

# **Configuración de Materiales para la Disipación de Ondas Explosivas.**

Simón Uribe Peláez

Universidad EAFIT  
Escuela de Ciencias y Humanidades  
Ingeniería Física  
2013

# **Configuración de Materiales para la Disipación de Ondas Explosivas.**

Simón Uribe Peláez

Universidad EAFIT  
Escuela de Ciencias y Humanidades  
Ingeniería Física  
2013

# **Configuración de Materiales para la Disipación de Ondas Explosivas.**

**Por:**

Simón Uribe Peláez

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Físico

**Asesor:**

Santiago Gil Durán

Grupo de Investigación en Materiales. Universidad Eafit.

**Co-Asesor:**

Javier Mauricio Betancur Muñoz

Tecnologías Marte

MEDELLÍN

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE CIENCIAS Y HUMANIDADES

2013

## **AGRADECIMIENTOS**

Son muchas las personas que han incidido en mi formación profesional y en este trabajo de grado, a las que deseo agradecer.

A mis profesores de carrera, que me han entregado lo mejor de su saber, y especialmente al profesor Juan Manuel Jaramillo por su acompañamiento, consejos, por su rectitud en su profesión como docente y por la amistad que me ha brindado, que me ha servido para formarme como profesional y persona.

A mi tutor Santiago Gil, por su asesoría y dirección en el trabajo de investigación y a Tecnologías Marte por su colaboración.

A la Universidad EAFIT, por el soporte institucional dado para la realización de este trabajo.

Al Ejército de Colombia, en cabeza del sargento viceprimero Castillo, el coronel Piza y el teniente coronel Corredor, quienes posibilitaron la realización de las pruebas necesarias para presentar los resultados de mi trabajo de grado.

Al ingeniero Jairo Aristizábal, gerente de ventas de Poliurea Colombia en Medellín, quien de manera desinteresada me prestó su colaboración.

A la empresa de arquitectura Rowcast, por su colaboración desinteresada.

A mis padres, por el apoyo incondicional que me dieron a lo largo de la carrera.

A Sarita, por su cariño y apoyo.

A todas aquellas personas que me han acompañado en este proceso para que yo lograra terminar mi carrera, GRACIAS!!

## TABLA DE CONTENIDO

1.INTRODUCCIÓN .....	12
1.1. Justificación.....	15
1.2. Objetivo General .....	15
1.2.1. Objetivos Específicos.....	16
1.3. Metodología.....	16
2.BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA .....	19
2.1. Marco teórico .....	19
2.1.1. Historia.....	19
2.1.2. Explosiones y Explosivos .....	20
2.2. Estado del arte .....	35
2.2.1. Materiales.....	35
2.2.2. Materiales usados en blindajes antiexplosivos.....	39
2.2.3. Equipos de protección anti explosivos.....	43
3.SELECCIÓN DE MATERIALES .....	50
3.1. Materiales para las capas del material propuesto .....	51
3.1.1. Materiales para la cara frontal y posterior.....	51
3.1.2. Materiales para las capas intermedias .....	54
3.1.3. Materiales para el núcleo .....	57
3.2. Configuraciones de materiales propuestas .....	63
3.2.1. Fabricación de las muestras .....	66
4.PRUEBAS DE CAMPO .....	72
4.1. Bancos de prueba.....	72
4.2. Configuraciones de la prueba de campo.....	73
5.RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	76
5.1. Resultados .....	76
5.1.1. Evaluación de las muestras .....	76
5.1.2. Evaluación de los moldes.....	88

5.2. Análisis.....	89
5.2.1. Comportamiento de las capas del material propuesto.....	90
6.CONCLUSIONES .....	101
7.RECOMENDACIONES .....	105
8.BIBLIOGRAFÍA .....	106
9.ANEXOS .....	114

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Diseño del autor. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.....	17
Figura 2. Desarrollo de una onda de choque desde una distribución inicial de presión en el aire.....	23
Figura 3. Perfil de presión/tiempo para una onda explosiva.....	26
Figura 4. Traje EOD de la empresa EOD Partner.....	44
Figura 5. Traje PBF-SD01 EOD Suit, de la empresa china WS FZ.....	45
Figura 6. Esquema de protección para el vehículo.....	46
Figura 7. Resultados de pruebas del AIGIS TABRE™ SUV Kit.....	47
Figura 8. Estructura TABREShield Building Protection System.....	48
Figura 9. Gráfica de tensión vs deformación para el SmartMetal™.....	49
Figura 10. Esquema de un panel de SmartMetal™.....	49
Figura 11. Ilustración del autor. Configuración general del material propuesto.....	50
Figura 12. Espuma de PVC Divinycell®.....	56
Figura 13. Aplicación poliurea.....	57
Figura 14. Espuma de aluminio de poro cerrado.....	58
Figura 15. Curvas de compresión y tensión para espumas de aluminio.....	59
Figura 16. Estructura de panel de abeja de aluminio.....	62
Figura 17. Lámina de balsa y la dirección de los granos.....	63
Figura 18. Diseño del autor. Muestras usadas para la selección de las caras.....	65
Figura 19. Diseño del autor. Muestras usadas para la selección de la sección intermedia.....	65
Figura 20. Diseño del autor. Muestras usadas para la selección de los núcleos.....	66
Figura 21. Fotografía del autor. Placa de a) fibra de vidrio. b) fibra de carbono. c) Twaron®.....	66
Figura 22. Fotografía del autor. Placas de PVC ( $650 \text{ g/cm}^3$ ) de 3 y 9mm de espesor.....	67
Figura 23. Fotografía del autor. Placas de PVC ( $80 \text{ g/cm}^3$ ) de 3 y 10 mm de espesor.....	68
Figura 24. Fotografía del autor. Placas de a) balsa. b) estructura de panel de abeja de aluminio. c) panel de abeja de tubos de aluminio.....	68
Figura 25. Foto del autor. Banco de pruebas.....	73



Figura 26. Fotografía del autor. Montaje experimental de las pruebas.....	73
Figura 27. Fotos del autor. Material explosivo, pentolita. ....	74
Figura 28. Fotografía del autor. Muestra No. 1, diferentes capas. ....	77
Figura 29. Fotografía del autor. Muestra No. 2, diferentes capas. ....	78
Figura 30. Fotografía del autor. Muestra No. 3, diferentes capas. ....	79
Figura 31. Fotografía del autor. Muestra No. 4, diferentes capas. ....	80
Figura 32. Fotografía del autor. Muestra No. 5, diferentes capas. ....	81
Figura 33. Fotografía del autor. Muestra No. 6, diferentes capas. ....	82
Figura 34. Fotografía del autor. Muestra No. 7, diferentes capas. ....	83
Figura 35. Fotografía del autor. Muestra No. 8, diferentes capas. ....	85
Figura 36. Fotografía del autor. Muestra No. 9, diferentes capas. ....	86
Figura 37. Fotografía del autor. Estado de un molde. ....	89
Figura 38. Fotografía del autor. Cráter en la cara frontal de fibra de carbono.....	91
Figura 39. Fotografía del autor. Rotura de matriz en forma de círculos en la cara frontal de Twaron® . ....	92
Figura 40. Fotografía del autor. Daño en la resina sobre la placa de Twaron® . ....	92
Figura 41. Fotografía del autor. Delaminación en una muestra de fibra de vidrio. ....	93
Figura 42. Fotografía del autor. Ruptura tipo cráter en una muestra de fibra de vidrio. ....	94
Figura 43. Daños en las caras de fibra de vidrio. ....	95
Figura 44. Fotografía del autor. Ampliación (4x) de imagen de una muestra de fibra de vidrio. Presenta delaminación leve. ....	95
Figura 45. Fotografía del autor. Placa de PVC recubierta con poliurea. ....	96
Figura 46. Ilustración del autor. Espuma de PVC después de la explosión.....	97
Figura 47. Fotografía del autor. Placa de espuma de PVC recubierta con poliurea, después de la explosión.....	98
Figura 48. Ilustración del autor. Fracturas y fisuras presentes en el balsa.....	99
Figura 49. Fotografía del autor. Placa de panal de abeja de aluminio comprimida tras la explosión. ....	100
Figura 50. Fotografías del autor. Presión del panal de abeja de tubos de aluminio sobre la espuma de PVC. ....	100

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Propiedades de las espumas de aluminio. ....	60
Tabla 2. Diseño del autor. Lista de capas con sus características. ....	70
Tabla 3. Diseño del autor. Precios y pesos aproximados de las muestras. ....	71
Tabla 4. Orden de realización de las pruebas de campo. ....	75
Tabla 5. Diseño de autor. Desplazamiento de bancos de pruebas según cada muestra. ....	88

## RESUMEN

El presente trabajo sobre configuración de materiales para la disipación de ondas explosivas parte de indagar sobre aquellos materiales empleados con más frecuencia a nivel mundial, en la fabricación de estructuras complejas para la disipación de las ondas explosivas y para la protección de personas e infraestructuras. Sobre esta primera aproximación bibliográfica se seleccionaron materiales con propiedades semejantes pero con la particularidad de que fueran de fácil acceso en el medio colombiano y cuyo costo no fuera una limitante para la producción de artefactos de protección que puedan ser usados en nuestro medio.

Con los materiales seleccionados se fabricaron combinaciones de estructuras complejas, conformadas por la superposición de capas de estos materiales, a manera de emparedado. Estas estructuras ensanduchadas, 9 en total, se sometieron a pruebas de resistencia anti explosivos, articuladas a dos bancos de pruebas contruidos especialmente para soportar los efectos antiexplosivos.

Como resultado de estas pruebas experimentales se extrajeron las conclusiones del trabajo, donde se resaltan las combinaciones que arrojaron mejores resultados en términos de protección, detallando los criterios utilizados. Por último, en recomendaciones podrá pensarse en una selección de materiales y sus propiedades de la cual es posible, si se continúa con esta línea de investigación, pensar en construir estructuras para protección anti explosivos, adecuados a nuestro medio colombiano.

**Palabras Claves:** Protección anti explosivos, materiales anti explosivos, estructuras de placas superpuestas.

## 1. INTRODUCCIÓN

El 4 de abril de este año, “Día Internacional para la Sensibilización contra las Minas Antipersonal”, el Secretario General de las Naciones Unidas dijo: “La eliminación de la amenaza de las minas y los restos explosivos de guerra, es un empeño de importancia crucial que impulsa la paz, facilita el desarrollo, ayuda a las naciones en transición y salva vidas”<sup>1</sup>.

La erradicación de las minas antipersonal sembradas en Colombia, debe ser un compromiso de todos. El país viene sufriendo un conflicto armado que se ha prolongado durante más de 5 décadas. Los actores del conflicto, guerrilleros y paramilitares, hacen presencia en 31 de los 32 departamentos del país, y solo San Andrés no ha sido desangrado por este fenómeno violento.

Como las minas antipersonal son costosas y su acceso es difícil, los actores armados emplean con frecuencia, las minas de fabricación casera que son más inestables y difíciles de ubicar después de instaladas.

¿Cómo estamos en víctimas?

Según la Revista Semana<sup>2</sup>, para el período 1990-2013 las víctimas de minas antipersonal en Colombia llegaron a la cifra de 10.272, de las cuales casi el 60% fueron militares y “1.011 niños y niñas han pisado uno de estos silenciosos asesinos”. Somos el único país de América Latina, en dónde aún se siembran minas antipersonal y el tercer país más minado del mundo después de Camboya y Afganistán.

---

<sup>1</sup> PNUD Colombia. Dirección URL: [www.pnud.org.co](http://www.pnud.org.co). Fecha de consulta: 2/6/2013. Última actualización: 10/7/2013.

<sup>2</sup> Revista Semana. *El pueblo más minado de la tierra*. Edición 1.622, junio 3 al 10 de 2013, p. 121.

La mayoría de la población desconoce la ubicación y localización de los campos minados, como también cuáles son las señales de peligro y los mecanismos para solicitar protección ante este tipo de riesgos, de parte del Estado.

Los territorios “sembrados” con minas antipersonal afectan la productividad de las áreas rurales, como también la movilidad y el desplazamiento de los campesinos. Donde hay campos minados crece el desplazamiento de la sociedad civil. En este sentido el reto que tiene nuestro país es enorme, el Estado tiene la obligación de mitigar el miedo, proteger a la población civil y adelantar costosos procesos de desminado. Es importante señalar que la acción en contra de las minas antipersonal y contra el impacto del sembrado de minas, no acaba cuando concluye una guerra. En muchos países, los restos explosivos de la guerra se constituyen en una amenaza latente para la seguridad de las personas, en tanto los artefactos sin activar, por diverso tipo de acciones pueden activarse.

Es, por tanto, preocupación permanente de los Estados, los Gobiernos y sus Fuerzas Militares, el diseño de medios de protección de la vida y los bienes a través del desarrollo y la experimentación con materiales novedosos y por medio de la fabricación de nuevos implementos de protección que sean eficientes y accesibles.

Espero que este trabajo de grado, pensado en el uso de materiales y de tecnología apropiada, de bajo costo, contribuya con una etapa inicial de selección de materiales que a futuro cercano puedan ser empleados en la protección de personal dedicado al desminado humanitario y a la desactivación de artefactos explosivos.

El trabajo tiene como objetivo implícito aportar al sueño colectivo de tener un país libre de guerras, miedos y violencias, donde vivamos en entornos seguros, en donde los sobrevivientes de la guerra y las víctimas de la misma, sean acogidos e integrados a la sociedad, reconociéndoles todos sus derechos humanos.

En este sentido, se hizo una revisión bibliográfica sobre los materiales empleados en la fabricación de implementos de seguridad antiexplosivos, sus características y propiedades, así como sobre las limitaciones para su uso en nuestro medio, y a partir de la información obtenida se experimentó con nuevas formas y nuevas configuraciones a partir de materiales que ofrezcan mayores garantías para su uso, con lo cual se busca desarrollar implementos de protección adecuados a las necesidades del personal encargado de dichas labores antiexplosivos.

Se evaluaron distintos ensambles de materiales, buscando que en su conjunto cumplieran con los estándares de protección para equipos anti-explosivos, pero que permitan cierta flexibilidad que facilite el trabajo del operario. Fue, igualmente, de vital importancia, trabajar con estructuras que garanticen una adecuada funcionalidad, siendo el peso del producto final, una condición importante que debe ser tenida en cuenta. Para el contexto de un país como Colombia, el costo final del producto es una variable muy importante, sobre todo si se piensa en materiales que puedan ofrecerse a los diversos agentes del Estado encargados de acciones de protección y desminado. Trabajar con materiales que se puedan conseguir en Colombia, para que la manufactura del producto final, sea exitosa, que no requiera de importaciones costosas, significa la posibilidad de alcanzar resultados con buenas posibilidades de convertirse en productos adecuados a nuestra realidad socioeconómica.

Se prepararon distintas configuraciones de diversos materiales utilizados actualmente en la disipación de ondas explosivas, para generar conocimiento alrededor de estos, y evaluar estructuras de estos sistemas de protección, que ofrezcan ventajas al momento de disipar la onda explosiva y la energía generada por una explosión.

El énfasis propuesto en esta investigación pretendió explorar configuraciones de materiales compuestos que potencien las propiedades de materiales antiexplosivos, con el ánimo de

que puedan ser luego empleados en la fabricación de elementos de protección en labores de desminado y de protección antiexplosiva.

### **1.1. Justificación**

Los sistemas de protección antiexplosivos, bien sean trajes reforzados, blindajes de vehículos o de estructuras, son una estrategia fundamental para contrarrestar el creciente poderío de los artefactos explosivos utilizados comúnmente en Colombia. Los retos que enfrentan la investigación, el desarrollo y la fabricación de dichos sistemas de protección, se relacionan con el diseño y la producción de materiales y equipos que sean eficaces, prácticos y económicos; es decir que protejan vidas e instalaciones, que sean funcionales y que su costo permita su uso masivo para las fuerzas militares y personas en riesgo.

Este tipo de investigación si bien se trata de un trabajo de grado y pretende el desarrollo formativo de un ingeniero físico, debido a que integra conocimientos del área de los materiales y de la física de las explosiones, los cuales son campos de estudio presentes en la formación del mismo, espera extraer conclusiones sobre tipos de estructuras que de alguna manera puedan ofrecer un resultado práctico.

### **1.2. Objetivo General**

Estudiar los efectos de las ondas explosivas con el fin de proponer y evaluar diversos materiales que puedan llegar a mejorar el desempeño de aquellos materiales utilizados actualmente en la disipación de ondas provenientes de artefactos explosivos.

### **1.2.1. Objetivos Específicos**

- Comprender a través del estudio de la literatura los principios físicos de las ondas provenientes de artefactos explosivos, con el fin de entender la respuesta de los materiales frente al efecto de las ondas explosivas.
- Realizar por medio del estudio de la literatura un estado del arte del comportamiento de diversos materiales que se han utilizado para disipar ondas explosivas, con el fin obtener los materiales que han tenido los mejores resultados en estudios preliminares.
- Proponer diversas configuraciones de materiales compuestos, a partir del estudio preliminar realizado, con la finalidad de evaluar con pruebas de campo dichas configuraciones en la disipación de ondas explosivas.
- Analizar los resultados obtenidos de las pruebas de campo para realizar el informe final donde se muestren los efectos de las configuraciones de los materiales propuestos sometidos a ondas explosivas.

### **1.3. Metodología**

La investigación se basa en cuatro etapas para su desarrollo que se muestra en la Figura 1.





**Figura 1. Diseño del autor.** Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

Una **primera etapa** comprende una **búsqueda bibliográfica** que permite el desarrollo del marco teórico y el estado del arte, en donde se busca la comprensión de la dinámica de las ondas provenientes de artefactos explosivos, y que además permitirá dar cuenta de las características de los materiales más usados en la fabricación de trajes y refuerzos contra explosiones, sus propiedades y características.

A partir de esta revisión bibliográfica se desarrollará la **segunda etapa** que permitirá la **selección de materiales** para ser usados en las pruebas de campo, esta etapa comprende además la fabricación y el montaje de las diferentes configuraciones de materiales a evaluar; todo esto con el fin de dar paso a la **tercera etapa** denominada **pruebas de campo**, aquí se procede básicamente con la definición de la prueba, la fabricación de los dispositivos necesarios para su ejecución y la realización de estas. Finalmente se pasa a la

**cuarta etapa, resultados y análisis** donde se concluye sobre los resultados obtenidos en las pruebas de campo.

Como entregables para el final del trabajo de grado, se presenta este informe final en el que se registra el marco teórico y el estado del arte, la descripción de los materiales seleccionados y su proceso de fabricación, además de la descripción de las pruebas realizadas y la interpretación de los resultados obtenidos.

## 2. BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA

### 2.1.Marco teórico

#### 2.1.1. Historia

La historia del origen de los explosivos se remonta al siglo IX, cuando los chinos inventaron la pólvora, la cual consistía en carbón vegetal en polvo, azufre y nitrato de potasio; éstos la utilizaban para la fabricación de fuegos artificiales y armas. Los bizantinos y los árabes fueron los encargados de dar a conocer al resto de la humanidad este novedoso invento que sin duda alguna revolucionaría la historia.<sup>3</sup>

Durante varios cientos de años la pólvora ocupó el primero lugar entre los explosivos conocidos. Posteriormente, en el año 1867 Alfredo Nobel logró fabricar dinamita, a partir de la mezcla de nitroglicerina con un material absorbente. La dinamita logró posicionarse debido a que esta mezcla era mucho más estable y manejable, y permitía que fuera quemada al aire sin que explotara.

Con el desarrollo de los explosivos y la llegada de los episodios de guerras mundiales, se hizo necesario desarrollar protecciones más fuertes y resistentes para personas, edificaciones y demás elementos vitales de la sociedad, y de esta manera mitigar el impacto de las acciones explosivas, sobre la comunidad y la infraestructura.

---

<sup>3</sup>DISCOVERY CHANNEL.Dirección URL: [www.tudiscovery.com](http://www.tudiscovery.com). Fecha de consulta: 7/6/2013. Última actualización: 10/7/2013.

Es así como se empiezan a desarrollar elementos como chalecos, cascos, trajes EOD y armaduras en general, compuestas por fibras de diferentes tejidos, que en ocasiones eran mejoradas con la adición de placas metálicas o cerámicas.

Desde finales de 1990 ha habido un avance significativo en el diseño de trajes y cascos, desarrollados pensando en propiedades de absorción de la energía proveniente de las explosiones, en brindar protección contra esquirlas, en mitigar los impactos de las ondas de presión, de la onda térmica y de los efectos colaterales que se ocasionan por la detonación del elemento explosivo.

### **2.1.2. Explosiones y Explosivos**

La generación, desarrollo y propagación de las ondas explosivas está gobernada por la física no lineal que describe estas ondas. Para el caso de los explosivos, las propiedades de la detonación definen a la onda explosiva.

Una explosión es el fenómeno que resulta de una liberación súbita de energía. La liberación de energía debe ser súbita y lo suficientemente rápida para causar una localización de la energía. Esta energía localizada es entonces disipada por una onda explosiva, por la propulsión de los fragmentos y del material circundante, y en muchos casos por radiación térmica.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup>CULLIS, IG. *Blast Waves and How They Interact With Structures*. J R Army Med Corps. 2001;147: p. 17.

La fuente de esta energía puede provenir de explosivos como pólvora o TNT, de una explosión química, de vapor presurizado en una caldera, de una explosión mecánica, explosiones de polvo en el aire, o de una transformación nuclear no controlada.<sup>5</sup>

Un explosivo es definido como un material que es capaz de producir una explosión mediante su propia energía, todos los explosivos poseen esta característica. Además producen calor, y casi todos producen gases. El gas es el principal mecanismo con el que un explosivo transfiere trabajo a sus alrededores. Los explosivos de alto rendimiento tienen capacidad de liberar su energía en un muy corto período de tiempo. La tasa de liberación de la energía está gobernada por la velocidad de detonación, la cual para explosivos de alto rendimiento, es del orden de 8 mm/ $\mu$ s, o de 8 km/s. Para dar referencia de la magnitud de esta velocidad, se puede comparar con la velocidad del sonido en el aire, que es de 0.33 mm/ $\mu$ s ó 0.33 km/s.<sup>6</sup>

La mayoría de los explosivos tienen una composición química que es oxígeno negativa, es decir, los productos formados por la detonación no han reaccionado completamente con el oxígeno del aire. A medida que se mezclan, pueden continuar quemando y liberando más energía. El TNT es una de las composiciones más oxígeno negativas y libera casi tanta energía de este modo como después de la detonación inicial.<sup>7</sup>

La carga del explosivo se puede clasificar basándose en el peso de la carga y la distancia a la que se encuentre. Generalmente, la cantidad de la carga del explosivo se da en términos del peso del mismo, convertido a un valor equivalente del peso de TNT mediante un factor de conversión. Dependiendo del experimento, se pueden usar leyes para escalarlos y así,

---

<sup>5</sup>IBID; p. 17.

<sup>6</sup>IBID; p. 17.

<sup>7</sup>ZHU.F. y LU. G. *A Review of Blast and Impact of Metallic and Sandwich Structures*. EJSE Special Issue: Loading on Structures. 2007. p. 92.

obtener las propiedades de las ondas explosivas de gran escala basadas en pruebas de escala mucho menor.<sup>8</sup>

La forma más común para escalar una onda explosiva es con el método Hopkinson – Craz, o escalamiento de raíz cúbica. Este dice que unas ondas explosivas similares son producidas a distancias escaladas idénticas cuando dos cargas explosivas de geometría similar y del mismo explosivo, pero de diferente tamaño, son detonadas en la misma atmósfera: "*It is customary to use as a scaled distance a dimensional parameter, Z, as follows:*

$$Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}}(1)$$

*where R is the distance from the center of the explosive source, and W is the charge mass of TNT".*<sup>9</sup>

Cerca de una detonación explosiva puede haber una gran dosis de radiación, la cual puede actuar como un mecanismo adicional de destrucción. En términos de la capacidad de realizar trabajo en sus alrededores mediante los productos gaseosos, 1 kg de TNT tiene una energía potencial de 7 MJ, casi el doble de su energía química. Es por esto, que una cantidad relativamente pequeña de explosivos puede causar daños catastróficos.<sup>10</sup>

- **Ondas de choque**

Una perturbación en un medio viaja a la velocidad del sonido en ese medio. En el aire, bajo condiciones normales, una perturbación (por ejemplo una onda de sonido) viaja a una velocidad de 330 m/s. En un metal, la misma onda viaja a una velocidad de 5000 m/s. La

---

<sup>8</sup>IBID. p. 93.

<sup>9</sup>IBID. p. 93.

<sup>10</sup>CULLIS.IG.Op. Cit. p. 17.

velocidad del sonido es una función de la presión y temperatura local. Por lo tanto, si la presión o la temperatura se incrementan, la velocidad del sonido también aumenta. Esto tiene una influencia dramática en la propagación de un pulso de presión de forma arbitraria y con amplitud finita a través de un medio.



**Figura 2.** Desarrollo de una onda de choque desde una distribución inicial de presión en el aire.<sup>11</sup>

Considere el pulso triangular idealizado mostrado en la Figura 2A. Dado que cada porción individual del pulso tiene una presión diferente, la velocidad del sonido local para cada porción, es diferente, y cada porción del pulso viaja con esta velocidad del sonido local. Las regiones de mayor presión se mueven más rápido que las de menor presión. Al cabo de un corto tiempo, alcanzan a las regiones de menor presión y el perfil de la onda se vuelve más empinado, como se ve en la Figura 2B. Este proceso continúa hasta que una discontinuidad marcada se forma (Figura 2C). Esto es llamado una onda de choque. La velocidad de una onda de choque es supersónica relativa al medio no perturbado en el cual está viajando.

Las ondas de choque se reflejan, de la misma manera que las ondas de luz y sonido lo hacen, sin embargo, a diferencia de las ondas de sonido, donde su efecto sobre las propiedades del medio es despreciable, las ondas de choque cambian el medio por el que están viajando. La reflexión de una onda de choque en una superficie es compleja y no intuitiva.<sup>12</sup>

<sup>11</sup>IBID. p. 17.

<sup>12</sup>IBID. p. 18.

Las ondas de choque muestran tres clases de reflexiones:

- Reflexión normal, asociada con un impacto directo con una superficie no fluente.
- Reflexión oblicua asociada a un pequeño ángulo de incidencia con respecto a la superficie.
- Formación Mach Stem, un efecto tipo chorro asociado con los ángulos de incidencia con respecto a una superficie casi paralela, es decir, para ángulos de incidencia bajos.

En el caso de una onda sonora normalmente reflejada a partir de una superficie rígida, la presión se duplica tras la reflexión. Sin embargo, en el caso de ondas de choque, la presión reflejada es una función no lineal del número de Mach ( $M$ ) de la onda de choque incidente. Por lo tanto, si consideramos una onda sonora como una onda de choque muy débil, podemos decir que para bajos números de Mach ( $M \sim 1$ ) el coeficiente de reflexión (la tasa de presión reflejada respecto a la presión incidente) es de 2. Para una onda de choque fuerte en el aire, el límite teórico del coeficiente de reflexión es de 8.

En el caso de la reflexión oblicua, la onda de choque incide sobre una superficie con un pequeño ángulo de incidencia y la onda de choque es reflejada de vuelta al flujo de la onda original. En este aspecto, se parecen a las ondas de sonido. Sin embargo, a diferencia de las ondas sonoras, el ángulo de reflexión no es igual al ángulo de incidencia.<sup>13</sup>

---

<sup>13</sup>IBID. p. 18.



Un frente de choque que incide sobre una superficie de manera casi paralela, no se refleja directamente, pero es deflectada de tal manera que se dispersa a manera de chorro a través de la superficie. A medida que el ángulo de incidencia aumenta y excede los  $40^\circ$ , el flujo viaja de manera paralela a la superficie con el frente de choque perpendicular a la superficie. Esto es llamado Mach Stem. Esta onda de choque se extiende desde la superficie hacia el flujo de la onda original hasta que se conecta con una línea de intersección entre la onda de choque incidente y la onda de choque reflejada. La onda de choque reflejada es entonces separada de la superficie. Una característica muy importante es la dirección del viento explosivo detrás de la onda de choque, el cual es paralelo a la superficie y viaja con una velocidad mucho más alta que la velocidad de la onda incidente.

Una onda de choque creada por una reacción química es llamada una onda de detonación. Es supersónica con respecto al explosivo sin reaccionar y sin detonar. Cuando es iniciada por un detonador, la onda de detonación es formada a los pocos microsegundos por una distancia de alrededor de 2 a 10 mm. Para un explosivo de alto rendimiento, la velocidad de detonación es del orden de 8 km/s. Al frente de la onda de detonación, la presión es de alrededor de 20-30 GPa (200 - 300 kbar, donde 1 kbar es 1000 veces la presión atmosférica). La temperatura de los productos gaseosos detrás de la onda puede llegar a los  $7000^\circ\text{C}$ .<sup>14</sup>

En la Figura 3 se muestra una gráfica típica de presión vs tiempo para una onda explosiva, donde  $t_a$  es el tiempo de arribo de la onda explosiva,  $P_s$  es el pico de presión de la onda explosiva y  $P_a$  es la presión del aire ambiente. El aumento de presión discontinuo que se presenta en el frente de onda se muestra en el salto de presión de  $P_a$  a  $P_s$  en el tiempo  $t_a$ . La Figura 3 también muestra que la presión decrece de manera aproximadamente exponencial hasta que llega a un nivel “pre-choque” en el tiempo  $t_a + t_d$ . Además de  $P_s$  y de  $t_a$ , otro

---

<sup>14</sup> IBID. p. 19.

parámetro importante de las ondas de choque es el impulso específico de la onda durante la fase positiva  $I_s$ , dado por la siguiente ecuación:

$$I_s = \int_{t_a}^{t_a+t_d} P(t)dt \quad (2)$$

Donde  $P(t)$  es la sobrepresión en función del tiempo.<sup>15</sup>

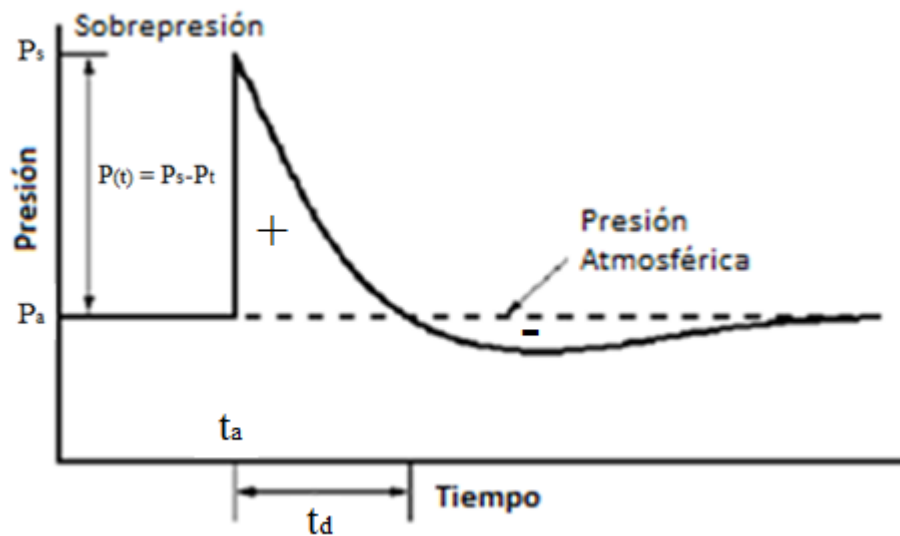


Figura 3. Perfil de presión/tiempo para una onda explosiva.<sup>16</sup>

Para ilustrar la onda explosiva generada por una explosión, es útil considerar como ejemplo la onda explosiva generada por 1 kg de TNT ubicado en campo libre. Las ondas de choque se esperan que sean fuertes y de carácter no lineal asociadas con su formación y propagación.

<sup>15</sup> ZHU. F. y LU. G. Op. Cit. p. 92.

<sup>16</sup>IBID. p. 93.

- ***Viento Explosivo***

Cuando un explosivo de alto rendimiento es detonado en aire, la onda de detonación con alta presión y temperatura incide en la interfaz explosivo-aire. La llegada de la onda de detonación a la superficie de la carga genera una onda de choque en el aire. Debido a que el aire es un gas, es altamente compresible, y entonces una fina capa se comprime gracias a la onda de detonación llevándola a tener una alta densidad, presión y temperatura. Esta temperatura puede alcanzar los 10000°C.<sup>17</sup>

Inmediatamente después de la detonación de la carga, hay un volumen de gases provenientes del explosivo con una alta temperatura y presión, rodeados de una fina capa de aire muy caliente. La velocidad de los gases y el aire puede llegar a ser de hasta 2.5 km/s.<sup>18</sup>

10  $\mu$ s después de la detonación, la máxima presión en el aire es de 120 bar, pero es de 45000 bar para los productos explosivos. El aire tiene una densidad de 1.2 kg/m<sup>3</sup> y la velocidad del sonido en el aire a temperatura ambiente de 330 m/s. Debido a su baja densidad, el aire es acelerado por una onda de choque. Además, su alta compresibilidad implica que la velocidad del sonido también sea función de la presión. Inicialmente, la fina capa de aire caliente comprimido se mantiene unida a los productos explosivos, ya que la velocidad de la superficie del producto es supersónica con respecto al aire estacionario. A medida que los productos explosivos se expanden, estos se enfrían y su presión, temperatura y densidad disminuyen. Como regla general se dice que por cada vez que el volumen se duplica, la presión disminuye en un orden de magnitud. Una vez la velocidad se

---

<sup>17</sup>CULLIS.IG.Op. Cit. p. 19.

<sup>18</sup>IBID. p. 20.

vuelve sub-sónica con respecto al aire, la capa de aire de choque se despega de la nube del producto. El tiempo que tarda esto es una función del explosivo y del tamaño de la carga.<sup>19</sup>

Un observador cercano a la explosión experimentará entonces, una onda de choque de alta presión seguida por un viento de alta velocidad con presión que disminuye debido al aire en movimiento y a los productos explosivos. La combinación de estos elementos se conoce como onda explosiva. El aire que se mueve rápidamente detrás del frente de choque es llamado viento explosivo.<sup>20</sup>

Cerca de la carga explosiva, la energía térmica liberada posiblemente encienda cualquier material combustible cercano. La onda explosiva a su vez lo acelera rápidamente y lo dispersa. Además existe un incremento transitorio en la temperatura asociado con el paso del viento explosivo, el cuál cercano a grandes explosiones puede ser significativo. Debido a la naturaleza irreversible del proceso de choque, también se da un cambio permanente en la temperatura, que puede afectar estructuras, equipos y personal.

- ***El efecto del suelo***

En la realidad, el suelo o cualquier objeto cercano, casi siempre tiene influencia en la propagación de la onda explosiva.

Tomando como ejemplo una carga elevada a 50 cm sobre el suelo, la onda explosiva lo impacta a alrededor de 200  $\mu$ s (equivalente a la velocidad promedio de 2000 m/s para una onda explosiva). En este punto, el frente de choque está aproximadamente 6 cm adelante de

---

<sup>19</sup>IBID. p. 20.

<sup>20</sup>IBID. p. 20.

los productos del explosivo. Al impactar con el suelo, la onda de choque es reflejada de vuelta hacia los productos del explosivo y el aire circundante. Esto refuerza la presión de la explosión. La presión reflejada desde el suelo puede tener entre 2 y 8 veces la presión incidente.<sup>21</sup>

La onda de choque reflejada viaja más rápido a través de los productos del explosivo que a través del aire comprimido. Esto es debido a que la temperatura de los productos es mayor que la del aire a su alrededor, y por lo tanto la velocidad del sonido es mayor en los productos del explosivo. Este efecto es más pronunciado para explosivos que continúan quemando tras un largo tiempo, ya que ellos están a una temperatura mayor.<sup>22</sup>

La velocidad de las partículas, inicialmente dirigidas hacia el suelo se reversa debido a la onda reflejada. Es así que una bola de fuego comienza a elevarse. La onda explosiva sigue propagándose alejándose del lugar de la explosión, mientras que la onda de choque reflejada comienza a alcanzarla gradualmente debido a su mayor presión y velocidad, hasta que la supera.<sup>23</sup>

Tras 1 ms, la onda reflejada ocupa alrededor de 2/3 del campo explosivo. Para un observador lo suficientemente alejado de la explosión, la onda explosiva que mide es la onda reflejada. Además el producto explosivo se mueve hacia arriba tomando la característica forma de hongo ascendiendo hacia la atmósfera.<sup>24</sup>

---

<sup>21</sup>IBID. p. 21.

<sup>22</sup>IBID. p. 21.

<sup>23</sup>IBID. p. 21.

<sup>24</sup>IBID. p. 21.

Sin embargo no sucede este fenómeno cuando la carga explosiva es detonada desde el suelo. Cuando esto sucede, no se produce una onda de choque reflejada ni tampoco un Mach Stem. Un observador experimenta la onda explosiva característica de una carga explosiva en campo libre.

Como vemos, la onda explosiva depende fuertemente de la posición y de los obstáculos que se encuentren en su camino hacia el observador. Las ondas reflejadas incrementan significativamente la presión de choque y el viento explosivo. Entonces, un observador, dependiendo de su posición relativa respecto a la carga explosiva puede experimentar una onda explosiva que consista de una onda de choque, dos ondas de choque o una onda de choque reflejada más fuerte. Cada escenario incluye su viento explosivo característico. Esto también explica porque a veces el personal cercano a una carga puede resultar herido de menor gravedad en comparación a alguien un poco más alejado a la carga explosiva.<sup>25</sup>

- ***Efecto de las ondas explosivas sobre estructuras***

A diferencia de un impacto, donde un proyectil aplica una fuerza en el punto inicial de contacto, una onda explosiva puede aplicar una fuerza en la parte trasera de una estructura un tiempo después de que ocurra la carga inicial.<sup>26</sup>

La onda de choque proveniente de una explosión interacciona con una estructura mediante la energía de acoplamiento del flujo explosivo con la estructura. Esto causa que la estructura se deforme hasta cierto punto dependiendo de la fuerza de la onda explosiva y de las propiedades de la estructura. Las características de una onda explosiva que tienen la mayor influencia en la respuesta de las estructuras son: el pico de presión máximo, el

---

<sup>25</sup>IBID. p. 22.

<sup>26</sup>IBID. p. 23.

impulso y la forma. La rigidez y el periodo natural de oscilación de una estructura sometida a esta carga determinan el tipo de interacción y la respuesta.<sup>27</sup>

La onda de choque al impactar sobre una estructura genera otra onda de choque que se propaga a través de la estructura y además se refleja de la misma, lo cual no ocurre con el suelo el cual es considerado como una superficie rígida. La fuerza de las ondas de choque reflejada y transmitida depende de las propiedades del material de la estructura y su geometría, así como de la onda explosiva incidente. Además de esto, si la estructura tiene espacios internos, como un edificio, o componentes internos, como el tórax de una persona, entonces la onda de choque transmitida puede inducir respuestas dramáticas no intuitivas en estos componentes.<sup>28</sup>

La carga de presión resultante del choque de una onda explosiva con una estructura está compuesta de dos elementos. De acuerdo con Cullis<sup>29</sup>, el primero es la presión de choque reflejada, que como se expresó anteriormente, puede ser mayor que la presión de choque incidente. El segundo es la presión desarrollada al parar o frenar un poco al viento explosivo.

Agrega este autor que en una explosión, el pico de presión producido por la onda de choque es mucho más grande que la presión estática de colapso de estructuras. Las estructuras normalmente pasan por una gran deformación plástica y absorben energía antes de colapsar a una configuración más estable o a fractura.<sup>30</sup>

---

<sup>27</sup>IBID. p. 23.

<sup>28</sup>IBID. p. 23.

<sup>29</sup>IBID. p. 23.

<sup>30</sup>IBID. p. 23.

Para entender mejor como actúa una onda explosiva sobre una estructura, es útil considerar un péndulo simple. Si el péndulo se deja oscilar libremente, éste oscilará con su frecuencia natural. Si tratamos de forzarlo a que oscile a una frecuencia diferente, entonces su respuesta va a depender de esta frecuencia forzada. Las frecuencias cercanas a la frecuencia natural generan una amplitud de respuesta mayor en el péndulo respecto a las frecuencias alejadas de la frecuencia natural del péndulo. Además el tiempo que se aplica la fuerza, la dirección y el punto en el que es aplicada en el período de oscilación del péndulo, influyen en la amplitud final observada. Entonces, una pequeña fuerza aplicada en fase con el péndulo, puede producir grandes amplitudes, comparado con una gran fuerza aplicada brevemente fuera de fase con el péndulo. Una estructura real, como un edificio o un ser humano, se comporta de manera similar, con la excepción de que para estos casos, la estructura debe de ser representada por un gran número de péndulos, cada uno con una frecuencia natural diferente. La respuesta natural de la estructura está entonces descrita por un número de modos de vibración, cada uno con su frecuencia característica. La respuesta de una estructura depende entonces de como la onda explosiva acopla energía en cada uno de estos modos de vibración.<sup>31</sup>

También podemos representar la onda explosiva como una serie de péndulos con diferentes frecuencias y amplitudes. A medida que la onda explosiva cambia su forma, su frecuencia natural y su distribución también cambian. Usando esta analogía, podemos entender como la energía se acopla a los modos compatibles de la estructura y porqué la respuesta de la estructura varía con respecto a la distancia de la explosión.<sup>32</sup>

La forma general de una onda explosiva puede ser definida cualitativamente en términos del tiempo que tarda en pasar de un mínimo a un máximo (tiempo de subida) en el frente de choque  $T_r$  y la duración del viento explosivo  $T_d$ . La respuesta depende de cómo estos

---

<sup>31</sup>IBID. p. 23.

<sup>32</sup>IBID. p. 23.



tiempos característicos se comparan con el período natural de la estructura  $T$ . Existen cuatro categorías de respuesta que se definen por ésta relación<sup>33</sup>:

*Categoría A:* Si la duración de la onda explosiva es corta en comparación con el período de oscilación de la estructura, la carga es absorbida parcialmente por la inercia de la estructura, reduciendo así la deformación estructural.

*Categoría B:* Si la duración de la onda explosiva es larga en comparación con el período de oscilación de la estructura y tiene un tiempo de subida largo en su frente de choque, entonces la estructura experimenta una carga quasi-estática. Esto significa que la presión varía lentamente y puede ser aproximada con un valor constante. La deformación es entonces la misma que la producida por una carga estática equivalente.

*Categoría C:* Si la duración de la onda explosiva es larga en comparación con el período de oscilación de la estructura y tiene un tiempo de subida corto en su frente de choque, entonces la estructura experimenta una deformación, la cual es mayor que la causada por una carga estática equivalente.

*Categoría D:* Si la duración de la onda explosiva es aproximadamente igual que el periodo de oscilación de la estructura y si el tiempo de subida es de alrededor de la mitad de la duración, entonces la respuesta de la estructura puede exceder nuevamente aquella causada por una carga estática equivalente.

---

<sup>33</sup>IBID. p. 23.

Esta es otra razón por la cual la distancia puede alterar el daño observado, y permite explicar porqué objetos o personas más cercanos a la explosión, muchas veces sufren menores daños que aquellos un poco más alejados de la fuente explosiva<sup>34</sup>.

La importancia de la presión y del impulso para determinar la respuesta estructural depende de si la onda explosiva carga a la estructura de manera impulsiva o quasi-estática. La categoría A es impulsiva, pues el impulso en la onda explosiva es el que determina la respuesta de la estructura. Las categorías B y C son quasi-estáticas, pues es la presión de la onda explosiva la que determina la respuesta de la estructura. La categoría D es en parte impulsiva y en parte quasi-estática, ya que tanto la presión como el impulso determinan la respuesta de la estructura<sup>35</sup>.

Intuitivamente, los mecanismos de daño, como la presión quasi-estática, en realidad no representan la mayor causal de las fallas estructurales. Los procesos dinámicos asociados a la aceleración del material y las altas velocidades relativas, son mucho más efectivas<sup>36</sup>.

En general, entre más empinado sea el tiempo de subida de la onda de choque, mayor será el daño a la estructura. Las ondas explosivas que presentan una pendiente alta en su tiempo de subida, son generadas por explosivos de alto desempeño, tales como TNT, HMX, RDX, etc. Los gases combustibles, como el hidrógeno o líquidos como el petróleo, generan ondas explosivas con tiempos de subida bajos<sup>37</sup>.

---

<sup>34</sup>IBID. p. 23.

<sup>35</sup>IBID. p. 24.

<sup>36</sup>IBID. p. 25.

<sup>37</sup>IBID. p. 24.

Aunque la deformación de la estructura externa puede generar una fuerza y comprimir los componentes internos, la onda de choque transmitida por la onda explosiva incidente, puede causar niveles más severos de daños. En muchos casos, las propiedades del material externo de una estructura incluso pueden incrementar los niveles de choque interno, aumentando entonces el daño<sup>38</sup>.

En términos de la respuesta interna, las diferentes velocidades del sonido para los distintos materiales indican que las ondas de choque desarrolladas por el impacto de una onda explosiva, se propagan a una diferente velocidad a través de los materiales. Los elementos internos de una estructura responden de manera diferente a estas ondas, lo que puede llevar a un movimiento relativo de las partes y consecuentemente aparecen esfuerzos cortantes y rasgaduras en las interfaces. La mayoría de los materiales, incluyendo a los materiales biológicos, son bastante débiles al corte, y por eso fallan fácilmente bajo condiciones de alto esfuerzo cortante<sup>39</sup>.

Para proteger una estructura del efecto del impacto de un explosivo, todos los posibles mecanismos de daño deben ser considerados y tomados en cuenta según su importancia relativa. Normalmente son los componentes de alta frecuencia inducidos por la onda de choque los que deben ser eliminados efectivamente, como es el caso de las heridas de pulmón, muy comunes en explosiones. Además debe tenerse en cuenta que una combinación inadecuada de materiales en un esquema de protección, puede incrementar, en lugar de disminuir la frecuencia que daña los componentes.

## **2.2.Estado del arte**

### **2.2.1. Materiales**

---

<sup>38</sup>IBID. p. 24.

<sup>39</sup>IBID. p. 25.

Tradicionalmente, en la industria anti-explosiva se han usado diferentes materiales para lograr una adecuada protección. Su correcta selección es de vital importancia para la disipación de una onda explosiva. Estos materiales van desde aceros y diferentes metales, hasta polímeros novedosos llamados aramidas.

A continuación se hará una descripción de las características de los materiales normalmente usados para contrarrestar el poder de los explosivos. Se presentan igualmente, los resultados observados previamente en la literatura acerca del comportamiento de estos materiales y con base en esto, se propondrá una lista de materiales seleccionados para realizar pruebas de campo.

- ***Geomateriales***

El concreto y el suelo típicamente no se piensan como materiales resistentes a explosivos, pero ambos son de los más usados para protección contra presiones provenientes de explosivos, así como de sus fragmentos derivados. Las bermas de tierra se usan alrededor del perímetro de la instalación que se desea proteger como barrera que mitiga la presión producida por la explosión. Esta berma reduce el acceso de la presión, la deflecta y absorbe fragmentos de la bomba. El concreto es usado principalmente como material de construcción resistente a explosivos debido a su disponibilidad y bajo precio. Después del acero, es el material más usado para resistir sobrepresiones provenientes de explosivos, principalmente debido a su masa. La propiedad más importante del concreto cuando se diseñan estructuras resistentes al impacto, es su capacidad para resistir fuerzas de compresión.<sup>40</sup> El efecto spalling y la fragmentación son problemas que resultan en el concreto cuando este está expuesto a explosiones. La fragmentación se puede reducir con refuerzos de fibras. Se pueden agregar refuerzos internos para incrementar la resistencia a la

---

<sup>40</sup> LANE. Richard, CRAIG. Benjamin y BABCOCK. Wade. *Materials for Blast and Penetration Resistance*. The AMPTIAC Quarterly, Volume 6, Number 4. p. 40.

fractura del concreto, pero solo puede ser contenida agregando capas superficiales adicionales de diferentes materiales. Los refuerzos típicos incluyen barras de acero o cables, fibra de vidrio, de carbono, o diferentes materiales poliméricos.<sup>41</sup>

- ***Polímeros y vidrios***

Los polímeros son materiales de bajo costo que pueden ser usados para proteger edificios y a sus ocupantes, de la acción de muros fracturados o ranurados, así como del impacto de fragmentos de vidrio provenientes de ventanas que se rompen durante una explosión. Algunas telas simples se pueden aplicar a las paredes en el interior de la estructura para capturar escombros de una pared fragmentada. Los polímeros también pueden ser aplicados por spray en una gran cantidad de superficies, reduciendo así la fragmentación debida a presiones provenientes de explosivos, como fue estudiado por Knox, et. al.<sup>42</sup>

Lane et. al, probaron un polímero elastomérico en una pared de concreto de 8 x 8 pies, a la cual se le aplicó por spray este polímero en ambas caras. Posteriormente, se le aplicó una presión de 80 psi. El muro experimentó una fractura severa, pero se mantuvo en su sitio sin fragmentarse. Estudios adicionales mostraron que agregando polímeros como poliurea se pueden obtener unas mejores cualidades y disminuir las deflexiones del muro. También se estudiaron los resultados de agregar espumas de polímero dentro de las paredes; éstas actuaron como absorbentes de energía, reduciendo así la severidad del daño dentro de la estructura.<sup>43</sup>

---

<sup>41</sup>IBID. p. 40.

<sup>42</sup>KNOX. K.J., et. al. *Polymer Materials for Structural Retrofit*. Air Force Research Laboratory. Tyndall AFB. FL. 2000.

<sup>43</sup>LANE. Richard, CRAIG. Benjamin y BABCOCK. Wade. Op. Cit. p. 41.

Las ventanas tradicionales son extremadamente peligrosas para los ocupantes de una edificación, debido a que se rompen muy fácilmente, y una presión explosiva puede desplazar los fragmentos del vidrio hacia el interior del edificio a una alta velocidad. Laminados de vidrio pueden ser usados para reducir o prevenir que esto suceda. Películas delgadas de policarbonato laminado en vidrio, por ejemplo, mantienen el vidrio en una sola pieza cohesiva, aunque quebrada. Otra alternativa es utilizar vidrio templado térmicamente, el cual protege de presiones de 40 psi. Este vidrio, al fracturarse, se convierte en piezas del tamaño de granos de sal, los cuales no son tan peligrosos. Además, se emplea también policarbonato grueso como reemplazo de vidrios debido a que este no se rompe fácilmente con el impacto de un proyectil o de una presión relativamente alta. Existen tipos de armadura transparente conformada por laminados de cerámicos/policarbonato, que presentan un mejor rendimiento, pero tienen un costo demasiado alto para la mayoría de las aplicaciones de protección estructural.<sup>44</sup>

- ***Metales***

Muchos metales se usan como materiales para protección contra explosivos. Los más comunes son las aleaciones de hierro, de aluminio y el titanio. El propósito de los materiales para protección estructural se enfoca en dos propósitos: protección contra fragmentos y mantener la integridad estructural. Los metales son útiles protegiendo estructuras contra explosivos debido a su fuerza de inercia y a su resistencia, además de su capacidad de absorber energía. Adicionalmente, tubos metálicos, conectores y placas, pueden ser usados para reforzar fallas en la mampostería.<sup>45</sup>

Los metales son materiales muy dúctiles. La ductilidad es indicador de la resistencia del material a la penetración de un proyectil y a su habilidad de absorber energía de una

---

<sup>44</sup>IBID. p. 41.

<sup>45</sup>IBID. p. 41.

explosión. Una mayor ductilidad permite una más alta deformación del metal, lo que produce una mayor penetración del objeto explosivo a través de aquel, mientras que una baja ductilidad hace que el proyectil dañe la superficie del metal, pero lo penetra en menor grado. Además, la fuerza de inercia y ductilidad de los metales, les permite absorber energía de la explosión, manteniendo así la integridad estructural.<sup>46</sup>

Algunos metales tienen una alta resistencia al impacto, lo cual indica alta tenacidad y resiliencia a fracturarse al ser impactado por un proyectil. Esto también indica su habilidad de resistir múltiples impactos.<sup>47</sup>

La resistencia a la fractura determina qué tan adecuado es un metal para frenar la propagación de grietas, el cual es un factor importante cuando se consideran las fuerzas aplicadas. Hay una estrecha correlación entre dureza y desempeño frente a la acción explosiva en metales. Los metales de alta dureza presentan un mejor desempeño contra proyectiles expulsados por las explosiones, sin embargo, son más susceptibles a fractura y por lo tanto son malos materiales estructurales.

### **2.2.2. Materiales usados en blindajes antiexplosivos**

En la literatura existen numerosos casos de estudios del comportamiento de materiales frente a explosivos. Éstos materiales se dividen principalmente en materiales estructurales y materiales para protección personal. En materiales estructurales se ensayan concretos y aceros principalmente, mientras que para protección personal se utilizan aramidas de diferentes tipos, fibras que pueden ser de vidrio, carbono entre otras, espumas de PVC y

---

<sup>46</sup>IBID. p. 41.

<sup>47</sup> IBID. p. 41.

diferentes polímeros. Las espumas de aluminio, las estructuras tipo panal de abejas con paredes de aluminio, entre otros, han sido utilizadas experimentalmente tanto en el campo estructural como en el contexto de la defensa personal. Estos materiales celulares tienen excelentes características como absorbentes de energía de impacto y energía explosiva, gracias a su habilidad de deformarse debido a un gran golpe con una carga casi constante. Bajo una carga intensiva dinámica, las ondas de compactación viajan a través del material celular y permiten una mejor absorción de energía.

Los materiales empleados para protección personal presentan una característica común, y es su estructura de emparedado o estructura ensanduchada, conformada por capas de diferentes materiales. Normalmente estas estructuras para aplicaciones de anti-explosivos, están hechas de unas caras externas que pueden ser metálicas ó de un material compuesto, las cuales encierran un núcleo liviano que disipa energía. El núcleo generalmente es un material celular que permite grandes deformaciones. Con estas configuraciones se pueden elaborar trajes y diferentes artículos para protección contra explosivos.

En sus estudios, Rajan Sriram et. al<sup>48</sup>, simularon el comportamiento de una placa con caras de fibra de vidrio S2 y con núcleo de espuma de aluminio Cymat<sup>®</sup>, obteniendo resultados similares a los experimentales. Se concluyó que el principal modo de daños en el material ocurre por un efecto llamado "dishing", que es una distorsión que aparece en la cara frontal.

Tekalur et. al<sup>49</sup>, realizaron varias pruebas con diferentes materiales ensanduchados, así como cada uno de los materiales de manera individual. Como caras, usaron fibra de carbono/vinyl ester y fibra de vidrio/vinyl ester, y como núcleos se usaron balsa y espuma

---

<sup>48</sup> SRIRAM. R. y VAIDYA. U. K. *Blast impact response of aluminum foam sandwich composites*. J Mater Sci. 41.2006. p. 4023-4039.

<sup>49</sup>TEKALUR. S.A. et. al. *Failure behavior and energy absorption of sandwich composites under dynamic loading*. Proceedings of the SEM Annual Conference. 2009.



Corecell<sup>®</sup>. Estos investigadores demostraron que los materiales ensanduchados proveen una protección mejorada respecto a los materiales sencillos. Además se vio que la fibra de carbono presenta mayor absorción de energía, pero se deflecta más que la fibra de vidrio. La espuma Corecell<sup>®</sup> resiste una presión mucho mayor que la que puede resistir el balsa, el cual falla fácilmente por esfuerzos cortantes.

Theobald et. al,<sup>50</sup> ensayaron el comportamiento de tres materiales de núcleo diferentes (Alporas<sup>®</sup>, Cymat<sup>®</sup> y estructura de panal de abeja de aluminio de diferentes densidades), todos con caras de aluminio. Los tres presentaron buenos resultados, pero la estructura de panal de abeja de aluminio de 29mm de grosor presentó mejor absorción de energía. En el panal de abeja, los mecanismos de absorción de energía actúan mediante separación de las celdas y rasgamiento. En las espumas de aluminio, se presentaron más daños en el Alporas<sup>®</sup> que en el Cymat<sup>®</sup>, esto debido a la menor densidad que tiene el Alporas<sup>®</sup>.

Karagioiova et. al,<sup>51</sup> usaron caras de acero y espuma Cymat<sup>®</sup> de núcleo. Intentaron simular la respuesta del material a una explosión mediante un modelo quasi-estático, sin embargo, llegaron a la conclusión de que este modelo no explica bien el fenómeno, ya que la energía absorbida depende de la velocidad de compresión.

Yang et. al,<sup>52</sup> probaron combinaciones de diferentes capas, todas con caras de fibra de vidrio y núcleo de balsa, y a esto se le agregaron capas de espuma Divinycell<sup>®</sup> de diferentes densidades y capas poliurea. Éstas últimas se agregaron tanto de manera individual como en combinación de las mismas, y se compararon los resultados. La mejor combinación

---

<sup>50</sup>THEOBALD. M.D. et. al. *Large inelastic response of unbonded metallic foam and Honeycomb core panels to blast loading*. Composite Structures. 92. 2010. p. 2465-2475.

<sup>51</sup>KARAGIOZOVA. D. LANGDON. G. S. y NURICK. G. N. *Blast attenuation in Cymat foam core sacrificial claddings*. International Journal of Mechanical Sciences. 52. 2010. p. 758-776.

<sup>52</sup>YANG. Y. et. al. *On the dynamic response of sandwich panels with different core set-ups subject to global and local blast loads*. Engineering Structures. 33. 2011. p. 2781-2793.

obtenida es aquella en la que inmediatamente después de la cara lleva una capa de espuma Divinycell<sup>®</sup> H200 seguida por una capa de poliurea y por el núcleo de balsa. Estas capas adicionales ayudan a mejorar la absorción de energía y además permiten que el material falle más fácilmente en las uniones de las capas, lo cual puede arreglarse con más facilidad.

Gardner et. al,<sup>53</sup> probaron muestras con caras de E-glass/vinyl-ester y con un núcleo combinado de espumas Corecell<sup>®</sup> de diferentes densidades (A300, A500, A800), para probar la dependencia de los resultados respecto al orden de estos materiales, se probaron dos muestras, una con orden ascendente respecto a la densidad y otra en orden descendente. Se obtuvo una diferencia bastante pronunciada, siendo mejor la que usa un cambio de densidad ascendente. Además luego se aplicó una capa de poliurea, la cual se probó tanto antes como después de las capas de Corecell<sup>®</sup>. Se obtuvo un efecto negativo al aplicar la poliurea antes de las espumas Corecell<sup>®</sup>, mientras que su efecto absorbente de energía se amplificó al aplicarla contra la cara trasera. Por último se hicieron tanto pruebas de campo con explosivos, así como pruebas de laboratorio quasi-estáticas, obteniéndose mejores resultados tras los experimentos dinámicos que en los quasi-estáticos.

Langdon et. al,<sup>54</sup> mostraron que los principales mecanismos de disipación de energía en los compuestos ensanduchados es mediante la fractura de las fibras, seguida por la delaminación y la compresión del núcleo.

Zhu et. al,<sup>55</sup> concluyeron que para núcleos de espuma de aluminio con caras de aluminio, un núcleo más denso y grueso aumenta la absorción de la energía. Además unas caras más delgadas incrementan la energía interna del sistema.

---

<sup>53</sup>GARDNER. N. *Blast Mitigation in a Sandwich Composite Using Graded Core and Polyurea Interlayer*. Experimental Mechanics. 52. p. 119-133.

<sup>54</sup>LANGDON.G.S. et. al. *The response of sandwich structures with composite face sheets and polymer foam cores to air-blast loading: Preliminary experiments*. Engineering Structures. 36. p. 104-112.

### 2.2.3. Equipos de protección anti explosivos

En el mercado existen diferentes tipos o modelos de equipos de protección antiexplosivos, con características y composiciones que pueden variar entre ellos, pero que conservan algunas similitudes. Normalmente, estos equipos de protección están compuestos de capas de aramidas como el Kevlar<sup>®</sup> y capas rígidas como la fibra de carbono. Este tipo de estructuras permite regularmente detener la metralla que a menudo sale disparada de un artefacto explosivo. Se ha encontrado en la experimentación que una capa de un material con una impedancia acústica alta, ligada con una capa de un material blando con una impedancia acústica baja, como una espuma de baja densidad, poliuretano o caucho sintético, pueden proteger de mejor manera de la onda explosiva. Sin embargo, también es importante tener en cuenta la frecuencia de la onda explosiva además del orden en que las capas son superpuestas, para asegurarse de que son efectivas<sup>56</sup>. Por último, regularmente, los equipos de protección anti explosivos, utilizan otra capa interna compuesta de aramidas, la cual debe detener el resto de metralla que haya podido superar la primera capa<sup>57</sup>.

A continuación se presentan las características de algunos de ellos que resaltan tanto por su efectividad como por su uso frecuente.

- **EOD Bomb Disposal Suit. EOD Partner**

---

<sup>55</sup>ZHU.Feng.et. al. *Structural Response and Energy Absorption of Sandwich Panels with an Aluminium Foam Core Under Blast Loading*. Advances in Structural Engineering. Vol. 11, No. 5.2008.

<sup>56</sup>COOPER. G. *Protection of the lung from blast overpressure by thoracic stress wave decouplers*. J Trauma. 40(3):S105-S110, 1996.

<sup>57</sup>Pavlus John. Marzo de 2010. *Real-life Hurt Locker: how bomb-proof suits work*. Dirección URL: <http://dvice.com/archives/2010/03/hurt-locker-sui.php>. Fecha de consulta: 01/8/2012. Última actualización: 10/7/2013.

Este traje, mostrado en la Figura 4, presenta una capa externa de Nomex<sup>®</sup> III resistente al fuego, una matriz de aramidas para protección de metralla y un sistema anti trauma, el cual consiste en dos capas de una espuma elástica lineal, con un módulo de compresibilidad de 4350 psi. Tiene un peso total de 31kg.



**Figura 4.** Traje EOD de la empresa EOD Partner<sup>58</sup>.

- **PBF-SD01 EOD Suit. WS FZ.**

Mostrado en la Figura 5, tiene un peso total de 28kg, tiene un casco protector de bajo peso, con un visor anti balas. El traje está cubierto en su mayoría de aramidas y la capa externa presenta alta tenacidad, protege contra altas temperaturas, provee resistencia a las llamas y es anti-estática.

Está conformado por una capa externa de Nomex<sup>®</sup>, capas de Dyneema<sup>®</sup>, una espuma lineal de celda cerrada y el casco está compuesto de polimetilmetacrilato y policarbonato de alta densidad.

---

<sup>58</sup>EOD Partner. *EOD BOMB DISPOSAL SUIT*. Art.No. 4700100. Dirección URL: [http://eodpartner.de/eng/02products/01eod/4700100\\_suit\\_heavy/4700100eng.pdf](http://eodpartner.de/eng/02products/01eod/4700100_suit_heavy/4700100eng.pdf). Fecha de consulta: 01/8/2012.



**Figura 5.** Traje PBF-SD01 EOD Suit, de la empresa china WS FZ<sup>59</sup>.

- **Global Armour Generation 6 EOD.**

Tiene un peso de 38.5 kg, y presenta los siguientes materiales para su composición. El casco tiene una capa de fibra de vidrio con núcleo de aramida, y el visor es de acrílico/policarbonato. El resto del traje está hecho de HTA rip stop Kermel<sup>®</sup>, y aramidas. Los refuerzos son de acero reforzado<sup>60</sup>.

En general, se puede observar que en la mayoría de los trajes existentes en el mercado, se emplean materiales y diseños de los mismos muy similares. Normalmente cada traje consta de:

- Casco protector.
- Chaleco.

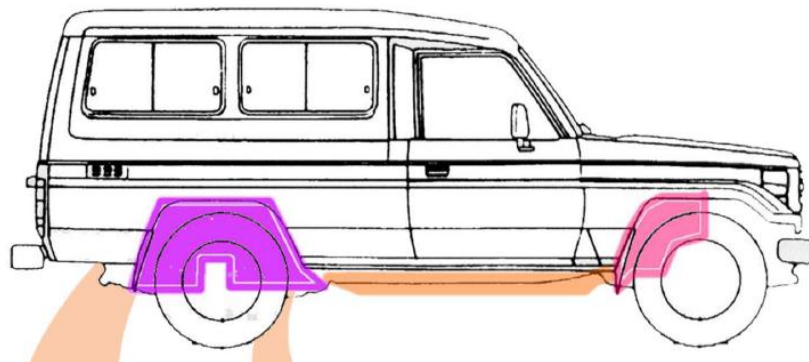
---

<sup>59</sup>Alibaba.com. Global trade starts here. Dirección URL: [http://www.alibaba.com/product-gs/526348370/PBF\\_SD01\\_EOD\\_suit\\_bomb\\_disposal.html](http://www.alibaba.com/product-gs/526348370/PBF_SD01_EOD_suit_bomb_disposal.html). Fecha de consulta: 01/08/2012. Última actualización: 10/7/2013.

<sup>60</sup>Global Armour. *EOD Suit Generation 6*. Dirección URL: <http://www.globalarmour.org/pdfs/EOD%20Suit%20Generation%206-04.06.pdf>. Fecha de consulta: 01/08/2012.

- Pantalón.
  - Refuerzos en la ingle.
  - Refuerzos de cuello y columna.
  - Botas.
  - Traje de refrigeración.
- **Enhanced Vehicle Blast Protection - AIGIS TABRE™ SUV Kit. AIGIS Blast Protection.**

En la Figura 6 se muestra un el esquema de protección del vehículo. Está diseñado para proteger la parte inferior del auto, incluyendo los arcos de las ruedas. Solo requiere ser atornillado al chasis, siendo de fácil instalación, y permitiendo quitarlo fácilmente para realizar el mantenimiento adecuado del vehículo.



**Figura 6.** Esquema de protección para el vehículo<sup>61</sup>.

El sistema de protección fue probado para: AEP55 nivel 1, granadas Dual DM51, granada Nato Stanag, todas presentando resultados satisfactorios, mostrados en la Figura 7.

---

<sup>61</sup> Aigis Blast Protection.SUV Kit.Dirección  
<http://www.aigis.co.uk/userfiles/GB/PDFs/SUV%20Kit%20-%20Vehicle%20Protection%20Datasheet%20270711.pdf>. Fecha de consulta: 16/10/2012.



**Figura 7.** Resultados de pruebas del AIGIS TABRE™ SUV Kit.<sup>62</sup>

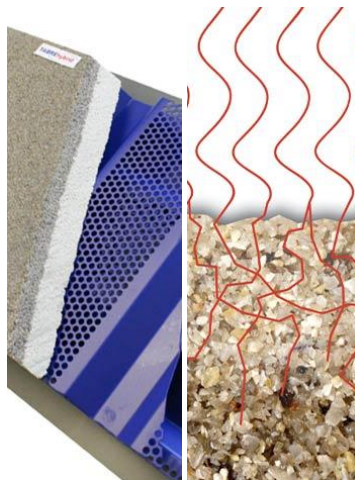
- **AigisTABREShield™ Building Protection System.**

El revestimiento AigisTABREShield™ se muestra en la Figura 8. Es un revestimiento no estructural liviano que permite buena protección, donde las estructuras más pesadas como el concreto reforzado o las estructuras reforzadas complejas son inviables.

TABREShield™ BlastProtection reduce la sobrepresión y las ondas de choque reflejadas, reduciendo el efecto progresivo de la explosión, previniendo así una falla en las estructuras. Este sistema de protección puede ser integrado directamente con la estructura del edificio. Su versatilidad, de diseño, permite su aplicación en la mayoría de estructuras.

---

<sup>62</sup> IBID.



**Figura 8.** Estructura TABRESHield Building Protection System<sup>63</sup>.

- **SmartMetal™ Cymat®.**

Es efectivo absorbiendo grandes cantidades de energía en un paquete liviano y reciclable. Puede ser usado en un amplio rango de aplicaciones para proveer una buena atenuación de una onda explosiva.

La estructura celular del SmartMetal™ es la clave que permite disipar la energía de la onda. Al chocar la onda con el material, las burbujas de la espuma de aluminio colapsan, absorbiendo energía y atenuando la transferencia de la fuerza destructiva, a vehículos o estructuras y a sus ocupantes.

SmartMetal™ presenta las siguientes características: Absorción de energía, capacidad de múltiples impactos, isotropía, bajo peso, reciclable, mejora la integridad estructural, atenúa el sonido, estable en tiempo y temperatura, se puede cortar y maquinarse y puede ser laminado.

---

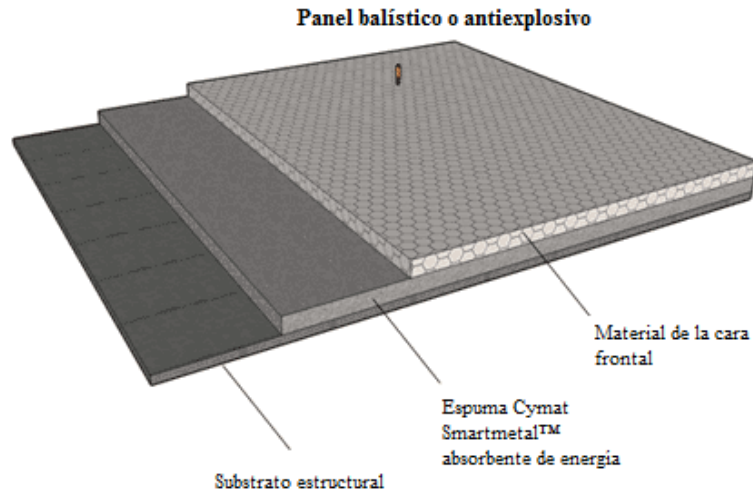
<sup>63</sup>Aigis Blast Protection. *Aigis SABRESHield*. Dirección URL: <http://www.aigis.co.uk/building-blast-protection>. Fecha de consulta: 16/10/2012.



En la Figura 9 se presenta la información típica para la compresión de un panel de SmartMetal™, mientras que en la Figura 10 se presenta un esquema de las partes de el panel de SmartMetal™.



**Figura 9.** Gráfica de tensión vs deformación para el SmartMetal™<sup>64</sup>.



**Figura 10.** Esquema de un panel de SmartMetal™<sup>65</sup>.

<sup>64</sup>Cymat. *SmartMetal*. Dirección URL: <http://www.cymat.com/>. Fecha de consulta: 16/10/2012. Última actualización: 30/8/2012.

<sup>65</sup> IBID.

### 3. SELECCIÓN DE MATERIALES

La anterior etapa del proyecto revisión bibliográfica, permitió la realización del marco teórico de las explosiones y el estado del arte sobre materiales de protección anti explosivos. Después se procedió con la segunda etapa denominada selección. De acuerdo al estudio de los materiales empleados para la disipación de ondas provenientes de artefactos explosivos, es claro que los materiales a utilizar son compuestos multicapa que permiten brindarle diferentes funciones al material como tal. La definición general del material a utilizar, es el de un material compuesto por la superposición de capas de diversos materiales usados comúnmente en la literatura, unidas entre sí por resina epóxica. El material se conforma de la siguiente manera como se muestra en la Figura 11.



**Figura 11. Ilustración del autor.** Configuración general del material propuesto.

Las **caras frontal y posterior**, que son las paredes de la placa, tienen la función de prevenir el paso de fragmentos provenientes del explosivo y darle además rigidez a la placa. Están conformadas por Twaron<sup>®</sup>, fibra de carbono, fibra de vidrio o aluminio. Las **capas intermedias** son materiales espumosos livianos que permiten una primera disipación de la energía de la onda, mediante su aplastamiento. Generalmente se usan materiales en los que la impedancia vaya aumentando capa por capa. Es por esto, y dado la dependencia de la

impedancia acústica con la densidad<sup>66</sup>, que en algunas muestras se ubicaron las espumas de PVC con densidad ascendente. En las capas intermedias se utilizó entonces PVC de diferentes espesores y densidades o poliurea. La tercera parte es **el núcleo**, el cual es el elemento con mayor espesor de la placa y es el encargado de absorber una gran parte de la energía del impacto. Para el núcleo se emplearon balsa, estructura con forma de panal de abeja de aluminio y tubos de aluminio simulando la misma forma del panal de abeja. Se buscó trabajar con espesores uniformes con el ánimo de realizar una mejor comparación de los materiales, eliminando la variable del espesor. Se definió que las caras frontales y traseras de las muestras tuvieran un espesor de entre 3 y 4 mm. Se definió un espesor de alrededor de 8 mm para las capas intermedias y un espesor de 30 mm para los materiales del núcleo. Para que en total las muestras presenten un espesor cercano más de 4 cm. Adicionalmente, las muestras se dimensionaron de 25 x 25 cm de lado.

### **3.1. Materiales para las capas del material propuesto**

#### **3.1.1. Materiales para la cara frontal y posterior**

- ***Aluminio***

El aluminio 2024 es una aleación de aluminio en la que se usa el cobre como principal elemento en la aleación. Se usa en aplicaciones que requieren una relación fuerza/peso elevada y también presenta una buena resistencia a la fatiga<sup>67</sup>. Tiene baja resistencia a corrosión. Es muy usado en la industria aeronáutica. La forma T3 de la aleación presenta una resistencia a la tensión de 400 a 427 MPa y un límite elástico de al menos 269 a 276

---

<sup>66</sup> INASEL. Tecnología Acústica. Dirección URL: <http://www.inasel.com/Acustipedia/Conceptos-generales/%C2%BFQue-es-la-impedancia-acustica.html>. Consultada: 15/6/2013. Última actualización: 27/11/2012.

<sup>67</sup> Capalex Ltd. Dirección URL: [http://www.capalex.co.uk/spanish/2024\\_alloy\\_sp.html](http://www.capalex.co.uk/spanish/2024_alloy_sp.html). Fecha de consulta: 5/3/2013.

MPa. Presenta una elongación de entre 10 y 15% antes de presentar ruptura. Presenta un módulo de elasticidad de 73.1 GPa.

- ***Fibra de vidrio***

La fibra de vidrio se obtiene gracias a la intervención de ciertos hilos de vidrio muy pequeños, que al entrelazarse van formando una malla, patrón o trama. Las fibras son un material liviano, muy fuerte y robusto. Aunque posee propiedades de resistencia un poco menores que la fibra de carbono, la fibra de vidrio es menos rígida, menos frágil y menos costosa. Las fibras de vidrio deben mezclarse con una resina que se endurece manteniendo juntas las fibras y brindándole diferentes propiedades dependiendo de la resina usada.<sup>68</sup>

Las fibras proveen las características mecánicas. Pueden usarse fibras en direcciones aleatorias, unidireccionales o bidireccionales. Las fibras de vidrio son muy livianas, y no son conductoras ni interfieren con las ondas electromagnéticas. Además, presentan alta resistencia mecánica y a corrosión. Presenta una resistencia a la tensión de 3445 MPa, y una resistencia a la compresión de 1080 MPa. Presenta una elongación de 4.9% antes de presentar ruptura.<sup>69</sup>

- ***Fibra de carbono***

La fibra de carbono (fibrocarbono) es un material formado por fibras de 50-10 micras de diámetro, compuesto principalmente de átomos de carbono. Los átomos de carbono están unidos entre sí en cristales que son más o menos alineados en paralelo al eje longitudinal de la fibra. La alineación de cristal da a la fibra alta resistencia en función del volumen (lo

---

<sup>68</sup>MAZHARUL.Islam Kiron. *Introduction of fiber glass*.TextileLearner. Dirección URL: [http://textilelearner.blogspot.com/2011/08/glass-fiber-types-of-glass-fiber\\_3834.html](http://textilelearner.blogspot.com/2011/08/glass-fiber-types-of-glass-fiber_3834.html). Consultada 9/6/2013.

<sup>69</sup>WALLENBERGER.Frederick T. et. al. *Glass Fibers*. ASM Handbook, Vol. 21: Composites. 2001. p.28.

hace fuerte para su tamaño). Varios miles de fibras de carbono están trenzados para formar un hilo, que puede ser utilizado por sí mismo o tejido en una tela<sup>70</sup>.

Las propiedades de las fibras de carbono, tales como una alta flexibilidad, alta resistencia, bajo peso, alta resistencia a tracción, buena conductividad térmica, alta tenacidad, resistencia química, conductividad eléctrica, tolerancia a altas temperaturas y baja expansión térmica, las hacen muy populares en la industria aeroespacial, ingeniería civil, aplicaciones militares, deportes de motor junto con muchos otros deportes. Sin embargo, son relativamente caras en comparación con las fibras similares, tales como fibras de vidrio o fibras de plástico, lo que limita en gran medida su uso.

Las propiedades varían un poco dependiendo de la composición de las fibras, pero presenta un módulo de elasticidad mayor a 230 GPa y puede alargarse un 1.8 % antes de presentar rupturas.<sup>71</sup>

- ***Twaron® o aramida.***

El Twaron® es un material que se forma mezclando para-fenilendiamina y cloruro tereftaloilo, dando como resultado, hilos de poliamida aromática (aramida). Luego se refinan los hilos y se extruyen para conseguir fibras regulares. Una fibra de Twaron® es un arreglo de moléculas orientadas de manera paralela, formando una estructura cristalina. En general, los polímeros que presentan resistencia a romperse es porque tienen grupos aromáticos o amidas, el Twaron® contiene ambos. Los componentes aromáticos del

---

<sup>70</sup>Tecnología de los Plásticos. Dirección URL: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/fibra-de-carbono.html>. Consultada: 5/3/2013. Última actualización: 29/6/2013.

<sup>71</sup> Aire y Espacio. *La fibra de carbono*. Dirección URL: <http://www.aireyespacio.com/2009/07/la-fibra-de-carbono.html>. Consultada: 9/6/2013. Última actualización: 7/12/2011.

Twaron<sup>®</sup> tienen orientación radial, lo que le proporciona un alto grado de simetría en el interior de las fibras<sup>72</sup>.

En tejido, el Twaron<sup>®</sup> es un material fuerte y ligero. Al combinarlo con resina, forma un material rígido y liviano, con 20 veces la fuerza del acero. Sin embargo, tiene un alto costo debido a los equipos necesarios para su fabricación.

Las aramidas tienen una alta tenacidad, lo que las hace muy difíciles de cortar. Son resistentes al fuego, y mantienen sus propiedades a elevadas temperaturas. Tiene un módulo de Young de entre 70.5 y 112.4 GPa, siendo mayor que el de la fibra de vidrio, pero menor que la fibra de carbono. La resistencia a tensión es de aproximadamente 2757 MPa.<sup>73</sup>

### **3.1.2. Materiales para las capas intermedias**

- ***Espuma de PVC***

Es un material rígido de bajo peso al igual que el PVC, pero pesa alrededor de la mitad, es altamente resistente a la humedad y a algunos químicos, y es muy fácil de cortar. Tiene propiedades termoplásticas y se liquidifica a alrededor de 65°C. Es por esto que debe protegerse térmicamente si se desea aplicar en el ámbito de las explosiones.

---

<sup>72</sup>Lawrence Berkeley Laboratory. *Kevlar*. Disponible en: <http://www.lbl.gov/MicroWorlds/Kevlar/index.html>. Consultada 17/5/2013. Última actualización: 8/6/2011.

<sup>73</sup> DEMERCHANT Christine. *Aramid Fibers, trade names Kevlar, Twaron, Nomex*. Dirección URL: [http://www.christinedemerchant.com/aramid\\_characteristics.html](http://www.christinedemerchant.com/aramid_characteristics.html). Consultada 9/6/2013.

La espuma de PVC presenta excelentes propiedades de compresión, siendo resistentes a impactos y vibraciones<sup>74</sup>. Se usa para absorber deformaciones, en juntas de estanqueidad, en aislamientos acústicos, y en componentes de automoción, debido a su alto grado de auto extingüibilidad.

Esta espuma es ideal para la construcción de laminados ligeros de tipo emparedado, con cualquier tipo de resina termoestable (poliéster, vinyl-éster o epoxi) y cualquier fibra de refuerzo, en procesos de INFUSIÓN/VACÍO o SCRIMP. Todas las resinas termoestables, así como los adhesivos epoxi, uretano, acrilato o vinyl-éster presentan una excelente adherencia a este tipo de espumas<sup>75</sup>.

La espuma de PVC con densidad de 80 g/cm<sup>3</sup> tiene una resistencia a compresión de 1.4 MPa, y un módulo de elasticidad de 0.09 GPa. Además tiene una resistencia a la tensión de 1.15 MPa y resiste una elongación del 30% antes de presentar ruptura<sup>76</sup>.

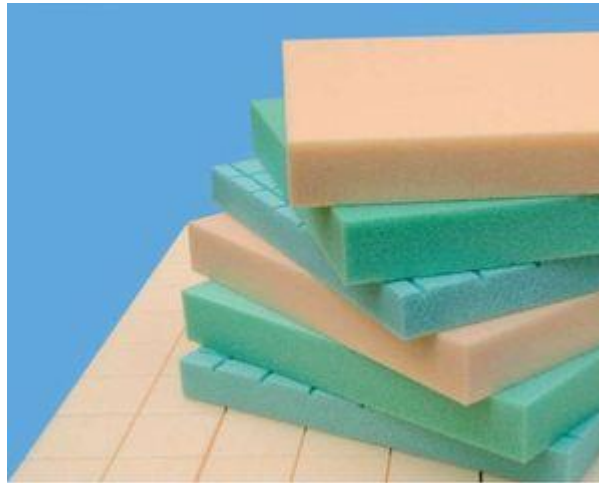
En la Figura 12 se muestra el aspecto tradicional de las diferentes espumas de PVC Divinycell<sup>®</sup>, en diferentes densidades y presentaciones.

---

<sup>74</sup>Modisprem, S.A. Dirección URL: [http://modisprem.com/materiales/PVC\\_Foam.html](http://modisprem.com/materiales/PVC_Foam.html). Consultada 5/3/2013. Última actualización: 14/7/2011.

<sup>75</sup>VoraforceCompositeSystems. *Soluciones epóxicas en materiales compuestos*. Dirección URL: [http://www.congresosudamericano.com/cobertura/apresentacoes/pr/8/dow\\_pr\\_08.pdf](http://www.congresosudamericano.com/cobertura/apresentacoes/pr/8/dow_pr_08.pdf). Consultada: 9/6/2013.

<sup>76</sup>Divinycell H. *Technical Data*. Dirección URL: <http://www.diabgroup.com/~media/Files/Products/Core-material-pdf/H%20Oct%202012%20rev9%20IMP.pdf>. Consultada: 9/6/2013. Última actualización: 8/7/2013.



**Figura 12.** Espuma de PVC Divinycell<sup>®77</sup>.

- ***Poliurea***

Las poliureas son una familia de polímeros sintéticos que se obtienen de la reacción de un disocianato con una diamina. La poliurea puede alcanzar grandes elongaciones y resistencia a la abrasión. Las poliureas pueden ser clasificadas en alifáticas o aromáticas según sea su estructura química. Mientras una poliurea aromática es de menor costo, presenta decoloración frente a la radiación UV y son más rígidas por la naturaleza de los anillos aromáticos. Las poliureas alifáticas son de precio mayor pero son resistentes a la radiación UV. La poliurea se aplica por spray, como se muestra en la Figura 13, y para esto se requiere de equipamiento especial.

La poliurea se usa como recubrimiento y le da al material buena protección contra corrosión y abrasión. Además tiene una alta elongación y durabilidad. Tiene una buena resistencia a tracción y resistencia a la rotura. También es un buen aislante acústico, es impermeable y presenta una excelente adhesión a diferentes materiales como madera, fibra

---

<sup>77</sup>Comargo. *CompositeMaterials*. Dirección URL:  
<http://www.comargo.com/Castellano/productos/estructuras/lista-estructuras.asp>. Consultada: 9/6/2013.



de vidrio y metales, entre otros. La poliurea puede sostener un alargamiento de 400% antes de presentar rupturas<sup>78</sup>.



**Figura 13.** Aplicación poliurea<sup>79</sup>.

### 3.1.3. Materiales para el núcleo

- ***Espuma de aluminio***

Las espumas de aluminio son de la familia de los metales porosos. Los metales porosos son el resultado de la combinación de gases y metal, donde los gases en forma de burbujas ocupan entre un 50 % y un 90 % de la estructura total (ver: Figura 14), por lo que se consiguen densidades muy bajas (entre 0,03 - 0,2 gr/cm<sup>3</sup>), con propiedades que son, por un lado, características del metal del que están formados y, por otro, derivadas de su peculiar estructura; el resultado es un material que brinda diversos rangos de propiedades térmicas, mecánicas y acústicas que son especialmente interesantes en aplicaciones de estructuras

---

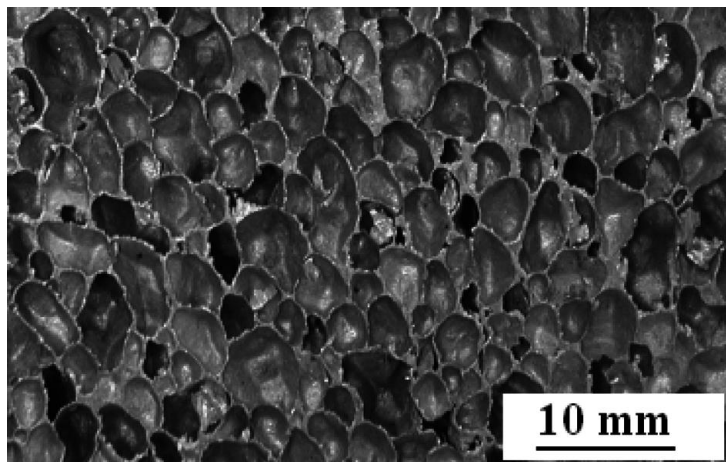
<sup>78</sup>Poliurea Colombia. Dirección URL: <http://www.poliureacolombia.com/>. Consultada 5/3/2013.

<sup>79</sup> IBID.

ultraligeras, así como sistemas de alta resistencia al impacto y elementos de disipación de calor y aislamiento acústico<sup>80</sup>.

Las espumas de aluminio presentan baja densidad, resistencia a la corrosión y un punto de la fusión relativamente bajo, que las hacen fáciles de manipular.

Las propiedades mecánicas y físicas dependen fuertemente de la densidad. En la Tabla 1 se muestran las propiedades típicas de las diferentes espumas de aluminio. Su densidad se encuentra típicamente en el rango de 0,4 a 0,8 gr/cm<sup>3</sup>. Las espumas de aluminio resultan materiales muy eficaces en la absorción de sonido, protección electromagnética, absorción de energía de impacto y vibración, no son inflamables y permanecen estables a alta temperatura. La espuma de aluminio es reciclable y no contaminante, ofreciendo una combinación de propiedades físicas, mecánicas, térmicas y acústicas, características de un material homogéneo.

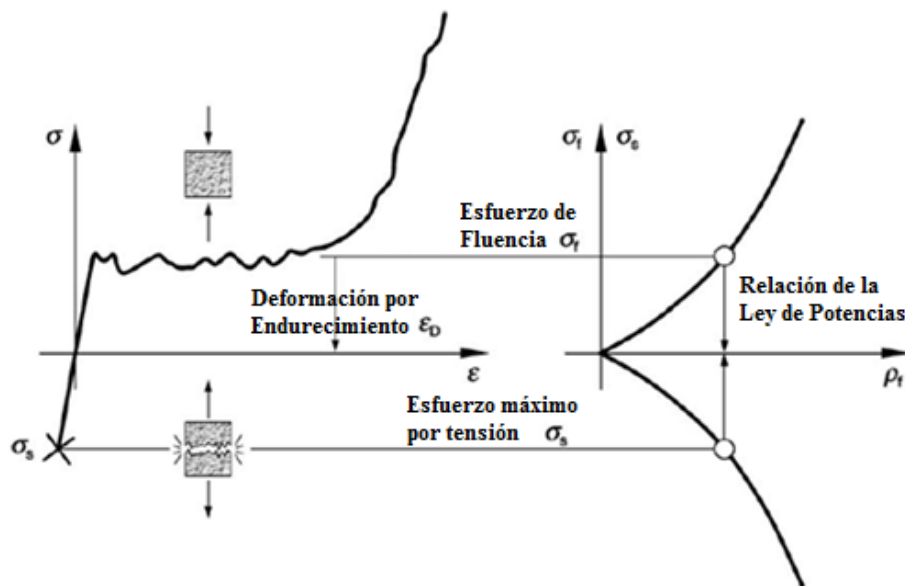


**Figura 14.** Espuma de aluminio de poro cerrado<sup>81</sup>.

---

<sup>80</sup>GUTIÉRREZ-VÁZQUEZJ. A, OÑORO J. *Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones.* Revista Metalurgia. 44. p. 460. 2008.

Los ensayos a compresión son muy habituales ya que muchas estructuras se diseñan para trabajar a compresión. La dirección de deformación es importante en los resultados obtenidos y se suele especificar que ésta es paralela a la dirección del crecimiento de la espuma. El comportamiento típico de una espuma de aluminio en compresión uniaxial, así como la tensión, se muestra en la Figura 15. Bajo compresión, el material se comporta de manera similar a un material plástico perfecto, mientras que bajo tensión, la región elástica inicial se limita por esfuerzos de tensión de falla por fragilidad<sup>82</sup>.



**Figura 15.** Curvas de compresión y tensión para espumas de aluminio<sup>83</sup>.

Espumas con densidades altas pueden presentar un desarrollo más plano, debido a la mayor resistencia que proporciona la eliminación de las paredes de la espuma en el curso de la deformación.

<sup>81</sup>IBID. p. 460.

<sup>82</sup>HANSSENA A.G. et. al. *Close-range blast loading of aluminium foam panels*. International Journal of Impact Engineering.27. p. 596. 2002.

<sup>83</sup>IBID. p. 595.

Las espumas de aluminio presentan alta eficiencia absorbiendo energía dinámica, ya que su velocidad de deformación es casi constante para un amplio rango de velocidades de aplicación de la carga. La estructura altamente isotrópica de la espuma hace que la energía mecánica recibida se disperse por igual en todas las direcciones. Durante el impacto los poros se colapsan y actúan como amortiguadores, disipando la energía de choque.

PROPIEDAD	UNIDAD	Espuma de aluminio							
		AlSi12	AlSi12	AlMg1Si (6061)	AlMg1Si (6061)	AlMg1Si (6061)	AlSi7	AlSi7	AlSi7
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	0,6	0,8	0,5	0,6	0,8	0,5	0,6	0,8
Modulo de Young	GPa	4,9	8,4		3,9				
Resistencia a compresión	sin piel [MPa]	18,8	30,2	14,3	22	43,6	7,8	11,9	22,8
	con piel [MPa]	16,1	29	14,1	20,3	35,8			
Absorción de energía a compresión	por volumen [kJ/dm <sup>3</sup> ]	3,1			7,1		4,4	5,3	
	por masa [kJ/kg]	5,3	9,75	9,86	11,9		8	8,4	
Conductividad térmica	W/mK	16,7 (20°C)			18,4 (20°C)		6,1 (50 °C)	7,8 (50 °C)	
							6,9 (100 °C)	8,8 (100 °C)	
							7,7 (200 °C)	9,8 (200 °C)	
Capacidad calorífica	kJ/kgK	0,88			9,2		0,9	0,9	
Coefficiente de dilatación lineal	[10 <sup>-6</sup> /K]	19,9 a 20,6			23,1				

**Tabla 1.** Propiedades de las espumas de aluminio<sup>84</sup>.

- **Estructura con forma de panal de abeja**

Estas son placas de aluminio que tienen un patrón de forma de panal de abeja, es decir, tiene un patrón de hexágonos verticales, lo cual permite mejorar las características de la placa, minimizando la cantidad de material usado. En la Figura 16 se muestra un esquema de la estructura de panal de abeja. Las propiedades que se ven mejoradas son principalmente la compresión fuera del plano y la resistencia a cortante fuera del plano<sup>85</sup>.

<sup>84</sup> GUTIÉRREZ-VÁZQUEZ J. A, OÑORO J. Op. Cit. p. 469.

<sup>85</sup> WAHL L. *Shear stresses in Honeycomb sandwich plates: Analytical solution, finite element method and experimental verification.* Journal of Sandwich Structures and Materials. 14 (4).p. 450. 2012.

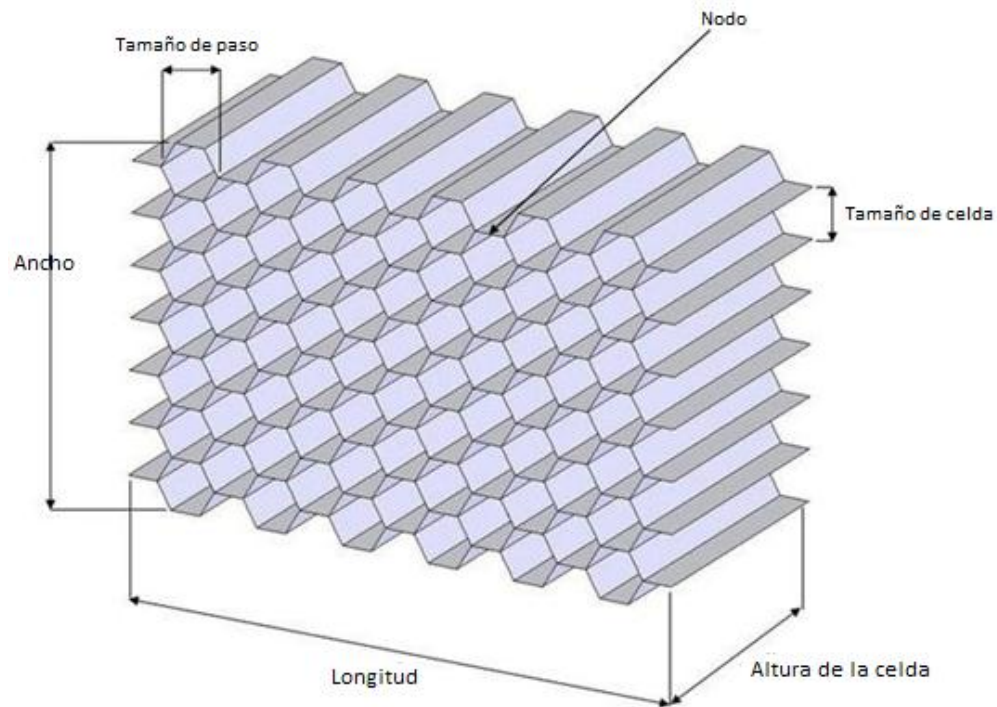
Además, este material presenta una buena resistencia a temperaturas elevadas, tiene una alta conductividad térmica, es resistente al fuego, a la corrosión, a la humedad y a los hongos.

Las propiedades físicas del panel de abeja dependen de diferentes factores. Es de gran importancia la densidad, la cual está dada por el espesor de la placa y el tamaño de las celdas.

La adición de unas tapas de aluminio que cubran el panel de abejamejoran su estabilidad, y resistencia a compresión. Las propiedades del panel de abeja de aluminio dependen de gran manera de la densidad del mismo. Aproximadamente, el panel de abeja de aluminio tiene un módulo de Young de 0.165 GPa, tiene resistencia al aplastamiento de 0.896 MPa y resistencia al corte de 0.448 MPa para el ancho y de 0.689 MPa para el largo<sup>86</sup>.

---

<sup>86</sup>HEXWEB. *Honeycomb Attributes and Properties*. Dirección URL: [http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb\\_Attributes\\_and\\_Properties.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf). Consultada: 9/6/2013. Última actualización: 14/6/2013.



**Figura 16.** Estructura de panel de abeja de aluminio<sup>87</sup>.

- **Balso**

Es la madera más liviana, se obtiene del árbol balsa, tiene una densidad de 0.10 a 0.15. Tiene una buena capacidad de aislamiento térmico y acústico. Se suele usar con la dirección de las fibras hacia afuera del plano, como se muestra en la Figura 17. Presenta buena resistencia a compresión y a fatiga<sup>88</sup>. Es muy usado en la industria naval. Tiene la ventaja de ser de bajo costo y de fácil consecución en el medio.

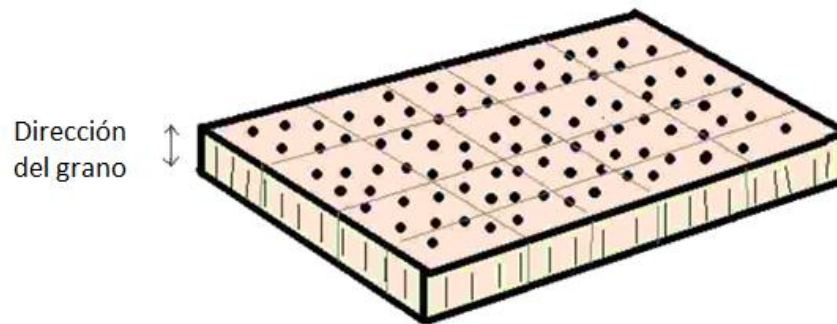
El balsa presenta daños a presiones reflejadas más bajas que la de los otros materiales presentados. El principal modo de falla es a través de una fractura por el centro del bloque,

<sup>87</sup>HongZan. *HoneycombMaterials*. Dirección URL: <http://www.aluminum-Honeycomb-panel.com/aluminium-Honeycomb-core.html>. Consultada: 9/6/2013.

<sup>88</sup> Pro Balsa. DIAB. Dirección URL: [http://www.nuplexcomposites.com/australia/files/images/stories/pdfs/products/cores/PB\\_SB.pdf](http://www.nuplexcomposites.com/australia/files/images/stories/pdfs/products/cores/PB_SB.pdf). Consultada: 5/3/2013. Última actualización: 9/12/2011.

en dirección transversal a la carga. A medida que aumenta la fuerza de la carga, múltiples grietas aparecen cerca al centro del bloque de balsa.

El balsa presenta un módulo de Young de 5.3 GPa, para cuando se hace compresión paralela a las fibras. Y es de  $1.7 \times 10^{-4}$  GPa para compresión perpendicular a las fibras.<sup>89</sup>



**Figura 17.** Lámina de balsa y la dirección de los granos<sup>90</sup>.

### 3.2. Configuraciones de materiales propuestas

A partir de los materiales seleccionados para las diferentes capas de la configuración del material propuesto, se realizaron nueve arreglos, combinando los materiales mencionados anteriormente, con el fin de poder realizar comparaciones entre los resultados de muestras similares y así concluir acerca del comportamiento de cada una de las capas. Se fabricó una muestra de cada una de las configuraciones, esto debido a que no se conocía la disponibilidad de carga explosiva por parte de las fuerzas militares, y también debido al alto costo de los materiales utilizados.

---

<sup>89</sup> Eco Balsa. *Ficha técnica de la madera balsa.* Dirección URL: [http://www.ecobalsa.com/descargar/FICHA\\_TECNICA\\_DE\\_LA\\_MADERA\\_BALSA.pdf](http://www.ecobalsa.com/descargar/FICHA_TECNICA_DE_LA_MADERA_BALSA.pdf). Consultada: 9/6/2013.

<sup>90</sup> Pro Balsa. Op. Cit.

Las nueve configuraciones seleccionadas se muestran en las Figuras 18 – 20. La selección de estas configuraciones, permite realizar una comparación entre ellas para poder obtener conclusiones del comportamiento de cada una de las muestras. Es así, que por ejemplo, comparando las muestras presentadas en la Figura 18 podemos diferenciar el comportamiento de los diferentes materiales utilizados para las caras. De igual manera, se puede hacer una comparación entre los materiales utilizados en las capas intermedias y entre los materiales utilizados en los núcleos.

Como se puede observar, para las pruebas se descartó la espuma de aluminio debido a la dificultad de adquirir muestras de este material. Con respecto a la espuma de PVC, solo se logró adquirir espumas de PVC de distintas densidades, una de mayor densidad de lo que se pretendía usar, y la otra menor. Además el panel de abeja de aluminio que se logró conseguir, no es un panel de abeja de tipo aeronáutico sino de uso arquitectónico y presenta un calibre bastante bajo. Por último, se fabricó una estructura tipo panel de abeja con tubería de aluminio con características semejantes al panel de abeja arquitectónico, pero con un calibre mayor.



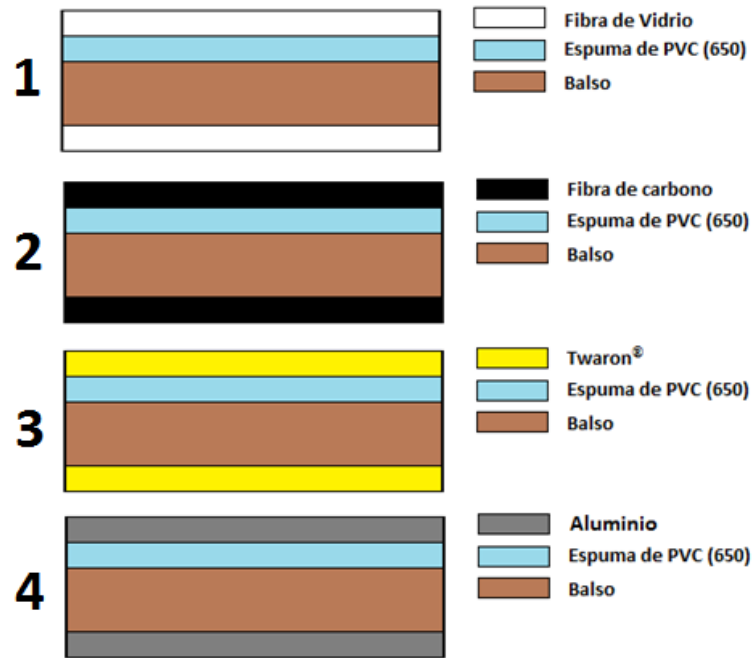


Figura 18. Diseño del autor. Muestras usadas para la selección de las caras.

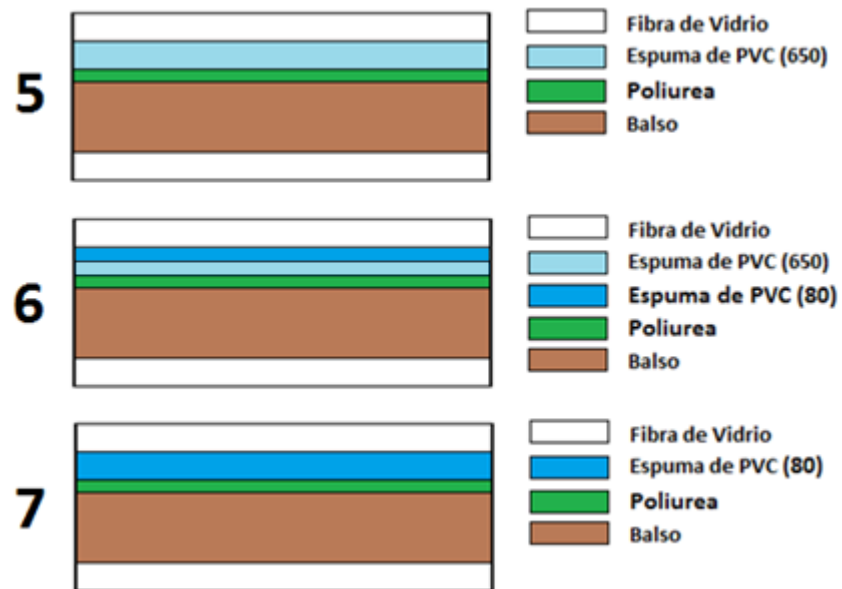


Figura 19. Diseño del autor. Muestras usadas para la selección de la sección intermedia.

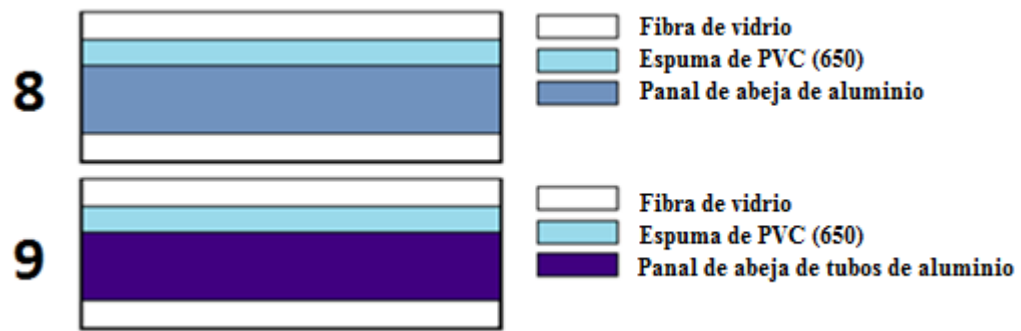


Figura 20. Diseño del autor. Muestras usadas para la selección de los núcleos.

### 3.2.1. Fabricación de las muestras

Para las **caras** de fibras sintéticas se usó resina epóxica, y se fabricaron por método de laminado por bolsa de vacío. Para lograr el espesor deseado de alrededor de 3.5 cm, en las caras de fibra de vidrio (Figura 21a), se usaron 10 capas, mientras que para las caras de fibra de carbono (Figura 21b) se usaron 12 capas y para las caras de Twaron® (Figura 21c) se usaron 5 capas.

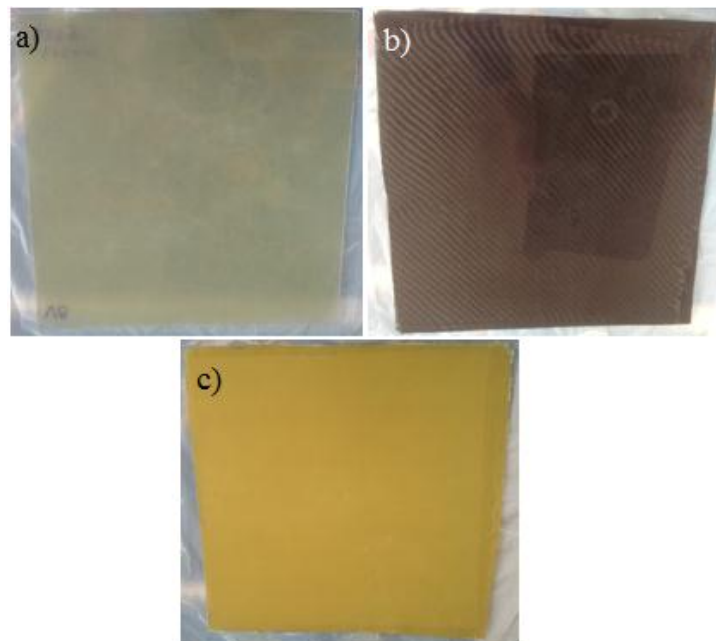


Figura 21. Fotografía del autor. Placa de a) fibra de vidrio. b) fibra de carbono. c) Twaron®.

Para las **capas intermedias** se usó poliurea de un espesor de alrededor de 2 mm, esto debido a que a los 2 mm de espesor ya la poliurea transfiere propiedades al material<sup>91</sup>, y tomando el mínimo espesor, se disminuye el peso y el espesor total de la muestra. La poliurea se aplicó mediante spray a presión.

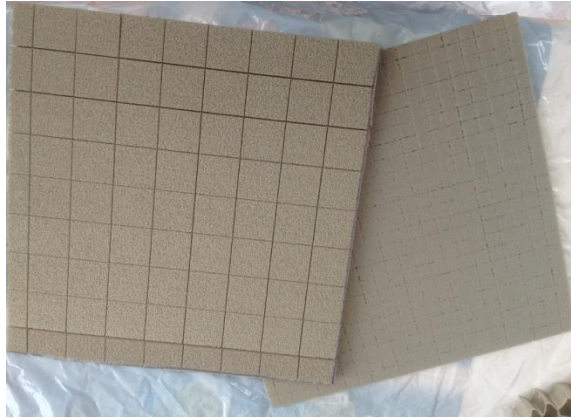
Se usó espuma de PVC (densidad  $\sim 650 \text{ gr/cm}^3$ ) de 3 mm de espesor, espuma de PVC (densidad  $\sim 650 \text{ gr/cm}^3$ ) de 9 mm de espesor (Figura 22), espuma de PVC (densidad  $\sim 80 \text{ gr/cm}^3$ ) de 3 mm de espesor y espuma de PVC (densidad  $\sim 80 \text{ gr/cm}^3$ ) de 10 mm de espesor (Figura 23). Estas son las especificaciones comerciales del producto, las cuales fueron combinadas de tal manera que ofrecieran espesores similares entre ellas.



**Figura 22. Fotografía del autor.** Placas de PVC ( $650 \text{ g/cm}^3$ ) de 3 y 9mm de espesor.

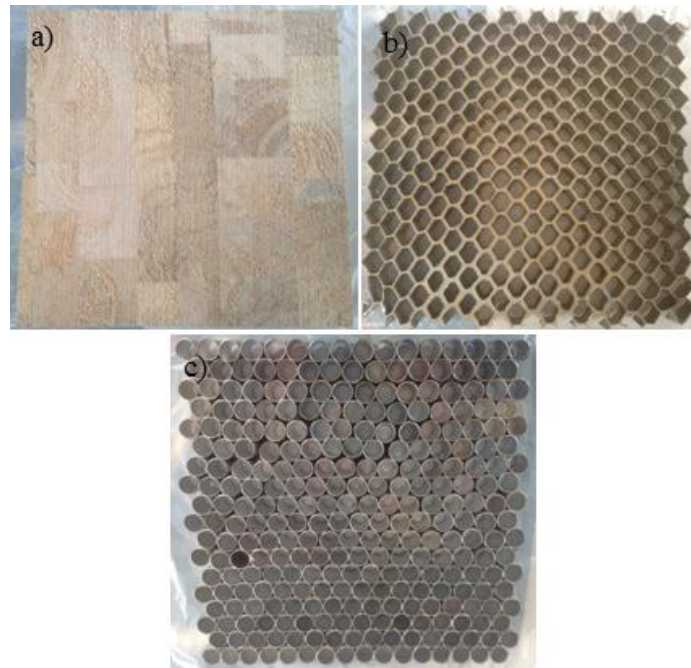
---

<sup>91</sup> Según asesoría personal del Ing. Jairo Aristizábal de Poliurea Colombia.



**Figura 23. Fotografía del autor.** Placas de PVC ( $80 \text{ g/cm}^3$ ) de 3 y 10 mm de espesor.

Para los **núcleos** se usaron placas de balsa de 30 mm de espesor (Figura 24a), una placa de estructura de panal de abeja de aluminio de 30 mm de espesor con calibre de 0.2 mm y tamaño de celda 16 mm (Figura 24b), y una placa estilo panal de abejas construida con tubos de aluminio adheridos entre sí por silicona. Siendo esta placa de 30 mm de espesor, 0.7 mm de calibre y con diámetro 15 mm (Figura 24c).



**Figura 24. Fotografía del autor.** Placas de a) balsa. b) estructura de panal de abeja de aluminio. c) panal de abeja de tubos de aluminio.

En la Tabla 2, se muestran los espesores y pesos de cada uno de los componentes de las muestras. Cabe especificar que dado que las placas de PVC, aluminio, poliurea y balsa provienen del mismo lote y tienen las mismas dimensiones, se asumió que sus características eran las mismas, es decir, solo se toma en cuenta un valor de peso y espesor para estos materiales.

Teniendo cada uno de estos elementos, se procedió a pegarlos para formar las muestras indicadas en el ítem anterior. Para esto, se usó una capa de resina epóxica entre cada una de las capas y se prensaron.

En la Tabla 3 se muestra el costo y peso aproximado de cada una de las muestras.

<b>Material</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Peso (gr)</b>
<b>Balso</b>	30	288
<b>PVC (650)</b>	9	294
<b>PVC (650)</b>	3	115
<b>PVC (80)</b>	10	53
<b>PVC (80)</b>	3	24
<b>Panal de abeja de aluminio</b>	30	126
<b>Panal de abeja de tubos</b>	30	855
<b>Aluminio 1</b>	1	137
<b>Vidrio 1</b>	3.8	377
<b>Vidrio 2</b>	3.4	342
<b>Vidrio 3</b>	3.5	356
<b>Vidrio 4</b>	3.4	369
<b>Vidrio 5</b>	3.5	384
<b>Vidrio 6</b>	3.6	378
<b>Vidrio 7</b>	3.8	389
<b>Vidrio 8</b>	3.4	337
<b>Vidrio 9</b>	3.4	357
<b>Vidrio 10</b>	3.5	361
<b>Vidrio 11</b>	3.3	340
<b>Vidrio 12</b>	3.3	366
<b>Twaron® 1</b>	3.7	278
<b>Twaron® 2</b>	3.8	298
<b>Carbono 1</b>	3.6	227
<b>Carbono 2</b>	3.5	313
<b>Poliurea</b>	2	135

**Tabla 2. Diseño del autor.** Lista de capas con sus características.

<b>Número de la muestra</b>	<b>Precio</b>	<b>Peso (gr)</b>
<b>1</b>	48.000	1.336
<b>2</b>	116.000	1.122
<b>3</b>	80.000	1.158
<b>4</b>	30.000	856
<b>5</b>	58.000	1.471
<b>6</b>	65.500	1.316
<b>7</b>	75.000	1.230
<b>8</b>	50.500	1.174
<b>9</b>	57.500	1.903

**Tabla 3. Diseño del autor.** Precios y pesos aproximados de las muestras.

Se observó que el valor que influye más en el precio de las muestras es el cambio de fibra de vidrio por otro material para las caras.

## 4. PRUEBAS DE CAMPO

Habiendo seleccionado y fabricado los materiales a probar se procede con la definición de las pruebas de campo. Las pruebas de campo fueron realizadas con la colaboración del Ejército Colombiano. En sus instalaciones se llevaron a cabo las pruebas explosivas con la asesoría y la colaboración de un experto en manejo de explosivos.

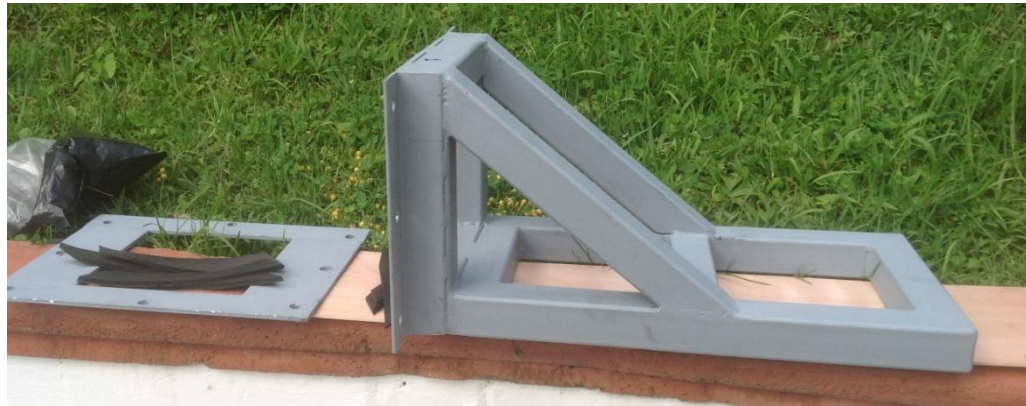
### 4.1. Bancos de prueba

Como los materiales a probar deben someterse al impacto de la fuerza explosiva, se construyeron dos bancos de pruebas<sup>92</sup> en acero estructural de calibre de 5mm, con las dimensiones adecuadas para hacer posible la colocación de las muestras, de manera que éstas reciban de forma directa, el impacto explosivo, requisito para una adecuada experimentación. Sobre la parte posterior del banco de pruebas se adecuó un espacio para ubicar un molde de arcilla de forma cuadrada de 15 X 15 cm, con un espesor de 6 cm, soportado por una lámina de madera de trípex cuadrada de 20 X 20 cm que se ajusta al banco de prueba, dejando una cámara de aire para permitir el reacomodo de la arcilla al momento de ejecutar la prueba. El soporte de trípex se ajustó al banco de pruebas por medio de dos platinas de aluminio atornilladas. Para efectos de la conservación de la humedad de la arcilla, esta fue cubierta con una película de polietileno lineal de baja densidad. Con la explosión era de esperarse que el molde de arcilla adquiriera la forma que la muestra asume después del impacto. De esta manera, para el análisis se dispondría tanto de la muestra deformada por el impacto, como de su imagen moldeada en la arcilla.

---

<sup>92</sup> Planos de los bancos de pruebas en anexos.





**Figura 25. Foto del autor. Banco de pruebas.**

## **4.2. Configuraciones de la prueba de campo**

Los bancos de pruebas se colocaron sobre una línea de 180 grados (o de frente) al explosivo, a una distancia de 1 metro del explosivo, como se muestra en la Figura 26. Según la bibliografía referenciada<sup>9394</sup> para este tipo de pruebas se pueden utilizar unos 400 gramos de explosivo con la muestra ubicada a 1 metro de distancia. En otros casos las muestras se acercan y se puede disminuir la cantidad de explosivo utilizado<sup>9596</sup>.



**Figura 26. Fotografía del autor. Montaje experimental de las pruebas.**

<sup>93</sup> SRIRAM et. al. Op. Cit. p. 4026.

<sup>94</sup> THEOBALD et. al. Op. Cit. p. 2468.

<sup>95</sup> ZHU et. al. Op. Cit. p. 526.

<sup>96</sup> LANGDON et. al. Op. Cit. p. 106.

Como material explosivo se utilizó Pentolita militar (Figura 27), en cantidad de 500 gramos para cada explosión, pues el ejército maneja explosivos de 500 gr o de 1 kg, y la primera es la que mejor se adecuaba a los requerimientos de las pruebas diseñadas.



**Figura 27. Fotos del autor. Material explosivo, pentolita.**

Debido a que se tenían dos bancos de pruebas, éstas se realizaron según el orden presentado en la Tabla 4.

Número de Prueba	Número de banco	Número de muestra
1	1	1
	2	3
2	1	4
	2	2
3	1	5
	2	6
4	1	7
	2	8
5	2	9

**Tabla 4.** Orden de realización de las pruebas de campo.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 5.1. Resultados

#### 5.1.1. Evaluación de las muestras

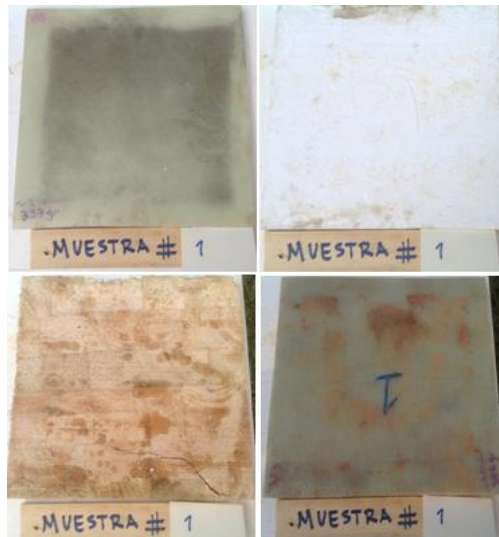
Los siguientes son los resultados de la evaluación de las muestras tras las pruebas de campo. Las imágenes de cada capa de las muestras tras realizarse las pruebas de campo, se presentan en las Figuras 28 - 36.

**Muestra No. 1.** Desplazamiento del banco de pruebas: 121 centímetros.

Composición: Caras frontal y posterior de fibra de vidrio de alrededor de 3.5 mm de espesor cada una, capa intermedia de PVC (650) de 9 mm de espesor, núcleo de balsa de 30 mm de espesor.

Aspecto de la muestra: La capa frontal presenta deflagración o quemadura por acción del fuego proveniente del explosivo. Igualmente presenta pequeños puntos de rasgado. El núcleo de PVC (650) presenta agrietamiento superficial y pequeñas líneas de fractura. Desprendimiento de la unión entre la espuma de PVC (650) y la capa de balsa.

Fractura completa en la parte inferior de la capa de balsa, casi de lado a lado, sin desprendimiento de partes. Otra fractura menor, desde el punto inferior hasta el superior. Desprendimiento incompleto de la capa de balsa con la cara posterior. Esta última no presenta mayor novedad. Adherencia de trozos de arcilla.

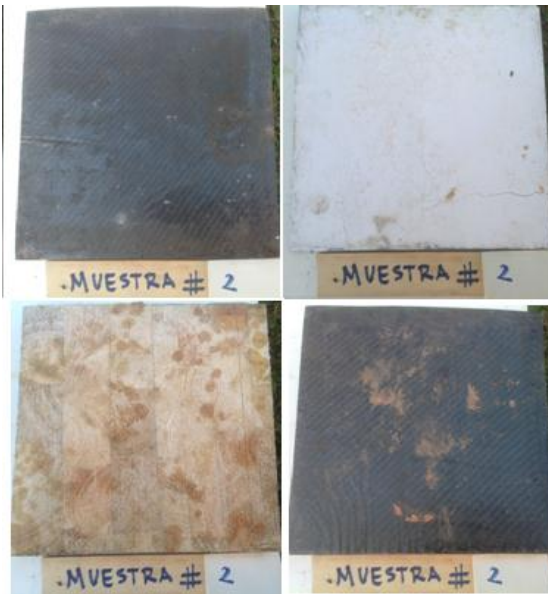


**Figura 28. Fotografía del autor.** Muestra No. 1, diferentes capas.

**Muestra No. 2.** Desplazamiento del banco de pruebas: 80 centímetros.

Composición: Caras frontal y posterior de fibra de carbono de alrededor de 3.5 mm de espesor cada una, capa intermedia de PVC (650) de 9 mm de espesor, núcleo de balsa de 30 mm de espesor.

Aspecto de la muestra: Presenta deflagración, pero no presenta mayores daños. El PVC presenta fractura lateral de unos  $\frac{3}{4}$  del ancho de la placa, sin desprendimiento entre la cara frontal y la espuma de PVC (650). Fisuras superficiales. Desprendimiento de la unión entre espuma de PVC y balsa.



**Figura 29. Fotografía del autor.** Muestra No. 2, diferentes capas.

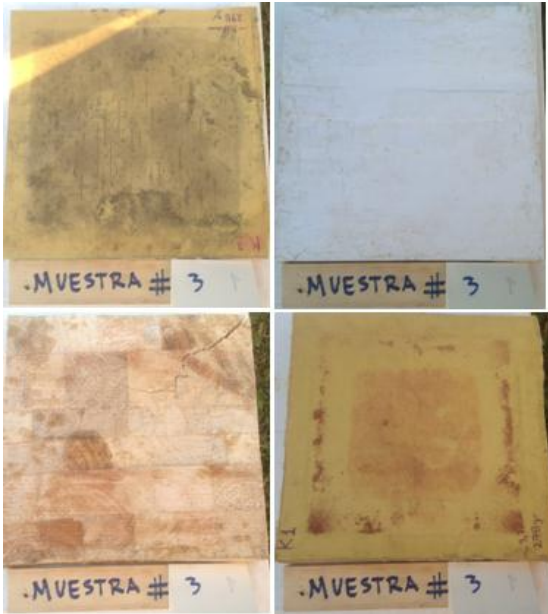
La capa de balsa no presenta daños observables, solo fisuras muy pequeñas que no superan los 4 centímetros de largo. Desprendimiento parcial hacia la cara posterior. En la cara posterior se observa adherencia de arcilla del molde que se destruyó por completo.

**Muestra No. 3.** Desplazamiento del banco de 112 centímetros.

Composición: Caras frontal y posterior de aramidaTwaron® de alrededor de 3.5 mm de espesor cada una, capa intermedia de PVC (650) de 9 mm de espesor, núcleo de balsa de 30 mm de espesor.

Aspecto de la muestra: La cara frontal presenta un comportamiento similar a la cara frontal de la muestra 1. Grietas superficiales en la espuma de PVC (650). Desprendimiento de la unión PVC-balsa.

La capa de balsa presenta fractura desde el ángulo superior izquierdo, ingresando hacia el centro de la placa. 5 agrietamientos que no logran traspasar la placa. No presenta aplastamiento.



**Figura 30. Fotografía del autor.** Muestra No. 3, diferentes capas.

**Muestra No. 4.** Desplazamiento del banco: 153 centímetros.

Composición: Caras frontal y posterior de aluminio de 1 mm de espesor cada una, capa intermedia de PVC (650) de 9 mm de espesor, núcleo de balsa de 30 mm de espesor.

Aspecto de la muestra: Presenta deflagración en la cara frontal. Hundimiento de forma cóncava bastante pronunciado con profundidades entre 1 y 2 centímetros. Impactos profundos y medianamente profundos en forma de cráter con diámetros entre 1 y 4 milímetros, en número superior a 12. La espuma de PVC (650) asume la concavidad por el empuje de la placa de aluminio y presenta fracturas profundas, formando una especie de cuadrado centrado de unos 15 por 15 centímetros. Presenta fracturas en los ángulos

derechos del cuadrado, que van del ángulo inferior derecho del cuadrado, hasta casi el ángulo inferior derecho de la placa. Otra fractura va del ángulo superior derecho, hasta la mitad de la distancia hasta el ángulo superior de la placa. Presenta fisuras múltiples en el centro y en la parte inferior de la placa.

El balsa presenta desprendimiento total de la unión con la espuma de PVC (650). Presenta fracturas pronunciadas que no pasan al otro lado de la lámina, que se encuentran en la parte frontal y posterior. Presenta concavidad en el centro, pero de menor profundidad a las observadas tanto en las placas de aluminio como en la espuma de PVC (650). La cara posterior de la lámina de balsa asume deformación convexa equivalente a la concavidad anterior.

Desprendimiento de la unión entre el balsa y la lámina posterior de aluminio. Esta última lámina presenta deformación en forma cóncava, más pronunciada que en las otras placas.



**Figura 31. Fotografía del autor.** Muestra No. 4, diferentes capas.

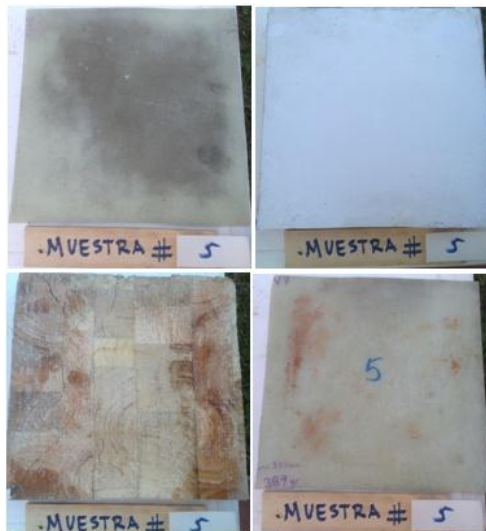


**Muestra No. 5.** Desplazamiento del banco: 94 centímetros.

Composición: Caras frontal y posterior de fibra de vidrio de alrededor de 3.5 mm de espesor cada una, capa intermedia de PVC (650) de 9 mm de espesor con aplicación de poliúrea de 2 mm de espesor, núcleo de balsa de 30 mm de espesor.

Aspecto de la muestra: Presenta deflagración y pequeños cráteres (unos 8), no muy bien caracterizados, en la cara frontal. Desprendimiento de unión fibra de vidrio-espuma de PVC (650). La espuma presenta pequeñas fisuras.

Desprendimiento de la unión placa de balsa-fibra de vidrio. El balsa presenta fracturas pronunciadas y desprendimiento de masa en una de las esquinas. La cara posterior presenta adherencias de arcilla del molde el cual quedó completamente destruido.



**Figura 32. Fotografía del autor.** Muestra No. 5, diferentes capas.

**Muestra No. 6.** Desplazamiento del banco: 145 centímetros.

Composición: Caras frontal y posterior de fibra de vidrio de alrededor de 3.5 mm de espesor cada una, capa intermedia de PVC(80) de 3 mm de espesor, PVC (650) de 3 mm de espesor y aplicación de poliurea de 2 mm de espesor, núcleo de balsa de 30 mm de espesor.

Aspecto de la muestra: Delaminación hacia el lado izquierdo. Pequeños cráteres (2), deflagración. El balsa permanece adherido a la poliurea y la poliurea al PVC. El balsa presenta fisuras en diversas partes, sin aplastamiento.

Desprendimiento de la cara posterior, la cual presenta rastros del molde de arcilla. El molde de arcilla presenta daños importantes, pero permitió su recolección.



**Figura 33. Fotografía del autor.** Muestra No. 6, diferentes capas.

**Muestra No. 7.** Desplazamiento del banco: 87 centímetros.

Composición: Caras frontal y posterior de fibra de vidrio de alrededor de 3.5 mm de espesor cada una, capa intermedia de PVC (80) de 10 mm de espesor y aplicación de poliurea de 2 mm de espesor, núcleo de balsa de 30 mm de espesor.

Aspecto de la muestra: La cara frontal presenta deflagración. Presenta un número importante (unos 24) de cráteres de diámetros entre 1 y 2 milímetros.

Desprendimiento parcial de la unión de balsa con la poliurea. El balsa presenta una fractura parcial hacia una lateral. Presenta unas 4 fisuras de más de 10 centímetros. La cara posterior presenta desprendimiento total. El molde de arcilla se conservó medianamente bien. La capa de PVC mostrada en la Figura 34 presenta daños, pero estos son debidos al despegado de la capa frontal, el cual se realizó manualmente.



**Figura 34. Fotografía del autor.** Muestra No. 7, diferentes capas.

**Muestra No. 8.** Desplazamiento del banco 146 centímetros.

Composición: Caras frontal y posterior de fibra de vidrio de alrededor de 3.5 mm de espesor cada una, capa intermedia de PVC (650) de 9 mm de espesor, núcleo de estructura tipo panal de abejas de aluminio con 30 mm de espesor.

Aspecto de la muestra: La cara frontal presenta deflagración y cráteres (20) superficiales y pequeños (1 milímetro) y unos más pronunciados (4) que llegan a diámetros hasta de 5 milímetros.

La espuma de PVC (650) presenta desprendimiento total con respecto a la cara frontal, y múltiples fracturas completas y fisuras a lo largo de toda la estructura. Presenta dos desprendimientos de masa uno en la esquina superior izquierda, forma triangular, de unos 4 por 4 por 4 centímetros y el otro en la parte inferior de unos 3 por 20 centímetros. Presenta hundimiento que corresponde con el cráter mayor de la fibra de vidrio, con un diámetro de unos 10 milímetros y una profundidad de unos 5 milímetros.

El panal de abeja de aluminio colapsó completamente y presenta pérdida de masa en zona sobrepuesta sobre la placa de PVC en el área desprendida, igualmente en forma de rectángulo de unos 3 por 20 centímetros. La capa posterior no presenta novedad aparente.



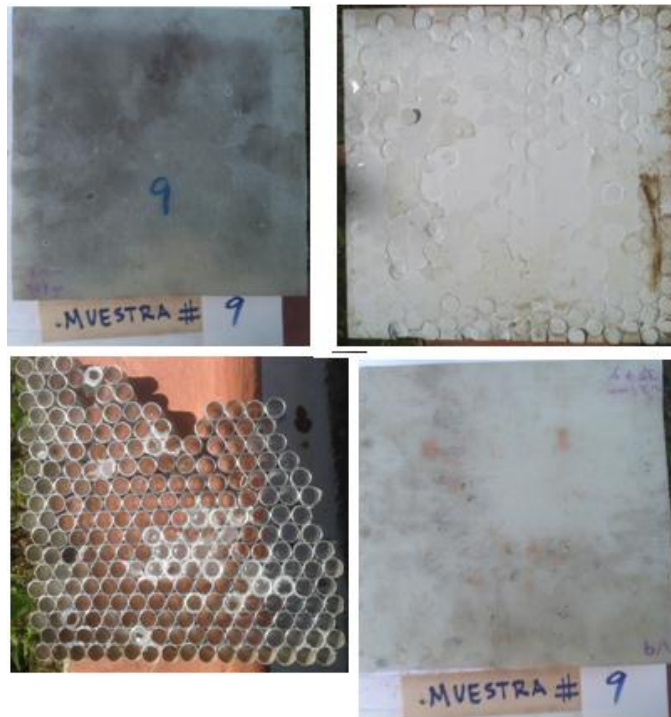
**Figura 35. Fotografía del autor.** Muestra No. 8, diferentes capas.

**Muestra No. 9.** Desplazamiento del banco en 152 centímetros.

Composición: Caras frontal y posterior de fibra de vidrio de alrededor de 3.5 mm de espesor cada una, capa intermedia de PVC (650) de 9 mm de espesor, núcleo de de 30 mm de espesor de estructura tipo panal de abejas construida con tubos de aluminio.

Aspecto de la muestra: La cara frontal presenta deflagración y aproximadamente unos 10 cráteres que van desde superficiales y pequeños (1 milímetro) hasta medianamente mayores (3 a 5 milímetros) y con profundidades de unos 2 milímetros.

La espuma de PVC (650) conservó su adherencia y presenta huellas de presión causada por los tubos de la estructura del panal de abeja. Esta estructura de tubos presenta pérdida parcial de masa en la parte inferior. La capa posterior no presenta novedad aparente.



**Figura 36. Fotografía del autor.** Muestra No. 9, diferentes capas.

Una primera comparación del comportamiento de las muestras, permite observar y clasificar, de manera inicial, las muestras que presentan mayores modificaciones estructurales, como son la muestra No. 4 compuesta de una placa frontal de lámina de aluminio, un núcleo de espuma de PVC (650) de 9 mm, además de una placa de balsa, y una cara posterior de lámina de aluminio. Las modificaciones se caracterizan por deformación pronunciada de todas sus capas, las cuales generaron concavidades en la parte frontal y fracturas pronunciadas en el núcleo, pero sin aplastamiento. Este es un efecto perjudicial, pues las fallas son debidas más a la deformación de la capa frontal, que causó los daños en las capas subsecuentes, que a efectos de disipación de energía del explosivo.

En contraste con la muestra anterior, la No. 8 cuya estructura está conformada por una cara frontal de fibra de vidrio, un núcleo de espuma de PVC (650) de 9mm, una capa de panel de abeja de aluminio y una cara posterior de fibra de vidrio, presenta una deformación de

forma plana con aplastamiento pronunciado de la estructura de panal de abejas, y múltiples fracturas en la capa de PVC. Esto es beneficioso en términos de evaluación de resultados de la muestra, ya que al producir daños importantes como los antes mencionados, implica un gasto significativo de la energía del explosivo<sup>97</sup>.

Las muestras conformadas con una capa de balsa en su núcleo (muestras No 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7), se caracterizaron por presentar fracturas y fisuras, y poco efecto de aplastamiento. Esto refleja una menor capacidad de absorción de energía, dado que se requiere menor energía para que el balsa falle por corte que por compresión<sup>98</sup>.

El desprendimiento de capas es una característica bastante generalizada para todas las muestras. En este sentido el comportamiento de las muestras fue el siguiente: con desprendimiento de la cara frontal del núcleo se encuentran las muestras No. 1, 4, 5, 7, 8). Con desprendimiento de las capas del núcleo encontramos las muestras No. 1, 2, 4, 5). Con desprendimiento entre el núcleo y la cara posterior aparecen las muestras No. 2, 4, 5, 6, 7). El desprendimiento entre capas de las muestras pudo darse debido a una adhesión insuficiente o a la acción misma del explosivo.

Otra variable importante para el análisis es el desplazamiento del banco de pruebas con respecto al lugar ocupado por el explosivo. Teniendo en cuenta que la distancia inicial, como el peso del banco y el área de la placa son constantes, la variable a observar es la composición de las muestras, las cuales, igualmente presentan un área constante. Es de esperarse que el desplazamiento del banco sea directamente proporcional a la resistencia ofrecida por la muestra. En otros términos, las muestras con mayor capacidad de absorción de energía deberían teóricamente, presentar menor desplazamiento del banco, causado por

---

<sup>97</sup>GURUPRASAD S. y MUKHERJEE A. Layered sacrificial claddings under blast loading.Part I. analyticalstudies. p. 972.

<sup>98</sup> BESEDNJAK, Alejandro. Materiales Compuestos. p. 55.

una menor resistencia al impacto ofrecida por la muestra. La tabla siguiente relaciona el desplazamiento medido tras cada una de las pruebas.

<b>Muestra</b>	<b>Desplazamiento del banco de pruebas (Centímetros)</b>
<b>No. 1</b>	121
<b>No. 2</b>	80
<b>No. 3</b>	112
<b>No. 4</b>	153
<b>No. 5</b>	94
<b>No. 6</b>	145
<b>No. 7</b>	87
<b>No. 8</b>	146
<b>No. 9</b>	152

**Tabla 5. Diseño de autor.** Desplazamiento de bancos de pruebas según cada muestra.

De la tabla anterior se puede deducir que los bancos se desplazaron más con las muestras No. 4, 9, 8, 6, en ese orden y las que menos se desplazaron fueron las muestras 5, 7 y 2, en ese orden. Teniendo en cuenta que "*Un explosivo gasta una parte determinada de energía al empujar el aire circundante*"<sup>99</sup> y que por lo tanto el viento puede concentrar la onda explosiva en la dirección del mismo, y al no tener control sobre esta variable, no es posible sacar conclusiones en este sentido.

### **5.1.2. Evaluación de los moldes**

El impacto de las explosiones destruyó completamente los moldes de arcilla correspondientes a las muestras No. 1, 2, 4 y 8. Por tanto, se conservaron los moldes No. 3, 5, 6, 7 y 9. Estos moldes se recogieron de manera cuidadosa buscando que no alteraran su forma, se empacaron separadamente y se llevaron para los laboratorios de la Universidad para su respectivo análisis.

---

<sup>99</sup> EXPLOSIVOS. Dirección URL: <http://pentolita.blogspot.com/>. Consultada: 16/06/2013. Última actualización: 12/11/2008.



Un posible error en el sistema de acople del molde de arcilla al banco de pruebas fue la más posible causa de pérdida de los moldes que se destruyeron, dado que en los 4 casos de moldes destruidos los acoples de platinas de aluminio con amarre de tornillos, se desprendieron completamente por efectos de la explosión, dispersando el material. No obstante, para el caso de los moldes que no se desprendieron, o sea los correspondientes a las muestras 3, 5, 6, 7, 9, se encontró que estos se destruyeron, adoptando una forma cóncava irregular, semejante en todos los casos (Ver: Figura 37), lo cual no permite establecer inferencias, ni hacer comparaciones de acuerdo con el comportamiento de las muestras correspondientes.



**Figura 37. Fotografía del autor.** Estado de un molde.

## 5.2. Análisis

El proceso de análisis de resultados se realizó, tanto de manera visual como por selección de muestras, a la manera de autores como Langdon<sup>100</sup> buscando identificar modos de falla en los materiales y en las estructuras. Para realizar este proceso de medición de resultados, se separaron las capas de cada una de las muestras y se procedió a su observación. En el laboratorio, se cortaron algunas de las muestras que visualmente presentaron signos de

---

<sup>100</sup> LANGDON et. al. Op. Cit. p. 109.

daños y que debían ser analizados a profundidad. Estas muestras se prepararon para ser observadas en el microscopio ZeissDiscovery V8 Stereo de la Universidad EAFIT.

Siguiendo el modelo de análisis desarrollado por Langdon<sup>101</sup>, se describe a continuación el comportamiento de los materiales empleados tanto para las caras como para los núcleos, observando fallas en la totalidad de la muestra, fractura de fibras, ruptura de la capa frontal, desprendimiento de las caras, deformación de las caras y compresión de los núcleos.

### **5.2.1. Comportamiento de las capas del material propuesto**

#### ***Materiales de la cara frontal y posterior***

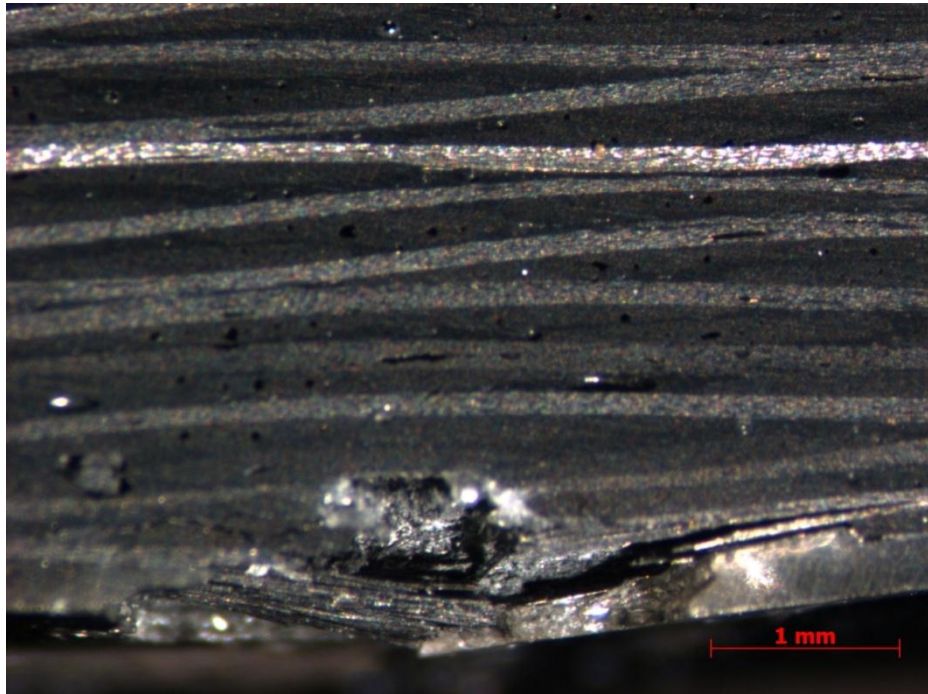
- *Fibra de carbono*

La fibra de carbono se ligó con resina epóxica, a diferencia de Tekalur<sup>102</sup> que encontró cómo esta fibra unida con vinyl-ester, presenta delaminación y rompimiento de fibras. En este caso no se encontraron modificaciones en su estructura. A nivel microscópico se pueden observar las capas de fibra de carbono, éstas se ven separadas por unas fibras de color más claro. Además se observaron algunos cráteres como el que se presenta en la Figura 38.

---

<sup>101</sup>IBID. p. 111.

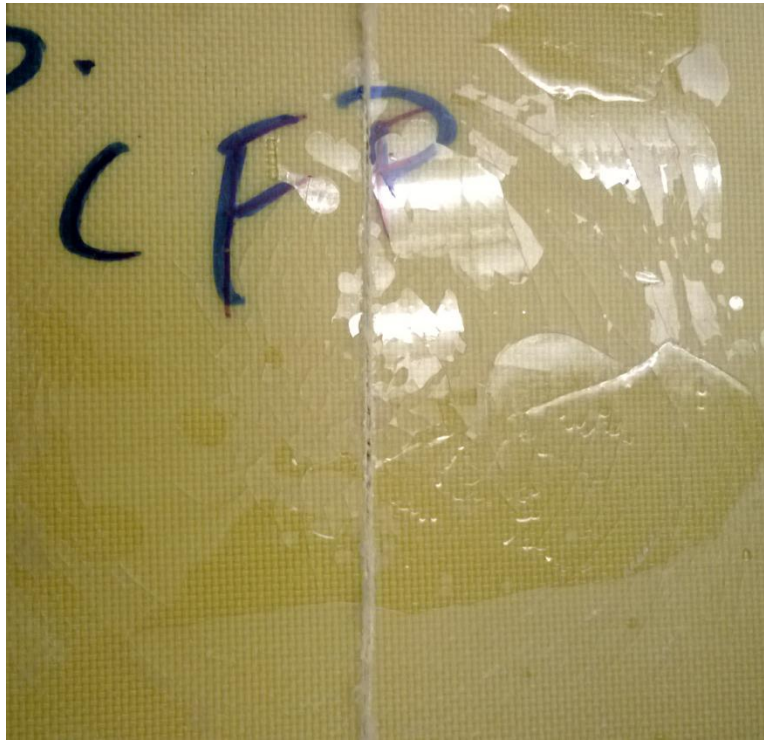
<sup>102</sup>TEKALUR.et. al. Op. Cit. p. 2.



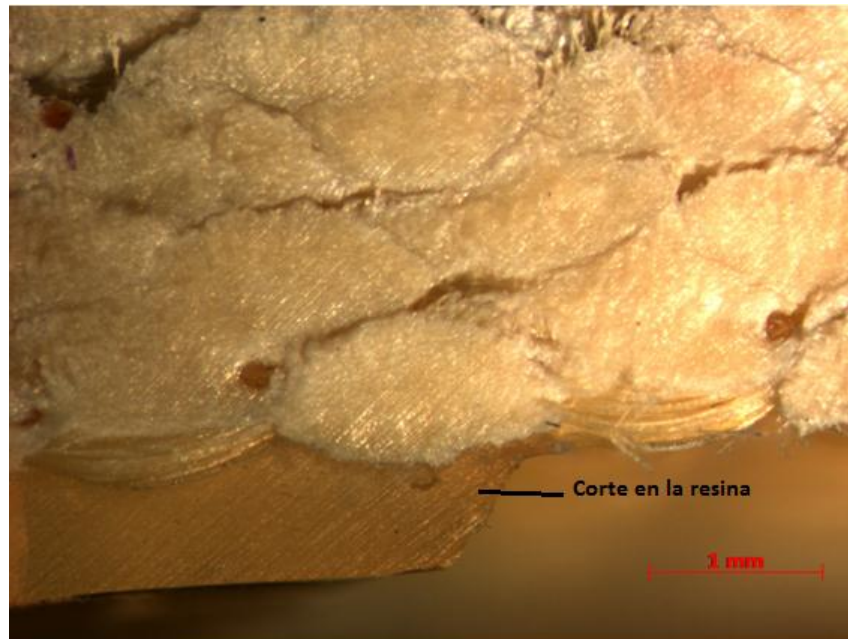
**Figura 38. Fotografía del autor.** Cráter en la cara frontal de fibra de carbono.

- *Twaron*<sup>®</sup>

La cara frontal de *Twaron*<sup>®</sup> presentó rotura de la matriz en forma circular, como se muestra en la Figura 39, mientras que la cara posterior presentó rotura de matriz en el centro, pero de manera no uniforme. A nivel microscópico, se encontró que no hubo daño presente en las fibras, y que la ruptura observada solo se dio en la capa de resina que se encontraba sobre las fibras (Figura 40).



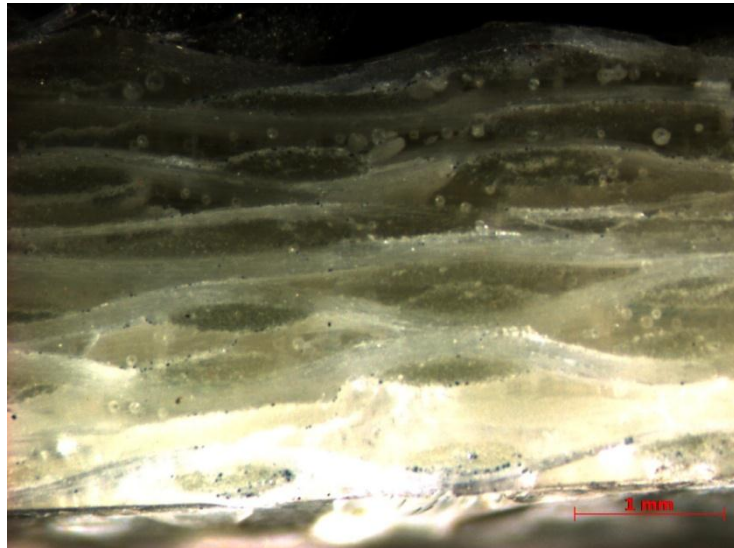
**Figura 39. Fotografía del autor.** Rotura de matriz en forma de círculos en la cara frontal de Twaron®.



**Figura 40. Fotografía del autor.** Daño en la resina sobre la placa de Twaron®.

- *Fibra de vidrio*

La cara frontal de fibra de vidrio presente en las muestras No. 1, 5, 6, 7, 8, 9, presenta delaminación en la muestra No. 6 y formación de cráteres debidos a impactos de partículas propulsadas por el explosivo. Estos cráteres van de 1 milímetro hasta los 5 milímetros de diámetro en todas las placas en que se presenta este comportamiento. La profundidad de los mismos va desde superficial (1mm) hasta unos 5 milímetros en la placa No. 8. Igualmente, la fibra de vidrio en su cara frontal presenta huellas superficiales dejadas por el impacto del explosivo, sin deformación o alteración de la superficie. Se observó a nivel microscópico las fibras más claras, que son signos de delaminación en las muestras (Figura 41). Estas delaminaciones se encontraron principalmente en las caras posteriores en la parte externa de las láminas. También se pueden ver grandes cráteres en algunas de las muestras (Figura 42).



**Figura 41. Fotografía del autor.** Delaminación en una muestra de fibra de vidrio.



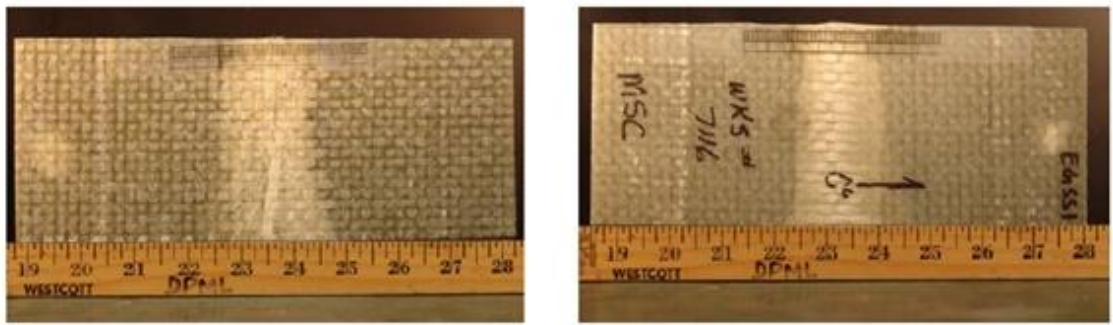
**Figura 42. Fotografía del autor.** Ruptura tipo cráter en una muestra de fibra de vidrio.

Las caras posteriores de fibra de vidrio no presentaron, en ninguna de las muestras, novedad aparente a excepción del desprendimiento parcial en las muestras No.1, y desprendimiento total en las muestras No. 5, 6, 7.

En observación visual, la fibra de vidrio presenta un comportamiento bastante semejante a la fibra de carbono como observa Tekalur<sup>103</sup> en sus investigaciones. No obstante, este autor encuentra una actuación ligeramente mejor en el caso de la fibra de vidrio, atribuible a una acumulación progresiva de fallas en esta fibra, mientras que considera que las fallas en la fibra de carbono se presentan de manera súbita.

---

<sup>103</sup>IBID. p. 4.



Cara frontal

Cara posterior

Figura 43. Daños en las caras de fibra de vidrio<sup>104</sup>.

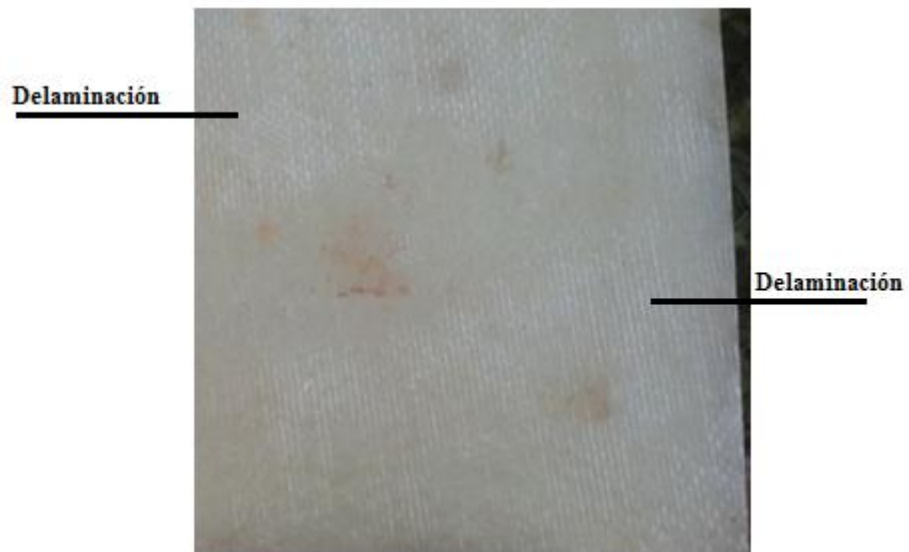


Figura 44. Fotografía del autor. Ampliación (4x) de imagen de una muestra de fibra de vidrio. Presenta delaminación leve.

---

<sup>104</sup>IBID. p. 5.

## ***Materiales de las capas intermedias***

- *Poliurea*

En las tres muestras en que se empleó poliurea (muestras No. 5, 6, 7), todo indica, como lo observaron otros investigadores como Yang et. al<sup>105</sup>, que la capa de poliurea crea un efecto amortiguador, protegiendo el balsa, pues en estos casos si bien se presentan fracturas y fisuras en el balsa, su importancia es menor. Es decir, la poliurea limita los daños o atrasa la propagación de la falla de corte, como ya lo observó el investigador anterior.



**Figura 45. Fotografía del autor.** Placa de PVC recubierta con poliurea.

En general las placas de espuma de PVC recubiertas con poliurea muestran un estado de conservación importante mejor que el de láminas semejantes sin recubrimiento de poliurea.

Según Gardner et. al<sup>106</sup>, las grietas del núcleo se propagan a través del núcleo hasta la poliurea, lo que puede indicar que esta última frena el proceso de delaminación, pues agrega dicho autor que cuando la poliurea está atrás de la placa de PVC, previene esfuerzos cortantes.

---

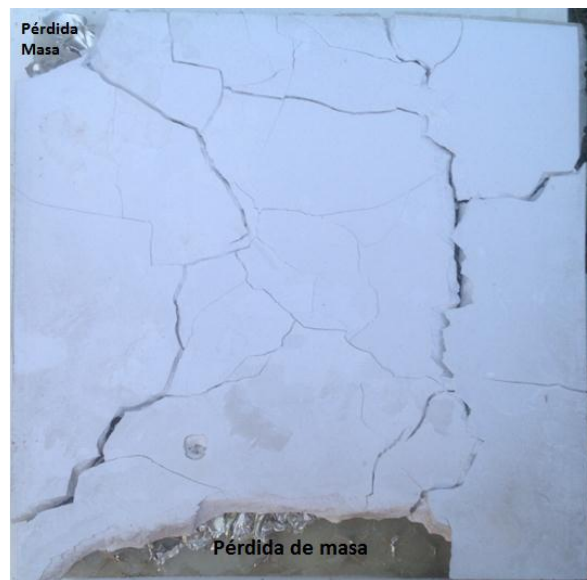
<sup>105</sup> YANG et. al. Op. Cit. p. 2791.

<sup>106</sup> GARDNER et. al. Op. Cit. p. 124.



- *Espuma de PVC*

En esta investigación se emplearon 4 referencias de espuma de PVC (H650 de espesores 9 y 3 mm, y H80 de 10 y 3 mm). Como lo denomina Yang et. al<sup>107</sup>, esta espuma presenta un “mecanismo de sacrificio”, pues absorbe energía mediante deformación y aplastamiento. Las muestras No.1, 2, 3, 4, 5, 8 y 9, incluyeron espuma de PVC (650) de 9 mm. La muestra No. 6 incluyó espumas (650) de 3 mm y espuma (H80) de 3 mm. La muestra No. 7 incluyó la espuma (H80) de 10 mm.



**Figura 46. Ilustración del autor.** Espuma de PVC después de la explosión.

En vez de fallar en el núcleo, el panel ensanduchado empleando espuma de PVC, puede fallar en la interfaz entre el núcleo y las caras<sup>108</sup>. Esto ocurrió en la mayoría de los casos donde se desprendió la unión con la espuma. Solo en el caso de la muestra No. 6 se conservó la unión balsa-PVC, pues esta unión estaba mediatizada por la capa de poliurea, de manera que la propiedad de adherencia, en este caso, es más atribuible a la poliurea que

---

<sup>107</sup> YANG et. al. Op. Cit. p. 2793.

<sup>108</sup> IBID. p. 2793.

a una propiedad de la espuma de PVC. Sin embargo, el fallo de la adhesión entre capas es menos grave, según Yang et. al, pues este se puede mejorar con otros métodos<sup>109</sup>.



**Figura 47. Fotografía del autor.** Placa de espuma de PVC recubierta con poliurea, después de la explosión.

### ***Materiales del núcleo***

- *Láminas de madera de Balso*

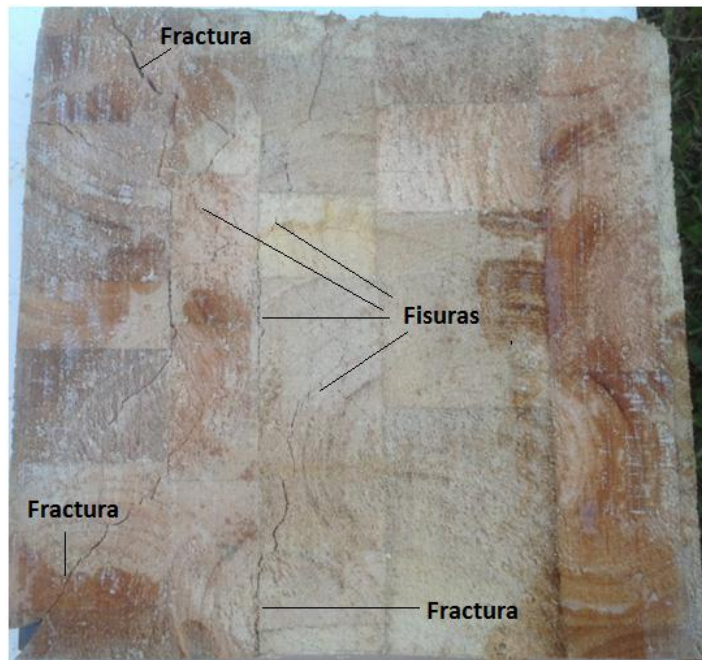
Como lo resaltan Tekalur et. al<sup>110</sup>, en las muestras de balso se observó comportamientos semejantes como son la presencia de fracturas de diversas formas y longitudes y de grietas. Las muestras que emplearon en su composición láminas de balso fueron las No. 1, 2, 3, 4, 6, 7. Es de resaltar el comportamiento de la lámina de balso de la muestra 4, que además de fracturas y fisuras presentó la misma deformación que presentó la muestra en su totalidad, es decir concavidad frontal y convexidad posterior. Igualmente se debe mencionar que ninguna de las láminas de balso presentó deformación por compresión o aplastamiento y por tanto no se puede considerar como un elemento adecuado como dissipador de la energía del impacto explosivo<sup>111</sup>.

---

<sup>109</sup>IBID. p. 2793.

<sup>110</sup>IBID. p. 5.

<sup>111</sup>BESEDNJAK.Op. Cit. p. 55.



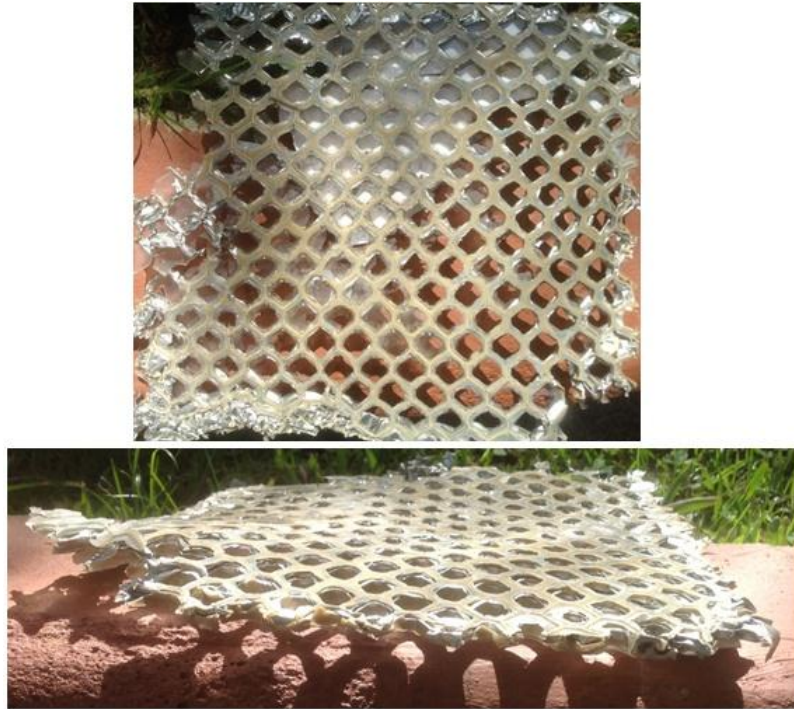
**Figura 48. Ilustración del autor.** Fracturas y fisuras presentes en el balsa.

- *Estructura de panal de abeja de aluminio*

El panal de abeja de aluminio presentó un comportamiento bastante singular, pues sufrió una compresión o aplastamiento completo. Esta lámina de panal de abeja de aluminio, presente en la muestra No. 8 pasó de los 30 milímetros de espesor inicial, a un espesor de unos 3 a 4 milímetros en el total de su superficie, lo cual demuestra su capacidad para disipar energía explosiva. Este resultado de compresión es consecuente con resultados encontrados por otros investigadores, como Theobald et. al<sup>112</sup>.

---

<sup>112</sup> THEOBALD et. al. Op. Cit. p. 2473.



**Figura 49. Fotografía del autor.** Placa de panal de abeja de aluminio comprimida tras la explosión.

En el caso del la estructura tipo panal de abeja fabricada de manera artesanal con tubos de aluminio de diámetro de 15 milímetros y un espesor de 0.7 milímetros, conformando una lámina de espesor de 30 milímetros, muestra No. 9, se observó compresión de la estructura tipo panal de abeja sobre la lámina de PVC (650) de 9mm, sin que se observara ningún tipo de fenómeno de aplastamiento.



**Figura 50. Fotografías del autor.** Presión del panal de abeja de tubos de aluminio sobre la espuma de PVC.

## 6. CONCLUSIONES

El estudio detallado del comportamiento de los explosivos fue fundamental para el desarrollo adecuado del proyecto, desde la selección de materiales, las pruebas de campo y hasta el análisis de las mismas. Dicho conocimiento permitió prever posibles comportamientos de los materiales tras una explosión, facilitando de esta manera su análisis posterior.

Se realizó un estudio de mercado de materiales para protección anti-explosiva en el mercado internacional para realizar una preselección de los materiales a usar. Luego se comparó esto con el mercado nacional para ver su disponibilidad. Debido a la poca accesibilidad de los materiales preseleccionados en el mercado nacional, se realizó una adecuación para seleccionar materiales similares que si estuvieran disponibles.

Para las muestras, se definió dividir el material en tres partes fundamentales, las caras, la capa intermedia y el núcleo. Cada parte tiene una función particular y se procuró comparar diversos materiales buscando potenciar sus propiedades.

Con respecto a las caras frontales y posteriores, no se notaron diferencias significativas entre la fibra de vidrio y el Twaron<sup>®</sup>. La fibra de vidrio que tiene un costo menor, por lo tanto, podría ser más recomendada.

En las capas intermedias, las espumas de PVC de menor densidad o combinadas entre sí, presentaron mayor capacidad de compresión. A mayor densidad, también se presentaron más fracturas, lo cual afecta el desempeño de la muestra. Sin embargo, la aplicación de

poliurea sobre las espumas de PVC disminuye notablemente la aparición de fisuras y de fracturas.

En los núcleos, se observó que el balsa presentó poca capacidad de compresión. Esta propiedad está más presente en la estructura tipo panal de abeja de aluminio. Igualmente el balsa es bastante propenso a las fracturas y a las fisuras, fenómeno menos frecuente en el panal de abeja. La estructura de panal de abeja construida de manera artesanal con tubos de aluminio, presentó resultados diferentes a los obtenidos con la muestra de panal de abeja tradicional. El mayor calibre de los tubos de aluminio, y el menor diámetro de los mismos hicieron a la estructura más resistente a la compresión, afectando la comparación entre las muestras.

Esta investigación cumple con los objetivos propuestos, relacionados con la evaluación de los efectos de las ondas explosivas en diversos materiales, y de esta manera, propone combinaciones de materiales con mejores propiedades de disipación de ondas provenientes de artefactos explosivos y en consecuencia para protección de personas y estructuras. La capacidad de respuesta a los efectos de una explosión, es decir a la sobrepresión, al efecto térmico, a la fragmentación y al efecto de concentración, se relacionó con características de peso de los compuestos y precio de las muestras, con el ánimo de seleccionar materiales que ofrezcan mayores ventajas respecto a estos valores. En este sentido hay que tener en cuenta que las muestras de menor costo fueron las No. 4, 1, 8, 9, en orden ascendente y las de menor peso fueron las muestras No. 4, 2, 3, 8, 7 y 6 de menor a mayor peso, aunque las diferencias de peso entre estas muestras no es muy significativa.

Si combinamos dicha capacidad de respuesta a los efectos de la explosión, y preferimos las muestras de menor costo y peso, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

Si bien la muestra No. 4 ofrece las mejores ventajas en términos de precio y peso, tiene el comportamiento menos adecuado respecto a la disipación de la energía proveniente del explosivo, y por tal motivo se descarta.

La muestra No. 8, con su núcleo de panal de abeja de aluminio combina propiedades en términos de asimilación de la sobrepresión, por efecto de compresión, con lo cual se puede lograr un importante efecto de disipación de la energía por transferencia de la misma. Igualmente, los componentes de esta muestra son de bajo costo y de bajo peso, y por tanto, se trata de una combinación de materiales importante para efectos de aplicación de propiedades antiexplosivas. No obstante hay que tener en cuenta que el panal de abeja de aluminio no es muy comercial y por lo general no se vende al detal.

Las muestras No. 5, 6, y 7, si bien se encuentran en un rango intermedio de precio y peso, presentan propiedades importantes en términos de capacidad de respuesta a los efectos de una explosión, en especial los relacionados con la resistencia al corte otorgados, por la presencia en su composición, de las capas de poliurea. Además, las muestras No. 6 y 7, presentaron buenas características de compresión en la capa intermedia de espuma de PVC.

Este trabajo me dio la posibilidad de fortalecer y adquirir conocimientos importantes en el campo de los materiales, pero también me permitió acercarme a unas problemáticas sociales tan graves en nuestra sociedad, como son las relacionadas con el impacto de las minas antipersonal y los riesgos y efectos de uso de artefactos explosivos.

El dolor de las víctimas clama por un compromiso fuerte de las nuevas generaciones de profesionales, en la búsqueda de la paz y en el desarrollo e implementación de conocimientos que de alguna manera alivien o prevengan el dolor de nuestros conciudadanos.

Utilizar materiales producidos en el país a bajo costo, desarrollar tecnologías propias, y diseñar creativamente formas de protección, aumentan la accesibilidad a materiales e implementos de protección, multiplicando de esta manera acciones como el desminado y la protección de personas y estructuras, y soñar así con un país libre de miedos, guerras y violencias.



## 7. RECOMENDACIONES

Si bien los bancos de pruebas mostraron un diseño resistente y adecuado al tipo de pruebas, presentaron una falla en el sistema de ajuste de los moldes de arcilla, pues en 4 de las 9 pruebas este tipo de soporte falló permitiendo la pérdida del material. No obstante en los 5 casos en los cuales se conservaron los moldes, no se alcanzó a observar diferencias significativas en la figura modelada en la arcilla, de tal manera que dichos moldes, al presentar concavidad semejante, permiten concluir que su uso no hace aporte importante en términos de observar modificaciones estructurales producto de la onda explosiva. En este sentido existen alternativas para registrar el proceso sufrido por las muestras en los instantes siguientes a la explosión, un ejemplo sería la fotografía con cámaras de altas velocidades, que toman un número de alto de cuadros por segundo, pero su limitante es su alto costo.

Para futuros trabajos de investigación en esta línea, recomiendo hacer algunos ajustes que permitan pruebas mucho más precisas que minimicen el margen de error, en especial, en lo relacionado a las posibles mediciones de energías, presiones y/o deformaciones durante las pruebas.

Igualmente, sería recomendable para pruebas posteriores, evaluar el comportamiento de unas nuevas muestras compuestas con los materiales mejor evaluados en el presente trabajo, y de obtenerse resultados favorables, podría pensarse en una etapa siguiente, en la aplicación de estas combinaciones de materiales para la fabricación de diferentes elementos de protección.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

AIGIS                      BLAST                      PROTECTION.AigisSABREShield.Dirección  
URL:<http://www.aigis.co.uk/building-blast-protection>. Fecha de consulta: 16/10/2012.

AIGIS              BLAST              PROTECTION.SUV              Kit.              Dirección              URL:  
[www.aigis.co.uk/userfiles/GB/PDFs/SUV%20Kit%20-20Vehicle%20Protection%20Datashet%20270711.pdf](http://www.aigis.co.uk/userfiles/GB/PDFs/SUV%20Kit%20-20Vehicle%20Protection%20Datashet%20270711.pdf). Fecha de consulta: 16/10/2012.

AIRE      Y      ESPACIO.      La      fibra      de      carbono.      Dirección      URL:  
<http://www.aireyespacio.com/2009/07/la-fibra-de-carbono.html>. Fecha de consulta:  
9/6/2013. Última actualización: 7/12/2011.

ALIBABA.COM. Global trade starts here. Dirección URL: [www.alibaba.com/products/526348370/PBF\\_SD01\\_EOD\\_suit\\_bomb\\_disposal.html](http://www.alibaba.com/products/526348370/PBF_SD01_EOD_suit_bomb_disposal.html). Fecha de consulta: 16/10/2012.  
Última actualización: 10/7/2013.

BESEDNJAK, Alejandro. Materiales Compuestos. Barcelona. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya. 2005. ISBN: 84-8301-820-9.

CAPALEX                      LTDA.                      Dirección                      URL:  
[http://www.capalex.co.uk/spanish/2024\\_alloy\\_sp.html](http://www.capalex.co.uk/spanish/2024_alloy_sp.html). Fecha de consulta: 5/3/2013.

COMARGO. CompositeMaterials. Dirección URL: <http://www.comargo.com/Castellano/productos/estructuras/lista-estructuras.asp>. Fecha de consulta: 9/6/2013.

COOPER, G. Protection of the lung from blast overpressure by thoracic stress wave decouplers.En: J Trauma [Online]. 40(3):S105-S110, 1996.

CULLIS, IG. Blast Waves and How They Interact With Structures. En: J R Army Med Corps.[Online] 147: 16-26, 2001.

CYMAT. SmartMetal. Dirección URL://[www.cymat.com/](http://www.cymat.com/). Fecha de consulta: 16/10/2012. Última actualización: 30/8/2012.

DEMERCHANT, Christine. Aramid Fibers, trade names Kevlar, Twaron, Nomex. Dirección URL: [http://www.christinedemerchant.com/aramid\\_characteristics.html](http://www.christinedemerchant.com/aramid_characteristics.html). Fecha de consulta: 9/6/2013.

DISCOVERY CHANNEL. Dirección URL: [www.tudiscovery.com](http://www.tudiscovery.com). Fecha de consulta: 7/6/2013. Última actualización: 10/7/2013.

DIVINYCELL H. Technical Data. Dirección URL: <http://www.diabgroup.com/~media/Files/Products/Core-material-pdf/H%20Oct%202012%20rev9%20IMP.pdf>. Fecha de consulta: 9/6/2013. Última actualización: 8/7/2013.

ECO Balsa. Ficha técnica de la madera balsa. Dirección URL: [http://www.ecobalsa.com/descargar/FICHA\\_TECNICA\\_DE\\_LA\\_MADERA\\_BALSA.pdf](http://www.ecobalsa.com/descargar/FICHA_TECNICA_DE_LA_MADERA_BALSA.pdf). Fecha de consulta: 9/6/2013.

ELSAYED N. M., ATKINS J. L., Explosion and Blast Related Injuries. Effects of Explosion and Blast from Military Operations and Acts of Terrorism.1 ed. Burlington, MA.Elsevier. 2008. ISBN: 13: 978-0-12-369514-7.

EOD PARTNER.EOD Bomb Disposal Suit.Art.No. 4700100.Dirección URL:[eodpartner.de/eng/02products/01eod/4700100\\_suit\\_heavy/4700100eng.pdf](http://eodpartner.de/eng/02products/01eod/4700100_suit_heavy/4700100eng.pdf). Fecha de consulta: 01/8/2012.

EXPLOSIVOS. Manejo de Explosivos. Dirección URL: <http://pentolita.blogspot.com/>. Fecha de consulta: 16/6/2013. Última actualización: 12/11/2008.

GARDNER, N, WANG,E, KUMAR, P, SHUKLA, A.Blast Mitigation in a Sandwich Composite Using Graded Core and Polyurea Interlayer. Experimental Mechanics. [Online] 52, 119-133. 2012.

GLOBAL ARMOUR.EOD Suit Generation 6.Dirección URL: [www.globalarmour.org/pdfs/EOD%20Suit%20Generation%206-04.06.pdf](http://www.globalarmour.org/pdfs/EOD%20Suit%20Generation%206-04.06.pdf). Fecha de consulta: 01/8/2012.

GURUPRASAD, S, MUKHERJEE, Abhijit. Layered sacrificial claddings under blast loading Part I. Analytical studies. International Journal of Impact Engineering. 24. p. 957 - 973. 2000.

GUTIERREZ-VÁZQUEZ, J. A, OÑORO, J. Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones. Revista Metalurgia. [Online] 44, 457-476. 2008.

HANSSENA, A.G, ENSTOCKB, L, LANGSETH, M. Close-range blast loading of aluminium foam panels. International Journal of Impact Engineering. [Online] 27, 593-618. 2002.

HEXWEB. Honeycomb Attributes and Properties. Dirección URL: [http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb\\_Attributes\\_and\\_Properties.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf). Fecha de consulta: 9/6/2013. Última actualización: 14/6/2013.

HONGZAN. Honeycomb Materials. Dirección URL: <http://www.aluminum-Honeycomb-panel.com/aluminium-Honeycomb-core.html>. Fecha de consulta: 9/6/2013.

INASEL. Tecnología Acústica. Dirección URL: <http://www.inasel.com/Acustipedia/Conceptos-generales/%C2%BFQue-es-la-impedancia-acustica.html>. Fecha de consulta: 15/6/2013. Última actualización: 27/11/2012.

KARAGIOZOVA, D, LANGDON, G.S, NURICK, G.N. Blast attenuation in Cymat foam core sacrificial claddings. International Journal of Mechanical Sciences. [Online] 52, 758-776. 2010.

LANGDON, G.S, von Klemperer, C.J, ROWLAND, B.K, NURICK, G.N. The response of sandwich structures with composite face sheets and polymer foam cores to air-blast loading: Preliminary experiments. Engineering Structures. [Online] 36, 104-112. 2012.

LAWRENCE BERKELEY LABORATORY.Kevlar.Dirección URL:  
<http://www.lbl.gov/MicroWorlds/Kevlar/index.html>. Fecha de consulta: 17/5/2013. Última actualización: 8/6/2011.

MATERIAL EASE. Dirección URL:  
<http://ammtiac.alionscience.com/pdf/2002MaterialEase20.pdf>. Fecha de consulta: 5/3/2013.

MAZHARUL, Islam Kiron. Introduction of fiber glass.TextileLearner. Dirección URL:  
[http://textilelearner.blogspot.com/2011/08/glass-fiber-types-of-glass-fiber\\_3834.html](http://textilelearner.blogspot.com/2011/08/glass-fiber-types-of-glass-fiber_3834.html).  
Fecha de consulta: 9/6/2013.

MODISPREM S.A. Dirección URL: [http://modisprem.com/materiales/PVC\\_Foam.html](http://modisprem.com/materiales/PVC_Foam.html).  
Fecha de consulta: 5/3/2013. Última actualización: 14/7/2011.

NACIONES UNIDAS. [www.pnud.org.co](http://www.pnud.org.co). Fecha de consulta: 2/6/2013. Última actualización: 10/7/2013.

PAVLUS, John. Real-life Hurt Locker: how bomb-proof suits work. Dirección URL: <http://dvice.com/archives/2010/03/hurt-locker-sui.php>. Fecha de consulta: 01/08/2012. Última actualización: 10/7/2013.

POLIUREA COLOMBIA. Dirección URL: <http://www.poliureacolombia.com/>. Fecha de consulta: 5/3/2013.

PRO Balsa. DIAB. Dirección URL: [http://www.nuplexcomposites.com/australia/files/images/stories/pdfs/products/cores/PB\\_S B.pdf](http://www.nuplexcomposites.com/australia/files/images/stories/pdfs/products/cores/PB_S B.pdf). Fecha de consulta: 5/3/2013. Última actualización: 9/12/2011.

REVISTA SEMANA. El pueblo más minado de la tierra. En: Revista Semana. Junio 3 al 10 de 2013. Edición 1.622.p. 121. ISSN: 0124-5473.

RYAN,V. What is Kevlar? Types of Kevlar. Dirección URL: <http://www.technologystudent.com/joints/Kevlar2.html>. Fecha de consulta: 17/5/2013

SRIRAM, R, VAIDYA, U. K. Blast impact response of aluminum foam sandwich composites. J Mater Sci.[Online] 41, 4023-4039. 2006.

TECNOLOGÍA DE LOS PLÁSTICOS. Dirección URL: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/fibra-de-carbono.html>. Fecha de consulta: 5/3/2013. Última actualización: 29/6/2013.

TEKALUR, S.A, WANG, E, JACKSON, M, SHUKLA, A. Failure behavior and energy absorption of sandwich composites under dynamic loading.En: Proceedings of the SEM Annual Conference. Albuquerque, New Mexico. Society for Experimental Mechanics Inc.2009.

THEOBALD, M.D, LANGDON, G.S, NURICK, G.N, PILLAY, S, HEYNS, A, MERRETT, R.P. Large inelastic response of unbonded metallic foam and Honeycomb core panels to blast loading. CompositeStructures. [Online] 92, 2465-2475. 2010.

VORAFORCE COMPOSITE SYSTEMS. Soluciones epóxicas en materiales compuestos.  
Dirección URL:  
[http://www.congresosudamericano.com/cobertura/apresentacoes/pr/8/dow\\_pr\\_08.pdf](http://www.congresosudamericano.com/cobertura/apresentacoes/pr/8/dow_pr_08.pdf).  
Fecha de consulta: 9/6/2013.

WAHL, L, MAAS, S, WALDMANN, D, ZURBES, A, FRERES, P. Shear stresses in Honeycomb sandwich plates: Analytical solution, finite element method and experimental verification.Journal of Sandwich Structures and Materials.[Online] 14 (4). p. 449–468. 2012.

WALLENBERGER, Frederick T, WATSON, James C, LI, Hong.PPG Industries, Inc. Glass Fibers.ASM Handbook. [Online] Vol. 21: Composites. p.27-34. 2001.

YANG, Y, FALLAH, A.S, SAUNDERS, M, LOUCA, L.A. On the dynamic response of sandwich panels with different core set-ups subject to global and local blast loads. Engineering Structures. [Online] 33, p. 2781-2793. 2011.



ZHU, Feng, ZHAO, Longmao, LU, Guoxing, WANG, Zhihua. Structural Response and Energy Absorption of Sandwich Panels with an Aluminium Foam Core Under Blast Loading. *Advances in Structural Engineering*. [Online] Vol. 11, No. 5. 2008.

## 9. ANEXOS

**Anexo 1:** Modelo de evaluación de resultados in situ.

**Anexo 2:** Planos del banco de pruebas.