con las exigencias determinadas en la norma MA01 y MA02 R.E.N.A.R. Como trabajos futuros, se debería trabajar en

los métodos de preformado que requiere cada diseño de automóvil, ya que el blindaje está contemplado para colocarse en la cara interior de cada autoparte.

El armado del material compuesto debería enfocarse a métodos más industriales, diseñando maquinarias idóneas para la mezcla y la aplicación del poliuretano sobre las diferentes láminas de telas reforzadoras.

El lugar de confeccionamiento del blindaje, debe ser libres de polvos, partículas de todo tipo y humedad, contemplando que el isocianato es extremadamente higroscópico como lo es el Kevlar (49), produciendo constantemente reacciones con las moléculas de agua existentes en el medio ambiente, es por ello que se recomienda guardarlo en recipientes cuyo espacio vacío, esté completado con nitrógeno.

## V. DISCUSIÓN

La composición estudiada de poliurea, resultó ser bastante homogénea desde el punto de vista de tamaños de los alveolos generados por el dióxido de carbono. El tamaño de los alveolos, fue determinado por el polioliol SD441, el cual además de determinar el tamaño de estos orificios, aportó un tiempo prolongado en el curado del poliuretano, lo que desde el punto de vista de la fabricación del material compuesto, aporta tiempo suficiente para la correcta distribución de la matriz entre el tramado de las fibras reforzadoras.

Las temperaturas de las reacciones de las poliureas generadas, fueron bastantes similares a las existentes en el medio ambiente. Esto hace que si bien existe un desprendimiento muy pequeño de calor exotérmico, no son temperaturas de las cuales debemos preocuparnos.

Las magnitudes de las energías cinéticas registradas durante los impactos de los proyectiles, estuvo entre los 700 Joules y los 1700 Joules, destacando el cal .44 Mg, el cual se aproximó al último valor mencionado.

Es fundamental colocar como primera placa receptora de los impactos balísticos, a la especie conformada por FVPU1. Esta especie, es la encargada de disminuir rápidamente la cantidad de movimiento que lleva el proyectil durante su vuelo, disipando esa energía cinética inicial de impacto, en ondas energéticas que se propagan a través del material compuesto en su conjunto.

Otro de los beneficios que presenta este blindaje, es la protección contra la humedad ambiente, la cual cuando humedece las fibras reforzadoras, como ser el Kevlar (49), esta humedad actúa como lubricante entre el proyectil y el blindaje disminuyendo así notablemente la capacidad de detención del mismo ante una situación de impacto de proyectiles de armas de fuego.

Cómo segundo elemento de detención en este blindaje, se utilizó la especie FKPU1, la cual presenta refuerzos aplicados por fibras poliméricas que tienden a enrollarse sobre la superficie externa del proyectil debido al movimiento rotacional y utiliza este para su estabilización a través de métodos giroscópicos, produciendo el efecto contrario, es decir desestabilizando al mismo.

La última especie se encuentra conformada por FVPU1. Esta composición, presenta la rigidez necesaria para detener por completo a los proyectiles. Además de asegurar la detención de éstos, permite garantizar que prácticamente no se desprenda material balístico, esto es muy importante, pues los materiales desprendidos del blindaje, sobre todo si es la placa que puede estar en contacto con las personas, podrían ocasionar lesiones. Con esta composición prácticamente no se detectaron esquirlas, permitiendo afirmar que es apto para ser usado además de blindaje para automóviles, para escudos balísticos de fuerzas especiales, donde la persona se encuentra en contacto directo con el material de protección balística.

## **VI. CONCLUSIONES.**

En este trabajo investigativo, se puede concluir que la matriz poliuretánica es apta e idónea para ser utilizada como matriz poliuretánica de un material compuesto el cual se pretende utilizar como protección balística.

Las adherencias de las fibras reforzadoras con esta poliurea, es muy buena, prácticamente no se observó debonding en las láminas de Kevlar (49), carbono (HM) y vidrio (E) Roving 600.

La composición poliuretánica manifiesta tiempos de curados acordes a los necesarios para llevar a cabo los procesos de fabricación del compuesto.

Otra de las ventajas de la formulación desarrollada, es que no presenta temperaturas elevadas durante la reacción exotérmica. Asimismo, en lo referente a la reacción de los

compuestos, no se observó el fenómeno de “scorching” durante la fase de espumado.

## **VII. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.**

### *A. Referencias bibliográficas:*

- [1] <http://www.anmac.gob.ar/pdf/2012MA02.pdf>
- [2] Grujicic, M, Pandurangan, B, Bell, W C, Cheeseman, B A, Yen, C F, Rando, C L (2011). Molecular-level simulations of shock generation and propagation in polyurea. *Materials Science and Engineering: A*, 528(10-11), 3799-3808.
- [3] <https://www.quimicaargentina.com/empresa-huntsman-ici-argentina-em-el-talar-de-pacheco-4807>
- [4] [https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/Kevlar\\_Technical\\_Guide\\_0319.pdf](https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/Kevlar_Technical_Guide_0319.pdf)
- [5] <https://www.pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/1995/p2/p2995000x031>
- [6] Sophia Do, Sophia Stepp, George Youssef, Quasi-static and dynamic characterization of polyurea microspheres reinforced polyurea matrix composite, *Materials Today Communications*, Volume 25, 2020.
- [7] Guo, H., Guo, W., Amirkhizi, A. V., Zou, R., Yuan, K. (2016). Experimental investigation and modeling of mechanical behaviors of polyurea over wide ranges of strain rates and temperatures. *Polymer Testing*, 53, 234–244.
- [8] Abrate S., *Impact of Composite Structures*, Cambridge University Press, UK, 1998.
- [9] Gibson, R: “Principles of composite material mechanics”, Ed. TaylorFrancis (2012).
- [10] Norma ASTM D-3039 –“Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”.
- [11] Norma ASTM 3039, Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials.
- [12] Sudipto Das, Iskender Yilgor, Emel Yilgor, Bora Inci, Ozgul Tezgel, Frederick L. Beyer, Garth L. Wilkes, Structure–property relationships and melt rheology of segmented, non-chain extended polyureas: Effect of soft segment molecular

weight, Polymer, Volume 48, Issue 1, 2007,  
Pages 290-301, ISSN 0032-3861.

[13] Jones, R.M., 1975. Mechanics of composite  
materials. Scripta Book Company Washington  
DC.

[14] <http://www.ansys.com>

[15] Todos los gráficos aportados, son  
provenientes de la investigación propia.

**Recibido:** 2023-10-17

**Aprobado:** A completar por el Editor. Formato: AAAA-MM-DD

**Hipervínculo Permanente:** <https://doi.org/10.54789/reddi.8.2.7>

**Datos de edición:** Vol. 8 - Nro. 2 - Art. 7

**Fecha de edición:** Formato: AAAA-MM-DD

