

DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL TETRA-PAK COMO
POSIBLE MATERIAL APTO PARA USOS DE BLINDAJE

LAURA PAREJA PÉREZ

ANDRÉS FELIPE VARGAS OQUENDO

DAVID ÁLVAREZ HERRERA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2014

DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL TETRA-PAK COMO
POSIBLE MATERIAL APTO PARA USOS DE BLINDAJE

LAURA PAREJA PÉREZ

ANDRÉS FELIPE VARGAS OQUENDO

DAVID ÁLVAREZ HERRERA

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico

Director

EMIGDIO JOSÉ MENDOZA FANDINO

M.Sc. Ingeniería Física

Codirector

PATRICIA FERNÁNDEZ MORALES

Ph.D. en Ingeniería – Energía y Termodinámica

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN

2014

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma

Nombre

Presidente del jurado

Firma

Nombre

Presidente del jurado

Firma

Nombre

Presidente del jurado

Medellín 2014

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todos los profesores que intervinieron en nuestra formación tanto académica como humana.

A nuestros padres, no hay palabras que expresen lo mucho que les debemos. Por eso, les decimos simplemente, gracias.

CONTENIDO

RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN	12
1. MARCO TEÓRICO	14
1.1. TETRA-PAK	14
1.2. MATERIALES COMPUESTOS.....	15
1.2.1. Materiales laminares	15
1.2.2. Materiales fibrosos	16
1.2.3. Materiales particulados.....	18
1.3. REFORZANTES TÍPICOS EN MATERIALES COMPUESTOS	18
1.3.1. Nanotubos de carbono	18
1.3.2. Alúmina.....	18
1.3.3. Carburo de silicio	19
1.4. PRUEBA DE TRACCIÓN	19
1.5. IMPACTO.....	20
2. ESTADO DEL ARTE.....	22
2.1. TETRA-PAK	22
2.1.1. Estudios a nivel industrial.....	22
2.1.2. Estudios a nivel académico.....	24
2.2. ESTUDIOS DE MATERIALES ANTE IMPACTO	24
2.2.1. Aluminio.....	26
2.2.2. Estudios de cargas y reforzantes utilizados en aplicaciones de impacto.....	27
- Carburo de silicio	27
- Nanotubos de carbono (NTC)	28
- Alúmina.....	29
2.3. PRUEBA DE IMPACTO	30

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	32
3.1. ELABORACIÓN DE LAS MUESTRAS	32
3.1.1. Reforzante utilizado.....	32
3.1.2. Configuración del material de prueba.....	33
3.1.3. Muestras	34
3.2. PRUEBA DE TRACCIÓN	37
3.3. PRUEBA DE IMPACTO	38
3.3.1. Condiciones para la prueba de impacto	38
3.3.2. Material de respaldo y medida de profundidad de penetración	40
3.3.3. Dispositivo para prueba de impacto	42
4. DISEÑO, CONTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE MÁQUINA DE IMPACTO	43
4.1. MÁQUINA DE IMPACTO	43
4.1.1. Requisitos de diseño según las normas HOSDB Body Armour Standards for UK Police [2] y Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06 [3].....	44
4.2. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE MÁQUINA DE IMPACTO	45
4.2.1. Valores de energía de impacto	45
4.2.2. Sujeción y rieles guía	45
4.2.3. Misil de impacto	46
4.2.4. Cuerpo de nylon.....	48
4.2.5. Porta cuchilla	50
4.2.6. Material de respaldo	51
4.3. SISTEMA DE CONTROL	52
4.3.1. Sensores de velocidad	53
4.3.2. Calibración de sensores de velocidad.....	54
4.3.3. Sistema de localización del misil	58
4.4. PUESTA A PUNTO Y REPETITIVIDAD DE LA PRUEBA	59
4.5. PROTOCOLO PARA EL ENSAYO DE IMPACTO	60
4.5.1. Procedimiento antes de iniciar el test.....	60
4.5.2. Inicio del test.....	62
5. RESULTADOS	63
5.1. RESULTADOS PRUEBA DE TRACCIÓN	63

5.2. RESULTADOS PRUEBAS DE IMPACTO	64
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	66
6.1. ANÁLISIS RESULTADOS PRUEBAS DE TRACCIÓN	66
6.1.1. Tenacidad.....	67
6.1.2. Carga máxima	67
6.1.3. Esfuerzo último	68
6.1.4. Deformación máxima	69
6.1.5. Módulo de elasticidad	70
6.2. ANÁLISIS RESULTADOS PRUEBAS DE IMPACTO	72
CONCLUSIONES	74
TRABAJOS FUTUROS.....	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Capas de Tetra-Pak. Extraído de [5].....	15
Figura 2. Material laminado. Extraído de [8].....	16
Figura 3. Morfologías de compuestos reforzados con fibras. a) Fibras continuas unidireccionales. b) Fibras discontinuas orientadas al azar. c) Fibras ortogonales o tejidos. d). Fibras en capas múltiples. Extraído de [9].....	17
Figura 4. Comparación de módulo específico y resistencia específica de materiales metálicos y compuestos. Extraído de [9]	17
Figura 5. Representación máquina universal para pruebas de tracción. Extraída de [16].....	20
Figura 6. Especificaciones de especímenes para pruebas de tracción. Plano elaborado a partir de la norma ASTM D1037 [1].....	37
Figura 7. Material de respaldo compuesto. Extraído de [2]	40
Figura 8. Cuchillo HOSDB P1B	42
Figura 9. Esquema dispositivo para pruebas de impacto diseñado.....	43
Figura 10. Corte de misil ensamblado	47
Figura 11. Modelo CAD – Cuerpo de Nylon	49
Figura 12. Modelo CAD – Porta cuchilla	50
Figura 13. Sensores de velocidad	53
Figura 14. Photogate	55
Figura 15. Temporizador PASCO	55
Figura 16. Disposición de los sensores	56

GLOSARIO

Anti-punzón: Capacidad de un material de oponerse a la penetración de un objeto puntiagudo y/o corto punzante.

Alotrópico: propiedad de algunos elementos químicos de poseer estructuras químicas diferentes.

Fulerenos: es la tercera forma cristalina del carbón más estable. Se presentan en forma de esferas, elipsoides o cilindros. Los fulerenos esféricos reciben el nombre de *bucky* esferas y los cilíndricos el de *bucky* tubos o nanotubos.

Grafeno: Alótropo del carbono, con forma de teselado hexagonal plano formado por átomos de carbono y enlaces covalentes que se generan a partir de la superposición de los estados de hibridación sp^2 (enlace doble) de los carbonos enlazados.

RESUMEN

En este proyecto de grado se estudió el comportamiento anti punzón de diferentes materiales multicapa elaborados a partir de láminas de Tetra-Pak usado como materia prima principal y carburo de silicio de diferentes granulometrías usado como reforzante. Inicialmente se elaboraron configuraciones de seis láminas de Tetra-Pak reforzadas con cada una de las cargas, para extraer de estas muestras las probetas requeridas para realizar la caracterización del material bajo la prueba de tracción especificada en la norma ASTM D1037 [1]. Adicionalmente a las configuraciones de materiales multicapa (seis capas) en los cuales se varió la granulometría y porcentaje del reforzante; se realizaron dos probetas base sin ningún tipo de carga como referencia (una de doce capas y la otra de seis capas de tetra-pak). A partir de los resultados obtenidos en la prueba de tracción, se seleccionaron las configuraciones realizadas con variaciones en la granulometría y porcentaje del carburo de silicio para ser evaluadas bajo la prueba de impacto con punzón.

La prueba anti-punzón fue realizada bajo las normas *HOSDB Body Armour Standards for UK Police* [2] para un blindaje KR1 + SP1 y *Stab Resistance of Personal Body Armor, NIJ Standard-0101.06* [3]. Finalmente, fueron probadas ante impacto tres configuraciones diferentes, iniciando con una estándar (sin carga) y las dos configuraciones seleccionadas a partir de la prueba de tracción, es decir, las que incluían carburo de silicio de diferente granulometría y porcentaje de reforzante.

Para la realización de las pruebas anti-punzón, se diseñó y construyó una máquina en la cual se pudieran simular las condiciones reales de impacto que describe la norma. El dispositivo garantiza la perpendicularidad de los impactos, permite realizar la medición de la velocidad de impacto, posicionar el misil a la altura deseada y, finalmente, arroja el cálculo de la energía del impacto.

Se concluyó que las cargas aplicadas a las láminas de Tetra-Pak, contribuyeron a aumentar algunas de las propiedades relevantes para mejorar el comportamiento del mismo ante el impacto. Sin embargo, con la cantidad de láminas con la cual se realizaron las muestras, no fueron suficientes para cumplir las condiciones de las normas utilizadas para cumplir con el nivel de protección requerido.

Palabras clave: materiales multicapa, Tetra-Pak, ASTM D1037, prueba anti balística, prueba anti punzón, HOSDB, NIJ.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, aproximadamente 194 millones de litros de las bebidas de consumo diario en más de 170 países, están envasados en este tipo de material que representa un gran problema de contaminación, esto, por la dificultad y altos costos de su reciclaje debido a la compactación y adherencia entre las capas que lo componen, lo que hace costoso la separación de cada una de éstas.

Por las anteriores razones, en el presente trabajo se buscó determinar la viabilidad de la implementación del Tetra-Pak reutilizado en aplicaciones de blindaje, aportando una nueva alternativa de uso de este tipo de material, con el fin de contribuir en el estudio del Tetra-Pak y, a la misma vez, aportar con una alternativa para materiales de impacto que sea amigable con el medio ambiente.

En éste trabajo de grado se realizaron materiales compuestos de tipo laminar con diferentes distribuciones de láminas de Tetra-Pak y partículas reforzantes, variando la distribución de estos con el fin de obtener probetas a las cuales se les efectuaron pruebas de tracción bajo la norma ASTM D1037 [1], determinando de esta forma las configuraciones con mejor comportamiento mecánico para ser evaluadas en las pruebas anti punzón. Luego de la prueba de tracción, se seleccionaron las dos configuraciones con características más apropiadas para ser impactadas bajo la prueba de punzón.

La prueba anti-punzón fue realizada bajo condiciones planteadas por dos normas: *HOSDB Body Armour Standards for UK Police* [2] y *Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06* [3]. Para cumplir con estas condiciones y debido a que no se contaba con un dispositivo para realizar dichas pruebas, se diseñó, construyó y se puso en marcha en los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana, un dispositivo para pruebas de

impacto con las características exigidas por las normas anteriormente nombradas, con el fin de darle validez a la prueba.

En esta prueba se logró observar el comportamiento de cada configuración y determinar la más efectiva frente a impactos de punzón.

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se abordarán las diferentes definiciones y conceptos relevantes en lo que respecta al tema abordado en el presente trabajo de grado.

1.1. TETRA-PAK

El Tetra-Pak es un envase que consta de seis barreras de protección, gracias a las cuales los alimentos que son empacados en dichos envases, se mantienen en óptimas condiciones durante un largo periodo de tiempo, sin la necesidad de conservantes artificiales ni refrigeración. Del interior al exterior, las capas son las siguientes [4]:

Primera capa: Polietileno, cuya función es impermeabilizar el envase y proteger los alimentos de la humedad externa.

Segunda capa: Cartón, para dar forma, estabilidad y rigidez.

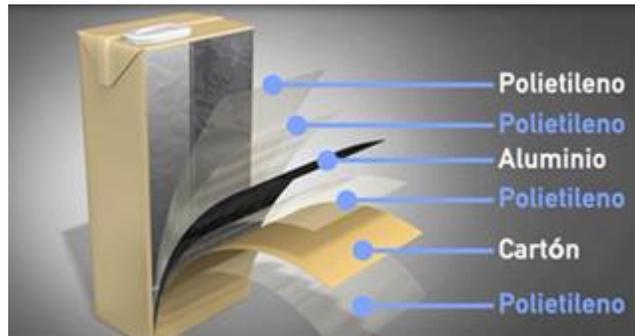
Tercera capa: Polietileno, cuya función es permitir que el cartón y la capa de aluminio se adhieran.

Cuarta capa: Aluminio, es la capa más importante del envase, ya que su función es actuar como barrera contra la luz y el oxígeno, para garantizar la protección de los alimentos del ambiente que los rodea, protegiendo sus diferentes componentes y evitando la proliferación de bacterias.

Quinta capa: Polietileno, cuya función es optimizar la adhesión del aluminio.

Sexta capa: Polietileno, que previene el contacto del producto con las otras capas del material del envase.

Figura 1. Capas de Tetra-Pak. [5]



1.2. MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos son materiales utilizados frecuentemente en diversos campos ingenieriles, esto debido a que con este tipo de materiales se pueden lograr propiedades que generalmente no se obtienen con materiales tales como: metales, polímeros y cerámicos. Los materiales compuestos se forman a partir de la unión de dos o más materiales o fases (matriz o fase continua y refuerzo o fase discontinua); a partir de dicha unión se logra un incremento en las propiedades o relaciones tales como conductividad eléctrica, conductividad térmica, resistencia a la corrosión, relación resistencia/peso, entre otras [6].

Existen tres tipos de materiales compuestos, los cuales se determinan por el tipo de reforzante con que interactúa: materiales fibrosos, materiales particulados y materiales laminados.

1.2.1. Materiales laminares

Los materiales laminares están formados por paneles unidos entre si por algún tipo de adhesivo u otra unión. Lo más usual es que cada lámina esté reforzada con fibras u otro tipo de reforzante y con dirección preferente, lo que los hace más resistente a los

esfuerzos [6], aunque sus propiedades dependen fundamentalmente de la geometría y de su diseño particular.

Los materiales laminares son diseñados para mejorar la resistencia mecánica direccional, resistencia mecánica isotrópica, resistencia al desgaste, principalmente, manteniendo el bajo costo [7]. Este tipo de materiales se dividen a su vez en:

- Laminados: capas de materiales unidos a través del uso de adhesivo orgánico
- Recubrimientos duros: capas superficiales duras que poseen buena resistencia al desgaste, son depositadas sobre materiales más duros y dúctiles.
- Metales de revestimiento: Compuesto por capas de metal – metal.
- Bimetales

Figura 2. Material laminado. [8]



1.2.2. Materiales fibrosos

Los materiales compuestos fibrosos se caracterizan por tener una estructura anisotrópica, con refuerzos cilíndricos o en hilos con diámetros que van desde 2 μm a 10 μm y longitudes de hasta 1 mm [9]. Dependiendo de los tamaños y de la alineación de las fibras se pueden tener los siguientes tipos de fibras reforzantes:

- Continuas: longitudes de fibras cercanas a 1 mm.
- Discontinuas alineadas: longitudes de fibras inferiores a 1 mm y alineadas entre sí.
- Discontinuas y orientadas aleatoriamente: tamaños longitudinales inferiores a 1mm y que se ubican aleatoriamente en la matriz.

Figura 3. Morfologías de compuestos reforzados con fibras. a) Fibras continuas unidireccionales. b) Fibras discontinuas orientadas al azar. c) Fibras ortogonales o tejidos. d). Fibras en capas múltiples. [9]

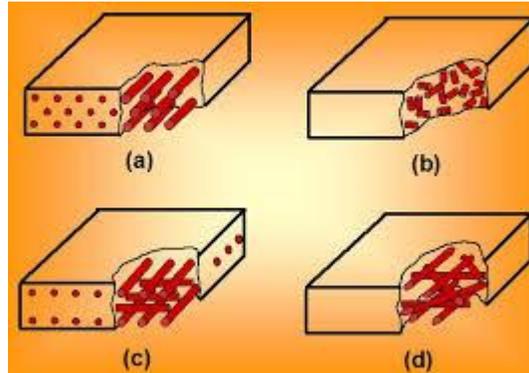
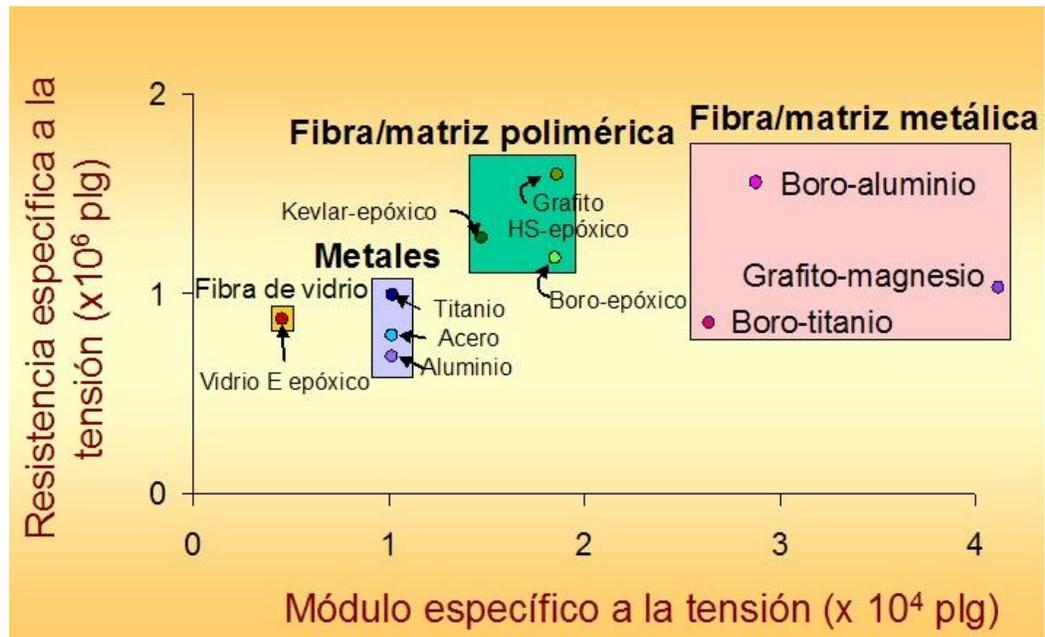


Figura 4. Comparación de módulo específico y resistencia específica de materiales metálicos y compuestos. [9]



1.2.3. Materiales particulados

Los materiales particulados se subdividen en materiales reforzados con partículas grandes y por endurecimiento por dispersión [10], los cuales se describen a continuación:

Reforzados con partículas grandes: se componen de partículas gruesas (mayores a 100 μm), que interactúan junto a la matriz permitiendo cierto tipo de propiedades que no se encuentran comúnmente en otros tipos de materiales.

Con endurecimiento por dispersión: se definen como materiales que contienen partículas con diámetros que van desde 10 nm a 250 nm. Estos materiales particulados son poco solubles en la matriz que es el componente base del material compuesto.

1.3. REFORZANTES TÍPICOS EN MATERIALES COMPUESTOS

1.3.1. Nanotubos de carbono

Los nanotubos de carbono (NTC), al igual que los fulerenos, el diamante y el grafito, son una forma alotrópica del carbono, cuya estructura se puede considerar que proviene de una lámina de grafeno enrollada [11]. Su elevada relación longitud/diámetro, da lugar a un buen número de propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, químicas y ópticas excepcionales que los hacen aptos para su uso en diferentes aplicaciones [12].

1.3.2. Alúmina

La alúmina (Al_2O_3) es un material cerámico muy versátil, sus propiedades la hacen especialmente apta para aplicaciones en donde la temperatura es un factor crítico [13]. La

combinación de una conductividad térmica alta, una resistencia a la compresión elevada y una expansión térmica baja resultan en una buena resistencia al impacto térmico [14].

1.3.3. Carburo de silicio

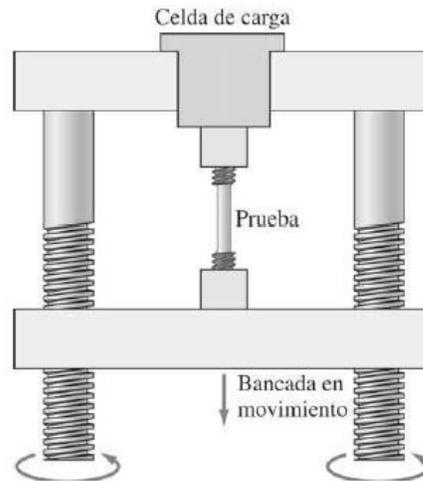
El carburo de silicio (SiC) es un material cerámico que posee diversas propiedades, entre otras, baja expansión térmica, una alta relación fuerza-peso, alta conductividad térmica, dureza, resistencia a la abrasión y a la corrosión y mantenimiento de la resistencia elástica hasta temperaturas de 1650 °C. Debido a esta variedad de propiedades, el carburo de silicio es empleado en diversas aplicaciones ingenieriles [15].

1.4. PRUEBA DE TRACCIÓN

La prueba de tracción es una prueba destructiva que mide la resistencia de un material a una fuerza cuasi-estática o aplicada lentamente. Para la realización de esta prueba se utiliza una máquina Universal; en la cual se ubica la muestra con el fin de aplicar a esta una carga. Para medir el cambio de la longitud del espécimen con respecto a una longitud determinada, la máquina debe tener adosada una galga extensométrica u otro tipo de extensómetro [16].

A través de la aplicación de la prueba de tracción se puede obtener información acerca de la resistencia mecánica, módulo de Young y ductilidad del material evaluado.

Figura 5. Representación máquina universal para pruebas de tracción. [16].



1.5. IMPACTO

Los impactos son colisiones en intervalos cortos de tiempo, que son experimentadas entre dos cuerpos generando cargas dinámicas [17]. Para estudiar estas cargas dinámicas o el comportamiento de un material sometido a dichas colisiones, se han desarrollado ensayos como el Charpy o el Izod, los cuales cuantifican la cantidad de energía absorbida por un material específico después de ser impactado por un péndulo. Para el ensayo Charpy, la energía se suele expresar en joules [J] o en libra-pie [lb·ft]; y para el ensayo Izod los resultados se expresan en J/m o lb·ft/in [6].

Por otro lado, también existen ensayos de impacto que se llevan a cabo para simular condiciones de uso final para un material o un producto, como es el caso de este estudio, en el cual, ocurre un impacto con una energía determinada, para luego establecer un *ranking* a un material, según la profundidad de penetración de una cuchilla en dicho material [6].

De este modo, se pretende que las configuraciones con los materiales propuestos en este estudio, incrementen el tiempo en el cual una cuchilla interactúa con dicho material, con el fin de que las fuerzas resultantes de la colisión generada, produzcan el menor daño posible. Esto se busca, logrando que el material disipe la energía cinética, disminuyendo las aceleraciones generadas que se tornarían perjudiciales para la integridad física de las personas que estén involucradas ya que el material a probar se pretende usar como protección personal [17].

2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se abordarán diferentes estudios realizados previamente sobre el Tetra-Pak; además, de estudios realizados sobre diversos materiales con el fin de determinar su comportamiento ante impacto.

2.1. TETRA-PAK

El Tetra-Pak es un envase que por su alto impacto en el ambiente, ha generado motivación en cuanto al estudio de métodos para lograr su reciclado y su reutilización. Estos empaques representan un gran problema de contaminación, esto, por la dificultad y altos costos de su reciclaje debido a la compactación y adherencia entre las capas que la componen, lo que hace costoso la separación de cada una de éstas. A continuación se describirán una serie de estudios y procesos que se han desarrollado en torno al reciclaje y reutilización del Tetra-Pak.

2.1.1. Estudios a nivel industrial

A nivel industrial son numerosos los estudios que se han realizado con el fin de desarrollar procesos que contribuyan con el reciclado del Tetra-Pak. Las dos alternativas que existen actualmente para el reciclado de Tetra-Pak fueron desarrolladas a nivel industrial, con el fin de lograr una separación en los diferentes componentes de este material, para poder ser utilizados nuevamente.

La dos vías para el reciclaje de este material son; en primer lugar, la ideada por Stora Enso, una empresa española [18] en donde se permite separar cada uno de los componentes del material para reintroducirlos al ciclo productivo o para destinarlo a la generación de

energía [19]; y la segunda técnica es la implementada en Klabin Piracicaba en Brasil [18], donde utilizando tecnología de plasma, se procesa el plástico y el aluminio, obteniendo parafina y aluminio de alta calidad, que posteriormente, pueden ser utilizados en otras industrias [19].

Otras alternativas para mitigar el impacto ambiental generado por este tipo de materiales es su reutilización. En 1992 *Papier fabrik Niederauer Muhle* (PNM)[18] en Alemania, desarrolló un sistema de reutilización del tetrabrik, en donde se utilizan todos los componentes del mismo en conjunto, para fabricar un aglomerado con propiedades mecánicas semejantes a las de la madera [19]. Además se ha planteado la reutilización para la fabricación de diferentes tipos de vestuario y accesorios como bolsos, billeteras, entre otros [20].

En Colombia existen tres empresas que tienen procesos que involucran el reciclado o reutilización de Tetra-Pak; estas son: Cartonall Ltda. ubicada en Bogotá, y Carficol Ltda. ubicada en Cartago, las cuales han realizado una adaptación de sus procesos de producción para poder utilizar dentro de sus productos la fibra de cartón obtenida a partir del reciclaje del Tetra-Pak como parte de la materia prima para la fabricación de láminas de cartón. De la misma forma, Sonoco de Colombia, está incorporando residuos de Tetra-Pak post consumo para la fabricación de cartón para rollos industriales y otros productos [21]. En cuanto a la reutilización, las cifras no son muy alentadoras, considerando que la empresa Tetra-Pak Ltda., sucursal de Tetra-Pak en Colombia, presentó para el 2010, 1160 toneladas al mes de residuos causados por el consumo de Tetra-Pak [22]. En estas cifras se ve evidenciada la gran problemática ambiental que está causando actualmente este tipo de empaque y la necesidad de desarrollar nuevas aplicaciones en cuanto a la reutilización o reciclaje del mismo.

2.1.2. Estudios a nivel académico

A nivel académico, se han realizado estudios en los cuales se plantea la reutilización del Tetra-Pak como insumo para la elaboración de aglomerados, obteniendo un material incluso con mejores propiedades en comparación con aglomerados industriales, en donde una de las propiedades que más resalta con respecto a otros aglomerados, es el comportamiento a tracción. Otra de las ventajas encontradas, se centra en que los aglomerados a partir de Tetra-Pak fueron obtenidos sin requerir un proceso adicional (hidropulpeo), además de utilizar temperaturas inferiores (130 °C) en comparación a las que son utilizadas en la industria para el reciclaje del Tetra-Pak (180°C a 220°C), con el fin de obtener la fusión total del polietileno [23].

El uso, reciclaje y estudio de este material, ha sido poco reportado a nivel académico. La mayoría de los desarrollos realizados en torno al uso y reciclaje del Tetra-Pak, se han dado a nivel comercial.

2.2. ESTUDIOS DE MATERIALES ANTE IMPACTO

De acuerdo con el reporte *“Who takes the bullet? The impact of small –arms violence”* [24], la necesidad de protección contra las armas de uso común se hace evidente desde el punto de vista de los civiles y de la fuerza pública. A raíz de esta situación, se hace necesaria la búsqueda de nuevos materiales compuestos de bajo costo y bajo peso con fines de protección balística y anti-punzón, que compitan con los materiales existentes actualmente.

En fenómenos de impacto, son muchos los factores que intervienen en la respuesta que pueda presentar un material multicapa. Estos incluyen el tipo y volumen de fibras, la

energía cinética generada en el impacto, espesor del laminado, el tipo de matriz y cargas usadas , entre otros [25].

Estudios realizados anteriormente han demostrado que las configuraciones tipo sándwich, también conocidas como multicapa, son una alternativa para la elaboración de sistemas de protección, pues la superposición de capas o placas de diferentes materiales, permite lograr la capacidad de absorción de energía requerida [26].

Alavi Nia, propone que el aluminio en forma de panel de abejas posee unas propiedades relativamente buenas frente a los impactos de bala y compara en sus estudios, resultados de un análisis teórico a través de un modelo matemático y datos experimentales, arrojando errores menores al 10% [27].

Otros estudios realizados, han demostrado que los materiales cerámicos que son usados como parte de los materiales compuestos multicapa, actúan como disipadores de energía a través de su forma geométrica[28], disipando energía durante la formación de grietas y cráteres que permiten la deformación del proyectil y la reducción de su velocidad. Además permite que la fuerza se distribuya sobre un área mayor, reduciendo la presión ejercida sobre las demás placas que forman el material [29].

Se ha demostrado además, que en las pruebas de impacto, la configuración del material, desde la disposición, manufactura, cambios estructurales, entre otros, es otra de las variables (a parte del material como tal y sus propiedades) que está directamente relacionada con la disipación de la energía generada en la colisión. Algunos de los materiales más conocidos en los cuales la configuración mejora el comportamiento dinámico del material son los laminados, estructuras *honeycomb* y espumas [30].

2.2.1. Aluminio

El aluminio es uno de los materiales que ha predominado en el tema del blindaje, sus propiedades, costo y beneficios en cuanto a otros tipos de materiales, han hecho la diferencia al momento de escogerlo como uno de los materiales más aptos para dicha aplicación. Según Askeland, el aluminio es uno de los materiales que posee una de las mejores relaciones resistencia-peso [6] y es uno de los compuestos del Tetra-Pak.

Estudios realizados [27], [31], [32] han demostrado que en cierto modo, el aluminio y sus aleaciones (las cuales generalmente tienen más del 95% de aluminio y otros componentes como el cobre, cobalto y zinc) poseen unas buenas propiedades para el blindaje. También se han realizado estudios sobre diferentes configuraciones que revelan cuales de estas presentan mejores propiedades para la aplicación en el campo del blindaje. Además se ha evidenciado que varios tipos de recubrimientos y materiales utilizados conjuntamente con el aluminio, muestran mejores resultados que el aluminio puro. Se ha demostrado mediante la comparación de diversos tipos de recubrimientos, que la utilización de estos sobre placas aleadas de aluminio, disminuyen la penetración de los impactos de proyectiles en el aluminio [31].

Varios de los blindajes elaborados a partir de materiales compuestos multicapa están constituidos por dos capas: la frontal, que presenta mayor eficiencia cuando está formada de elementos que disminuyen la energía cinética (generalmente cerámicos) y la de soporte, que es apta para recibir la energía sobrante del impacto, como por ejemplo, el aluminio [32].

2.2.2. Estudios de cargas y reforzantes utilizados en aplicaciones de impacto

Con el fin de determinar las cargas a utilizar en las muestras que se realizaron, se tuvieron en cuenta una serie de estudios realizados anteriormente en torno a la utilización de diferentes cargas y su comportamiento frente a impacto. Para incrementar las propiedades mecánicas de un material, se utilizan diferentes compuestos como carga dentro de una matriz polimérica. Dichas matrices son muy atractivas, debido a que pueden ser más livianas, más fuertes y más rígidas que polímeros sin reforzar o que los metales mismos [33]. Estas matrices han sido adoptadas por industrias militares debido a que retrasan el proyectil absorbiendo la energía cinética por medio de la deformación del compuesto [34].

- Carburo de silicio

Algunos de los estudios que fueron tenidos en cuenta para este trabajo de grado, demuestran que los materiales cerámicos utilizados como parte de los materiales compuestos multicapa, actúan como disipadores de esfuerzos a través de su forma geométrica [28] y han sido ampliamente utilizados en aplicaciones de blindaje balístico y de punzón [26], [29], [35], [36].

Frente a la alúmina y el nitruro de silicio, el carburo de silicio presenta un módulo elástico superior, una tenacidad a la fractura promedio y una densidad más baja como se muestra en la Tabla 1. Comparación entre reforzantes cerámicos avanzadas [26], propiedades que fueron de gran relevancia al momento de elegir el material cerámico que se utilizaría en las configuraciones [26].

Es importante además tener en cuenta que el carburo de silicio en algunos estudios [26], ha sido el factor determinante debido a que la cantidad de este material la posición dentro del compuesto fue el principal actor en la variación de los resultados.

Tabla 1. Comparación entre reforzantes cerámicos avanzadas [26].

Propiedades	Alúmina (Al ₂ O ₃)	Nitruro de silicio (Si ₃ N ₄)	Carburo de Silicio (SiC)
Resistencia a la flexión (MPa)	358	700	380
Modulo Elástico (GPa)	300	310	410
Tenacidad a la fractura (MPa x m ^{1/2})	4 - 5	6	4,6
Conductividad Térmica (W/mk)	24,7	26	125
Coeficiente de expansión térmica (10 a -6°C)	8,2	3,1	4,0
Densidad (g/cm ³)	3,75	3,25	3,1

- **Nanotubos de carbono (NTC)**

Los NTC utilizados en materiales compuestos multicapa de fibra de carbono, mejoran la respuesta al impacto y limitan el tamaño de los daños en el material [37]. Se ha comprobado además que la adición de NTC, mejora la eficiencia de amortiguamiento de los laminados y controla los daños en los laminados [38].

Otra razón para considerar los NTC en la fabricación de materiales compuestos, es la dureza, tenacidad, resistencia mecánica, flexibilidad y elasticidad de estos compuestos, propiedades que les permite generar una alta capacidad de absorción de energía generada por impacto, a los compuestos de los que hacen parte, transformando la energía del impacto en deformación plástica [12]. Otro factor determinante para la utilización de NTC en aplicaciones de blindaje, es su ligereza, obteniendo grandes prestaciones y poco

peso, a diferencia de los materiales comúnmente utilizados en blindaje [12], [37]. Además los NTC poseen el módulo de Young más alto conocido entre los materiales de ingeniería, y la densidad de un NTC de una sola pared es de alrededor de $1,33 - 1,40 \text{ g/cm}^3$ [39] lo que representa la mitad de la densidad del aluminio.

Los nanotubos de carbono (NTC) son una excelente opción como carga para la matriz polimérica debido a sus buenas propiedades mecánicas como lo han demostrado estudios anteriores [40][41], en los cuales utilizaban los NTC en una matriz de aleación aluminio AA7017 en un porcentaje de peso de 4% p/p causando una mejora del 35% en la disminución de la profundidad de penetración del proyectil en cuanto a resistencia al impacto se refiere, esto debido a que esta fibra requiere de 600 J/g para romperse, que comparado con los 27-33 J/g y 150 J/g necesarios para romper el Kevlar® y la tela de araña respectivamente [42], pueden considerarse muy buenos resultados. En otros estudios [42], se han utilizado NTC en una matriz de UHMWPE, logrando incrementar el módulo de Young un 82%.

- **Alúmina**

Otro material que se ha sido tenido en cuenta como carga en matrices poliméricas destinadas a este tipo de aplicaciones es la alúmina (Al_2O_3). Este reforzante ha sido utilizado como carga en una matriz epoxi para reforzar fibras de Kevlar®, mostrando un aumento del 30% en el nivel de absorción de energía en el impacto del proyectil, con respecto al Kevlar® sin ningún tipo de reforzante [35]. Además la alúmina ha sido utilizada en estudios balísticos como el cerámico que tiene el primer contacto con el proyectil en las pruebas debido a su bajo costo y altas prestaciones como la dureza y la baja densidad, en dichos estudios se ha demostrado una diferencia significativa en la resistencia balística al poner una placa de 6mm de alúmina delante de una placa de aluminio [28]. Esto es debido a que dicha placa cerámica aumenta el área en la cual la fuerza proveniente del

proyectil incide, y disipa la energía en forma de fracturas para que luego la energía restante sea absorbida por la placa de aluminio la cual disipa la energía cinética deformando el material [29]. La alúmina fue utilizada por Mustafa y demás, para realizar una investigación de balística mediante compuestos de alúmina y una aleación de aluminio, en el cual se observó que la alúmina, como capa primaria para propiedades balísticas posee un excelente desempeño [29]. Otro estudio relacionado con la alúmina, plantea que un cambio incremental del espesor de una placa de aluminio genera un incremento en la propagación de la onda transmitida de tensión y una disminución de la onda reflejada, produciendo que el cerámico reduzca sus daños [36].

2.3. PRUEBA DE IMPACTO

Durante la vida útil de diferentes tipos de elementos fabricados a partir de materiales compuestos, estos pueden encontrarse expuestos a diferentes tipos de impacto, ya sea de baja velocidad (como la caída de una herramienta), o de alta velocidad (como los impactos de basura espacial contra vehículos espaciales o satélites en órbita [43].

Por los constantes fenómenos de impacto que se presentan a diario, se vuelve importante el desarrollo de ensayos dinámicos y dispositivos que intentan representar las situaciones reales de impacto a las que pueden estar sometidos diferentes componentes. Actualmente, son pocos los estudios realizados sobre el impacto de diferentes componentes a alta velocidad, en comparación con los realizados para impactos a baja velocidad. Actualmente, estos ensayos suelen realizarse utilizando un cañón de gas al cual se le adaptan diferentes proyectiles de diversas formas y tamaños [43].

Una de las aplicaciones de los ensayos de impacto a altas velocidades, se evidencia en la utilización de este tipo de pruebas en la industria por parte de empresas dedicadas a la fabricación de materiales de protección para fuerzas militares y policiales; esto debido a

que dichas empresas deben adaptarse a las normas para poder determinar que su producto cumple con todas las condiciones requeridas. Esta necesidad se evidencia en las normas que desarrollan en algunos departamentos militares y policíacos alrededor del mundo, para garantizar que los elementos que utilizan cumplen o suplen sus necesidades de protección. Este es el caso de la policía del reino unido, la cual desarrolló una de las normas tratadas en este trabajo de grado denominada HOSDB [2].

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Es este capítulo se describirá la metodología experimental utilizada en este trabajo con el fin de determinar la viabilidad de la implementación del Tetra-Pak en aplicaciones de blindaje.

3.1. ELABORACIÓN DE LAS MUESTRAS

Teniendo en cuenta los diferentes factores expuestos anteriormente, las propiedades que deben presentar los materiales usados en aplicaciones de blindaje y estudios previos realizados, se eligieron los posibles materiales que podrían mejorar la respuesta del Tetra-Pak frente a pruebas anti-balística y anti-punzón. Esto se describe a continuación.

3.1.1. Reforzante utilizado

A pesar de las excelentes propiedades que poseen los nanotubos de carbono - NTC, su utilización fue descartada debido a sus altos costos y baja disponibilidad en el mercado nacional.

El material cerámico seleccionado para incluir en las configuraciones fue el carburo de silicio, debido a las propiedades que este tiene en comparación con otros cerámicos comerciales; dicha comparación se evidenció en lo reportado en los capítulos anteriores. Además, en los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana, se tenía la disponibilidad de este material, lo que contribuyó con la elección de este como carga a utilizar.

Una vez seleccionado el material reforzante, se definió el uso de tres granulometrías: 120, 320 y 600 y tres porcentajes de peso diferentes (5%, 10% y 15% p/p), con el fin de estudiar

el comportamiento del material dependiendo del tamaño de grano utilizado y determinar aquel que presentara mejor comportamiento en conjunto con el Tetra-Pak.

3.1.2. Configuración del material de prueba

Para la configuración del material de prueba, se planteó inicialmente la posibilidad de hacer tejidos de Tetra Pack; debido a que en anteriores estudios se ha demostrado que los tejidos tipo satén exhiben mayores límites balísticos [25], o usar laminados del Tetra Pak.

En el caso de la configuración de tejidos de Tetra-Pak, se realizaron tejidos a través de la obtención de láminas finas, cada una de 5 mm de ancho (mínimo valor posible mediante el método utilizado para su obtención). De este modo, se elaboraron una serie de placas tejidas, cuya elaboración fue altamente compleja. Proyectando el posible uso comercial del material usado en este proyecto, la idea era obtener materiales que no implicaran alta complejidad en su elaboración. En ese sentido, debido la dificultad que implicó la extracción de las láminas delgadas de Tetra-Pak y la elaboración de los tejidos, se descartó su uso en este trabajo y por tanto, se decidió utilizar el material entero para construir los laminados.

Fotografía 1. Configuración de muestras tejidas a partir de Tetra-Pak



3.1.3. Muestras

Para la realización de las probetas, se utilizaron cajas de Tetra-Pak, las cuales se cortaron de modo que se obtuviera a partir de estas, láminas cuadradas de aproximadamente 25 cm de lado.

Fotografía 2. Lámina de Tetra-Pak



Estas láminas fueron cargadas con carburo de silicio de diferentes granulometrías y diferentes porcentajes p/p (en caso que aplicara) y, posteriormente, fueron prensadas a 1 MPa y 130 °C durante 12 minutos, utilizando una prensa calefactora de marca “*IMPLEJOY*” ubicada en el laboratorio de resistencia de materiales de la universidad Pontificia Bolivariana. Con el fin de que las láminas de Tetra-Pak no se deslizaran entre sí durante el proceso de prensado, se utilizó cinta transparente de modo que envolviera la configuración de las láminas evitando deslizamientos indeseados.

Fotografía 3. Prensa calefactorsa utilizada en la fabricación de las muestras



Fotografía 4. Configuración de láminas de Tetra-Pak antes de prensado



Luego de que las configuraciones fueron prensadas bajo las condiciones descritas anteriormente, fueron cubiertas con silicona líquida en los bordes evitando la absorción de humedad, esto debido a que estudios realizados han demostrado que las propiedades de las configuraciones realizadas a partir de Tetra-Pak son afectadas de forma

considerable con la variación de la humedad, ya que el cartón (que compone el 75% del material del envase), absorbe agua [23].

Fotografía 5. Vistas de configuración de Tetra-Pak luego de prensado



A partir de láminas de Tetra-Pak y carburo de silicio, se realizaron las muestras descritas en la

Tabla 2. Muestras para pruebas de tracción

Muestra	% P/P	Granulometría	Capas	Presión (MPa)	Temperatura (°C)
1	5	120	6	1	130
2	10	120	6	1	130
3	15	120	6	1	130
4	5	320	6	1	130
5	10	320	6	1	130
6	15	320	6	1	130
7	5	600	6	1	130
8	10	600	6	1	130
9	15	600	6	1	130
10	Sin carga	Sin carga	6	1	130
11	Sin carga	Sin carga	12		130

. Posteriormente, de estas muestras se obtuvieron las probetas requeridas para la prueba de tracción.

Tabla 2. Muestras para pruebas de tracción

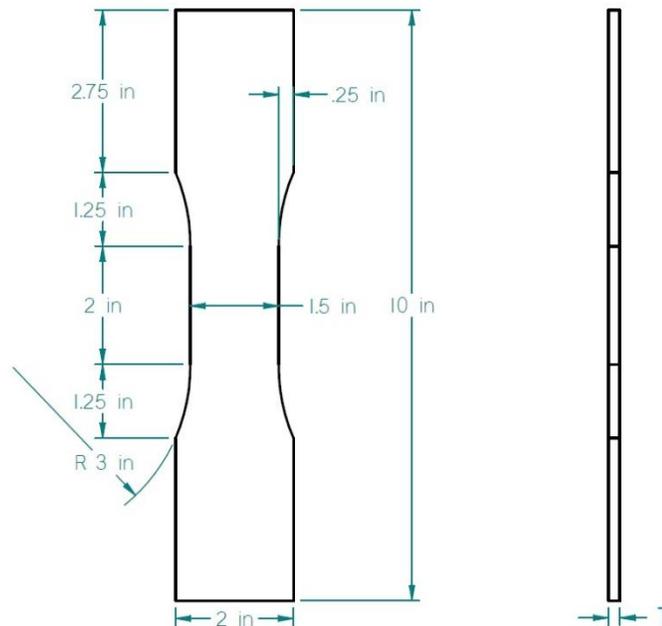
Muestra	% P/P	Granulometría	Capas	Presión (MPa)	Temperatura (°C)
1	5	120	6	1	130
2	10	120	6	1	130
3	15	120	6	1	130
4	5	320	6	1	130
5	10	320	6	1	130
6	15	320	6	1	130
7	5	600	6	1	130
8	10	600	6	1	130
9	15	600	6	1	130
10	Sin carga	Sin carga	6	1	130
11	Sin carga	Sin carga	12		130

3.2. PRUEBA DE TRACCIÓN

La prueba de tracción se realizó con el fin de determinar las propiedades más relevantes en cuanto al comportamiento mecánico de los materiales y a partir de estos datos, realizar comparaciones entre las diferentes muestras, para finalmente seleccionar aquellas que mejores propiedades presentaron para someterlas posteriormente a pruebas de impacto.

De cada una de las probetas descritas anteriormente, se obtuvieron dos especímenes para pruebas de tracción, que cumplieran con las dimensiones descritas en la norma ASTM D1037 y que se especifican en la Figura 6. Especificaciones de especímenes para pruebas de tracción. Teniendo en cuenta que el espesor de cada una de las muestras, no debía superar 2,4 cm.

Figura 6. Especificaciones de especímenes para pruebas de tracción. Plano elaborado a partir de la norma ASTM D1037 [1]



Todas las pruebas de tracción fueron realizadas en una máquina Universal de ensayos Instron 5582, usando una celda de carga de 30 kN y a una velocidad de 4 mm/min. Para cada una de las muestras probadas, se obtuvo la tenacidad, la carga máxima, el esfuerzo último, la deformación máxima y el módulo de elasticidad.

3.3. PRUEBA DE IMPACTO

3.3.1. Condiciones para la prueba de impacto

Las pruebas de impacto realizadas se basaron en la norma *HOSDB Body Armour Standards for UK Police* [2] y en la norma *Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06* [3]. Ambas normas incluyen especificaciones bajo las cuales se deben realizar las pruebas de punzón para que un material se considere o no apto para su uso en aplicaciones de blindaje KR1 + SP1. La norma *HOSDB Body Armour Standards for UK Police* [2], contempla

que para cada muestra se deben realizar 40 impactos, cada uno de estos separado 5 cm el uno del otro; además, contempla que para cada uno de los impactos, se debe utilizar una cuchilla nueva; de esta forma, la decisión de si el material cumple o no con los requerimientos necesarios para ser aceptado, depende de todos los impactos realizados, permitiendo incluso, que alguno de ellos, sobrepase los límites de penetración permitidos. Por otro lado, la norma *Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06* [3], contempla que el material debe ser impactado una sola vez para en valor de energía E1, de modo que el resultado es determinante.

Tabla 3. Resumen de la prueba de impacto para cada panel

Número de pruebas de impacto	Ángulo de incidencia	Tipo de cuchilla	Nivel de energía
1	0°	Hoja de cuchilla P1	E1
1	0°	Hoja de cuchilla P1	E2
1	0°	Hoja de cuchilla S1	E1
1	0°	Hoja de cuchilla S1	E2
1	45°	Hoja de cuchilla P1	E1
1	45°	Hoja de cuchilla P1	E1

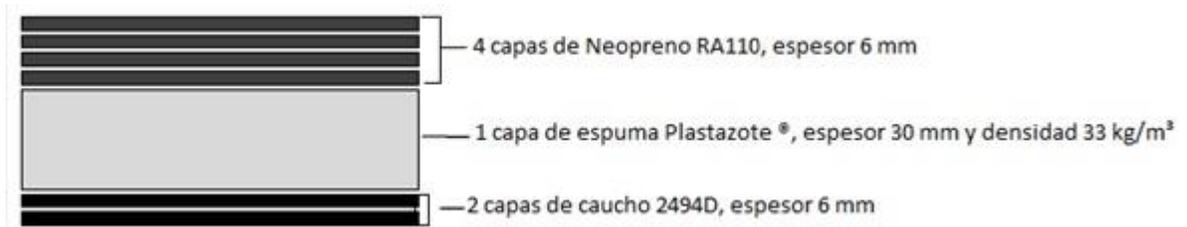
La norma *Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06* [3] está elaborada para materiales cuya estructura se comporte de manera homogénea y cuyo proceso de manufactura esté completamente estandarizado, garantizando que cada una de las muestras de un lote es exactamente igual (al menos en sus propiedades más determinantes), caso en el cual la realización de un solo impacto, es completamente válido.

Debido a lo anterior, y teniendo en cuenta que el material utilizado no es homogéneo, que el proceso de fabricación de las muestras no es replicable de forma exacta y considerando los altos costos que conllevaría realizar las pruebas bajo las consideraciones planteadas por la *HOSDB Body Armour Standards for UK Police* [2], para efectos de este trabajo se consideró que se realizarían tres impactos por cada una de las muestras seleccionadas, cumpliendo con que cada impacto se realice con mínimo 5 cm de separación de los otros impactos realizados. En cuanto a las cuchillas, luego de realizar una pequeña prueba en donde se consideró que el comportamiento de esta es el mismo en aproximadamente diez impactos, se consideró que cada cuchilla sería usada tres veces, garantizando que las pruebas no se verían afectadas por el desgaste de la misma.

3.3.2. Material de respaldo y medida de profundidad de penetración

Para la prueba de impacto debía ser utilizado un material de respaldo, cuya función es simular el cuerpo que recubre el material de proyección, amortiguar el impacto y medir la profundidad de penetración de la cuchilla en función de la longitud de corte marcada en dicho papel. Según la norma *HOSDB Body Armour Standards for UK Police* [2], dicho material de respaldo puede estar compuesto por cuatro láminas de neopreno RA110 cada una de 6 mm de espesor, una lámina de espuma de 30 mm de espesor de espuma Plastazote® 33 kgm^3 y dos capas de caucho 2494D de 6 mm de espesor. La disposición de las capas se muestra en la Figura 7. Material de respaldo compuesto.

Figura 7. Material de respaldo compuesto. [2]



Entre la probeta y el material de respaldo se ubicó una hoja de papel sintético de 8 mils (milésimas de pulgada) de espesor el cual permitió medir la profundidad de penetración de la cuchilla en función de la longitud de corte marcada en dicho papel. Esta relación se especifica en la Tabla 4. Relación entre longitud de corte y profundidad de penetración.

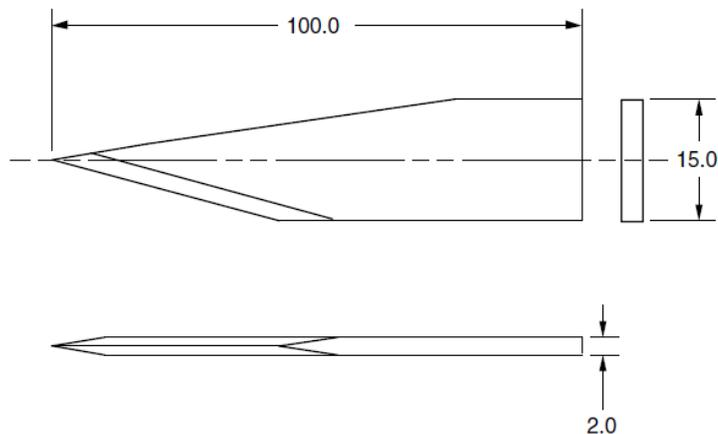
Tabla 4. Relación entre longitud de corte y profundidad de penetración. [3]

Longitud de corte (mm)	Profundidad (mm)						
0,42	1	5,91	14	11,39	27	13,66	40
0,84	2	6,33	15	11,81	28	13,81	41
1,27	3	6,75	16	11,96	29	13,96	42
1,69	4	7,17	17	12,12	30	14,12	43
2,11	5	7,59	18	12,27	31	14,27	44
2,53	6	8,02	19	12,43	32	14,43	45
2,95	7	8,44	20	12,58	33	14,58	46
3,37	8	8,86	21	12,73	34	14,73	47
3,8	9	9,28	22	12,89	35	14,89	48
4,22	10	9,7	23	13,04	36	15	49
4,64	11	10,12	24	13,19	37		
5,06	12	10,55	25	13,35	38		
5,48	13	10,97	26	13,5	39		

3.3.3. Dispositivo para prueba de impacto

Para las pruebas de impacto se utilizó el dispositivo para pruebas de impacto construido bajo especificaciones de norma, de manera que cumple con todos los requerimientos establecidos [2][3]. El dispositivo fue fabricado para soportar diferentes tipos de punzones; el punzón utilizado para este trabajo, fue el exigido por ambas normas bajo las cuales se realizó el desarrollo de todo este trabajo (*HOSDB Body Armour Standards for UK Police* [2] y *Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06* [3]) y los planos se presenta en la Figura 8. Cuchillo HOSDB P1B. Las especificaciones completas del dispositivo se presentan en el siguiente capítulo, así como también se describen todos los aspectos relacionados al diseño, construcción y puesta en marcha del dispositivo para prueba de impacto.

Figura 8. Cuchillo HOSDB P1B

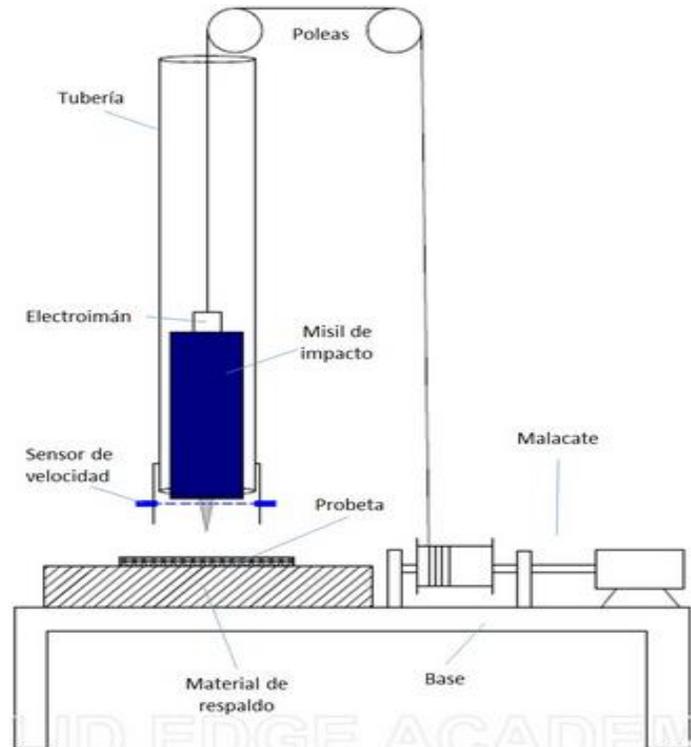


4. DISEÑO, CONTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE MÁQUINA DE IMPACTO

4.1. MÁQUINA DE IMPACTO

Se diseñó, construyó e instaló una máquina de impactos que cumple varios de los requisitos descritos en las normas *HOSDB Body Armour Standards for UK Police* [2] y *Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06* [3] para probar materiales que vayan a ser utilizados como blindaje contra armas tipo punzón. Dicha máquina fue instalada en el laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad Pontificia Bolivariana y consta de varios subcomponentes, cada uno de estos, descritos a continuación.

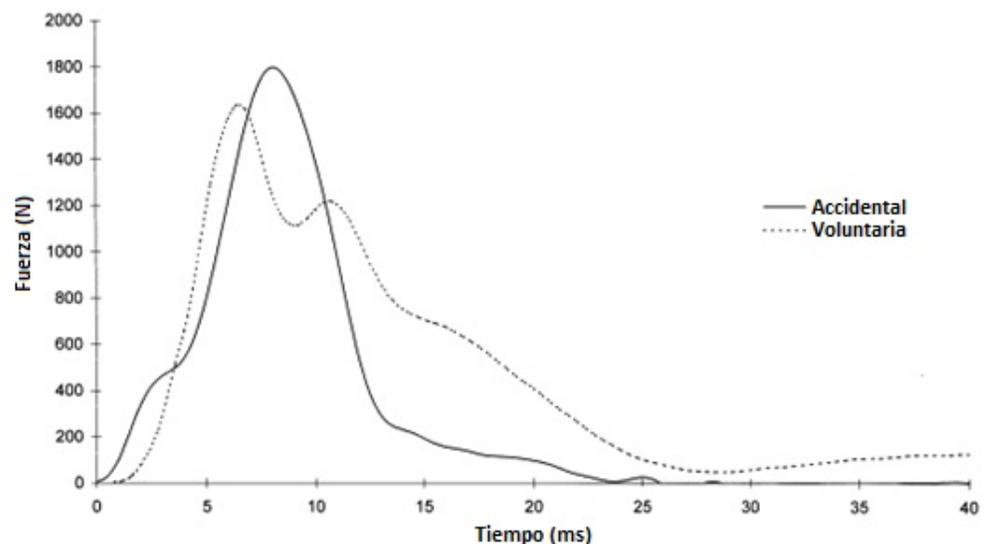
Figura 9. Esquema dispositivo para pruebas de impacto diseñado



4.1.1. Requisitos de diseño según las normas HOSDB Body Armour Standards for UK Police [2] y Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06 [3]

La máquina debe permitir que un misil al cual se le adapta una cuchilla o punzón en la parte inferior, caiga libremente por efecto de la gravedad e impacte una probeta suministrando una energía determinada. Dicho impacto se debe realizar evitando que el misil rote sobre su eje vertical y buscando un lanzamiento similar a una caída libre en donde la fricción sea casi nula. Además, el dispositivo debe estar anclado firmemente a la pared evitando movimientos y vibraciones indeseadas. Otras de las condiciones que según las normas anteriormente mencionadas se deben simular en el dispositivo, es que la cuchilla impacte verticalmente la probeta y que el misil se comporte como un sistema de doble masa. Debido a esto, sus componentes se acoplaron por medio de un elemento amortiguador de tal modo que la energía fuese entregada en un periodo de tiempo adecuado, logrando el efecto que se generaría en un impacto real generado por una persona con un arma tipo cuchilla o punzón; este efecto se presenta en la Gráfica 1. Biomecánica de una cuchillada [44].

Gráfica 1. Biomecánica de una cuchillada [44]



4.2. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE MÁQUINA DE IMPACTO

4.2.1. Valores de energía de impacto

Los valores de energía requerida ante el impacto por las normas *HOSDB Body Armour Standards for UK Police* [2] y *Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06* [3] para los diferentes niveles de protección y tipos de cuchilla, van desde 24 Joules para un nivel de protección mínimo y hasta 65 Joules para un nivel de protección máximo. En este estudio solo se evaluaron las muestras para analizar si se adaptaban a la condiciones requeridas para el nivel de protección KR1 & SP1 (cuchilla de un solo borde con filo y 24 Joules de energía). Sin embargo, el dispositivo se diseñó de forma que se pudiera alcanzar la energía requerida para probar materiales bajo las condiciones requeridas para el último nivel de protección; basados en esto, el delta de altura alcanzado por el misil dentro del dispositivo fue de 3,5 m.

Tabla 5. Niveles de protección de energía

Nivel de protección	Nivel de energía	Energía (joules)	Total masa del misil (kg)	velocidad (m/s)
KR1 & SP1	E1	24	1.9	5.0
KR1	E2	36	1.9	6.2
KR2 & SP2	E1	33	1.9	5.9
KR2	E2	50	1.9	7.3
KR3 & SP3	E1	43	1.9	6.7
Kr3	E2	65	1.9	8.3

4.2.2. Sujeción y rieles guía

Para lograr un impacto que cumpla con todos los requerimientos de las normas anteriormente mencionadas, la tubería de PVC transparente que conforma el cuerpo del

dispositivo, se sujetó a la pared por medio de tres anclajes metálicos. Además, se instalaron al interior de la tubería, dos rieles de acero con un perfil cuadrado recubiertos en teflón, con el fin de evitar la rotación del misil en todo su recorrido y buscando lograr un coeficiente de fricción bajo entre el misil y las guías.

Fotografía 6. Parte inferior (a) y superior (b) de la máquina de impacto construida



4.2.3. Misil de impacto

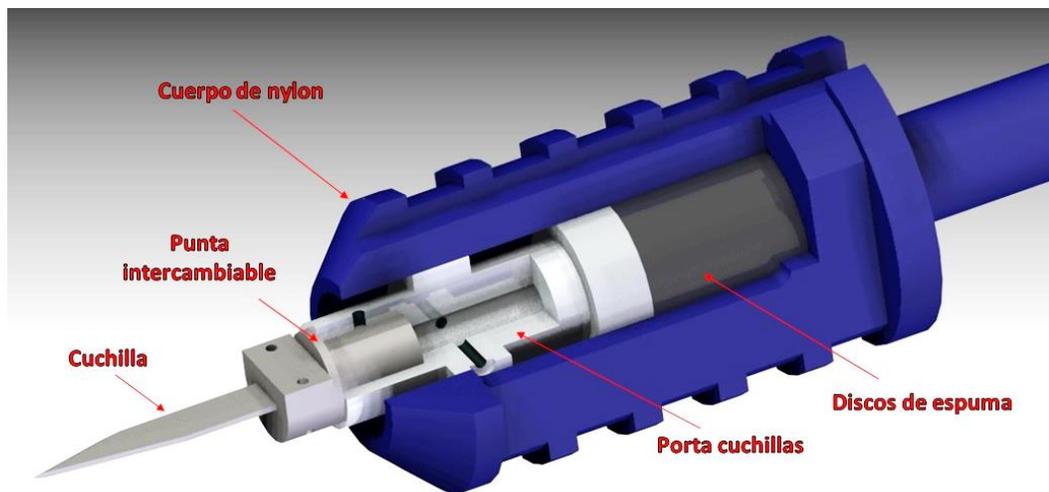
El misil es un cuerpo de nylon que viaja en caída libre a través de una tubería vertical. Este fue diseñado para que sus componentes cumplan con los pesos especificados en la norma *Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06* [3], logrando alcanzar los niveles de energía y la forma en que esta es transferida a la probeta.

Tabla 6. Pesos de componentes - NIJ

ITEM	PESO REQUERIDO [g]	PESO OBTENIDO [g]
Cuerpo de Nylon	1250 ± 13	1265.5
Porta cuchilla + cuchilla	650 ± 7	648
Misil completo	1900 ± 20	1911

Además, el misil posee las dimensiones necesarias para que después del impacto permanezca dentro de la tubería y las guías.

Figura 10. Corte de misil ensamblado



Fotografía 7. Misil de impacto dentro de tubería guía



El misil está conformado por varios subcomponentes para poder cumplir con todos los requisitos anteriormente nombrados.

4.2.4. Cuerpo de nylon

El cuerpo de nylon hace las veces de chasis, a este van sujetos todos los elementos del misil de impacto, además este los guía de forma adecuada durante todo el trayecto de la caída libre. Dicho cuerpo se diseñó de modo que estuviera dentro del peso requerido según la norma, permitiendo que el porta-cuchillas se pudiese desplazar 55 mm verticalmente dentro de este sin rotar y con una longitud considerable para evitar que el mismo se atravesara en su recorrido y cause atascamientos indeseados. También se incluyeron en el diseño, unas ranuras en los costados, las cuales junto con los rieles metálicos, actúan como guía para evitar que el misil rote sobre su eje vertical.

Este cuerpo se fabricó en una formulación especial: Nylon Prolon SF, cuyas propiedades se especifican en la Tabla 7. Especificación Nylon Prolon S; dicha formulación hace que la poliamida tenga una mayor resistencia al impacto.

Figura 11. Modelo CAD – Cuerpo de Nylon

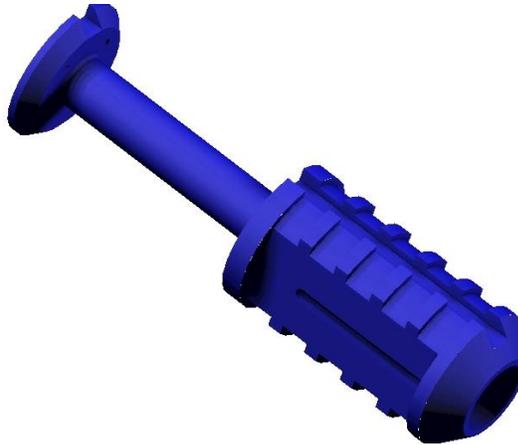


Tabla 7. Especificación Nylon Prolon SF. (Especificaciones dadas por el fabricante)

Especificación de producto			
Propiedades	Unidades	ISO	
		Método	SF2320
Gravedad específica		D792	1.10-1.13
Resistencia a la tensión	PSI	D638	8700-11500
Modulo a la tensión	PSI	D638	240.000-330.000
Resistencia a la compresión	PSI	D695	11.000-12.500
Modulo de compresión	PSI	D695	200.000-300.000
Resistencia a la flexión	PSI	D790	15000-18000
Modulo de flexión	PSI	D790	280.000-385.000

Además, en la parte superior del cuerpo de Nylon, se instaló una placa metálica para que el misil de impacto pudiese ser levantado por un electroimán que hace parte del sistema de control.

Fotografía 8. Platina de sujeción



4.2.5. Porta cuchilla

El porta cuchilla cumple la función de soportar la cuchilla o punzón que vaya a ser usada en las diferentes pruebas posibles que permite realizar el dispositivo. El porta cuchilla está ubicado dentro del cuerpo de nylon y tiene la habilidad de deslizarse 55mm dentro de este sin rotar. Entre el porta cuchilla y el cuerpo de nylon se instalaron unos discos de espuma de polietileno (mismo material usado en el material de respaldo), los cuales cumplen la función de elemento amortiguador. Además el porta cuchilla cuenta con una punta intercambiable, haciendo posible instalar elementos de diferentes geometrías, haciendo de esta, una máquina versátil que puede ser utilizada en diferentes tipos de pruebas de impacto.

Figura 12. Modelo CAD – Porta cuchilla



4.2.6. Material de respaldo

El material de respaldo busca simular la dinámica del cuerpo humano ante un impacto. Este, según las normas *HOSDB Body Armour Standards for UK Police* [2] y *Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06* [3] es conformado por cuatro capas de espuma de neopreno, una de espuma de polietileno de célula cerrada y dos de caucho natural como se muestra en la Tabla 8. Especificación según normas

Tabla 8. Especificación según normas

ITEM	Cantidad	especificaciones NIJ	especificaciones HOSDB
Espuma de neopreno	4	5,8 mm de espesor, Shore A 20-30	6 mm de espesor, densidad firme
Espuma de Polietileno	1	célula cerrada, 31 mm (1,22in) de espesor, Shore A 14	célula cerrada, 30 mm (1,88in) de espesor, densidad de 33kg/m ³
Caucho natural	3	6,4 mm (0,25in) de espesor, Shore A 45-50	BS249D, 6 mm de espesor

Para la prueba de impacto realizada, se implementaron los materiales de respaldo tomando en cuenta los materiales disponibles en el mercado. Debido a dicha disponibilidad, se modificaron los espesores de la capa de espuma de polietileno utilizada con respecto a los especificados en las normas; además, la dureza de la espuma de neopreno también se modificó, como se puede apreciar en la Tabla 9. Especificaciones de materiales utilizados

Tabla 9. Especificaciones de materiales utilizados

ITEM	Cantidad	Especificaciones de material de respaldo utilizado
Espuma de neopreno	4	6,35 mm (0,25 in) de espesor, Shore A 5
Espuma de Polietileno	2	célula cerrada, 12,7 mm (0,5 in) de espesor, densidad de 35,5 kg/m ³ (2,2 lb/ft ³)
	1	célula cerrada, 0,25 in (6,35 mm) de espesor, densidad de 35,5 kg/m ³ (2,2 lb/ft ³)
Caucho natural	3	6,4 mm (0,25 in) de espesor, Shore A 45-50

4.3. SISTEMA DE CONTROL

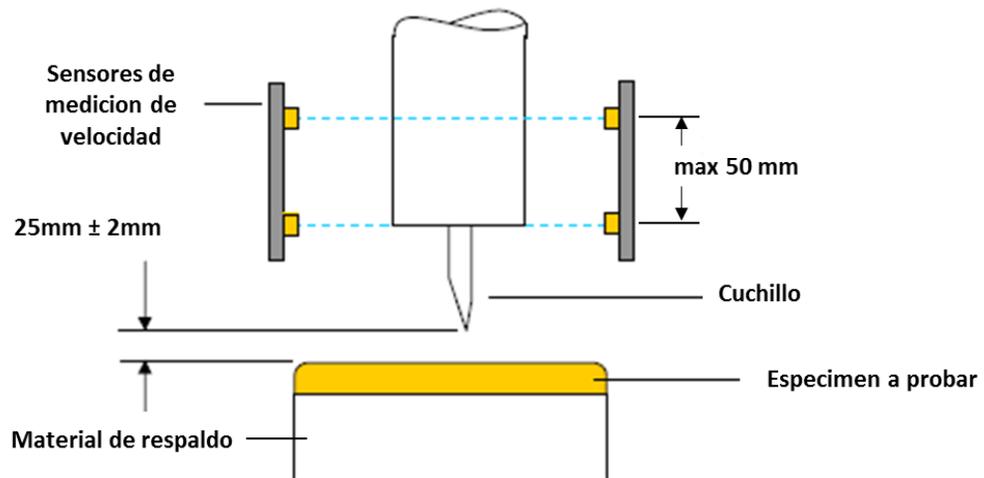
Para lograr obtener unos datos confiables y una buena repetitividad entre las pruebas, se implementó un sistema de control, el cual consta de un malacate accionado por un motor eléctrico que hala un cable, el cual, en su extremo, está atado a un electro-imán sujetando el misil de impacto para trasladarlo a través de la tubería hasta una altura deseada. El usuario, posteriormente, acciona un botón, dando la orden para lanzar el misil en caída libre hacia el espécimen a probar. Antes de iniciar la prueba, el usuario, a través de una interfaz amigable, ingresa ciertas condiciones bajo las cuales se van a realizar las pruebas: peso del misil, nombre o consecutivo a utilizar para el almacenamiento de la prueba y el GAP (distancia desde la ubicación del misil en el momento en el que se obtiene el valor de velocidad y el espécimen a probar). Unos pocos centímetros antes de impactar, un sistema de medición de velocidad obtiene la velocidad final del misil y almacena este valor de velocidad junto con los datos descritos inicialmente por el usuario. De esta forma, con los valores de velocidad, masa y distancia entre los sensores (GAP), el procesador calcula la energía cinética instantes antes del impacto. Todos estos datos son tabulados y se pueden transferir posteriormente a una tarjeta de memoria para ser guardados y analizados en otros dispositivos.

Por cuestiones de tiempo y de falta de experiencia en programación de dispositivos electrónicos, el sistema de control fue contratado por un tercero, quien apoyó la elaboración y diseño de dicho sistema, de forma que se adaptara a los requisitos exigidos por las normas y que se ajustara al diseño de la parte mecánica del dispositivo.

4.3.1. Sensores de velocidad

Para lograr una buena confiabilidad de los datos obtenidos, la *norma HOSDB Body Armour Standards for UK Police* [2] exige que la velocidad final sea medida a 25 ± 2 mm por encima de la probeta, con una resolución de mínimo 0,5 m/s y una separación máxima entre sensores de 50 mm.

Figura 13. Sensores de velocidad



Según las exigencias de la norma, se ubicaron los sensores de tal modo que se obtuviera el dato de velocidad a 17 mm por encima del espécimen a probar (en este caso, muestras de

aproximadamente 7 mm de espesor). El equipo de medición de velocidad se calibró para medir con una precisión de $\pm 0,1$ m/s y los sensores se ubicaron a 18,5 mm entre sí.

Fotografía 9. Sensores de velocidad reales



Además, los registros de los ensayos realizados para las pruebas de calibración, deben mantenerse y ser trazables como garantía de la calidad del dispositivo para pruebas de impacto. Esta trazabilidad fue lograda a través de la implementación de una prueba de calibración.

4.3.2. Calibración de sensores de velocidad

Para la calibración del temporizador y de los sensores que fueron fabricados para ser implementados en el sistema de medición de velocidad, se utilizaron como referencia los siguientes elementos comerciales:

Sensor IR de referencia:

- Resolución: 0,1 ms
- Tiempo de respuesta de ascenso: <500 ns
- Tiempo de respuesta de descenso: <50 ns
- Pico de fuente infrarroja de: 880 nm

Figura 14. Photogate



Temporizador de referencia:

- Marca: PASCO *Smart Timer* ME-8930
- Resolución: 100 μ s
- Precisión: 0,01%
-

Figura 15. Temporizador PASCO



El sensor y el temporizador fabricados para ser utilizados en el dispositivo, presentan las siguientes características:

Temporizador implementado:

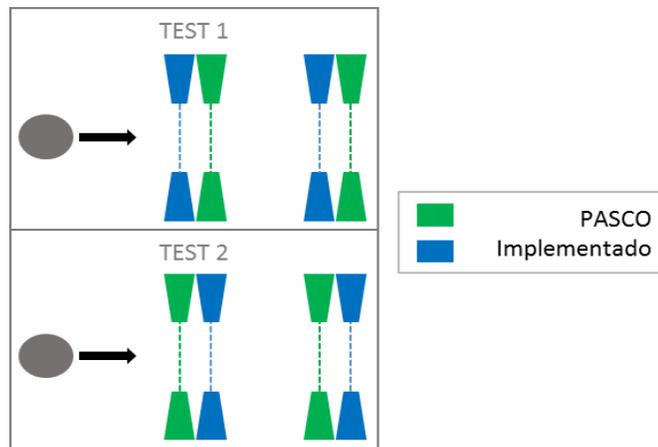
- Arduino Mega 2560 16 Mhz@ preescaler 64
- Resolución: 100 μ s
- Precisión: +/-4 μ s

Sensor IR implementado

- Tiempo de respuesta de ascenso: <4 μ s
- Tiempo de respuesta de descenso: <2 μ s
- Pico de fuente infrarroja de: 940 nm

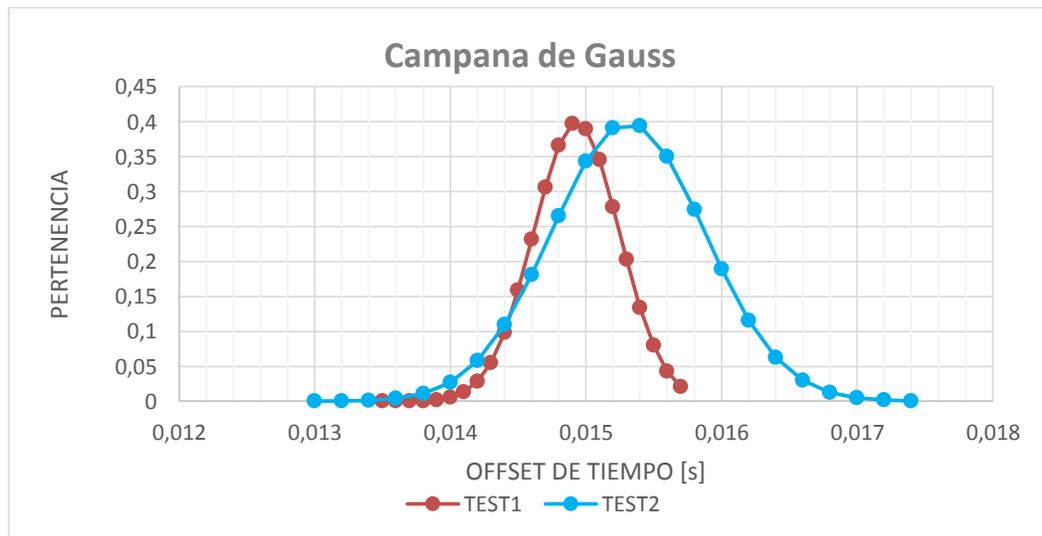
Con estos elementos se realizaron dos test de calibración, en los cuales se dejó caer un balón por un riel 40 veces, los lanzamientos fueron realizados desde una misma altura y distancia entre sensores constante, variando únicamente la disposición de los sensores entre cada como se indica en la Figura 16. Disposición de los sensores

Figura 16. Disposición de los sensores



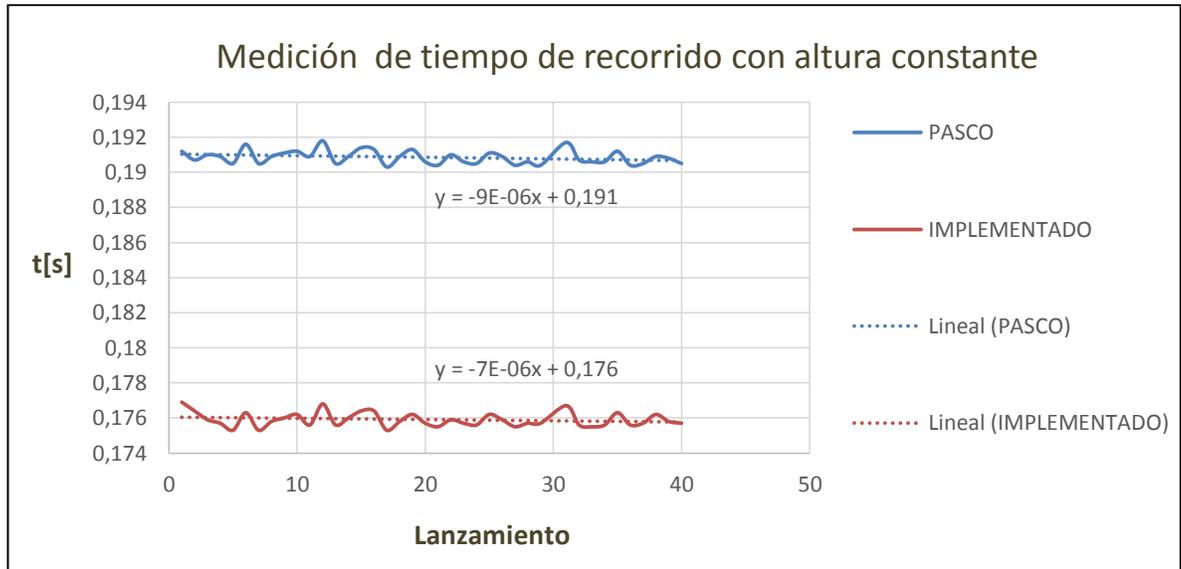
Lo anterior se realizó con el fin de encontrar la diferencia de mediciones de tiempo (*offsets*) entre sistemas para luego ser corregida en la programación del microcontrolador. Para comprobar que las dos pruebas dieron resultados similares, de cada prueba se obtuvieron los *offset* entre los dos sensores y se realizó una distribución estándar de estos datos; en la Gráfica 2. Offset de tiempo se puede observar que en las dos pruebas, para un mismo evento, la mayoría de *offset* están cercanos al promedio, logrando así una buena repetitividad de los datos obtenidos; además se verificó que el promedio de los *offset* en las dos pruebas son similares, mostrando así la veracidad de la prueba de calibración.

Gráfica 2. *Offset* de tiempo



Además, se realizó una medición del tiempo recorrido del balón lanzado desde una altura constante. Los resultados obtenidos se presentan en la Gráfica 3. Tiempo de recorrido con GAP y altura constante

Gráfica 3. Tiempo de recorrido con GAP y altura constante



Los resultados de los *offsets* obtenidos en cada una de las pruebas se presentan en la

Tabla 10. Resultados offsets

OFFSETS (s)		
	TEST 1	TEST 2
Promedio	0,01493077	0,01531026
Desviación	0,00031719	0,00056559
Máximo	0,0156	0,0168
Mínimo	0,0140	0,0139

Tabla 10. Resultados offsets

OFFSETS (s)		
	TEST 1	TEST 2
Promedio	0,01493077	0,01531026
Desviación	0,00031719	0,00056559
Máximo	0,0156	0,0168
Mínimo	0,0140	0,0139

4.3.3. Sistema de localización del misil

Las pruebas realizadas en el dispositivo exigen que se conozca la altura precisa desde la cual se realizan los lanzamientos. Por este motivo, se implementó un sistema de localización, de modo que el misil de impacto sea ubicado a la altura deseada para las pruebas.

Para lograr esto, en el dispositivo para pruebas de impacto se implementó un malacate accionado por un motor eléctrico para el desplazamiento del misil a través de la tubería. El misil es fijado al malacate a través de un electro imán; cuando se acciona el lanzamiento, el electroimán invierte su polaridad, logrando que el misil sea lanzado de forma inmediata. Como medida de seguridad, antes que el misil sea lanzado, se activa una alarma sonora.

Para la medición de la altura, se implementó un *encoder* óptico de 64 pulsos, en donde por medio de dos ruedas de caucho y garantizando que el cable siempre se encuentre en contacto con estas, se obtiene la distancia lineal, es decir, el cambio de la altura del misil. La fórmula utilizada para el cálculo de la altura se presenta en la Ecuación 1..

$$\text{numero de pulsos} = \text{Redondear} \left(\frac{\text{altura[cm]}}{499,94} * 1997 \right) \text{ Ecuación 1.}$$

Los resultados se presentan con un error máximo de 0,1382% y un error mínimo de 0,0001%.

4.4. PUESTA A PUNTO Y REPETITIVIDAD DE LA PRUEBA

Con el fin de garantizar que el dispositivo para pruebas de impacto estuviese arrojando los resultados correctos y para garantizar que la prueba pudiese simular las mismas condiciones las veces que fuese necesario, se realizaron una serie de impactos

garantizando la misma altura del misil, con el fin de comprobar que la velocidad medida por el sensor, siempre fuera la misma (teniendo en cuenta las desviaciones permitidas por la precisión del mismo) y para comprobar que la energía arrojada por el sistema, fuera la correcta según el peso del misil, la altura de la cual fue arrojado y la velocidad obtenida. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 11. Ensayo puesta a punto y repetitividad de la prueba, y soportan el hecho de que las pruebas se pueden realizar asegurando las mismas condiciones en cada impacto y obteniendo resultado correctos.

Tabla 11. Ensayo puesta a punto y repetitividad de la prueba

Impacto	Energía (J)	Velocidad (m/s)
1	29,414	5,370
2	29,485	5,543
3	30,000	5,645
4	29,274	5,524
5	29,344	5,530
6	29,340	5,530
7	29,135	5,510

4.5. PROTOCOLO PARA EL ENSAYO DE IMPACTO

A continuación se describe la forma en la cual se debe proceder para la realización de las pruebas de impacto, utilizando el dispositivo elaborado.

4.5.1. Procedimiento antes de iniciar el test

Antes de empezar un test en el dispositivo para pruebas de impacto, se deberá seguir el procedimiento descrito a continuación; este procedimiento solo será necesario

implementarlo una vez al inicio de una serie de pruebas o en el caso que se cambie a otra probeta con dimensiones diferentes.

1. Poner el dispositivo en modo manual:
 - a. Después de ser encendida la máquina, en el panel de control presionar siguiente sin ingresar los valores requeridos para pasar a la próxima pantalla.
 - b. Cambiar a modo manual y presionar siguiente. En este modo se permite modificar la altura del electroimán manualmente, pues esta altura dependerá del grosor de la muestra a probar.

2. Preparación misil:
 - a. Insertar el porta cuchillas en el cuerpo de nylon, presionando los discos de espuma que se encuentran al interior de este, hasta que sea visible el agujero del porta cuchillas en el agujero del cuerpo de nylon.
 - b. Instalar los tornillos guía en dichos agujeros.

3. Ubicación del misil dentro de la máquina de impacto.
 - a. Bajar el electroimán por medio del panel de control, oprimiendo las flechas que apuntan hacia la parte inferior, de modo que este quede posicionado de tal forma que el misil pueda ser insertado y quede en contacto con este.
 - b. Insertar el misil dentro de la tubería hasta que sea anclado por el electroimán.
 - c. Subir el electroimán con el botón del panel de control en el cual las flechas apuntan hacia la parte superior, hasta que el espacio sea suficiente para instalar el material de respaldo.

4. Instalación de la probeta:

Se debe ubicar el papel sintético o papel testigo sobre el material de respaldo; encima del papel se debe ubicar la probeta y posteriormente sujetarla con un elástico al material de respaldo, de modo que al presentarse el impacto, la probeta no se mueva.

Encontrar el GAP (distancia entre sensores): Se debe medir la distancia entre la última posición en que el misil es censado y la probeta a impactar; para esto, mientras el misil sube manualmente desde la posición mínima, este será censado y se encenderá un testigo luminoso en el panel de control, en ese punto se deberá detener el electroimán.

4.5.2. Inicio del test

- 1) Encender el microcontrolador desde el panel de control (si estaba encendido, apagar y prender de nuevo).
- 2) Ingresar el nombre o consecutivo de la prueba.
- 3) Ingresar el peso del misil.
- 4) Ingresar el valor del GAP (encontrado anteriormente).
- 5) Presionar siguiente para pasar a la próxima pantalla.
- 6) Escoger el modo automático y presionar siguiente.
- 7) Ingresar el valor de altura desde la cual se desea realizar el lanzamiento y presionar siguiente.
- 8) Esperar que el dispositivo lleve el misil a la altura deseada.
- 9) Presionar los dos botones de lanzamiento al tiempo (uno digital en la pantalla y otro físico al lado de la pantalla). Lo anterior se consideró por seguridad.
- 10) Para realizar el siguiente lanzamiento se vuelven a seguir los pasos desde el ingreso de la altura del lanzamiento.

- 11) Al finalizar el número de lanzamientos deseados presionar siguiente para llegar a la pantalla donde se muestran los resultados tabulados del test, además estos podrán ser almacenados en una tarjeta de memoria SD.

5. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados que fueron obtenidos en las pruebas de tracción y en las pruebas de impacto realizadas.

5.1. RESULTADOS PRUEBA DE TRACCIÓN

A partir de la prueba de tracción realizada a cada una de las probetas, se determinó para cada una de estas, el esfuerzo de fluencia, la tenacidad, la carga máxima, el esfuerzo último, la deformación máxima y el módulo de elasticidad. Los resultados obtenidos para cada una de las probetas, se reportan en la Tabla 12. Resultados pruebas de tracción

Tabla 12. Resultados pruebas de tracción

Probeta	Tamaño de grano	% SiC	Tenacidad (MPa)	Carga Máxima (N)	Esfuerzo último (MPa)	Deformación Máxima (mm/mm)	Módulo elasticidad (GPa)
120051	120	5%	2,515	2887,75	20,63	0,1783	0,22
120052	120	5%	4,231	3977,55	28,48	0,2059	0,33
120101	120	10%	2,156	2876,96	20,85	0,1512	0,28
120102	120	10%	1,858	2619,81	18,67	0,148	0,23
120151	120	15%	2,331	2595,57	19,11	0,1759	0,21
120151	120	15%	3,621	3760,13	26,99	0,1875	0,34
320051	320	5%	4,248	3199,43	24,89	0,1777	0,41
320052	320	5%	2,978	3828,71	29,79	0,1395	0,39
320053	320	5%	4,063	3941,93	29,17	0,1916	0,38
320101	320	10%	1,972	2836,12	21,67	0,1499	0,33
320102	320	10%	2,322	2970,96	19,69	0,1461	0,31
320151	320	15%	3,188	3314,45	27,58	0,1606	0,45
320152	320	15%	3,060	3197,51	26,37	0,1558	0,44
600051	600	5%	2,680	2935,37	24,09	0,1533	0,41
600052	600	5%	2,858	2970,7	23,33	0,158	0,38

600101	600	10%	2,463	2750,48	22,15	0,1495	0,42
600102	600	10%	2,641	3012,98	23,35	0,1406	0,45
600151	600	15%	3,514	3343,16	29,15	0,1735	0,45
600152	600	15%	3,863	3038,21	26,51	0,1612	0,46

Los resultados promedio obtenidos para cada una de las muestras se presentan en la Tabla 13. Resultados promedios obtenidos para cada probeta en la prueba de tracción.

Tabla 13. Resultados promedios obtenidos para cada probeta en la prueba de tracción.

Tamaño de grano	% SiC	Promedio esfuerzo de fluencia (MPa)	Promedio tenacidad	Promedio carga máxima (N)	Promedio esfuerzo último (MPa)	Promedio deformación máxima (mm/mm)	Promedio módulo de elasticidad (GPa)
120	5%	7,88	2,52	2887,75	20,63	0,18	0,22
120	10%	8,43	2,16	2876,96	20,85	0,15	0,28
120	15%	7,3	2,33	2595,57	19,11	0,18	0,21
320	5%	10,79	4,25	3199,43	24,89	0,18	0,41
320	10%	5,04	1,97	2836,12	21,67	0,15	0,33
320	15%	12,15	3,19	3314,45	27,58	0,16	0,45
600	5%	11,18	2,68	2935,37	24,09	0,15	0,41
600	10%	11,26	2,46	2750,48	22,15	0,15	0,42
600	15%	11,02	3,51	3343,16	29,15	0,17	0,45

5.2. RESULTADOS PRUEBAS DE IMPACTO

Luego de la realización y análisis de resultados de las pruebas de tracción, se seleccionaron muestras con dos configuraciones para ser probadas mediante la prueba anti-punzón: la configuración con carburo de silicio de granulometría 600 al 15 % p/p y la configuración con carburo de silicio de granulometría 320 al 5 % p/p, ambas de doce placas prensadas a 130 °C y 1 MPa. Las razones por las cuales se seleccionaron dichas placas se especifican en la sección de

A Además, como referencia, se probó una muestra de doce placas sin carga, prensada bajo las mismas condiciones de las dos anteriores.

Luego de someter al impacto cada una de las muestras, se realizó la medición del material testigo, con el fin de medir la longitud de la marca dejada por la cuchilla y, a partir de esta, determinar la profundidad de penetración de la misma a través de la muestra.

Fotografía 10. Huella dejada en el papel testigo por la cuchilla luego del impacto



Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a las probetas especificadas anteriormente, se presentan en la Tabla 14. Resultados pruebas de impacto.

Tabla 14. Resultados pruebas de impacto.

Probeta	Impacto	Peso (g)	Velocidad [m/s]	Energía [J]	Longitud de corte [mm]	Penetración [mm]	Penetración /energía [mm/J]	prom [mm/J]
12 capas sin carga	1	1911	4,99	23,82	9,63	22,83	0,95	0,84
	2	1911	5,03	24,19	7,79	18,47	0,77	
	3	1911	5,00	23,88	8,04	19,06	0,79	
12 capas con carga 320 al 5%	1	1911	5,00	23,93	8,45	20,03	0,83	0,97
	2	1911	5,00	23,93	10,02	23,75	0,99	
	3	1911	5,00	23,88	11,1	26,31	1,10	
12 capas con carga 600 al 15%	1	1911	5,02	24,08	6,76	16,02	0,67	0,75
	2	1911	5,00	23,93	7,56	17,92	0,75	
	3	1911	5,04	24,24	8,4	19,91	0,83	

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se realiza un análisis de los resultados que fueron obtenidos tanto en las pruebas de tracción como en las diferentes pruebas de impacto que fueron realizadas.

6.1. ANÁLISIS RESULTADOS PRUEBAS DE TRACCIÓN

Se determinó que las pruebas de tracción realizadas fueron válidas, debido a que la falla de todas las muestras se presentó dentro de la zona calibrada y en ninguna de las pruebas se presentó deslizamiento de la muestra.

Fotografía 11 Falla en muestra de laminado reforzado con carburo de silicio, granulometría 600 al 15 %.



Las propiedades obtenidas para cada una de las muestras, fueron comparadas, con el fin de determinar aquellas que presentaron las mejores propiedades. Para tal fin, se elaboraron diferentes gráficos para cada una de las propiedades, de manera que dicha

comparación se puede observar de manera directa con respecto a las probetas probadas. A continuación se presentan las diferentes gráficas utilizadas para realizar la comparación mencionada anteriormente.

6.1.1. Tenacidad

La tenacidad está relacionada directamente con el volumen de partículas y el volumen de total del compuesto, a mayor volumen de partículas mayor será la tenacidad obtenida. La probeta de carburo de silicio que mayor tenacidad presentó, fue la que tiene un carburo de silicio 320 al 5% p/p, como se muestra en la Gráfica 4. Resultados comparativos de tenacidad obtenidos en la prueba de tracción

Gráfica 4. Resultados comparativos de tenacidad obtenidos en la prueba de tracción

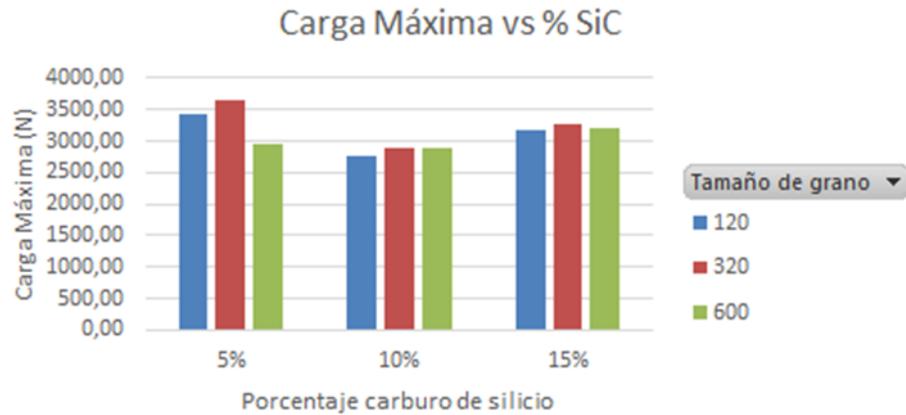


6.1.2. Carga máxima

En la Gráfica 5. Resultados comparativos carga máxima prueba de tracción, se observa que las probetas al 5% p/p, son las probetas que obtuvieron valores de carga máxima más

altos, esto se debe a que el material compuesto no presenta una sobre saturación entre las capas de Tetra-Pak y carburo de silicio.

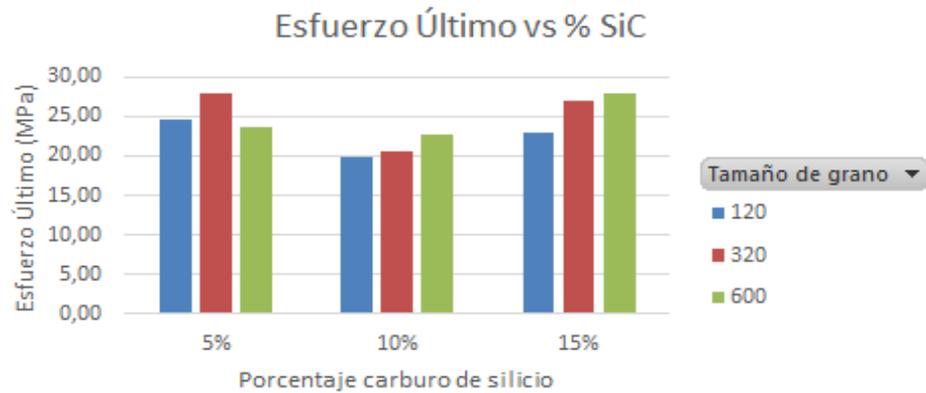
Gráfica 5. Resultados comparativos carga máxima prueba de tracción



6.1.3. Esfuerzo último

Al tenerse una relación menor entre el volumen de carburo de silicio y el volumen total de la matriz polimérica, el compuesto tiene menores propiedades de esfuerzo último. Las probetas de carburo de silicio de granulometría 600, fueron las que arrojaron un esfuerzo último mayor en comparación con los otros dos tipos de tamaño de grano utilizado. Cabe anotar que la homogeneidad en el esparcimiento de las cargas en las diferentes probetas falladas, no se logra completamente.

Gráfica 6. Resultados comparativos esfuerzo último pruebas de tracción



6.1.4. Deformación máxima

Las probetas que arrojaron mejores resultados de deformación máxima, fueron las probetas con carburo de silicio de granulometría 120, esto debido a que las partículas con mayores tamaños de grano, permiten una adhesión mayor entre las capas de polietileno, maximizando la ductilidad del polietileno. Adicionalmente a mayor relación de volumen de partículas con respecto al volumen de la matriz polimérica, la deformación tiende a ser menor.

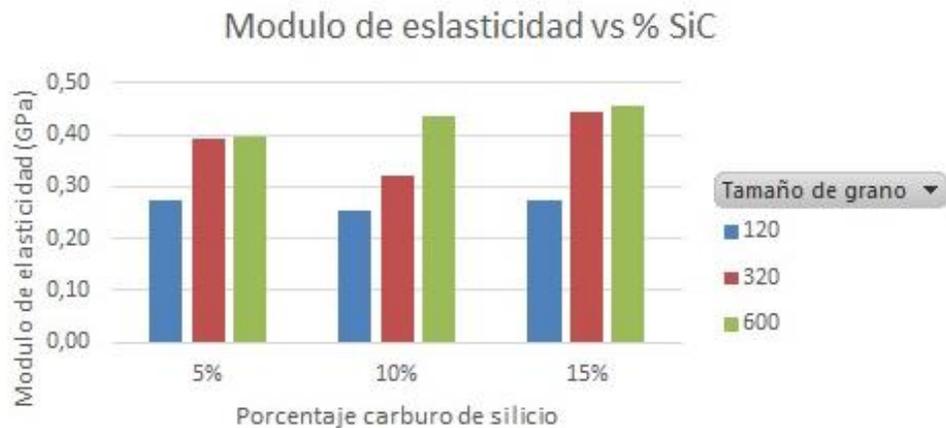
Gráfica 7. Resultados comparativos deformación máxima pruebas de tracción



6.1.5. Módulo de elasticidad

De acuerdo con la gráfica 8, el módulo de elasticidad con resultados más altos en las pruebas realizadas en este trabajo de grado, están asociados a una homogeneidad en la aplicación de la carga y al volumen total de las partículas que intervienen en la conformación de la matriz. Debido a estas dos características, las probetas que mejores resultados presentaron para esta propiedad, fueron aquellas fabricadas con carburo de silicio al 15% p/p.

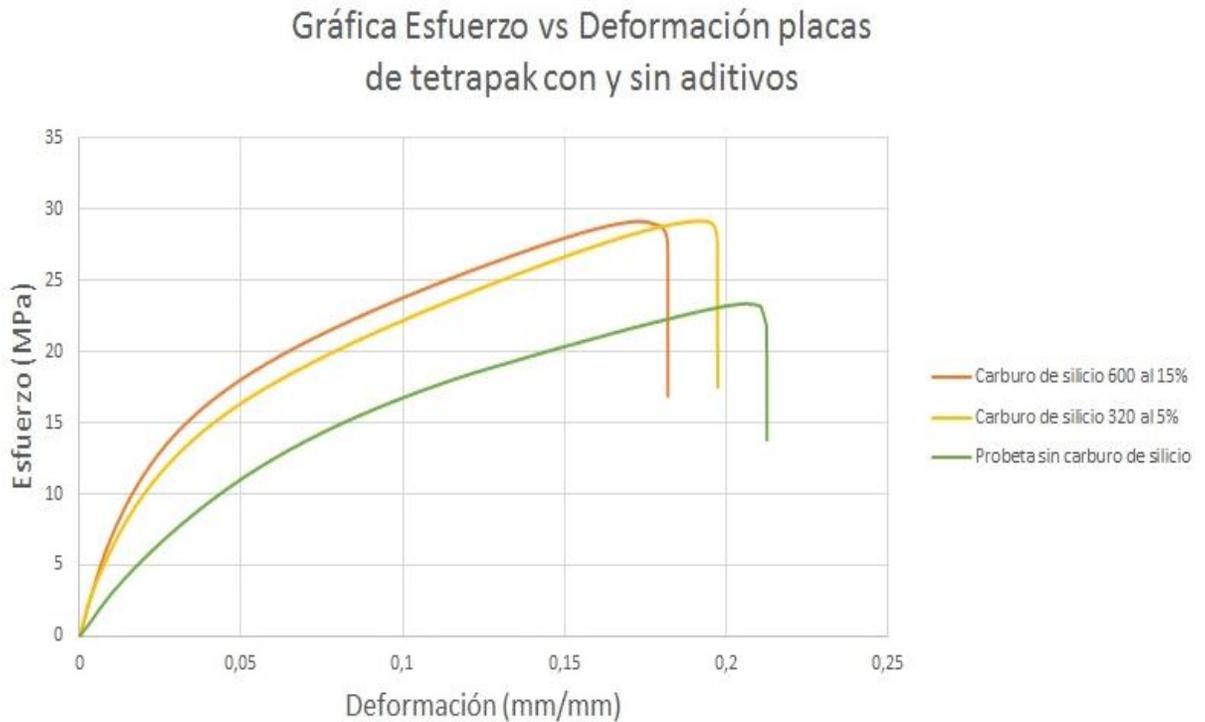
Gráfica 8. Resultados comparativos módulo de elasticidad pruebas de tracción



Estudios realizados han indicado que entre menor sea el tamaño de grano y más homogénea sea la distribución de la carga, aumentará el comportamiento dilatante de las suspensiones [45]; mejorando el comportamiento frente a impacto del material. Debido al tamaño de grano del carburo de silicio 120, no fue posible lograr una distribución homogénea, pues al ser las partículas tan gruesas, no se adherían al Tetra-Pak y se concentraban en punto específicos. Debido a lo anterior, las configuraciones en las cuales se incluyó carburo de silicio de granulometría 120, fueron descartadas para ser usadas en la prueba de punzón, debido a que los resultados obtenidos en la prueba de tracción realizada, no fueron concluyentes.

En general, las probetas que mejores propiedades obtuvieron en promedio de cada una de las propiedades evaluadas (tenacidad, carga máxima, deformación, esfuerzo último, módulo de elasticidad y esfuerzo de fluencia) en las pruebas de tracción, fueron la probeta con 5% de carburo de silicio de granulometría 320 y la probeta con 15% de carburo de silicio de granulometría 600, ambas de 6 capas. Por otra parte, las probetas fueron comparadas con los resultados obtenidos para la prueba de tracción de la probeta de 6 capas sin carga prensada bajo las mismas condiciones, con el fin de determinar la variación de las propiedades con respecto a la carga utilizada.

Gráfica 9. Esfuerzo Vs. Deformación placas de Tetra-Pak con y sin aditivos



De esta comparación se determinó que, efectivamente las cargas utilizadas incrementaron las propiedades que favorecen al material frente al impacto, obteniendo para la probeta con carburo de silicio de granulometría 600 al 15 % p/p, un valor de tenacidad de 3,86 MPa; para la probeta con carburo de silicio de granulometría 320 al 5 % se obtuvo una tenacidad de 4,06 MPa; ambos resultados, por encima de la tenacidad obtenida para la probeta sin carburo de silicio (3,34 MPa). Los datos obtenidos son aproximados y fueron calculados por medio del método del área bajo la curva.

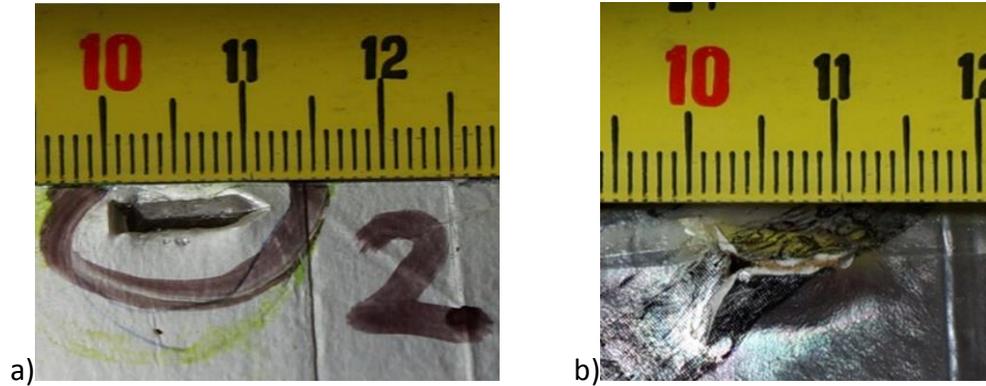
6.2. ANÁLISIS RESULTADOS PRUEBAS DE IMPACTO

La probeta con la que mejores resultados se obtuvo en el ensayo de impacto o prueba anti-punzón, fue la probeta con carburo de silicio de granulometría 600 y 15 % p/p, al absorber mayor energía en el impacto y presentar una penetración inferior a las reportadas en los otros ensayos; esto debido a que cuenta con una tenacidad, una deformación máxima y un módulo elástico superior al máximo de las demás muestras como lo mostraron los ensayos de tracción, siendo estas propiedades las más representativas a la hora de evaluar la resistencia al impacto de un material determinado.

Este resultado está asociado entre otras cosas, a que se pueden presentar discontinuidades en la concentración de la carga de carburo de silicio. Para efectos de este trabajo se identificó que no es fácil realizar un esparcimiento homogéneo de las partículas de carburo de silicio en la matriz de polietileno que se encuentra presente en las cajas de Tetra-Pak. En las probetas con tamaño de grano 120 no fue posible lograr un esparcimiento homogéneo de las partículas de carburo de silicio; esto debido al gran tamaño de las partículas con respecto a las otras granulometrías utilizadas, lo que hacía que la carga se comportara como pequeñas esferas que se aglomeraban en puntos específicos de la lámina. En el caso del carburo de silicio de granulometría 320 y 600, se logró homogenizar de una forma adecuada la carga en la matriz de polietileno, pues el tamaño de dichas partículas permitía que estas se comportaran como polvo adhiriéndose al polietileno de la lámina de Tetra-Pak en donde eran esparcidas.

Sin embargo, de las muestras probadas, ninguna cumplió los criterios de aceptación planteados por ambas normas (*HOSDB Body Armour Standards for UK Police* [2] y *Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06* [3]), es decir, máximo 7 mm de penetración. Las huellas dejadas por la cuchilla en cada una de las muestras, tanto en la cara de ingreso de la cuchilla como por la cara de salida, se presentan a continuación.

Fotografía 12. Huella dejada por el impacto de la cuchilla. a) En la cara de ingreso. b) en la cara de salida.



Luego de esto, se realizaron otra serie de impactos a configuraciones prensadas a 130 °C y 1 MPa sin ningún tipo de carga, con el fin de determinar el número mínimo de capas con las cuales el material cumple con los criterios de aceptación. Se determinó que con 24 capas de Tetra-Pak prensadas bajo las condiciones anteriormente mencionadas, el material cumple con los requerimientos establecidos para ser aceptado como material de blindaje KR1 + SP1.

CONCLUSIONES

Como conclusiones del desarrollo de este trabajo de grado se pueden establecer las siguientes:

- Se evidenció claramente que la distribución de las cargas en el material influyó de manera crucial en los resultados obtenidos. Si no se obtiene un esparcimiento de las cargas que se considere homogéneo, no es viable determinar las propiedades obtenidas en la prueba de tracción, ya que todos los resultados presentan comportamientos atípicos. Similarmente sucede con la prueba de impacto anti-punzón, pues dependiendo del punto en donde se realice el impacto, se presentan penetraciones completamente diferentes. A partir de lo anterior, se comprobó la importancia de una distribución homogénea de la carga en una matriz polimérica para mejorar las prestaciones del aglomerado de láminas de tetra pack.
- El dispositivo elaborado para la realización de las pruebas de impacto así como la metodología planteada para el análisis de las mismas, es aplicable en todo tipo de materiales; sin embargo, para la obtención de resultados determinantes, es importante garantizar la homogeneidad del material a probar. Además, las pruebas realizadas en este dispositivo son válidas para ambas normas seguidas en este trabajo, y su validez se soporta en la calibración de los dispositivos utilizados para la medición de las diferentes variables involucradas en este estudio y en la prueba de repetitividad realizada.
- La temperatura utilizada para la realización de las muestras a partir de láminas de Tetra-Pak, fue de 130°C; temperatura inferior a la usada comúnmente en procesos de reciclado de Tetrapak (180 °C – 220 °C, con el fin de lograr la fusión total del

polietileno). De esta forma, se da una alternativa de reutilización del Tetra-Pak en la cual además se reduce el consumo energético necesario para su obtención. Además de esto, el polietileno contenido en las láminas de Tetra-Pak, se usa como matriz para las cargas utilizadas, evitando el uso de resinas provenientes, en la mayoría de los casos, de hidrocarburos.

- Con base en los resultados obtenidos de los ensayos de tracción e impacto se puede observar que la configuración del material compuesto que mostro mejor desempeño es la que contenía carburo de silicio de granulometría 600 y 15% p/p, ya que, evaluando conjuntamente las propiedades obtenidas en la prueba de tracción, fue la que más incrementó tuvo en las propiedades relevantes para el impacto. Además, ante la prueba de punzón, fue la que obtuvo menor relación de penetración con respecto a la energía aplicada.

Con lo anterior, se concluye que las configuraciones de Tetra-Pak reforzadas a partir de carburo de silicio de granulometría 600 y 15% p/p, son potencialmente aptas para ser usadas como material de protección ante impacto, basándose en los resultados numéricos de las pruebas realizadas.

TRABAJOS FUTUROS

Para próximos estudios, se recomienda desarrollar un mecanismo para la extracción de fibras de aproximadamente 5 mm de ancho, de las cajas de Tetra-Pak reutilizado; esto, debido al amplio campo de acción que, de forma probada, tiene este material en la industria actual, desde la elaboración de materiales compuestos, hasta la aplicación de este material en la industria textil y de diseño en general.

Otro estudio que puede ser realizado a partir de este trabajo, consiste ensamblar diferentes tipos de cuchillas y punzones en el dispositivo para pruebas de impacto, con el fin de determinar el comportamiento frente a impacto de un material determinado frente a estos diferentes elementos.

Se recomienda además, para hacer más versátil el dispositivo para pruebas de impacto, diseñar un mecanismo adaptado a dicho dispositivo, con el cual pueda ser medida la aceleración del misil antes de que el impacto se genere y la desaceleración durante la penetración.

REFERENCIAS

- [1] ASTM, *Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle*. pp. 1–31.
- [2] J. Croft and D. Longhurst, *HOSDB Body Armour Standards for UK Police (2007) Part 3: Knife and Spike Resistance*, no. 39. 2007.
- [3] NIST, “Stab Resistance of Personal Body Armor, NIJ Standard-0115.00,” *Stab Resistance of Personal Body Armor, NIJ Standard-0115.00*. 2000.
- [4] Tetra Pak Ltda, “Las seis barreras de protección del empaque.” [Online]. Available: <http://www.tetrapak.com/co/las6capasdeproducción>. [Accessed: 06-Nov-2014].
- [5] V. José and J. HM, “ECOLOPACK - REDUCE / REUSA / RECICLA,” *Septiembre 15, 2013*. [Online]. Available: <http://tetrapakmedioambiente.wordpress.com/2013/09/15/tutorial/>. [Accessed: 05-Nov-2011].
- [6] D. Askeland, *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Tercera Ed. International Thomson Editores - PWS Publishing Company.
- [7] C. F. Gerbaudo, M. D. Roca, and D. R. Hünicken, “Materiales compuestos,” Universidad nacional de Córdoba, 2002.
- [8] “Materiales compuestos,” *11 de Julio, 2011*. [Online]. Available: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/materiales-compuestos.html>.
- [9] Universidad politécnica de valencia, “Compuestos reforzados con fibras.” [Online]. Available: http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/pfcm15_9_2.html. [Accessed: 06-Nov-2014].
- [10] Universidad politécnica de valencia, “Compuestos reforzados con partículas.” [Online]. Available: http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/pfcm15_9_1.html. [Accessed: 06-Nov-2014].
- [11] A. Herráez, “Las asombrosas estructuras del carbono : fullerenos , grafenos y nanotubos Fullerenos.” [Online]. Available: <http://www.cdImadrid.org/cdl/archivospdf/ciencias/estructuras-carbono.pdf>. [Accessed: 02-Sep-2012].

- [12] M. J. Rivas, J. R. Ganzer, and M. L. Cosme, “Aplicaciones actuales y futuras de los nanotubos de carbono,” Madrid, 2007.
- [13] Ecured, “Alúmina.” [Online]. Available: <http://www.ecured.cu/index.php/Alúmina>. [Accessed: 06-Nov-2014].
- [14] Goodfellow, “Alúmina (Al₂O₃).” [Online]. Available: <http://www.goodfellow.com/S/Alumina.html>. [Accessed: 06-Nov-2014].
- [15] “Cerámica estructural de carburo de silicio,” *18 de julio*, 2006. [Online]. Available: www.textoscientificos.com/quimica/ceramicas-avanzadas/carburo-silicio.
- [16] W. F. Smith and J. Hameshi, “Propiedades mecánicas de metales I,” in *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales.*, 2006.
- [17] D. P. Ospina, “ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO FRENTE AL IMPACTO DE ESPUMAS DE POLIURETANO REFORZADAS CON SUSPENSIONES DE ALMIDÓN.,” Universidad Pontificia Bolivariana, 2014.
- [18] Tetra Pak Ltda, “Tecnologías de reciclado,” 2010. [Online]. Available: http://www.tetrapak.com/ar/environment/recycling_and_recovery/recycling_technologies/pages/default.aspx. [Accessed: 29-Aug-2012].
- [19] J. Rivero, “Concienciación Tetrapak,” 2011. [Online]. Available: <http://isla0verde.blogspot.com/2011/05/concienciacion-tetrapak.html>. [Accessed: 18-Jul-2012].
- [20] Futuro verde, “TETRAPAK lo nuevo en bolsos y billeteras,” *7 de octubre*, 2009. [Online]. Available: <http://www.futuroverderd.com/tetrapak-lo-nuevo-en-bolsos-y-billeteras/>.
- [21] Tetra Pak Ltda, “Comunicado de prensa: La responsabilidad social corporativa también incluye el medio ambiente,” 2009. [Online]. Available: <http://www.tetrapak.com/co/SiteCollectionDocuments/Comunicado Medio Ambiente jun09.pdf>. [Accessed: 29-Aug-2012].
- [22] J. M. Obando and M. Escobar, “Modelación del proceso de recuperación parcial de envases de tetra pak,” *Revista EIA*, vol. 11, Medellín, pp. 157–167, Jul-2009.
- [23] J. A. Cuervo and J. Arango, “Fabricación y caracterización de placas aglomeradas obtenidas a partir de Tetra Brik reciclado,” Universidad Pontificia Bolivariana, 2010.

- [24] T. Sjøtrø, E. Froyn, L. Macgregor, L. Grung, R. Knutsen, and Ø. Lied, "PRØVETEKST WHO TAKES THE BULLET ? The impact of small arms violence," 2005.
- [25] M. V. Hosur, U. K. Vaidya, C. Ulven, and S. Jeelani, "Performance of stitched/unstitched woven carbon/epoxy composites under high velocity impact loading," *Composite Structures*, vol. 64, no. 3–4, pp. 455–466, Jun. 2004.
- [26] G. B. TORRES, "COMPORTAMIENTO DE UN PANEL LAMINADO COMPUESTO A PARTIR DE MATERIALES POLIMÉRICOS Y CERÁMICOS ANTE EL IMPACTO DE UN PROYECTIL METÁLICO," UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2011.
- [27] a. Alavi Nia, S. B. Razavi, and G. H. Majzoubi, "Ballistic limit determination of aluminum honeycombs—Experimental study," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 488, no. 1–2, pp. 273–280, Aug. 2008.
- [28] M. Übeyli, H. Deniz, T. Demir, B. Ögel, B. Gürel, and Ö. Keleş, "Ballistic impact performance of an armor material consisting of alumina and dual phase steel layers," *Materials & Design*, vol. 32, no. 3, pp. 1565–1570, Mar. 2011.
- [29] M. Übeyli, R. O. Yıldırım, and B. Ögel, "Investigation on the ballistic behavior of Al₂O₃/Al₂O₂₄ laminated composites," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 196, no. 1–3, pp. 356–364, Jan. 2008.
- [30] P. Qiao, F. Asce, M. Yang, and F. Bobaru, "Impact Mechanics and High-Energy Absorbing Materials : Review," no. October, pp. 235–249, 2008.
- [31] E. Özşahin and S. Tolun, "Influence of surface coating on ballistic performance of aluminum plates subjected to high velocity impact loads," *Materials & Design*, vol. 31, no. 3, pp. 1276–1283, Mar. 2010.
- [32] E. Özşahin and S. Tolun, "On the comparison of the ballistic response of coated aluminum plates," *Materials & Design*, vol. 31, no. 7, pp. 3188–3193, Aug. 2010.
- [33] M. Mamivand and G. H. Liaghat, "A model for ballistic impact on multi-layer fabric targets," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37, no. 7, pp. 806–812, Jul. 2010.
- [34] a. a. Ramadhan, a. R. Abu Talib, a. S. Mohd Rafie, and R. Zahari, "High velocity impact response of Kevlar-29/epoxy and 6061-T6 aluminum laminated panels," *Materials & Design*, vol. 43, pp. 307–321, Jan. 2013.

- [35] a. R. Abu Talib, L. H. Abbud, a. Ali, and F. Mustapha, "Ballistic impact performance of Kevlar-29 and Al₂O₃ powder/epoxy targets under high velocity impact," *Materials & Design*, vol. 35, pp. 12–19, Mar. 2012.
- [36] Z. Zuoguang, W. Mingchao, S. Shuncheng, L. Min, and S. Zhijie, "Influence of panel/back thickness on impact damage behavior of alumina/aluminum armors," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 30, no. 4, pp. 875–887, Mar. 2010.
- [37] E. M. Soliman, M. P. Sheyka, and M. R. Taha, "Low-velocity impact of thin woven carbon fabric composites incorporating multi-walled carbon nanotubes," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 47, pp. 39–47, Sep. 2012.
- [38] P. S. Venkatanarayanan and a. J. Stanley, "Intermediate velocity bullet impact response of laminated glass fiber reinforced hybrid (HEP) resin carbon nano composite," *Aerospace Science and Technology*, vol. 1, pp. 1–9, May 2011.
- [39] E. Thostenson, C. Li, and T. Chou, "Nanocomposites in context," *Composites Science and Technology*, vol. 65, no. 3–4, pp. 491–516, Mar. 2005.
- [40] A. Morka and B. Jackowska, "Ballistic resistance of the carbon nanotube fibres reinforced composites - Numerical study," *computational materials science*, vol. 50, no. 4, pp. 1244–1249, 2011.
- [41] Q. Zeng, Z. Li, and Y. Zhou, "Synthesis and Application of Carbon Nanotubes," *Journal of Natural Gas Chemistry*, vol. 15, no. 3, pp. 235–246, Sep. 2006.
- [42] S. R. Bakshi, J. E. Tercero, and a. Agarwal, "Synthesis and characterization of multiwalled carbon nanotube reinforced ultra high molecular weight polyethylene composite by electrostatic spraying technique," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, no. 12, pp. 2493–2499, Dec. 2007.
- [43] S. K. García Castillo, "Análisis de laminados de materiales compuestos con precarga en su plano y sometidos a impacto," Universidad Carlos III de Madrid, 2007.
- [44] E. K. J. Chadwick, A. C. Nicol, J. V. Lane, and T. G. F. Gray, "Biomechanics of knife stab attacks," *Forensic Science International*, vol. 105, no. 1, pp. 35–44, Nov. 1999.
- [45] A. Srivastava, A. Majumdar, and B. S. Butola, "Improving the impact resistance performance of Kevlar fabrics using silica based shear thickening fluid," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 529, pp. 224–229, Nov. 2011.

ANEXO 1. CARTA DEL DIRECTOR

Medellín, noviembre de 2014

Señores
Comité Académico
Facultad de ingeniería mecánica
Medellín

Asunto: Dirección de trabajo de grado

Cordial saludo.

La presente tiene como objetivo confirmar mi intención de participar como Director en el desarrollo del Proyecto de Grado **Determinación de la viabilidad en la implementación del Tetra-Pak como posible material apto para usos de blindaje** que será desarrollando por los estudiantes **Laura Pareja Pérez, Andrés Felipe Vargas Oquendo y David Álvarez Herrera** con ID **000123900, 000124295 y 000123771** respectivamente.

Declaro además que, conozco el manual de Proyecto de Grado de la Escuela de Ingenierías de la UPB y los deberes y derechos que como Director esto implica. El desarrollo del proyecto se hará de conformidad con lo estipulado en dicho manual.

Anexo mi currículum.

Atentamente

Emigdio José Mendoza Fandino
CC. 11.004.693
Docente e investigador
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Pontificia Bolivariana

Patricia Fernández Morales
c.c. 43.582.009
Docente e investigador
Facultad de Ingeniería Industrial
Universidad Pontificia Bolivariana

ANEXO 2. CARTA DE PRESENTACIÓN DEL PROYECTO.

Medellín, noviembre de 2014

Señores
Comité Académico
Facultad de ingeniería mecánica
Medellín

Asunto: Dirección de trabajo de grado

Cordial saludo.

La presente tiene como objetivo presentar para su estudio por parte de Consejo de Facultad, el Proyecto de Grado titulado: **Determinación de la viabilidad en la implementación del Tetra-Pak como posible material apto para usos de blindaje.**

Manifestamos además que, conocemos el manual de Proyecto de Grado de la Escuela de Ingenierías de la UPB y los deberes y derechos que como Estudiantes esto implica. El desarrollo del proyecto se hará de conformidad con lo estipulado en dicho manual.

Atentamente,

Laura Pareja Pérez
CC. 1.128.283.702
Estudiante

Andrés Felipe Vargas Oquendo
CC. 1.037.600.150
Estudiante

David Álvarez Herrera
CC. 1.037.607.220
Estudiante