CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

"CHALECOS ANTIBALA. CONSTITUCIÓN Y DESEMPEÑO ANTIBALÍSTICO."

CASO DE ESTUDIO.

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: INGENIERÍA DE PROCESOS DE POLIMERIZACIÓN.

PRESENTA:

YDELIO MIGUEL VALENCIA ORTEGA

SALTILLO, COAHUILA **AGOSTO 2006**

CENTRO DE INFORMACIÓN
13 OCT 2006
RECIBIDO

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

"CHALECOS ANTIBALA. CONSTITUCIÓN Y DESEMPEÑO ANTIBALÍSTICO."

CASO DE ESTUDIO.

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: INGENIERÍA DE PROCESOS DE POLIMERIZACIÓN.

PRESENTA:

YDELIO MIGUEL VALENCIA ORTEGA

ASESOR:

DR. LUIS FRANCISCO RAMOS DE VALLE

SALTILLO, COAHUILA **AGOSTO 2006**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

"CHALECOS ANTIBALA. CONSTITUCIÓN Y DESEMPEÑO ANTIBALÍSTICO."

CASO DE ESTUDIO.

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: INGENIERÍA DE PROCESOS DE POLIMERIZACIÓN.

PRESENTA:

YDELIO MIGUEL VALENCIA ORTEGA

EVALUADORES:

DR. FRANCISCO RODRÍGUEZ GONZÁLEZ | **M.C. ISAURA YAÑEZ FLORES**

SALTILLO, COAHUILA | **AGOSTO 2006**

ÍNDICE.

1. INTRODUCCIÓN. 1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA. 3
   2.1. FABRICACIÓN DE CHALECOS ANTIBALAS. 3
   2.2. COMPORTAMIENTO DE LOS CHALECOS AL SER IMPACTADOS POR UN PROYECTIL. 6
   2.3. EFECTOS EN EL CUERPO HUMANO PROVOCADOS POR EL IMPACTO DE UN PROYECTIL EN EL CHALECO ANTIBALAS. 9
   2.4. NIVELES DE PROTECCIÓN DE LOS CHALECOS ANTIBALAS. 10
   2.5. GENERALIDADES DE LOS MÉTODOS DE PRUEBA. 14
   2.6. GENERALIDADES DE LA NORMATIVIDAD QUE RIGE LAS PRUEBAS BALÍSTICAS DE CHALECOS ANTIBALAS. 15
   2.7. DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS EMPLEADAS PARA LA FABRICACIÓN DE CHALECOS ANTIBALAS. 16
      2.7.1. FIBRA M5. 17
      2.7.2. FIBRA ARAMIDA. 18
      2.7.3. FIBRA SPECTRA. 19
      2.7.4. FIBRA ZYLON. 20
      2.7.5. FIBRA KEVLAR. 21
      2.7.6. FIBRA TWARON. 21
3. ESTADO DEL ARTE O ESTADO ACTUAL DE CONOCIMIENTO. 24
   3.1. ESTRUCTURA DEL CHALECO. 24
   3.2. EMPLEO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS NANOESTRUCTURADOS. 25
   3.3. COMPORTAMIENTO DE UN CHALECO ANTIBALAS REFORZADO CON NANOCOMPÓSITOS POLIMÉRICOS NANOESTRUCTURADOS. 26
   3.4. OTROS DESARROLLOS. 27
   3.5. ESTUDIOS RECIENTES. 28
4. ÁREAS DE OPORTUNIDAD. 31
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. 32
6. REFERENCIAS. 33

1. INTRODUCCIÓN.

Durante el constante desarrollo y evolución del ser humano a través del tiempo han existido en él, preocupaciones que lo han acompañado siempre, entre otras la satisfacción de sus necesidades básicas, la comodidad en el entorno en el que se desenvuelve y su protección. Este último aspecto es el que da origen al presente caso de estudio, ya que los seres humanos que tienen como objetivo resguardar algo considerado valioso, desde un objeto hasta una nación entera, están exponiendo su integridad física y su vida en el cumplimiento de su deber. A fin de proteger la vida de estas personas, a lo largo de la historia se han enfocado esfuerzos para desarrollar y aplicar avances en tecnología de materiales para crear y producir aditamentos que minimicen las consecuencias del impacto de un proyectil en el cuerpo humano.

De esta manera, se ha observado[1] que, en un principio, los escudos protectores estaban hechos de piel de animal. A medida que las civilizaciones avanzaron, se empezó a utilizar madera y luego metal para su fabricación, eventualmente, durante la edad media se emplearon vestimentas de metal. No obstante, la aparición de las armas de fuego nulificó la efectividad de los implementos anteriores. Sin embargo, el hombre no podía estar desprotegido ante las amenazas, por lo que se emplearon materiales más resistentes, pero más pesados que limitaban los movimientos del usuario. Lo anterior, aunado al hecho de que se observó que las armaduras de los guerreros japoneses de la edad media eran a base de tejidos de seda, originó que, a principios del siglo XX, se llevaran a cabo estudios a fin de fabricar artículos que protegieran al ser humano sin entorpecer sus movimientos.

En virtud de que los resultados obtenidos con prendas confeccionadas con tejidos naturales no fueron satisfactorios comenzaron a emplearse tejidos sintéticos, los cuales en primera instancia ofrecían protección contra fragmentos de municiones o de granadas, pero aún no protegían de proyectiles disparados por la gran mayoría de las armas de fuego existentes. Después de varios años de investigación sobre el comportamiento de los tejidos sintéticos, a la fecha se han desarrollado diferentes tipos de fibras que conforman por sí solas chalecos ligeros y flexibles que pueden detener proyectiles de baja y hasta mediana energía

y chalecos robustos y rígidos o semi-rígidos que, además, incorporan en su construcción capas de materiales cerámicos o metálicos que pueden detener proyectiles de alta energía, pero los cuales son pesados y voluminosos.

De esta forma se puede observar que permanece constante, en el diseño y fabricación de chalecos antibalas, el objetivo de obtener la máxima protección, movilidad y confort con el mínimo peso y volumen, con el fin de que el usuario tenga un óptimo desempeño en sus funciones de manera segura.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

2.1. FABRICACIÓN DE LOS CHALECOS ANTIBALAS.

Como se mencionó en el capítulo anterior, los chalecos antibalas tienen como objetivo proteger al usuario de proyectiles de armas de fuego de cualquier calibre y de fragmentos de explosivos principalmente, debiendo además ser lo mas ligero y cómodo posible, a fin de no entorpecer los movimientos del usuario. Para que los chalecos cumplieran con su objetivo de brindar protección se debió analizar la estructura adecuada para tal fin, determinándose después de varios estudios, que ésta debería ser entretejida a fin de oponer mayor resistencia al proyectil que intenta dañar al cuerpo humano, tal como se muestra en la Figura 1, ya que permitiría la dispersión de la energía del proyectil en el punto de impacto, considerándose posteriormente el hecho de que con varias capas de material con una estructura entretejida se obtendría un mayor nivel de protección[2].

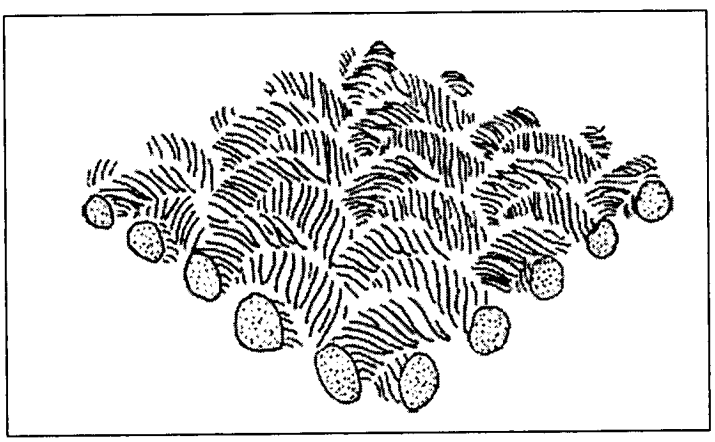

Figura 1. Estructura entretejida que conforma los chalecos[2].

Típicamente los chalecos antibalas flexibles (sin ningún aditamento metálico o cerámico extra) son prendas fabricadas de varias capas de fibras sintéticas las cuales forman estructuras complejas similares a una red muy resistente, pudiéndose combinar diferentes orientaciones de las redes de fibra.

Los chalecos pueden ser fabricados con diferentes tipos de fibra o combinaciones de ellas. Por ejemplo, se puede mencionar que el proceso de fabricación de la fibra denominada Spectra (constituída de Polietileno de alto peso molecular) consiste primero en disolver el polímero que puede contener de 70,000 a 350,000 unidades repetitivas, en un solvente a alta temperatura, y después extruirlo a través de un dado con unos pequeñísimos orificios circulares llamados "spinnerets", y produciendo así unos filamentos muy finos, que finalmente se secan, se enfrían y se enredan en carretes o bobinas similares a los que se observan en la Figura 2, que tendrán como finalidad alimentar la fibra para la formación de la red. Este proceso de producción de fibra alinea longitudinalmente las cadenas moleculares; provocando que las fibras tengan una gran resistencia a la tensión, lo cual es fundamental para que un chaleco antibalas pueda proporcionar la protección requerida[2].

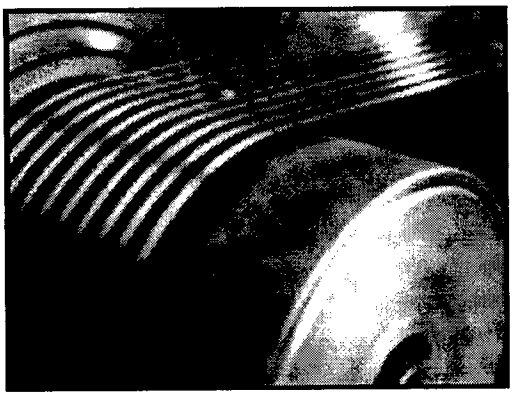

Figura 2. Carretes de fibra[2].

A continuación, como se muestra en la Figura 3, los carretes anteriormente mencionados son colocados de tal manera que conforme cada uno alimente fibras éstas se vayan alineando antes de pasar a un dispositivo que tiene la función de atomizar una resina flexible con el fin de conformar una sola hoja que posteriormente es enrollada en un nuevo carrete, después se cruzan dos tramos de hoja de manera perpendicular siendo unidos por medio de un adhesivo. La nueva hoja entretejida es cubierta en cada lado con una película que es comúnmente una poliolefina, la cual proporciona resistencia a elementos externos como la abrasión, la humedad y los rayos UV, produciendo de esta manera una fina y delgada tela, la cual finalmente es

cortada siguiendo un modelo previamente establecido que deberá garantizar comodidad y libertad de movimientos; cabe mencionar que, si se requiere de una tela mas gruesa, se puede incrementar el número de capas entretejidas apilándolas una sobre otra antes de colocar la película de poliolefina[2].

Una vez fabricado, el chaleco debe ser sometido a pruebas de funcionamiento de conformidad con las normas dictadas por el Instituto Nacional de Justicia (NIJ) de los Estados Unidos de América. De acuerdo a los resultados que se obtengan en las pruebas de funcionamiento y a los requerimientos del usuario, el fabricante puede modificar el número de capas de tela entretejidas, su orientación, o bien los adhesivos y resinas empleadas, así como el proceso de alineación de las fibras, a fin de obtener un mejor producto.

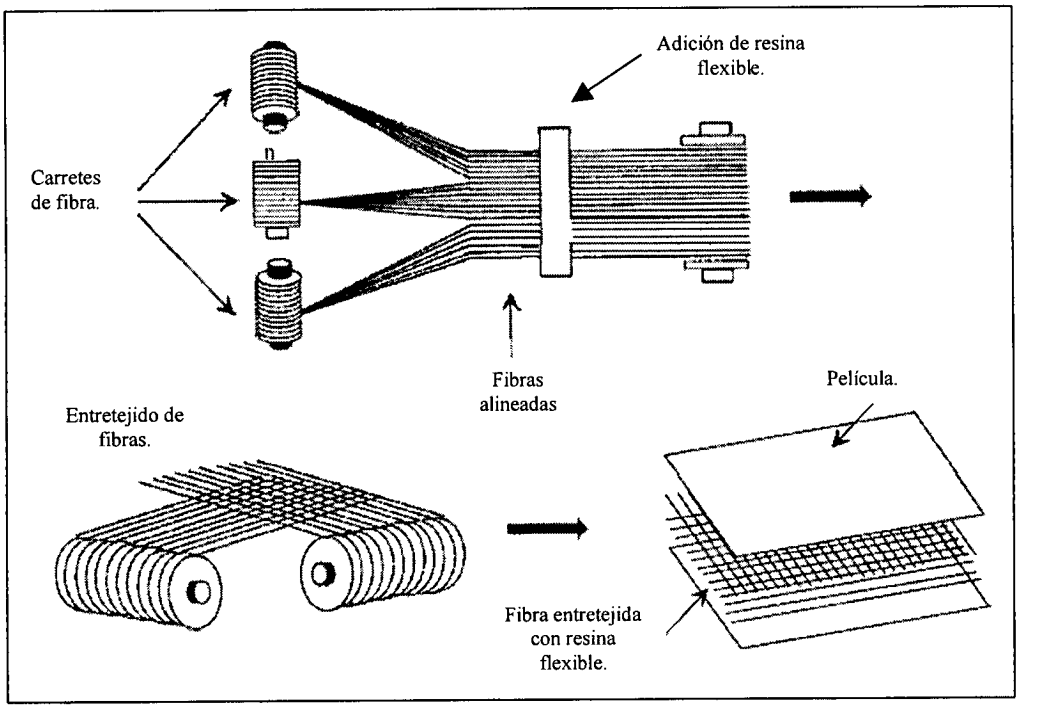

Figura 3. Diagrama del proceso general de fabricación de tela para producir chalecos antibalas[2].

2.2. COMPORTAMIENTO DE LOS CHALECOS AL SER IMPACTADOS POR UN PROYECTIL.

De acuerdo con la descripción del proceso de fabricación de un chaleco antibalas flexible, se observa que su tela esta constituida por una o varias capas de fibras entretejidas similares a una red. Esta estructura permitirá que cuando un proyectil impacte en el chaleco, éste sea atrapado en la red de fibras de manera similar a como una red detiene el movimiento de un balón. El proyectil puede penetrar un cuerpo debido a la elevada energía con que cuenta, derivada de su peso y velocidad, sin embargo, al hacer contacto con la superficie del chaleco se espera que no logre penetrarlo y herir al usuario, debido, en términos generales, a dos fenómenos:

- El hecho de que la estructura del chaleco es similar a una red provoca que, al impactar el proyectil, la totalidad de su energía es absorbida y dispersada a través de ésta, ya que al momento del golpe no solo se deforman las fibras con las que entra en contacto, sino que además estira a las que se encuentran en las inmediaciones, extendiendo la fuerza del impacto a un área mayor[3], como se ilustra en la Figura 4. La elongación de la red absorberá la energía y la distribuirá a toda el área abarcada por la fuerza de impacto, provocando que el proyectil vaya perdiendo fuerza hasta ser detenido.

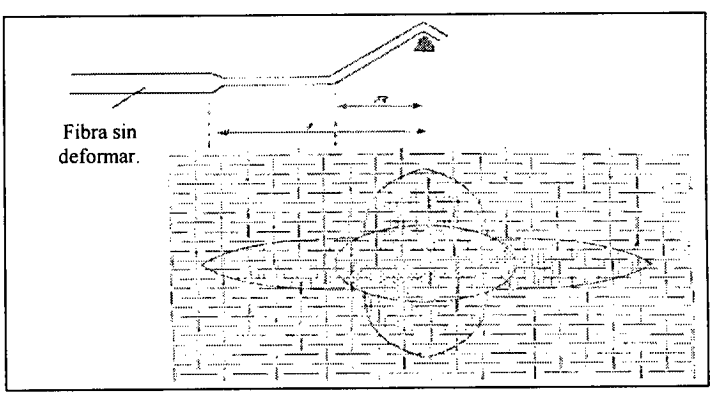

Figura 4. Deformación de las fibras y área afectada por el impacto del proyectil.

- Cuando el proyectil entra en contacto con el chaleco e intenta penetrarlo la estructura de red opondrá resistencia, provocando la deformación del proyectil de manera similar a que si se arrojara una bola de arcilla en una pared[4], como se puede observar en la Figura 5, reduciendo su energía.

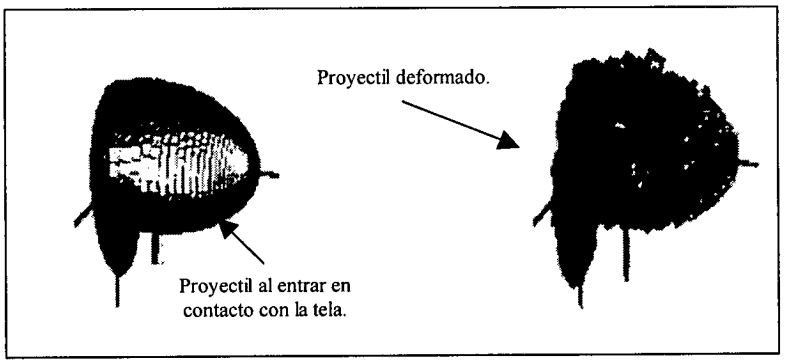

Figura 5. Deformación del proyectil al intentar penetrar la tela del chaleco antibalas.

En virtud de que, normalmente, una sola capa de fibras no es suficiente para detener un proyectil, se requiere que los chalecos consten de varias capas para poder absorber más energía sin sufrir mas daño que su deformación como se muestra en la Figura 6[5].

Figura 6. Deformación de las capas del chaleco antibalas ocasionada por un proyectil, el cual no atravesó su estructura.

Cabe mencionar que, aunque el chaleco no sea penetrado, el tejido puede sufrir daños debido a la energía del impacto, tal y como se ilustra en la siguiente figura.

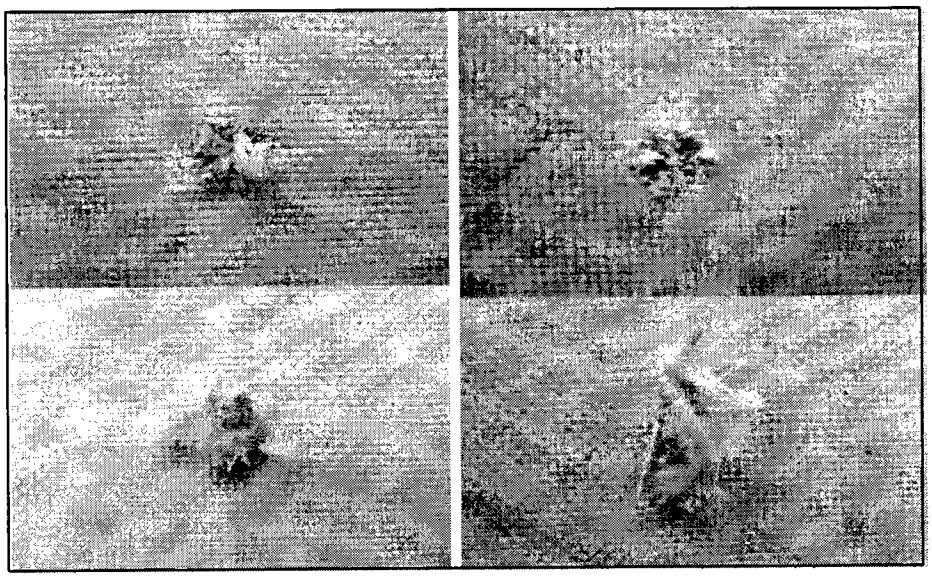

Figura 7. Daños sufridos en el tejido del chaleco antibalas ocasionados por un proyectil, el cual no atravesó su estructura[5].

Sin embargo, hay ocasiones en las que el proyectil atraviesa el chaleco impactando en el cuerpo del usuario, como se muestra en la Figura 8; lo cual se debe, según investigaciones, a que la energía del proyectil es tal que rompe la estructura del tejido sin ser deformado[6].

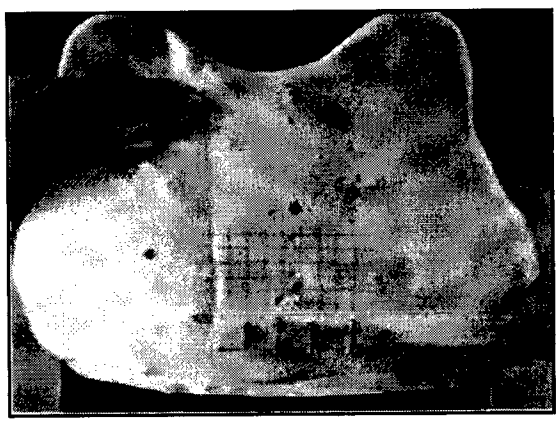

Figura 8. Chaleco antibalas perforado por la acción de los impactos de cartuchos calibre .22", .38", .40" y .45".

2.3. EFECTOS EN EL CUERPO HUMANO PROVOCADOS POR EL IMPACTO DE UN PROYECTIL EN EL CHALECO ANTIBALAS.

Como se explicó anteriormente, cuando los tejidos que conforman un chaleco antibalas son impactados por un proyectil sufren una deformación, la cual en el conjunto de fibras tendrá una forma cóncava en su estructura, tal y como se muestra en la Figura 9.

Esta deformación se proyectará directamente contra el cuerpo del usuario, provocando una lesión por contusión, la cual dependerá de las características del proyectil tales como su tipo, velocidad, y fuerza de impacto. La magnitud de la contusión puede ser de severa a mortal dependiendo del lugar del cuerpo en el que se produzca el impacto[7].

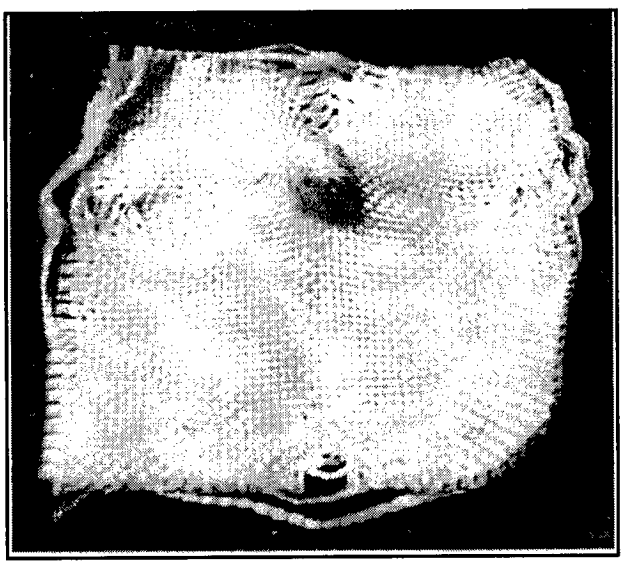

Figura 9. Chaleco antibalas deformado por la acción de un proyectil.

La preocupación por los efectos del impacto en el cuerpo es, en términos generales, debido a la alta probabilidad de que resulte severamente dañado un órgano vital, o por lo menos sufra una hemorragia interna, aunque los efectos dependerán en gran medida de la complexión del usuario, así como de su edad y estado físico. Sin embargo, la herida cutánea que se produce es muy similar en cualquier caso,

observándose desde lesiones como hematomas (moretones), como se puede apreciar en la siguiente figura, hasta heridas similares a ámpulas reventadas[6].

Figura 10. Lesión (hematoma) provocado por el impacto de un proyectil sobre un chaleco antibalas que portaba esta persona.

Actualmente, a fin de evaluar los efectos de las lesiones en el torso, se llevan a cabo simulaciones en computadoras del impacto del proyectil, teniendo la protección del chaleco antibalas. Otra forma de evaluación es realizar pruebas balísticas en diferentes tipos de animales. Los resultados de estos estudios indican que las partes que pueden resultar más afectados por el impacto de un proyectil sobre el chaleco y contra el cuerpo humano son: la columna vertebral, los pulmones, el hígado, el corazón y el riñón[4]. No obstante lo anterior, los estándares para evaluar las lesiones provocadas por contusión aún tienen una limitada fundamentación biomecánica que permita determinar con precisión y de manera mas completa los efectos de los impactos[6].

2.4. NIVELES DE PROTECCIÓN DE LOS CHALECOS ANTIBALAS.

A la fecha, no existe un chaleco flexible compuesto por una sola capa de tejido que por si solo pueda proteger a su usuario de todo tipo de proyectil. Sin embargo, con

cada capa de tejido se puede brindar una determinada protección. A esa protección por capa se le ha denominado "nivel de protección", distinguiéndose seis diferentes niveles de acuerdo a la protección que ofrecen[1].

1. NIVEL I.

   Este es el nivel mínimo de protección, los chalecos correspondientes a este nivel son ligeros y flexibles. Protegen contra proyectiles de rifle calibre .22" largo, con punta redonda de plomo (Lead Round Nose), con un peso de 2.6 gramos y que impactan a una velocidad de 320 m/s. Asimismo brindan protección contra proyectiles calibre .38" especial, con chaqueta de metal (Full Metal Jacket), con un peso de 6.2 gramos y que impactan a una velocidad de 312 m/s.

2. NIVEL II A.

   Los chalecos que corresponden a este nivel son ligeros y flexibles. Brindan protección contra proyectiles calibre 9 mm. con chaqueta de metal (Full Metal Jacket), y con punta redonda (Round Nose), con un peso de 8 gramos y que impactan a una velocidad de 332 m/s. Asimismo, protegen contra proyectiles calibre .40" S&W, con chaqueta de metal (FMJ), con un peso de 11.7 gramos y que impactan a una velocidad de 312 m/s.

3. NIVEL II.

   Los chalecos correspondientes a este nivel son mas pesados y voluminosos que los chalecos de nivel I y II A, pero aún son flexibles. Protegen contra proyectiles calibre 9 mm, con chaqueta de metal (FMJ) y punta redonda (Round Nose), con un peso de 8 gramos y que impactan a una velocidad de 358 m/s. Asimismo brindan protección contra proyectiles calibre .357" Magnum, con chaqueta y punta suave (Jacketed Soft Point), con un peso de 10.2 gramos y que impactan a una velocidad de 427 m/s.

4. NIVEL III A.

Este tipo de chalecos provee el más alto nivel de protección disponible sin dejar de ser flexibles. Brindan protección contra proyectiles calibre 9 mm. con chaqueta de metal (FMJ), y con punta redonda (RN), con un peso de 8 gramos y que impactan a una velocidad de 427 m/s. Asimismo protegen contra proyectiles calibre .44" Magnum, con chaqueta y punta hueca (Jacketed How Point), con un peso de 15.6 gramos y que impactan a una velocidad de 427 m/s.

5. NIVEL III.

Los chalecos correspondientes a este nivel son semirígidos. Protegen contra proyectiles calibre 7.62 mm. tipo AK47 (conocida comúnmente como "cuerno de chivo") con chaqueta de metal (FMJ), con un peso de 9.6 gramos y que impactan a una velocidad de 838 m/s.

6. NIVEL IV.

Este tipo de chalecos provee el más alto nivel de protección, sin embargo, requieren para tal fin que se les inserte una placa balística metálica o cerámica entre las capas del tejido. Esta placa, además de incrementar el peso del chaleco y disminuir la movilidad del usuario, pudiera ser quebradiza y solo resistirá satisfactoriamente un impacto.

Brindan protección contra proyectiles calibre .30-06, con capacidad de perforar los chalecos, con un peso de 10.8 gramos y que impactan a una velocidad de 868 m/s.

PLACAS BALÍSTICAS.

Como se ha mencionado, debido a que aún no existen chalecos flexibles que protejan de todo tipo de proyectil al usuario, se requiere el refuerzo de éste con placas balísticas de diferentes materiales que incrementen la protección aunque disminuyan la movilidad y comodidad. Cabe aclarar que las placas únicamente son complemento de los chalecos y no pueden emplearse de manera independiente, ya que no resistirían el impacto de ciertos proyectiles. Estas placas balísticas como se muestra en la Figura 11 son insertos de espesor constante y tamaño aproximado al área del chaleco que protegen el dorso y la espalda, las cuales se colocan en el chaleco en el interior de unos bolsillos fabricados en éste para tal fin, las placas deben ajustarse a la forma del cuerpo a fin de no entorpecer los movimientos del usuario y de no ser incómodas[8].

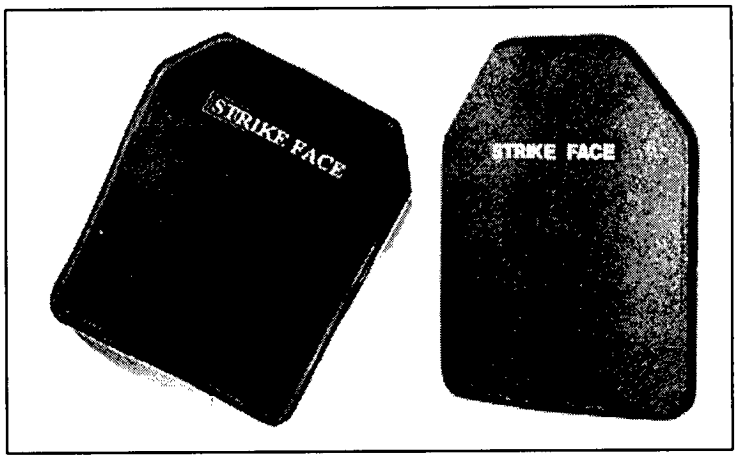

Figura 11. Placas balísticas.

Los materiales que normalmente son empleados para la fabricación de estas placas son: óxido de Aluminio, carburo de Silicio, polietileno (no recomendadas para su uso o almacenamiento en temperaturas inferiores a -26 °C y superiores a 79° C), y acero principalmente[8].

2.5. GENERALIDADES DE LOS MÉTODOS DE PRUEBA.

Una vez que ha concluido la fabricación del chaleco antibalas se efectúan a éste pruebas de resistencia a fin de determinar si están en posibilidad de proporcionar la protección requerida. Existen varios métodos de prueba apegados a la normatividad correspondiente. El método mas general, ilustrado en la siguiente figura, consiste en principio, en emplear un arreglo en el que se usan dos cronógrafos que tienen como finalidad medir la velocidad del proyectil al pasar por dos dispositivos denominados marcas, así como un prisma hueco relleno de una arcilla balística (con aspecto similar a la plastilina) en el que se asegura el chaleco sujeto a prueba, el cual previamente fue ligeramente humedecido[1].

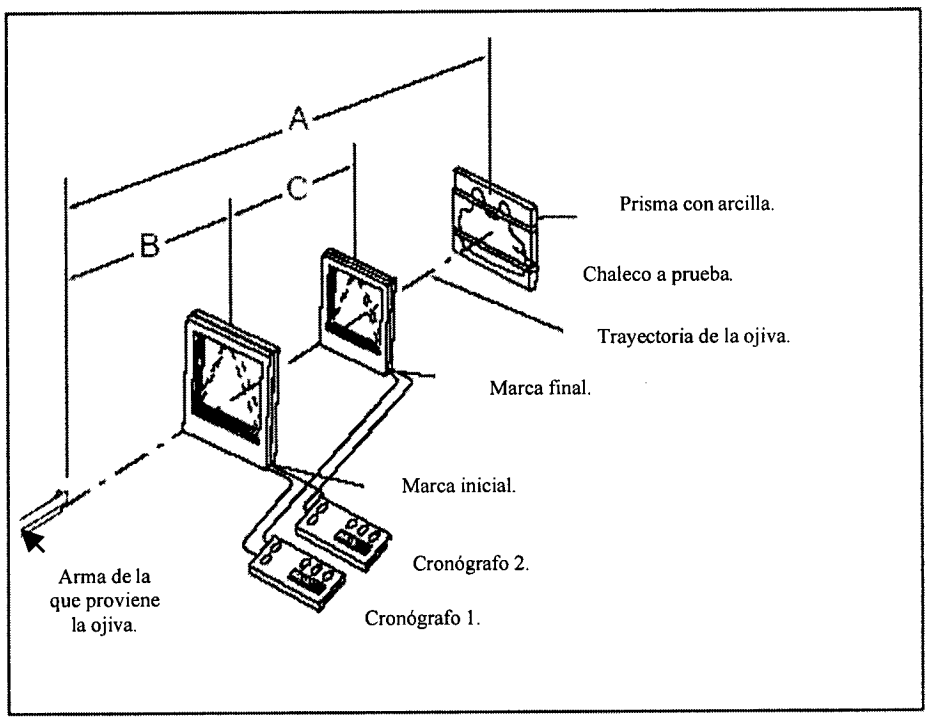

Figura 12. Esquema del arreglo para llevar a cabo pruebas balísticas a chalecos antibalas.

Al instalarse el arreglo para llevar a cabo las pruebas se realizan seis disparos sobre la superficie del chaleco con una distribución similar a la que se ilustra en la Figura 13. Una vez concluidos los disparos se desmonta el chaleco del cuerpo que contiene

la arcilla; debido a que el chaleco se deformó contra la arcilla al recibir los impactos se efectúa la medición de la profundidad de las cavidades provocadas en la arcilla por esta deformación. Una vez hechas las mediciones se reacomoda la arcilla a fin de que esté en condiciones de recibir las deformaciones de otro chaleco. Esta mecánica se repetirá para cada chaleco que se pruebe[1].

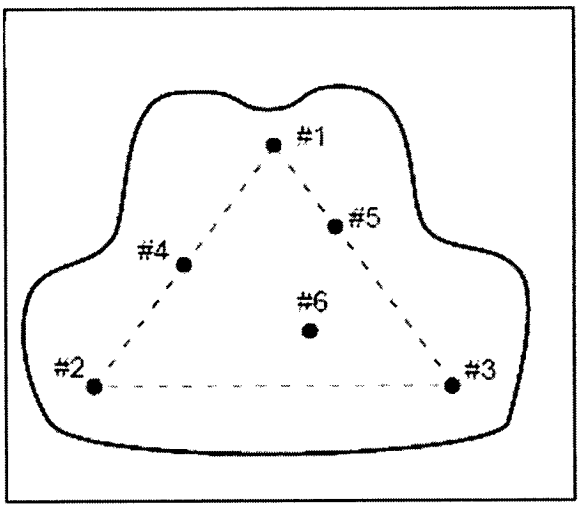

Figura 13. Distribución de los disparos que se le llevan a cabo al chaleco antibalas.

Para que un chaleco sea aceptado, no debe ser perforado por ninguno de los seis disparos. Asimismo la profundidad de las deformaciones o cavidades no debe exceder 44 mm[1].

Otra manera de efectuar pruebas balísticas con carácter netamente experimental es efectuarlas empleando pistolas de helio que permiten disparar variando la velocidad, en éstas el chaleco es colocado entre placas de Aluminio[9].

2.6. GENERALIDADES DE LA NORMATIVIDAD QUE RIGE LAS PRUEBAS BALÍSTICAS DE CHALECOS ANTIBALAS.

Debido a la gran importancia que reviste el hecho de que los chalecos antibalas estén en perfectas condiciones para ser empleados, las pruebas para verificarlo deben estar

normalizadas. Este aspecto encontró solución en 1972 cuando en un esfuerzo por proporcionar la guía para realizar estas pruebas el Instituto Nacional de Justicia de los Estados Unidos de América emitió la primera norma para determinar la resistencia balística de los chalecos antibalas, denominada NILECJ Standard 0101.00, la cual especificó los procedimientos generales, tipos de municiones y velocidades a ser empleados[10]. Dicha norma fue substituida por la NILECJ Standard 0101.01 en 1978, la cual fue la primera en basarse en un criterio de seguridad cuantitativo y en base a experimentos biomédicos con animales, dando paso en 1985 a la NIJ (National Institute of Justice) 0101.02, y en 1987 a la NIJ Standard 0101.03[10]. En el año 2000, debido a la introducción de nuevos materiales y el cambio de la estructura y diseño de los chalecos se llevó a cabo una nueva revisión, de la cual surgió la norma NIJ Standard 0101.04[10].

Si bien las normas NIJ son las que regulan las pruebas balísticas a chalecos antibalas, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América ha diseñado diferentes pruebas de conformidad con la necesidad de comprobar que los chalecos resistirán al ser sometidos a situaciones similares a las que el personal militar experimenta, siendo las principales pruebas las MIL-STD y los TOP[10]. Cabe mencionar que toda norma debe considerar que las pruebas sean sencillas de efectuar, económicas, significativas y reproducibles[1]. En nuestro país, las pruebas balísticas llevadas a cabo a chalecos antibalas son con estricto apego a las normas NIJ.

2.7. DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS EMPLEADOS PARA LA FABRICACIÓN DE CHALECOS ANTIBALAS.

Desde que se fabricó el primer chaleco antibalas ha sido permanente la búsqueda y desarrollo de nuevas fibras que permitan producir chalecos cada vez más ligeros, que brinden una mayor protección. Por lo anterior, en la actualidad se pueden encontrar diversas telas sintéticas en varios estilos y composiciones provenientes de un gran número de fabricantes de diferentes países, cada una con propiedades antibalísticas muy particulares.

Los principales tipos de fibras son:

2.7.1. FIBRA M5.

M5 es una fibra resistente y versátil cuya unidad repetitiva es altamente aromática[11], tal como se puede ver en la Figura 14, la cual fue diseñada por un grupo de científicos guiados por el Dr. Doetze Sikkema a lo largo de 10 años a partir de 1990 por la compañía Akzo Nobel en Holanda. La meta trazada por estos científicos fue diseñar una fibra sintética con una alta resistencia a la deformación provocada por el impacto de un proyectil.

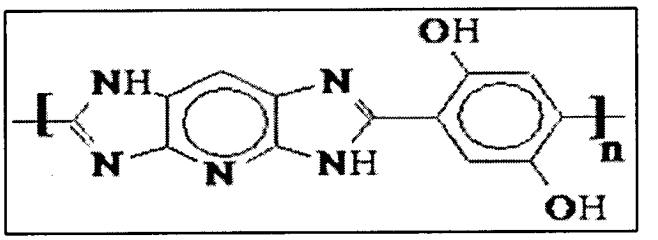

Figura 14. Unidad repetitiva de la fibra M5.

La estructura de la fibra M5 tiene un arreglo similar al de un panal como se muestra en la figura siguiente, teniendo una alta orientación molecular de las cadenas de polímero. Conforme se incrementa el número y fortaleza de los enlaces intermoleculares se incrementa la habilidad de la fibra para transferir la energía del proyectil a escala microscópica.

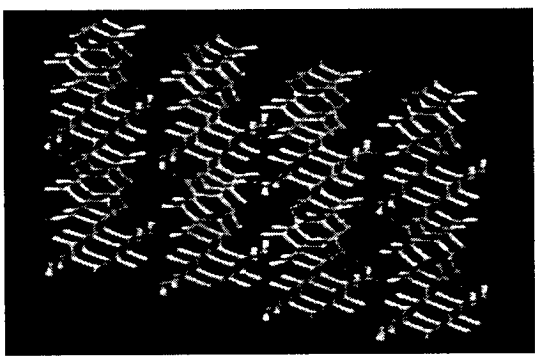

Figura 15. Representación esquemática de la estructura de la fibra M5[11].

Tiene las siguientes características:

- Módulos de tensión y compresión altos.
- Resistencia a la deformación similar a la del acero.
- Resistencia a altas temperaturas y al fuego.
- Muy dúctil.
- Estabilidad a la luz ultravioleta.
- No conductivo.
- Resistencia a la corrosión.

2.7.2. FIBRA ARAMIDA.

Fue producida por primera vez en 1961 por la compañía DuPont.

Es una fibra compuesta por largas cadenas sintéticas de poliamidas unidas a dos anillos aromáticos[12](Figura 16).

Sus características principales son las siguientes:

- Altos puntos de fusión.
- Resistencia a altas temperaturas y al fuego.

Figura 16. Imagen de un segmento de fibra Aramida[12].

2.7.3. FIBRA SPECTRA.

Es una fibra de polietileno de ultra alto peso molecular muy resistente y ligera. Fue la primera fibra de polietileno de alto peso molecular de cadena lineal y con alta resistencia, desarrollada comercialmente. Tiene una tenacidad más alta que la del acero, es más durable que el poliéster y es 40% más resistente que la fibra Aramida. Su desempeño específico depende de la cantidad de filamentos con que este compuesta. Debido a la elevada tenacidad y viscoelasticidad con que cuenta este material, puede resistir las tensiones provocadas por impactos a alta velocidad[13].

Las características de esta fibra son las siguientes:

- Muy baja densidad.

- Resistencia a productos químicos, agua y rayos UV.

- Alta resistencia a la fatiga provocada por flexión.

- Bajo coeficiente de fricción.

- Resistente a la abrasión.

- Baja constante dieléctrica, lo que provoca baja perceptibilidad a radares.

- Resistencia a altas temperaturas y al fuego.

2.7.4. FIBRA ZYLON.

Es una fibra rígida de polímero poli-(p-fenileno-2,6-benzobisoxazol) cristalino isotrópico de alto desempeño desarrollada por TOYOBO. Tiene una tenacidad mayor que las fibras p-Aramidas. Puede ser procesada de diferentes formas para obtener diferentes productos como filamentos continuos, fibras básicas, hilos y tejidos, entre otros[14].

Las principales características del Zylon son:

- Gran estabilidad térmica.

- Altos módulos.

- Resistente a productos químicos.

- No absorbe humedad.

- Resistente a la abrasión.

- Suave al tacto y flexible.

- Resistencia a altas temperaturas y al fuego.

2.7.5. FIBRA KEVLAR.

Fue creada en el año 1965 por los científicos Stephanie Kwolek y Herbert Bades y producida comercialmente por la empresa DuPont, está compuesta por un polímero constituido por largas cadenas de amidas aromáticas denominadas poli-parafenilentereftalamidas con una orientación radial, ésta orientación provoca un alto grado de simetría y regularidad. Esta regularidad cristalina es el factor que más contribuye a la resistencia del Kevlar; misma que es cinco veces mas resistente que una placa de acero de su mismo peso, siendo al mismo tiempo mas ligero y cómodo[15].

Tiene las siguientes características:

- Módulos de tensión y compresión altos.
- Resistencia a las altas temperaturas y al fuego.
- Baja conductividad eléctrica.
- Alta resistencia a agentes químicos.
- Alta resistencia al corte.
- Dureza elevada.

2.7.6. FIBRA TWARON.

Es una fibra similar a la Aramida producida por la compañía japonesa Tejin, siendo su principal diferencia, el hecho de estar compuesta por mas de 1,000 filamentos que actúan absorbiendo la energía del impacto de un proyectil y disipándolo a través de todo el tejido de filamentos y fibras adyacentes[1].

Sus principales características son:

- Módulos de tensión y compresión altos.
- Resistencia a las altas temperaturas y al fuego.
- Baja conductividad eléctrica.
- Alta resistencia a agentes químicos.

A continuación se presentan los valores correspondientes a la tenacidad, módulo, porcentaje de elongación y densidad de las fibras antes mencionadas, así como del nylon y el polyester, a fin de tener un comparativo de estas.

FIBRA	TENACIDAD (g/d)	MÓDULO (g/d)	ELONGACIÓN (%)	DENSIDAD (g/cm3)
M5	30	1,470	1.5	1.59
ARAMIDA	23	550	3	1.44
SPECTRA	35	2,000	3.1	0.97
ZYLON	23.5	587	3.5	1.54
KEVLAR	26	850	3.5	1.43
TWARON	24	600	3	1.4
NYLON	8	35	22	1.14
POLIÉSTER	3.81		3	1.21

Tabla 1. Propiedades de los diferentes tipos de fibras empleadas para la fabricación de chalecos antibalas y su comparación con fibras textiles de uso común[1, 11-15].

Para cualquiera de las citadas fibras, las principales propiedades que se evalúan además de las indicadas en la tabla anterior, a fin de determinar su utilidad para ser empleadas en la fabricación de chalecos antibalas son: retención de la humedad, absorción de la energía de impacto, y resistencia al calor. Dadas las características y propiedades de cada fibra, al ser tejidas para conformar un chaleco éste responderá

diferente ante el impacto de un proyectil, además de esto, la respuesta variará dependiendo de la trama del tejido y de su orientación[1].

3. ESTADO DEL ARTE O ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO.

A fin de incrementar la resistencia balística de los chalecos sin incrementar su peso, actualmente se continua el desarrollo de nuevas fibras y de la estructura tanto del tejido como de la matriz polimérica; así como, de los compósitos poliméricos nanoestructurados, una nueva clase de materiales que surgen de la dispersión de partículas de tamaño nanométrico (orgánicas o inorgánicas) con habilidad para intercalarse entre las capas de una matriz polimérica, observándose significativas mejorías en las propiedades mecánicas de los polímeros base gracias a la presencia en ellos de las partículas de tamaño nanométrico[16].

3.1. ESTRUCTURA DEL CHALECO.

Se ha observado que es posible que la forma y acomodo de los tejidos dependan del calor y estiramiento a que sean sujetas las fibras cuando estos se fabrican. En la Universidad de Leeds se desarrolló el proceso denominado compactación caliente, el cual consiste en aplicar calor y presión a una fibra altamente orientada hasta que funda parcialmente, enfriándola posteriormente hasta que recristaliza, formando de esta manera la matriz. Entretanto, un estudio paralelo llevado a cabo en la Universidad de Massachussets introdujo un proceso que involucró someter a presión varias capas de tejido para prevenir su encogimiento, aumentando de esta manera su temperatura a un punto cercano o ligeramente más alto que la temperatura de fusión. Al enfriar el tejido mientras se mantenía la presión las capas de este tejido se fusionaron, formando una sola hoja fuerte. A elevadas temperaturas las fibras poliméricas son muy elásticas y tienen tiempos de relajación largos, por lo que pueden ser sujetas a un estiramiento considerable. Si las capas del tejido son confinadas apropiadamente para prevenir el encogimiento, es factible la producción de una protección balística rígida y gruesa con las formas deseadas. Asimismo, si las condiciones de proceso son apropiadas las fibras no sufrirán una pérdida considerable de orientación durante el proceso[17].

3.2. EMPLEO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS NANOESTRUCTURADOS.

El primer reporte sobre la preparación de compósitos poliméricos nanoestructurados surgió de un grupo de investigadores de la compañía japonesa Toyota, y consistió en un sistema basado en nylon-6 y partículas de arcilla de tamaño nanométrico. Estos nanocompósitos exhibieron propiedades físicas y mecánicas notoriamente superiores a las del nylon-6 original[18]. Este hecho fue el punto de partida para el desarrollo de nanocompósitos utilizando diferentes matrices poliméricas, las cuales tienen como función mantener unidas las fibras y absorber energía por deformación adicionando dureza al compósito, además de otorgar resistencia la compresión[19]. Debido a lo pequeño de la escala nanométrica el área interfacial entre la matriz polimérica y las partículas de tamaño nanométrico es considerable y, en consecuencia, las características del material dependerán grandemente de la interacción interfacial entre la matriz polimérica y las nanopartículas, así como de la dispersión de éstas en la matriz, encontrándose que al aumentar la compatibilidad entre partículas de tamaño nanométrico y la matriz polimérica, aumentan las interacciones (adhesión) interfaciales partícula-matriz y aumenta la resistencia al impacto del polímero modificado, es decir, del compósito polimérico nanoestructurado[16]. En general, la tenacidad y la resistencia al impacto aumentan con el contenido de partículas, hasta llegar a un punto óptimo. Sin embargo, los resultados obtenidos a una determinada concentración de partículas dependerán de su tamaño, de las características de éstas y de su compatibilidad con la matriz polimérica[18].

Las propiedades del compósito podrían mejorarse sustancialmente al modificar las interacciones en la región interfacial entre la matriz polimérica y las partículas nanométricas, por lo que dichas interacciones serán decisiva para desarrollar nuevos materiales antibalísticos.

La interacción interfacial se podrá controlar ya sea, modificando químicamente la superficie de las nanopartículas o modificando la matriz polimérica. Está matriz se podría modificar injertando grupos afines a las nanopartículas o mediante la mezcla

previa de la matriz con otro polímero afín a las nanopartículas. Y por otro lado, el grado de dispersión podrá controlarse, en principio, manejando adecuadamente los esfuerzos y velocidades de corte durante el proceso de mezclado de las nanopartículas y la matriz[18].

3.3. COMPORTAMIENTO DE UN CHALECO ANTIBALAS REFORZADO CON NANOCOMPÓSITOS POLIMÉRICOS NANOESTRUCTURADOS.

A fin de explicar el comportamiento de un chaleco antibalas reforzado con nanocompósitos poliméricos nanoestructurados, es conveniente mencionar primeramente que cualquier proyectil disparado por un arma de fuego exhibirá un movimiento giratorio, mismo que se mantendrá hasta que impacte con su objetivo.

Considerando lo anterior, cuando un proyectil golpea la superficie de un chaleco reforzado con nanocompósitos su punta es distorsionada[4], tal como se observa en la siguiente figura:

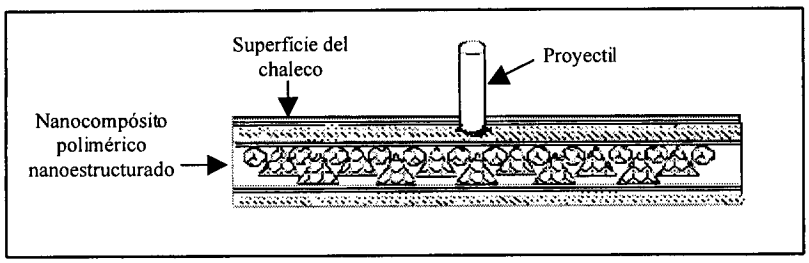

Figura 17. Comportamiento de un proyectil al impactar en un chaleco reforzado con nanocompósitos.

Por otra parte, debido a que el proyectil no puede penetrar el nanocompósito detiene su movimiento, sin embargo la inercia de éste provocará la fractura y deformación total del resto del proyectil, evitando de esta manera que pueda penetrar en el chaleco[4] (Figura 18).

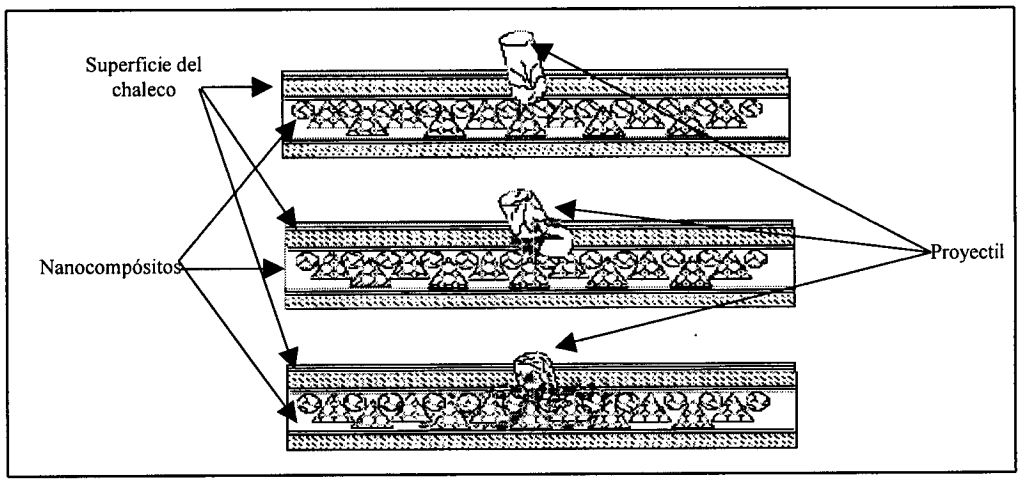

Figura 18. Deformación progresiva del proyectil al intentar penetrar en un chaleco reforzado con nanocompósitos.

Como se puede observar, la incorporación de los nanocompósitos poliméricos en la estructura del chaleco mejora su resistencia al impacto, teniéndose la ventaja de que no incrementa mucho su peso[16].

3.4. OTROS DESARROLLOS.

Además de lo mencionado anteriormente, a continuación se mencionan otros desarrollos sobresalientes que pretenden incrementar las propiedades antibalísticas de los chalecos:

- Empleo de partículas de reforzamiento (fillers) de tamaño nanométrico en el desarrollo de compósitos poliméricos para protección balística. Encontrándose que las estructuras reforzadas con fibras de carbón de tamaño nanométrico ofrecen una alta protección balística[20].

- Desarrollo de un método de procesamiento que utiliza un extrusor de doble husillo co-rotatorio para producir nancompósitos poliméricos de alto desempeño, que permiten reducir el peso de los tejidos de protección balística hasta en un 35%[16].

- Desarrollo de diversos modelos matemáticos para relacionar los resultados de pruebas balísticas llevadas a cabo en laboratorio con las practicadas en campo, siendo los modelamientos en laboratorio una herramienta muy útil para el diseño de nuevas estructuras de protección[21].

3.5. ESTUDIOS RECIENTES.

En los últimos años se ha estudiado el efecto de la composición y del arreglo estructural sobre las propiedades antibalísticas de los chalecos, a fin de aplicar los efectos positivos de esas variaciones en la producción de las citadas prendas.

- En 1998, Gellert, Pattie y Woodward aplicaron técnicas fotográficas de alta velocidad para estudiar la perforación de compósitos laminados, elaborados a base de telas Spectra y Kevlar, así como de plástico reforzado con fibra de vidrio. Se utilizaron modelos simples para comparar las energías absorbidas por los compósitos con las energías disipadas por los proyectiles. Encontraron que todos los términos de energía son importantes (energía cinética, energía de deformación y energía de delaminación)[22].

- En 1998, Zee y Hseieh estudiaron la contribución de las fibras Spectra, Kevlar y de grafito a la resistencia al impacto de diferentes compuestos poliméricos. Encontraron que la fibra Spectra absorbe la mayor energía de deformación, seguida de la fibra Kevlar y por último la fibra de grafito. Un patrón similar se observó en lo relativo a la energía de fractura[23]. Estas tendencias se correlacionan perfectamente con la mayor tenacidad y ductilidad de estas fibras. Encontraron, además, que la capacidad de absorción de energía de estas fibras aumenta al aumentar la velocidad de deformación.

- En el 2000, Van Hoof, Worswick y Williams aplicaron un modelo numérico de elementos finitos que utiliza resultados post-impacto, para predecir la penetración y

la deformación del material producida por un proyectil, encontrando concordancia entre los resultados experimentales y los generados por el modelo numérico[21].

- En el 2001, Jacobs y Van Dingenen desarrollaron un modelo para calcular el desempeño de un chaleco a base de polietileno de ultra alto peso molecular contra proyectiles de punta suave y de punta de fragmentación, encontrando que los resultados generados por el modelo numérico se ajustaban con los resultados experimentales[20].

- En el 2002, Song y Auerbach estudiaron el desempeño balístico de nanocompósitos y fibra Kevlar y de nanocompósitos y fibras Kevlar y Spectra, arreglados con diferentes estructuras. Encontraron que el conjunto de nanocompósitos y fibra Kevlar tienen mejor desempeño contra proyectiles de pequeño calibre, mientras que el conjunto de nanocompósitos y fibras Kevlar y Spectra muestran mejor desempeño contra proyectiles de mayor calibre. Lo anterior se atribuyó a la capacidad de absorción de la energía de deformación de las estructuras híbridas[24].

- En el 2003, López-Puente, Zaera y Navarro estudiaron la influencia de impactos de alta velocidad (desde 60 hasta 600 m/s) sobre láminas de resina epóxica reforzadas con fibra de carbón. Ellos utilizaron un modelo de elementos finitos para simular el evento y encontraron que los resultados del modelo, en lo que se refiere a la velocidad residual del proyectil luego de perforar el laminado, coinciden con los resultados experimentales[25].

- En el 2003, Xu, Farris y Conte analizaron la protección balística de laminados multicapa sinterizados de tejidos de Spectra; el sinterizado se llevó a cabo a un tejido Spectra con un espesor de 0.05 cm en una prensa caliente, la cual fue cerrada y mantenida a una presión deseada. Encontraron que las propiedades balísticas de los laminados multicapa sinterizados de tejidos Spectra eran superiores a las de los laminados sin sinterizar[17].

- En el 2003, Justo y Marques examinaron el desempeño balístico de dos tipos de placas elaboradas a base de materiales disponibles comercialmente, contra proyectiles de punta de fragmentación. Una placa estaba fabricada de fibra aramida con matriz de resina fenólica y la otra de fibra de polietileno con matriz de termoplástico. Las velocidades de impacto estudiadas fueron desde 300 m/s hasta 1,260 m/s. Observaron que tenia mejor desempeño balístico la placa de polietileno con matriz de termoplástico, asimismo llevaron a cabo algoritmos para simular matemáticamente pruebas similares [26].

- En el 2005 Weon, Creasy Sue y Hsieh utilizaron un extrusor modificado para crear anisotropía en la microestructura del extruido, y examinaron la fractura y la resistencia balística del poli metil metacrilato. Encontraron que al utilizar este extrusor modificado, la tenacidad de la fractura aumentaba en un 180% y se aumentaba la resistencia balística[27].

4. ÁREAS DE OPORTUNIDAD.

Mientras exista la necesidad de resguardar la vida de un ser humano cuya función sea la protección de alguna nación, persona o bien material, continuará el empleo y demanda de chalecos antibalas. Estas prendas serán usadas preferencialmente de manera constante por los integrantes de los ejércitos de diferentes partes del mundo, guardias nacionales, cuerpos de policía, grupos de protección de valores y empresas, así como compañías de protección privada a personas y las mismas personas que son resguardadas.

El continuo incremento del peligro al que se deben enfrentar los usuarios de un chaleco antibalas, así como la constante necesidad de mayor comodidad, menor peso y discreción de estas prendas genera el interés permanente por mantener la investigación de nuevas fibras para tejer los chalecos, procesos de fabricación en los que se obtengan la orientación y combinación adecuadas de diferentes tipos de fibras que permitan la máxima resistencia y poder de disipación de la energía de impacto, asimismo continuar investigaciones en el campo de nuevas tecnologías, empleando la nanociencia y la nanotecnología, a fin de desarrollar matrices poliméricas nanoestructuradas con mayor resistencia mecánica que brinden la posibilidad de fabricar chalecos antibalísticos con mejores características.

Asimismo se debe mencionar que los modelos matemáticos que se desarrollen para simular la respuesta de la estructura del chaleco al ser sometida a la fuerza del impacto de un proyectil serán de suma importancia, ya que permitirán obtener en menor tiempo parámetros que indiquen el comportamiento de los materiales sin necesidad de emplear recursos para efectuar las pruebas de campo y sin tener que sacrificar a algún tipo de animal.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- El estudio constante de los materiales y tecnologías para la fabricación de chalecos antibalas, se debe al deseo de obtener un chaleco que pesando lo menos posible otorgue la máxima protección al usuario.

- Los chalecos antibalas impiden el paso de los proyectiles debido a que las fibras que los conforman se encuentran entretejidas, provocando la disipación de la energía del proyectil a través de su tejido.

- Hasta el momento se han establecido seis niveles de protección antibalística, en función de la potencia de los proyectiles empleados actualmente.

- De las principales fibras poliméricas que se han desarrollado a lo largo del tiempo para la fabricación de chalecos antibalas, se observó que las que tienen las mejores propiedades mecánicas son la M5 y la Spectra.

- En comparación con el nylon y el poliéster empleados comúnmente en la industria textil, las fibras con las que se fabrican los chalecos antibalas tienen una tenacidad y un módulo mayores, y es debido a esas propiedades que se pueden deformar al recibir el impacto de un proyectil disipando la energía de éste.

- Para incrementar la protección de los chalecos antibalas sin aumentar de manera significativa su peso, actualmente se llevan a cabo estudios sobre compuestos poliméricos nanoestructurados que permitirán producir placas con mayor protección antibalística.

6. REFERENCIAS.

1. U.S. Department of Justice, "Selection and Application Guide to Personal Body Armor", National Institute of Justice, 2001, pp. 1-42.
2. Office of Technology Assessment, "Police Body Armor Standards and Testing:Volume 1", National Institute of Justice, 1992, p. 4.
3. E. P. Gellert et al "Energy Transfer in Ballistic Perforation of Fibre Reinforced Composites", Journal of Materials Science Vol. 33, 1998, pp. 1845-1849.
4. Howard L. Thomas et al "An Overview of Industrial Fabric Ballistic Protection for Police and Military Personnel", Auburn University, 2001, pp. 1-35.
5. D. Mac Pherson, "Dynamic Projectile Interactions and Associated Body Armor Effects", IWBA Wound Ballistics Review, vol. 3, no. 2, 1997, pp. 1057-1059.
6. Ian Lee et al "Fuzzy Modeling of Gunshot Bruises in Soft Body Armor", 2004, pp. 1,2.
7. A. J. Ryan MD, "Traumatic Injuries: Office Treatment of Deep Bruises" Postgraduate Medicine, 1976.
8. www.bulletproofme.com/Body_Armor_Accessories_Rifle_Protection.html.
9. Alex J. Hsieh et al "Measurements of ballistic Impact Response of Novel Coextruded PC/PMMA Multilayered-Composites", Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2001, Vol. 20, No. 03/2001, pp. 242, 243.
10. Police Body Armor Standards and Testing, Vol. I, p. 6.
11. www.m5fiber.com/magellan/m5_fiber.htm.
12. www.fibersource.com/f-tutor/aramid.htm.
13. www.honeywell.com/sites/sm/afc/spectra_fiber.htm.
14. www.nlectc.org/testing/ba_environment.html.
15. www.dupont.com/kevlar/whatiskevlar.html.
16. Kal R. Sharma "Processing Methodology for Transparent Armor Nanocomposites", ANTEC, 2000, pp. 1-4.
17. Tao Xu et al "Making Matrix-Free Spectra Fiber Reinforced Composites", ANTEC, 2003, pp. 1-5.
18. Hinrinchsen G et al "Proceedings of the Ninth International Conference on the Mechanics of Composite Materials", Riga, 1996, pp. 550-572.

19. www.Compósitos Poliméricos.htm.
20. Jacobs, et al "Ballistic Protection Mechanisms in Personal Armor", Journal Of Materials Science", 2001, Vol. 13, p. 3137.
21. Van Hoof et al "Backplane Response of Ballistically Impacted Composites", Materials Science and Engineering, 1999, Vol. 2, p.155.
22. Gellert et al "Energy Transfer in ballistic Perforation of Fiber Reinforced Composites", Journal of Materials Science, 1998, Vol. 7, p. 1845.
23. Zee et al "Energy Absorption Processes in Fibrous Composites", Materials Science and Engineering, 1998, Vol. 2, p. 161.
24. Song et al "Ballistic Impact Resistence of Composites with Different Fabric Structures and Configurations", ANTEC, 2002, pp. 1-5.
25. López-Puente et al "High Energy Impact on Woven Laminates", Journal of Physique, 2003, Vol. 4, p. 639.
26. Justo et al "High Velocity Impact Resistance of Composite Materials", Journal of Physique, 2003, Vol. 4, p. 651.
27. Weon et al "Mechanical Behaviour of PMMA with Molecules Oriented Via Simple Shear", Polymer Engineering and Science, 2005, Vol. 3, p. 314.