

COMPORTAMIENTO DE UN PANEL LAMINADO COMPUESTO A PARTIR DE  
MATERIALES POLIMÉRICOS Y CERÁMICOS ANTE EL IMPACTO DE UN  
PROYECTIL METÁLICO

GIOVANNI BARRERA TORRES

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE MINAS  
ESCUELA INGENIERIA, MATERIALES Y PROCESOS  
MEDELLIN  
2011

COMPORTAMIENTO DE UN PANEL LAMINADO COMPUESTO A PARTIR DE  
MATERIALES POLIMÉRICOS Y CERÁMICOS ANTE EL IMPACTO DE UN  
PROYECTIL METÁLICO

GIOVANNI BARRERA TORRES

Memoria del trabajo de grado de grado de maestría en Ingeniería  
Materiales y Procesos

Director, PhD Juan Manuel Vélez Restrepo  
Profesor Asociado

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE MINAS  
ESCUELA INGENIERIA, MATERIALES Y PROCESOS  
MEDELLIN  
2011

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Medellín, 27 de Octubre de 2011

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de investigación está dedicado a mi familia mi esposa por su apoyo, comprensión, amor y grata compañía junto a mi Gaby por su dulzura y abrazos que fortalecieron el deseo de seguir adelante y no desfallecer...

A mis padres, mi columna de apoyo en todo momento de mi vida.

A Erica porque siempre me ha inspirado a través de su ejemplo.

## AGRADECIMIENTOS

A mi director de investigación PhD. Juan Manuel Vélez Restrepo, a quien siempre guardaré gratitud, admiración y respeto por los conocimientos y sabios consejos aportados a lo largo éste proceso, sin su colaboración y disciplina no hubiese culminado éste proyecto.

A la Comercializadora Internacional Grupo Empresarial Caballero SAS, en cabeza del ingeniero Miguel Caballero, por su decisiva colaboración, disposición y financiación de las pruebas balísticas, laboratorios y material polimérico.

A la ingeniera Pilar Arévalo por su valioso acompañamiento y asesoría durante los ensayos de impacto en la planta de Miguel Caballero® en la ciudad de Bogotá.

Al Señor Mario Castro quien gestionó el aporte de la resina epoxica, como representante de la empresa quimiresinas, seccional Bogotá.

Al laboratorio de Metalografía y ensayo de materiales, quien me brindó los recursos para la adquisición de las placas cerámicas para la realización de la exploración.

Al PhD. Juan Pablo Hernández Ortiz, quien con su visión en los cursos impartidos me permitió conocer el alcance que puede tener una investigación.

A Mery y su equipo de colaboradores en el laboratorio de metalografía de la universidad Nacional sede Medellín por su amistad y apoyo incondicional durante todo el proceso de análisis.

A Orly en el laboratorio de química del Instituto Tecnológico Metropolitano, quien abrió sus puertas para adelantar las pruebas preliminares al uso de los materiales.

A Chepe por acompañar el proceso y hacerlo divertido en el laboratorio.

A mi familia quien siempre ha acompañado cada uno de mis pasos

A Jesucristo quien infundió en mí la fuerza para terminar éste proceso.

## RESUMEN

En éste trabajo de investigación se exploró el comportamiento de sistemas laminados compuestos tipo sándwich, elaborados a partir de placas cerámicas y laminas de polietileno(UHWMPE) frente al impacto de un proyectil metálico; se realizó el diseño de dos grupos con diferentes arreglos, un grupo con la cara que recibe el impacto en material cerámico (SiC) con respaldo en material polimérico y un grupo con la cara que recibe el impacto en material polimérico con respaldo cerámico, las dimensiones aproximadas fueron de 200 x 200 mm de lado y espesores de 5 y 12 mm. Se realizó la prueba de impacto siguiendo los parámetros de la norma NIJ III A; se identificaron como mecanismos de disipación de energía cinética en el material cerámico a: la formación de un cráter, fracturas y delaminación; en el material polimérico se observó fibrilación, formación de geometría cónica, delaminación, torsión y fusión de fibras.

Se concluyó que el grupo con mayor influencia para disipar energía fue el grupo con la cara principal que recibe el proyectil en material cerámico y contracara en material polimérico (UHWMPE), comprobado mediante un balance de energía realizado en cada uno de los arreglos, posteriormente se culminó la exploración realizando una comparación entre el arreglo que presentó mayor absorción de energía frente a un sistema adicional diseñado con un cerámico (SiC) de menor porosidad.

Palabras clave: sistemas laminados compuestos, impacto, Norma NIJ III A, mecanismos de disipación de energía, balance de disipación de energía.

## ABSTRACT

In this research work has explored the behavior of composite laminate sandwich systems, made from ceramic plates and sheets of polyethylene (UHWMPE) against the impact of a metallic design was made of two groups with different arrangements, a group with the side that receives the impact of ceramic material (SiC)-backed polymeric material and a group with the side that receives the impact on polymer-backed ceramic material, the approximate dimensions were 200 x 200 mm square and thickness of 5 and 12 mm. The test was performed following the parameters of impact of the standard NIJ III A, were identified as mechanisms of dissipation of kinetic energy in the ceramic material: the formation of a crater, fracture and delamination, in the polymeric material was observed fibrillation training conical geometry, delamination, twisting, and melting fibers.

It was concluded that the group's most influential energy dissipation was the group with the main side that receives the projectile in ceramic and polymeric counterface material (UHWMPE) demonstrated through an energy balance performed on each of the arrangements, later exploration culminated making a comparison between the arrangement that had higher energy absorption compared to an additional system designed with a ceramic (SiC) less porous

Keywords: composite laminates systems, impact, NIJ III A standard, energy dissipation mechanisms, energy balance dissipation.

## INTRODUCCION

En la búsqueda permanente de sistemas de protección, específicamente ante el impacto de proyectiles, se ha incrementado la investigación en diseño y desarrollo de nuevos materiales para formar sistemas individuales y compuestos, con el fin de absorber la mayor cantidad de energía proveniente de distintos proyectiles en diferentes campos de aplicación tales como: arquitectónico, transporte (vehículos de transporte aeroespacial, marítimo y de carretera) y protección flexible, aplicado actualmente en vestuario personal.

Tema por el cual se ha hecho imprescindible identificar las propiedades de los materiales habitualmente empleados, como los son los: metales (acero), cerámicos (carburo de silicio, carburo de boro, alúmina) y poliméricos (aramidas, polietileno de ultra alto peso molecular). De la caracterización de las propiedades mecánicas se puede destacar el uso del acero como material predominante en los sistemas estructurales, en sistemas de transporte y sistemas compuestos para protección personal; el acero absorbe la energía cinética de los proyectiles en forma de calor, deformación plástica, formación de un cráter y dependiendo del espesor, la formación de un cono en la cara posterior del sistema; siendo el material más efectivo presenta como limitante la densidad ( $7,8 \text{ g/cm}^3$ ), propiedad que imposibilita el desarrollo de diseños livianos y poco voluminosos.

También se destaca la absorción de energía cinética de los materiales cerámicos, que disipan la energía en forma de erosión, grietas, formación de un cráter para frenar y deformar a los proyectiles; como limitante de éste material se presenta que no actúa de forma individual, sino que debe estar unido a otro material que absorba la energía cinética residual del proyectil, por lo cual generalmente se combina con una placa metálica o unas capas de tejido polimérico para aumentar la probabilidad de éxito en la detención del proyectil.

Los materiales poliméricos tienen propiedades mecánicas con mayor beneficio para el diseño de un sistema de protección personal, porque tienen muy baja densidad ( $0,94 \text{ g/cm}^3$  polietileno (UHMWPE) y las fibras de aramida  $1,4 \text{ g/cm}^3$ ), además puede llegar a absorber igual cantidad de energía cinética que el acero, en forma de transmisión de calor, rotura y deformación de fibras. Una característica importante es que éste material con el aumento en el número de capas y la dirección de los tejidos ó combinándolo con otros materiales permite controlar el nivel de protección requerido por el usuario.

En éste trabajo de maestría se elaboró un sistema laminado a partir de placas de carburo de silicio y de tejido de polietileno de ultra alto peso molecular, para combinarlos en diferente posición, con el fin de observar los mecanismos de deformación y obtener así información del sistema con la combinación más efectiva, para lo cual se realizó un ensayo balístico y un acercamiento a un modelado de absorción de energía cinética.

## CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCION	7
1. ESTADO DEL ARTE Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	17
2. OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GENERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3. MARCO TEÓRICO	20
3.1 SISTEMAS DE PROTECCION	20
3.2 BALÍSTICA	21
3.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA	22
3.4 MODELAMIENTO DE ABSORCION DE ENERGÍA	24
4 SISTEMAS TECNOLOGICOS APLICADOS EN PROTECCION BALISTICA	31
4.1 SISTEMAS DE PROTECCIÓN CON MATERIAL PREDOMINANTEMENTE METÁLICO (ACERO)	31
4.2 SISTEMAS DE PROTECCIÓN CON MATERIAL PREDOMINANTEMENTE CERÁMICO	36
4.2.1 Condiciones de manufactura para sistemas cerámicos	41
4.3 SISTEMAS DE PROTECCIÓN CON MATERIAL PREDOMINANTEMENTE POLIMÉRICO(TEJIDO)	42
4.4 NORMA DEL INSTITUTO NACIONAL DE JUSTICIA (NIJ)	47
5. MATERIALES Y METODOS	49
5.1 MATERIALES	49
5.1.1 Polietileno de ultra alto peso molecular	49
5.1.2 Carburo de silicio.	50
5.1.3 Comparación de las características de una placa elaborada manualmente con una placa cerámica comercial	53
5.1.4 Adhesivo	53
5.2 DISEÑO EXPERIMENTAL	53
5.2.1 Manufactura de los sistemas	56
5.3 ENSAYO BALÍSTICO	59
5.3.1 Procedimiento para la realización del ensayo balístico	59
6 RESULTADOS EXPERIMENTALES	61
6.1. PRESENTACIÓN DEL COMPORTAMIENTO Y MECANISMOS DE FALLA DEL GRUPO A	62
6.1.1 Análisis a la configuración C/P, que corresponde al arreglo de capa sencilla en material cerámico sobre placa sencilla de material polimérico.	62

6.1.2	Análisis a la configuración C/PP, que corresponde al arreglo de capa sencilla en material cerámico sobre placa doble de material polimérico.	64
6.1.3	Análisis a la configuración CC/P, que corresponde al arreglo de placa doble de material cerámico y capa sencilla de material polimérico.	66
6.1.4.	Análisis a la configuración CC/PP, que corresponde al arreglo con la cara que recibe al proyectil en doble capa de material cerámico y en el respaldo doble capa en material polimérico.	69
6.2	PRESENTACIÓN DEL COMPORTAMIENTO Y MECANISMOS DE FALLA DEL GRUPO B	71
6.2.1	Análisis a la configuración P/C, que corresponde al arreglo con la capa principal sencilla de tejido polimérico y capa posterior con placa sencilla de material cerámico.	71
6.2.2	Análisis a la configuración P/CC, que corresponde al arreglo con la capa principal sencilla de tejido polimérico y capa posterior con placa doble de material cerámico	73
6.2.3	Análisis a la configuración PP/C, que corresponde al arreglo con la capa principal sencilla de tejido polimérico y capa posterior con placa doble de material cerámico.	77
6.2.4	Análisis a la configuración PP/CC corresponde al arreglo con cara principal que recibe al proyectil en doble capa de tejido polimérico y con respaldo doble placa de material cerámico.	79
6.3	EFFECTOS DE LOS FACTORES SOBRE LAS VARIABLES RESPUESTA.	81
6.3.1	Efectos de los factores sobre la formación del cráter de entrada	81
6.3.2	Efectos de los factores sobre la formación del cráter de salida	82
6.3.3	Efectos de los factores sobre la formación del diámetro del cono	83
6.4	MECANISMOS DE FALLA OBSERVADOS EN UNA PLACA CERÁMICA COMERCIAL	84
6.5	COMPARACIÓN DEL BALANCE DE ENERGÍA ENTRE EL SISTEMA CON CERAMICA POROSA QUE PRESENTÓ MEJOR DISIPACIÓN DE ENERGÍA CON EL SISTEMA ELABORADO CON CERÁMICA DE BAJA POROSIDAD	86
7.	CONCLUSIONES	89
8.	RECOMENDACIONES	91
	REFERENCIAS	92
	ANEXOS	98



## LISTA DE CUADROS

	Pág
Cuadro 1. Propiedades características de materiales usados para protección balística	23
Cuadro 2. Comparación de daño ocasionado con proyectiles de diferente geometría	36
Cuadro 3. Tamaño de grano típico y estructura cristalina de algunos materiales cerámicos.	37
Cuadro 4. Comparación entre cerámicas avanzadas	37
Cuadro 5. Propiedades de tejidos poliméricos usados en protección	42
Cuadro 6. Aplicación del diseño factorial	54
Cuadro 7. Matriz de diseño	54
Cuadro 8. Información obtenida del ensayo sobre el arreglo C/P	61
Cuadro 9. Información obtenida del ensayo sobre el arreglo C/PP	63
Cuadro 10. Información obtenida del ensayo sobre el arreglo CC/P	65
Cuadro 11. Información obtenida del ensayo sobre el arreglo CC/PP	68
Cuadro 12. Información obtenida del ensayo sobre el arreglo P/C	72
Cuadro 13. Información obtenida del ensayo sobre el arreglo P/CC	72
Cuadro 14. Información obtenida del ensayo sobre el arreglo PP/C	76
Cuadro 15. Información obtenida del ensayo sobre el arreglo PP/CC	78
Cuadro 16. Análisis de efectos para obtención del estadístico de prueba en el diámetro de entrada.	81
Cuadro 17. Análisis de efectos para obtención del estadístico de prueba en el diámetro de salida	82
Cuadro 18. Análisis de efectos para obtención del estadístico de prueba en el diámetro de cono	83
Cuadro 19. Comparativo de placas cerámica utilizada en la exploración	84
Cuadro 20. Datos tomados del sistema	85
Cuadro 21. Información obtenida del ensayo sobre el arreglo CC/PP	86
Cuadro 22. Información obtenida del ensayo sobre el arreglo con cerámica optimizada C/PP.	86

## LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Panel compuesto (1 polímero, 2 cerámico, 3 respaldo flexible)	20
Figura 2. Clasificación de la velocidad para los impactos de objetos extraños	22
Figura 3. Formas convencionales de proyectiles	23
Figura 4. Ondas transversales y longitudinales en el hilo impactado por un proyectil	24
Figura 5. Ilustración del corte transversal donde se observa el movimiento del cono y transmisión de tensiones en el laminado	25
Figura 6. Diagrama de cuerpo libre de la incidencia del proyectil sobre el tejido	26
Figura 7. a) Localización de fibras en torno al impacto, b) Representación del cono formado en la cara posterior del panel	27
Figura 8. Micrografías de la formación del cráter sobre probeta en acero	31
Figura 9. Formación del cono posterior al impacto balístico sobre una placa metálica	31
Figura 10. Gráfica de la tipología de cráteres	32
Figura 11. Fragmentación ante el impacto de la lámina	33
Figura 12. (a) Esquema del modo de fallo de proyectiles hemisféricos. (b) Petalling debido al proceso de perforación de una lamina de acero mediante un proyectil hemisférico	34
Figura 13. Geometría de proyectiles empleados en las simulaciones numéricas	35
Figura 14. (a) Deformación de la placa para proyectiles cilíndricos (b) Deformación de la placa para proyectiles cónicos (c). Deformación de la placa para proyectiles hemisféricos	35
Figura 15. Micrografía a) Placa impactada y b) Formación de patrón radial	38
Figura 16. Modos de falla producidos en placas cerámicas, durante el impacto de proyectiles	38
Figura 17. Formas de rotura de sistemas cerámicos en función de la velocidad de proyectil.	38
Figura 18. Deformación de una placa porosa, de izquierda a derecha, a) rotura cara posterior b) vista transversal de la deformación	39
Figura 19. Impacto sobre sistema compuesto a) deformación material cerámico b) Corte transversal, donde se observa diferente deformación en las combinaciones [38]	40
Figura 20. Micrografía a) visión general de espuma de SiC. b) Detalle de uno de los huecos	41
Figura 21. a) Micrografías del cerámico infiltrado. b) detalle del hueco	41
Figura 22. Deformación cerámico infiltrado con poliuretano,	41
Figura 23. Comparación de índice de absorción de energía para polímeros	43

Figura 24. Estructura del tejido compuesto formado por capas con diferente orientación de las fibras	44
Figura 25. Deformación en tejido polimérico	44
Figura 26. Efecto de deformación en tejidos de aramida	45
Figura 27. Imagen de configuraciones diferentes de un sistema compuesto tipo sándwich, a partir de un material polimérico termoestable, Cerámica de alta dureza y tejido compuesto, ordenadas de izquierda a derecha	45
Figura 28. Micrografía transversal de la delaminación en un sistema laminado de 6,15 mm de espesor modelo CFRP penetrado por un proyectil metálico	46
Figura 29. Micrografía de la delaminación y encapsulamiento del proyectil en el panel compuesto	46
Figura 30. Modelado del tejido 3d	46
Figura 31. Micrografía de la sección transversal de un sistema compuesto donde se observa detención del proyectil	46
Figura 32. Orientación de las capas del tejido de Polietileno de ultra alto peso molecular utilizado.	49
Figura 33. SEM del tejido de Polietileno de ultra alto peso molecular, a) Micrografía capas del tejido b) Micrografía del tejido con una aproximación donde se observa la dirección de los hilos.	50
Figura 34. Dsc - Tg del tejido de Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE)	50
Figura 35. Microscopia óptica a) para análisis visual de porosidad. b) muestra el detalle SEM de un grano de carburo de silicio sinterizado con un diámetro aproximado de 50 $\mu\text{m}$ .	51
Figura 36. Imagen del análisis por difracción de rayos x (DRX) al cerámico donde se confirma, que el carburo utilizado es de fase alfa, lo cual confirma las propiedades mecánicas provenientes de la información bibliográfica.	52
Figura 37. Modelo general del sistema	53
Figura 38. Grupo A (ver de izquierda a derecha) corresponde al arreglo del sistema con capa principal que recibe el proyectil en material cerámico con respaldo en tejido polimérico y grupo (B) (ver de derecha a izquierda) corresponde al arreglo del sistema con capa principal que recibe al proyectil en material tejido polimérico con respaldo cerámico.	55
Figura 39. Montaje requerido para la realización de pruebas de impacto balístico, norma NIJ	59
Figura 40. Imagen de la fractura intralaminar en el arreglo C/P	62
Figura 41. Imágenes SEM de la fractura cercana a la capa de resina epóxica. De izquierda a derecha imagen a detalle de la fractura, imagen b acercamiento al límite entre recubrimiento de resina epóxica y placa cerámica.	62
Figura 42. Imagen de las fallas sobre la capa principal. b) acercamiento al cráter formado.	63

Figura 43. Imagen del cráter formado en el sistema de capa sencilla de cerámica y doble lámina de polietileno (UHMPE).	64
Figura 44. SEM a un corte transversal del sistema cerámica sencilla sobre doble polietileno	64
Figura 45. Imagen a fotografía del cráter originado; b) micrografía a la periferia del cráter de entrada.	65
Figura 46. Imágenes de la cara de impacto del sistema conformado por doble capa de cerámica y refuerzo posterior en lámina sencilla de polietileno (UHMPE).	66
Figura 47. Imágenes de la contracara de impacto del sistema conformado por doble capa de cerámica y lámina sencilla de polietileno (UHMPE)	66
Figura 48. Imágenes de la cara de impacto del sistema conformado por doble capa de cerámica y lámina sencilla de polietileno (UHMPE).	67
Figura 49. Imágenes de la propagación de la fractura.	67
Figura 50. Imágenes de la cara de impacto del sistema conformado por doble capa de cerámica y doble lámina de polietileno (UHMPE).	68
Figura 51. Microfotografías del cráter en la cara de impacto del sistema conformado por doble capa de cerámica y doble lámina de polietileno (UHMPE); de izquierda a derecha imagen a vista superior del cráter, imagen b vista lateral del sistema.	69
Figura 52 Gráfica del arreglo. b) fotografía de los mecanismos de fractura en la cara posterior del sistema.	69
Figura 53. Fotografía de la capa principal y d fotografía de la vista superior del cráter en la contracara del sistema	70
Figura 54. Microfotografías de la zona de impacto en el grupo B.	71
Figura 55. Imágenes de las deformaciones en el sistema de capa sencilla de polietileno (UHMPE) y doble capa de cerámica.	73
Figura 56. Microfotografías de los mecanismos de fractura en el sistema	73
Figura 57. Imágenes del micro deformaciones en el sistema de capa sencilla de polietileno (UHMPE) y doble capa de cerámica.	74
Figura 58. Micrografías de las deformaciones entre componentes del sistema. De izquierda a derecha	74
Figura 59. Micrografías al corte transversal del arreglo P/CC	75
Figura 60. Imagen SEM a escala de 500µm de una fractura interlaminar	75
Figura 61. Micrografía del cráter de entrada en cara de impacto en polietileno	77
Figura 62. Micrografía del cráter de salida del sistema con cara de impacto en polietileno.	77
Figura 63. Imágenes de las deformaciones en el sistema de capa doble de polietileno (UHMPE) y doble capa de cerámica.	78
Figura 64. Imágenes de las deformaciones en la contracara del sistema de capa doble de polietileno (UHMPE) y doble capa de cerámica	79
Figura 65. Micrografías del cráter entrada	79
Figura 66. Micrografías del cráter de salida del arreglo con doble capa de polietileno y doble placa cerámica.	80
Figura 67. Resultados comparativos en la dimensión del diámetro de entrada	81

Figura 68. Resultados comparativos en la dimensión del diámetro de salida.	82
Figura 69. Resultados comparativos en la dimensión del diámetro del cono.	83
Figura 70. Fotografías del sistema con cerámica mejorada en capa sencilla y capa doble de polietileno (UHMWPE).	84
Figura 71. Huella del impacto originada por los sistemas explorados sobre el material de respaldo	87

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Pág

Foto 1. Elementos empleados para la imprimación de las placas cerámicas	55
Foto 2. Resina, catalizador embasados y beaker en proceso de calentamiento	56
Foto 3. Placas cubiertas con la resina ubicadas dentro de la campana de extracción.	56
Foto 4. Ubicación de las placas sobre los soportes	56
Foto 5. Placa en proceso de curado	57
Foto 6. Materiales listos para elaboración de laminados compuestos.	57
Foto 7. Montaje del sistema en el backing según norma NIJ	58
Foto 8. Sistema asegurado al material de apoyo.	58
Foto 9. Cronógrafo utilizado durante las pruebas.	58

## LISTA DE ANEXOS

Pág.

Anexo 1. Product specification sheet, Dyneema	101
Anexo 2. Ficha Técnica de placas cerámicas de carburo de silicio	102
Anexo 3. Norma ASTM 1039	103
Anexo 4. Ficha Técnica de la resina epóxica, Colrepox 33 a, versión normal	106

## 1. ESTADO DEL ARTE Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La constante necesidad de mejora en la calidad de vida en la sociedad actual ha demandado de forma creciente la implementación de sistemas de protección en la vida de las personas, en áreas de convivencia habituales tales como: seguridad personal, sistemas de transporte, transporte espacial y sísmica entre otras en los campos civil y militar, esta demanda ha generado a lo largo del último siglo un desarrollo tecnológico acelerado en la búsqueda de sistemas y materiales.

Los sistemas de blindaje con material metálico han sido tradicionales en la protección vehicular y estructural, mientras en la protección personal los sistemas compuestos tienen mayor uso debido a la presentación tanto en forma rígida para protección estructural, como en sistemas flexibles para protección personal; a nivel mundial el desarrollo de materiales con aplicaciones balísticas ha hecho énfasis en protección con materiales livianos, donde históricamente la humanidad ha sido expuesta a los proyectiles de alta y baja velocidad, a saber las balas disparadas desde una pistola o fusil, los fragmentos de acero templado de una granada de mano o masivas explosiones de proyectiles de artillería, bombas caseras o fragmentos de aviones o de vehículos a alta velocidad contra viviendas e integridad humana directamente.

Históricamente, durante la primera y segunda guerra mundial los conocimientos sobre equipos de protección personal se limitaban a la utilización del acero, sin embargo, debido al gran peso de la armadura y la falta de flexibilidad se utilizó sólo para desplazamientos lentos, en gran medida en vehículos blindados. La protección personal en ésta etapa era totalmente nula; algunos de los primeros diseños fueron: El casco de protección para la cabeza, el cual se implemento durante la primera guerra mundial por el ejército francés, durante la misma guerra, Alemania e Inglaterra presentaron sistemas para la protección pectoral mientras en Italia se desarrollaba chalecos blindados, éstos chalecos antibalas fueron utilizados durante la era de Vietnam, sin embargo estos eran pesados, voluminosos y proporcionaron una protección limitada ante proyectiles de alta velocidad; A nivel mundial el desarrollo reciente de paneles con resistencia balística ha cambiado del acero (material pesado) a materiales compuestos de menor peso pero con igual ó mayor capacidad para disipar energía[1].

Uno de los campos más intensivos en investigación ha sido el estudio de la mecánica de penetración de proyectiles en estos sistemas. Los mecanismos de falla han sido reportados por muchos investigadores el caso de Cristescu et al. 1975; Sol y Potti 1993 muestran como la formación de un cráter es seguido por la propagación de grietas, Según el equipo de I. Horsfall et al [2] y Eugene Medvedovski et al, 2007 [3] hallaron que los componentes individuales en un sistema compuesto tienen diferentes funciones durante la deformación del panel, al igual que la forma de disipación de energía depende de la precisión en el proceso de fabricación y de los materiales empleados en la elaboración de los componentes del sistema.

Se ha comprobado que los sistemas compuestos superan en capacidad de disipación de energía, en peso y en propiedades para el diseño de sistemas de protección personal, a los materiales convencionales empleados sin combinación alguna. Dov Sherman and D. G. Brandon en enero de 1997 [4], detectaron una secuencia en los mecanismos de disipación de energía en una placa cerámica, tales como: Formación de grietas radiales durante la tracción asociada ésta a la baja resistencia a la tracción de la cerámica. Philip M. Cunniff, et al en el año 1999 [5] presentaron el rendimiento de la fibra polimérica balística identificada como M5 y se identificó que el potencial de absorción de energía ante impacto balístico de las fibras son superiores a los de las fibras hasta entonces diseñadas para uso en sistemas flexibles de protección. H. Harel et al en el año 2000 [6] realizaron una comparación en el comportamiento de sistemas compuestos de tela de polietileno en tejido tipo 2D y tejido tipo 3D ante impactos balísticos, se obtuvo que son más eficientes los tejidos 3D frente a otros tejidos en 2D, debido al aumento en la resistencia a la tensión y al incremento en los mecanismos de falla que redujeron la velocidad y la energía provenientes del proyectil.

En Colombia es incipiente el desarrollo (publicado) en materiales y sistemas de protección, en el área académica hay poco trabajo en cuanto a la exploración y análisis de materiales y sistemas de protección diferentes al acero; mientras que en la industria hay interesantes desarrollos en cuanto a sistemas de protección, la empresa privada a tomado la delantera en Latinoamérica combinando los materiales foráneos con formulaciones propias, pero no son publicados por razones de seguridad.

En la actualidad se ha ido incrementando la necesidad del uso de dichos sistemas, pero en la industria aún se desconocen los mecanismos de disipación de energía y los fenómenos alrededor de un impacto de proyectiles entorno a materiales específicos, lo cual disminuye el avance para producir un diseño local de materiales para protección tanto en usos militares (chalecos, cascos, sistemas de transporte) como civiles (estructurales, aeronáuticos) entre otros. De continuar ajenos al tema y sin discusión alguna, seguirá Colombia siendo un comprador más de productos que día a día por cuestiones sociales se han ido tornando más necesarias, tanto para la seguridad nacional como para el desarrollo de estructuras y sistemas de protección expuestas al riesgo de un impacto mecánico entre éstos el balístico.

La universidad en términos de apoyar el desarrollo científico y tecnológico local ha encontrado adecuado la investigación en el campo de protección personal, ya que de una u otra forma la protección personal balística ha estado restringida, debido al carácter estratégico. Pero no han sido abordados precisamente debido al desconocimiento de los mecanismos de absorción de energía, hecho que induce a profundizar más allá del fenómeno, hasta lograr por medio de la investigación académica proyectar desarrollo de procesos y de productos con el fin de beneficiar a la sociedad que día a día se encuentra más expuesta a riesgos súbitos de impacto en los diferentes contextos tales como: industrial, comercial, policial entre otros.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Identificar el comportamiento de un panel laminado compuesto a partir de materiales poliméricos y cerámicos ante el impacto de un proyectil metálico.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Identificar las posibilidades de conformación más usuales para el panel a partir de los materiales seleccionados y su posible influencia en el comportamiento frente al impacto de proyectiles metálicos.

Identificar los posibles mecanismos de falla en el panel impactado.

### 3 MARCO TEÓRICO

#### 3.1 SISTEMAS DE PROTECCIÓN

Se entiende a un sistema de protección como un ensamble de componentes con funciones propias destinadas a proteger la integridad personal o estructural contra impactos de proyectiles, el sistema puede ser flexible formado por tejidos poliméricos ó rígido formado por metales, polímeros rígidos y cerámicos.

Los sistemas también pueden ser conformados por la aplicación de varios materiales en forma de paneles tipo sándwich ilustrado en la figura 1, con combinaciones entre acero, cerámicos y poliméricos ó sistemas individuales como el acero que modificando su estructura se llega a obtener la resistencia deseada para un tipo específico de protección.

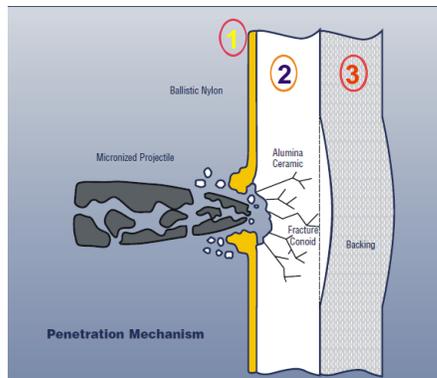


Figura 1. Panel compuesto (1 polímero, 2 cerámico, 3 respaldo flexible) [6].

El acero es el sistema individual más representativo en el grupo de los metales usado en la industria de protección personal y estructural, ejemplos de ésta aplicación están en la protección residencial, protección en sistemas de transporte (vehículos terrestres militares y civiles; aéreos como helicópteros, plataformas y partes específicas de aviones; marítimo como submarinos, lanchas de vigilancia militares).

Los polímeros han venido ocupando espacios donde los materiales metálicos y cerámicos eran los predominantes, pero debido a la necesidad de reducción de peso, los materiales poliméricos han tenido muy buena recepción en aplicaciones de protección ligera tal como: ropa, cascos militares, vestidos para personal civil y en aplicaciones rígidas o estructurales (partes específicas en helicópteros y en vehículos terrestres). Los sistemas compuestos tienen como objetivo combinar las propiedades de cada material para obtener un complemento de propiedades ante una solicitud específica de protección.

Por ejemplo combinando una placa cerámica con una cantidad específica de tejido polimérico se obtiene la capacidad de absorber una cantidad de energía específica, que con los materiales individuales no sería posible disipar sin comprometer el aumento de volumen y de masa en el sistema; la evolución de sistemas de protección flexibles en los últimos quince años ha sido impulsada por la invención del polietileno de ultra alto peso molecular, donde con un polímero tejido con diferente direccionamiento de fibras, se logra aumentar la resistencia del sistema [7].

Los sistemas de protección poliméricos compuestos, pueden ser moldeados en una variedad de formas sencillas y complejas bajo calor y presión [8]; las fibras compuestas ligeras y reforzadas tales como aramida y polietileno de ultra alto peso molecular, actualmente proveen productos para protección ante proyectiles de baja (0-10m/s) y alta velocidad (100-1000m/s) en diferentes campos de acción. Mientras los materiales cerámicos por si solos no representan protección efectiva y necesitan ser combinados con metales y/o con polímeros y han sido empleados principalmente en sistemas de transporte, aeroespacial, protección personal con amplias posibilidades de conformación compitiendo con el acero [9]. Las placas de cerámica combinadas con un número de capas de tejido de aramida pueden detener gran variedad de proyectiles, con la única limitante que el sistema es aplicado predominantemente en sistemas rígidos estructurales.

### **3.2 BALÍSTICA**

Según Zukas (1982) [10], se entiende por impacto a la colisión entre un proyectil y un objetivo a una velocidad tal que deben considerarse efectos Inerciales y la propagación de ondas de tensión en el material. Se trata de un proceso en el que no existe una situación de equilibrio y en consecuencia, distintas zonas de la estructura impactada pueden estar sometidas a estados tensionales muy diferentes. La velocidad de deformación es varios órdenes de magnitud superior a la correspondiente a situaciones estáticas y debe considerarse la influencia de esta magnitud en las propiedades del material.

Las variables que caracterizan la respuesta de una estructura ante una carga impulsiva dependen en su mayoría de la velocidad de impacto. Como norma general puede decirse que a medida que aumenta la velocidad de impacto el comportamiento de la geometría de la estructura se hace secundario frente al comportamiento del material (Viechnicki 1991). Así, a velocidades de impacto relativamente bajas la geometría y rigidez de la estructura pueden resultar dominantes. Cuando la velocidad de impacto supera los 300 m/s las propiedades mecánicas del material, límite elástico, resistencia a compresión, resistencia a tracción, controlan la respuesta del sólido. Si el impacto tiene velocidades muy elevadas, mayores de 1000 m/s, estamos en el régimen que se conoce como hipervelocidad [11-12] en éste régimen el material se comporta como un fluido sometido a presiones enormes.

### 3.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA

Dentro de los factores principales que influyen en la disipación de energía se pueden citar: geometría, peso y velocidad del proyectil.

Peso del proyectil: es una función del diámetro, longitud y la composición de los materiales del mismo; los proyectiles de arma de fuego son generalmente pesados porque la composición está dominada por el plomo que es relativamente el metal más pesado, la energía cinética del proyectil es linealmente proporcional a su peso cuanto más pesado sea el proyectil, mayor será la energía cinética que recibirá el objetivo.

Velocidad: Uno de los principales factores que contribuye al aumento o reducción de la energía cinética, a la deformación y a la capacidad de penetración de un proyectil.

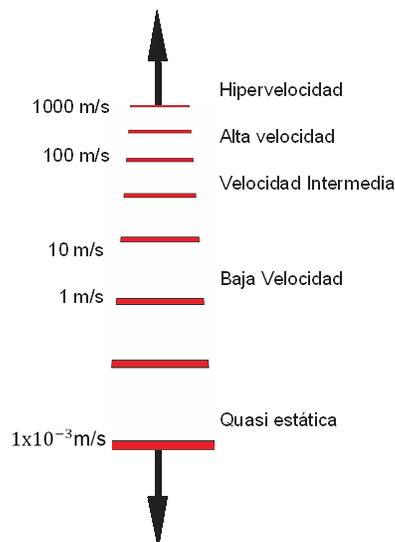


Figura 2. Clasificación de la velocidad para los impactos de objetos extraños (Usenbach 1995) [11]

Resistencia al avance: Es la resistencia del aire al movimiento del proyectil depende de la forma (figura 3), tamaño, densidad, temperatura y presión barométrica del aire, en esta interacción se reduce la velocidad del proyectil, para entender el concepto de resistencia al avance es importante tener claro el concepto de rozamiento[13], donde la resistencia a la fricción depende del sistema tribológico en estudio; en balística se tiene en cuenta, tanto la densidad del sólido a impactar como la geometría y el ángulo de incidencia del proyectil sobre la superficie del sistema (área proyectada correspondiente a la sección transversal del proyectil), que es donde se genera la resistencia al avance del proyectil sobre el material impactado [14]. El fenómeno de resistencia está relacionado con un balance de energía, tan pronto como el proyectil hace contacto con la superficie del sistema se inicia la disipación de la energía cinética, la cual tiene unos componentes citados en la siguiente ecuación.

$$E_c = \frac{1}{2} m \times v_0^2 \quad \text{Ecuación. 1}$$

Donde  $E_c$ : energía cinética,  $m$ : masa del proyectil,  $V_0$ : velocidad del proyectil un instante antes de entrar en contacto con el objeto impactado y se disipa de acuerdo a los siguientes mecanismos:

Deformación del proyectil

Conversión de energía cinética en energía térmica

Delaminación o separación entre capas de un laminado.

Fracturas

Formación de un cono en la cara posterior del material impactado en sistemas tejidos laminados y formación de un cráter entre otros, dependiendo la deformación de la velocidad, la geometría, peso del proyectil y naturaleza del material impactado (cerámico, metálico, polimérico o compuesto).



Figura 3. Formas convencionales de proyectiles, de izquierda a derecha (Hemisférica, plana, ojival, cónica) Tan et al 2003 [15]

Propiedades mecánicas del material: resistencia al impacto, densidad, módulo elástico; en el cuadro uno (1) se presentan algunas de las propiedades características de los materiales más usados en protección balística, donde predominan las características de los polímeros debido a su baja densidad para diseño de producto.

Cuadro1. Propiedades características de materiales usados para protección balística

Material	Densidad g/cm <sup>3</sup>	característica
Acero 1918	7.86	Muy pesado, requiere gran volumen y diseño limitado
Poliamidas,(NylonDuPont) 1931 Aramida presentación en tela 1960	1.15 1.45	Permeable, costoso, tecnología foránea
Cerámicos 1960 (AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )(SiC)	3.2	Reemplazable, alto volumen, no es aplicado solo.
Hmwpe, presentación en Tela 1980-1990	0.94	Alto costo, Tecnología foránea y diseño flexible
Compuesto laminado tipo sándwich	---	Actúa combinado, desarrollo con tecnología local

Resistencia al impacto: Es la medida o capacidad de un material o estructura de soportar la aplicación súbita de una carga sin fallar [16]. Es una función de la geometría, ángulo de impacto, velocidad de aplicación de la carga, medio ambiente, propiedades del material y procesos de fabricación del mismo [17].

Límite balístico: Se le denota como  $V_{50}$ , es la probabilidad de penetración de un proyectil sobre un material determinado y se halla en el promedio de un número igual de penetraciones parciales en alta velocidad y el promedio de penetración completa a velocidad más baja; se tiene en cuenta un mínimo de dos replicas con penetración parcial y dos con penetración total. Esta velocidad incidente proporciona información acerca de la capacidad que tiene el sistema para detener el proyectil [18].

### 3.4 MODELAMIENTO DE ABSORCION DE ENERGÍA

El balance de energía resultante del impacto de un proyectil sobre un sistema de protección puede obtenerse a partir de la diferencia entre la energía incidente ( $E_0$ ) y energía residual del proyectil ( $E_r$ ) y de la masa del mismo, ecuaciones 2 y 3, en las cuales  $V_0$  y  $V_r$  son las velocidades inicial y residual del proyectil respectivamente.

$$E_0 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_0^2 \quad \text{Ecuación. 2}$$

$$E_r = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_r^2 \quad \text{Ecuación. 3}$$

La absorción de energía [16] se puede expresar como:

$$\Delta E = E_0 - E_r = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_r^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_0^2 - v_r^2) \quad \text{Ecuación. 4}$$

Una primera aproximación al modelamiento es el aporte de Smith et al (1958) [19] los cuales propusieron un modelo que analiza la incidencia del proyectil sobre un único hilo o fibra del tejido polimérico. Un hilo impactado perpendicularmente, absorbe dos ondas que viajan a lo largo del mismo; una onda longitudinal que viaja a la velocidad del sonido e inicia el movimiento de las partículas en el hilo hacia el área de impacto, mientras que otra onda transversal, más lenta, origina el movimiento de las partículas del hilo en la misma dirección del proyectil, véase la figura 4.

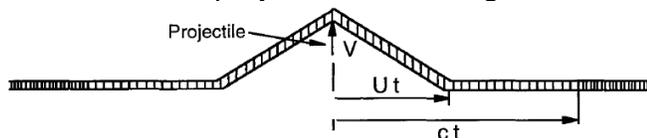


Figura 4. Ondas transversales y longitudinales en el hilo impactado por un proyectil [19]

Se supone como hipótesis, que durante el impacto el área en contacto con el proyectil permanece a velocidad constante del mismo y el hilo muestra deformación elástico lineal en el proceso, Smith et al proponen las siguientes ecuaciones:

$$U = c \left( \sqrt{\varepsilon(1 + \varepsilon)} - \varepsilon \right) \quad \text{Ecuación. 5}$$

$$V = c \sqrt{\varepsilon \left( 2\sqrt{\varepsilon(1 + \varepsilon)} - \varepsilon \right)} \quad \text{Ecuación. 6}$$

Donde  $\varepsilon$  es la tensión del hilo,  $c$  la velocidad del sonido,  $U$  la velocidad de la onda transversal y  $V$  la velocidad del proyectil.

Es un modelo que resuelve el cómo se distribuye la energía cinética sobre un solo hilo del tejido polimérico y hace una formulación para determinar la velocidad de las ondas de tensión transversal y longitudinal sobre el tejido, lo cual aporta la base para iniciar el planteamiento del balance de energía sobre sistemas de protección elaborados a partir de tejido polimérico en distribución lineal.

Basados en el modelo de Smith, Chocron et al plantearon un modelado donde se tiene en cuenta la masa del proyectil y la deformación producida en el tejido por el proyectil, además se deduce que la tensión es uniforme para todas las capas y el comportamiento del sistema es unidireccional. Como aporte importante esta el hallazgo del tiempo de rotura en el tejido como un nuevo criterio de falla, el cual aplica para sistemas laminados tejidos unidireccionalmente.

El modelo estudia el fenómeno de impacto sobre un tejido polimérico con fibras dispuestas unidireccionalmente; se intenta modelar el impacto como un problema unidimensional y muestra que las ecuaciones de Smith (5 y 6) son válidas cuando la velocidad del proyectil es constante si se aplican al punto de impacto en el tejido, los resultados más importantes de este modelo se pueden describir:

$$m_p \frac{d\bar{v}}{dt} = 2\bar{F} \quad \text{Ecuación. 7}$$

Donde  $m_p$  es la masa del proyectil se asume constante,  $V$  es la velocidad y  $F$  la fuerza que actúa sobre el proyectil, ver la ilustración del fenómeno en la figura 5 y en la figura 6 se observa el diagrama de cuerpo libre de la distribución de la fuerza sobre el tejido, en eje  $y$  actúan ondas transversales y en el eje  $x$  las ondas longitudinales.

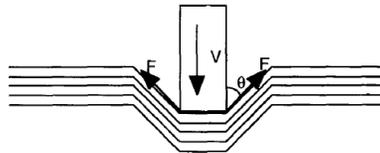


Figura 5. Ilustración del corte transversal donde se observa el movimiento del cono y transmisión de tensiones en el laminado [19]

Con el fin de simplificar el problema, se pueden asumir las siguientes hipótesis: el comportamiento del tejido es unidireccional y la tensión es uniforme para todas las capas y los hilos que entran en contacto con el proyectil contribuyen a la disminución de penetración. Por lo tanto, la fuerza puede ser:

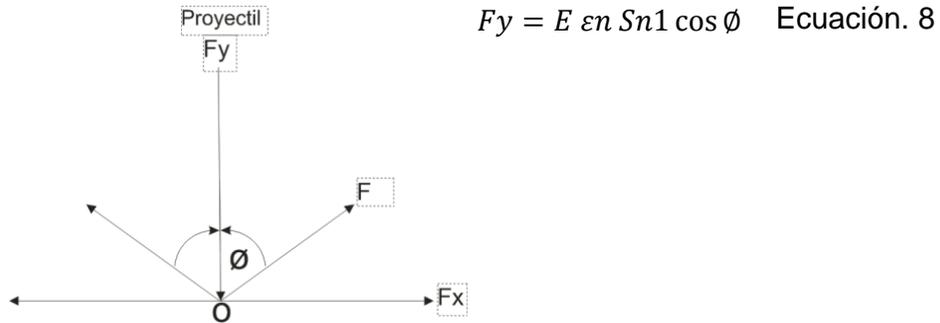


Figura 6. Diagrama de cuerpo libre de la incidencia del proyectil sobre el tejido

Donde  $F_y$  es el componente de la fuerza en dirección del movimiento,  $E$  el módulo de Young de los hilos,  $\varepsilon$  la deformación del tejido bajo el proyectil,  $n$  es el número de hilos en contacto directo con el proyectil,  $S$  es la sección de área del tejido afectado,  $n_1$  es el número de capas del tejido afectado, Smith modeló la tensión en ángulo  $\theta$  y con la ecuación 8, proponen las condiciones para hallar el balance de energía determinando el tiempo de falla del sistema.

El modelo de Chocron et al fue complementado por Prosser, quien adicionó al modelo anterior los criterios de falla sugiere que la energía absorbida por el tejido cuando se produce la perforación completa debe ser constante, independiente de la velocidad de impacto. Esta hipótesis establece que la energía pérdida por el proyectil durante el impacto tiene que ser igual a la energía distribuida en el tejido sin considerar la fricción:

$$\frac{1}{2} m_p (V_s^2 - V_r^2) = \frac{1}{2} n n_1 S E c \int_0^t \varepsilon^2(t) dt \quad \text{Ecuación.9}$$

Permite la adopción de un nuevo criterio de falla y el valor desconocido es el tiempo de rotura en el tejido.

$$\frac{m_p}{n n_1 S E c} = \int_0^{t_{vs}} \varepsilon^2(t) dt = R \quad \text{Ecuación.10}$$

Donde  $R$  es una falla constante y sólo depende de la configuración no de la velocidad de impacto ni del tiempo de la falla. La constante  $R$  debe ser obtenida experimentalmente para la configuración de referencia de un llamado  $R_0$ , mientras que para otra configuración llamada  $R_i$ , el valor puede ser analítico y se encuentran de la siguiente manera:

$$R_i = R_0 \frac{(m_p)_i}{(m_p)_0} \cdot \frac{n_0}{n_i} \cdot \frac{(n_i)_0}{(n_i)_0} \cdot \frac{(V_{50}^2)_i}{(V_{50}^2)_0} \quad \text{Ecuación. 11}$$

En el modelo desarrollado por Morye et al [20] se consideran cinco mecanismos de deformación que contribuyen a la disipación de energía proveniente del proyectil, los cuales son: falla por tracción de las fibras primarias, deformación elástica de las fibras secundarias, delaminación, rotura de la matriz del sistema y la formación y movimiento de un cono en el lado posterior de la placa del material compuesto, ver figuras 7a y 7b, aunque muy completo el análisis, está proyectado para estudiar sistemas de tejidos laminados, aunque al ser modelos exploratorios se pueden aplicar algunos de los conceptos a otros tipos de sistemas de disipación de energía, por ejemplo los sistemas laminados tipo sándwich.

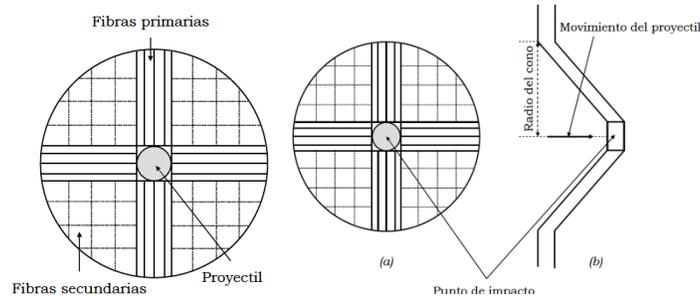


Figura 7a

Figura 7b

Figura 7. a) Localización de fibras en torno al impacto, b) Representación del cono formado en la cara posterior del panel [20]

Morye et al identificaron cinco mecanismos de absorción de energía, los cuales fueron:

$$E_T = E_{Fp} + E_{Fs} + E_{KC} + E_{DL} + E_{RM} \quad \text{Ecuación. 12}$$

Donde  $E_T$ : energía total absorbida por el laminado de material compuesto

EFP: Energía absorbida por el fallo de las fibras primarias.

EFS: Energía absorbida por la deformación elástica de las fibras secundarias

EKC: Energía absorbida en la formación y movimiento del cono en la cara posterior del panel.

EDL: Energía absorbida debido a la delaminación del material

ERM: Energía absorbida debido a la rotura de la matriz.

La energía cinética tomada en un instante de tiempo es igual a la energía cinética del proyectil y del cono formado en la cara posterior del impacto y está dada por la siguiente ecuación:

$$E_{0i} = \frac{1}{2} \cdot v_i^2 \cdot (m + m_{C_i}) \quad \text{Ecuación. 13}$$

$m_{C_i}$  Es la masa del cono formado en la cara posterior del panel para un instante de tiempo determinado. Se considera que hay contacto permanente entre el proyectil y el material impactado, la velocidad del vértice del cono que se forma en la cara posterior del sistema puede suponerse igual a la velocidad del proyectil ( $V_i$ ) en cada instante de

tiempo, teniendo en cuenta que la energía absorbida por el sistema durante el impacto es igual a la energía cinética perdida por el proyectil, se tiene:

$$E_{tT} = E_C - E_R = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_0^2 - V_R^2) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_{LB}^2 \quad \text{Ecuación. 14}$$

Donde:

ER: Energía residual del proyectil

VR: Velocidad residual del proyectil

VLB: Limite balístico del material estudiado, cuando  $VR \geq 0$

Disipación de energía debido a la deformación elástica de las fibras secundarias para determinar la energía absorbida debido a la deformación elástica de las fibras secundarias de un material compuesto se considera que el material presenta un comportamiento elástico- lineal hasta la rotura, se tiene que la energía absorbida por este mecanismo puede expresarse como:

$$E_{FS} = \frac{1}{2} \cdot E \cdot \varepsilon^2 \quad \text{Ecuación. 15}$$

Para el cálculo de energía absorbida por deformación elástica de las fibras secundarias se recurrió al modelo desarrollado por Morye et al, donde se emplearon proyectiles esféricos, se observó que la energía absorbida por deformación de las fibras secundarias puede calcularse empleando la siguiente ecuación:

$$E_{FS} = \frac{1}{2} \cdot E \cdot e \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \varepsilon^2 \quad \text{Ecuación. 16}$$

e = espesor del laminado

r = radio de la zona sometida a deformación elástica

La deformación elástica de las fibras secundarias es función de la distancia radial al punto de impacto de tal forma que las fibras que se encuentran más próximas al punto de impacto están sometidas a una deformación aproximadamente igual a la de las fibras primarias. La modelación de la absorción de energía por el mecanismo de formación del cono en el lado posterior del laminado, cuyos vértices se mueven a la misma velocidad del proyectil ( $V_i$ ) y la profundidad del mismo es igual al desplazamiento total del proyectil ( $D_i$ ), durante el contacto, por tanto, la energía cinética del cono ( $E_{KCi}$ ) se puede determinar usando la siguiente ecuación:

$$E_{KCi} = \frac{1}{2} \cdot m_{c_i} \cdot V_i^2 \quad \text{Ecuación. 17}$$

Donde, ( $M_{C_i}$ ) es la masa del cono que se forma en la cara posterior de la placa de material compuesto y está determinada por la siguiente ecuación:

$$m_{C_i} = \pi \cdot R_{c_i}^2 \cdot e \cdot \rho \quad \text{Ecuación. 18}$$

Siendo  $\rho$  la densidad de laminado de material compuesto.

De las ecuaciones 18 y 19, se obtiene la energía cinética debido a la formación y movimiento del cono en el lado posterior de la placa de material compuesto, se puede complementar con la siguiente ecuación:

$$E_{KC_i} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot R_{c_i}^2 \cdot e \cdot \rho \cdot V_i^2 \quad \text{Ecuación. 19}$$

Para determinar la energía absorbida por delaminación, se establecieron las siguientes hipótesis:

- a) El área que contribuye a la absorción de energía por delaminación se encuentra en el cono que se forma en la cara posterior del laminado y el área deformada se aproxima a la forma de una circunferencia.
- b) La delaminación que se produce en el material no es completa porque la matriz permanece ligada al refuerzo después de estar sometida al impacto, entonces la energía absorbida por delaminación para instante de tiempo (EDL) puede determinarse con la siguiente ecuación:

$$E_{DL_i} = P_{DL} \cdot \pi \cdot R_{c_i}^2 \cdot C \cdot G_{IICD} \quad \text{Ecuación. 20}$$

Donde:

$P_{DL}$  = porcentaje de láminas en las que tiene lugar la delaminación

$C$  = factor de corrección, debido a la hipótesis realizada con respecto a la forma del área dañada

$G_{IICD}$  = tenacidad a fractura en modo II

El equipo de Naik et al consideró, que el aporte de disipación de energía por rotura de la matriz en el sistema laminado quedaba definido por la deformación en dirección radial para cada instante de tiempo. Se plantea el modelo para determinar la energía absorbida por rotura de matriz para un instante de tiempo genérico ( $\Delta E_{RM_i}$ ) y se puede determinar así:

$$E_{RM_i} = P_{RM} \cdot \pi \cdot R_{c_i}^2 \cdot C \cdot E_{MT} \cdot e \quad \text{Ecuación. 21}$$

Donde:

$P_{RM}$  = porcentaje de matriz rota

$E_{MT}$  = energía absorbida por la rotura de matriz por unidad de volumen

En el caso de sistemas en los que la absorción de la tensión de corte fuera significativa, la energía disipada se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$\Delta E_{CT_i} = N \cdot e_1 \cdot S_{CT} \cdot \pi \cdot D \cdot de \quad \text{Ecuación. 22}$$

Donde:

N= número de láminas que fallan por cortadura en el intervalo temporal de integración.

$S_{CT}$  = resistencia al corte del laminado

D = diámetro del proyectil

$e_1$  = espesor de una lamina

En el modelo general del balance de energía presentado por Retch e Ipson [21] los autores presentaron un modelo semi empírico, donde se analiza un balance de energía cinética y se halla la energía disipada por la generación del cráter durante el impacto. (Ecuaciones 24 y 25). Para realizar el estudio del balance de energía se tiene en cuenta las siguientes características del sistema compuesto: masa, densidad y dimensiones del sistema, masa, diámetro y velocidad del proyectil, velocidad residual del impacto y la masa del tapón (material eyectado producto del impacto), se presenta la siguiente fórmula de balance de energía:

$$ET = E + W \quad \text{Ecuación. 23}$$

E es la diferencia entre la energía cinética inicial y residual, ésta corresponde a la energía perdida por deformación y calor durante el impacto, se calcula de la siguiente forma:

$$E = \frac{1}{2} mpV_s^2 - \left[ \frac{mp}{mp + ms} \right] \frac{1}{2} mpV_s^2 \quad \text{Ecuación. 24}$$

Con Vs: velocidad inicial, mp: masa del proyectil y ms: masa del tapón

La energía cinética adicional (w) puede ser perdida a través de la deformación durante la perforación debido a la presencia de la zona de corte circunferencial y el balance queda así:

$$\frac{1}{2} mpV_s^2 = E + W + 1/2(mp + ms)V_r^2 \quad \text{Ecuación. 25}$$

Para obtener la velocidad residual durante la formación del cráter:

$$V_r = \left[ \frac{mp}{mp + ms} \right] V_s \quad \text{Ecuación. 26}$$

Donde: Vr: velocidad residual; Vs: velocidad inicial; mp: masa del proyectil y ms: masa del tapón. En este modelo se realiza un balance de energía general donde se puede analizar la absorción debida a la formación del cráter y a la masa desalojada por el proyectil, información valiosa para realizar el análisis a los sistemas en exploración predominantemente rígidos, éste modelo puede ser complementado con el modelo presentado por Morye et al con las ecuaciones 17 a 19, asumiendo que el respaldo flexible de polietileno (UHMWPE) permanece unido a la cerámica y puede ser analizado como una membrana circular con una masa inicial que aporta al sistema reduciendo la velocidad del proyectil.

## 4. SISTEMAS TECNOLOGICOS APLICADOS EN PROTECCION BALISTICA

### 4.1 SISTEMAS DE PROTECCIÓN CON MATERIAL PREDOMINANTEMENTE METÁLICO (ACERO)

Martínez et al [22] encuentran al impacto de un proyectil metálico en placas metálicas, como un proceso complejo asociado a fenómenos de deformación, contacto y fricción como resultado de la transferencia de energía cinética y son procesos físicos asociados a la propagación de ondas elásticas y plásticas durante el impacto con el proyectil. Espejo E. y Castro A. [23] analizaron los mecanismos de absorción de energía en un sistema de protección metálico, observaron que el proceso de disipación se inicia con el contacto entre el proyectil y la superficie del sistema, produciendo erosión y formación de un cráter, ver figura 8. El grupo observó, que la formación de grietas alrededor del punto de impacto distribuye calor y son el resultado de las ondas tanto transversales como longitudinales, también originan en el sistema una deformación con geometría cónica en la parte posterior de la placa metálica, ver figura 9.

Durante el impacto, cuando el proyectil ha alcanzado la velocidad residual igual a cero, este se ha deformado totalmente es decir ocurre la detención total del proyectil, la cual es dependiente de la dureza y el espesor del sistema.

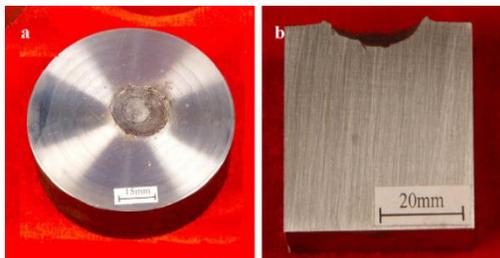


Figura 8. Micrografías de la formación del cráter sobre probeta en acero, L. Zhen, G.A. Li et al [24]

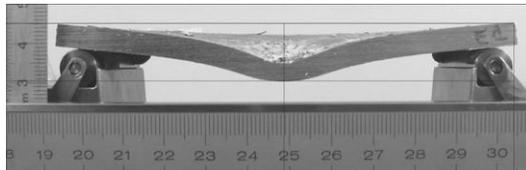


Figura 9. Formación del cono posterior al impacto balístico sobre una placa metálica [25]

Los mismos investigadores muestran el análisis del comportamiento de placas de acero AISI-SAE 1045, con diferentes ciclos de temple-revenido, impactadas con un proyectil de masa 4 gramos a una velocidad de 925,7 m/s, posterior al impacto fueron

clasificados los cráteres obtenidos, analizando algunos para identificar los mecanismos de deformación y fractura presentes, se obtuvo la siguiente información donde se agruparon los cráteres de acuerdo a su geometría en 6 tipos, en la figura 10 son clasificados de la siguiente forma:

Tipo 1: Cráteres perforantes con protuberancias a entrada y salida, donde se puede tener delaminación (Tipo 1b y 1d) o no (Tipo 1a y 1c), las protuberancias indican fluencia del material original de la lámina tanto en el sentido de avance del proyectil la cara opuesta al impacto, en algunos cráteres las protuberancias de entrada fueron desgarradas por la acción erosiva del proyectil (Tipos 1c y 1d). Las paredes de los cráteres presentaron deformación plástica masiva y en algunos casos esta fue acompañada por micro grietas.

Tipo 2: Cráter perforante con protuberancia a la salida del proyectil únicamente, donde se puede tener delaminación (Tipo 2b y 2d) o (Tipo 2a y 2c), la protuberancia indica fluencia del material original solamente en el sentido de avance del proyectil. En algunos cráteres también se presentaron grietas circunferenciales en la superficie de impacto (Tipo 2c y 2d) y se dedujo que las paredes de los cráteres se deformaron producto dichas micro fracturas.

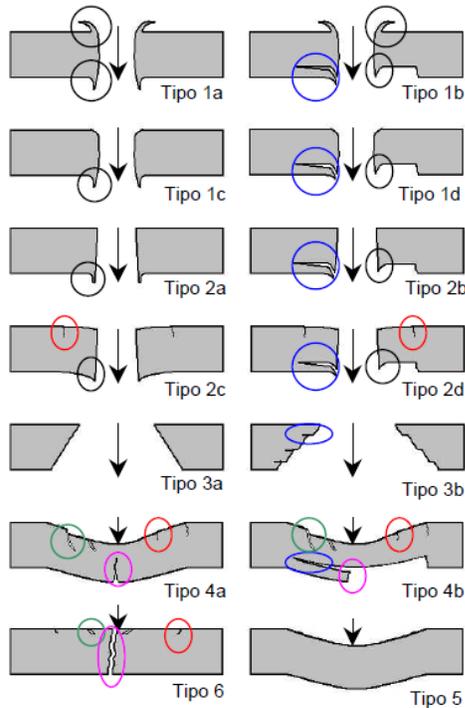


Figura 10. Grafica de la tipología de cráteres

Nota: encerradas en color negro son protuberancias, en azul delaminaciones, en verde micro fracturas, en rosado grietas radiales, la flecha indica el sentido de incidencia del proyectil [23]

Tipo 3: Cráter perforante con fractura frágil por flexión axisimétrica, donde se puede tener delaminación (Tipo 3b) o (Tipo 3a), en este caso todo el material original de la lámina fue expulsado en el sentido de avance del proyectil y las paredes de los cráteres presentaron fractura frágil.

Tipo 4: Cráter no perforante con grietas radiales en la superficie opuesta al impacto; se observó que durante la deformación se puede o no tener micro fisuras y grietas circunferenciales alrededor del sitio de impacto junto con delaminación en la superficie opuesta (Tipo 4b) o (Tipo 4a).

Tipo 5: Cráter no perforante con fluencia masiva de material en el sentido de impacto.

Tipo 6: Cráter con fractura total de la lámina por grietas radiales, donde se puede o no tener microfisuras con ausencia de calor y grietas circunferenciales alrededor del sitio de impacto, como se ilustra en la figura 11. Las delaminaciones que se presentaron en algunos cráteres se formaron debido a microfisuras, las cuales fueron originadas en el acero templado y revenido con alta dureza; también se obtuvo, que para durezas superiores a 50 Rc la formación de cráteres de naturaleza frágil (tipo 3) y spalling entorno al cráter.

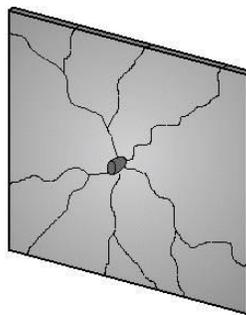


Figura 11. Fragmentación ante el impacto de la lámina [23]

Se concluyó, que en el caso de impactos con proyectiles a velocidad 821,78 m/s y masa de 9,46 g con una energía cinética de 3194 Joules, se obtuvo detención total del proyectil empleando láminas de acero AISI-SAE 1045 de 6,35 mm de espesor, a partir de una dureza aproximada de 45 Rc y se genera fragmentación total de la lámina para mayores de 50 Rc.

Se observó, que con el aumento de dureza en el sistema se origina mayor deformación en el proyectil, también se produjeron chispas durante el impacto como parte del proceso de disipación, siendo mayor la cantidad de estas cuando se presenta detención total del proyectil, además se observó que los diámetros de los cráteres perforantes tipo 1 y 2, disminuyeron en función de la dureza del sistema y para durezas superiores a 45 RC empiezan a aparecer cráteres tipo 3.

El grupo de T. Borvik et al [26] estudió el comportamiento de placas de acero Weldox 460 E (acero estructural de alta soldabilidad tratable térmicamente) de 12 mm de

espesor, las cuales fueron sometidas al impacto normal de proyectiles rígidos de diferentes geometrías: cilíndrica, hemisférica y cónica. Se analizó con simulación numérica y se utilizó software de elementos finitos, donde se consideró el tiempo de fractura, el límite balístico y la energía absorbida por la placa, se confirmó que límite balístico y los mecanismos de falla del sistema cambian con la geometría del proyectil [27]. La falla de la placa ocurre debido a la presencia de microfisuras, lo cual precede a la formación y eyección de un tapón como etapa final del proceso de perforación, el diámetro originado es aproximadamente igual al diámetro del proyectil y el espesor del mismo tapón es aproximadamente igual al espesor de la placa perforada, ilustrado en la figura 12 a.

Se observó que en altas velocidades de impacto, el empleo de geometrías cónicas o hemisféricas en la punta del proyectil producen velocidades residuales mayores; en éste caso la perforación de la placa se produce debido al alargamiento de la zona afectada por el impacto, que puede llegar a formar pétalos de material para placas de pequeño espesor. Figura 12b

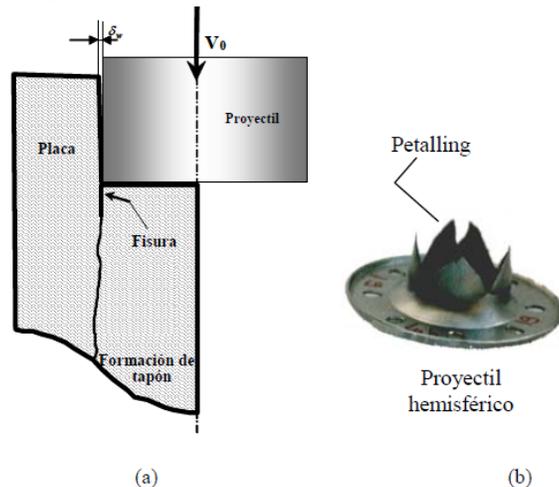


Figura 12. (a) Esquema del modo de fallo de proyectiles hemisféricos. (b) Petalling debido al proceso de perforación de una lamina de acero mediante un proyectil hemisférico [28]

J. A. Rodríguez Martínez et al [27], estudiaron simulaciones basadas en la geometría experimental del impacto de proyectiles sobre placas de acero circulares de diámetro  $\Phi = 500\text{mm}$  y espesor  $t = 12\text{mm}$  empotradas en el perímetro exterior. Los proyectiles empleados son de diámetro  $\phi = 20\text{mm}$  y masa  $m_p = 0.2\text{kg}$  para tres geometrías diferentes: cilíndrica, cónica y hemisférica, ver figura 13 y el rango de velocidades de impacto consideradas en los ensayos ha sido  $180\text{m/s} \leq V_0 \leq 450\text{m/s}$ ; las deformaciones son ilustradas en la figura 14.

Los proyectiles fueron mecanizados en acero con límite elástico superior al de las placas y posteriormente templados en aceite, estos han sido definidos como sólidos rígidos, las principales observaciones de la exploración están resumidas en el cuadro número 2.

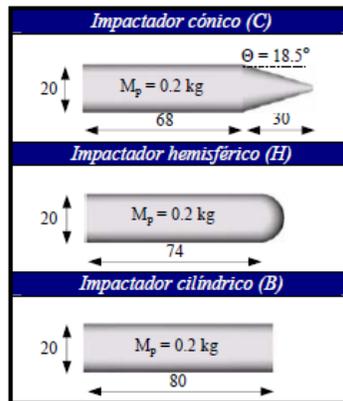


Figura 13. Geometría de proyectiles empleados en las simulaciones numéricas [28].

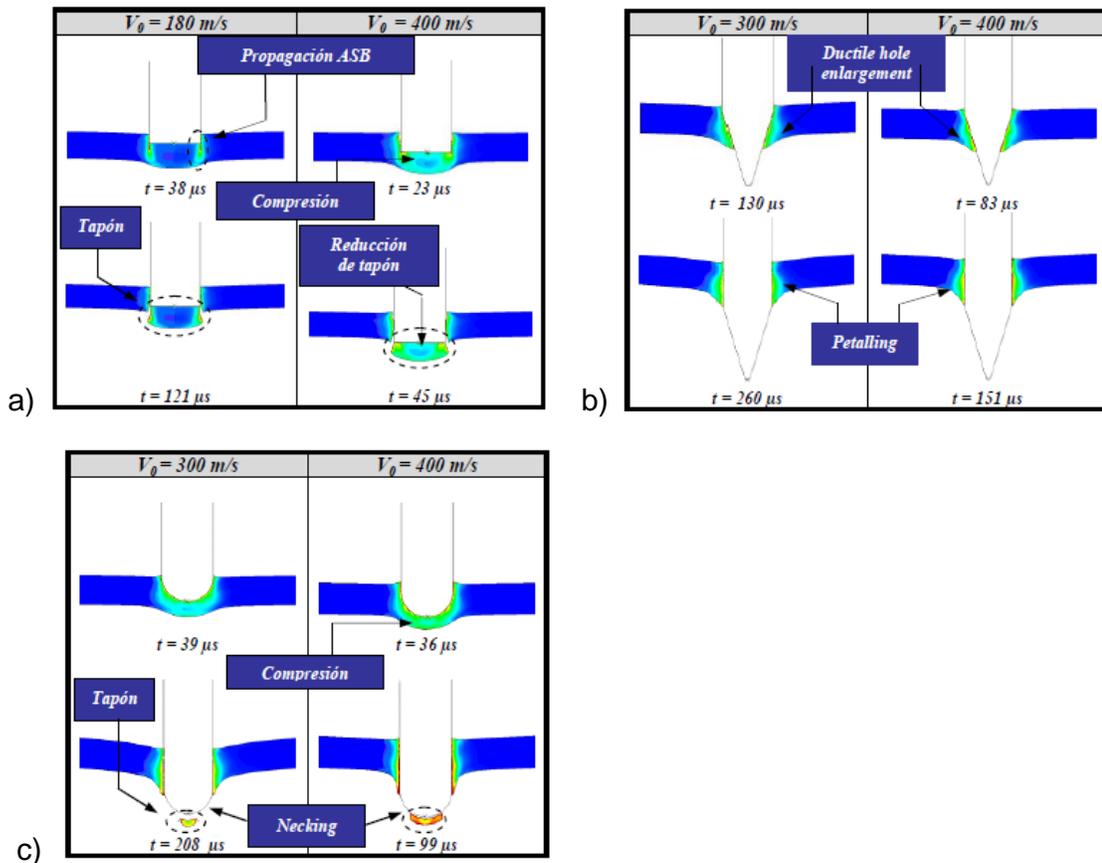


Figura 14. (a) Deformación de la placa para proyectiles cilíndricos a  $V_0=180\text{m/s}$  y a  $400\text{m/s}$ ; (b) Deformación de la placa para proyectiles cónicos a  $V_0=300\text{m/s}$  y a  $400\text{m/s}$ . (c). Deformación de la placa para proyectiles hemisféricos a  $V_0=300\text{m/s}$  y a  $400\text{m/s}$ . [28].

Cuadro 2. Comparación del daño ocasionado con proyectiles de diferente geometría [28]

Modos de falla de la placa impactada con diferentes proyectiles		
<p>a) <i>Proyectiles cilíndricos</i>                      En los primeros instantes del proceso de perforación se observa la aparición microfisuras, debido a la geometría del proyectil.</p> <p>el ablandamiento térmico del material hace que la velocidad de propagación de las ondas plásticas, sea nula y la velocidad de propagación de las microfisuras, permanece constante para velocidades de impacto <math>V_0 \geq 150\text{m/s}</math>.</p>	<p>b) <i>Proyectiles cónicos</i>                      La perforación se produce mediante un proceso de ampliación dúctil del agujero. Este proceso consiste en el desplazamiento del material de la placa lateralmente, a medida que el proyectil avanza, disipando gran cantidad de energía, por deformación plástica y por fricción.</p>	<p>c) <i>Proyectiles hemisféricos</i>,                      Se producen estados tensionales de tracción y compresión debido a la flexión incipiente de la placa.</p> <p>El modo de falla de la placa en este caso es la combinación de microfisuras y un <i>cuello</i>, cuya respectiva importancia en el proceso depende de la velocidad del impacto.</p>

Los proyectiles cilíndricos producen la falla de la placa por la propagación de microfisuras, generando un tapón del material al final del proceso, mientras que los proyectiles cónicos producen un estado de compresión radial y alargamiento de la zona impactada. La desventaja de alta densidad en los sistemas de protección elaborados en acero ha dirigido a los investigadores a buscar diferentes tipos de sistemas de protección más livianos, que puedan disipar energía cinética de manera tan eficiente como los sistemas metálicos, pero con menor volumen, peso y que presenten mayor flexibilidad al momento del diseño del sistema.

#### 4.2 SISTEMAS DE PROTECCIÓN CON MATERIAL PREDOMINANTEMENTE CERÁMICO

Los materiales cerámicos son conocidos por tener alta rigidez, alta dureza y alta resistencia a la compresión, las cuales son propiedades deseables en un sistema de protección diseñado para disipar energía cinética durante un impacto balístico [19,29].

El proceso de compactación y prensado de polvos cerámicos determina la porosidad en el producto final, con éstos procesos se busca maximizar las propiedades mecánicas para obtener sistemas de protección con alta capacidad de disipación de energía, característica que implica reducir la porosidad al mínimo [30], Greenhut (1991), estudió que los poros son pequeños defectos, que pueden actuar como concentradores de tensión e iniciadores de falla en el material, en el cuadro 3, se muestra el tamaño de grano típico de algunos materiales cerámicos, con los cuales se diseñan gran variedad de sistemas para la protección personal y estructural.

Cuadro 3. Tamaño de grano típico y estructura cristalina de algunos materiales cerámicos [30].

<i>Material</i>	<i>Tamaño de grano (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>Estructura Cristalina</i>
$\text{Al}_2\text{O}_3$	2-50	Hexagonal
<b>SiC <math>\alpha</math></b> SiC $\beta$	<b>1-50</b>	<b>Hexagonal</b> Cúbico
$\text{B}_4\text{C}$	5-20	Romboidal

En una comparación de alúmina y carburo de silicio, ilustrada en el cuadro 4, En una comparación de alúmina y carburo de silicio, el carburo de silicio SiC presenta un mayor módulo elástico respecto a la alúmina, una tenacidad a la fractura promedio y una densidad más baja, entre alúmina y nitruro de silicio que son materiales usualmente utilizados en sistemas de protección [31-32], siendo una característica muy importante para el diseño de sistemas utilizados en protección balística, propiedades que fueron importantes al momento de seleccionar la cerámica para el trabajo de investigación, además de ser los cerámicos de mejor asequibilidad en el mercado local.

	Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	Nitruro de Silicio( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )	Carburo de Silicio (SiC)
Resistencia a la flexión (Mpa)	358	700	380
Modulo Elástico(Gpa)	300	310	410
Tenacidad a la fractura (Mpa x m <sup>1/2</sup> )	4-5	6	4.6
Conductividad Térmica(W/ mk)	24.7	26	125
Coefficiente de expansión térmica ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	8.2	3.1	4.0
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3.75	3.25	3.1

Cuadro 4. Comparación entre cerámicas avanzadas [31]

Durante el impacto en placas cerámicas se presenta como mecanismo de disipación de energía, la propagación de grietas (figura 15 a) y 15b) con posterior rotura y formación de un cono en la cara posterior de la placa como resultado de la resistencia a la tracción del material, el cual distribuye la fuerza del impacto sobre un área mayor a la del contacto, mientras que el proyectil es deformado en tres etapas, contacto, plastificación y rotura [33].

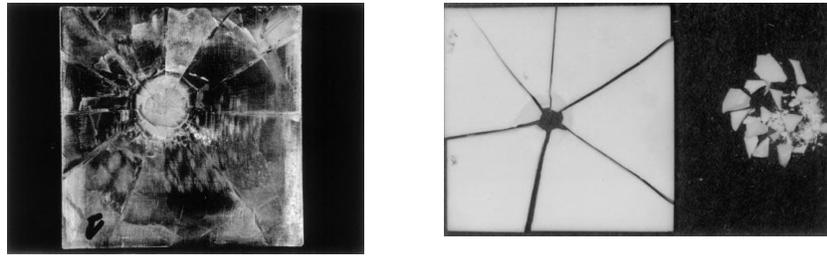


Figura 15. Micrografía a) Placa impactada y b) Formación de patrón radial [34]

Se estableció una clasificación de los tipos de deformación ocasionados por el impacto de un proyectil en placas cerámicas [35] ilustrados en la figura 16, donde se destacan tres modos de falla característicos: un modo frágil que origina crecimiento de microgrietas entorno al cráter; modo radial que produce clivaje entorno al cráter y fragmentación como la rotura completa del material.

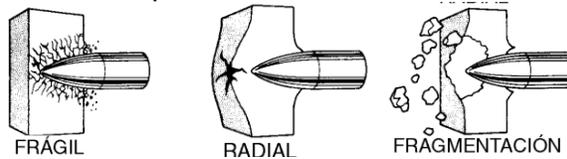


Figura 16. Modos de falla producidos en placas cerámicas, durante el impacto de proyectiles [35]

El comportamiento de materiales cerámicos sometidos a impacto balístico, depende de la velocidad del proyectil [36], a baja velocidad, a intermedia y alta velocidad, el proceso de penetración está dominado por las propiedades mecánicas del material (formación de un cráter cónico, donde a medida que penetra el proyectil se amplía un cráter hasta la superficie de salida), mientras que en el rango de hipervelocidad (superior a 3000m/s), el proyectil penetra en el cerámico, manteniendo el diámetro del cráter durante el proceso de contacto, ver figura 17. Durante un impacto, la deformación del proyectil está ligada a la dureza de la cerámica, el único inconveniente del uso de un material cerámico es que solamente puede ser utilizado para disipar la energía de un impacto, en el cual la placa es destruida por completo dejando vulnerable la estructura a posteriores proyectiles.

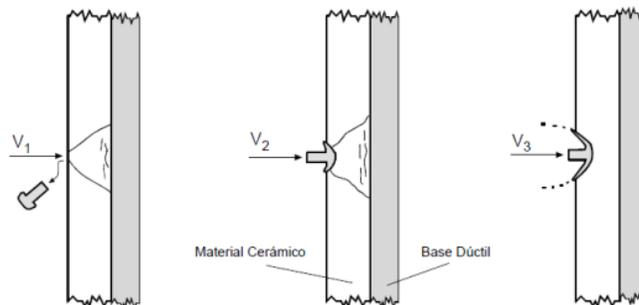


Figura 17. Formas de rotura de sistemas cerámicos en función de la velocidad de proyectil. De izquierda a derecha: velocidad baja, velocidad intermedia e hipervelocidad [36]

Una excelente aplicación de los materiales cerámicos en sistemas de protección balística en sistemas compuestos, es combinando la cerámica con placas de acero, aluminio ó laminas poliméricas, las cuales permiten capturar los fragmentos tanto del proyectil como del cerámico durante el impacto. Algunas de las propiedades que debe presentar un sistema compuesto donde predomine el material cerámico, para aplicación balística, son: homogeneidad de la cerámica, completa adherencia entre los componentes y baja deformación en la cara posterior del sistema [33,37].

Una alternativa para un sistema de protección con material cerámico, es el sistema fabricado a partir de la combinación de una placa de espuma de aluminio saturada con una matriz compuesta de partículas de carburo de silicio con una pequeña cantidad de aluminio, donde se obtuvo un sistema con baja densidad, alta dureza, tenacidad y alta absorción de energía [38], propiedades deseadas para el diseño de sistemas de protección. Ensayos de impacto con fragmentos de un proyectil metálico de 20 mm de diámetro a una velocidad de 915 m/s sobre el sistema mencionado, mostraron como mecanismo principal de falla, la fractura en la capa frontal del sistema de espuma de aluminio, figura 18 a), con delaminación en la cara posterior; se determinó que el sistema compuesto permite una buena distribución de energía cinética entre los componentes, en la figura 18 b) se observa un corte transversal del diseño donde el mecanismo de absorción de energía predominante, es la deformación plástica al igual que la deformación elástica en las porosidades.

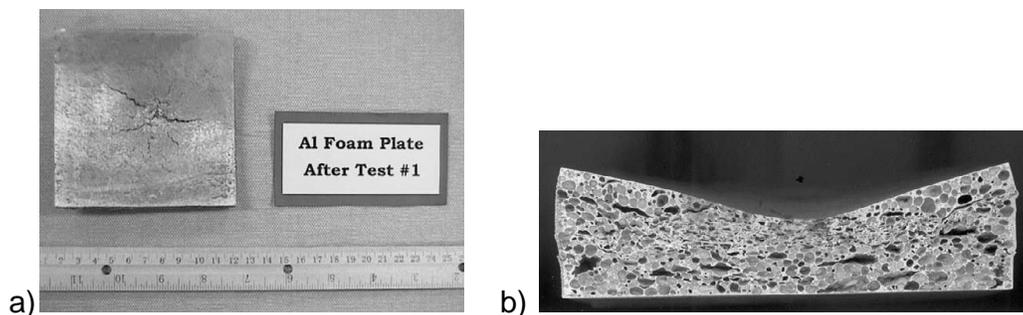


Figura 18. Deformación de una placa porosa, de izquierda a derecha, a) rotura cara posterior b) vista transversal de la deformación [38]

Con los materiales analizados, se plantearon dos modificaciones para un sistema tipo sándwich; una combinación (figura 19 a) elaborada con una capa delgada de tejido flexible en la cara que recibe el impacto(a), una placa gruesa de alúmina (b), una capa flexible delgada (c) y una última capa de varias laminas en tejido flexible(d), con un espesor mayor al de la capa de alúmina; la segunda combinación, (figura 19 b), fue elaborada con una capa delgada en tejido flexible(a), una placa cerámica gruesa(b), una capa delgada flexible(c), una capa con igual grosor del cerámico pero en material metálico(d) y una capa posterior de varias laminas en tejido flexible(e) con la mitad de espesor de la capa metálica utilizada.

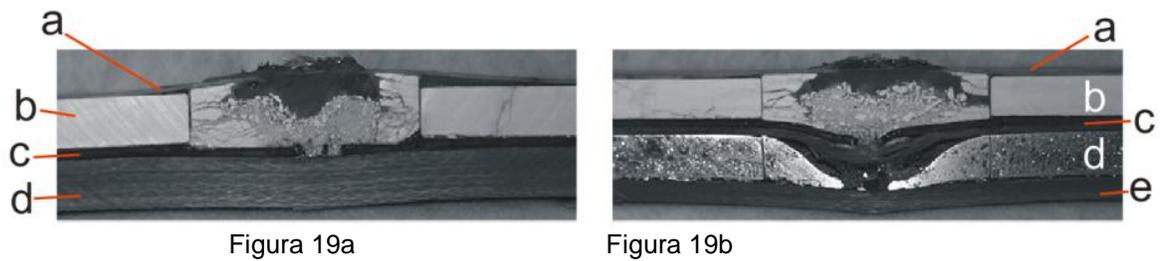


Figura 19. Impacto sobre sistema compuesto a) deformación material cerámico b) Corte transversal, donde se observa diferente deformación en las combinaciones [38]

Aunque los dos sistemas logran detener los fragmentos del proyectil, en la primera combinación, figura 19a, se obtuvo una deformación completa en la cara cerámica que recibió el impacto y una deformación incipiente en la cara posterior del sistema, se observó como mecanismo de disipación de energía cinética, la formación de un cráter, al igual que la delaminación en la cara que recibe al proyectil, mientras que la segunda combinación, figura 19b, se presentó mayor deformación en el sistema respecto a la primera combinación al reducir las capas de laminado flexible y adicionar la placa de espuma de aluminio.

Se comprobó, que una placa cerámica ubicada en la cara que recibe el impacto, junto a una capa posterior en material tejido flexible, logró detener fragmentos de un proyectil metálico de 20 mm de diámetro a una velocidad de 915 m/s, al igual que se controló la energía cinética remanente junto a los fragmentos resultantes del impacto; con la combinación uno (figura 19 a), se obtuvo un sistema más liviano porque no fue necesario utilizar la placa metálica que presentó la combinación número dos (figura 19 b). Esta propuesta para sistemas de protección es muy completa respecto a los sistemas cerámicos sin combinación, porque absorbe la energía tanto en deformación plástica como en deformación elástica, aportando al elemento que se está protegiendo la posibilidad de recibir al menos un impacto adicional, debido a que el sistema de protección no se destruyó completamente con el primer contacto; éste diseño ofrece alternativas casi infinitas de protección, teniendo en cuenta las innumerables posibilidades de conformación de espumas tanto cerámicas como metálicas, al mismo tiempo que ya existe en el mercado una gran familia de polímeros con los cuales se puede inyectar dichas combinaciones.

Una tercera combinación de materiales, analizada por el mismo investigador [37,38], analizó dos sistemas, uno elaborado con placas de carburo de silicio con grandes poros y diferente geometría (figura 20 a) y 20 b), sin adición polimérica y una segunda combinación impregnada con poliuretano (figura 21a) y 21b), con el objetivo de proporcionar disipación de energía y reducción de peso en un sistema compuesto, sometido al impacto de un proyectil metálico de 7.62mm de diámetro a una velocidad promedio 760m/s.

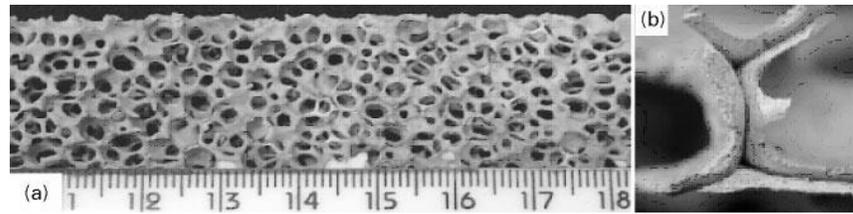


Figura 20. Micrografía a) visión general de espuma de SiC. b) Detalle de uno de los hueco [39]

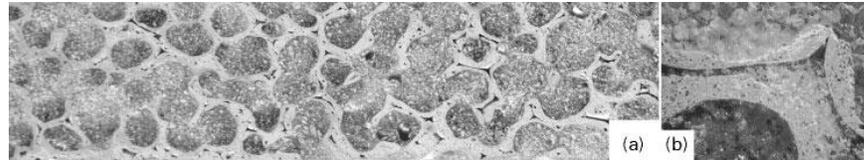


Figura 21. a) Micrografía del cerámico infiltrado. b) detalle del hueco [39]

Se observó, que cuando la espuma cerámica no infiltrada se somete a carga de compresión, ésta se deforma elásticamente hasta alcanzar una carga máxima tras un aplastamiento frágil, figura 22 a, hubo formación de grietas macroscópicas en la dirección de la tensión aplicada, fracturándose en grandes piezas, mientras en el panel infiltrado de poliuretano se observó un aumento en la rigidez del sistema; en la cara frontal la fragmentación se presentó con formación de grietas y en la zona cercana del punto de impacto se observó trozos de diferentes tamaños y polvo, con un foco de grietas conoidales y coaxiales (Figura 22 b y c).

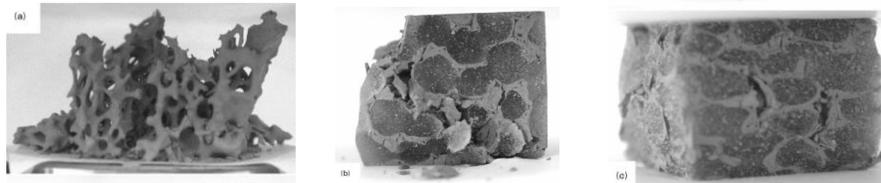


Figura 22. Deformación cerámico infiltrado con poliuretano, de izquierda a derecha a, b y c [39]

La infiltración con termo poliuretano aporta a la estructura compuesta mayor absorción de energía; éste estudio brinda información valiosa para proyectar la sustitución de caras frontales elaboradas en poliaramidas ó de caras posteriores elaboradas en tejido de polietileno, evitando así la necesidad de un proceso de laminación.

**4.2.1 Condiciones de manufactura para sistemas cerámicos.** Existen “condiciones” adecuadas en la fabricación de los sistemas de protección con materiales cerámicos [40-41] para asegurar en las placas dimensiones y geometrías precisas, paralelismo y planitud en sus caras. En la fabricación de placas cerámicas para un sistema de protección, es necesario contar con técnicas adecuadas de fabricación que permitan, controlar al máximo la formación de defectos superficiales, mantener un espesor constante en las placas y controlar porcentajes de porosidad; un ejemplo de la tecnología aplicada, es el *prensado* a temperatura ambiente del polvo

cerámico utilizando sistemas mecánicos para un posterior sinterizado, también está el proceso de prensado, aplicando altas temperaturas para mejorar las propiedades mecánicas del producto final.

Al utilizar un material adicional flexible en el sistema cerámico, se debe asegurar un espesor con tolerancias dimensionales específicas para que durante las pruebas de impacto se minimice la posibilidad de fallas originadas por un incorrecto montaje de los sistemas cerámicos sobre la estructura de soporte, adicionalmente se recomienda utilizar la técnica de autoclave, para obtener una mejor adhesión entre los componentes, ésta técnica se caracteriza por tener un sistema de control de los parámetros de curado, condiciones de presión y de temperatura, las cuales son relevantes durante el proceso de adhesión y compactación de los materiales no homogéneos. Los materiales cerámicos aplicados sin combinación y compuestos, poseen propiedades excepcionales que aún no han sido exploradas en su totalidad, factor que deja un amplio espacio para seguir investigando sobre diseños apropiados con alta resistencia a la flexión y al impacto.

#### 4.3 SISTEMAS DE PROTECCIÓN CON MATERIAL PREDOMINANTEMENTE POLIMÉRICO (TEJIDO).

Durante la segunda guerra mundial se incorporó el primer material polimérico para protección balística PRD-49, caracterizado por tener una baja densidad ( $1.4 \text{ g/cm}^3$ ) y alta resistencia al impacto, posteriormente, se utilizó el polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE), material que se caracteriza por tener una baja densidad ( $0.97 \text{ g/cm}^3$ ), alta capacidad de absorción de energía cinética y alta resistencia a esfuerzos de tensión [42,43]. En una comparación de propiedades mecánicas, entre los polímeros tejidos más utilizados en sistemas de protección balística (ver cuadro 5), el polietileno de ultra alto peso molecular, denominado por el autor como polietileno de alto comportamiento (HPPE), tiene resistencia, módulo de elasticidad y un porcentaje de elongación superior, dentro del grupo de polímeros balísticos, propiedades que hacen de éste material, óptimo para la aplicación en sistemas de protección personal; dichas propiedades intervienen directamente con la formación de mecanismos de falla plásticos y elásticos durante el proceso de absorción de energía cinética proveniente de un proyectil determinado.

Cuadro 5. Propiedades de tejidos poliméricos usados en protección [44]

	Resistencia (Gpa)	Modulo (Gpa)	Elongación antes de ruptura (Gpa)
Aramid	2.8-3.2	60-115	1.5-4.5
HPPE	2.8-4.0	90-140	2.9-3.8
LCP	2.8	65	3.3
PBO AS	5.5	280	2.5
M5	4.0	330	1.2
S glass	4.65	87	5.4

En polímeros tejidos con aplicación balística, existen diferencias en el índice de absorción de energía, frente a la velocidad sónica de propagación de las fallas, ver figura 23; aunque no se determina el tipo de proyectil, se ilustra que el polietileno junto al parafenileno benzobisoxazol (PBO) son los polímeros que más rápido disipan energía cinética, en comparación con los tejidos de aramidas (Kevlar®), poliamidas y de fibra de vidrio.

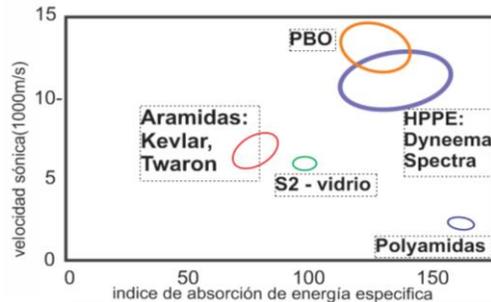


Figura 23. Comparación de índice de absorción de energía para polímeros [44]

Los polímeros pueden ser empleados en protección balística en forma de placas y tejidos laminados, con lo cual se amplía su aplicación en el campo de la protección personal tanto en productos rígidos como flexibles [45], las placas son utilizadas generalmente para protección estructural, donde el volumen no es una característica importante del diseño, por ejemplo, en sistemas de protección vehicular se utilizan placas delgadas de policarbonato entre las capas de vidrio, otro polímero aplicado en placas ha sido el poliuretano donde es combinado con cerámicas y con metales para formar sistemas de diverso espesor; mientras, los polímeros tejidos en forma de laminas, han sido utilizados principalmente en protección personal flexible, en chalecos y en todo tipo de vestidos, al igual que en algunos casos de protección estructural rígida en sistemas tipo sándwich.

En tejidos laminados poliméricos, el número de capas superpuestas con diferente orientación de los hilos (figura 24), proporciona el grado de protección, en términos de absorción de energía cinética, reducción de la velocidad y retención de los fragmentos originados durante el impacto, a través de mecanismos de deformación elástica como: resistencia a la tensión, adherencia con la matriz, orientación y fuerza interfacial de las fibras[46], se identificaron dos formas de deformación en los hilos de los polímeros [47], una con olas de esfuerzo de tensión transversal para energía en baja velocidad y otra con olas de esfuerzo de corte longitudinal para energía en alta velocidad.

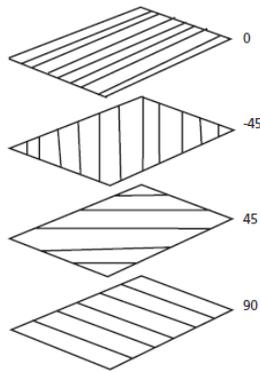


Figura 24. Estructura del tejido compuesto formado por capas con diferente orientación de las fibras [45]

En sistemas poliméricos tejidos laminados, los mecanismos de deformación, dependen del módulo de elasticidad del polímero[48], en las micrografías se muestran fracturas de fibras, ver figura 25, imágenes a y b, donde se observó, que el rendimiento de las fibras fue mayor para las fibras denominadas M5, las cuales tienen un módulo de elasticidad aproximado de 310Gpa y tenacidad superior a las otras fibras hasta el momento desarrolladas con aproximadamente 220Gpa, en la figura 25b se ilustra a las fibras con mayor módulo de elasticidad las cuales no presentaron fibrilación y se observó menor rotura en comparación con las fibras de aramida (figura 25a), las cuales presentaron fusión, fibrilación y rotura completa.

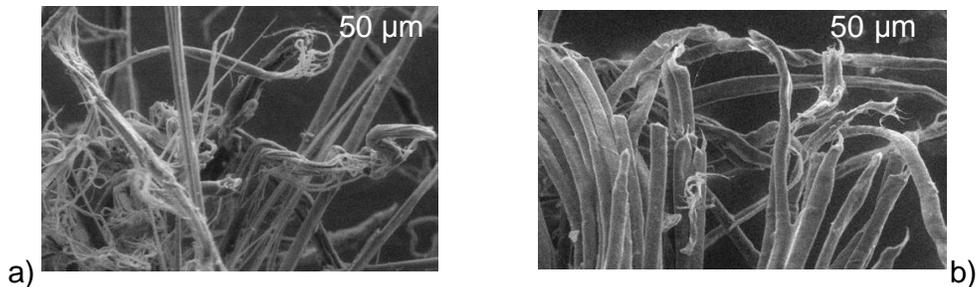


Figura 25. Deformación en tejido polimérico [48]

Otro de los mecanismos predominantes en los polímeros tejidos durante la disipación de energía cinética, es la formación de una pirámide cónica al respaldo del material ilustrada en la figura 26 [49], donde se observó que la tensión está en función de la distancia del impacto, por tanto los hilos que están más cerca, experimentan tensión de falla, mientras que los hilos más distantes del punto de impacto, no tienen tensión alguna, lo que permitió plantear para el análisis de disipación de energía un modelo basado en el tamaño de la conicidad formada, a partir de los siguientes supuestos:

1. El proyectil se deforma durante el impacto.
2. Para dicho cálculo son insignificantes la pérdida de energía (rozamiento entre proyectil y el compuesto) y el calor generado durante la interacción.
3. El mecanismo de falla del sistema es uniforme a través del espesor.
4. La energía absorbida por delaminación no se tiene en cuenta.

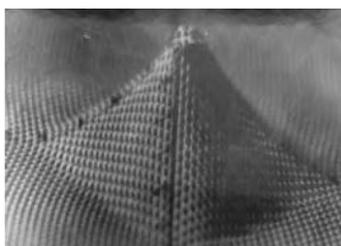


Figura 26. Efecto de deformación en tejidos de aramida [49]

Los tejidos en fibras de aramidias y poliamidas sin combinación con otros materiales tienen alta resistencia al impacto, pero se requiere entre 30 a 40 capas de tejido para absorber la energía cinética proveniente de un proyectil con una energía cinética igual o superior a 900 Joules; en el caso de polímeros producidos por inyección, el espesor de la placa se incrementa ante la necesidad de disipar energía cinética superior a 900J y se hace indispensable el uso de materiales adicionales para el sistema de protección. Durante el impacto a sistemas de protección balística elaborados con materiales poliméricos en forma de placas como en tejidos combinados con otros materiales, complementando así las propiedades del sistema para disipar la mayor cantidad de energía cinética posible [50, 52,53].

Una alternativa para un sistema de protección es el sistema tipo sándwich, donde se superponen capas o placas del mismo o de diferente material para hallar la absorción de energía requerida; en ensayos de resistencia balística a las combinaciones de un sistema, donde se utilizó capas tejidas de aramida, cerámicos, tejidos de polietileno y fibras de carbono y/o fibra de vidrio [51], se analizó la reacción frente al impacto de un proyectil metálico en tres combinaciones ilustradas en la figura 27, en el estudio se identificó como la mejor combinación al sistema elaborado con fibras de aramida en la primera capa, una placa intermedia en cerámica y una capa posterior en poliéster reforzado con fibras de vidrio y de carbono (ver la configuración c, de la figura 27,) debido a que éste sistema presentó mayor absorción de energía, es decir menor delaminación y menor formación del cono en la cara posterior del sistema frente a las otras dos combinaciones.

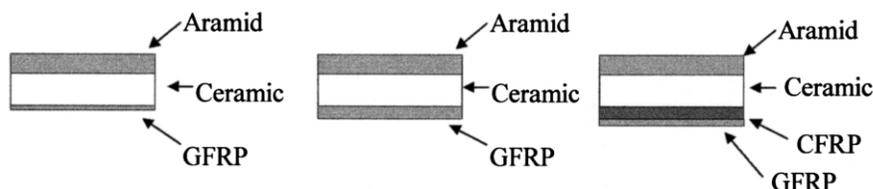


Figura 27. Imagen de configuraciones diferentes de un sistema compuesto tipo sándwich, a partir de un material polimérico termoestable, Cerámica de alta dureza y tejido compuesto, ordenadas de izquierda a derecha [51]

Al estudiar el impacto de proyectiles en tejidos laminados de polietileno sobre placas delgadas de policarbonato, se han clasificado mecanismos de disipación de energía de acuerdo a la velocidad de impacto donde: en baja velocidad, la respuesta en el

sistema es una deformación entorno al impacto, mientras, en alta velocidad se detallan mecanismos de fractura, tales como, perforación, cráter y rotura de fibras. En sistemas combinados de tejido de polietileno con fibras de aramida [54,55], se observaron tres mecanismos de absorción de energía (despreciando la energía absorbida por delaminación): a) Energía absorbida en la falla a la tracción del compuesto; b) Energía convertida en deformación elástica y c) Energía disipada por formación de un cráter.

En el sistema se observó que las primeras capas son perforadas sin deformación importante entorno al cráter (ver la figura 28), mientras en las últimas capas se presenta delaminación, donde, la energía del proyectil es absorbida en tres etapas; penetración con baja área afectada [56], deformación y una tercera etapa de detención del proyectil con gran área deformada (figura 29).



Figura 28. Micrografía transversal de la delaminación en un sistema laminado de 6,15 mm de espesor modelo CFRP penetrado por un proyectil metálico (Sanders 1997) [56]

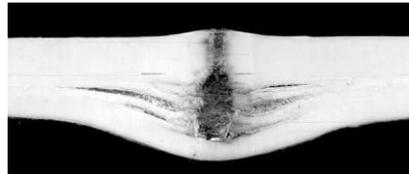


Figura 29. Micrografía de la delaminación y encapsulamiento del proyectil en el panel compuesto [56]

En el análisis de la resistencia balística de estructuras compuestas tipo sándwich [57], se elaboró un sistema, donde el material del núcleo es una placa cerámica, alúmina ( $Al_2O_3$ ) con una capa de material compuesto en la cara posterior, intercalada entre dos tejidos poliméricos, configurados en 2d y en 3d (figura 30).

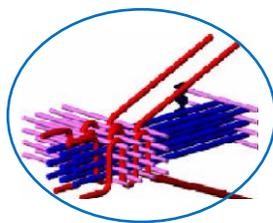


Figura 30. Modelado del tejido 3d [56]

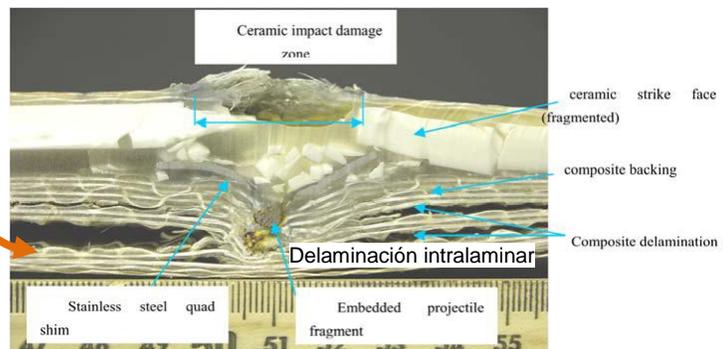


Figura31. Micrografía de la sección transversal de un sistema compuesto donde se observa detención del proyectil [57]

El análisis posterior al impacto, comparó el rendimiento entre tejidos 2d y 3d en la cara posterior del sistema, para lo cual se hizo un corte transversal del panel, donde se observó, que el sistema de protección con respaldo en tejido 3d obtuvo mayor eficiencia balística, es decir, mayor control de la delaminación y menos penetraciones completas, respecto a los paneles diseñados en tejido 2d; los mecanismos de deformación presentes, fueron: fragmentación de la cerámica en tamaño variable y delaminación interlaminar (ver la figura 31), donde la deformación más evidente la presentó el material cerámico.

De los anteriores estudios se puede afirmar que los polímeros son los materiales ideales en los sistemas de protección debido a su gran flexibilidad, baja densidad y gran capacidad de absorción de energía cinética, el único inconveniente es que el nivel de protección es limitado, teniendo en cuenta la gran cantidad de proyectiles que existen y que día a día se están diseñando, por lo que se hace necesario utilizar otros materiales como los cerámicos o los metales que brinden propiedades adicionales al sistema para la absorción de energía cinética, el reto del diseño está en mantener el bajo peso y un mínimo volumen en todas las aplicaciones de protección tanto personal como estructural.

#### **4.4 NORMA DEL INSTITUTO NACIONAL DE JUSTICIA (NIJ)**

Es un documento técnico desarrollado por el Gobierno de los Estados Unidos de Norteamérica, que especifica los requisitos de funcionamiento que debe tener un sistema de protección balístico, flexible o rígido. La norma está diseñada para proporcionar un método de pruebas de impacto preciso y detallado; el cumplimiento de los requisitos de ésta norma debe ser comprobado por un laboratorio certificado internacionalmente. El producto incluido en ésta norma es el chaleco personal antibalas el cual se clasifica en función del nivel de protección balística requerido; un sistema de protección certificado, debe tener un rendimiento mínimo frente a un impacto especificado en el estándar de prueba.

Una serie de países, además de los EE.UU. han adoptado la norma NIJ y otros la han modificado y han publicado normas internas con un nivel completamente nuevo, basados en necesidades y exigencias de las políticas de protección locales. Para ésta exploración ha sido seleccionada la clasificación NIJ III A, la cual tiene propiedades para absorber energía de proyectiles encamisados, FMJ (full metal jacket) de punta redonda de 9mm de diámetro x 19 mm de longitud, con una masa nominal de 8,0 gramos; con una velocidad de 436 m/s [58]. Para la elaboración de los ensayos se requiere entender las siguientes definiciones:

- a) Angulo de incidencia: es el ángulo entre la línea de vuelo del proyectil y la perpendicular al plano tangente de la superficie del punto de impacto.
- b) Proyectil encamisado (Full Metal Jacket) de núcleo de plomo recubierto completamente excepto su base por una aleación 90% Cu, 10% Zn.

- c) Cara de impacto: cara que recibe el proyectil
- d) Deformación: el máximo desplazamiento de la superficie posterior del panel Causado por el proyectil.
- e) Impacto válido: cuando el proyectil impacta a la placa en un ángulo de incidencia no mayor a  $\pm 5^\circ$  del ángulo de incidencia 0, con una distancia de 76 mm del borde del panel.
- f) Material de apoyo (backing): plastilina moldeable con base en aceite, denominada comercialmente plastilina roma número 1 de endurecimiento retardado, ubicada en la cara posterior del sistema ensayado.
- g) perforación: perforación del proyectil o por parte de este o del mismo panel durante el impacto.
- h) Acondicionamiento del material de ensayo: Todas las muestras para ensayo deben ser almacenadas y acondicionadas durante 12 horas antes del ensayo a una temperatura de  $(20 \pm 4)^\circ\text{C}$
- i) Material de apoyo del blindaje (backing): se emplea de soporte una caja de 61cm  $\pm 5\text{mm}$  de ancho, por 14 cm  $\pm 5\text{mm}$  de profundidad, la caja debe ser rellena con plastilina roma número 1, para apoyar totalmente al panel a ensayar, la plastilina debe ser cortada a ras de los bordes frontales de la caja.
- j) Fijación de las muestras al material de apoyo: Las placas a impactar deben de asegurarse individualmente al material de apoyo mediante cintas elásticas y/o cierres adhesivos (velcro), de forma tal que no interfieran con el punto de impacto en el sistema, evitando que estos se deslicen del material de apoyo cuando reciban el impacto del proyectil.

Calibración del material de apoyo: El material de apoyo debe ser calibrado, es decir se debe restaurar la planitud superficial de la placa, antes y después del ensayo de cada secuencia de seis impactos.

Calibrador de profundidad: es un elemento utilizado para medir la depresión ocurrida en el material de apoyo después de haber sido impactado. Se utiliza siempre y cuando la huella del proyectil no sobrepase los 40mm de perforación, cuando sobrepasa esta profundidad, se asume que la pieza probada no debe ser aceptada para el nivel de protección utilizado.

## 5. MATERIALES Y METODOS

### 5.1 MATERIALES

**5.1.1 Polietileno de ultra alto peso molecular.** Como material flexible fue seleccionado el tejido laminado de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) ver anexo 1, dadas las propiedades de alta absorción de energía cinética y aplicación en sistemas de protección balística. En la figura 32 se observa la disposición del panel multicapa, el cual tiene cuatro capas cada una formada por hilos paralelos, en la configuración del panel hay dos capas sucesivas con la misma orientación, las dos capas posteriores están orientadas perpendicularmente a la dirección de los hilos anteriores.

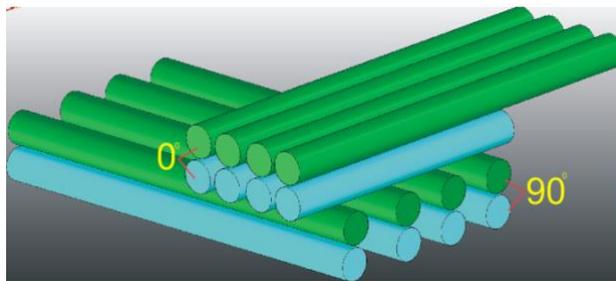


Figura 32. Orientación de las capas del tejido de Polietileno de ultra alto peso molecular utilizado.

En la figura 33, en la imagen a, se ilustra un acercamiento al panel. En la imagen 33b, se ilustra que el diámetro de cada hilo era aproximadamente de  $15\ \mu\text{m}$ . Las dimensiones de la tela para la elaboración del sistema a analizar son:  $200\text{mm}\pm 3 \times 200\text{mm}\pm 3$ .

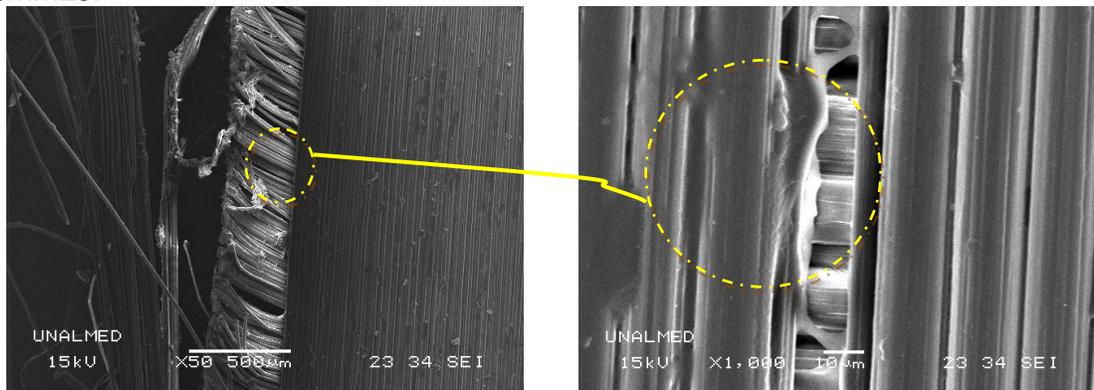


Figura 33. SEM del tejido de polietileno de ultra alto peso molecular, a) Micrografía capas del tejido b) Micrografía del tejido con una aproximación donde se observa la dirección de los hilos.

Para caracterizar el polietileno (UHMWPE) se realizó una prueba termo gravimétrica (TG) y un análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) con los cuales se obtuvo información sobre la capacidad calórica del polietileno; en la figura 34 se

observa la curva derivada del DSC (color verde) que ilustra el punto de la temperatura de fusión del material, alrededor de los 140°C donde se observa un pico negativo.

En la curva derivada (TG)(color azul) se observa que el material sufre una pérdida de masa en un porcentaje inferior al 5% desde el inicio del calentamiento hasta el pico donde empieza a perderse abruptamente la masa del material alrededor de los 426°C, alcanzando el punto máximo de absorción calórica. Con ésta información se busca tener los datos para identificar el comportamiento en un posible proceso de degradación de las fibras del tejido por alta temperatura debido al contacto con el proyectil.

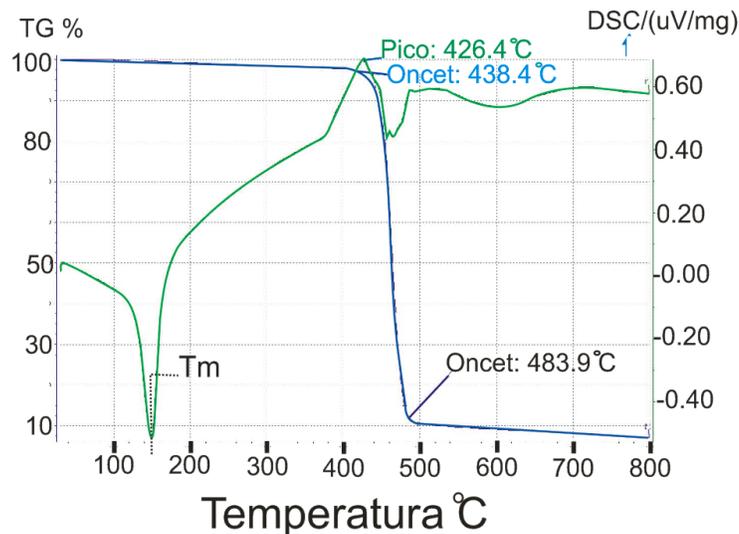


Figura 34. Dsc - Tg del tejido de Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE)

**5.1.2 Carburo de silicio.** Se seleccionó como material cerámico al carburo de silicio (SiC) porque es un material con alta dureza, alta resistencia a la abrasión y ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones balísticas [29-41], además de ser un cerámico comercial, característica primordial para el proceso de elaboración de los sistemas en éste trabajo de investigación.

Las propiedades del SiC se deben al tipo de enlace atómico y a su estructura cristalina, hexagonal tipo( $\alpha$ ), siendo ésta la más estable química y mecánicamente, incluso a temperaturas superiores a 2000°C, el tipo de estructura obtenida depende del método utilizado para su producción, en éste caso, el polvo de carburo del silicio utilizado es producido por el proceso de Acheson, que consiste en la reducción de la arena de sílice en contacto con coque del petróleo o con antracita a una temperatura cercana a 1200°C durante 36 horas, para formar el SiC  $\alpha$  de grado comercial [59]. Las propiedades del cerámico utilizado son:

- Tamaño de grano: 10- 50  $\mu\text{m}$
- Pureza del material: 80% Silicio, 20% sílice y aglomerante a base de celulosa porosidad aparente 40%, ver anexo 2

- Densidad real media: 1.60 g/cm<sup>3</sup>, obtenida mediante toma directa de masa y volumen de las muestras.
- Temperatura de servicio: 1250°C
- Dimensiones de la placa: 200±3mm x 200±3mm x 5±1,5 mm
- Masa media de la placa: 293.4g - 312.9g
- Densidad teórica del SiC: 3.1 – 3.2 g/cm<sup>3</sup> [60]
- Conformado por compactación a presión atmosférica, posteriormente sinterizado en horno eléctrico a 850 °C.

Para determinar la porosidad de las muestras, inicialmente las probetas fueron secadas y sinterizadas en horno a aproximadamente 850°C, posteriormente se ensayaron de acuerdo con la norma ASTM C1039, donde se obtuvo una porosidad aparente del 40%, ver anexo 3, la porosidad superficial de las placas es del 46% obtenida por análisis visual utilizando un software de análisis de imágenes. Se utilizaron imágenes de micrografías tal como la de la figura 35; se realizó un análisis DRX (figura 36), donde se identifica al cerámico utilizado como carburo de silicio fase alfa ( $\alpha$ ), al ser comparado con el gráfico de la base de datos.

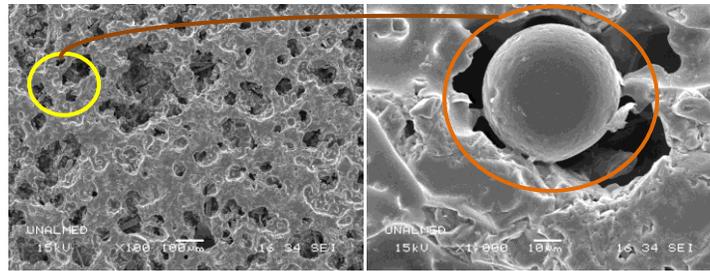


Figura 35. Microscopia óptica a) para análisis visual de porosidad. b) muestra el detalle SEM de un grano de silicio promedio con un diámetro aproximado de 50  $\mu$ m.

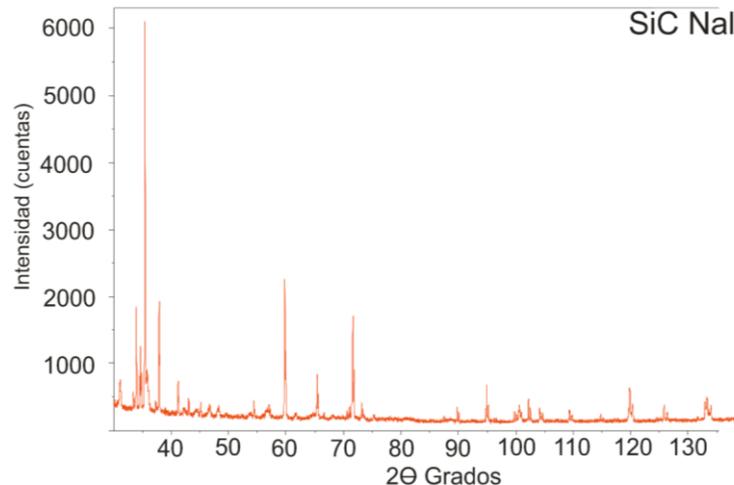


Figura 36. Imagen del análisis por difracción de rayos x (DRX) al cerámico donde se confirma, que el carburo utilizado es de fase alfa, lo cual ratifica las propiedades mecánicas provenientes de la información bibliográfica.