



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

SELECCIÓN DE MATERIALES PARA UN
ÓPTIMO DESEMPEÑO ANTE IMPACTOS
BALÍSTICOS

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO
P R E S E N T A:
OSCAR VIRGILIO ASCENCIO PÉREZ



DIRECTOR DE TESIS:
M.I. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGÁN

MÉXICO, D.F.

2006



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

	Página
1. ANTECEDENTES	1
1.1 Panorama actual	1
1.2 Impacto de proyectiles	3
1.3 Fractura	4
1.4 Bajos impactos	5
1.5 Altos impactos	6
2. MATERIALES PARA BLINDAJE	10
2.1 Influencia de las propiedades mecánicas sobre los procesos del evento balístico	10
2.2 Clasificación de los materiales para blindaje	11
2.2.1 Metálicos	11
2.2.2 Cerámicos monolíticos	16
2.2.3 Compuestos laminares	18
2.3 Comparación entre familias de materiales	24
3. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE MATERIALES	27
3.1 Planteamiento del problema	27
3.2 Análisis de los materiales	28
3.2.1 Resistencia balística	28
3.2.2 Comparación entre el desempeño balístico de los materiales	35
3.3 Selección de materiales	58

4. RESULTADOS	62
5. CONCLUSIONES	68
6. BIBLIOGRAFÍA	72

OBJETIVO:

Seleccionar un material o combinación de materiales que sean capaces de resistir impactos balísticos correspondientes al nivel D según la norma NOM-142-SCFI-2000 cumpliendo con restricciones específicas de peso y costo.

PRÓLOGO

El blindaje automotriz tiene sus raíces en la industria militar, Leonardo da Vinci concibió en 1492 un artefacto de combate cubierto accionado por poleas pero no fue sino hasta la invención del motor de combustión interna cuando apareció el primer vehículo blindado.

Durante mucho tiempo el desarrollo del blindaje se centró solamente en los vehículos militares y durante la Primera Guerra Mundial se construyó el primer tanque movido por orugas, pero fue hasta los años 20's cuando a petición de Al Capone se comenzaron a blindar automóviles distintos a los de uso castrense.

Tradicionalmente el blindaje automotriz se ha destinado en mayor medida a la protección de dirigentes políticos, empresarios, directivos de grandes empresas y para el transporte de valores, sin embargo hoy en día se ha popularizado cada vez más el uso de automóviles blindados debido al incremento de la inseguridad existente en las grandes orbes.

Los cuerpos policíacos también han tenido que recurrir a la protección de sus vehículos pero de manera distinta debido a que estratégicamente les es muy útil blindar únicamente las puertas para utilizarlas como escudo en caso de algún enfrentamiento incrementando de manera modesta el peso de sus automóviles.

En general la calidad de los blindajes se mide comparando el desempeño balístico mostrado contra el costo y el peso adicionado al vehículo, esta última característica debido a que a medida que un automóvil pierda su capacidad de movimiento se volverá más vulnerable. Existen en el mercado diversas clases de materiales destinados a esta aplicación no obstante encontrar un balance óptimo entre los factores mencionados es una tarea complicada.

Es por todo esto que el presente trabajo tiene como propósito mostrar una propuesta para el desarrollo de esta última clase de protección a partir de un proyecto llevado a término durante el año 2003 para una empresa de la iniciativa privada dedicada a este giro.

1. ANTECEDENTES

1.1 Panorama actual

El blindaje automotriz ha cobrado gran relevancia a nivel mundial a consecuencia de los altos índices de inseguridad que se presentan en las distintas regiones, así tenemos por ejemplo: el narcotráfico, el secuestro, el robo a mano armada, los conflictos étnicos, o bien, la guerrilla que tradicionalmente había atacado a países de Centro y Sudamérica pero que en la última década ha tenido repercusiones en nuestro país. Se pueden seguir mencionando diferentes tipos de problemáticas, sin embargo, la lista puede ser muy larga, lo que resulta importante retomar de esto es en primer lugar que cada país tiene características propias de los actos violentos que se viven a diario y en segundo lugar que unido a cada tipo de problemática esta la clase de arma bajo la cual estamos expuestos.

Esto ha llevado a que los cuerpos policiacos, militares y hasta población civil se vean en la necesidad de protegerse contra atentados.

A pesar de que en México la mayor cantidad de ilícitos se comenten con armas cortas las fuerzas policiacas no están exentas de verse envueltas en un enfrentamiento donde estén involucrados altos calibres por lo que sus necesidades de protección serán mayores que las de la población civil.

PORCENTAJE DE ATENTADOS EN MÉXICO POR NIVELES DE BLINDAJE

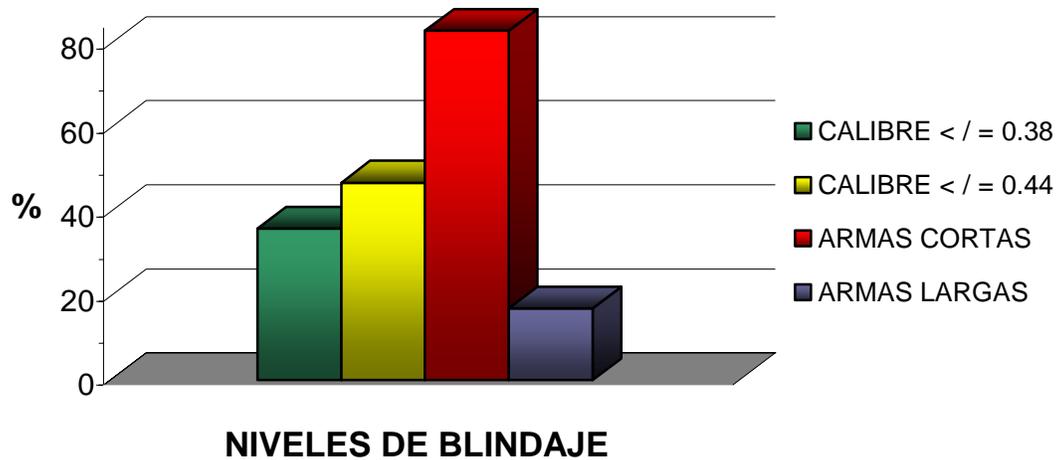


FIGURA 1.1

TIPO DE ARMA	TOTAL	%	% ACUM
CALIBRE			
.22 LR	12	8.16	8.16
.25 AUT	3	2.04	10.20
.32 AUTO	0	0.00	10.20
.380 AUTO	8	5.44	15.65
.38 ESPECIAL	21	14.29	29.93
.38 SUPER	9	6.12	36.05
.45 AUTO	20	13.61	49.66
.40S&W	4	2.72	52.38
10MM AUTO	0	0.00	52.38
.41 MAG	0	0.00	52.38
9 MM	43	29.25	81.63
.357 MAGNUM	1	0.68	82.31
.44 MAGNUM	1	0.68	82.99
SUBTOTAL ARMAS CORTAS	122	83	82.99
AK 47	21	14.29	14.29
AR 15	4	2.72	17
SUBTOTAL ARMAS LARGAS	25	17	17
T O T A L E S	147	100	100

INFORMACIÓN RECABADA DEL PERIÓDICO REFORMA
DE MAYO DE 2001 A ABRIL DE 2002

TABLA 1.1

El blindaje automotriz consiste en proteger el habitáculo del vehículo colocando materiales capaces de soportar el impacto de balas sin dejarlas pasar hacia el interior evitando así algún daño en el personal que lo tripula. Proteger un automóvil contra este tipo de atentados tiene diversas repercusiones una de las cuales es la adición de peso al vehículo y que está en relación directa al nivel de protección, mientras mayor sea el nivel de protección mayor será el peso adicionado, el desgaste del vehículo y menos eficiente su desempeño dinámico.

Otra consecuencia intrínseca al blindaje de un automóvil es la pérdida de funcionalidad o de ajuste en diversos elementos ya que al proteger el habitáculo se requiere colocar materiales de espesores variados que no fueron pensados en el desarrollo original del vehículo, ocasionando interferencia entre elementos móviles (vidrios, puertas, etc.) y desajustes tanto en elementos móviles y estáticos.

Estas repercusiones hacen de suma importancia contar con materiales ligeros de gran resistencia al impacto capaces de adaptarse a las formas de los vehículos alterando lo menor posible su funcionalidad y al menor costo.

1.2 Impacto de proyectiles

La carga de impacto ocurre cuando un objeto golpea a otro, de modo que se desarrollan grandes fuerzas entre los objetos durante un espacio de tiempo muy corto⁽¹⁾, debido a esta alta velocidad con la que es aplicado el esfuerzo los materiales pueden tener un comportamiento más frágil comparado con el que se observa en una carga de tensión.

Los impactos se pueden clasificar en elásticos y plásticos, la diferencia entre ellos es la deformación que puedan sufrir los cuerpos que se impactan, en un impacto perfectamente plástico no hay periodo de restitución y los dos cuerpos permanecen unidos después del impacto, en el caso perfectamente elástico los cuerpos se alejarán con la misma velocidad con la que se acercaron antes del impacto. Esto tendrá repercusiones cinéticas y dinámicas distintas debido a que parte de la energía cinética que posee cada uno de los cuerpos se absorberá convirtiéndose en energía de deformación, siendo está un factor importante en el estudio de los fenómenos de impacto.

Muy ligada a la energía está el área sobre la cual la carga de impacto es aplicada, ya que a medida que el área disminuye el cociente de dividir la energía de impacto entre el área incrementa volviéndose crítica. Esto quiere decir que si disminuye el área existe menos material para absorber la energía de impacto y por lo tanto el esfuerzo aumenta.

Cuando la energía por milímetro cuadrado es muy alta llega a presentarse indentación o penetración localizada, por lo que la dureza y el tipo de material del cuerpo que impacta tendrá un efecto importante.

1.3 Fractura

Es la separación de un cuerpo sujeto a un esfuerzo, en dos o más partes.

Existen distintos tipos de fractura durante el impacto y se clasifican de la siguiente forma:

- Frágil.- generalmente comprende la rápida propagación de una grieta, con el mínimo de absorción de energía y de deformación plástica. Este tipo de fractura ocurre en metales de alta resistencia mecánica o en metales con baja ductilidad y tenacidad. Además, incluso metales normalmente dúctiles pueden fallar de manera frágil a bajas temperaturas, en secciones muy gruesas o a grandes tasas de deformación (impacto) o cuando los defectos juegan un papel importante. Frecuentemente se observan fallas frágiles cuando es el impacto en vez de la sobrecarga lo que causa la falla⁽²⁾.

- Dúctil.- ocurre después de una considerable deformación plástica previa a la falla. La falla de la mayoría de los materiales dúctiles policristalinos ocurre con una fractura copa-y-cono, asociada con la formación de un cuello en una probeta tensil. La fractura empieza con la formación de cavidades en el centro de la región en forma de cuello. Bajo un esfuerzo aplicado continuo, las cavidades se unen para formar una grieta en el centro de la

probeta. La grieta avanza hacia la superficie de la probeta en una dirección perpendicular al esfuerzo aplicado. La culminación de la fractura ocurre rápidamente a lo largo de una superficie que hace un ángulo de aproximadamente 45° con el eje ténsil⁽²⁾.

Los impactos se pueden clasificar como altos y bajos dependiendo de la influencia que tenga la onda de propagación de esfuerzos a través del espesor del material impactado.

Una forma sencilla de distinguir entre los altos y los bajos impactos es por medio de la deformación por compresión del material, calculando ésta como:

$$\varepsilon = V_0/c$$

Donde V_0 es la velocidad del proyectil y c la velocidad del sonido en dirección transversal del espécimen⁽³⁾. La deformación típica para calcular la velocidad de transición es de entre 0.5 y 1.0%, para algunos materiales compuestos con matriz epóxica se ha determinado que la velocidad de transición entre un bajo y un alto impacto es de entre 10 y 20 m/s.

1.4 Bajos impactos

Como ejemplo de este tipo de impactos pueden citarse aquellos propios de los procesos de manufactura o la caída de algún cuerpo sobre algún elemento estructural.

Se estudian tomando como consideración una carga que la carga que ocurre durante el impacto es cuasi-estática y bajo esta hipótesis se han desarrollado modelos donde el cuerpo impactado se simula mediante un resorte donde la energía que almacena éste último corresponde a la energía de deformación del material impactado⁽¹⁾.

También se han tratado de estudiar mediante balances de energía considerando que la energía cinética que posee el proyectil antes del

impacto se transforma en energía de deformación y energía cinética residual⁽⁵⁾.

1.5 Altos impactos

Esta clase de impactos también suele llamarse impactos balísticos ya que los daños que provocan los proyectiles a velocidades mayores a las de transición se asemejan a los efectos que causan las municiones disparadas por armas de fuego⁽³⁾.

Existen diversos autores que han tratado de modelar estos impactos, sin embargo, la mayoría de estos modelos incluyen factores y/o coeficientes que se obtienen de manera experimental y que dependerán de las condiciones específicas tanto del evento como de los materiales involucrados.

Como se mencionó anteriormente, los materiales son más susceptibles a presentar un comportamiento frágil a medida que la tasa de deformación aumenta y el efecto de la onda de propagación de la deformación cobra importancia por lo que para el presente trabajo se considerarán como altos impactos aquellos en los que la velocidad del cuerpo impactante es mayor a 700 m/s, de tal forma que los proyectiles disparados por un arma de fuego de alto poder cumplen con esta definición.

Para estandarizar la nomenclatura en cuanto a proyectiles disparados por arma de fuego y al nivel de protección que pueden ofrecer los distintos materiales contra el impacto de diversas municiones se creó en México la norma NOM-142-SCFI-2000¹ debido a que una misma arma puede disparar proyectiles con características distintas como masa, dimensiones y velocidad causando diferentes efectos sobre los materiales que impactan.

¹ La norma se puede consultar en www.amba.com.mx

Con la finalidad de describir ordenadamente algunos ejemplos de altos impactos se recurre a esta norma de la cual se extrae la siguiente tabla:

Nivel de protección	Energía del proyectil en joules	Calibre	Peso de la ojiva en gramos	Tipo de ojiva	Velocidad mínima del proyectil en metros por segundo	Tipo de arma
Nivel c plus	1746.69	5.56 x 45	3.56	EXPANSIVO	990.60	RIFLE
Nivel c plus	1568.47	5.56 x 45	3.88	S. E. PLOMO	899.16	RIFLE
Nivel c plus	1729.80	5.56 x 45	4.00	ENCAMISADO	930.00	RIFLE
Nivel D	3659.83	7.62 x 51	9.70	EXPANSIVO	868.68	RIFLE
Nivel D	3467.05	7.62 x 51	9.53	ENCAMISADO TOTAL	853.44	RIFLE
Nivel D	3641.62	7.62 x 51	11.67	SEMIENCAMISADO (PUNTA BLANDA)	790.00	RIFLE
Nivel D	3823.38	7.62 x 63	9.72	ENCAMISADO TOTAL	886.96	RIFLE
Nivel D	3951.83	7.62 x 63	11.67	SEMIENCAMISADO (PUNTA BLANDA)	822.96	RIFLE
Nivel E	2219.45	7.62 x 39	7.96	PERFORANTE	746.76	RIFLE
Nivel E	2344.92	7.62 x 39	8.41	PERFORANTE	746.76	RIFLE
Nivel E	1488.31	5.56 x 45	3.56	PERFORANTE	914.40	RIFLE
Nivel E	1568.47	5.56 x 45	3.88	PERFORANTE	899.16	RIFLE
Nivel E	1746.69	5.56 x 45	3.58	PERFORANTE	990.60	RIFLE
Nivel E	1903.70	5.56 x 45	3.88	PERFORANTE	990.60	RIFLE
Nivel E	3784.34	7.62 x 51	10.03	PERFORANTE	868.68	RIFLE
Nivel E	4029.59	7.62 x 51	10.68	PERFORANTE	868.68	RIFLE
Nivel E	3423.45	7.62 x 51	9.75	PERFORANTE	838.00	RIFLE

Para entender mejor esta tabla se pueden explicar las columnas de la siguiente manera:

- Nivel de protección.- La norma mexicana mencionada ha clasificado la protección que provee un material balístico utilizando el alfabeto siendo la A la de menor protección y la E la máxima.
- Energía del proyectil.- Esta se obtiene calculando la energía cinética que posee el proyectil cuando es disparado, se utiliza la fórmula $E=1/2mv^2$.
- Calibre.- Esto se refiere en primera instancia al diámetro comercial de la munición en estos ejemplos se encuentran en milímetros pero en algunos proyectiles se acostumbra darlo en pulgadas. La segunda parte del calibre expresa la longitud de la munición antes de ser disparada, por lo que esta medida incluye la parte que contiene el detonante.
- Peso de la ojiva.- Es en realidad la masa del cuerpo impactante (ojiva)
- Tipo de ojiva.- Esta característica describe el tipo de material con que está hecha la ojiva, si lo clasificamos cualitativamente de manera ascendente por su capacidad de penetración veremos:
 - Expansivo
 - Semi encamisado
 - Encamisado
 - Perforante

Sin embargo, el daño que pueda causar una ojiva a un material está en función de varios factores como ya se mencionó.

- Velocidad mínima del proyectil.- Para que una prueba balística se considere como válida el proyectil debe alcanzar al menos dicha velocidad para asegurar que la energía de la ojiva corresponde a la norma. Se mide por medio de un instrumento electrónico llamado cronógrafo, el cual funciona mediante dos circuitos, el primero activa un cronómetro cuando el proyectil pasa a través del área de sensado, el segundo detiene el cronómetro funcionado de igual forma que el primero. El cálculo de la velocidad se realiza suponiendo un movimiento rectilíneo uniforme, por lo que ambas áreas de sensado deben estar a una distancia calibrada (normalmente un metro de distancia).

2. MATERIALES PARA BLINDAJE

2.1 Influencia de las propiedades mecánicas sobre los procesos del evento balístico

Sabemos que las propiedades mecánicas de los materiales son de suma importancia al diseñar blindajes capaces de soportar un amplio rango de municiones, pero antes es necesario conocer tanto las etapas del fenómeno balístico como la consecuencia energética del proyectil.

El fenómeno balístico se compone de tres etapas consecutivas fundamentales que son⁽⁶⁾:

1. *Identación*: Se refiere a la penetración parcial localizada sobre la superficie del material de blindaje por lo que la dureza relativa entre el proyectil y el blindaje será un factor muy importante durante este evento.
2. *Penetración*: Es el nombre que se le da al periodo durante el cual el proyectil ya ha indentado el blindaje y provoca una grieta en este último. La tenacidad del material de blindaje será la principal característica para soportar el impacto del proyectil y absorber la mayor cantidad de energía, también la fricción existente entre los dos cuerpos provocará que parte de la energía cinética se disipe en forma de calor.
3. *Salida*: Este evento sucede cuando una vez generada la grieta ésta se propaga hasta llegar a una magnitud tal que el proyectil alcanza a atravesar el blindaje.

La energía cinética y el momentum del proyectil serán las dos características primordiales que tendrá que soportar el material de blindaje por medio de tres mecanismos básicos⁽⁷⁾:

- Absorción de energía en forma de calor y deformación o fractura del material de blindaje.

- Desviación o rebote del proyectil, esto sucede cuando el impacto resultante tiene componentes elásticas y plásticas evidenciándose aún más si el ángulo de incidencia tiende a alejarse de 90°.
- Deformación mayor del proyectil.

Este último mecanismo es el más eficiente para soportar altos impactos debido a que la mayor cantidad de la energía cinética del proyectil es absorbida en la destrucción de éste y si existe un ligero rebote el momentum transferido al blindaje es mínimo.

2.2 Clasificación de los materiales para blindaje

Atendiendo los mecanismos que ocurren durante un impacto balístico se han desarrollado diversos materiales buscando combinaciones de propiedades mecánicas que satisfagan las características de cada uno de estos mecanismos. Los materiales utilizados en blindaje se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- Metálicos
- Cerámicos monolíticos
- Compuestos laminares

2.2.1 Metálicos

Son los más conocidos por su trayectoria cognoscitiva ya que comenzaron a usarse durante la Edad Media en Europa para la protección de los caballeros y la de sus equinos, sin embargo fue hasta principios del siglo XVIII en Francia que este grupo de materiales se comenzó a ocupar para blindar vehículos.

Actualmente se ocupan para el blindaje diversas clases de materiales metálicos como los aceros, aleaciones de aluminio y titanio.

En cuanto a aceros se refiere se han desarrollado básicamente dos tipos para esta aplicación. El primero es una familia de aceros con composiciones químicas dentro del rango que se muestra a continuación:

%					
C	Si	Mn	P	Cr	Mo
0.23 a 0.3	0.65 a 0.80	0.80 a 1.3	0.006 a 0.015	0.3 a 0.85	0.16 a 0.27

Estos aceros son templados y revenidos para lograr una combinación de dureza y tenacidad tales que en distintos espesores sean suficientes para resistir impactos de una gran variedad de proyectiles.

Las propiedades promedio de esta familia de aceros se muestran en la siguiente tabla:

Densidad (g/cm ³)	7.86
Esfuerzo último (ksi)	250
Elongación %	13
Dureza HB	500
Impacto Charpy (J/m)	100

* Datos obtenidos a partir de las especificaciones de los fabricantes.

El segundo tipo de acero para blindaje se compone de una cara frontal de alta dureza y una posterior de menor dureza, teniendo como propósito que la cara de impacto (frontal) fracture o deforme el proyectil mientras que la cara de soporte (posterior) absorba la energía y detenga el proyectil. Ambas caras son de acero aleado con Ni-Mo-Cr pero la cara de impacto posee mayor contenido de carbono lo cual le permite tener mayor dureza después del tratamiento térmico. Para unir ambas caras se emplea rolado en caliente hasta lograr una fuerte unión metalúrgica entre ambas.

Debido a las características intrínsecas de este material es necesario realizar las operaciones de corte y conformado en estado recocido y después realizar el tratamiento térmico para lograr las propiedades mecánicas requeridas.

Las propiedades promedio de estos aceros en estado recocido son:

Densidad (g/cm ³)	7.86
Esfuerzo último (GPa)	1.02
Elongación %	14.5
Impacto Charpy (J/m)	80
Dureza	
Cara de impacto HB	293
Cara de soporte HB	240

* Datos obtenidos a partir de las especificaciones de los fabricantes.

Ambas clases de acero pertenecen a la familia 4XXX en los que el molibdeno es utilizado generalmente en combinación de cromo, níquel o ambos. El molibdeno favorece ampliamente la formación de carburos y además tiene una gran relevancia mejorando la templabilidad de los aceros, este efecto lo logra desplazando el diagrama TTT del acero en cuestión hacia la derecha. La adición de alrededor de 1% de molibdeno a los acero de bajo carbono llega a duplicar su resistencia a la tracción⁽⁸⁾.

A continuación se incluye una tabla que muestra la influencia que tienen los elementos aleantes encontrados sobre las propiedades de los aceros descritos:

ELEMENTO	INFLUENCIA
Si	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Endurece la ferrita ◆ Tiene un efecto moderado mejorando la templabilidad ◆ Favorece la formación de grafito ◆ Incrementa las propiedades magnéticas del acero
Mn	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Fuerte endurecedor de la ferrita ◆ Mediano formador de carburos ◆ Mediano efecto sobre la templabilidad

Cr	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Endurece la ferrita medianamente ◆ Tiene un efecto moderado mejorando la templabilidad ◆ Favorece la formación de óxidos ◆ Mejora la resistencia a la abrasión y a la corrosión
Mo	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Favorece el endurecimiento por envejecimiento ◆ Tiene un fuerte efecto mejorando la templabilidad ◆ Es un fuerte formador de carburos ◆ Mejora la resistencia a la abrasión ◆ Mejora la resistencia a impactos
Ni	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Endurecedor de ferrita ◆ Mediano efecto sobre la templabilidad ◆ Formador de grafito ◆ En presencia del cromo retiene austenita ◆ Mejora la tenacidad de los aceros hipoeutectoides

Además de los aceros también es ampliamente utilizado el aluminio aleado, siendo el más conocido en estas aplicaciones el 2024-T3 del cual se muestra la proporción de elementos aleantes enseguida:

Si: 0.08 Cr: 0.016 Zn: 0.07 Ti: 0.03 V: 0.02
 Fe:0.22 Cu: 4.76 Mn: 0.65 Mg:1.38

El sufijo T3 indica que esta clase de aleación de aluminio es tratada térmicamente, trabajada en frío y envejecida naturalmente.

Las propiedades promedio de este material son las siguientes:

Densidad (g/cm ³)	2.78
Esfuerzo último (MPa)	482.6
Elongación %	18
Dureza HB	120
Impacto Charpy (J)	70

* Datos obtenidos a partir de las especificaciones de los fabricantes.

Finalmente el Titanio en su aleación 6Al-4V que además de ser utilizado en balística se llega a encontrar en algunos componentes de motores de aviones es utilizado de manera discreta en aplicaciones balísticas debido a su alto costo.

Las propiedades promedio de este material son las siguientes:

Densidad (g/cm ³)	4.47
Esfuerzo último (MPa)	1172.1
Elongación %	7
Dureza HB	379
Impacto Charpy (J)	23

* Datos obtenidos a partir de las especificaciones de los fabricantes.

Las aleaciones de aluminio y de titanio tienen la propiedad de ser altamente resistentes a la corrosión, son más ligeros que el acero pero de alto costo.

Los materiales metálicos resistirán los impactos balísticos transformando la energía del proyectil en deformación plástica, sin embargo, en general estos materiales no son capaces de repeler municiones perforantes con corazón de tungsteno por lo que se han desarrollado otro tipo de materiales como los cerámicos y los compuestos.

En balística existe un concepto llamado multi-impactos que es la característica de poder soportar tres impactos separados entre ellos aproximadamente 12 cm, esta característica tiene que ver con el área circundante dañada por el impacto ya que mientras mayor sea ésta, la separación entre impactos deberá crecer para poder soportarlos. Los metales aquí descritos tienen la propiedad de ser multi-impactos.

En los materiales metálicos se ha observado experimentalmente que existe un cambio en el mecanismo de falla presentado en diversas muestras y que tiene relación con el espesor del material impactado, esto es, que existe un espesor crítico para cada tipo de metal por debajo del cual la fractura se presentará dúctil mientras que por encima de dicho espesor la fractura será frágil.

2.2.2 CERÁMICOS MONOLÍTICOS

Con el afán de reducir peso y poder hacer frente a impactos de proyectiles perforantes (de alta dureza) se ha centrado la atención en los materiales cerámicos siendo los monolíticos los de mayor aplicación ya que se forman a partir de un solo compuesto.

Este tipo de materiales incluye óxidos, carburos y nitruros. El óxido más utilizado es el de Aluminio (Al_2O_3) debido a su alto nivel de propiedades físicas.

Densidad (g/cm ³)	3.97
Tenacidad a la fractura (MPa*m ^{1/2})	3.5
Resistencia a la compresión (MPa)	2757.9
Dureza Vickers (GPa)	11.75

La alúmina es de bajo costo y puede ser manufacturada de varias maneras como vaciado, prensado o inyección, los cuales son métodos de fabricación sencillos que no requieren de equipos costosos.

En general los carburos y los nitruros son usados en la protección balística debido a sus altas propiedades físicas y baja densidad que comparados con la alúmina son más bondadosos, sin embargo estos cerámicos son conformados normalmente mediante prensado en caliente lo que los convierte en una opción cara y poco productiva.

Tanto los carburos de silicio y de boro como los nitruros de silicio, de aluminio y de titanio han encontrado gran aplicación en el blindaje. Se muestra a continuación una tabla con las propiedades físicas de estos materiales:

MATERIAL	DENSIDAD (g/cm ³)	TENACIDAD A LA FRACTURA (MPa*m ^{1/2})	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)	DUREZA VICKERS (Kg/mm ²)
Carburo de silicio	3.2	4.6	4667.75	2800
Carburo de boro	2.47	3.2	9652-23442	3200
Nitruro de silicio	3.3	6.1	13789-24131	1700 - 2200
Nitruro de aluminio	3.26	2.6	2100	1100
Nitruro de titanio	5.22	5	-	2300

* Datos obtenidos a partir de las especificaciones de los fabricantes.

Los materiales cerámicos basan su capacidad de soportar impactos balísticos absorbiendo parte de la energía cinética del proyectil por medio de la energía de fractura y apoyándose en su dureza que actúa deformando al proyectil durante la indentación y funcionando como abrasivo sobre el proyectil durante la penetración y la salida, es por esto que muchas veces se forman materiales compuestos utilizando los cerámicos monolíticos como cara de impacto antecediendo a otro material que detenga al proyectil mediante deformación plástica.

Una gran desventaja de estos materiales es que no tienen la capacidad de ser multi-impactos por sí solos debido a que presentan fracturas frágiles ante cargas de impacto, esto consiste en la formación y propagación de fisuras a través de la sección del material en una dirección perpendicular a la carga aplicada que llega a afectar una zona circundante al impacto muy amplia. El crecimiento de grietas normalmente ocurre a través de los granos y a lo largo de determinados planos cristalográficos que son de alta densidad atómica.

La capacidad de un cerámico de resistir la fractura cuando una grieta está presente se especifica en términos de la tenacidad de fractura.

2.2.3 Compuestos laminares

Buscando solventar las deficiencias de los metales y los cerámicos monolíticos se comenzaron a desarrollar los materiales compuestos para lograr propiedades físicas y mecánicas que con los distintos grupos de materiales por sí solos sería imposible lograr. Si bien es cierto que existen compuestos con refuerzo de fibras o partículas y con matrices distintas, es en los laminares donde se ha desarrollado más la balística, por lo que existe una gran diversidad de materiales compuestos laminares para resistir impactos balísticos.

Como ejemplos podemos encontrar los chalecos antibalas que en su mayoría están fabricados con Kevlar, éste se produce como fibras continuas que se tejen entre sí para lograr una mejor resistencia tridimensional, es muy útil en esta aplicación debido a su baja densidad y su flexibilidad, sin embargo para resistir armas de bajo calibre se deben colocar varias capas de este textil. Esto se ejemplifica mejor cuando es necesario que con estos chalecos puedan soportar impactos de armas de altos calibres, para esto se requiere colocar una placa ya sea de acero o de algún cerámico como cara de impacto logrando así un material compuesto de una lámina de metal o cerámico y láminas subsecuentes de Kevlar entretejido.

Los mecanismos que se buscan mejorar mediante el uso de materiales compuestos laminares incluyen la indentación de la punta del proyectil, deformación plástica del laminado, la delaminación y la fricción entre las capas y el proyectil⁽⁹⁾.

Delaminación se puede entender como la separación total o parcial entre las láminas que forman el compuesto.

Los materiales compuestos laminares tienen como característica lo que se conoce como efecto de borde u orilla libre, esto quiere que las propiedades mecánicas del compuesto se verán disminuidas en la vecindad del perímetro si existe esfuerzo de tensión interlaminar que generará delaminación, provocando que el material ya no actúe como un conjunto del compuesto.

Cuando se forman materiales compuestos en los que se utiliza como cara de impacto algún cerámico o metálico se presentará fricción y erosión en el proyectil cuando éste atraviese la interfase entre la cara de impacto y el material de soporte, ya que en esta zona existirán fragmentos del material impactado que servirán como abrasivos, disipando así una parte de la energía.

Los materiales empleados como base para formar los compuestos laminares más utilizados en el blindaje son:

- Kevlar
- Polietileno de ultra alto peso molecular
- Acero
- Cerámicos

Kevlar

El Kevlar es una fibra de la familia de las aramidas, debido a que está formada a partir de una poliamida que contiene anillos de benceno en la estructura del polímero lo cual le da una excelente resistencia a la tracción y al impacto debido a su capacidad de soportar grandes deformaciones.

Los tipos más conocidos de Kevlar son el Kevlar 29 y el Kevlar 49, en aplicaciones balísticas se utiliza el Kevlar 29 debido a que soporta una mayor deformación antes de la fractura, que comparado con el Kevlar 49 aunque éste tiene mejor resistencia su capacidad de absorber energía es menor.

Las propiedades físicas del Kevlar 29 se muestran a continuación^(10,11,12):

Densidad (g/cm ³)	1.44
Resistencia a la tensión (GPa)	2.8
Elongación %	200

Para formar compuestos laminares el Kevlar se utiliza de varias maneras, una es a partir de la fibras entretejidas en forma de textil, cada capa de este textil se une a las otras mediante costura con hilo de la misma fibra y sin que exista entre ellas otra cosa que no sea aire. Este compuesto básicamente logra su resistencia a impactos

balísticos tratando de absorber la energía cinética del proyectil transformándola en su totalidad en deformación plástica.

Sus mayores ventajas son la flexibilidad de este compuesto ya que puede adoptar gran variedad de formas irregulares y su bajo peso lo que en conjunto da la posibilidad de movimiento. Estas características son muy importantes en la construcción de chalecos antibalas como se describió anteriormente.

Otra manera de formar compuestos laminares a partir de Kevlar es colocando películas de uretano entre las capas del Kevlar en forma de textil, después aplicando presión y temperatura se unen logrando así mejorar sus propiedades mecánicas.

Las propiedades del uretano son las siguientes:

Densidad (g/cm ³)	1.3
Resistencia a la tensión (MPa)	68.94
Elongación %	600

* Datos obtenidos a partir de las especificaciones de los fabricantes.

Aunque el Kevlar basa su resistencia balística en la deformación plástica del compuesto, colocando la interface de uretano el compuesto es más rígido por lo que las geometrías que puede adoptar son más limitadas, sin embargo gracias a las propiedades que le confiere dicha interface se pueden lograr resistencias balísticas mayores con menor cantidad de capas lo que repercute en costos y volúmenes necesarios para proteger un área determinada.

Este compuesto laminar llega a soportar hasta 9074 J/m de energía de Impacto en un ensayo Charpy.

El Kevlar se ve en gran desventaja ante proyectiles de alta dureza (penetrantes) por lo que se han experimentado compuestos donde se antecede al Kevlar con una placa ya sea de acero balístico (como los descritos anteriormente) o de cerámico monolítico, tratando de mejorar el comportamiento de estos compuestos ante el mecanismo de deformación del proyectil para disipar parte de la energía cinética por ese medio además de aumentar el área de contacto entre el proyectil y el material de soporte (Kevlar). Existe además otro mecanismo de disipación de energía cinética del

proyectil que aunque no está perfectamente cuantificado se sabe que durante la penetración y la salida del proyectil sobre la cara de impacto se produce erosión del proyectil actuando los fragmentos de la cara de impacto como abrasivos.

Es muy importante mencionar que las fibras aramidadas son muy resistentes a la tensión pero su resistencia a la compresión es relativamente baja por lo que este tipo de materiales no pueden ser precedidos de materiales rígidos que impidan la deformación plástica de las fibras.

Polietileno de ultra alto peso molecular

El polietileno es un polímero termoplástico del cual existen tres clases que se clasifican como de baja densidad, de alta densidad y de ultra alto peso molecular (UHMW), en aplicaciones balísticas se utiliza el de ultra alto peso molecular debido a que posee propiedades mecánicas más elevadas como muestra la siguiente tabla comparativa^(10,11,12):

TIPO	DENSIDAD (g/cm³)	RESISTENCIA A LA TENSION (MPa)	ELONGACIÓN A LA FRACTURA (%)	IMPACTO IZOD (J/m)
Baja densidad	0.92	20.68	800	480.4
Alta densidad	0.96	37.92	130	213.5
Ultra alto peso molecular (UHMW)	0.97	2695.85	350	1601.3

La manera en que se encuentra comercialmente este compuesto es en forma capas de fibras unidireccionales de UHMW con una interfase del mismo polietileno entre cada una de las capas. Las fibras de cada capa se orientan perpendiculares a la capa que preceden, esto se hace para mejorar su resistencia ante cargas en dirección transversal al compuesto.

Este compuesto laminar tiene como ventaja su bajo peso pero para soportar impactos de municiones penetrantes se requiere colocar (al igual que en el caso de las aramidas) una lámina de acero o cerámico como cara de impacto.

Estos materiales son poco flexibles y para adecuarlos a formas con curvaturas leves se deberán termoformar para evitar generar delaminación.

Laminares de acero

En el caso del acero además de colocarse como cara de impacto para mejorar el comportamiento de las aramidas y el polietileno ante impactos perforantes se han utilizado formado compuestos laminares recurriendo a unir dos placas de acero soldadas por tramos en su contorno. Las razones para formar esta clase de compuestos son en primera instancia obtener mejores propiedades balísticas que utilizando acero de mayor espesor, esto se debe a que durante la penetración y salida de la cara de impacto ocurrirá erosión en el proyectil lo que disipará parte de la energía cinética de la munición, además la placa de soporte evitará que el acero que la antecede se deforme modificando así su resistencia, además de estos mecanismos existe la ventaja de que aún cuando se genere una grieta en la cara de impacto ésta solo podrá propagarse en la lámina en cuestión.

El segundo motivo para ocupar esta clase de compuestos es por que después de determinados espesores de acero se complican las operaciones que conlleven doblez por lo que es una alternativa doblar por separado los aceros que formarán el compuesto y después unirlos de la manera descrita.

Laminares de cerámicos

El ejemplo más común son los “vidrios blindados” que se forman a partir de láminas de vidrio de sosa-cal y policarbonato con películas polivinil butiral que funciona como adhesivo entre ellas. En este caso se busca obtener un material transparente que logre soportar los impactos aunque el peso y el costo comparados con los materiales opacos son una desventaja.

Las propiedades físicas de estos tres componentes se muestran a continuación:

MATERIAL	DENSIDAD (g/cm³)	RESISTENCIA A LA TENSION (MPa)	ELONGACIÓN A LA FRACTURA (%)	IMPACTO IZOD (J/m)
Vidrio	2.5	48.3	-	-
Polivinil butiral	0.95	3.44-20.68	150-450	-
Policarbonato	1.2	55-75	100-150	854

* Datos obtenidos a partir de las especificaciones de los fabricantes.

En este caso en particular se busca que el compuesto sea transparente por lo que a pesar de que existen materiales que ofrecen mayores propiedades mecánicas y menor densidad se utilizan aquellos que no presentan opacidad.

Otra característica propia de todos los compuestos laminares es que tienen un comportamiento altamente anisotrópico por lo que se debe asegurar que los impactos se aplicarán transversalmente y que impactarán sobre la cara dispuesta para tal propósito en el material de blindaje.

densidad son los materiales compuestos laminados mientras que los más densos son los aceros.

Bajo la misma suposición podemos analizar de igual manera el diagrama de resistencia vs costo relativo por unidad de volumen de Ashby que se muestra enseguida:

RESISTENCIA VS COSTO RELATIVO

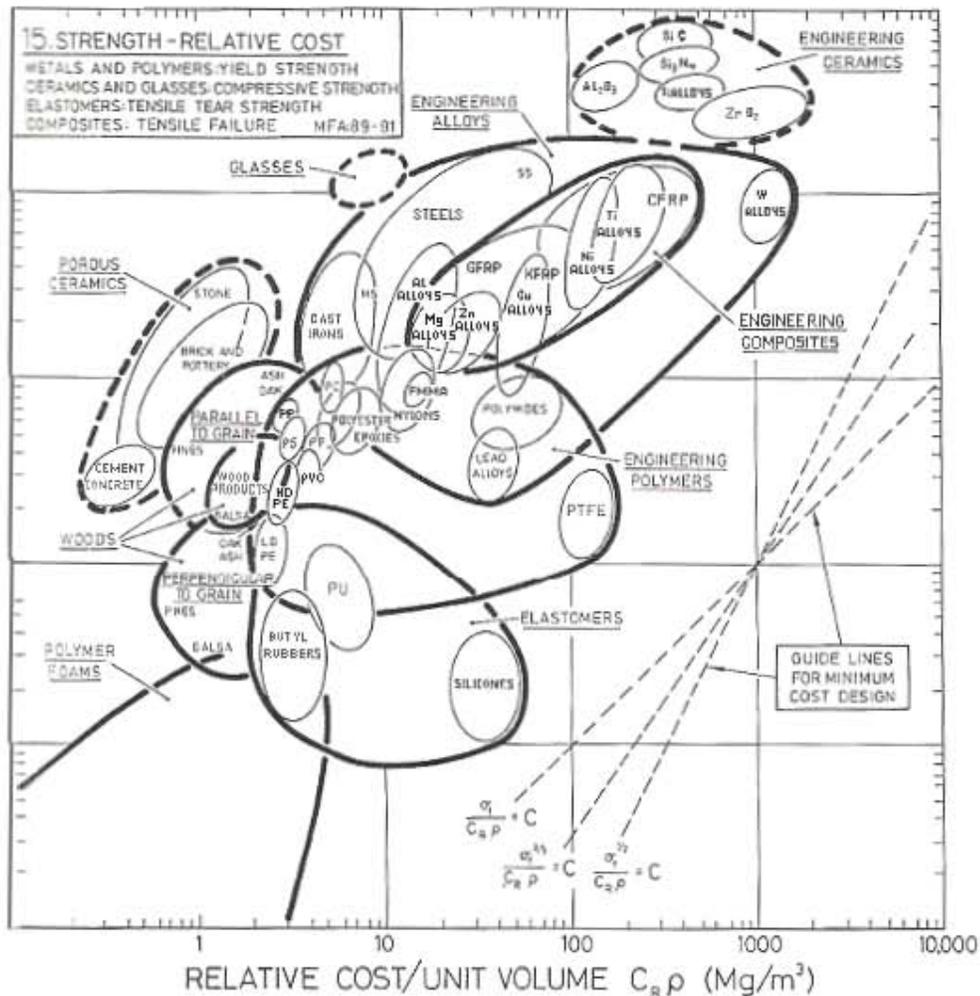


FIGURA 2.2

El área a lo largo del eje X y con 100 y 1000 MPa como límites en el eje Y incluye a la mayor parte de los materiales para blindaje y a partir de este diagrama observamos que los cerámicos aunque ofrecen mayor resistencia tienen en general un costo relativo por unidad de volumen mayor al de las demás familias de materiales.

También se puede observar que los aceros ofrecen una amplia gama de resistencias llegando a rebasar los 1000 MPa y su costo

3. SELECCIÓN DE MATERIALES

3.1 Planteamiento del problema

Se requiere proteger ambas puertas delanteras de un vehículo sedán con un área de 0.554 m² cada una. La protección deberá ser nivel D clase 1 según la norma NOM-142-SCFI-2000, esto implica que el blindaje deberá ser capaz de soportar multi-impactos de la munición 7.62X63 mm semi-encamisado de punta blanda a una velocidad de 822.96 m/s. El peso máximo admisible para ese blindaje será de 22 Kg con un costo máximo de \$5200 m.n. por el material requerido para la protección de cada puerta.

El blindaje deberá estar instalado de tal forma que no interfiera con el funcionamiento regular de los sistemas propios del vehículo, los cuales son:

1. *Mecanismo de apertura y cierre de puertas (chapas).*
2. *Sistema de eleva-vidrios (elevador).*
3. *Controles eléctricos y cableado.*

Analizando estos sistemas se encontró que el espacio disponible para alojar el material de protección es muy irregular y va de un mínimo de 15 mm (en la zona de la chapa y la barra anti-impactos) a un máximo de 39 mm (en la región comprendida entre los bordes superior e inferior con el parachoques).

Se muestran a continuación de manera esquemática estas regiones:

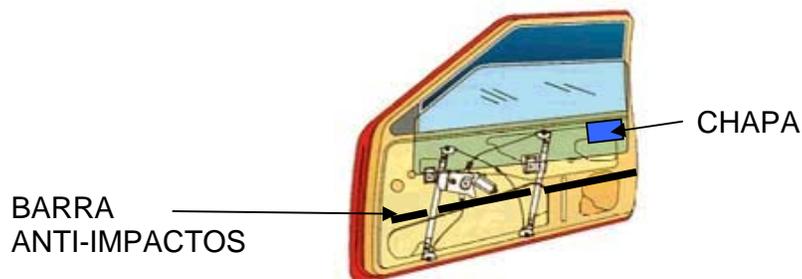


FIGURA 3.1

Debido a que la zona a blindar es muy irregular y a que existen regiones con restricciones distintas la selección de los materiales constará de los siguientes puntos:

1. Análisis de materiales: Se analizarán los materiales posibles enlistándolos descendientemente según su desempeño para esta aplicación.
2. Selección de materiales: Se evaluarán las restricciones específicas utilizando los materiales de la lista anterior buscando que fracción del área se deberá blindar con cada uno de los materiales.

3.2 Análisis de materiales

Para analizar los distintos materiales existentes se tomará como base la restricción de resistencia balística mientras que el peso y el costo se buscará minimizarlos.

3.2.1 Resistencia balística

En cuanto a la resistencia balística se han desarrollado varios modelos dependiendo de los materiales de los que esté hecho el blindaje ya que cada familia de materiales depende de mecanismos distintos para dispersar y/o absorber la energía cinética del proyectil.

Metales

Para los metales se considera que inmediatamente después de que los cuerpos entran en contacto se crea una interfase entre el proyectil y el blindaje que se comporta de manera hidrodinámica, donde se asume erosión y pérdida de masa de ambos cuerpos; producto de esta erosión existirá desaceleración en el proyectil⁽¹⁴⁾.

A partir del modelo de Grace⁽¹⁴⁾ se tiene que la interfase viajará a una velocidad constante u_0 durante todo el proceso mientras que el proyectil tendrá una velocidad $v(t)$, además una porción del material de blindaje se acelerará desde el reposo hasta una velocidad w causando deformación plástica. De acuerdo a la dinámica el momentum y la energía cinética del proyectil se seguirán entregando hasta el punto en que la penetración se detenga. En ese punto la masa de la porción del blindaje tendrá como velocidad u_0 , de tal forma que la velocidad de reducción del espesor del

blindaje ($u = u_0 - w$) sea igual a cero, mientras que en un tiempo intermedio a este evento el proyectil reducirá su longitud L y el blindaje experimentará la misma situación en su espesor z . Existirá por lo tanto un espesor mínimo (Z_{\min}) requerido para soportar el impacto del proyectil.

Se muestra a continuación un diagrama en un tiempo intermedio t del proceso de penetración:

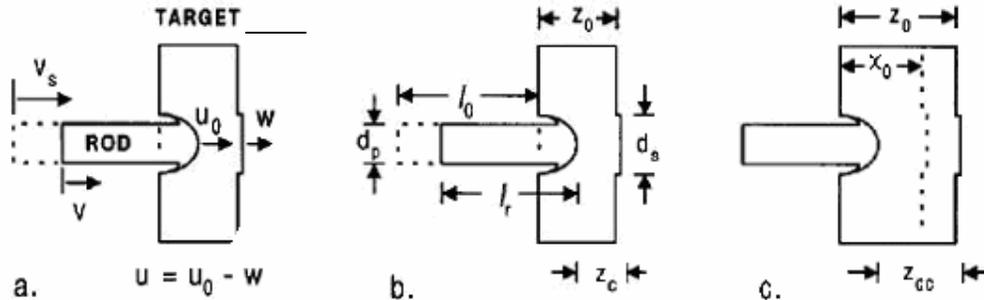


FIG 3.2

a) Dirección de los vectores de velocidad, b) Características geométricas de los cuerpos en contacto cuando $Z < Z_{\min}$, c) Características geométricas del material impactado cuando $Z > Z_{\min}$.

La energía cinética del proyectil se calcula como:

$$E_k = \frac{1}{2} m_p v_p^2$$

Mientras que las siguientes ecuaciones describen el proceso de penetración en general:

	PROYECTIL	BLINDAJE
Momentum:	$M_p \frac{d(v - u_0)}{dt} = -A_p S_p$	$M_t \frac{du}{dt} = -A_t S_t$
Masa:	$M_p = \rho_p A_p l$	$M_t = \rho_t A_t z$
Erosión:	$\frac{dl}{dt} = -(v - u_0)$	$\frac{dz}{dt} = -u$

donde:

M_p = Masa del proyectil

M_t = Masa del blindaje

t = Tiempo

A_t = Área del blindaje

v = velocidad del proyectil

S_t = Resistencia última

u_0 = vel. inicial de penetración

del blindaje

A_p = Área del proyectil

ρ_t = densidad del blindaje

S_p = Resistencia al cortante
del proyectil

u = velocidad de reducción
del espesor del blindaje

ρ_p = densidad del proyectil

z = espesor del blindaje

l = longitud del proyectil

Existe un concepto llamado velocidad límite, que representa la máxima velocidad a la que un proyectil determinado puede impactar sobre algún material sin que exista penetración, por lo tanto será una medida que nos mostrará la capacidad de los materiales para resistir los impactos del proyectil en cuestión. A partir de las ecuaciones mostradas se ha desarrollado la siguiente expresión para la velocidad límite:

$$v_L = \sqrt{4k(1+\gamma)^2 \frac{\beta \cdot S_t}{\alpha \cdot \rho_p}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{T}{D}}{1+k \frac{\gamma \cdot S_p}{\alpha^2 \cdot S_t} - 2k\gamma^2 \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{T}{D} - 2\lambda \frac{P}{D} \right)}}$$

$\alpha = d_s/d_p$

$\beta = S_s/S_t$

$\gamma = (\rho_t/\rho_p)^{1/2}$

Donde:

v_L = velocidad límite del proyectil

k = constante experimental

λ = constante experimental

T = espesor del blindaje

D = diámetro inicial del proyectil

- d_s = diámetro de la sección afectada del blindaje
- d_p = diámetro final del proyectil
- S_t = resistencia del blindaje
- S_s = resistencia al cortante del blindaje
- S_p = resistencia del proyectil
- ρ_p = densidad del proyectil
- ρ_t = densidad del blindaje

Cerámicos monolíticos

La respuesta ante el impacto que exhiben los cerámicos es única debido a su naturaleza. Cuando un cerámico se somete a un impacto balístico se pueden identificar dos diferentes respuestas. La primera fase ocurre durante unos cuantos microsegundos después del contacto entre los cuerpos donde se genera una onda de esfuerzo de compresión que viaja radialmente desde el punto de impacto hacia la cara exterior. Si la magnitud de esta onda compresiva excede la resistencia dinámica local de este material se comenzarán a generar grietas hasta formar un cono de material pulverizado desde el punto de impacto y hasta la región posterior de material. Cuando la onda compresiva alcanza la superficie libre del cerámico, ésta la refleja en forma de una onda que podrá formar fragmentación del cerámico si su resistencia a la tensión dinámica se excede.

La segunda fase se caracteriza por una mayor deformación y erosión tanto del proyectil como del cerámico y concluye con la perforación del blindaje o la detención del proyectil⁽¹⁴⁾.

Para los cerámicos se ha desarrollado la siguiente expresión para la velocidad límite⁽¹⁵⁾.

$$v_L = \sqrt{\frac{2(Y_{co} - Y_p)}{\rho_p}}$$

Donde:

- v_L = velocidad límite del proyectil
- Y_{co} = Resistencia a la penetración del cerámico intacto
- Y_p = Resistencia del proyectil

Sin embargo debido a que una de las restricciones desprendidas de la norma es que el blindaje deberá ser multi-impactos la familia de los cerámicos no será candidata para este desarrollo debido a que no posee (por sí sola) esta característica ya que como se explicó el

impacto genera un cono de material pulverizado que repercute en que el área dañada por el impacto sea mayor.

Para lograr el uso de estos materiales y convertirlos en multi-impactos, atribuciones recientes los consideran dentro de los compuestos laminares al reforzarlos con materiales de soporte independientemente del uso de refuerzos de nanopartículas de otros cerámicos, metales o polímeros.

Compuestos laminares

Para los materiales compuestos con base en fibras de polímeros Moyre⁽¹⁶⁾ ha estudiado que la energía máxima que pueden absorber y por tanto su velocidad límite están en función de tres mecanismos principales suponiendo que el proyectil se mantiene indeformable durante en todo el proceso, además de que se desprecian tanto la fricción y la delaminación como dispersores de la energía cinética del proyectil.

A continuación se muestra un diagrama del comportamiento de estos materiales ante un impacto balístico:

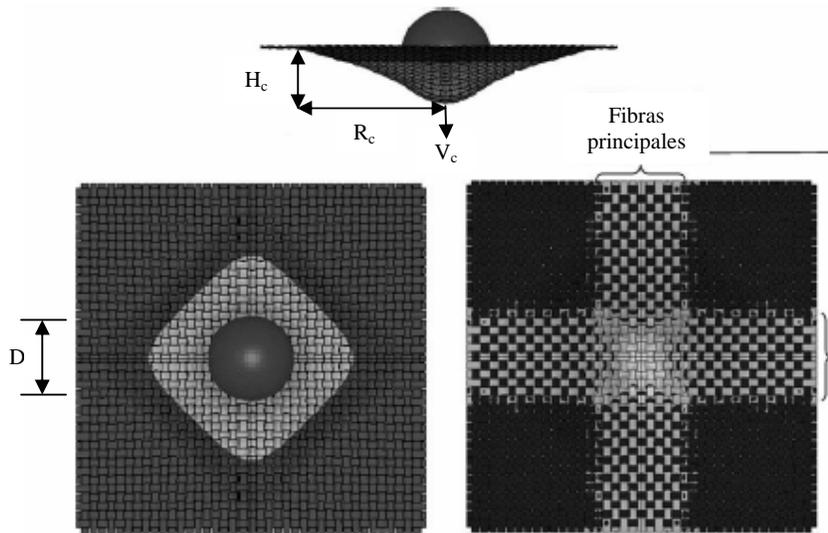


FIGURA 3.3

El primero de los mecanismos es la absorción de energía por medio de la falla ténsil de las fibras primarias, donde éstas últimas son entendidas como aquellas fibras que se encuentran en contacto directo con el proyectil y la ecuación que describe este mecanismo es:

$$E_{tf} = 4E_c R_c D T$$

Donde:

E_{tf} = Energía absorbida por falla de las fibras primarias bajo tensión

E_c = Resistencia última a la tensión por unidad de volumen del material compuesto

R_c = Radio del cono formado en el compuesto

D = Diámetro del proyectil

T = Espesor del material compuesto

El segundo mecanismo es la absorción de energía por deformación elástica de las fibras secundarias. Esta energía puede obtenerse del área bajo la curva de esfuerzo vs deformación del compuesto y debido a que este comportamiento es lineal puede ser dado por:

$$E_{ed} = \frac{1}{2} M \varepsilon^2$$

Donde:

E_{ed} = Energía absorbida por deformación tensil de las fibras secundarias

M = Módulo de tensión del compuesto

ε = Deformación promedio de las fibras secundarias

Las fibras secundarias experimentarán deformaciones distintas dependiendo de su posición relativa al punto de impacto por lo que la expresión anterior se puede modificar como:

$$E_{ed} = \frac{\pi M \varepsilon_0^2 T}{(2R_c - D)^2} \left[\frac{R_c^4}{3} - \frac{D^2 R_c^2}{2} + \frac{D^3 R_c}{3} - \frac{D^4}{16} \right]$$

El tercer mecanismo se produce debido a que el cono formado en el material compuesto partirá desde el reposo hasta adquirir una velocidad v por lo que parte de la energía del proyectil se transformará en energía cinética en el cono del material compuesto y se puede calcular como:

$$E_{ke} = 1/2\pi R_c^2 T \rho v^2$$

Donde:

E_{ke} = Energía cinética del cono
 ρ = Densidad del material compuesto

Por último si consideramos que toda la energía cinética del proyectil se transforma en la energía absorbida por estos tres mecanismos tenemos que:

$$v_L = \sqrt{\frac{2 \cdot (E_{ef} + E_{ed} + E_{ke})}{m}}$$

Donde:

m = Masa del proyectil

Es muy común que se utilicen combinaciones de dos tipos de materiales teniendo como cara de impacto ya sea algún material metálico o cerámico y como placa de soporte algún compuesto laminar por lo que se han desarrollado también modelos⁽¹⁷⁾ con base en la experimentación para predecir la velocidad límite de estos compuestos, el modelo más utilizado es:

$$v_L = \sqrt{\frac{\epsilon_0 S}{k \cdot M_p f(a)}}$$

$$f(a) = \frac{M_p}{[M_p + (h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2) \pi a^2] \pi a^2}$$

Donde:

- S = Resistencia última a la tensión del material de soporte
- k = Constante experimental
- ϵ_0 = Deformación a la fractura del material de soporte
- Mp = Masa del proyectil
- h_1 = espesor del material de la cara de impacto
- ρ_1 = densidad del material de la cara de impacto
- h_2 = espesor del material de soporte
- ρ_2 = densidad del material de soporte
- a = radio de la base del cono formado por la fractura del material de la cara de impacto

3.2.2 Comparación entre el desempeño balístico de los materiales

En la siguiente tabla se muestran las propiedades de los materiales que influyen en el comportamiento balístico de las familias de materiales mostradas:

PROPIEDADES	FAMILIAS DE MATERIALES			
	METÁLICOS	CERÁMICOS	COMPUESTOS CON BASE EN POLÍMEROS	COMPUESTOS CON CARA DE IMPACTO DE METAL
	ρ_t	Y_{co}	E_c	ϵ_0
	S_s		ϵ	S
	S_t		M	ρ_1
		ρ	ρ_2	

De esta tabla se puede ver que la resistencia balística de cada familia de materiales se basa en aquellas propiedades que distinguen a cada familia manteniéndose constante en tres familias su resistencia a la tracción. Además, en las ecuaciones que rigen el comportamiento balístico de cada familia de materiales se encuentran factores que se determinan experimentalmente y que serán válidas sólo en casos específicos por lo que para efectos de poder comparar el desempeño de cada material en esta aplicación

se propone el siguiente modelo para la resistencia balística, suponiendo que el proyectil es indeformable y que su energía cinética se utilizará en desplazar un volumen de material de protección que comprende el diámetro de la bala por el espesor del blindaje:

$$E_{kp} = \frac{1}{2} m_p v_p^2$$

$$E_a = \frac{1}{4} \pi D^2 T \sigma_{eq}$$

Donde:

E_{kp} = Energía cinética del proyectil

m_p = Masa del proyectil

v_p = Velocidad de impacto del proyectil

E_a = Energía absorbida por el material de protección

D = Diámetro del proyectil

T = Espesor del material de protección

σ_{eq} = Resistencia al impacto balístico equivalente

A nivel mundial existen laboratorios que certifican la resistencia de los materiales ante el impacto balístico. En estos laboratorios se tienen proyectiles de masa, densidad y geometría estandarizada los cuales se hacen incidir sobre probetas de medidas y sujeción estándar a una velocidad calibrada. Esta prueba es de carácter cualitativo debido a que el resultado solo estriba en si el material detuvo o no el proyectil, sin embargo para el propósito que nos ocupa es suficiente información.

Los siguientes materiales se encuentran certificados para soportar multi-impactos de la munición 7.62X63 mm semi-encamisado de punta blanda a una velocidad de 823 m/s:

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS
ACERO BALÍSTICO	T 9 mm ρ 7.86 (g/cm ³) Dureza 520 Brinell σ_u 1862 Mpa $\$/m^2$ 4200 mn
ALUMINIO 2024-T3	T 25 mm ρ 2.78 (g/cm ³) Dureza 120 Brinell σ_u 482.6 Mpa $\$/m^2$ 6840 mn
TITANIO 6Al-4V	T 15 mm ρ 4.47 (g/cm ³) Dureza 379 Brinell σ_u 1034 Mpa $\$/m^2$ 10248 mn
COMPUESTO LAMINAR DE POLIETILENO UHMW	T _{total} 25 mm ρ 0.625 (g/cm ³) % ϵ 350 σ_u 2.7 Gpa $\$/m^2$ 13440 mn
COMPUESTO LAMINAR DE VIDRIO CON POLICARBONATO	T _{total} 39 mm $\rho_{promedio}$ 3.47 (g/cm ³) ρ_1 2.5 (g/cm ³) ρ_2 1.2 (g/cm ³) % ϵ_0 120 S 70 Mpa $\$/m^2$ 17520 mn

El costo por metro cuadrado tiene incluidos los costos asociados al corte como insumos, mano de obra y el uso de máquinas de corte con gastos indirectos y fueron tomados en el año 2003.

Con el fin de tener mayor número de materiales candidatos se intentó formar compuestos laminares a partir de combinar por pares los materiales más comunes que están certificados balísticamente en niveles más bajos de protección buscando con esto lograr propiedades competitivas contra los materiales de la tabla anterior. Las combinaciones propuestas son:

- Acero 3 + 4
- Acero 3 + polietileno 20
- Acero 3 + Kevlar 9

Acero 3 + 4

DESCRIPCIÓN

Este material se compone de dos placas que se unen mediante soldadura en su contorno colocando en la cara de impacto acero de 3.2 mm de espesor con las siguientes propiedades:

T	3.2	mm
ρ	7.86	(g/cm ³)
Dureza	495	Brinell
σ_u	1862	Mpa
\$/m ²	1248	m.n.

Mientras que en la cara de soporte se coloca acero de 4.1 mm de espesor con las propiedades que se muestran a continuación:

T	4.1	mm
ρ	7.86	(g/cm ³)
Dureza	512	Brinell
σ_u	1715	Mpa
\$/m ²	1752	m.n.

JUSTIFICACIÓN

Se busca con esta combinación lograr un material metálico con las ventajas de precio y manejabilidad del acero pero disminuyendo el espesor de material para así lograr menor peso para la misma resistencia.

Al unir estas dos placas en comparación con una sola placa de mayor espesor se tendrá un mecanismo extra de disipación de la energía ya que el material de la cara de impacto será perforado por el proyectil formando un cono que por experiencia se sabe que tendrá un ángulo de aproximadamente 5°, esto tendrá como consecuencia que se aumente el área de aplicación del impacto sobre el material de soporte además de que entre la porción punzada del material de la cara de impacto y el proyectil existirá erosión.

Buscando hacer una predicción del comportamiento de este material y debido a que se forma un compuesto laminar con un material rígido en la cara de impacto se utilizó el modelo anteriormente descrito para esta clase de materiales de la siguiente manera:

$$v_L = \sqrt{\frac{\epsilon_0 S}{k \cdot M_p f(a)}}$$

$$f(a) = \frac{M_p}{[M_p + (h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2) \pi a^2] \pi a^2}$$

$$S = 1862 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_0 = 0.145$$

$$M_p = 11.67 \text{ g}$$

$$h_1 = 3.2 \text{ mm}$$

$$\rho_1 = 7.86 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$$

$$h_2 = 4.1 \text{ mm}$$

$$\rho_2 = 7.86 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$$

Para determinar 'a' se parte de que el ángulo del cono formado es de aproximadamente 5° y se supone al proyectil de geometría cilíndrica, tomando un triángulo rectángulo como se muestra en la siguiente figura se tiene:

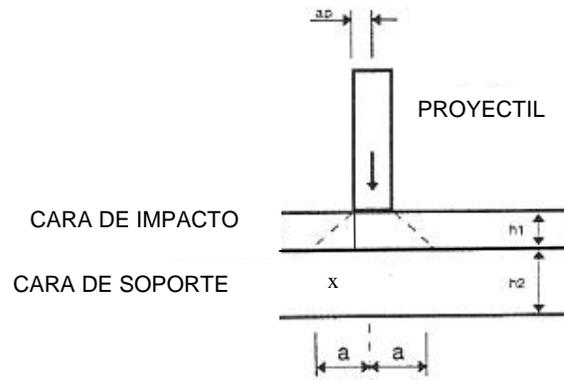


FIGURA 3.4

$$x = (h_1)\tan(5^\circ)$$

$$a = a_p + x = 4.09 \text{ mm}$$

El acero de 4.2 mm de espesor utilizado para la formación de este compuesto es certificado para soportar impactos de la munición 5.56X45 mm con una masa de 4 g y una velocidad de impacto de 930 m/s. Para modelar el comportamiento de este material se realizan las siguientes suposiciones:

- Los proyectiles 5.56X45 mm y 7.62X51 mm son de la misma densidad.
- La velocidad límite de 930 m/s es la velocidad límite para el acero de 4.2 mm cuando es impactado por un proyectil de masa 4 g y de 5.56 mm de diámetro.
- Para calcular la constante k del acero de 4.2 mm se supondrá que le antecede como cara de impacto una capa de aire de espesor y densidad despreciables.

Basándose en la ecuación de la velocidad límite con un valor de $a=2.78 \text{ mm}$, $M_p=4 \text{ g}$ y bajo las suposiciones descritas se tiene que:

$$k = 1.895 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$$

Con este valor de k y los correspondientes para las variables descritas con anterioridad se calcula la velocidad límite para el material acero de 3 + 4 por lo que:

$$v_L = 801.8 \text{ m/s}$$

Este resultado de velocidad límite es 2.66 por ciento menor que el requerido para nivel D de la NOM-142-SCFI-2000, debido a que el modelo es solamente una aproximación que depende del factor experimental k se ensayará el material propuesto en el túnel de tiro bajo las condiciones de la norma mencionada para verificar el resultado.

Las propiedades físicas y el costo por metro cuadrado de este nuevo material serán las siguientes:

T	7.3	mm
ρ	7.86	(g/cm ³)
\$/m ²	3360	m.n.

El costo por metro cuadrado lleva incluido el sobre costo por el trabajo de unión de ambos aceros.

Acero de 3 + polietileno 20

DESCRIPCIÓN

Para formar este material se coloca como cara de impacto el mismo acero de 3.2 mm del punto anterior mientras que como material de soporte se utiliza el compuesto laminar de polietileno de ultra alto peso molecular con un espesor de 20 mm, ambos materiales se unirán por medio de adhesivo con base de uretano formando una capa de 1 mm en la interfase entre el acero y la primera capa de polietileno.

El compuesto laminar de polietileno de 20 mm tiene las mismas propiedades tanto físicas como mecánicas que el de 25 mm de espesor mientras que el costo por metro cuadrado será:

$\$/m^2$ 10800 m.n.

Finalmente el adhesivo con base de uretano tendrá las siguientes características:

T	1	mm
ρ	1.5	(g/cm ³)
σ_u	32	Mpa
$\$/m^2$	120	m.n.

JUSTIFICACIÓN

Al colocar el acero como cara de impacto se busca deformar y/o erosionar al proyectil logrando con esto que el área sobre la cual se aplica el impacto sobre el material de soporte aumente como en el caso anterior pero buscando tener la resistencia adecuada con menor peso que con los materiales metálicos pero con un costo menor al del compuesto laminar de polietileno de alta densidad de 25 mm de espesor.

Para predecir el comportamiento balístico de este material se utilizará el mismo modelo y procedimiento que en el caso del acero de 3 + 4 partiendo del hecho de que el compuesto laminar de polietileno de 25 mm de espesor es sabido que soporta el impacto del proyectil 7.62X51 mm con las condiciones de la norma vigente, además se tomarán las consideraciones siguientes:

- La velocidad límite de 823 m/s es la velocidad límite para el compuesto laminar de polietileno de 25 mm de espesor cuando es impactado por un proyectil de masa 11.68 g y de 7.62 mm de diámetro.
- Se desprecia la aportación de propiedades y espesor del adhesivo.
- Para calcular la constante k del compuesto laminar de polietileno de 25 mm de espesor se supondrá que le antecede como cara de impacto una capa de aire de espesor y densidad despreciables.

La magnitud de las variables del modelo correspondiente para estimar la constante k requerida son:

$$\begin{aligned} S &= 2.7 \text{ GPa} \\ \epsilon_0 &= 3.5 \\ M_p &= 11.67 \text{ g} \\ h_1 &= 0 \text{ mm} \\ \rho_1 &= 0 \text{ Kg/m}^3 \\ h_2 &= 25 \text{ mm} \\ \rho_2 &= 0.625 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3 \\ a &= 3.81 \times 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

Con estos valores se tiene que:

$$K = 5.447 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$$

Para calcular la velocidad límite de este compuesto utilizamos:

$$\begin{aligned} h_1 &= 3.2 \text{ mm} \\ \rho_1 &= 7.86 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3 \\ h_2 &= 20 \text{ mm} \\ \rho_2 &= 0.625 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3 \\ a &= 4.09 \times 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación de la velocidad límite tenemos:

$$v_L = 883.5 \text{ m/s}$$

Este valor de velocidad límite es casi 7.35 por ciento superior al requerido por lo que se justifica su validación en el túnel de tiro bajo las condiciones estándar, esperando además mayor resistencia de la exigida por el nivel de blindaje aplicable.

Las propiedades físicas y el costo por metro cuadrado de este nuevo material serán las siguientes:

$$T = 24.2 \text{ mm}$$

ρ	1.94	(g/cm ³)
\$/m ²	9912	m.n.

El costo por metro cuadrado lleva incluido el sobre costo por el trabajo de unión de ambos materiales por medio del uretano.

Acero 3 + kevlar 9

DESCRIPCIÓN

Este material se formó bajo la misma premisa de colocar acero de 3.2 mm como cara de impacto pero utilizando como material de soporte un compuesto laminar de Kevlar con uretano con 9 mm de espesor, unidos ambos materiales con adhesivo con base de uretano.

Las propiedades del compuesto laminar de Kevlar son:

T	9	mm
ρ	1.1	(g/cm ³)
σ_u	2.76	Gpa
\$/m ²	12480	m.n.

El adhesivo de uretano es el mismo del punto anterior.

JUSTIFICACIÓN

De igual manera que los casos anteriores se buscó formar un material compuesto laminar utilizando acero de 3.2 mm para erosionar, deformar y frenar el proyectil mientras que el material hecho con base en Kevlar intentará detener el proyectil en una segunda etapa.

En este caso se sabe que el compuesto laminar de Kevlar utilizado pero con 6 mm de espesor es capaz de soportar los impactos correspondientes al nivel B plus de la norma NOM-142-SCFI-2000, a partir de este hecho se calculará la constante k con los siguientes datos y suposiciones:

- Los proyectiles 0.44 in Magnum y 7.62X51 mm son de la misma densidad.
- La velocidad límite de 533 m/s es la velocidad límite para el compuesto laminar de Kevlar de 5 mm de espesor cuando es impactado por un proyectil de masa 11.67 g y de 11.18 mm de diámetro.
- Para calcular la constante k del compuesto laminar de Kevlar se supondrá que le antecede como cara de impacto una capa de aire de espesor y densidad despreciables.

La magnitud de las variables del modelo correspondiente para estimar la constante k requerida son:

$$S = 2.76 \text{ GPa}$$

$$\epsilon_0 = 3.7$$

$$M_p = 11.67 \text{ g}$$

$$h_1 = 0 \text{ mm}$$

$$\rho_1 = 0 \text{ Kg/m}^3$$

$$h_2 = 5 \text{ mm}$$

$$\rho_2 = 1.1 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$$

$$a = 3.81 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Con estos valores se tiene que:

$$K = 30.21 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$$

Para calcular la velocidad límite de este compuesto utilizamos:

$$h_1 = 3.2 \text{ mm}$$

$$\rho_1 = 7.86 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$$

$$h_2 = 9 \text{ mm}$$

$$\rho_2 = 1.1 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$$

$$a = 4.09 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación de la velocidad límite tenemos:

$$v_L = 390 \text{ m/s}$$

El valor obtenido para la velocidad límite de este material es muy baja, esto puede ser debido a que el cálculo de la constante k a partir de datos del Kevlar en nivel B plus no sea aplicable ya que las

condiciones entre el nivel B plus y el nivel D tanto en la velocidad y la geometría de los proyectiles son muy distintas. Para validar el modelo se realizará una prueba a este material en el túnel de tiro pero no se considerará como material candidato.

ENSAYOS BALÍSTICOS

Se realizaron 5 muestras (probetas) tanto de acero 3 + 4 como de acero de 3 + polietileno 20 para ser ensayadas balísticamente bajo las condiciones de norma las cuales son:

- Las probetas deben medir 40 X 40 cm y se soportan mediante un marco metálico que las sujeta en todo su perímetro.
- La distancia entre la probeta y el cañón del arma es de 15 m
- El tipo de munición a utilizar será la 7.62X63 mm de 11.67 g de masa.
- La velocidad mínima que debe alcanzar el proyectil es de 822.96 m/s mientras que la máxima será de 837.96 m/s.
- El ángulo de incidencia no deberá ser mayor a 5°.
- La temperatura y la humedad dentro del túnel de tiro serán de 22 +/- 3 °C y de 65 +/- 5 % respectivamente.

El túnel de tiro tiene una configuración similar a la que se muestra en el siguiente esquema.

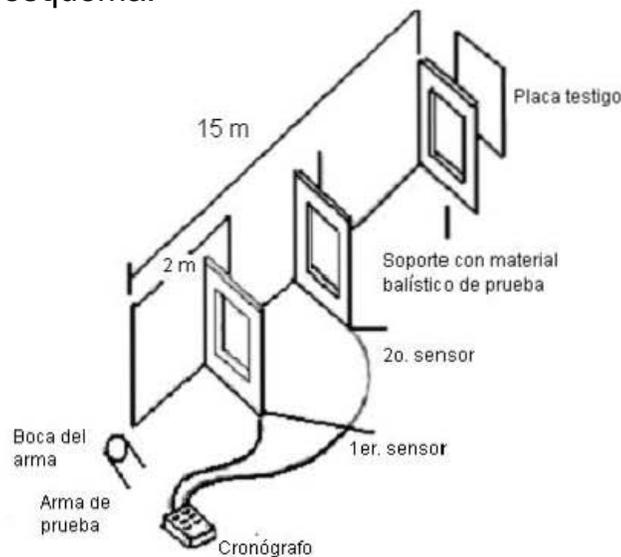


FIGURA 3.5

El cronógrafo es el instrumento que mide la velocidad de las balas. La placa testigo es de aluminio de 5 mm de espesor y sirve para registrar el impacto de cualquier partícula que haya sido expedida a partir de la probeta durante el ensayo.

De las 5 muestras de cada tipo de material se prueban tres disparándoles a cada una 3 impactos espaciados entre sí, a una distancia 12 ± 1 cm, en forma triangular al centro de cada probeta.

De las dos probetas restantes una es expuesta a una temperatura de $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ en la cara de ataque durante tres horas y simultáneamente la otra cara de la probeta es expuesta a una temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. La segunda probeta es expuesta a una temperatura de $-20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ en la cara de ataque durante tres horas y simultáneamente la cara opuesta se expone a una temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, después de esto ambas probetas son ensayadas como en el punto anterior.

Del material acero 3 + Kevlar 9 solo se ensayó una probeta bajo las condiciones descritas disparándole 3 impactos espaciados 12 cm entre sí.

Los resultados de los ensayos se muestran en la siguiente tabla:

MATERIAL	PROBETA	VELOCIDAD REGISTRADA (m/s)	ENERGÍA CINÉTICA CALCULADA (KJ)	OBSERVACIONES
ACERO 3 + 4	1	827.3	3993.62	Sin perforación, con grietas en la cara de impacto
		829.1	4011.02	
		832.6	4044.95	
	2	825.0	3971.45	Sin perforación, con grietas en la cara de impacto
		828.1	4001.35	
		824.8	3969.52	
	3	832.5	4043.98	Sin perforación, con grietas en la cara de impacto
		830.3	4022.64	
		828.6	4006.18	
	4	827.3	3993.62	Sin perforación, con grietas en la cara de impacto
		826.1	3982.04	
		823.6	3957.98	
	5	828.6	4006.18	Sin perforación, con grietas en la cara de impacto
		829.2	4011.99	
		826.1	3982.04	

MATERIAL	PROBETA	VELOCIDAD REGISTRADA (m/s)	ENERGÍA CINÉTICA CALCULADA (KJ)	OBSERVACIONES
ACERO 3 + POLIETILENO 20	1	827.3	3993.62	Perforación total de la cara de impacto, deformación sin perforación en la cara de soporte
		829.1	4011.02	
		832.6	4044.95	
	2	825.0	3971.45	Perforación total de la cara de impacto, deformación y ruptura de fibras sin perforación en la cara de soporte
		828.1	4001.35	
		824.8	3969.52	
	3	832.5	4043.98	Perforación total de la cara de impacto, deformación sin perforación en la cara de soporte
		830.3	4022.64	
		828.6	4006.18	
	4	827.3	3993.62	Perforación total de la cara de impacto, deformación sin perforación en la cara de soporte
		826.1	3982.04	
		823.6	3957.98	
	5	828.6	4006.18	Perforación total de la cara de impacto, deformación y ruptura de fibras sin perforación en la cara de soporte
		829.2	4011.99	
		826.1	3982.04	
ACERO 3 + KEVLAR 9	1	824.2	3963.75	El proyectil atravesó totalmente la probeta
		823.5	3957.02	
		826.2	3983.01	

Debido a que los ensayos balísticos validaron las predicciones de velocidad límite que se realizaron para los tres materiales, el acero 3+4 y el acero 3+ polietileno 20 se pueden considerar materiales candidatos en la selección que a continuación se realizará.

Como se mencionó anteriormente para poder comparar entre los materiales candidatos se define:

$$E_{kp} = \frac{1}{2} m_p v_p^2$$

$$E_a = \frac{1}{4} \pi D^2 T \sigma_{eq}$$

Si consideramos que la totalidad de la energía cinética del proyectil en cuestión viajando a la velocidad especificada por la norma es absorbida por el material de blindaje tenemos:

$$\sigma_{eq} = \frac{2m_p v_p^2}{\pi D^2 T}$$

La siguiente tabla muestra el valor de σ_{eq} para cada material candidato:

MATERIAL	ESPESOR (mm)	σ_{eq} (Gpa)
ACERO BALÍSTICO	9.0	9629.39
ALUMINIO 2024-T3	25.0	3466.58
TITANIO 6AL-4V	15.0	5777.63
COMPUESTO LAMINAR DE POLIETILENO (UHMW)	25.0	3466.58
COMPUESTO LAMINAR DE VIDRIO CON POLICARBONATO	39.0	2222.17
ACERO 3 + 4	7.3	11871.84
ACERO 3 + POLIETILENO 20	24.2	3581.18

Para encontrar los índices de funcionalidad tenemos:

$$E_{kp} = \frac{1}{2} m_p v_p^2 = \frac{1}{4} \pi D^2 T \sigma_{eq}$$

Por lo tanto:

$$T = \frac{4E_{kp}}{\pi D^2 \sigma_{eq}}$$

Además:

$$m_b = A_b T \rho$$

$$\text{Costo} = (PV) A_b T f_d$$

Donde:

m_b = Masa del blindaje

A_b = Área a blindar

PV = Precio por volumen del material de blindaje

f_d = Factor de desperdicio por el corte del material, se considera por experiencia de 1.2

Sustituyendo la ecuación del espesor en estas dos últimas ecuaciones tenemos:

$$m_b = \left(\frac{4E_{kp}}{\pi D^2} \right) A_b \left(\frac{\rho}{\sigma_{eq}} \right)$$

$$Costo = \left(\frac{4f_d E_{kp}}{\pi D^2} \right) A_b \left(\frac{PV}{\sigma_{eq}} \right)$$

Como premisas para poder enlistar los materiales candidatos según su grado de desempeño en la presente aplicación se buscará minimizar tanto la masa del blindaje como su costo, observando ambas ecuaciones que están agrupadas de tal manera que el primer factor representa los requerimientos funcionales, el segundo término contiene los factores geométricos, mientras que el tercero involucra las propiedades de los materiales. Los primeros dos términos permanecen constantes para todos los candidatos por lo que para minimizar ambas funciones tendremos que maximizar las relaciones (σ_{eq}/ρ) y (σ_{eq}/PV) .

Sabemos además que uno de los requerimientos planteados en el problema es que los sistemas propios de las puertas deberán operar de manera normal, por lo que en aras de evitar interferencias físicas entre el blindaje y estos sistemas se buscará tener un material que requiera el menor espesor posible satisfaciendo a su vez los demás requerimientos. Esto obliga a considerar al espesor (T) dentro de la clasificación del desempeño de los materiales candidatos.

Finalmente, aunque el planteamiento no especifica nada sobre los requerimientos para la producción del blindaje será útil considerar un factor de facilidad de producción (FFP) tomado con base en la experiencia y que involucre la viabilidad de los procesos asociados al corte y al conformado de los materiales.

A continuación se presenta la tabla de propiedades de los materiales candidatos:

MATERIAL	σ_{eq}/ρ (Gpa*m³/Kg)	σ_{eq}/PV (Gpa*m³/\\$)	T (mm)	FFP
ACERO BALÍSTICO	1.225113232	0.020634407	9	10
ALUMINIO 2024-T3	1.246971223	0.012670249	25	5
TITANIO 6AL-4V	1.292534676	0.008456718	15	6
CLP	5.546528	0.006448251	25	7
CLVP	0.640394813	0.004946611	39	2
ACERO 3+4	1.510412214	0.025792986	7.3	8
ACERO 3 + POLIETILENO 20	1.845969072	0.008743397	24.2	6

Para jerarquizar los datos mencionados se procederá a utilizar el método entrópico dado por Jee y Kang pues su grado de confiabilidad según los autores es alto. La tabla anterior representa el término del lado derecho de la siguiente expresión matricial:

$$D = \begin{matrix} & \mathbf{X}_1 & \dots & \mathbf{X}_j & \dots & \mathbf{X}_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Donde A_1, \dots, A_m son los materiales candidatos y X_1, \dots, X_n son las propiedades o los índices de funcionalidad. De esta manera x_{ij} es el valor de la propiedad o índice X_j para el material A_i . Debido a que los valores de las distintas propiedades de los materiales candidatos son de órdenes de magnitud muy dispares se requiere normalizar estas cantidades mediante la ecuación:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}$$

Donde r tendrá valores en el rango de 0 a 1. Al normalizar la matriz de propiedades nos queda:

MATERIAL	σ_{eq}/ρ (Gpa*m ³ /Kg)	σ_{eq}/PV (Gpa*m ³ /\\$)	T (mm)	FFP
ACERO BALÍSTICO	0.092058934	0.235303805	0.062284	0.2272727
ALUMINIO 2024-T3	0.093701414	0.144484776	0.17301	0.1136364
TITANIO 6AL-4V	0.097125198	0.096435919	0.103806	0.1363636
CLP	0.416783889	0.07353243	0.17301	0.1590909
CLVP	0.048121319	0.056408524	0.269896	0.0454545
ACERO 3+4	0.113497214	0.294129491	0.050519	0.1818182
ACERO 3 + POLIETILENO 20	0.138712032	0.099705055	0.167474	0.1363636

Para establecer prioridades entre las propiedades y factores de funcionalidad se incorpora el factor de peso utilizando para este propósito el concepto de entropía E_j sobre los valores normalizados de la matriz de propiedades mediante:

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m r_{ij} \log r_{ij}$$

Donde:

$$k = 1/\log m$$

La tabla siguiente presenta los valores de k y de la entropía E_j .

K	E1	E2	E3	E4
0.513898342	0.873448614	0.919589966	0.934616434	0.961071564

Mientras que el factor de peso se determina como:

$$\omega_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)}$$

Los factores de peso calculados para cada propiedad son:

ω_1	ω_3	ω_2	ω_5
0.406560202	0.258326052	0.210051876	0.12506187

Si tenemos valores muy dispersos de alguna propiedad entonces E_j disminuirá y por lo tanto el factor de peso aumentará, sin embargo se pueden agregar las restricciones propias del problema por medio del factor s_j con lo que el factor de peso quedará ajustado de la siguiente forma:

$$\omega_j^* = \frac{s_j \omega_j}{\sum_{j=1}^n s_j \omega_j}$$

Partiendo de que el problema plantea explícitamente cuatro restricciones que son la resistencia balística, el peso, el costo y el funcionamiento de los sistemas propios del vehículo se asignó un valor de $s_j = 3$ para los tres índices relacionados con estas restricciones mientras que al FFP se le dio un valor de $s_j = 1$ de tal forma que la suma de los cuatro s_j sea igual a 10. Bajo estas consideraciones se tiene la siguiente matriz para el factor de peso ajustado:

ω^*_1	ω^*_2	ω^*_3	ω^*_4
0.443540178	0.281822919	0.229157812	0.04547909

Cada columna de la matriz de propiedades normalizada se multiplica por su factor de peso ajustado respectivo por lo que la matriz queda de la siguiente forma:

MATERIAL	$\frac{\sigma_{eq}}{\rho}$ (Gpa*m ³ /Kg)	σ_{eq}/PV (Gpa*m ³ /\\$)	T (mm)	FFP
ACERO BALÍSTICO	0.040831836	6.6314005E-02	0.014273	0.010336157
ALUMINIO 2024-T3	0.041560342	4.0719121E-02	0.039647	0.005168078
TITANIO 6AL-4V	0.043078928	2.7177852E-02	0.023788	0.006201694
CLP	0.184860401	2.0723124E-02	0.039647	0.00723531
CLVP	0.021343738	1.5897215E-02	0.061849	0.002067231
ACERO 3+4	0.050340575	8.2892432E-02	0.011577	0.008268925
ACERO 3 + POLIETILENO 20	0.061524359	2.8099170E-02	0.038378	0.006201694

Basándose en la idea de que el mejor material para la aplicación en cuestión será aquel en que cada uno de los valores de sus propiedades sea más cercano al valor ideal y más lejano del valor no deseable de la propiedad respectiva se seleccionan de la matriz anterior los valores ideales (v_j^+) y los valores no deseables (v_j^-) para cada X_j .

	j=1	j=2	j=3	j=4
v_j^+	0.184860401	8.2892432E-02	0.011576831	0.010336157
v_j^-	0.021343738	1.5897215E-02	0.061848821	0.002067231

La distancia entre los valores de las propiedades y los valores ideales se define como S_i^+ y la distancia respectiva a los valores no deseables como S_i^- , calculando ambas por medio de:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

Los resultados de aplicar las ecuaciones anteriores se muestran en la tabla siguiente:

MATERIAL	S_i^+	S_i^-
ACERO BALÍSTICO	0.14500462	0.07248097
ALUMINIO 2024-T3	0.152079323	0.03908182
TITANIO 6AL-4V	0.152880042	0.04544657
CLP	0.068282901	0.1651685
CLVP	0.183906786	0
ACERO 3+4	0.134535709	0.0888533
ACERO 3 + POLIETILENO 20	0.137657097	0.04828399

La cercanía relativa al material ideal será la medida que represente que material es el que tiene la mejor combinación de propiedades e índices de funcionalidad para la aplicación específica, esta cercanía se define por medio de:

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)}$$

Si el resultado de C_i^+ es igual a 1, el material es el ideal para la aplicación mientras que el 0 representa al material no deseable por tener una combinación de propiedades poco favorables.

El valor de C_i^+ para cada uno de los materiales candidatos es:

MATERIAL	C_i^+
ACERO BALÍSTICO	0.333267922
ALUMINIO 2024-T3	0.20444436
TITANIO 6AL-4V	0.229150127
CLP	0.707506995
CLVP	0
ACERO 3+4	0.397751451
ACERO 3 + POLIETILENO 20	0.2596736

A partir de esta tabla se puede completar el primer punto de la selección de materiales enlistando a los candidatos descendientemente según su desempeño medido a través de C_i^+ , quedando de la siguiente manera:

1. Compuesto laminar de polietileno (UHMW)
2. Acero 3 + 4
3. Acero balístico
4. Acero 3 + polietileno 20
5. Titanio 6Al-4V
6. Aluminio 2024-T3
7. Compuesto laminar de vidrio con policarbonato

3.3 SELECCIÓN DE MATERIALES

Para resolver el punto de selección de materiales se atenderá a las restricciones de costo, masa y espesor máximo posible según las zonas y los sistemas propios de las puertas.

En el planteamiento del problema se menciona que el costo máximo del material necesario para proteger cada puerta deberá ser de \$5200, mientras que la masa deberá tener un valor máximo de 22 Kg. Para atender estos dos requisitos se recurre a las siguientes ecuaciones:

$$Costo = A_b \cdot T \cdot PPV \cdot f_d$$

$$m_b = A_b \cdot T \cdot \rho$$

Para el compuesto laminar de polietileno tenemos:

$$\begin{aligned} A_b &= 0.554 \text{ m}^2 \\ T &= 25 \text{ mm} \\ PPV &= \$ 409\,586.8 \text{ m.n.} \\ F_d &= 1.2 \\ \rho &= 0.625 \text{ (g/cm}^3\text{)} \end{aligned}$$

Por lo tanto:

$$\text{Costo} = (0.554)(0.025)(409586.8)(1.2) = \$ 6\,807.33 \text{ mn}$$

$$m_b = (0.554)(0.025)(625) = 8.65 \text{ Kg}$$

Si utilizamos únicamente compuesto laminar de polietileno tendríamos un sobre costo de \$ 1 607.33 m.n. y estaríamos casi 13.35 Kg por debajo del límite de masa permitido, además en las zonas del parachoques y la chapa el espacio disponible es de 15 mm como máximo por lo que no es posible alojar compuesto laminar de polietileno, además se debe recordar que todo material compuesto laminar presenta efecto de orilla libre, por tal motivo es necesario proteger dicho compuesto en 2.5 cm en todo su perímetro con algún otro material que no presente tal comportamiento y que tenga la resistencia balística adecuada asegurando así la correcta protección del contorno del compuesto laminar de polietileno.

El segundo material en la lista según su desempeño en el procedimiento anterior es el acero 3 + 4, si blindáramos con este material la totalidad del área requerida tendríamos lo siguiente:

$$A_b = 0.554 \text{ m}^2$$

$$T = 7.3 \text{ mm}$$

$$\text{PPV} = \$ 460\,274 \text{ m.n.}$$

$$F_d = 1.2$$

$$\rho = 7.86 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Por lo tanto:

$$\text{Costo} = (0.554)(0.0073)(460\,274)(1.2) = \$ 2\,233.72 \text{ m.n.}$$

$$m_b = (0.554)(0.0073)(7\,860) = 31.78 \text{ Kg}$$

En este caso estaríamos alrededor de \$ 3 000 m.n. por debajo del límite en cuanto a costo se refiere, sin embargo tendríamos un sobre peso de casi 10 Kg.

Todo esto nos lleva a combinar materiales para lograr la mayor protección disminuyendo el costo manteniéndonos dentro del

requisito de masa.

Para las zonas donde el espesor máximo que se puede alojar es de 15 mm solo tenemos tres candidatos que son los aceros (tanto 3+4 como 9 mm) y el titanio, sin embargo como se mencionó el acero de 3 + 4 es el mejor situado en la lista de desempeño, por tal motivo se proponen las siguientes ecuaciones para minimizar el costo y cumplir con el máximo de masa permisible:

$$\text{Costo} = A_b \cdot f_d \cdot [(xT_p PPV_p) + ((1-x)T_a PPV_a)]$$

$$m_b = A_b \cdot [(xT_p \rho_p) + ((1-x)T_a \rho_a)]$$

Donde el subíndice “p” se refiere al compuesto laminar de polietileno mientras que las propiedades del acero se denotan con “a”. El término x representa la fracción del área a blindar protegida con el compuesto laminar de polietileno.

Utilizaremos la ecuación de la masa buscando que la combinación de materiales alcance el valor de 0.9 del máximo permitido para este requisito, dejando un 10% como margen de error.

Despejando x nos queda:

$$x = \frac{\frac{0.9m_b}{A_b} - T_a \rho_a}{T_p \rho_p - T_a \rho_a}$$

Donde x = 0.48 para los siguientes valores:

$$\begin{aligned} m_b &= 22 \text{ Kg} \\ A_b &= 0.554 \text{ m}^2 \\ T_a &= 7.3 \text{ mm} \\ \rho_a &= 7860 \text{ Kg/m}^3 \\ T_p &= 25 \text{ mm} \\ \rho_p &= 625 \text{ Kg/m}^3 \end{aligned}$$

Esto quiere decir que las fracciones del área en cuestión óptimas para obtener el menor costo dentro del límite de masa permisible son:

MATERIAL	FRACCIÓN DEL ÁREA
CLP	0.48
ACERO 3+4	0.52

Utilizando la ecuación para el costo tenemos:

$$Costo = (0.554)(1.2)[(0.48)(0.025)(409586.8) + (0.52)(0.0073)(460274)]$$

Con estos valores el costo correspondiente es de \$ 4 429 m.n., el cual es aproximadamente 15% inferior al límite planteado y cerca de 35% menor al costo que se hubiera tenido usando únicamente el compuesto laminar de polietileno. Con esto se resuelve el punto de selección de materiales.

4. RESULTADOS

Para dimensionar las piezas que compondrán el blindaje se requiere partir de que el 48% del área se protegerá con compuesto laminar de polietileno (CLP) y el porcentaje restante con acero 3 + 4.

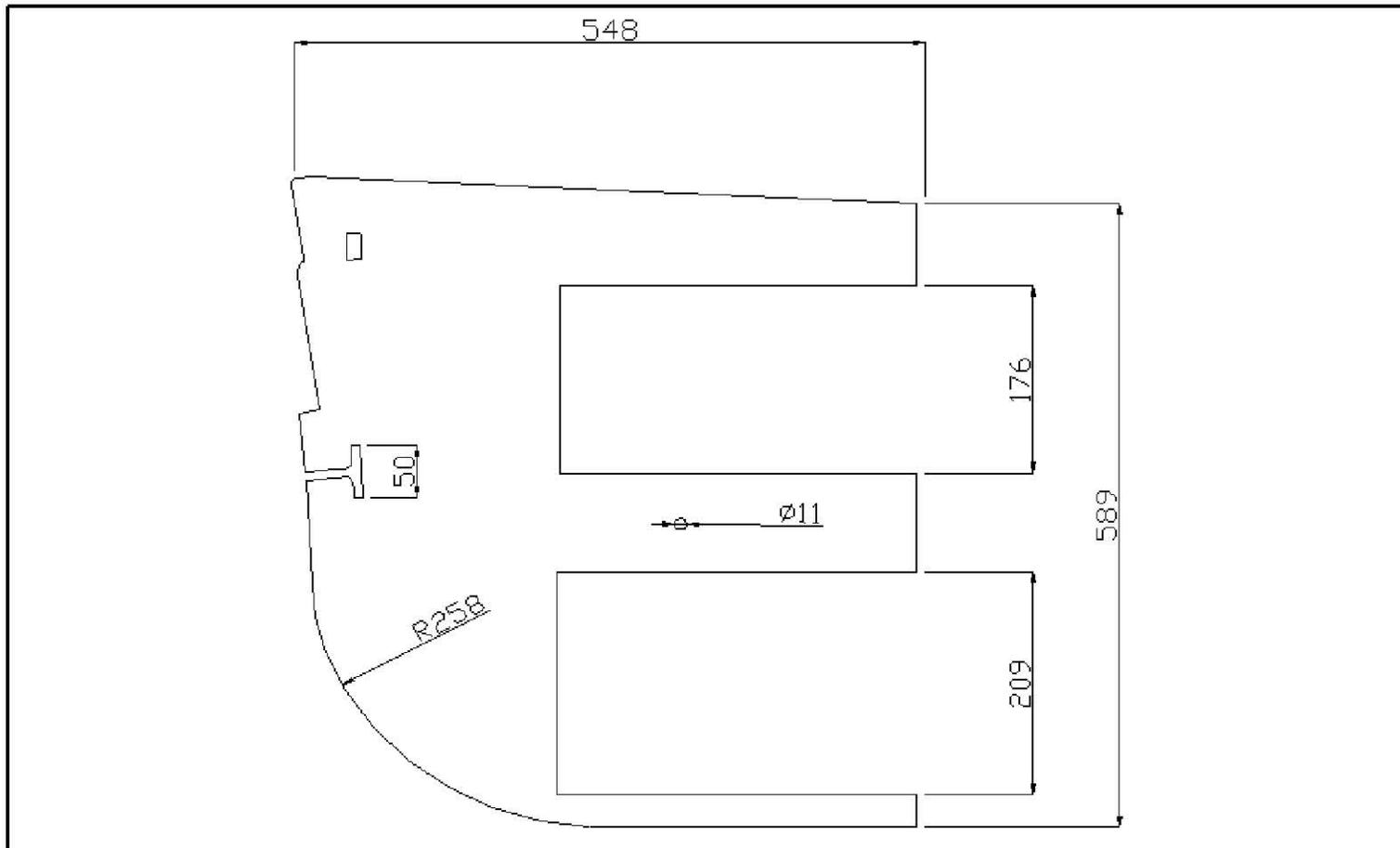
De manera experimental se ha encontrado que el polietileno al ser un compuesto laminar se deberá cubrir en 2.5 cm en todo su contorno con el acero 3 + 4, debido a esto se buscarán las zonas en las que se puede alojar el CLP cuidando que la región ocupada por su perímetro tenga la posibilidad de ubicar cerca de 33 mm (el espesor del CLP más el espesor del acero y el adhesivo) sin causar interferencia con los sistemas propios del vehículo. Para tal fin y debido a que la geometría del área a blindar es muy irregular se tomaron moldes utilizando materiales asequibles semejantes en espesor a los materiales balísticos.

Una vez que se obtuvieron las geometrías de las piezas se colocaron los moldes a manera de simular el blindaje para después instalar los sistemas del vehículo y verificar su funcionamiento.

Utilizando la técnica descrita de manera iterativa se llegó al resultado que muestran los croquis* adjuntos en las siguientes páginas.

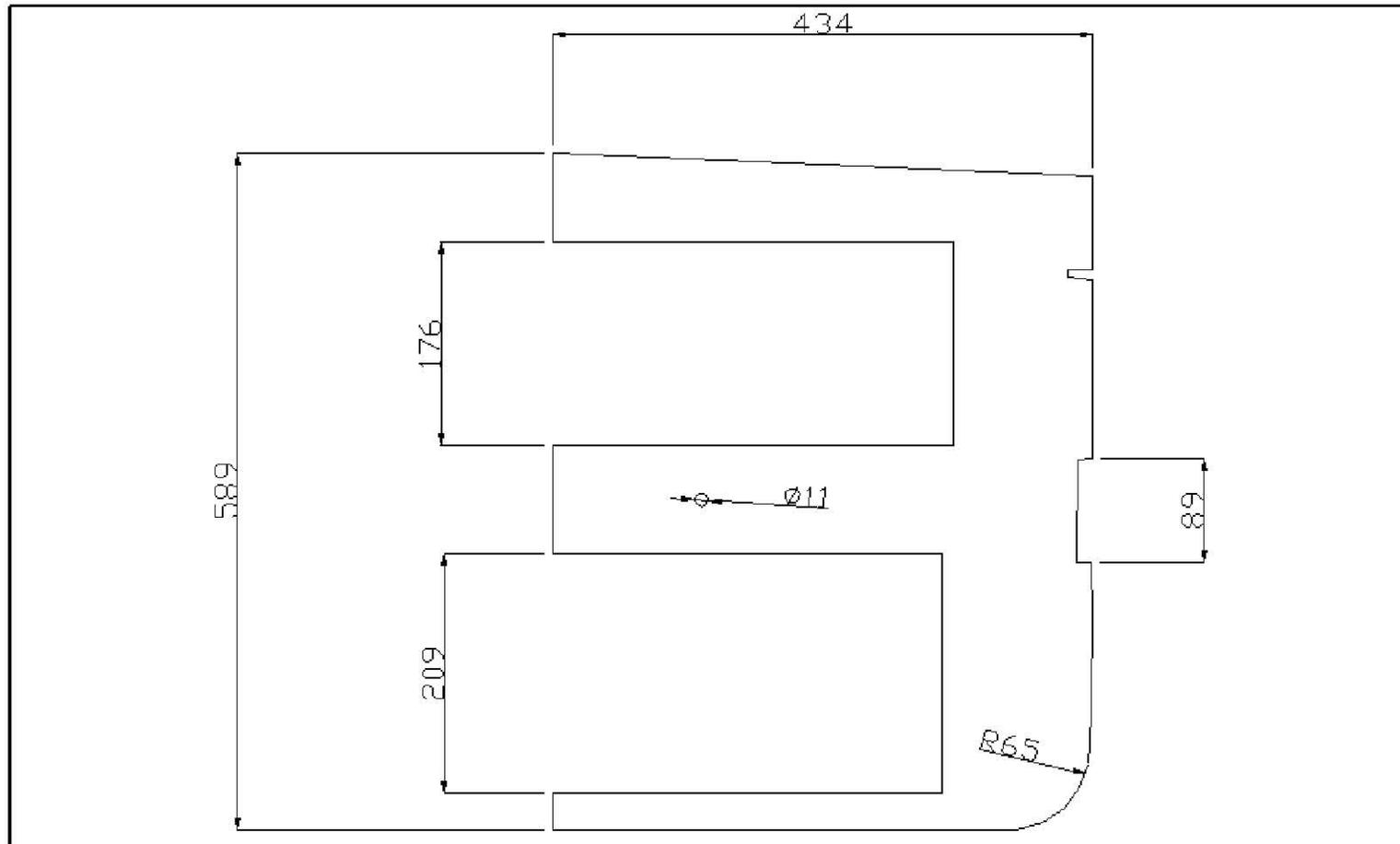
* Solamente se muestran croquis para evitar su reproducibilidad debido a que el presente trabajo parte de un desarrollo llevado a cabo para una empresa de la iniciativa privada.

Pieza No. 1 en acero 3 + 4



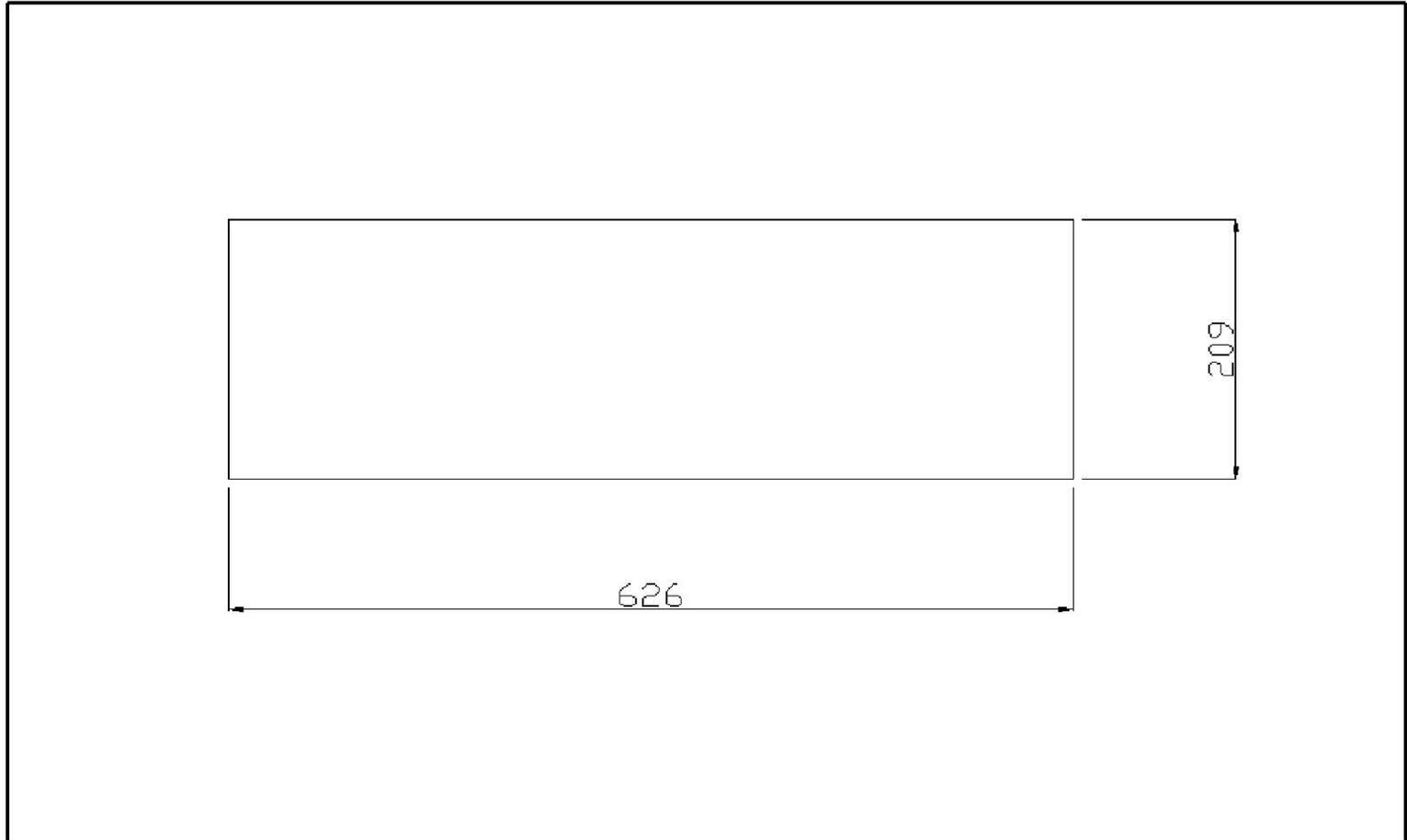
PROPIEDADES		FECHA:	
ÁREA	0.1795 m ²	DIBUJADO POR:	OSCAR VIRGILIO ASCENCIO PÉREZ
PERÍMETRO	3602.9 mm	DIMENSIONES:	mm
MASA	10.3 Kg	ESCALA:	SIN ESCALA

Pieza No. 2 en acero 3 + 4



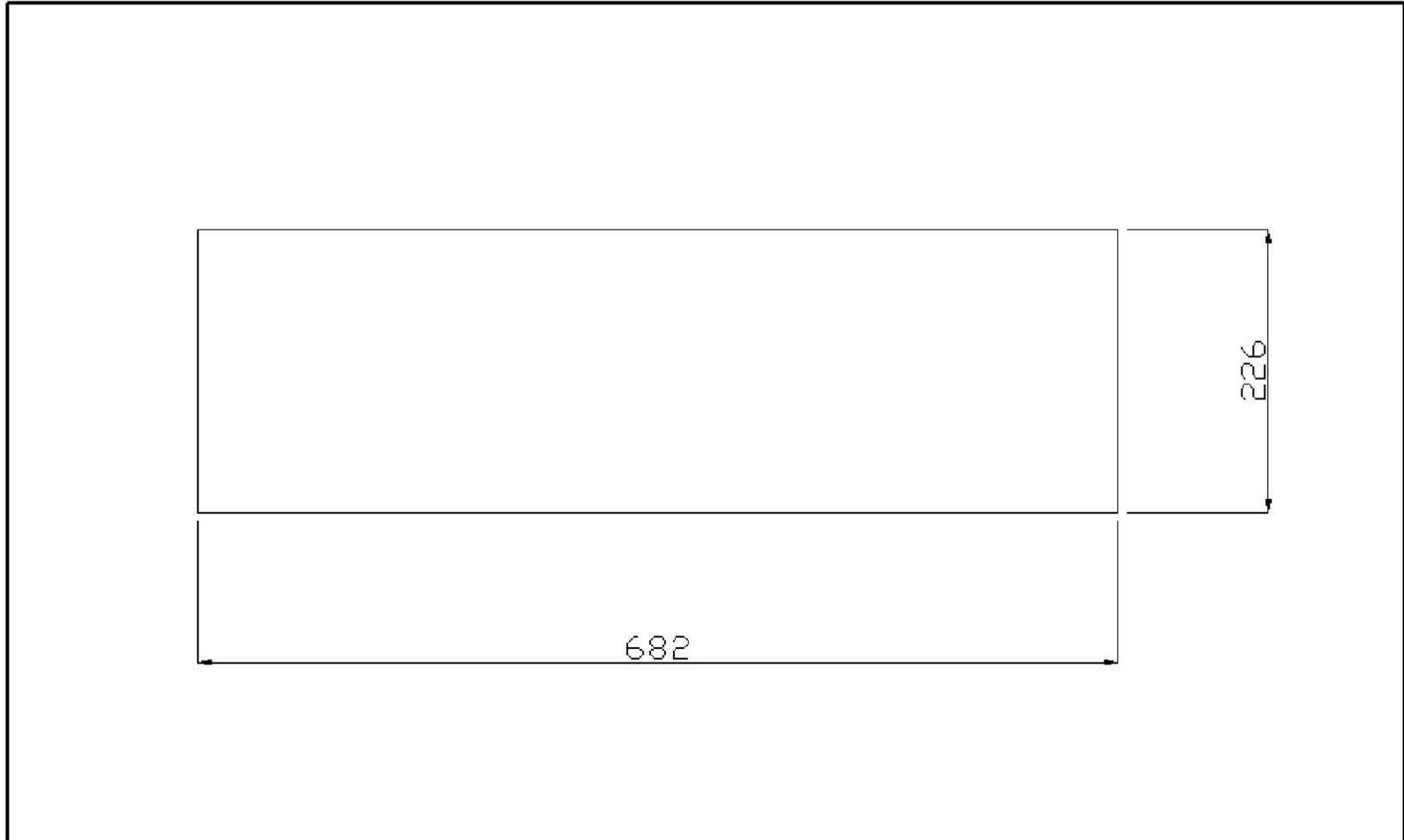
PROPIEDADES		FECHA:	
ÁREA	0.1261 m ²	DIBUJADO POR:	OSCAR VIRGILIO ASCENCIO PÉREZ
PERÍMETRO	3325.8 mm	DIMENSIONES:	mm
MASA	7.23 Kg	ESCALA:	SIN ESCALA

Pieza No. 3 en CLP de 25 mm



PROPIEDADES		FECHA:	
ÁREA	0.1307 m ²	DIBUJADO POR:	OSCAR VIRGILIO ASCENCIO PÉREZ
PERÍMETRO	1669.4 mm	DIMENSIONES:	mm
MASA	2.04 Kg	ESCALA:	SIN ESCALA

Pieza No. 4 en CLP de 25 mm



PROPIEDADES		FECHA:	
ÁREA	0.1543 m ²	DIBUJADO POR:	OSCAR VIRGILIO ASCENCIO PÉREZ
PERÍMETRO	1816.4 mm	DIMENSIONES:	mm
MASA	2.41 Kg	ESCALA:	SIN ESCALA

Las piezas de CLP resultaron rectangulares debido además de la simplicidad de su forma a que se desperdicia menos material y se disminuyen los costos por corte.

La siguiente foto fue tomada del prototipo que se probó satisfactoriamente en el túnel de tiro y se sobrepuso un esquema que muestra la ubicación de las piezas que conforman el blindaje.

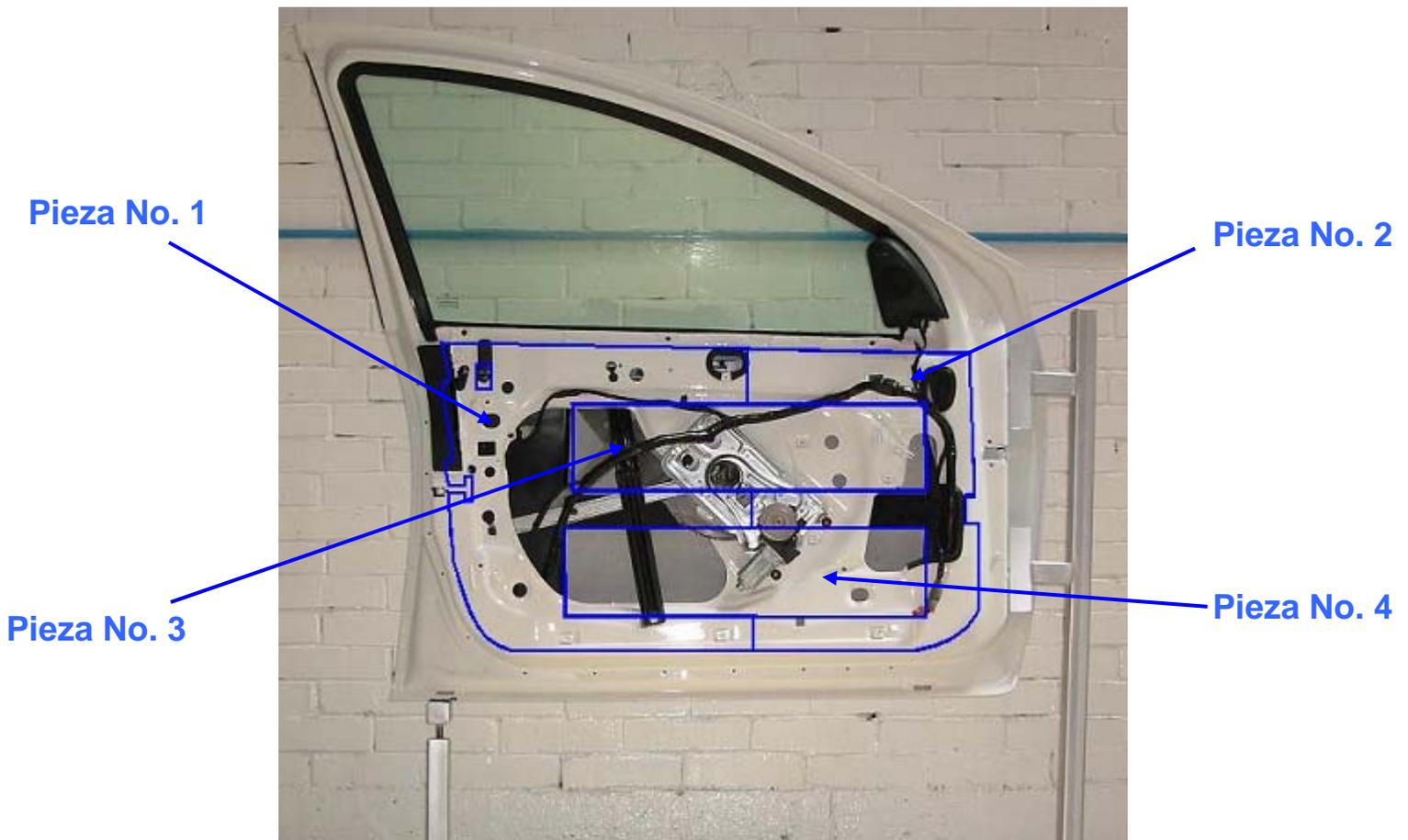


FIGURA 5.1

5. CONCLUSIONES

Se pueden obtener diversas conclusiones a partir del trabajo desarrollado siendo la primera y más importante que se cumplió con el objetivo ya que se logró seleccionar una combinación de materiales para soportar adecuadamente los múltiples impactos del proyectil 7.62x51 mm bajo las condiciones de norma logrando disminuir al máximo el costo y estando dentro del límite de masa permitido para un área de 0.554 m².

Otra situación que se pudo concluir es que aunque existen diagramas comparativos entre las diferentes familias de materiales para sus índices de funcionalidad más comunes como los que presenta Ashby, no existe como tal una propiedad específica para todos los materiales a partir de la cual se pueda obtener un índice de funcionalidad con el objeto de seleccionar el mejor material para una aplicación balística, esto debido a que cada tipo de material tendrá alguna propiedad característica en la cual se apoye para resistir altos impactos, por lo que con el método tradicional de Ashby sería imposible comparar la dureza de los cerámicos contra la ductilidad de los polímeros o la tenacidad de los metales. Sin embargo englobando las propiedades de los distintos materiales a través del concepto de resistencia equivalente (σ_{eq}) es factible la evaluación comparativa de los candidatos como lo propone el mismo autor.

También a manera de conclusión se tiene que se pueden crear materiales compuestos laminares para aplicación de blindaje partiendo de entender las etapas y características del evento balístico y que como se mencionó en su momento existen propiedades características de los materiales que juegan un papel fundamental en cada etapa del desarrollo de los altos impactos. Además se observó que el modelo utilizado para esta tarea tuvo buena correlación con los experimentos tanto del acero 3 + 4 como del acero 3 + polietileno 20; en el caso del acero 3 + Kevlar 9 el resultado que se tuvo desde la predicción con el modelo matemático fue que no soportaría los impactos en cuestión, esto pudo deberse a varios factores que como se mencionó se partió de los datos arrojados en experimentos en los cuales se somete al Kevlar ante impactos de 0.44 in Magnum sabiendo que las características físicas y geométricas de esta munición difieren en gran medida con las del proyectil 7.62x51 mm ya que mientras la ojiva del primero tiene forma de cono truncado (carece de punta), la del segundo es completamente cónica, esto pudo tener repercusiones en el comportamiento de la probeta ya que el primer contacto durante el impacto sucede en una región de área casi nula pudiendo causar daño muy puntualizado tanto en la cara de impacto como en el material de soporte. Se sabe que algunos desarrolladores de blindaje han utilizado eficazmente el Kevlar como material de soporte colocando como cara de impacto distintas clases de materiales cerámicos, esto puede confirmar de cierta forma nuestra conclusión ya que los cerámicos tienen durezas superiores a los aceros, esto puede causar mayor deformación y erosión sobre el proyectil, además de que el ángulo típico en el que se fracturan los cerámicos genera un cono el

cual tiene un área de base mayor que el generado en los aceros, esto es de gran relevancia ya que mientras mayor sea esta área el esfuerzo sobre el material de soporte será menor y en el caso específico del Kevlar existirán más fibras que estarán directamente en contacto con el conjunto formado por el proyectil y el cerámico fracturado. Sería de gran utilidad contar con equipo para poder medir la energía residual con la que contó el proyectil después haber atravesado completamente el compuesto laminar citado ya que tomando ese dato como base se pudo evaluar si se podía mejorar el comportamiento de este compuesto incrementando el espesor de la cara de impacto y realizar más ensayos que lo confirmaran para tener otro material candidato en la evaluación y selección del material óptimo.

Finalmente se puede mencionar que si bien existe gran variedad de autores que han intentado predecir el comportamiento balístico de los materiales, la mayor parte de sus desarrollos dependen de la experimentación lo que restringe en gran medida el desarrollo de nuevos materiales, esta puede ser la razón de que hoy en día la gama de materiales utilizados para dicha función sea muy limitada. Además es importante decir que debido a que la presente aplicación está ligada de manera muy estrecha a la seguridad, es muy escasa la información disponible para el desarrollo o el estudio del fenómeno balístico y la mayor parte de ella está patrocinada y protegida por los distintos gobiernos siendo en general de acceso restringido.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Hibebeler R, Mecánica de materiales. 1ª edición, México: CECSA, 1995, 737 – 742
2. Avner S. Introducción a la metalurgia física. México: McGraw-Hill, 1974, 128 – 133
3. Abrate S. Impact on laminated composites: Recent Advances. Appl Mech Rev vol 47, no 11, Noviembre 1994
4. Beer F, Johnston R. Mecánica vectorial para ingenieros (Dinámica). 5ª edición, México: McGraw-Hill, 1990: 640 - 650
5. Abrate S. Impact on laminated composites. Appl Mech Rev vol 44, no 4, Abril 1991
6. Reid S, Wen H. Perforation of FRP laminates and sandwich panels subjected to missile impact, 1996: 239 – 276
7. Wijk G. High-velocity projectile penetration into thick armour targets. Int J Impact Eng 22, 1999: 45 – 54
8. Pollack H. Materials Science and Metallurgy. 3ª edición . 179 – 181
9. Chocron I, Sánchez-Gálvez V. A new analytical model to simulate impact onto ceramic/composite armors. Int J Impact Eng 21 (6), 1998: 461 – 471
10. Askeland D. Ciencia e ingeniería de los materiales. 3ª edición, México: International Thomson Editores, 1998
11. Shackelford J. Ciencia de materiales para ingenieros. 3ª edición, México: Prentice Hall Hispanoamericana, 1995
12. Callister W. Introducción a la ciencia e ingeniería de materiales. México: Reverte, 1995

13. Ashby M. Materials selection in mechanical design. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1992
14. Grace F. Ballistic limit velocity for long rods from ordnance velocity through hypervelocity impact. *Int J Impact Eng* 23, 1999: 295 – 306
15. Zaera R, Sánchez-Gálvez V. Analytical modeling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal light weight armours. *Int J Impact Eng* 21 (3), 1998: 133 – 148
16. Moyre S, Hine P, Duckett R, Carr D, Ward I. Modelling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact. *Composites Science and Technology* 60, 2000: 2631 – 2642
17. Hetherington JG, Rajagopalan BP. Investigation in to the energy absorbed during ballistic perforation of composite armours. *Int J Impact Eng* 11(1). 33 – 40
18. Wang B, Chou S. The behaviour of laminated composite plates as armour. *Journal of materials processing technology* 68, 1997: 279 – 287
19. Jee D, Kang K. A method for optimal material selection aided with decision making theory. *Materials and Design* 21, 2000: 199 – 206
20. Van Vlack L. *Materiales para Ingeniería*. México: Continental, 1967
21. Smith W. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. México: McGraw – Hill Interamericana, 1999