

**DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ  
POLIMÉRICA PARA LA PROTECCIÓN CONTRA PROYECTILES**

**TRABAJO DE GRADO**

**AUTORES**

**ALEJANDRO ISAZA RESTREPO  
SANTIAGO VICENTE JIMENEZ**

**ASESOR**

**JOSE LUIS MEJIA MONTERO**

**CO ASESOR**

**MAURICIO BETANCUR MUÑOZ**

**INGENIERIA DE DISEÑO DE PRODUCTO**

**UNIVERSIDAD EAFIT**

**MEDELLIN**

**OCTUBRE 2011**

# Contenido

	Pagina
<b>1. Anteproyecto.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Contexto y caracterización del problema.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos del proyecto.....</b>	<b>3</b>
1.2.1. Objetivo General.....	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
<b>1.3. Justificación.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4. Antecedentes.....</b>	<b>5</b>
<b>1.5. Metodología.....</b>	<b>7</b>
<b>1.6. Resultados y productos esperados del proyecto.....</b>	<b>9</b>
<b>1.7. Identificación de la innovación propuesta.....</b>	<b>10</b>
<b>1.8. Productos entregables.....</b>	<b>11</b>
<b>2. Introducción.....</b>	<b>11</b>
<b>3. Estado del Arte.....</b>	<b>12</b>
<b>3.1. Historia.....</b>	<b>12</b>
<b>3.2. Municiones.....</b>	<b>15</b>
3.2.1. Munición de pistola.....	16
3.2.2. Munición de rifle.....	18
3.2.3. Munición de armas pesadas.....	19
<b>3.3. Materiales para blindajes.....</b>	<b>19</b>
3.3.1. Aceros.....	20
3.3.2. Cerámicos.....	21
3.3.3. Resinas.....	22
3.3.4. Fibras Sintéticas.....	22
3.3.4.1. Fibras de aramida.....	23
3.3.4.2. Fibra de vidrio.....	25
3.3.4.3. Fibras de PE alto peso molecular.....	26
<b>3.4. Configuración de blindajes.....</b>	<b>27</b>
<b>3.5. Evaluación de configuraciones.....</b>	<b>29</b>
3.5.1. Evaluación del comportamiento balístico de materiales compuestos reforzados con fibras sintéticas.....	30
3.5.2. Evaluación del comportamiento balístico en placas metálicas.....	32
<b>4. Desarrollo experimental.....</b>	<b>34</b>
<b>4.1. Selección de materiales.....</b>	<b>34</b>

4.1.1.	Aceros.....	35
4.1.2.	Fibras sintéticas.....	36
4.1.3.	Resinas.....	37
4.2.	Materiales empleados en las pruebas.....	38
4.2.1.	Placas.....	38
4.2.2.	Municiones.....	39
4.2.2.1.	9mm Parabellum.....	39
4.2.2.2.	5.56mm.....	40
4.3.	Caracterización de materiales.....	40
4.4.	Método experimental.....	42
4.5.	Fabricación de muestras.....	46
4.6.	Fabricación del soporte para las pruebas.....	49
4.7.	Prueba.....	50
4.7.1.	Prueba preliminar.....	50
4.7.2.	Análisis técnicos iniciales.....	51
4.7.2.1.	Primera etapa.....	52
4.7.2.2.	Segunda etapa.....	52
4.7.2.3.	Tercera etapa.....	53
5.	Análisis de resultados.....	54
5.1.	Primera etapa.....	56
5.2.	Segunda etapa.....	57
5.3.	Tercera etapa.....	59
5.4.	Análisis general para laminas metálicas.....	61
5.5.	Análisis general para materiales compuestos.....	64
6.	Selección de materiales y configuración.....	65
7.	Implementación de una mejora.....	69
8.	Prueba de campo final.....	71
9.	Conclusiones.....	74
10.	Recomendaciones.....	77
11.	Bibliografía.....	79

## **1. Anteproyecto**

### **1.1. Contexto y caracterización del problema**

Durante años el conflicto armado en Colombia ha revelado la capacidad bélica y adaptativa de los grupos terroristas organizados, en cuanto a las acciones concretas para anular y desequilibrar a las fuerzas armadas colombianas. A pesar de las grandes inversiones realizadas en personal, organización y actualización de equipo militar realizadas por el gobierno colombiano, se encuentra un déficit concreto en el campo de acción, considerando que el personal operativo del ejército se encuentra expuesto a una gran cantidad de condiciones y circunstancias en las que sus vidas corren peligro; además en el curso de estos atentados el personal civil también se ve constantemente afectado de forma directa e indirecta, y por ello tanto se vuelve imperativo tomar acciones para la solución de estos eventos.

Aunque el enfoque de este problema puede ser abordado desde diversas ópticas y probablemente, deban ser consideradas múltiples alternativas, es esencial que los individuos que se encuentran en situaciones potencialmente peligrosas dispongan de un blindaje adecuado a través de un material que pueda ser utilizado en diferentes aplicaciones asegurando así su protección, permitiendo así una mayor eficiencia en los operativos militares cuyos resultados se verán claramente reflejados en bienestar civil.

Actualmente, se encuentran en uso algunas alternativas para la protección del personal militar aplicadas a múltiples productos; en el área de blindaje de vehículos terrestres se emplea protección balística haciendo uso de aceros especializados, fibras sintéticas y polímeros reforzados. Estos aunque logran la protección bajo situaciones de asalto con arma de fuego hasta ciertos niveles, comprometen el peso de los vehículos causando un sobre costo en combustible y pérdida de rendimiento, por lo que muchas veces no es viable la implementación de su blindaje o no logran detener armamento de penetración, por lo tanto se crea una brecha que permite al terrorismo hacer uso de diversos métodos para anular fuerzas armadas móviles desprovistas de un blindaje adecuado.

Podría considerarse aplicable el uso de un refuerzo al blindaje ya existente, por medio de las técnicas comerciales, pero esto agregaría un peso y un costo inviable para los propósitos requeridos por las fuerzas públicas. Paralelo a este problema se presenta la situación de los vehículos aéreos donde la variable peso se vuelve más crítica, pero siendo consistente con el desempeño de estos es todavía más pertinente generar un blindaje adecuado a las circunstancias que se han dado en los últimos años. Finalmente, se presenta la situación de la protección personal, caso en el cual se halla la mayor cantidad de falencias ya que el individuo es vulnerable por diversos puntos y las protecciones existentes, no cumplen su función en los incidentes más frecuentes.

Abordando los requerimientos a nivel de protección frente a proyectiles, peso y costo que se revelan al evaluar el desempeño en las formas de protección de los productos mencionados, encontramos que la conformación de los blindajes empleados por el ejército no cumplen con las demandas generadas por los cambiantes atentados que se realizan; un aumento en el blindaje de dichos productos realizado por los métodos

existentes afectaría los límites estipulados para las variables de peso y precio, esto generaría la posibilidad del desarrollo de un material que pudiese ser aplicado en diversos contextos, tales como; protección personal y blindaje de vehículos militares terrestres y aéreos, por lo tanto, este proyecto propone el diseño y fabricación de un material compuesto que cumpla con las necesidades militares de peso, costo, y resistencia para futuras aplicaciones.

## **1.2. Objetivos del proyecto**

### **1.2.1. Objetivo General**

Diseñar una combinación de diferentes materiales para la conformación de un producto compuesto, capaz de satisfacer las necesidades de protección frente a proyectiles que se utilizan en el escenario del conflicto armado actual en Colombia.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Investigar las características de diferentes materiales, a través del análisis de proveedores, que puedan dar solución a las necesidades de protección del personal expuesto.
- Realizar una prueba preliminar de desempeño balístico (prueba de campo) en donde se estudie y evalúe el comportamiento de los materiales investigados y así generar un acercamiento inicial a la solución del problema.
- Analizar desde un punto de vista técnico los resultados obtenidos en la prueba a través de las deformaciones presentes en los materiales, posterior a esta.

- Seleccionar los materiales más adecuados bajo criterios de precio, compatibilidad, resistencia, accesibilidad y los resultados obtenidos en el análisis técnico para ser sometidos a una prueba de campo final.
- Conformar materiales compuestos, utilizando procesos como Hand Lay UP (Laminado manual), para ser sometidos a pruebas.
- Elaborar pruebas de campo finales que permitan validar el comportamiento de los materiales conformados a partir de los resultados del análisis de las pruebas iniciales.
- Analizar los resultados obtenidos en las pruebas realizadas por medio de métodos comparativos bajo objetivos tales como peso, resistencia, costo entre otras características suministradas por personal involucrado en la temática con el fin de obtener un material que cumpla con las especificaciones propuestas.
- Proponer una combinación de materiales óptima para la conformación de un producto compuesto, capaz de satisfacer las necesidades de protección.

### **1.3. Justificación**

La conformación de un material compuesto que pueda ser utilizado como blindaje, es una alternativa atractiva para el sector militar, debido a que podría ser utilizado para un amplio rango de aplicaciones como chalecos antibalas, escudos anti-esquirlas y blindaje para vehículos de transporte de tropa no blindados, como camiones livianos tipo Chevrolet NPR por mencionar algunas. Por lo tanto, el desarrollo e investigación de este material ayuda a llenar un vacío existente frente a la implementación de materiales para la protección militar, ya que existe un desconocimiento parcial en el tema por parte de las fuerzas públicas en cuanto a las propiedades técnicas que se pueden llegar a obtener con dichos materiales.

Desde un punto de vista social, es un proyecto que permite la preservación y protección no solo de la vida de los miembros de las fuerzas armadas Colombianas sino también de ciudadanos y campesinos los cuales se pueden convertir en víctimas de atentados. Esto, apuntando a la creación de un país más seguro en donde soldados y civiles no tengan que morir en atentados explosivos o por disparos realizados con armas de fuego.

Como justificación personal, el desarrollo de este proyecto nos permitirá adquirir conocimientos referentes al tema, al igual que establecer contactos para posibles desarrollos de productos futuros en el ámbito militar, además de esto será posible la realización del trabajo de grado como requisito para obtener el título de Ingenieros de Diseño de Productos. En resumen, cabe afirmar que es un proyecto cuya inversión para su desarrollo es mínima en relación a la gran variedad de aplicaciones que puede tener en un futuro para la protección de militares, teniendo en cuenta además que cuando se trata de salvar vidas humanas no existe inversión alguna injustificada.

#### **1.4. Antecedentes**

El tema concreto de blindajes y materiales dispuestos a la protección en escenarios de conflicto militar no se encuentra desarrollado de una forma equivalente a la fuerza bélica que los avala; se halla en el mercado con facilidad la obtención de armamento en cuanto a variedad y cantidad, superando con creces la disponibilidad de elementos de protección, esto ha generado con el pasar del tiempo la oportunidad de desarrollar métodos, materiales y dispositivos de vanguardia, para la protección de equipamiento y personal militar en una escala moderada.

Se encuentra información y disponibilidad de productos relacionados con el tema desarrollados en las industrias de países más vinculados al conflicto armado en relación con la historia y el desarrollo tecnológico; se toma a los Estados Unidos de América como ejemplo principal, donde empresas a nivel comercial abierto, muestran resultados de productos acorazados con blindajes de última tecnología, resaltando valores tales como el peso y la enorme capacidad de resistencia (calidad), compañías como AMTANK ARMOR, ARMORSTRUXX y ARMOR WORKS se toman la escena digital con productos terminados en pro de resaltar los componentes protectores aplicados en desarrollos para uso real. El uso de materiales compuestos es común en estas aplicaciones, pero las variaciones son perceptibles en cada compañía, reseña y/o patente en razón a la amplitud del campo a explorar siguiendo las directrices basadas en el uso de este tipo de material para la función en cuestión.

En el contexto local se halla que el enfoque no es distante al empleado por los Estados Unidos pero los medios de ejecución si lo son, las entidades poseedoras del conocimiento y la experiencia para equipar productos que cumplan los requerimientos militares tales como BLINDAMAX, IP, PANAMERICAN SECURITY poseen información y productos que aunque cumplen la función de venta no trascienden a instancias más complejas, las entidades de desarrollo del conocimiento como universidades y escuelas técnicas se encuentran reguladas con barreras que dejan en múltiples ocasiones, investigaciones sin el campo de acción o el aval para continuar, y finalmente se encuentra la brecha comunicativa entre las entidades militares y las instancias antes mencionadas, provocando así, un medio complicado para la búsqueda de soluciones enfocadas a este y otros problemas generados de la misma fuente. Aun en las condiciones mencionadas se dan casos donde se logran desarrollos excepcionales tales como vehículos radio controlados para la destrucción de minas (ANT

desarrollado por MARTE), botas reforzadas para el personal operativo militar contra MAP desarrolladas por MINE PRO entre otros que valiosamente aportan desarrollos e innovación a la problemática de seguridad nacional.

## 1.5. Metodología

La metodología a emplear para el desarrollo de los objetivos específicos es la aplicación de la herramienta metodológica del CAP-DO (Chequear, Analizar, Planear y Hacer) en donde se tendrán las siguientes fases de desarrollo:

- **Fase de investigación o chequeo:** En esta primera etapa, se realiza una búsqueda de información partiendo de proveedores, patentes e investigaciones enfocados al tema de materiales compuestos utilizados para la protección. En esta búsqueda toda la información encontrada será registrada de forma digital para la elaboración del informe que permitirá en el siguiente paso, analizar y seleccionar las mejores alternativas a probar.
- **Fase de pruebas preliminares:** En esta etapa se toman los materiales de la primera fase y son sometidos a pruebas de campo iniciales, obteniendo así un acercamiento inicial al problema, en esta fase también se debe construir el soporte para dichos materiales en ambas pruebas. La prueba a realizar será la siguiente:
  - **Prueba de campo balística:** Para la realización de esta prueba se requiere ayuda del gobierno y las fuerzas militares de Antioquia, ya que es necesario el uso de armas de fuego, de diferentes calibres que serán disparadas hacia las muestras elaboradas, para determinar su aplicación y uso como blindaje contra proyectiles, se aplicarán los protocolos de procedimiento utilizados por el ejército, y se usarán las

variables recomendadas de distancia de tiro ofrecidas por el mismo personal.

- **Fase de análisis y selección:** Tras obtener y documentar la información, se procede a realizar un análisis técnico, en términos de peso, precio, compatibilidad con otros materiales, disponibilidad del producto, y desempeño, para luego mediante la implementación de una matriz comparativa obtener resultados que finalmente, llevaran a la selección de los materiales más adecuados para conformar los materiales compuestos.
- **Fase de fabricación de materiales:** Se procede a la conformación de los materiales seleccionados que servirán para la realización de pruebas. Para dicha elaboración se utilizara el proceso de Hand Lay UP el cual se basa en la elaboración manual del material compuesto. Para este proceso es necesario el uso de un molde que permita la fabricación de piezas con espesores variables. En esta fase se tiene como objetivo obtener al menos 2 combinaciones diferentes de materiales para ser sometidos a pruebas.
- **Pruebas de campo balística final:** Desarrollo de las pruebas de campo finales, que será la misma aplicada para la fase de pruebas iniciales con la diferencia que será realizada con los materiales constituidos en la fase anterior.
- **Fase de análisis técnico de resultados:** Se analizan los resultados obtenidos de forma comparativa mediante el desarrollo de una matriz evaluativa ponderada utilizando las características mencionadas con anterioridad como criterios de evaluación, lo cual permitirá la selección del material que presente mejores cualidades y que cumpla con los requerimientos estipulados para finalmente elaborar un informe con las características del material seleccionado y sus posibles aplicaciones.

En caso de no obtener los resultados esperados para cada uno de los objetivos específicos, serán utilizadas metodologías como los 5 ¿Porqués? para identificar la raíz del problema y generar soluciones; y diagramas de flujo en donde se ilustra el problema con una posible solución que se emplea de forma inmediata para validar su efectividad, estas metodologías son planteadas para fases posteriores del proyecto y se tienen como reserva en caso de que ninguna de las propuestas haya cumplido con las expectativas propuestas en el proyecto.

### **1.6. Resultados y productos esperados del proyecto**

Bajo los lineamientos definidos en los objetivos específicos se encuentra una estructura de desarrollo comparable con metodologías como el CAPDO dándole una organización secuencial al desarrollo de cada objetivo y consecuentemente a sus entregables.

- **Fase de investigación de materiales e información referente al proyecto (chequear):**

Se define como entregable un informe donde con base en información puntual de propiedades, conformación y características de materiales pertinentes se constituye una base teórica para la toma de decisión en relación a la adquisición de materias primas para realizar los compuestos adecuados en la fase de selección.

- **Fase de análisis de alternativas y selección (Analizar):**

Se procede a realizar el análisis de alternativas haciendo uso de validación de proveedores en cuanto a información técnica y practica de los productos y un depurado de las opciones basándose en los parámetros de selección (precio, disponibilidad del producto, peso, desempeño y compatibilidad con otros materiales o versatilidad).

- **Fase de constitución de compuestos (hacer):**

Se continúa con la obtención de muestras para la conformación de compuestos físicos, se verificara la viabilidad de la selección bajo actos comparativos en cuanto a propiedades como compatibilidad de materiales, humectación de las fibras, comportamiento en procesos productivos seleccionados y maniobrabilidad del material.

- **Fase de construcción y ejecución de pruebas (Planear-Hacer):**

La construcción de pruebas se constituye como un entregable inmediato en tanto se encuentra ligado a la ejecución de la misma en donde se evidencien los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a las placas.

- **Fase de análisis de resultados (Analizar-verificar):**

Fase final del proyecto, se definen los parámetros para la selección del material con la mejor combinación de atributos basado en el análisis técnicos obtenidos de las pruebas, se elabora la documentación y caracterización para lograr definir un alcance real de las funciones del producto con aplicación al medio militar.

### **1.7. Identificación y caracterización de la innovación propuesta**

El desarrollo del proyecto brinda a través de la investigación en materias primas y composición de materiales compuestos, la posibilidad de innovar en cuanto a los valores no satisfechos de una necesidad imposible de ignorar, el alcance del proyecto abrirá posibilidades concretas en cuanto a la creación de ventajas en el campo de acción, y la utilización de procesos y materias primas específicas que impulsaran directamente la industria de los compuestos y el desarrollo de productos en pro de la seguridad militar y civil.

## **1.8. Productos Entregables**

- Informe de composición física y distribución del material compuesto, incluye materias primas para el desarrollo del producto, proceso productivo y características técnicas obtenidas en las pruebas técnicas y de campo.
- Placa de muestra del compuesto
- Recomendaciones del proyecto, anexas en el informe general, se identifican las características con las cuales el producto se desempeña correctamente y con cuáles no lo hace.

## **2. Introducción**

La abrumadora situación bélica que acosa Colombia es el motor que mueve este trabajo, dentro del análisis situacional del proyecto se encuentran la posibilidad de desarrollar un nuevo material cuya función es la protección balística, enfocado a las variables de costos, peso, accesibilidad y funcionalidad, el trabajo gira en torno a la posibilidad de combinar diferentes materiales para obtener la mejor configuración donde se obtenga un resultado óptimo para las variables mencionadas, y lograr constituir un blindaje prometedor para suplir las necesidades latentes de un mercado insatisfecho.

Para la manufactura del material balístico se tiene en cuenta que no solo es relevante el tipo de material que se usa, además es necesario tener en cuenta aspectos como: la cantidad de material, el orden de los materiales y finalmente la forma de los materiales, esta última puede darle un giro importante al desempeño del blindaje ya que es un factor que incide fuertemente en el desempeño sin necesidad de aumentar los costos directamente o el peso, incluso podría traer beneficios a estas características; el trabajo busca realizar una aproximación a la configuración del material balístico que presente la mejor relación de: peso,

desempeño, accesibilidad, y costos, logrados a través del orden, tipo, cantidad y forma de los materiales, sin duda la mejor combinación de todas las variables es muy ambiciosa, pero lograr una primera aproximación es un paso por demás importante.

Para lograr un resultado viable en términos del funcionamiento del blindaje se aplican pruebas balísticas utilizando la munición común en el conflicto armado, estas pruebas otorgan resultados contundentes, y con el apoyo de análisis experimentales se determinara el desempeño de las diferentes propuestas.

Finalmente este trabajo expresa una serie de conclusiones y recomendaciones las cuales buscan encaminar los resultados de las pruebas de campo y la experiencia obtenida manufacturando los blindajes y de esta manera se espera depurar las propuestas a un punto donde cumplan de una manera más óptima los requisitos ya mencionados.

### **3. Estado del Arte**

#### **3.1. Historia**

Sin lugar a dudas el proceso evolutivo está presente en todas las facetas de desarrollo de la humanidad, desde la construcción de dispositivos y herramientas, hasta técnicas y metodologías que se encuentran en constante cambio adaptándose a las múltiples circunstancias del entorno a través del tiempo, este método de selección (la evolución) permite la obtención de resultados que pocas veces son comparables en cuanto a eficiencia y desarrollo a otros productos de metodologías altamente estructuradas en el método técnico-científico, esto se debe a la cantidad de variables que puede absorber el producto evolutivo, los dispositivos de protección no son ajenos a este proceso.

La historia nos muestra como las cambiantes variables han modificado la manera como el hombre se protege de los diferentes factores que pueden atender contra su vida, las modificaciones a esta necesidad han obligado al hombre a pensar en formas, materiales y características que logren cumplir con este caprichoso requisito, llegando tristemente a la escena actual donde debe adaptar sus conocimientos en metodologías de protección para protegerse de sus pares, evidentemente la línea de tiempo en la evolución de los productos para la protección ha mostrado cuales son los parámetros fundamentales para que un blindaje o elemento de protección sea válido, y se verá repetido en este documento constantemente: Capacidad de detener el elemento incidente, peso, disponibilidad y facilidad de manufactura, elementos presentes producto de la tendencia evolutiva donde los productos, deben tender a ser prácticos y útiles, y estas serán las directrices para el resultado de este trabajo; a continuación se ilustra una breve línea de tiempo en cuanto a la evolución de la protección personal, específicamente enfocado a los materiales y formas.



(a) (Armadura de cuero, resistente al corte y flexible)



(b) (Malla metálica, más resistente al corte y menos flexible que su predecesor)



(c) (Escamas metálicas, menos flexible que su predecesor pero más resistente al corte y al perforado)



(d) (Armadura por placas o láminas, nula flexibilidad pero superior en todos los aspectos de resistencia, incluyendo resistencia al impacto)



(e) (Placa cerámica, máxima resistencia al corte, el impacto y la penetración, pero se fragmenta con facilidad y debido a esto su desempeño no es el mejor a la hora de recibir varios impactos en una misma región)



(f) (Tela polimérica Kevlar®, alta resistencia al corte y al desgarre, bajo peso, flexible y absorbe gran cantidad de energía cinética)

Figura 1(a)-1(f). Ilustraciones de armaduras a través del tiempo (Fuente: <http://www.history-of-armor.com/>)

### **3.2. Municiones**

A la hora de desarrollar un material para ser utilizado como blindaje, es muy importante saber y analizar los tipos de amenazas contra las que será enfrentado, ya sean municiones de armas de fuego, explosivos o fragmentos de dichas explosiones; para así definir las características y propiedades que deberá poseer el material con el fin de bloquear dichas amenazas. Para el caso particular de este trabajo solo se pretende enfocarse en las municiones de armas de fuego, debido a que es una de las amenazas más comunes del país y donde pueden existir diferentes aplicaciones para el blindaje.

Las municiones, son el armamento utilizado para disparar las armas de fuego, en donde es propulsado el proyectil para dar en el blanco; en general las municiones están conformadas como se puede apreciar en la figura 2 por el ignitor (primer) el cual comienza el proceso de detonación al ser golpeado el casquillo de la munición, quemando el propelente que genera una expansión de gases dentro del mismo casquillo y empuja el proyectil por el barril del arma hasta dar en el blanco, este proyectil entonces será la amenaza considerada a ser detenida por el blindaje.

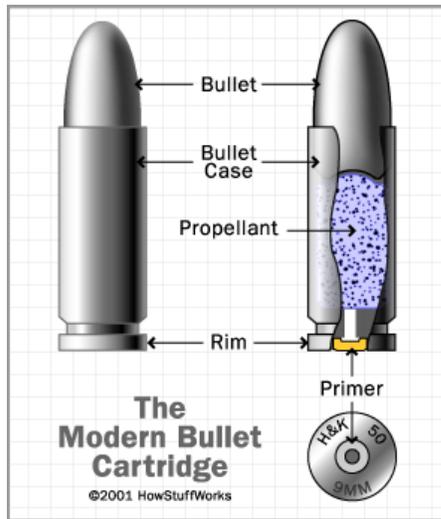


Figura 2. Partes de una munición empleada en armas de fuego.  
(Fuente: <http://www.howstuffworks.com>)

De acuerdo con el trabajo realizado por R.Zaera et al, en el 2011 [1], podemos destacar 3 tipos de municiones.

### 3.2.1. Munición de pistola

Este tipo de munición es utilizada en armas de fuego diseñadas para ser sostenidas en una sola mano, por lo general el proyectil está fabricado en plomo con una camisa de cobre ya que la alta densidad de este primer material le otorga al proyectil mayor energía cinética y adicionalmente al ser tan maleable puede ocasionar mayor daño a la victima ya que al impactar con esta, la cabeza del proyectil se aplana aumentando así el área de impacto del mismo y por ende el daño ocasionado mientras que el segundo material mencionado evita que la fricción del proyectil con el barril de la pistola deformen el proyectil antes de que este impacte con su objetivo. Esta disposición se conoce comúnmente como munición antipersonal, debido al gran daño que ocasiona en seres humanos.

Otra disposición utilizada es reemplazando el plomo por materiales más duros como el acero, el tungsteno o uranio, esto para poder penetrar materiales duros con facilidad, por eso a esta disposición se le conoce como perforadora de armaduras, ya que está diseñada para atravesar materiales de alta dureza aunque el daño ocasionado a personas sea menor.

Las municiones utilizadas en las pistolas por lo general tienen una velocidad de salida entre 350 - 450m/s y una masa del proyectil mayor a la del rifle, entre las utilizadas encontramos la calibre 9mm Parabellum, la 0,357 Magnum y la 0.44 Magnum (Ver figura 3).



Figura 3. Municiones de Pistola, de izquierda a derecha, 0.50, 0,44 Magnum, 0,357 Magnum, 0,45 ACP, 0,40, 9mm, 0,22.

(Fuente: Fuente: Impact Engineering of Composite Structures de International Center for Mechanical Science, CISM Course and Lectures, vol. 526)

### 3.2.2. Munición de Rifle

Munición utilizada en armas diseñadas para ser sostenida con las dos manos, una para sostener el barril de la pistola y otra para apoyar el gatillo, la composición de estas municiones es igual a la de la pistola utilizando plomo para las municiones antipersonales y metales duros para perfora armaduras, lo que las diferencia de las municiones de pistola es que estas poseen una cabeza más aguda lo que hace que estas municiones tengan una mejor aerodinámica y una capacidad perforadora mayor.

Estas municiones tienen una velocidad de salida del barril del rifle entre 800-950m/s debido a que tienen una menor masa que las de pistola y que tienen una mayor cantidad de propelente en el casquillo de la munición. En esta categoría encontramos municiones como calibre 7.62mm, y el 5,56 mm (Ver figura 4).



Figura 4. Munición de Rifle, calibre 5,56mm  
(Fuente: <http://es.dreamstime.com>)

### 3.2.3. Munición de armas pesadas

Estas municiones se refieren a las empleadas en montajes pesados o estructuras estáticas, diseñadas para perforar estructuras blindadas como tanques y vehículos de infantería, tiene una masa mayor a la utilizada en rifles y pistolas al igual que presenta elevadas velocidades de salida que oscilan entre los 820-1250m/s, lo que hacen que esta munición sea la de mayor energía cinética al dar en el objetivo y por ende su gran poder destructivo. Encontramos en este tipo de municiones el calibre 12,7mm, 14,50mm, 20mm y 30mm (Ver figura 5).



Figura 5. Municiones de armas pesadas, de izquierda a derecha, 30mm, 25mm, 20mm y 12,7mm (Fuente: Impact Engineering of Composite Structures de International Center for Mechanical Science, CISM Course and Lectures, vol. 526)

### 3.3. Materiales para blindajes

En la actualidad el mercado de sistemas y productos para la protección balística se ha encontrado con retos cada vez más complejos y exigentes, por lo tanto si nos centramos en los desarrollos evidenciados en la última parte del devenir histórico se encuentran materiales de acuerdo con R.Zaera et al, en el 2011 [1] que poseen propiedades ajustadas a la función enunciada: el acero, la cerámica y tejidos realizados a partir de fibras

poliméricas reforzados con resinas. A continuación se pretende explicar de una forma breve cada uno de estos materiales con el fin de entender su utilidad a la hora de desarrollar un blindaje.

### **3.3.1. Aceros**

Uno de los materiales más antiguos en ser utilizado como blindaje balístico ha sido el acero, ya que en 1917 cuando apenas se iniciaba el uso de los tanques de guerra, estos debían de estar blindados contra el armamento del enemigo, por lo que llevaban una armadura de acero rolando con una dureza entre los 35 y 40 HRC; pero debido a que esta armadura debía ser capaz de detener munición de rifle su espesor era muy elevado, aumentado así el peso del tanque afectando su movilidad [1], a partir de este punto se comenzaron a implementar investigaciones y desarrollos para mejorar las propiedades mecánicas del material en base a reducir la cantidad de este a ser utilizado y por ende reducir el peso del blindaje.

Algunas de estas propiedades mecánicas a ser mejoradas considerablemente a través del tiempo han sido la dureza, definida como la resistencia que opone un material a ser rayado o cortado en su superficie y la tenacidad, definida como la cantidad de energía que absorbe el material antes de sufrir una ruptura ; la combinación y mejora de estas dos propiedades ayudan a que el material al recibir el impacto inicial de un proyectil, se deforme este de tal forma que aumente el área de contacto del proyectil para así posibilitarle a otros materiales contiguos absorber la energía residual del proyectil, tal y como se puede apreciar en figura 6 a continuación.

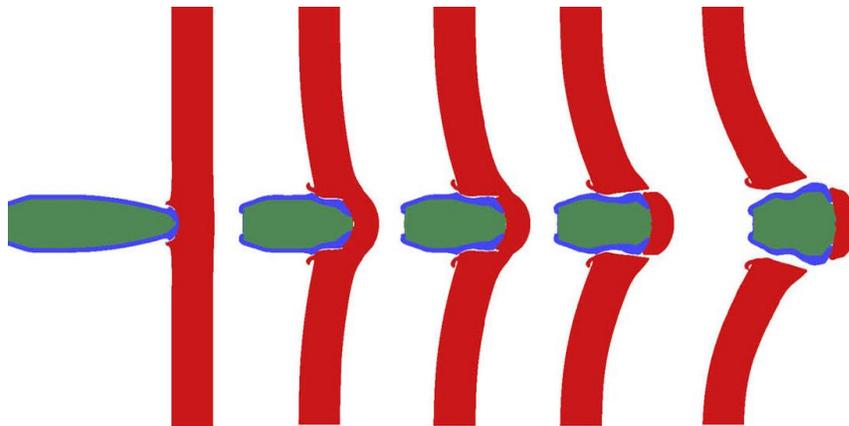


Figura 6. Representación grafica de la perforación de una placa de Acero estructural WELDOX 500 de 6mm de espesor por un proyectil de 7.62mm (Fuente: Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles por T. Børvik, et al, 1999 )

En la actualidad encontramos aceros a nivel comercial nacional como el acero balístico que posee una dureza de 50 HRC y un esfuerzo máximo de casi 1250 MPa antes de sufrir ruptura, el cual en espesores de 7mm es capaz de detener un proyectil de rifle calibre 7,62mm el cual viaja a una velocidad de aproximadamente 840m/seg.

### 3.3.2. Cerámicos

Continuando con el tema de materiales nos encontramos con los cerámicos los cuales se volvieron muy populares luego de estudios realizados por Wilkins (1967-69) y Florence (1969), en donde se ayudo a comprender la utilidad de estos materiales en el ambiente balístico ya que estos al presentar elevadas durezas son capaces de achatar, fragmentar y erosionar el proyectil [1]. Por otro lado, estos materiales presentan el inconveniente de que el área de daño generado por el impacto de un proyectil suele ser mucho mayor al de los materiales metálicos, puesto que en los últimos el daño es local a la región del impacto, pero debido a la deformación ocasionada por el cerámico en el proyectil el área de daño es mucho mayor en este último;

adicionalmente los materiales cerámicos son muy frágiles por lo que luego de ser impactados se presentan rupturas y fragmentaciones en el mismo que imposibilitan el uso de este tipo de materiales para recibir varios impactos consecutivos.

Entre las más usadas con este fin encontramos el Carburo de Boro ( $B_4C$ ), Carburo de Silicio (SiC), Boruro de titanio ( $TiB_2$ ) y la alúmina ( $Al_2O_3$ ) los cuales se destacan por tener una dureza mayor a los 60 HRC.

### **3.3.3. Resinas**

Su propósito en el sistema propuesto es dar una forma fija a las fibras sintéticas, además las resinas han logrado un desarrollo importante en cuanto a prestaciones físicas y comportamiento frente a esfuerzos de gran magnitud, en especial las resinas de la familia epóxica y viniléster, las cuales se encuentran en la parte superior en desempeño en comparación con resinas poliéster, fenólicas entre otras.

### **3.3.4. Fibras sintéticas**

Este material tiene la función de absorber y retener o evitar en cierta medida las deformaciones y/o rompimientos de los materiales que lo preceden en la conformación de un blindaje compuesto de varios materiales; realizando un supuesto imaginamos una capa de un material (x) que posee una alta dureza y es un material generalmente frágil ante los impactos, por lo tanto sería la labor de un material (y) aportar las propiedades físicas de las cuales carece el material (x), como flexibilidad y tenacidad, para este fin, las fibras sintéticas tanto como las poliamidas y de vidrio son una opción, ya que logran cumplir

con las condiciones de las cuales carece un material de alta dureza como el acero. Puesto que en un estudio realizado por B. Wang, et al en 1997 [2], analizaron el comportamiento de láminas compuestas por resina viniléster y fibra de vidrio como armadura balística encontraron que generaban una reducción en la velocidad del proyectil hasta en un 20%. Debido a su gran utilidad, versatilidad y desempeño se hace mención de las siguientes fibras:

#### **3.3.4.1. Fibras de Aramida : (*Kevlar*® y *Twaron*®)**

La aramida o poliparafenileno tereftalamida es una fibra sintética desarrollada por la empresa *Dupont*, el objetivo de este material es brindar alta resistencia a la tensión y al calor, y además permiten conformar productos de geometrías diversas manteniendo un peso considerablemente menor al de materiales metálicos, los cuales son normalmente aplicados para desempeñarse frente a impactos o esfuerzos considerables. El *Kevlar*® al igual que otras fibras sintéticas permite conformar piezas o productos teniendo en cuenta la naturaleza de los esfuerzos ya que la disposición de las fibras tiene un impacto en la manera como se comporta la pieza frente a esfuerzos predeterminados, otras propiedades como resistencia al desgaste o abrasión y resistencia química son de resaltar en este material por lo que ha sido una opción obligada para la producción de blindajes en la actualidad, una clara muestra del desempeño balístico de este material se ve evidenciado en varios de los productos e implementos utilizados por los ejércitos de diferentes países; en las figuras 7 y 8 se puede apreciar la simulación y los resultados reales obtenidos de una prueba balística sobre el *Kevlar*®.

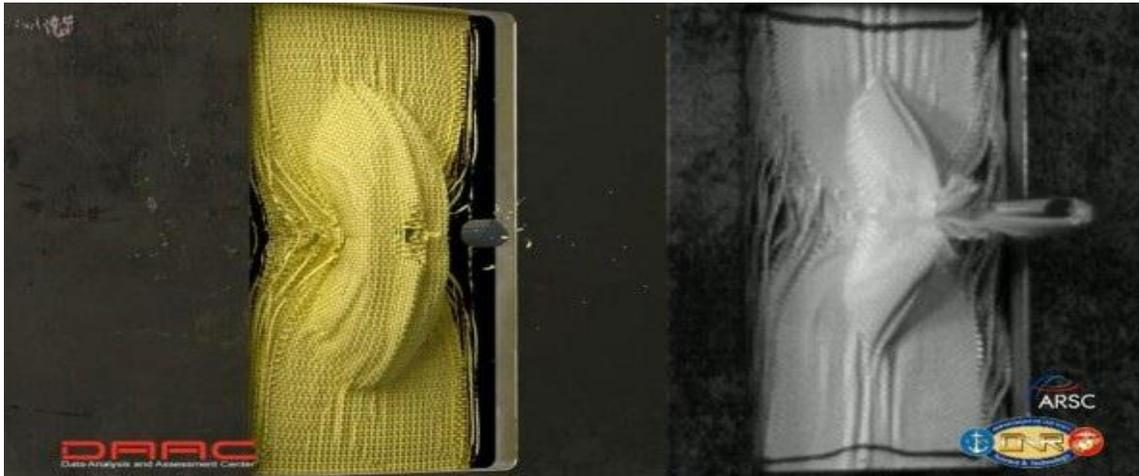


Figura 7 y 8. Tejido de Kevlar en prueba balística, la imagen de la izquierda corresponde a la simulación en software CAE y la de la derecha los resultados reales. (Fuente: <http://www.vizworld.com>)

Por otro lado también existe otra aramida conocida con el nombre comercial de *Twaron*® la cual es elaborada por la empresa *Teijin*, el cual tiene un comportamiento muy similar al del *Kevlar*®, pero presenta mejores propiedades mecánicas que le ayudan a desempeñarse mejor como material balístico, el *Twaron*® en su forma de tejido se puede apreciar en la figura 9 a continuación.



Figura 9. Manta de TWARON bidireccional (Fuente: <http://www.splav.ru/press/info/bron/bron.aspx>)

### 3.3.4.2. Fibra de vidrio

La fibra de vidrio ha tomado lugar importante para en una gran cantidad de aplicaciones dada su versatilidad y desempeño en cuestiones de resistencia, peso y costo, apoyados en el valor de los materiales compuestos la fibra de vidrio basa sus cualidades en un concepto interesante donde el vidrio se transforma de un material duro pero frágil, a uno flexible y con gran resistencia a la tensión que en conjunto con aditivos de resina logra un desempeño diferente al de la lámina de vidrio tradicional, conservando las propiedades químicas de este pero añadiendo un componente de tenacidad y versatilidad decisivo para las diferentes tareas y productos que pueden ser desarrollados con este material.

Las fibras de vidrio se dividen en las siguientes categorías: A, E, C, AR y S; ellas enmarcan diferencias en cuanto a uso y características de la fibra de vidrio, como ejemplo tenemos a las fibras tipo E (Eléctrico) estas son usadas para cableados de fibra óptica y el enfoque de su tratamiento se encuentra en el desempeño del índice de refracción de la luz. En el caso particular de un producto balístico la fibra tipo A es la más adecuada ya que su función es la de reforzarte, otra característica de vital importancia para la aplicación de fibras sintéticas es la conformación del tejido, por lo tanto se debe tener en cuenta que el mercado ofrece diversidad de configuraciones, en las cuales encontramos mantas de tipo MAT (Ver figura 10) donde las fibras están organizadas de modo aleatorio y en porciones reducidas (fibra cortada), WOVEN ROVING (Ver figura 11) donde las fibras son largas y entretejidas con un patrón determinado, este

determina el desempeño mecánico del laminado el cual debe ser conformado según las necesidades del producto.



Figura 10 y 11. De izquierda a derecha tenemos tejido tipo MAT y woven roving de fibra de vidrio. (Fuente:en.fukesi.com y <http://gssfiberglass.com>)

#### 3.3.4.3. Fibras de PE Ultra alto peso molecular

Las fibras de UHMPE o de polietileno de ultra alto peso molecular es un tipo de fibra orgánica que contiene moléculas de gran tamaño por lo que la fibra es muy resistente haciéndola ideal para fines balísticos. Fue desarrollada en 1950 por Ruhrchemia AG y veinte años más tarde la compañía holandesa *DSM* distribuyó las fibras bajo el nombre comercial de *Dyneema*®. Estas fibras son altamente resistentes a químicos corrosivos al igual que a la humedad y a los rayos UV y tienen un bajo coeficiente de fricción.

Como ya fue expuesto los materiales empleados en la protección balística se han reducido a: Cerámicos, Aceros y fibras sintéticas reforzadas con resina como principales actores, concretamente este documento se enfoca en dos particularmente, dada su disponibilidad, y por este motivo y con el fin de reducir las variables y poder emitir juicios más acertados acerca del comportamiento de los materiales en conjunto se seleccionan los aceros y las fibras poliméricas, particularmente *Twaron*® o *Kevlar*® para el caso de

las fibras poliméricas, para los aceros se amplía la muestra ya que en el medio hay más acceso y disponibilidad de ellos con las propiedades deseadas y además por la naturaleza del material, se pueden tomar referencias comerciales para hacer los puntos de comparación con otros que están específicamente diseñado para balística. Las propiedades claves en los metales son la dureza y la tenacidad, considerando que se debe oponer a un cuerpo de baja masa pero alta dureza y velocidad, consecuentemente, la variable espesor es una gran incógnita.

Las fibras sintéticas son una opción casi obligatoria para la conformación de un producto de uso anti-balístico, ya que su relación de resistencia a la ruptura por tensión vs peso, es superior a todos los materiales previamente mencionados pero al igual que el acero, la incógnita que se presenta es la cantidad de capas necesarias para cumplir los resultados deseados.

### **3.4. Configuración de blindajes**

Cada uno de estos materiales mencionados en el punto anterior se desempeña de forma diferente por lo que aporta un ataque contra el problema interesante. Uno de los textos que mejor enfoca esta premisa es el editado por Serge Abrate en el 2011 bajo el nombre de “Impact Engineering of Composite Structures” [3] en este trabajo profundiza en el comportamiento mecánico de los materiales mencionados en relación a la escena balística, enfoque acertado ya que en el mercado las configuraciones de blindajes más recurrentes son: *Kevlar*® reforzado (anti-balística, anti-explosivo), Cerámica mas *Kevlar*® (anti-balística), Acero más *Kevlar*® en diferentes configuraciones (anti-balística, anti-explosivo), incluso el texto mencionado propone como conclusión una secuencia de materiales donde interviene el acero, la cerámica y el *Kevlar*® para detención de un proyectil de prueba con interesantes resultados.

Algunas de las referencias más impresionantes puede ser incluso uno de los nuevos desarrollos de **Pinnacle Armor** en Fresno USA, donde proponen chalecos anti balas usando discos de cerámica, *Kevlar*® entre otros componentes, conocido como Dragon Skin [4] esta propuesta presenta interesantes demostraciones en video pero aun, no logra obtener el aval del gobierno de los estados unidos por variables implicadas en el uso que pone en tela de juicio la utilidad del producto.

Aplicando los últimos hallazgos ( la placa de CISM Course and Lectures y Dragon skin (Ver figura 12 y 13 respectivamente )) es claro que la utilización de más de un tipo de material mejora considerablemente el desempeño de un producto diseñado para la protección balística, esta afirmación se valida en las demostraciones de ambos productos y la información técnica y científica que los respalda, a su vez, este panorama abre una cantidad de preguntas como: ¿Qué configuración de materiales es la mejor?, ¿En qué orden es más apropiado disponer dichos materiales?, ¿Qué cantidades o espesores de cada material son las más apropiadas?.

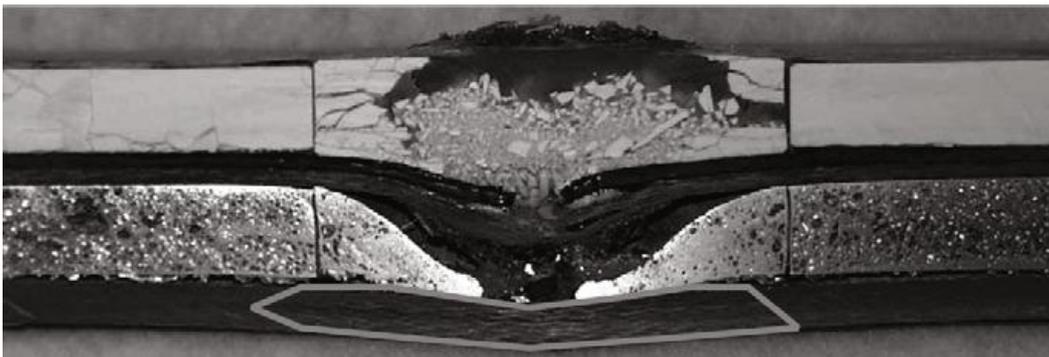


Figura 12. Corte transversal de una placa compuesta de diversos materiales contra un proyectil de simulación de fragmento. (Fuente: Impact Engineering of Composite Structures de International Center for Mechanical Science, CISM Course and Lectures, vol. 526)



Figura 13. Interior del chaleco anti-balas Dragon Skin fabricado por Pinnacle Armor (Fuente: <http://quikigrupo.wikispaces.com/Chaleco+antibalas+Dragon+Skin>)

Es claro que no esperamos resolver estas preguntas ya que el nivel de investigación, documentación y análisis se encuentra fuera de las pretensiones y capacidades de los autores de este documento, pero si se espera brindar algunas pautas a partir de pruebas de campo reales y haciendo uso de materiales similares a los expuestos, que permitan construir una idea realista del comportamiento de este tipo de productos frente a situaciones muy cercanas a la realidad, y posiblemente reducir las variables que afectan las preguntas abiertas por el análisis de los productos actuales.

### **3.5. Evaluación de configuraciones**

A la hora de estudiar y analizar los resultados obtenidos en las pruebas de campo, es necesario tener unas bases para poder definir los factores que serán medidos y lo que estos significan; por lo tanto se analizarán por separados el comportamiento de los aceros y del material compuesto reforzado con fibra. A continuación se muestra el análisis para cada uno de ellos:

### 3.5.1. Evaluación del comportamiento balístico de materiales compuestos reforzados con fibras sintéticas.

Esta investigación realizada por L.M.Nunes et al, en el 2004 [5], se enfoca en el análisis del cráter en compuestos de fibra de vidrio y resina epóxica, en donde, por medio del cálculo de la relación de Ferret (Ferret Ratio) y el factor de circularidad, es posible analizar si el comportamiento del material frente a el impacto ha sido isotrópico o anisotrópico.

El factor de circularidad está definido por la siguiente ecuación:

$$\text{Factor de Circularidad} = \frac{4A}{\pi F^2}$$

Donde:

**A:** es el área total del cráter.

**F max:** es la longitud máxima del cráter (Ver figura 14).

La relación de Ferret está dada por la siguiente ecuación.

$$\text{Relación de Ferret} = \frac{F \text{ min}}{F \text{ max}}$$

Donde:

**F min:** es la longitud mínima del cráter (Ver figura 14).

**F max:** es la longitud máxima del cráter (Ver figura 14).

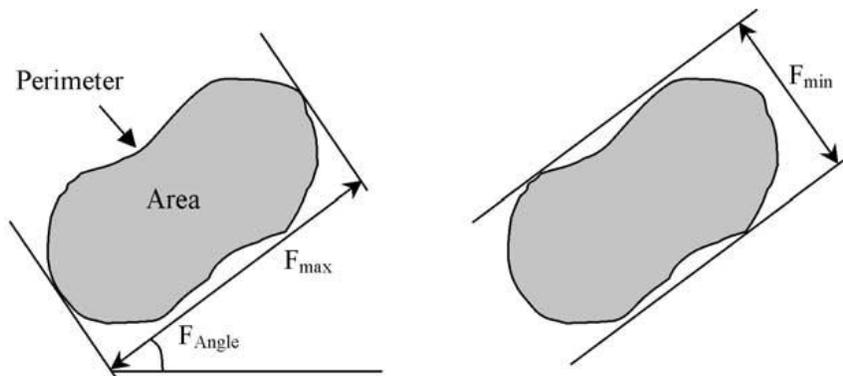


Figura 14. Parámetros de tamaño y orientación medidos para caracterizar los cráteres (Fuente: Evaluation of the damaged area of glass-fiber-reinforced-epoxy-matrix composite materials submitted to ballistic impacts por L.M.Nunes, et al en el 2004)

En ambas ecuaciones a medida que el resultado de más cercano a 1 se considera isotrópico y mientras más cercano este a 0 se considera elongado. Por lo tanto si el material presenta un comportamiento más isotrópico indica que este posee una distribución de cargas más equitativa alrededor de todo el material y por lo tanto es capaz de absorber de una forma más eficiente la energía recibida por el impacto balístico. Se utilizan ambas ecuaciones debido a que a pesar de que con las dos se calcula el comportamiento isotrópico o elongado del material, cada uno utiliza variables diferentes para llegar al resultado, esto con el fin de obtener un punto de comparación que indique si dichos resultados obtenidos son fiables.

Otros factores que tienen en cuenta en su investigación son el área del cráter tanto de entrada del proyectil como el de salida ya que con dichos factores encontraron que a medida que el área de entrada es más pequeño el daño en el material es menor y a medida que la relación del área de salida crece con respecto al área de entrada del proyectil hay una mejor absorción de energía del material y por lo tanto un desempeño balístico óptimo.

La relación de áreas está dada por la siguiente ecuación:

$$RA = \frac{As}{Ae}$$

Donde:

**RA:** es la relación de áreas

**As:** es el área total del cráter de salida

**Ae:** es el área total del cráter de entrada

### 3.5.2. Evaluación del comportamiento balístico en placas metálicas.

Elaborada por A.Durmus et al, en el 2011 [6], esta investigación está enfocada en el análisis del cráter dejado por un proyectil 9mm en laminas metálicas y de cómo las medidas de este, se encuentran relacionadas con el límite balístico del material, definido como la máxima velocidad de un proyectil que puede resistir una lamina metálica.

Las medidas tomadas del cráter fueron las siguientes (Ver figura 15):

- Df= El diámetro frontal de impacto.
- Lk= La altura del cráter.
- Dh= El diámetro de agujero de salida del proyectil.

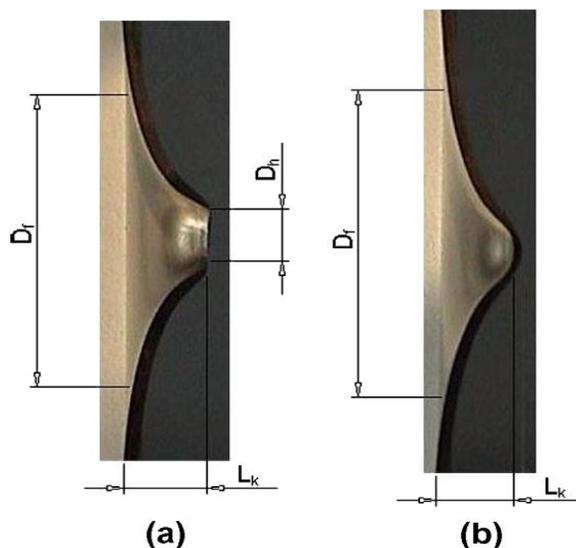


Figura 15. Parámetros de tamaño medidos para caracterizar los cráteres (a) Perforada (b) no perforada (Fuente: Experimental investigation on the ballistic impact performances of cold rolled sheet metals por A. Durmus, et al, en el 2011)

Con dichas mediciones hallaron que a medida que la altura del cráter y el diámetro frontal para un mismo material aumentan este se acerca más a su límite balístico, hasta llegar al punto que es perforado por el proyectil y luego si se disparan progresivamente proyectiles a mayores velocidades del límite balístico del material, dicha altura y diámetro de la lamina comienzan a reducirse hasta el punto que el material es perforado y no se presenta ninguna formación de cráter en el mismo.

Para el caso particular de este trabajo y a diferencia de la investigación de referencia, se mantuvieron la velocidad y distancia como constantes para efectuar el disparo, por lo que se asume que cada placa fue impactada en igualdad de condiciones y con aproximadamente la misma cantidad de energía cinética; por lo tanto, con estas mediciones es posible evaluar el comportamiento de los materiales al ser impactados con la misma energía, obteniendo así información que permite seleccionar el metal más adecuado para conformar el compuesto en base al tamaño del cráter.

## **4. Desarrollo experimental**

### **4.1. Selección de materiales**

La primera fase para el desarrollo del material compuesto consistió en realizar una investigación de los posibles materiales a probar, y de acuerdo a sus propiedades físicas y mecánicas evaluar cuales son los más adecuados para ser utilizados. Se recurrió a buscar información tanto de proveedores como de documentos científicos que avalan el uso de ciertos materiales para la protección balística, en adición, se uso la evidencia histórica, se tomó como ejemplo los casos más representativos donde los blindajes han marcado la diferencia, por lo tanto se encuentra que el análisis de blindajes de tanques y helicópteros de la 2da guerra mundial son en extremo útiles, considerando que en casos específicos como el identificado en el armamento alemán da cuenta de un manejo particular del caso balístico, que expande las variables a considerar.

La información más pertinente se encuentra en los catálogos de productos y páginas web destinadas a la fabricación de chalecos anti balas, tanques blindados del ejército norte-americano y estructuras para instalaciones militares, la tendencia que marcan estas fuentes de información es clara en cuestiones del tipo de materiales que son empleados, metales, cerámicas, fibras sintéticas de alto desempeño y cauchos quienes llaman la atención por sus impresionantes pruebas de desempeño documentadas en videos y avaladas por tablas de propiedades técnicas congruentes, en el caso de los metales y las cerámicas, es claro que la intención de usar su alta dureza para causar deformaciones en el proyectil y detenerlo haciendo uso de su tenacidad (en el caso de los metales).

En cuanto a las fibras sintéticas de alto desempeño, se desea utilizar su alta capacidad de absorción energética y resistencia a la ruptura por tensión, finalmente los cauchos se muestran como una excelente opción para absorber energía por su capacidad de disipar la energía cinética por contacto. De acuerdo a la investigación realizada se encontraron los siguientes materiales considerados apropiados y pertinentes bajo criterios de funcionalidad, disponibilidad, manejo, precio y peso.

#### 4.1.1. Aceros

Se investigaron múltiples aceros considerando características como, densidad, esfuerzo máximo, precio y disponibilidad en el mercado local, como se muestra en la tabla 1 a continuación:

Nombre	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Precio (\$/kilo)	Esfuerzo máximo (MPa)	Disponibilidad	Observaciones
Acero Inoxidable	7.8	7000	600	Si	Familia Austenítica
AISI 1020	7.87	6800	380	Si	
AISI 1020 Cementado	7.87	14800	500	Si	Penetración del cementado 0.5mm
AISI 1045	7.85	9000	580	Si	Se consigue en placa con espesor de 5/16"
AISI 4140	7.85	N/A	1000	No se encuentra en el mercado local en forma de laminas	

<b>Acero Balístico</b>	7.87	18000	1250	Se encuentra en el mercado local, pero es muy escaso debido a la alta demanda.	Mínimo espesor de lámina de 3mm.
<b>Acero Templado</b>	7.87	\$17000	1200	Si	

Tabla 1. Tabla comparativa de las características investigadas en los diferentes aceros.

(Fuente para los datos de densidad y esfuerzo máximo: <http://www.matweb.com> )

De acuerdo con la tabla anterior se observa que los materiales analizados comparten un densidad muy similar por lo tanto no es un factor crítico para la selección del material a usar, en cuanto a su disponibilidad la gran mayoría de los materiales se encuentran disponibles en el mercado local exceptuando el AISI 4140, que solo se encuentra en forma de barra por lo que se descarta la idea de usarlo debido a que la importación aumentaría los costos para el desarrollo del producto lo cual es un factor no deseable. Sin embargo, los otros materiales listados son llevados a la prueba inicial de campo para probar su desempeño.

#### 4.1.2. Fibras sintéticas

Teniendo los requerimientos que definirán las funciones de las fibras sintéticas en el producto a fabricar, encontramos diferentes opciones en el mercado, que pueden acoplarse de manera satisfactoria.

A continuación se presenta una tabla (Ver Tabla2) comparativa de las diferentes fibras sintéticas investigadas, con sus características más relevantes para el objeto de estudio como esfuerzo ultimo de tensión

el cual indica el esfuerzo necesario para fracturar el material sometido a tensión, densidad, precio y disponibilidad en el mercado local.

<b>Nombre</b>	<b>Esfuerzo ultimo de tensión (MPA)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Precio (\$/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Disponibilidad</b>
<b><i>Twaron</i></b> <sup>®</sup>	3600	1.44	45.000	Si
<b><i>Kevlar</i></b> <sup>®</sup>	3000	1.44	120.000	Si
<b>Fibra de vidrio tipo A</b>	2415	2.5	4.450	Si

Tabla 2. Tabla comparativa de las características investigadas en las diferentes fibras sintéticas.

(Fuente para los datos de esfuerzo ultimo de tensión y densidad: : <http://www.matweb.com>)

De acuerdo con la tabla anterior, es posible observar que el *Twaron*<sup>®</sup> es el material que presenta el valor más alto de esfuerzo último de tensión, y aunque no es tan barato como la fibra de vidrio es casi un 60% más económico que el *Kevlar*<sup>®</sup>; por estas razones se definió el *Twaron*<sup>®</sup> como la fibra sintética a emplear para el desarrollo del material compuesto, dado que esta presenta una alta resistencia a la tensión sin comprometer demasiado el peso y costo del producto final.

#### 4.1.3. Resinas

Para el desarrollo de pruebas de campo se realizaran laminados utilizando dos tipos de resina: viniléster y epóxica, estas resinas fueron seleccionadas ya que estas presentan buenas propiedades mecánicas y además tienen alta disponibilidad en el mercado, adicionalmente presentan un precio moderado; esto dará un panorama de relevancia de este elemento en el sistema, puesto que las resinas viniléster tienen

un costo menor a las epóxicas y solo es posible analizar la viabilidad del uso del material de menor precio a partir del análisis de despeño en todo el sistema laminado.

## **4.2. Materiales empleados en las pruebas**

De acuerdo a la selección de materiales en el punto anterior, se resume los materiales que serán estudiados en el desarrollo de esta investigación, tanto para las placas de los diferentes materiales sobre los cuales se realizaran los ensayos, como de las municiones que serán empleadas en las pruebas para impactar dichos materiales.

### **4.2.1. Placas**

- Acero Inoxidable
  - Calibre 14, (1.9mm Aproximadamente)
  - Proveedor: Acinox.
  
- Acero 1020
  - Calibre 14, (1.9mm Aproximadamente)
  - Proveedor: Corteaceros
  
- Acero 1020 Cementado
  - Calibre 14, (1.9mm Aproximadamente)
  - Proveedor: Corteaceros – Tratar S.A
  
- Acero Balístico
  - Calibre 3mm
  - Proveedor: Confidencial.

- Acero Templado
  - Calibre 14, (1.9mm Aproximadamente)
  - Proveedor: Confidencial
  
- Twaron
  - Referencia 3360
  - Tejido bidireccional
  - Proveedor: Confidencial
  
- Resina Epóxica
  - Referencia COLREPOX 6090 A / 1956 B
  - Precio:\$19.700/kilo
  - Proveedor: Sumiglas - Colquímicos
  
- Resina Viniléster
  - Referencia A 430
  - Precio: \$14.000 / Kilo
  - Proveedor: Sumiglas – BASF

#### **4.2.2. Municiones**

Se seleccionaron 2 tipos de municiones para la realización de las pruebas de campo con base a su accesibilidad y a las diferentes características de cada una, las seleccionadas fueron las siguientes:

##### **4.2.2.1. 9mm Parabellum**

Munición usada principalmente en pistolas con un peso aproximado de 7.5g, alcanza velocidades de hasta 350m/s y contiene un núcleo de plomo encapsulado en una camisa de

cobre. A continuación podemos ver una imagen de la munición (Ver figura 16). Para la realización de las pruebas este proyectil será disparado a 5m de las placas a ensayar.



Figura 16. Munición calibre 9mm Parabellum.  
(Fuente: <http://www.123rf.com>)

#### 4.2.2.2. 5.56mm

Esta munición usada comúnmente en rifles tiene un peso de 4g con lo que alcanza velocidades de hasta 940m/s y su núcleo está compuesto al igual que el 9 mm de plomo con una camisa de cobre. Podemos ver una imagen de la munición en la figura 4 que se encuentra en el estado del arte. Este proyectil se dispara a 20 m de las placas a ensayar.

### 4.3. Caracterización de materiales

Se aplican métodos de medición a las muestras de láminas de acero disponibles en el mercado que cumplieran con los prerrequisitos obtenidos en los documentos y textos que han sido citados en este trabajo, se partió de las siguientes conceptualizaciones:

1) Sobre las láminas ya que poseen densidades muy similares se busca homologar el espesor, y se define como 2mm por razones de peso que es una limitante, además no es lógico proponer un producto con un peso mayor a los existentes en el mercado.

2) Se desea obtener una dureza lo más cercano posible a 50-60 Hardness Rockwell en escala C (HRC) por lo tanto serán aplicados tratamientos térmicos para obtener dichos valores.

Se trabajó con un estándar en relación con el espesor de dichas láminas por lo tanto la variable que requirió análisis de laboratorio fue la dureza, esta medida fue tomada con un durómetro HÄRTEPRÜFER GNEHN (Ver figura 17) para medición en HRC, para la medición se utilizó un indentador con punta de diamante, medición que es práctica para el proyecto ya que los valores de referencia de los documentos relacionados a utilización de aceros en aplicaciones balísticas utilizan esta misma escala.



Figura 17. Durómetro HÄRTEPRÜFER GNEHN (tomado de: Laboratorio de materiales Universidad EAFIT, Medellín, Colombia)

Para las fibras poliméricas no se realizaron análisis de laboratorio ya que los filtros que se impusieron para la obtención de materiales nos condujeron a un único resultado, el cual fue una manta de *Twaron*® tejida bidireccional, por lo tanto se utilizó la información del proveedor que fabrica el hilo de fibra polimérica (*Teijin*) para la base de propiedades mecánicas, pero adicionalmente para la unión entre las placas metálicas y las mantas poliméricas era necesario utilizar resinas, y estas también fueron analizadas bajo los criterios de precio, peso, desempeño y disponibilidad, para este caso el análisis plantea dos posibles referencias, resina epóxica y viniléster, ambas poseen buenas propiedades químicas de adhesión, rigidez y permeabilidad, pero como es común en el trabajo con materiales compuestos la mejor forma de comprobar estas variables es con la aplicación y uso de dichos materiales, ya que existe gran diversidad de proveedores de fibras sintéticas y resinas poliéster, viniléster, epóxicas, entre otras y la posibilidad que un proveedor asegure determinadas propiedades de un compuesto son algo limitadas, por lo tanto una vez que se obtuvieron las materias primas se procedió al proceso de laminado y verificación del comportamiento en la manufactura, para ambas fue satisfactoria, por ello solo resta realizar la verificación en el uso con la ayuda de las pruebas de campo.

#### **4.4. Método experimental**

El método experimental está directamente ligado a la metodología científica, su fin es simple: recrear situaciones o eventos físicos para la comprobación, demostración y chequeo de hipótesis generadas en torno a la modificación de variables ligadas a los resultados analizados. En este caso se encontró posible y controlable realizar pruebas de laboratorio que brinden resultados teóricamente prácticos en la realización de los productos que se desean integrar al conflicto, pero se le advirtió al equipo

de trabajo de este proyecto por parte del personal del ejército que ya se habían enfrentado a productos similares avalados bajo normas y estándares internacionales y no habían cumplido las expectativas balísticas, por lo tanto, una estrategia para asegurar el éxito del producto propuesto en este trabajo es realizar pruebas de campo directamente, es posible que esto se deba a las muchas otras variables que afectan el tema del funcionamiento adecuado del producto con respecto al proyectil, tales como, el fabricante del arma y el proyectil, además, de las calidades de los procesos y materias primas de los mismos y por último, factores como la distancia y el ángulo del disparo, bajo estas recomendaciones se hace mucho más claro que más práctico realizar pruebas de campo preliminares.

Tras el éxito del producto, se debe proceder a caracterizar y realizar pruebas de laboratorio adicionales, que permitan enmarcar el comportamiento del producto de una manera más técnica y entendible, sin lugar a dudas, la intención ingenieril del proyecto a futuro no se detiene en cumplir expectativas funcionales, se busca también tener, comprender las razones por las cuales el producto es exitoso o no, esto permite optimizar y proponer variaciones útiles y prácticas para promover el mejoramiento continuo del producto.

Para las pruebas de campo se establecieron dimensiones estándar de 20\*20cm para todas las placas a ser ensayadas, como se muestra en la figura 18, con el fin de elaborar una placa lo suficientemente grande para permitir a la persona encargada de dispararle a la placa desde 5m de distancia posea mayor facilidad para acertar en el blanco.

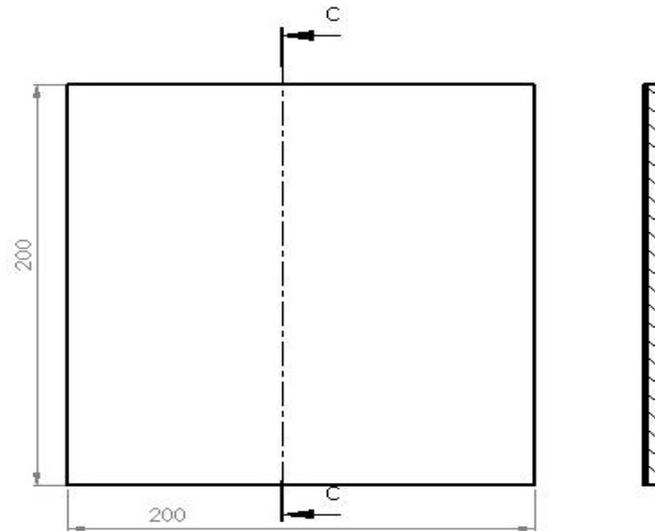


Figura 18. Dimensiones de la placa para la elaboración de las pruebas de campo. Unidades en mm.

Cada uno de las configuraciones de materiales se prueban con ambas municiones como se muestra en la tabla resumen de pruebas preliminares (ver tabla3) y así observar el comportamiento de estos frente a estos 2 tipos de municiones diferentes. El hecho de efectuar 2 disparos consecutivos en el material no afecta las propiedades de este ya que la respuesta a un impacto balístico está dominado por un esfuerzo propagado en forma de onda a través del espesor del material lo que ocasiona que el daño sea localizado ya que el evento del impacto termina antes que las ondas de esfuerzo lleguen a las condiciones de frontera del material (soportes) [7].

Material	Munición	Distancia de disparo
Resina Viniléster con 10 capas de <i>Twaron</i> ®	Cal. 9mm	5m
	Cal. 5.56mm	20m
Resina Epóxica con 10 capas de <i>Twaron</i> ®	Cal. 9mm	5m
	Cal. 5.56mm	20m
Acero Templado Cal 14 con 5 capas de <i>Twaron</i> ® en resina Viniléster	Cal. 9mm	5m
	Cal. 5.56mm	20m
Acero Templado Cal 14 con 5 capas de <i>Twaron</i> ® en resina Epóxica	Cal. 9mm	5m
	Cal. 5.56mm	20m
Acero Inoxidable Austenítico Cal 14	Cal. 9mm	5m
	Cal. 5.56mm	20m
Acero Templado Cal 14	Cal. 9mm	5m
	Cal. 5.56mm	20m
Lamina Balística 3mm de espesor	Cal. 9mm	5m
	Cal. 5.56mm	20m
Acero 1020 cementado	Cal. 9mm	5m
	Cal. 5.56mm	20m
Acero 1020	Cal. 9mm	5m
	Cal. 5.56mm	20m

**Tabla 3. Tabla resumen de las pruebas preliminares en donde se evidencia los materiales a probar, las municiones a utilizar por cada material y la distancia a las que será efectuado el disparo.**

Por otro lado, tal y como se aprecia en la tabla anterior, el objetivo de las pruebas es comparar el comportamiento de materiales metálicos, los laminados de fibras poliméricas aglomerados con resina y estos laminados de material compuesto con una placa metálica y así obtener una idea inicial de dicho comportamiento que permita seleccionar la mejor configuración y disposición de materiales; debido a esto, se selecciona el acero templado combinado con *Twaron*® y las diferentes resinas para generar un primer material compuesto y así detallar su funcionamiento en conjunto en una prueba preliminar, en el momento de ser impactado por un proyectil.

#### **4.5. Fabricación de muestras**

Para esta etapa no se tiene en cuenta las láminas metálicas que son probadas solas ya que el proceso productivo de estas estará en manos de los proveedores mencionados anteriormente en la especificación de materiales; por tanto, si se tendrá en cuenta la elaboración de los compuestos de fibra sintética, resina con la adición de una placa metálica frontal.

Por lo tanto, se aprovechan las características propias de los materiales para aumentar la adhesión entre ellos; partiendo de las propiedades adhesivas de las resinas, se procede a realizar un tratamiento de acabado con una grata en la superficie del acero que se encuentra en contacto con el laminado de fibra sintética y resina, garantizando con ello una unión más fuerte, ya que las ralladuras e imperfecciones que la grata graba en la superficie funcionan como anclajes para la resina (Ver figura 19), permitiendo que el sistema quede bien adherido y sus partes desempeñen una labor óptima.

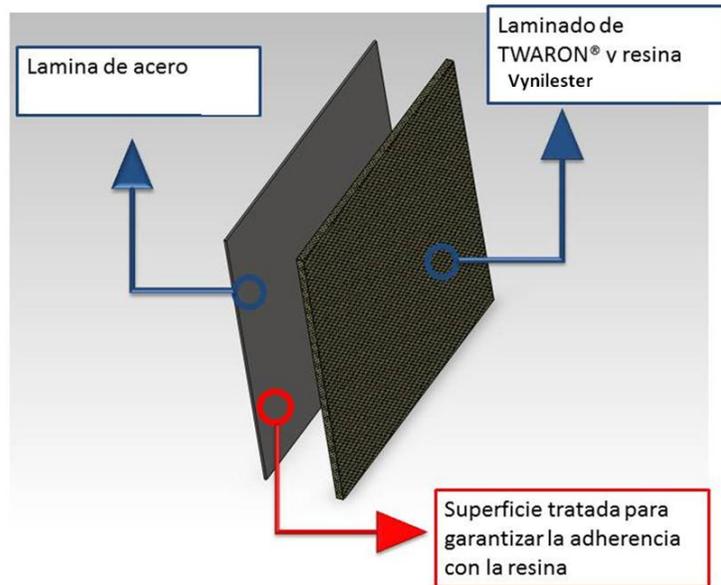


Figura 19 .Partes y características de la placa compuesta en explosión.

El proceso de laminación se inicia a partir de las placas de acero cortadas a las dimensiones establecidas, posteriormente se procede a aplicar un tratamiento superficial a la placa de acero por medio de una grata (Ver figura 20a). El paso siguiente a efectuar es aplicar una capa de resina catalizada, sobre esta sin endurecer, se lamina la primera capa de *Twaron*® por el proceso de Hand lay up el cual consiste en aplicar fibras sintéticas en un molde utilizando un proporción en peso aproximada de 55% de resina y un 45% de la fibra de manera manual, se continúan laminando las demás capas de *Twaron*® hasta obtener el espesor deseado (Ver figura 20b). Finalmente, utilizando una placa impregnada con desmoldante (alcohol poli vinílico) y prensas manuales se comprime la lamina de acero inoxidable junto con los laminados de *Twaron*® y resina para reducir los excesos de esta y garantizar una mejor adherencia entre la resina y el acero templado (Ver figura 20c). Finalmente se espero alrededor de 48 horas para desmoldar (Ver figura 20d) y se les dieron al

menos una semana adicional para que los materiales terminaran de curar. Todos los materiales laminados se fabricaron al mismo tiempo para garantizar el mismo grado de curado en la resina.



a)



b)



c)



d)

**Figuras 20.** Proceso productivo del material compuesto, comenzando de izquierda a derecha por el acabado superficial (a), laminado (b), prensado y curado del material(c), resultado final (d).

#### 4.6. Fabricación del soporte para las pruebas

Para sostener las placas durante las pruebas de campo fue necesario el diseño y construcción de un soporte, que además de mantenerlas fijas durante las pruebas, permitió que los proyectiles impactaran de forma perpendicular en los materiales. Las placas son sujetadas al soporte por medio de un sistema de prensa ayudado con tornillos de tal forma que resistan la energía de los impactos balísticos sin dejar mover dichas placas, en las figuras 21 y 22 a continuación se puede apreciar el resultado final del soporte.



**Figuras 21 y 22.** Soporte en el lugar de pruebas (Izquierda) Vista del soporte acabado (Derecha)

Finalmente, en la zona inmediatamente posterior a la placa, se posiciono arcilla de aproximadamente 2 pulgadas de espesor, debido a que uno de los parámetros claves a analizar es el trauma posterior del material, definido como la herida no penetrante que resulta de la rápida deformación del material en un usuario contiguo al material; ya que aunque el material sea capaz de detener por completo el proyectil, parte de su energía

cinética es transmitida al cuerpo hiriéndolo o inclusive ocasionando la muerte, por lo tanto la deformación producida en la arcilla será medida para luego ser analizada [1], en la figura 23 a continuación podemos apreciar una figura de la arcilla posicionada en el soporte.



**Figuras 23.** Arcilla empleada para el análisis del trauma luego del impacto.

## **4.7. Prueba**

### **4.7.1. Prueba preliminar**

Las pruebas iniciales fueron realizadas en el batallón de Ingenieros Pedro Nel Ospina ubicado en el municipio Bello con ayuda y seguimiento del ejército de Colombia. Se utilizó una muestra de cada uno de los materiales descritos en la tabla 3, debido a que se contaba con una cantidad limitada de materias primas de las laminas metálicas, mantas de *Twaron*® y municiones, ya que por ejemplo el acero templado y balístico particularmente se debía comprar como mínimo áreas muy grandes del material, afectando directamente los costos del proyecto, por lo que se

recurrió a solicitar retazos de estos y la cantidad encontrada fue suficiente para la elaboración de una placa.

Para mejorar la reproducibilidad en los ensayos, todos los disparos fueron efectuados por un mismo tirador en una misma posición y a una misma distancia según la munición, con el fin de disminuir para eliminar la mayor cantidad de variables del disparo. Por otro lado, las láminas metálicas analizadas presentaban igual espesor de 1.9mm, exceptuando la lámina balística cuyo espesor mínimo comercial es de 3mm. Para ver el registro fotográfico de las pruebas favor referirse al Anexo 1.

#### **4.7.2. Análisis técnicos iniciales**

Con estos análisis se pretende evaluar el desempeño de los diferentes materiales que fueron sometidos a la prueba de campo inicial y así obtener mayor información acerca de ellos y así seleccionar de una forma efectiva los mejores para conformar el compuesto. Este análisis será realizado en varias etapas. En una primera etapa se realizó una evaluación del comportamiento balístico en las placas metálicas en base a la medición del cráter generado por el impacto del proyectil calibre 9mm, en la siguiente etapa se pretende evaluar el comportamiento balístico de los materiales compuestos reforzados con fibras sintéticas para finalmente analizar las deformaciones en la arcilla luego de ser impactados cada uno de los materiales por el proyectil mencionado con anterioridad.

#### **4.7.2.1. Primera etapa, evaluación del comportamiento balístico en placas metálicas.**

Para este análisis es necesario tomar las medidas mencionadas en el numeral **3.5.2** de las láminas metálicas luego de ser impactadas por el proyectil calibre 9mm, dichas medidas son:

- Df= El diámetro frontal de impacto.
- Lk= La altura del cráter.
- Dh= El diámetro de agujero de salida del proyectil.

El objetivo de esta etapa, es comparar las deformaciones ocasionadas por el proyectil mencionado en las diferentes placas metálicas y así ver los diferentes comportamientos de ellas al ser sometidas a aproximadamente la misma cantidad de energía.

#### **4.7.2.2. Segunda etapa, evaluación del comportamiento balístico en materiales compuestos reforzados con fibras sintéticas**

Este análisis está basado en la investigación mencionada en el punto **3.5.1**, en donde se analiza el cráter o la región dañada por el impacto en materiales compuestos de un proyectil calibre 9mm, que en nuestro caso corresponderá a las laminas de 10 capas de *Twaron*® en resina epóxica y viniléster.

Para lograr este análisis, luego de las pruebas de campo se realizo un registro fotográfico en donde a cada una de las laminas se delimito con marcador rojo la zona del cráter en el material, y luego con ayuda de un software CAD, Solidworks, se resolvieron

las ecuaciones de Relación de Ferret, Factor de Circularidad y Relación de Áreas.

#### 4.7.2.3. Tercera etapa, análisis del trauma posterior al material en la arcilla

Este análisis se lleva a cabo sobre todos los materiales sometidos a pruebas de campo, tanto metálicos como compuestos ya que su objetivo como se menciona con anterioridad es comparar la energía cinética residual del material luego de sufrir el impacto por el proyectil midiendo la deformación de un bloque de arcilla adjunto a la placa en el momento de las pruebas. Esta deformación puede ser considerada como la energía que afectaría a cualquier objeto o persona posterior a la placa causando daños [1].

En esta prueba se analizaron 2 escenarios diferentes uno para placas perforadas por el proyectil calibre 9mm y otro para placas no perforadas, para cada uno de los casos a se muestra imágenes de las medidas tomadas de la deformación de la arcilla (Ver figura 24 y 25).



Figuras 24 y 25. Medición del agujero de salida para materiales perforados (Izquierda) y medición de la altura máxima de deformación en la arcilla para materiales no perforados (Derecha)

De acuerdo con los resultados obtenidos en la etapa de análisis y con la selección de los materiales adecuados para la conformación del compuesto, se elabora un proceso de optimización a partir del cual se pretende mejorar el desempeño, el peso del material compuesto, partiendo de bibliografías consultadas. Para finalmente fabricar estos materiales optimizados, los cuales serán sometidos a una prueba de campo final para validar su desempeño.

## 5. Análisis de resultados

En primer lugar, de acuerdo a la caracterización de los materiales metálicos a ensayar se encontraron los siguientes valores (Ver tabla4):

<b>Nombre</b>	<b>Dureza (HRC)</b>
<b>Acero Inoxidable</b>	25
<b>AISI 1020</b>	65 (HRB)
<b>AISI 1020 Cementado</b>	37
<b>Acero Balístico</b>	50
<b>Acero Templado</b>	48

Tabla 4. Resultados obtenidos de la medición de dureza en las láminas metálicas.

Como se puede apreciar se encontró que el material con mayor dureza fue el acero balístico, seguido por el acero templado; por otro lado observamos que el material con menor dureza fue el acero 1020, pero que al ser sometido al proceso químico de cementado su dureza aumento considerablemente presentando mejores características que el acero inoxidable, por lo que, la

utilización de este medio para mejorar las propiedades del material puede ser considerada en futuros estudios.

Por otro lado las pruebas Preliminares arrojaron como resultado que ninguno de los materiales propuestos logro detener la munición de rifle calibre 5,56mm, debido a alta velocidad y geometría de la misma, generando así una perforación en la mayoría de los materiales sin ningún tipo de resistencia. El análisis de los cráteres en la mayoría de los materiales analizados tampoco indican absorción de energía por parte de los materiales para detener el proyectil a excepción del material con acero templado y acero balístico, en donde se presenta un cráter de poca altura, que indica que hubo una mayor absorción de energía cinética que en los demás probados.

Sin embargo, al tratar de detener la munición calibre 5,56 mm y debido a que se necesitaría un mayor presupuesto en materiales de alta ingeniería con compromiso los factores: peso, costo y accesibilidad, se tomo la decisión de enfocar el desarrollo del material compuesto de esta tesis en la detención balística, únicamente la munición calibre 9mm para pistolas y así dejar abierta la posibilidad, mediante nuevas investigaciones encontrar la forma de detener una munición 5,56mm.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las diferentes pruebas y el análisis de los diferentes comportamientos presentes en láminas metálicas y en materiales compuestos reforzados con fibras sintéticas.

## 5.1. Primera etapa, evaluación del comportamiento balístico en placas metálicas

Las medidas obtenidas para esta etapa fueron las siguientes (Ver tabla 5).

<b>Material</b>	<b>Df (mm)</b>	<b>Lk (mm)</b>	<b>Dh (mm)</b>
Acero Templado Cal 14 con 5 capas de <i>Twaron</i> ® en resina Vynilester	<b>32</b>	<b>2,4</b>	<b>N/A</b>
Acero Templado Cal 14 con 5 capas de <i>Twaron</i> ® en resina Epóxica	<b>28,2</b>	<b>2</b>	<b>N/A</b>
Acero Templado Cal 14	<b>37,8</b>	<b>4,3</b>	<b>N/A</b>
Acero Inoxidable Austenítico Cal 14	<b>52</b>	<b>10,4</b>	<b>N/A</b>
Lamina Balística espesor 3mm	<b>15,6</b>	<b>0,5</b>	<b>N/A</b>
Acero 1020 Cal 14	<b>30,5</b>	<b>7,5</b>	<b>11,95</b>
Acero 1020 cementado Cal14	<b>49,2</b>	<b>11,8</b>	<b>N/A</b>

**Tabla 5. Resultados obtenidos de la medición del cráter en las láminas metálicas luego de ser impactadas por munición calibre 9mm.**

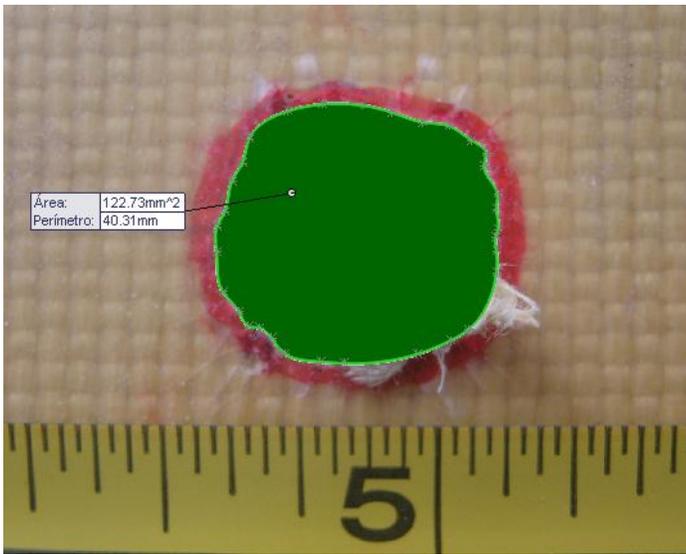
Como se aprecia en la anterior tabla, el material con mejor comportamiento según el análisis del cráter, es la lámina balística ya que presenta un cráter de medidas muy reducidas casi llegando a un valor de 0 en la altura, seguido por el acero templado con 5 capas de *Twaron*® y resina epóxica el cual si se observa las medidas del cráter del acero templado solo se reduce hasta un 53% la altura del cráter y un 25% el diámetro frontal, si se compara estos resultados con los obtenidos por el acero templado reforzado con resina viniléster podemos apreciar que el comportamiento de la resina epóxica da indicios de ser más rígida que la viniléster al presentar un cráter de menor medidas que el cráter de la última. Lo anterior, dado por el solo hecho de adicionarle otro material que ayude a recibir y disipar la energía cinética del proyectil; y por ello se realiza un

análisis general de los materiales teniendo en cuenta varios factores que sirven como base para la selección.

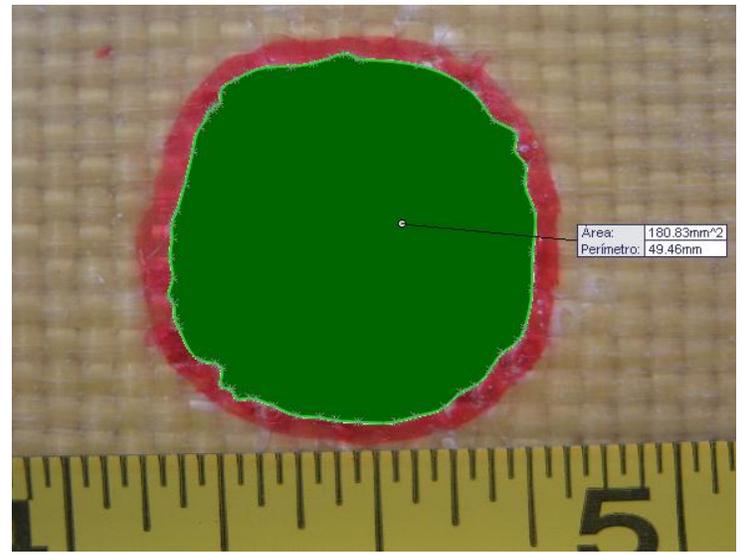
Adicionalmente se observa que la lámina de 1020 cal 14 fue la única lámina que no detuvo el proyectil 9mm, pero que esta al ser sometida al proceso de cementado si la detuvo, por lo tanto el proceso de cementado como medio para aumentar la dureza y propiedades del material puede ser un factor a tener en cuenta en futuras investigaciones y desarrollos, aunque la realización de este proceso aumente los costos productivos en casi un doble de lo que sería el precio de la lamina sin tratar. Finalmente más adelante en el numeral **5.4** se hará un análisis individual de los resultados obtenidos en las pruebas para cada una de las láminas metálicas.

## **5.2. Segunda etapa, evaluación del comportamiento balístico en materiales compuestos reforzados con fibras sintéticas.**

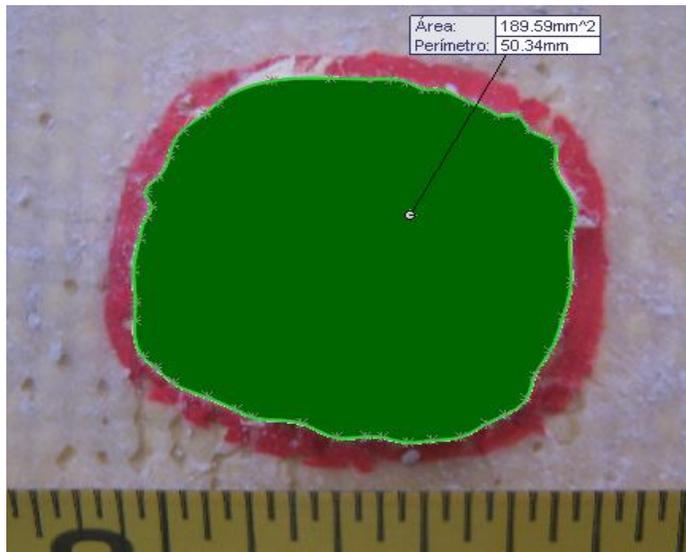
Para esta etapa fue primero necesario procesar las imágenes obtenidas en SolidWorks y así poder calcular su área y su perímetro como se observa en la figura 26.



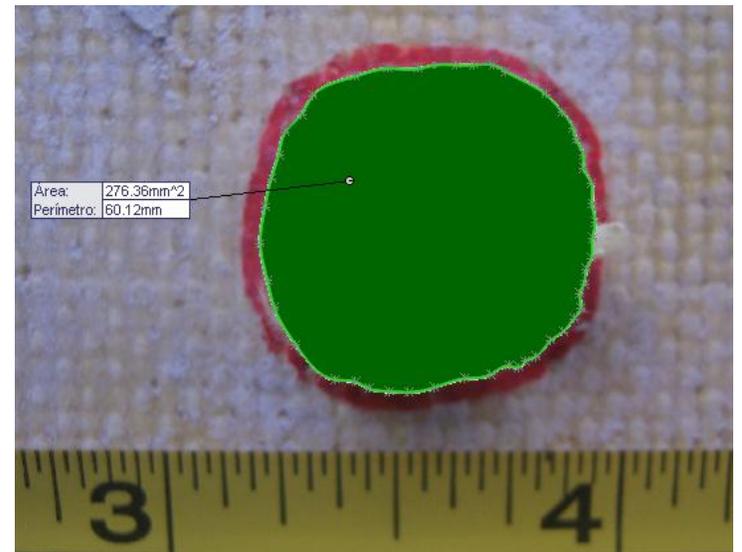
a)



b)



c)



d)

Figura 26. a) Cráter frontal y b) posterior de la placa de 10 capas de *Twaron*® con resina Viniléster y c) Cráter frontal y d) posterior de la placa de 10 capas de *Twaron*® con resina Epóxica.

Los resultados obtenidos de acuerdo a la figura anterior se pueden apreciar en la tabla a continuación (Ver tabla 6).

Material	Entrada/ Salida	Fmax (mm)	Fmin (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Perímetro (mm)	Relación de Ferret (Fmin/Fmax)	Factor de circularidad (4*A / $\pi$ *Fmax <sup>2</sup> )	Relación de aéreas (As/Ae)
10 capas de Twaron® con resina viniléster	Entrada	16	14.5	180.3	49.46	0.9	0.90	1.532
	Salida	19.7	17.4	276.36	60.12	0.88	0.91	
10 capas de Twaron® con resina epóxica	Entrada	13.6	11.4	122.73	40.31	0.83	0.84	1.544
	Salida	17	13.9	189.59	50.34	0.8	0.84	

Tabla 6. Resultados obtenidos de la medición del cráter en las láminas compuestas luego de ser impactadas por munición calibre 9mm.

Según los datos de la tabla anterior podemos observar que el área del cráter en la lamina de resina epóxica es alrededor de un 30% menor que el de viniléster, lo que significa que el primero sufrió un daño menor que el segundo, pero al observar las relaciones de comportamiento isotrópico del material se nota que tanto en la relación de Ferret como en el Factor de circularidad en ambos materiales se presentan valores muy cercanos, mostrando un comportamiento más isotrópico la resina viniléster por una ventaja de 6 centésimas, por otro lado se observa que una relación de aéreas en los materiales muy similar por lo que se asume que en ambos casos la absorción y dispersión de la energía del proyectil fue semejante, sin embargo se hace necesario la elaboración de más pruebas en trabajos posteriores con el fin de establecer la validez de dicha afirmación . Al igual que para las láminas metálicas, se realizara un análisis más profundo de estos materiales en el numeral **5.5**.

### 5.3. Tercera etapa, análisis del trauma posterior al material en la arcilla.

Las medidas obtenidas para los diferentes materiales se muestran resumidas a continuación en la tabla7:

Material	Agujero de salida (mm)	Altura Máxima de deformación (mm)
Resina Viniléster con 10 capas de <i>Twaron</i> ®	138.2	N/A
Resina Epóxica con 10 capas de <i>Twaron</i> ®	165.6	N/A
Acero Templado Cal 14 con 5 capas de <i>Twaron</i> ® en resina Viniléster	N/A	65.7
Acero Templado Cal 14 con 5 capas de <i>Twaron</i> ® en resina Epóxica	N/A	88.1
Acero Inoxidable Austenítico Cal 14	N/A	5.5
Acero Templado Cal 14	N/A	31.2
Lamina Balística 3mm de espesor	N/A	24.5
Acero 1020 cementado	N/A	8.8
Acero 1020	145.8	N/A

Tabla 7. Resultados obtenidos de la medición del trauma posterior en la arcilla en todos los materiales luego de ser impactados por munición calibre 9mm.

Con la información acumulada y el análisis de la deformación en la arcilla, es posible la comprobación de algunas hipótesis y la aparición de comportamientos singulares pero no ajenos a la lógica partiendo de las propiedades conocidas de los materiales empleados. En primera instancia es claro, que el material con mejor desempeño en cuanto la absorción de energía es el acero inoxidable de la familia Austenítica, debido a la alta ductilidad del material, a diferencia de los materiales compuestos con una lámina de acero templado los cuales presentaron la mayor rigidez y por ende la menor absorción de energía. Lo anterior se explica en las propiedades de los materiales empleados, ya que la rigidez del acero templado más el *Twaron*® es considerablemente mayor al del acero inoxidable, por tanto la disipación de la energía residual en el acero inoxidable es mayor, sin embargo vemos que en los compuestos con resina viniléster presento una mayor absorción de energía que la epóxica, esto debido a que esta última es más rígida que la vynilester, siendo la

flexibilidad de la resina una propiedad deseable en el material a la hora de detener un proyectil.

#### 5.4. Análisis general para láminas metálicas.

Se realiza un análisis general de las láminas metálicas sometidas a pruebas, teniendo en consideración las propiedades mecánicas del material al igual que los resultados obtenidos en la Primera y Tercera etapa del análisis técnico como se puede apreciar en la siguiente tabla (Ver tabla8):

Material	Dureza (HRC)	Esfuerzo Máximo (MPA)	Df (mm)	Lk (mm)	Dh (mm)	Agujero de salida en la arcilla	Altura máxima de deformación En la arcilla
Acero Inoxidable Cal14	25	600	52	10,4	N/A	N/A	5,5
AISI 1020 Cal 14	65 (HRB)	380	30,5	7,5	11,95	145,8	N/A
AISI 1020 Cementado Cal 14	37	500	49,2	11,8	N/A	N/A	8,8
Acero Balístico Espesor 3mm	50	1250	15,6	0,5	N/A	N/A	24,5
Acero templado Cal 14	48	1200	37,8	4,3	N/A	N/A	31,2

Tabla 8. Resumen de los resultados obtenidos para las laminas metálicas.

Para el análisis de los resultados obtenidos de acuerdo a los puntos anteriores, donde se integran los resultados de dureza y esfuerzo máximo del material, medidas del cráter y deformación de la arcilla luego del impacto contra munición de 9mm, se realiza una segmentación de los resultados de cada propuesta.

**-Acero inoxidable:** Este material posee excelentes propiedades de absorción de energía cinética debido a que es un material más dúctil en comparación con las otras placas, y debido a esto presenta mayores deformaciones en el cráter, ello no es precisamente un indicador negativo ya que según la deformación de la arcilla queda claro que este material permitiría al material que lo sucede realizar un menor trabajo para detener el proyectil 9mm, pero es menos funcional en un escenario donde es impactado múltiples veces en una zona común, además el tamaño del cráter puede influir en la unión con otros materiales, perjudicando la integridad del producto.

**-AISI 1020 / 1020 Cementado:** para analizar el primer material o el 1020 sin el tratamiento este material debe cambiarse el enfoque ya que fue la única muestra metálica que no logro detener el proyectil, pero basados en la información ya mencionada por A. Durmus, et al en el 2011 [6] establecen una relación entre el limite balístico de un material y el diámetro de perforación de la lámina, y a medida que el material se acerca más a su límite balístico el diámetro de la perforación se acerca más del diámetro del proyectil y viceversa; este caso particular, se observa que el diámetro de salida es aproximadamente 12mm, un valor lejano al diámetro del proyectil, y es evidente que el material se encuentra alejado de su límite balístico; razón por la cual sería necesario modificar el espesor del material lo que produciría variaciones en el peso y el costo o, también, modificar la dureza del material por medio de un proceso químico o térmico, lo que aumentaría el costo considerablemente sin modificar el peso del material. Este es el caso del acero 1020 cementando, el cual demuestra que al modificar sus propiedades ha sido capaz de detener el proyectil, casi llegando al límite balístico, evidenciando lo anterior en la ruptura del material por lo tanto, un proyectil con una velocidad ligeramente mayor hubiera hecho ceder

el material. Adicionalmente, se resalta que el proceso de cementado promueve un comportamiento beneficioso en relación a la absorción de energía cinética que deja pasar el material.

**-Acero Balístico de3mm:**

Este material obtuvo los mejores resultados en relación al análisis del cráter, esto se debe a múltiples factores entre ellos, el espesor de la placa, ya que el proveedor solo distribuye este material en 3mm (variable negativa que afecta el peso del producto), consideramos que se encontraba en una posición ventajosa en comparación a las otras muestras, aun así sus propiedades de dureza y esfuerzo máximo son superiores pero no distantes a las del acero templado. Otra característica importante es la alta rigidez del material lo que produce una baja absorción de la energía cinética del proyectil por lo que presento una alta deformación en la arcilla, aun así el hecho de poseer un cráter con las menores medidas es una garantía para el escenario donde la placa recibe múltiples impactos en una zona común, ya que al no presentar un gran área de daño en el material es más probable el hecho de detener otro proyectil dado el caso que impacte en la misma zona .

**- Acero templado Cal 14:**

Esta muestra presento la mayor deformación en la arcilla en comparación con las demás placas metálicas, lo que indica una mayor rigidez, aun mas que el acero balístico de 3mm, a pesar de esto, el cráter dejado por el proyectil es reducido tanto en área como en altura en comparación al acero inoxidable y lo fue en mayor proporción al aplicarle el laminado de *Twaron*® con resina epóxica, disminuyendo en casi un 50% la altura del cráter, lo que a su vez produjo un aumento en el tamaño de la deformación de la arcilla causado por el aumento de

rigidez aportado por la resina epóxica. El aumento en el tamaño de la deformación de la arcilla fue incluso mayor al del acero balístico templado sin el laminado de soporte.

Estos resultados muestran que existe una relación entre la deformación de la arcilla y el tamaño del cráter en tanto no haya perforación de la placa, ya que a medida que el material es más rígido las medidas del cráter serán menores y la deformación en la arcilla será mayor y a medida que el material es más elástico, el cráter tendrá dimensiones mayores pero la deformación de la arcilla será menor, por tanto, habrá que tener en cuenta estos factores según la aplicación que se le dé al blindaje en un futuro próximo.

### 5.5. Análisis general para materiales compuestos reforzados con fibras sintéticas

Se elabora un análisis general para los materiales compuestos reforzados con fibras sintéticas de acuerdo a los resultados obtenidos en la Segunda y Tercera etapa del análisis técnico (ver tabla 9).

Material	Entrada/ Salida	Área (mm <sup>2</sup> )	Relación de Ferret (Fmin/Fmax)	Factor de circularidad (4*A / π*Fmax <sup>2</sup> )	Relación de aéreas (As/Ae)	Agujero de salida en la arcilla (mm)
10 capas de Twaron® con resina viniléster	Entrada	180,3	0,9	0,90	1,532	138,2
	Salida	276,36	0,88	0,91		
10 capas de Twaron® con resina epóxica	Entrada	122,73	0,83	0,84	1,544	165,6
	Salida	189,59	0,8	0,84		

Tabla 9. Resumen de los resultados obtenidos para las laminas de materiales compuestos.

El análisis de los cráteres nos permite observar que el laminado de *Twaron*® y resina epóxica se comportan de una manera similar, se podría suponer entonces que poseen un comportamiento isotrópico comparable en base a los resultados obtenidos de acuerdo a la Relación de Ferret y al Factor de Circularidad, pero el análisis de la deformación de la arcilla indica que existe una diferencia en cuanto a la rigidez en relación a la absorción de energía cinética, considerando que el *Twaron*® se está aplicando con el fin de absorber dicha energía para detener el proyectil, ya que el agujero de salida en el laminado con resina epóxica es un 20% mayor que el agujero del laminado con resina viniléster, siendo esta última por ende la que mayor energía cinética absorbe. Es pertinente dar crédito al desempeño del la lámina de acero templado reforzado con resina viniléster y *Twaron*®, ya que en las deformaciones de la arcilla, este material presenta una menor deformación en comparación a su homólogo con resina epóxica el cual presenta hasta un 30% más en la altura máxima de la deformación de la arcilla.

## **6. Selección de materiales y configuración**

Para la selección de los materiales a utilizar en las pruebas finales se utilizó una matriz ponderada para láminas metálicas en donde se evalúan de 1 a 5, siendo la primera la mínima calificación posible y la última la máxima, para cada una de las variables a considerar se califica en primera instancia, el material que presente mejores condiciones con un 5 y a partir de allí se procede a asignar la calificación a los otros materiales proporcionalmente de acuerdo a sus características. Este proceso se repite con cada una de las variables hasta completar la tabla con el fin de seleccionar el material que obtenga la mejor calificación para la conformación del compuesto (Ver tabla 10). Las variables a considerar son las siguientes:

- **Precio:** Para establecer un comparativo del precio de los materiales se toma como base el valor de un kilogramo de cada uno de los materiales, dicho valor ya fue mencionado. Esta variable es importante considerarla debido a que se pretende desarrollar un material para detener un proyectil de 9mm, con el menor costo posible y por lo tanto se le concede una valoración del 20%.
- **Disponibilidad:** Con esta variable se pretende establecer que tan accesible es el material en el mercado local y las restricciones de venta que estos presentan, ya que estos factores pueden limitar o no la producción del material compuesto y/o aumentar los costos del mismo pues al no conseguirse en el mercado nacional, se debe recurrir a la importación de materiales; por lo anterior, se le concede una valoración del 25%.
- **Resistencia:** Bajo esta variable se pretenden evaluar y considerar las propiedades mecánicas de los materiales tales como dureza, esfuerzo máximo entre otras. Puesto a que esta es una variable secundaria; ya que no es de gran utilidad si un material con excelentes propiedades no se desempeña de forma correcta, se le concede una importancia del 10%.
- **Desempeño:** De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas iniciales y a los análisis técnicos realizados para los diferentes materiales la variable pretende evaluar estos aspectos con el fin de seleccionar el material con mejor desempeño; y que este en la capacidad de detener la munición de 9mm, por lo que se le da una importancia de un 45%.

## Selección de lámina metálica.

<b>Material</b>	<b>Acero Inoxidable Cal14</b>	<b>AISI 1020 Cal 14</b>	<b>AISI 1020 Cementado Cal 14</b>	<b>Acero Balístico Espesor 3mm</b>	<b>Acero templado Cal 14</b>
<b>Criterio</b>					
<b>Precio (20%)</b>	<b>4,8</b>	5	2,3	1,9	2
<b>Valor Ponderado</b>	<b>0,96</b>	1	0,46	0,38	0,4
<b>Disponibilidad (25%)</b>	<b>5</b>	5	5	2,5	5
<b>Valor ponderado</b>	<b>1,25</b>	1,25	1,25	0,625	1,25
<b>Resistencia (10%)</b>	<b>2,5</b>	1,25	2,8	5	4,8
<b>Valor ponderado</b>	<b>0,25</b>	0,125	0,28	0,5	0,48
<b>Desempeño (45%)</b>	<b>5</b>	1	3,6	4,7	2,2
<b>Valor ponderado</b>	<b>2,25</b>	0,45	1,62	2,115	0,99
<b>Total 100%</b>	<b>4,71</b>	2,825	3,61	3,62	3,12

Tabla 10. Matriz ponderada para la selección de la lámina metálica.

Como se aprecia en la tabla anterior el material que obtuvo una mejor calificación fue el acero inoxidable ya que es un material de bajo costo con un valor de 7.000 COP el kilo, de alta disponibilidad en el mercado ya que es un material frecuentemente utilizado por la industria por lo que también es posible encontrarlo en diferentes espesores o configuraciones; adicionalmente, presenta un buen desempeño en las pruebas ya que además de detener el proyectil 9mm, fue el material que mayor absorción de energía cinética presentó entre todos los materiales debido a su ductilidad. Por otro lado aunque el acero inoxidable carece de la dureza y tenacidad del acero balístico que le permiten desempeñarse mejor como blindaje, la falta de estas características hacen posible la realización de

tratamientos superficiales con grata o perforaciones y así aumentar la compatibilidad de este con resinas para elaborar un material compuesto reforzado con fibras sintéticas y mejorar su desempeño.

### **Selección de la Resina.**

Para la selección de la resina a emplear en el compuesto, no fue necesaria la elaboración de una matriz ponderada, ya que tanto la resina epóxica como la resina viniléster presentaron un comportamiento muy similar de acuerdo a los análisis realizados de las pruebas preliminares; además de que ambas resinas son disponibles a nivel local con facilidad. Por lo tanto la única diferencia significativa encontrada en las resinas fue su precio, siendo la resina de viniléster un 30% más económica que la epóxica, razón por la cual fue seleccionada como la resina a utilizar en la fabricación del compuesto.

De esta forma los materiales seleccionados para la elaboración de las pruebas finales son:

- Acero Inoxidable Austenítico
- Resina Viniléster
- Tela tejida de *Twaron*®

Los cuales serán sometidos a un proceso de implementación de una mejora donde basados en documentos de investigaciones realizadas, se plantea el mejoramiento del desempeño de los materiales aplicando factores de diseño.

## 7. Implementación de una mejora

Como factor adicional se incorpora una variable extra posterior a la fase de selección de material, basados en el trabajo propuesto por Sidney Chocron, et al, en el 2001 [8], donde se espera agregar un factor de diseño que puede afectar el resultado de las pruebas dando como resultado una reducción en el peso del producto final. En este trabajo se encuentra el planteamiento de un posible diseño de placa donde exista una alta posibilidad de contacto inicial del proyectil versus el borde del material, generando la posibilidad de fracturar el proyectil y de este modo promover la disipación cinética, además, del aumento de área de contacto entre el proyectil y el material balístico. Con ello, se deja a la fibra polimérica operar en función de sus cualidades más destacadas, tales como, la absorción de energía cinética la cual se ve altamente beneficiada por el cambio esperado en el área de contacto.

Para lograr la aplicabilidad de este concepto, se debe proponer un escenario donde se obtenga un impacto contra un borde del acero reduciendo en la menor medida posible la integridad del material, además en caso tal que el proyectil no impacte contra un borde, el resultado del impacto debe tener consecuencias que permitan asegurar la detención del mismo; La propuesta se consolida de la siguiente manera:

-Se perfora la placa asegurándose que las perforaciones sean de la mitad del diámetro del proyectil, garantizando el escenario donde el proyectil impacta el centro de una perforación y logrando detener el avance.

-Se ubican los agujeros a una distancia equivalente al 1.5 veces el diámetro del proyectil entre los centros de las perforaciones y así dado el escenario donde el proyectil impacta en el punto medio entre cuatro perforaciones

como se ilustra en la figura 27, se garantiza material suficiente para afrontar el proyectil, previendo una posible situación de ruptura para materiales rígidos que se puede apreciar en la figura 28, y una mayor deformación en materiales con alta ductilidad.

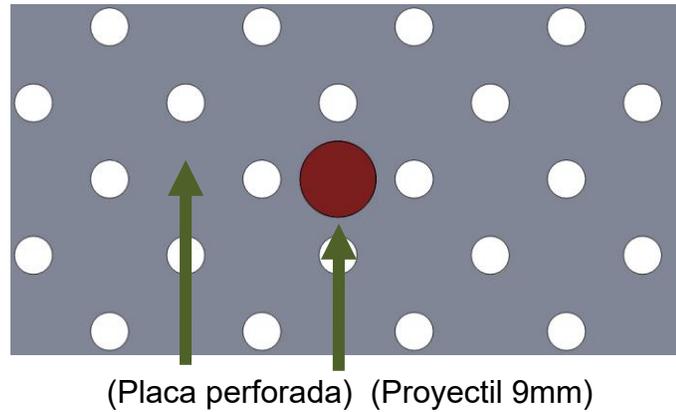


Figura 27. Vista frontal ilustración de la placa perforada.

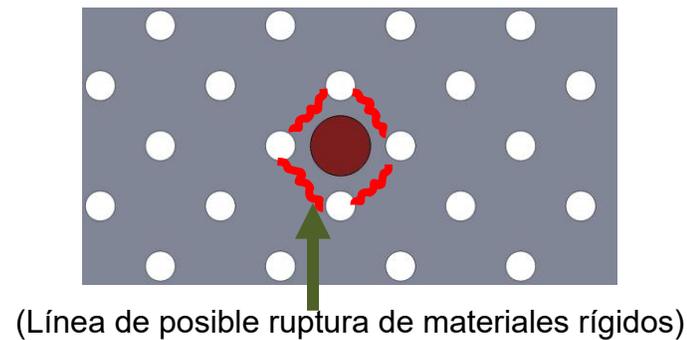


Figura 28. Vista frontal ilustración de la placa perforada con líneas de fractura posible según el impacto propuesto.

-Se espera luego de los escenarios críticos propuestos que los demás puntos de impacto del proyectil tengan un comportamiento similar al propuesto en el documento de Sydney Chocron, et al, en el 2001 [8] donde se espera que el proyectil sea fracturado tal como lo ilustra la figura 29 tomada del mismo documento.

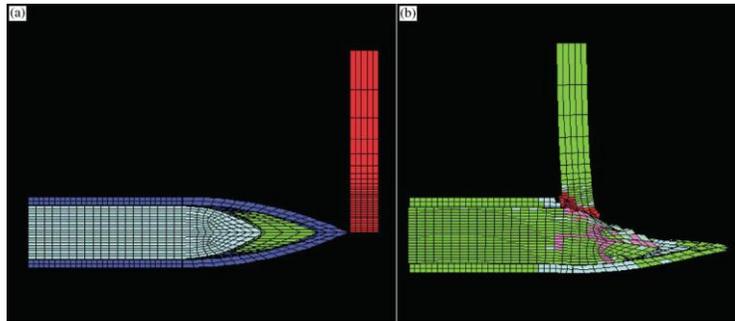


Figura 29. Simulación en CAE del impacto de un proyectil tipo APM2 7.62-mm contra el borde de una placa metálica de 3.175 mm de espesor y 1400 MPA de esfuerzo de fluencia.

(Fuente: Impact of the 7.62-mm APM2 projectile against the edge of a metallic target, por Sydney Chocron, et al, en el 2001)

Adicionalmente, para seleccionar el calibre del acero a trabajar se decidió reducir el espesor de este a 1mm (Calibre 20) con el fin de reducir el peso y el costo del material. Sin embargo, esta reducción en el espesor afecta directamente el desempeño de la lámina por lo cual se propuso reforzarla con 5 capas de *Twaron*® en resina viniléster ya que según las pruebas realizadas anteriormente se pudo apreciar el buen comportamiento que tiene este numero de laminados en conjunto a una placa metálica, reduciendo casi que en un 50% la altura del cráter del proyectil.

Por último, con el fin de establecer un comparativo de desempeño para el compuesto con la placa perforada, se propuso un material similar al anterior con la diferencia de que este no llevara perforaciones, para establecer comparativos entre costos, peso, desempeño y compatibilidad que permitan validar la optimización realizada.

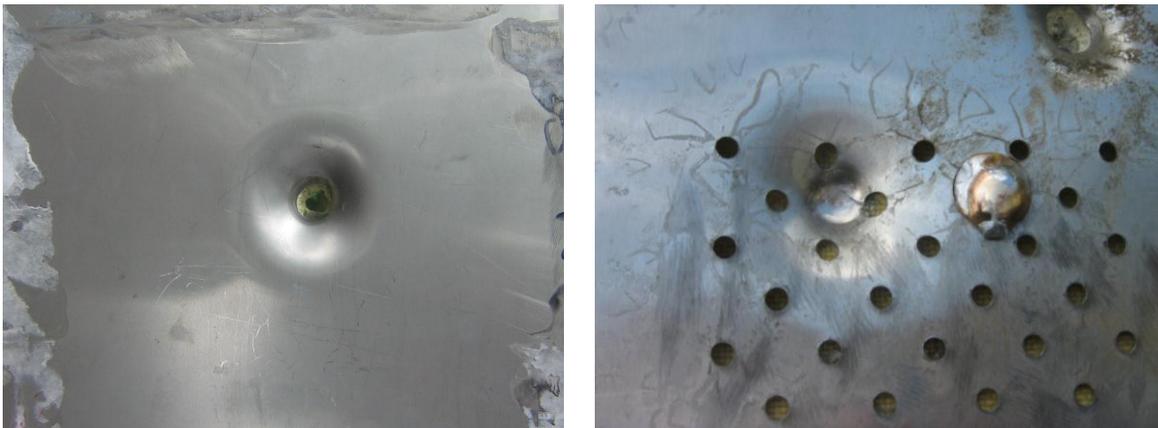
## 8. Prueba de campo final

Las pruebas finales fueron realizadas el jueves 13 de Octubre de 2011 en el batallón de Ingenieros Pedro Nel Ospina ubicado en el municipio Bello con ayuda y seguimiento del Ejército de Colombia.

Para esta prueba se consideraron los siguientes materiales a ser impactados por un proyectil calibre 9mm a una distancia de 5 metros:

- Acero inoxidable Calibre 20 perforado con 5 capas de *Twaron*® en resina viniléster.
- Acero inoxidable Calibre 20 sin perforaciones con 5 capas de *Twaron*® en resina viniléster.

Como se puede observar en la figura 30, el material no perforado, no fue capaz de detener el proyectil de la munición, mientras que el material perforado si pudo detenerla como se evidencia en la figura 31.



**Figuras 30 y 31. En la figura izquierda apreciamos el resultado del impacto en el material sin perforaciones y en la figura derecha el resultado obtenido en la placa con perforaciones.**

De acuerdo a estos resultados es posible evidenciar que la adición de las perforaciones en la placa mejora claramente su desempeño y por ello, se recomienda la realización de pruebas adicionales en futuros trabajos, sobre materiales con perforaciones para garantizar que ellas si optimicen el comportamiento del material como blindaje.

Adicionalmente, al tomar las medidas del cráter del acero inoxidable Cal 20 y compararlas con las medidas tomadas del acero inoxidable Cal14 en las primeras pruebas (Ver Tabla 11), encontramos que, aunque se presenta una diferencia entre los espesores, esperando que el cráter en la lámina de menor espesor fuera la de mayor cráter, las dimensiones encontradas son muy similares, posiblemente debido a que la resina con fibras sintéticas sirvió como soporte de la placa perforada y absorbió la energía cinética del proyectil, haciendo, por lo tanto, que el cráter fuera de menor tamaño al esperado, siendo casi igual al cráter de la lamina de acero inoxidable Cal 14.

	<b>Acero inoxidable perforado Cal 20.</b>	<b>Acero inoxidable sin perforar Cal 14.</b>
<b>Df (mm)</b>	53,8	52
<b>Lk (mm)</b>	10,5	10,4

**Tabla 11 .comparación de los cráteres en las laminas de acero inoxidable.**

Otros factores a tener en cuenta en el análisis del material perforado, son la reducción de peso en el material en dichas perforaciones y cuanto es el sobre costo del material para fabricarlas. En lo que respecta al peso y asumiendo que se trabaja con una lámina de acero inoxidable Cal 20, de 20 x 20 cm totalmente perforada se encuentra que hay una reducción de peso entre ésta y una sin perforar del 6,5% valor que aumentará progresivamente a medida que aumente el espesor del material siendo la reducción de peso en una lámina de las mismas especificaciones, pero Cal 14, de un 13% y así sucesivamente. Por otro lado, el sobre costo del material para generar las perforaciones, se verá afectado principalmente por el método seleccionado para tal fin, ya que no costara lo mismo generarlas mediante corte por laser que en un centro de mecanizado; tomando este como referencia y en base a que las perforaciones fueron elaboradas mediante el proceso de punzonado

con un sobrecosto de un \$42.000 COP el cual equivale a casi 10 veces más el valor de una placa sin perforar.

De acuerdo a estos dos últimos factores, el peso y el sobrecosto de la lámina perforada se observa que la reducción en peso en láminas delgadas es insignificante versus el sobrecosto que genera realizar dichas perforaciones, pero a medida que se trabaje con laminas de espesores más gruesos será mayor el ahorro en material y por lo tanto justifica la inversión en las perforaciones, siempre y cuando se tenga en cuenta que las diferentes aplicaciones que existen para los blindajes estarán constituidas por necesidades diferentes, ya que si el objetivo es optimizar al máximo el peso de un blindaje con cierta tolerancia en los costos, la propuesta de un blindaje perforado deberá ser considerado.

Por lo tanto, se propone la utilización del acero inoxidable perforado reforzado con 5 capas de *Twaron*® en resina viniléster en situaciones donde el factor de peso sea más importante que el factor costo, como el caso de las camionetas de transporte militar donde el blindaje empleado es una palca maciza de acero, la cual, podría ser reemplazada por un material más liviano que ahorre el consumo del combustible del mismo.

## **9. Conclusiones**

- De acuerdo a la bibliografía consultada se encontró que dos de las características principales a considerar para el desarrollo de un material balístico son la dureza y tenacidad del material, ya que éstas permiten la deformación del proyectil y la absorción de la energía transmitida por el mismo para detenerlo.

- En la prueba de campo inicial se obtuvo como resultado que la mayoría de los materiales fueron capaces de detener la munición de 9mm exceptuando al acero 1020, la lamina de 10 capas de *Twaron*® y resina viniléster; y la de 10 capas de *Twaron*® y resina epoxica. Pero ningún material estuvo en la capacidad de detener la munición de fusil 5,56mm debido a la gran cantidad de energía cinética presente en el proyectil y a la misma forma de este, por lo que para este acercamiento a materiales balísticos se decide descartar debido a su complejidad.
- En el análisis técnico se pudo apreciar que cada uno de los materiales ensayados se comportan de forma diferente, y se halló una relación inversamente proporcional entre la dureza del material y la absorción de energía del mismo, siendo este uno de los factores de desempeño más importantes a considerar en el momento de evaluar y seleccionar los materiales.
- De acuerdo a la matriz ponderada para calificar los materiales sometidos a pruebas bajo criterios de precio, disponibilidad, resistencia, desempeño y compatibilidad, se encontró que el acero inoxidable es el más adecuado debido a su bajo costo, buen desempeño y facilidad para modificar con perforaciones o con tratamientos superficiales que aumenten su compatibilidad.
- Con base en los resultados obtenidos en la prueba de campo final, fue posible evidenciar que las perforaciones en la lámina de acero inoxidable podrían impartir un mejor desempeño que el de su homóloga sin perforaciones, lo que proporciona un resultado que justifica la realización de futuras investigaciones.

- Se propone la utilización de una lamina de acero inoxidable perforada, reforzada con resina viniléster y 5 capas de *Twaron*®, como material de blindaje contra munición de 9mm debido a su bajo costo y peso, para posibles desarrollos de blindajes vehiculares, o escudos balísticos, que protejan a el usuario del proyectil de dicha munición.
- La variable de costo utilizada en los análisis de viabilidad aplicados a los materiales, pierde importancia según el contexto, en comparación con la variable de peso y desempeño, esto ocurre debido al ambiente donde se desarrollan estos productos, ya que si una solución anti-balística logra mejorar en dichos aspectos a una existente en el mercado, es claro que los materiales empleados poseen un mayor valor, o la tecnología empleada requiere una inversión considerable, por lo que un valor superior es de esperarse, aunque, un cambio que optimice el desempeño sin afectar el costo de manufactura es más beneficiosa para el fabricante. Lo anterior, se sustenta en la realización de perforaciones en el blindaje, considerando que reduce el peso de la placa metálica en un 6,5% y mejora el desempeño del producto a un nivel satisfactorio, en comparación con su versión sin perforaciones.
- El producto de este trabajo tiene validez comercial en tanto se continúe depurando la composición del producto, al igual que las investigaciones referentes a blindajes perforados, y se desarrolle un sistema de montaje práctico y funcional, el cual garantice el correcto funcionamiento del producto, considerando su futura aplicación.
- La utilización de la metodología CAPDO encontrada en el TPM ayudo a este proyecto a cumplir los objetivos trazados definiendo fases concretas que permitían la obtención de información para toma de decisiones, y el correcto desenvolvimiento de las actividades planeadas; aunque los objetivos del

trabajo fueron cumplidos tal cual lo trazado, es claro que esta metodología ofrece más herramientas que hubieran permitido un resultado más documentado y depurado, por medio de la elaboración de formatos y actividades previamente mencionadas como los "5 porque", a pesar que esta metodología está enfocada en el ámbito empresarial concretamente para los procesos de producción, es claro que su utilización en el desarrollo de proyectos es válida, dada su simplicidad y enfoque hacia los resultados.

## 10. Recomendaciones

- Para la aplicación del material propuesto, se debe tener en cuenta las dimensiones y condiciones de la materia prima, además de los procesos de manufactura involucrados, considerando estas variables encontramos una ventaja, ya que la lámina de acero inoxidable y el *Twaron*® laminado con resina viniléster tienen la posibilidad de amoldarse a diversas geometrías, esto abre la posibilidad de usar el producto en aplicaciones de protección personal (placas balísticas anti-trauma) con formas más adaptables al cuerpo humano. Para esto, se debe considerar la energía cinética que el material no absorbe, la cual genera daños en la persona, ya sea realizando investigaciones sobre la implementación de caucho en estos materiales para la absorción de dicha energía, manteniendo a salvo la persona sin comprometer en grandes proporciones los costos y el peso del producto.
- Se deben replicar las pruebas a muestras del material con variaciones en las distancias de separación y diámetros de las perforaciones, para analizar los resultados; si estos son positivos, el aumento en el diámetro de las perforaciones o la reducción de la distancia entre las mismas producirá una reducción en el peso del producto.
- Si se desea detener un proyectil de fusil calibre 5,56mm, se deberá llevar a cabo estudios adicionales, que permitan definir cuál es la mejor configuración

de materiales para este fin, teniendo en consideración el uso de blindajes perforados que pueden ayudar a mejorar el desempeño de este.

- Para futuras investigaciones, se recomienda el estudio del comportamiento del material propuesto sin la utilización de resina viniléster, esto con el fin de evidenciar la diferencia en el desempeño del material versus su homólogo con resina y así definir el uso o no uso de la resina en futuras aplicaciones.
- La comparación entre la documentación científico-técnica, referencias empresariales y empíricas de personas involucradas en el ámbito militar otorga un panorama radicalmente diferente a la visión previa del proyecto, por lo tanto, es pertinente realizar una pregunta que estará latente en pruebas futuras para la continuación de este proyecto, y ella es la influencia de las resinas en el desempeño de las fibras sintéticas ante proyectiles. Inicialmente era casi obligatorio el uso de este material como método de empaquetamiento de las fibras y adhesión con el metal, pero luego de los análisis y comparaciones de la información teórica versus la información resultante de las pruebas de campo se ha abierto una incógnita sobre cuál de las fibras poliméricas según la capacidad de disipación de energía cinética es óptima en un estado la capacidad de disipación de energía cinética de las fibras poliméricas es más óptima en un estado libre de resina. Esta pregunta se ratifica en el análisis de productos como chalecos antibalas donde el *Kevlar*® no está empaquetado en resina y cumple contundentemente con los parámetros prometidos por el producto.
- Dadas las limitaciones en materiales y en municiones presentes en el proyecto, no fue posible la realización de las pruebas en múltiples placas del mismo material con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados obtenidos y de esta forma corroborar el desempeño de los materiales. Por lo tanto este

factor deberá ser considerado en futuras investigaciones a realizar y asegurar que los comportamientos de dichos materiales sean reproducibles.

## 11. Bibliografía

- Propiedades de materiales, disponible en: <http://www.matweb.com/>, consultada el miércoles 16 de Marzo de 2011.
- [1] R. Zaera, Ballistic Impacts on Polymer Matrix composites, Composite Armor, Personal Armor, en Impact Engineering of Composites Structures (2011).
- [2] B Wang , S.M. Chou, The behaviour of laminated composite plates as armour en Journal of Material Processing Technology 68 (1997) 279-287.
- [3] Editor Serge Abrate, Impact Engineering of composite structures (2011)
- [4] Patente del Dragon Skin, (2004).
- [5] L.M. Nunes, S.Paciomik, J.R.M. d'Almeida, Evaluation of the damaged area of glass-fiber-reinforced-epoxy-matrix composite materials submitted to ballistic impacts, en Composites science and technology (2003).
- [6] A.Durmus, M. Güden, B.Gülcimen, S.Ülkü, E. Musa, Experimental investigations on the ballistic impact performances of cold rolled sheet metals, en Materials & Design (2011).

- [7] Uday K. Vaidya, Impact response of laminated and sandwich composites en Impact Engineering of Composites Structures (2011).
- [8] Sindy Chocron, Charles E. Anderson Jr. Donald J. Grosch, Carl H. Popelar, Impact of the 7,62mm APM2 projectile against the edge of a metallic target en international journal of impact engineering. (2000).
- Bryan A. Cheeseman, Travis A. Bogetti, Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates, en composite structures (2003)
- T.Børvik, M. Langseth, O.S Hopperstad, K.A Malo, Ballistic penetration of steel plates, en international journal of impact engineering. (1999).
- T.Børvik, S.Dey, A.H Clausen, Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles, international journal of impact engineering. (2009).
- Military Armor and Bullet Proof Armor AMTank Armor: “Products & services”, Disponible en: <http://www.amtankarmor.com>, consultada el viernes 24 de Septiembre de 2010.
- Agy: “LHD Ship – “HJ1” Composite Armor System”, Disponible en: [http://www.agy.com/markets/PDFs/NEW\\_AGY205eLHDships.pdf](http://www.agy.com/markets/PDFs/NEW_AGY205eLHDships.pdf), consultada el viernes 24 de Septiembre de 2010.
- Aramid LTD: “Products & products comparison”, Disponible en: <http://www.aramid.com/>, consultada el viernes 24 de Septiembre de 2010.
- Armor Struxx: “Products”. Disponible en: <http://www.armorstruxx.com> , consultada el viernes 24 de Septiembre de 2010.
- Kevlar. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Kevlar> , consultada el domingo, 10 de Abril de 2011.