



Estudio de la fabricación de un casco táctico militar mediante ingeniería inversa para el uso de las Fuerzas Armadas del Ecuador.

Tasinchano Toapanta Roberto Luis

Zhispón Rivera Jonathan Rubén

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Sánchez Sánchez, Xavier Rolando, Ph.D

29 de febrero de 2024



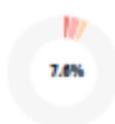
Plagiarism and AI Content Detection Report

Formato plagio_Tasinchano_Zhispon....

Scan details

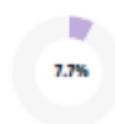
Scan time: February 29th, 2024 at 12:43 UTC Total Pages: 51 Total Words: 12676

Plagiarism Detection



Types of plagiarism	Words
Identical	1.9% 246
Minor Changes	3.3% 415
Paraphrased	2.3% 297
Omitted Words	0% 0

AI Content Detection



Text coverage	Words
AI text	7.7% 976
Human text	92.3% 11700

[Learn more](#)

Plagiarism Results: (14)



🔍 Análisis experimental y numérico del comportamiento mecánico del mat... **5%**

https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/33280/tesis_ignacio_rubio_diaz_2021.pdf?sequence=1&ia...

[Ignacio Rubio Diaz](#)

Universidad Carlos III de Madrid Tesis Doctoral Análisis experimental y numérico del comportamiento mecánico del material compuesto base...

🔍 Aplicaciones - GAB Neumann **0.5%**

<https://www.gab-neumann.com/aplicaciones/3/fibras-de-aramida/198>

Interc...

🔍 Resumen de Nueva norma NIJ para Elementos de Protección Balística **0.3%**

<https://es.linkedin.com/pulse/resumen-de-nueva-norma-nij-para-elementos-proteccion-balistica-leonardo-moreno-siles...>

[Leonardo Moreno Siles](#)

Acepta...

🔍 Moldeo por compresión | Tecnología de los Plásticos **0.3%**

<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/10/moldeo-por-compresion.html>

Tecnología de los Plásticos Blog dedicad...

Certified by

About this report
help.copyleaks.com

copyleaks.com

.....
Ing. Sánchez Sánchez, Xavier Rolando, Ph.D

C.C.: 1712575826



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Estudio de la fabricación de un casco táctico militar mediante ingeniería inversa para el uso de las Fuerzas Armadas del Ecuador.”** fue realizado por los señores **Tasinchano Toapanta Roberto Luis y Zhispon Rivera Jonathan Rubén**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 29 de febrero de 2024

.....

Ing. Sánchez Sánchez, Xavier Rolando, Ph.D

C.C.: 1712575826



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Tasinchano Toapanta Roberto Luis**, con cédula de ciudadanía n° 1723349740, y **Zhispón Rivera Jonathan Rubén**, con cédula de ciudadanía n° 1726507856, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **“Estudio de la fabricación de un casco táctico militar mediante ingeniería inversa para el uso de las Fuerzas Armadas del Ecuador”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 29 de febrero de 2024


.....
Tasinchano Toapanta Roberto Luis

C.C.: 1723349740


.....
Zhispón Rivera Jonathan Rubén

C.C.: 1726507856



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Autorización de Publicación

Nosotros, **Tasinchano Toapanta Roberto Luis**, con cédula de ciudadanía n° 1723349740, y **Zhispon Rivera Jonathan Rubén**, con cédula de ciudadanía n° 1726507856 autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **“Estudio de la fabricación de un casco táctico militar mediante ingeniería inversa para el uso de las Fuerzas Armadas del Ecuador”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 29 de febrero de 2024


.....
Tasinchano Toapanta Roberto Luis
C.C.: 1723349740


.....
Zhispon Rivera Jonathan Rubén
C.C.: 1726507856

Dedicatoria

A mis padres, Jaime y Pilar que gracias a sus enseñanzas sobre el valor del esfuerzo, dedicación y sacrificio han sido un faro de luz que ha guiado mis pasos, recordándome que, con perseverancia y entrega, cualquier meta es alcanzable.

A mis hermanos, Karina, Nicol y Ronny que han sido mi constante fuente de alegría y fortaleza. A través de risas compartidas y momentos difíciles superados juntos, han sido mi apoyo inquebrantable.

A mis abuelitos, Luis, Rosita y Juan mis tres ángeles quienes siguen siendo mis guías desde el cielo, mi abuelita Laura que sigue velando por mi bienestar.

Roberto Luis Tasinchano Toapanta

El resultado de este proyecto le dedico primeramente a mi madre Yaneth Rivera, mi compañera de vida, la que ha caminado junto a mi durante todo este camino, mi soporte y mi motivación, conjunto a esto dedico este logro a mi padre Humberto Zhispón quien me ha sabido inculcar el valor de la perseverancia y me ha enseñado la importancia de esforzarse para conseguir mis metas.

De igual manera este logro viene acompañado de mis hermanos Carolina y Darling, quién han sido un pilar fundamental en mi crecimiento, los cuales han sacrificado muchas cosas para poder ayudarme a conseguir esta meta.

Agradezco a Erika Pacheco mi fiel compañera, quien me supo brindar su apoyo, amor y compañía quien ha sido mi inspiración y motivo para ser una mejor persona cada día, por último, quiero dedicar este logro a Libiak el regalo más grande que me ha dado la vida.

Jonathan Rubén Zhispón Rivera

Agradecimientos

A Dios por la sabiduría y cobijo durante este trayecto y por el cierre de una etapa que me permite abrir nuevas puertas hacia el futuro, con la confianza y el conocimiento adquirido durante este proceso.

A mis padres, por su apoyo incondicional durante esta travesía, su amor y sacrificio han sido el pilar sobre el cual he construido mis metas y ambiciones.

A mis hermanos, porque a pesar de las riñas y peleas que puedan surgir, siempre han estado ahí para mí, agradezco su constante amor y complicidad, que han sido un recordatorio constante de la importancia de la familia y el valor de la unión.

A mis abuelitos, por haber inculcado en mí el amor y los valores que han guiado mis pasos a lo largo de este camino. Su sabiduría, ternura y ejemplo de vida han dejado una huella imborrable en mi corazón.

A la Universidad, por brindarme la oportunidad de desarrollarme como persona y profesionalmente. Durante mi tiempo aquí, he sido agraciado con maestros entregados a su trabajo, instalaciones enriquecedoras y un entorno de aprendizaje estimulante que han contribuido significativamente a mi crecimiento. Además, valoro profundamente las amistades que he forjado aquí, que han enriquecido mi experiencia universitaria y han sido un apoyo invaluable en mi camino hacia el éxito.

Roberto Luis Tasinchano Toapanta

Al concluir una etapa maravillosa de mi vida quiero agradecer a todas esas personas que caminaron de mi mano día tras día especialmente a mi familia.

Agradecer a Dios por darme oportunidades maravillosas durante este camino y agradecer a mi querida ESPE por haberme acogido y preparado durante este tiempo para la vida profesional.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecerme por creer en mí, quiero agradecerme por hacer todo este trabajo duro, quiero agradecerme por nunca haber renunciado.

Jonathan Rubén Zhispón Rivera

Índice de contenido

Dedicatoria	6
Agradecimientos.....	7
Resumen.....	15
Abstract	16
Capítulo I: Generalidades	17
Antecedentes	17
Definición del Problema.....	18
Justificación.....	19
Alcance.....	19
Objetivos	20
Objetivo General.....	20
Objetivos Específicos.....	20
Área de Influencia.....	20
Capítulo II: Marco Teórico	22
Importancia del casco táctico militar	22
Cascos tácticos	23
PASGT (Sistema de blindaje personal para tropas terrestres).....	23
MICH (casco modular de comunicaciones integradas):	24
ACH (Advanced Combat Helmet)	25
FAST (Future Assault Shell Technology)	26
Norma NIJ, casco balístico estándar	27

	10
Materiales compuestos.....	29
Material Matriz - Fibra de aramida	30
Análisis de una lámina de material compuesto	32
Características mecánicas en las direcciones locales (1-2)	35
Relaciones $\sigma - \varepsilon$ en las direcciones locales 1-2.....	38
Relaciones $\sigma - \varepsilon$ en las direcciones globales x-y.....	40
Deformaciones del material en las direcciones globales x-y	41
Análisis de un laminado de material compuesto	43
Moldeo por compresión	48
Capítulo III: Metodología	51
Modelamiento y diseño CAD	52
Fabricación del molde.....	54
Composición del material compuesto para fabricación del casco táctico	56
Análisis de las propiedades mecánicas del material compuesto para fabricación de casco táctico militar	57
Fabricación de probetas “placas” para ensayo balístico bajo la norma NIJ 0106.01 ..	68
Verificación de la efectividad del material	69
Validación del diseño del casco	69
Optimización del rendimiento del casco.....	69
Análisis de impacto en un material compuesto	71
Cálculo del área de la sección transversal de la bala.....	74
Modelización balística.....	74

Física del impacto balístico en sistemas fibrosos.....	77
Fabricación del casco táctico.....	80
Capítulo IV: Análisis de Resultados.....	84
Resultados Experimentales.....	84
Ensayos de Probetas.....	84
Parámetros norma NIJ 106.01.....	85
Parámetros de aprobación.....	85
Resultados del Ensayo 1.....	85
Datos técnicos.....	85
Resultados del Ensayo 2.....	86
Datos técnicos.....	86
Análisis de las láminas.....	87
Resultados del Ensayo 3 – Casco Táctico.....	89
Datos técnicos.....	89
Capítulo V: Análisis Económico.....	93
Costos Directos.....	93
Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones.....	96
Conclusiones.....	96
Recomendaciones:.....	97
Bibliografía.....	99
Apéndices.....	102

Índice de tablas

Tabla 1 Exigencia de nivel de protección balístico NIJ 0106.01	28
Tabla 2 Propiedades mecánicas de diferentes fibras empleadas como refuerzo, comparadas con el acero	30
Tabla 3 Propiedades mecánicas de diferentes fibras de aramida.....	32
Tabla 4 Proceso del diseño en 3D del Molde	52
Tabla 5 Proceso de fabricación del molde del casco táctico.....	55
Tabla 6 Proceso de fabricación de placas de kevlar.....	70
Tabla 7 Numero de capas necesitó para V50 requeridos	76
Tabla 8 Velocidad de impacto del proyectil 9 mm FMJ en cada capa	78
Tabla 9 Proceso de fabricación del casco táctico	81
Tabla 10 Gastos en materia prima y herramientas utilizadas en la matriz	93
Tabla 11 Gastos en el mecanizado de la matriz.....	93
Tabla 12 Gastos en probeta placa de kevlar	94
Tabla 13 Gastos en Casco táctico MICH Nivel IIIA.....	94
Tabla 14 Gastos en ensayos balísticos- empresa Santa Bárbara.....	95
Tabla 15 Costo total del proyecto.....	95

Índice de figuras

Figura 1 Casco PASGT	24
Figura 2 Casco MICH	25
Figura 3 Casco ACH.....	26
Figura 4 Casco FAST	27
Figura 5 Direcciones locales de una lámina de material compuesto	33
Figura 6 Diagrama de esfuerzos de un material compuesto	34
Figura 7 Corte transversal de un material compuesto.....	34
Figura 8 Material compuesto sometido a tracción en la dirección 1	35
Figura 9 Material compuesto sometido a tracción en la dirección 2	37
Figura 10 Diagrama de esfuerzos en las direcciones locales1-2.....	38
Figura 11 Material compuesto sometido a esfuerzos	44
Figura 12 Análisis de laminado de un material compuesto	44
Figura 13 Análisis del esfuerzo perpendicular en el eje x de un material compuesto	45
Figura 14 Esquema del proceso de fabricación de un casco táctico	50
Figura 15 Detalles de un ensayo balístico en casco de prueba.....	71
Figura 16 Análisis de velocidad del proyectil a través de las capas de kevlar	72
Figura 17 Esquema que muestra la forma de cono creada por una bala que golpea múltiples capas de capas de tejido. En esta representación, la capa 1 es atravesada y se activan las capas 2, 3 y 4.....	77
Figura 18 Modelo matemático de la velocidad del proyectil 9 mm FMJ con la que impacta y penetra una serie de capas de kevlar (49).	80
Figura 19 Placa Kevlar 49 con resina epóxica sometida a pruebas balísticas.....	86
Figura 20 Placa de kevlar con cemento de contacto sometida a pruebas balísticas	87

Figura 21 Vista posterior de la placa de kevlar del segundo ensayo sometida a pruebas balísticas.....	88
Figura 22 Medición del trauma balístico.....	88
Figura 23 Detalle de los impactos del proyectil.....	89
Figura 24 Diagrama de Evaluación de Impactos en Casco Táctico según norma NIJ 0106.01.....	90
Figura 25 Análisis visual de los impactos balísticos en el casco táctico.....	91

Resumen

El presente proyecto se enfoca en el proceso de fabricación de un casco táctico mediante la aplicación de ingeniería inversa, partiendo de un casco existente como referencia. El proceso de ingeniería inversa implicó el escaneo tridimensional del casco original utilizando un scanner Goscan 20 de Creaform, que produce un mallado fino con una resolución de 1mm. A partir de los perfiles obtenidos del escaneo, se generó el modelo CAD del casco táctico, esto permitió diseñar una matriz que sirvió como molde del casco y facilitó el proceso de laminación para garantizar una protección efectiva contra impactos y penetraciones, utilizando un método de pegado por compresión.

Además, se llevó a cabo una prueba del mechero, que consistió en la delaminación un casco dado de baja, para identificar el número de capas presentes en el casco original usado como referencia. El proceso de fabricación incluyó la aplicación de capas de Kevlar utilizando técnicas de laminación, con un enfoque en asegurar una adecuada adhesión entre las capas y una distribución uniforme del material. Se realizaron pruebas balísticas utilizando probetas fabricadas con el mismo número de capas que el casco táctico. Estas pruebas permitieron evaluar la resistencia del material compuesto de Kevlar a impactos de bala y determinar el diseño óptimo del casco. El número de capas y el diseño del casco se ajustaron según los resultados de las pruebas balísticas y un estudio preliminar considerando varios factores, como la resistencia del material, la munición, la velocidad y la distancia que se impacta la bala, esto bajo los estándares de la Norma NIJ 0106.01 "Cascos Balísticos", para garantizar la máxima protección para el usuario.

Palabras clave: casco táctico, kevlar, Norma NIJ, laminación, resistencia al impacto

Abstract

This project focuses on the manufacturing process of a tactical helmet through the application of reverse engineering, starting from an existing helmet as a reference. The reverse engineering process involved the 3D scanning of the original helmet using a Creaform Goscans 20 scanner, which produces a fine mesh with a resolution of 1mm. From the profiles obtained from the scan, the CAD model of the tactical helmet was generated, which allowed the design of a matrix that served as a mold for the helmet and facilitated the lamination process to ensure effective protection against impacts and penetrations, using a compression bonding method.

In addition, a lighter test, which consisted of delaminating a decommissioned hull, was carried out to identify the number of layers present in the original hull used as a reference. The manufacturing process included the application of Kevlar layers using lamination techniques, with a focus on ensuring adequate adhesion between layers and uniform material distribution. Ballistic tests were conducted using specimens manufactured with the same number of layers as the tactical helmet. These tests made it possible to evaluate the resistance of the Kevlar composite material to bullet impacts and to determine the optimal helmet design. The number of layers and the design of the helmet were adjusted according to the results of the ballistic tests and a preliminary study considering several factors, such as the resistance of the material, the ammunition, the speed and the distance that the bullet impacts, this under the standards of NIJ 0106.01 "Ballistic Helmets", to guarantee the maximum protection for the user.

Keywords: tactical helmet, kevlar, NIJ Standard, lamination, impact resistance.

Capítulo I: Generalidades

Antecedentes

El estudio de la ingeniería inversa persigue el objetivo de obtener la mayor cantidad de información técnica de un producto, del cual no se tiene la más mínima información técnica de su diseño, construcción y funcionamiento, de modo que se debe partir de un todo para comprender cada pieza del sistema, para lo cual se deben tomar notas muy detalladas.

La ingeniería inversa es una rama de la ingeniería relativamente reciente, cuyos orígenes se remonta en el siglo XX, en la Segunda Guerra Mundial, cuando la tecnología armamentística empezó a ser tan importante que podía hacer que la balanza de la victoria se decantara por unos países o por otros. Tanto el bando de los Aliados como las Potencias del Eje se dedicaban a capturar aviones, máquinas y armas del enemigo para estudiarlas y buscar puntos débiles de su tecnología, para conseguir una ventaja estratégica frente al bando contrario.

Las técnicas de ingeniería inversa han evolucionado enormemente desde épocas pasadas. Si bien se inició con aplicaciones militares, ahora es útil en muchos campos diferentes, incluida la fabricación, reproduciendo imágenes en 3D de piezas ya fabricadas cuando no se cuenta con un plano. Esto tiene importantes usos para la construcción, ya que permite:

- Optimizar los procesos de fabricación en recuperación de superficies.
- Separar los datos obtenidos por escaneado en 3D.
- Modificar los diseños existentes para mejorarlos.
- Preparar el modelado 3D para la simulación digital.
- Facilitar la construcción virtual.

Dado que la naturaleza del combate ha cambiado tanto en los últimos años, los departamentos del ministerio de defensa de algunos países han invertido mucho en asociarse con empresas privadas para la investigación y el desarrollo para mejorar los diseños de cascos.

Todo con el objetivo de reducir las lesiones y su gravedad, satisfaciendo las necesidades operativas. Los cascos balísticos no sólo brindan protección contra las amenazas de armas ligeras, sino que también sirven para disminuir el impacto de las ondas de choque de una explosión y el trauma de la fuerza contundente de los proyectiles. Este elemento de protección también tiene la función de proteger al soldado de golpes accidentales en vehículos blindados y ambientes destrozados por la guerra.

Definición del Problema

Debido a que no existe la fabricación de cascos táctico militar en el Ecuador que cumplan la norma para protección balística NIJ STD se requiere acudir a la importación de estos elementos, lo que resulta un problema de stock ya que el periodo de vida útil de estos cascos es de 5 a 6 años los cuales al tener inconvenientes o daños antes de cumplir este periodo se dan de baja y tendrán que ser sustituidos cuando el lote de compra sea en grandes proporciones.

Conjuntamente a esto la fabricación de cascos táctico militar en el Ecuador permitirá satisfacer de una manera óptima las necesidades de los elementos militares para la protección y de igual manera se podrá diseñar y fabricar los cascos bajo las circunstancias y condiciones a las que trabajan estos elementos ya que Ecuador posee un clima húmedo, con esto el material compuesto al ser sometido durante largos periodos a estas condiciones se degradará y perderá sus características de protección lo cual no es deseable.

Justificación

Ecuador al ser un país que presenta una organización militar la cual al tener como objetivo defender la integridad territorial debe poseer implementos de protección los cuales deben presentar ciertas características que rigen las normas de protección militar, debido a esto el estudio de materiales que cumplan con esto ha evolucionado con el pasar de los tiempos tratando de mejorar las características de estos implementos en forma, peso y modularidad.

Para la protección de la cabeza siendo un punto crítico de protección se ha implementado cascos tácticos militares los cuales deben cumplir ciertas características para no poner en riesgo la integridad del personal militar, pero esto a la misma vez deben de ser cómodos y en lo posible poseer un peso que no afecte a la persona en periodos de usos largos, mediante esto se ha utilizado diferentes materiales compuestos como el Kevlar que posee propiedades, composición y comportamiento adecuado para la protección de la cabeza,

De la misma forma que el Kevlar cumple con la protección adecuada, la fabricación de los cascos tácticos resulta más eficiente y fácil ya que se realiza mediante un proceso de laminado con infusión de resina permitiendo fabricar cascos dentro del país con el objetivo de menorar costos y realizarlos bajo las condiciones a las que van a estar sometidos en su uso.

Alcance

Mediante la presente aplicación de ingeniería inversa se desea obtener la factibilidad de fabricación de cascos táctico militar que cumplan los estándares de la Norma NIJ STD, con esto se pretende disminuir los costos que conlleva la importación y conjuntamente a esto mejorar las características de este elemento de protección.

La construcción de un casco táctico mediante el proceso de laminado de capas de material compuesto permitirá reemplazar el acero como material principal de fabricación para los cascos táctico militar, en un esfuerzo por mejorar el peso, la protección balística y la protección contra lesiones en la cabeza; para esto los cascos serán sometidos a pruebas balísticas para ser aceptados por la Norma NIJ STD y poder ser utilizados sin poner en riesgo la integridad de alguna persona.

Así se beneficiará las Fuerzas Armadas del Ecuador ya que se logrará alargar los tiempos de vida útil del casco táctico militar y poseer un stock amplio de elementos en caso de nuevas dotaciones hacía los elementos militares.

Objetivos

Objetivo General

- Analizar la fabricación y composición de un casco táctico militar mediante ingeniería inversa.

Objetivos Específicos

- Fabricar un casco táctico militar para el uso del personal de las Fuerzas Armadas del Ecuador.
- Ejecutar el casco fabricado a pruebas balísticas bajo la norma NIJ STD 0106.01 para cascos balísticos.
- Evaluar el estado del casco táctico fabricado.

Área de Influencia

La aplicación de ingeniería inversa en este proyecto tendrá como área de influencia el estudio y comportamiento de materiales compuestos al ser sometidos a impacto y penetración en protección militar como son los cascos tácticos, de la misma forma se tomará en cuenta los

procesos de manufactura aplicados a la fabricación de cascos al ser elaborados con láminas de materiales compuestos con la finalidad de cumplir los criterios que presenta la norma NIJ STD.

Debido a la creación de nuevos materiales compuestos, el material Kevlar puede ser sustituido por otro material compuesto que cumpla con las propiedades de este pero que al mismo tiempo optimice las características de los cascos, esto permitirá abrir las puertas a futuras investigaciones dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas.

Capítulo II: Marco Teórico

Importancia del casco táctico militar

Los cascos tácticos militares tienen una importancia significativa en Ecuador, particularmente para el personal militar que opera en diversos entornos desafiantes y de alto riesgo. Es por ello que se detallan varias razones por las que los cascos tácticos militares son importantes en Ecuador:

Protección: El propósito principal de los cascos tácticos militares es proporcionar protección a la cabeza y la cara del personal militar. Están diseñados para resistir amenazas balísticas, como balas o fragmentos de explosivos, reduciendo el riesgo de lesiones en la cabeza y potencialmente salvando vidas.

Mitigación de amenazas balísticas: En Ecuador, el personal militar puede enfrentarse a amenazas de grupos armados, cárteles de la droga u otros elementos criminales. Los cascos tácticos ofrecen una protección crucial contra las amenazas balísticas que se suelen encontrar en las operaciones de combate o de aplicación de la ley, mejorando la seguridad y la capacidad de supervivencia de los soldados y los agentes del orden.

Defensa contra la fragmentación: Los cascos tácticos militares también son eficaces para mitigar el impacto de fragmentos resultantes de explosiones u otros impactos de alta velocidad. Estos cascos pueden reducir el riesgo de lesiones cerebrales traumáticas causadas por escombros voladores o metralla, lo que es especialmente relevante en entornos con un alto riesgo de artefactos explosivos.

Mayor integración del equipo: Los cascos tácticos militares modernos están diseñados para integrarse con diversos accesorios y equipos. A menudo cuentan con raíles o soportes para accesorios que permiten acoplar dispositivos de visión nocturna, sistemas de

comunicación, cámaras y otras herramientas específicas de la misión, lo que mejora las capacidades operativas y el conocimiento de la situación.

Adaptabilidad y versatilidad: Los cascos tácticos suelen estar diseñados para ser ajustables y cómodos, lo que permite un ajuste adecuado y un uso prolongado durante operaciones prolongadas. Están diseñados para adaptarse a diferentes tamaños de cabeza y proporcionan suficiente ventilación para evitar la incomodidad y la acumulación de calor.

Es importante señalar que la importancia específica y la utilización de cascos tácticos militares en Ecuador pueden variar en función de los requisitos operativos, el terreno y los retos de seguridad propios del país. La selección y el uso de cascos tácticos son determinados normalmente por las autoridades militares y policiales de acuerdo con sus necesidades específicas y entornos de amenaza. (Matt Reece, 2021)

Cascos tácticos

Los cascos tácticos están diseñados para ofrecer diferentes niveles de protección balística según las necesidades del usuario. Es importante seleccionar un casco que cumpla con los estándares de seguridad y protección requeridos para el entorno específico de uso.

Existen varios tipos de cascos balísticos, cada uno diseñado para satisfacer necesidades y requisitos específicos. He aquí algunos tipos de cascos:

PASGT (Sistema de blindaje personal para tropas terrestres)

El casco PASGT es un casco de combate utilizado por las fuerzas armadas de varios países, incluyendo las de los Estados Unidos. originalmente en la década de 1980 por la empresa estadounidense Gentex Corporation, este casco fue desarrollado como una mejora respecto a los cascos anteriores, ofreciendo una mejor protección balística y una mayor comodidad para el usuario.

Está fabricado con fibras de aramida u otros materiales balísticos similares, lo que lo hace resistente a los impactos de balas y fragmentos de explosiones.

Peso aproximado: 1.4 a 1.9 kg.

Figura 1

Casco PASGT



Nota. Tomado de El casco de combate moderno, por (Matt Reece, 2021), TIRADORES DE PRECISIÓN GC(<https://tiradoresprecision.com/el-casco-de-combate-moderno-y-cuando-usar-uno/>).

MICH (casco modular de comunicaciones integradas):

Es una versión modernizada del casco PASGT. Presenta una protección balística mejorada, un peso reducido y permite la integración de sistemas de comunicación y accesorios, como visores balísticos, linternas y cámaras. Esto proporciona una mayor versatilidad y adaptabilidad a las necesidades específicas de cada usuario.

Los cascos MICH están clasificados como nivel de amenaza IIIA para armas de fuego pequeñas.

Peso aproximado: 1.36 a 1.6 kg.

Figura 2*Casco MICH*

Nota. Tomado de El casco de combate moderno, por (Matt Reece, 2021), TIRADORES DE PRECISIÓN GC(<https://tiradoresprecision.com/el-casco-de-combate-moderno-y-cuando-usar-uno/>).

ACH (Advanced Combat Helmet)

Los cascos ACH (Advanced Combat Helmet) son un tipo específico de casco balístico utilizado principalmente por el Ejército de los Estados Unidos y otras fuerzas armadas aliadas. Están diseñados para proporcionar una mejor protección balística y un mayor confort en comparación con los cascos anteriores. Están hechos de kevlar u otros materiales compuestos balísticos de alta resistencia, lo que los hace ligeros, pero aun así capaces de proporcionar una sólida protección contra impactos de balas y fragmentos.

Peso aproximado: 1.36 a 1.6 kg.

Figura 3**Casco ACH**

Nota. Tomado de Protección Balística, por (Matt Reece, 2021), TIRADORES DE PRECISIÓN GC(<https://tiradoresprecision.com/el-casco-de-combate-moderno-y-cuando-usar-uno/>).

FAST (Future Assault Shell Technology)

El casco FAST está diseñado para ser ligero y aerodinámico, lo que lo hace ideal para operaciones tácticas y de asalto. Está fabricado con materiales compuestos de alta resistencia que proporcionan una protección balística efectiva sin comprometer la movilidad del usuario.

Una de las características clave del casco FAST es su capacidad para integrar una amplia gama de accesorios y sistemas modulares. Estos incluyen rieles laterales que permiten la instalación de visores, linternas, cámaras y sistemas de comunicación, proporcionando a los usuarios la flexibilidad para personalizar su equipo según las necesidades específicas de la misión.

Peso aproximado: 0.6 a 1.2 kg.

Figura 4

Casco FAST



Nota. Tomado de El casco de combate moderno, por (Matt Reece, 2021), TIRADORES DE PRECISIÓN GC(<https://tiradoresprecision.com/el-casco-de-combate-moderno-y-cuando-usar-uno/>).

Es importante señalar que la disponibilidad y los tipos específicos de cascos balísticos pueden variar en función del país, la rama militar o el organismo encargado de hacer cumplir la ley. La elección del casco depende de los requisitos operativos, el nivel de protección necesario y las preferencias de los usuarios finales. (Nick Hohman, 2022)

Norma NIJ, casco balístico estándar

La fabricación de cascos balísticos suele ajustarse a normas específicas para garantizar su calidad, rendimiento y seguridad.

El Instituto Nacional de Justicia (NIJ): Es una agencia de investigación, desarrollo y evaluación del Departamento de Justicia de EE.UU., ha establecido normas para la protección balística. La norma NIJ 0106.01 establece los requisitos mínimos de rendimiento de los cascos balísticos, clasificándolos en diferentes niveles de amenaza en función de su capacidad para resistir la penetración y el impacto contundente.

La norma NIJ 0106.01, titulada "Cascos balísticos", clasifica los cascos balísticos en tres niveles de amenaza en función de su capacidad para resistir la penetración y el impacto contundente. Estos niveles son el Nivel IIA, el Nivel II y el Nivel IIIA, siendo el Nivel IIIA el que ofrece el mayor nivel de protección.

En la Tabla 1 se detalla las especificaciones que exige un nivel de protección de Nivel IIIA según la normal NIJ 01106.01:

Tabla 1

Exigencia de nivel de protección balístico NIJ 0106.01

Calibre	Tipo de bala	Peso del cartucho	Longitud del cañón	Velocidad	Impactos requeridos por muestra
0.44	SWC	15.55 gr	14 a 16 cm	426 ± 15 m/s	5
Magnum		240 gr	5.5 a 6.25 in	1400 ± 50 ft/s	
9 mm	FMJ	8.0 gr	24 a 26 cm	426 ± 15 m/s	5
		124 gr	9.5 a 10.25 in	1400 ± 50 ft/s	

Nota. La tabla detalla las especificaciones de las municiones, velocidad de impacto, etc, que se realiza en los ensayos balísticos. Tomado de *NIJ Standard for Ballistic Helmets* (pg.9), (National Institute of Justice., 1981)

En el Anexo 1, se encuentra a mayor detalle las especificaciones de las municiones para diferentes niveles de protección balística.

Para los dos proyectiles especificados, no deben presentar penetración total en ningún impacto, inclusive si el casco se encontrase mojado o sometido a altas temperaturas (hasta 60°C). Todos los disparos deben efectuarse a una distancia no menor a 5 m.

Materiales compuestos

Como se ha descrito anteriormente, los cascos de combate actuales requieren de materiales capaces de ofrecer un alto nivel de protección, es decir, una alta resistencia ante diferentes amenazas, combinado con un bajo peso, necesario para proporcionar movilidad y confort a su portador. Por este motivo, el uso de los materiales compuestos resulta idóneo para la fabricación de las calotas de casco de combate.

Los materiales compuestos de matriz polimérica y refuerzo de fibras son los más empleados para el diseño de cascos de combate. Este tipo de materiales son ampliamente utilizados en la industria, debido a su bajo coste de fabricación en comparación con otro tipo de materiales compuestos y a sus buenas propiedades mecánicas específicas, es decir, una alta resistencia junto con un bajo peso.

En la actualidad, existen diferentes tipos de fibras de altas prestaciones empleadas en la fabricación de materiales compuestos, entre las que destacan la fibra de carbono, la fibra de vidrio, la aramida o el UHMWPE. Estas fibras se utilizan para mejorar las propiedades del acero en términos de resistencia, peso, durabilidad y otras características, permitiendo así la fabricación de productos más eficientes y avanzados en diversas industrias. La selección del tipo de fibra depende de las especificaciones de rendimiento requeridas para la aplicación específica. En la Tabla 2 se presenta una comparativa de las propiedades mecánicas de estas fibras en contraste con las del acero.

Tabla 2

Propiedades mecánicas de diferentes fibras empleadas como refuerzo, comparadas con el acero

Material	Densidad [<i>kg/m³</i>]	Diámetro [<i>μm</i>]	Módulo elástico [<i>GPa</i>]	Tensión rotura [<i>GPa</i>]	Deformación rotura [%]
Carbono	1800	5-7	240-425	3.4-4.8	1.4-1.8
Vidrio	2550	15-25	70-73	2-3.5	2.7-3.7
Aramida	1440	12	60-100	3	2.5-3.7
Nylon 66	1140	30	5	1	18.2
UHWHIPE	980	16.1	132	3.8	3.5
Acero	7850	-	210	0.215-0.830	10-30

Nota. Tomado de *Análisis experimental y numérico del comportamiento mecánico del material compuesto base aramida empleado en protecciones personales* (pg.38), por (Díaz, 2021)

En la fabricación de cascos tácticos modernos, las fibras predominantes son las de aramida y UHMWPE. Dado que el casco objeto de estudio en esta tesis está fabricado con material compuesto de fibra de aramida, a continuación, se expone una breve reseña sobre este tipo de fibras. (Díaz, 2021)

Material Matriz - Fibra de aramida

Las aramiditas fueron desarrolladas por primera vez en la década de 1960 por la compañía química DuPont e inicialmente se llamaron HT-1. Posteriormente, el nombre se cambió por el nombre comercial Nomex.

Las fibras de aramida pertenecen a una categoría de fibras sintéticas resistentes y termoestables. Se utilizan en aplicaciones aeroespaciales y militares, tejidos para chalecos antibalas y compuestos balísticos, neumáticos de bicicleta y como sustituto del amianto Debido

a sus propiedades resistentes a las llamas, esta meta-aramida se usó como tejido para proteger a los conductores de autos de carrera. (TECNOpeg, 2023)

Las fibras de para-aramida llegaron solo unos años más tarde, bajo el nombre de Kevlar. Aquí una pequeña definición de cada una:

Meta-aramidas: Se desarrollan en una solución química, a menudo denominada hilatura en húmedo. Estas fibras poseen una notable capacidad de resistencia tanto a altas temperaturas como a la degradación química y a la abrasión. Tienen una dureza de unos 5,6 g/den y pueden soportar tensiones durante la exposición al fuego y a altas temperaturas.

Para-aramidas: Poseen una alta resistencia a la tracción y un alto módulo elástico. Para su fabricación, el polímero de p-fenileno tereftalamida (PPTA), es sometido al proceso de hilado denominado *dry-jet wet spinning*, produciendo cadenas cristalinas totalmente alineadas a lo largo del eje de la fibra, aumentando significativamente la resistencia a tracción de la misma. Este tipo de fibras son las más empleadas en la fabricación de protecciones personales.

– Propiedades:

- Alta resistencia a tracción.
- Excelente resistencia al impacto debido a su alta capacidad de absorción de energía.
- Buena resistencia a fatiga.
- Elevada resistencia térmica. Temperatura de descomposición superior a 420 grados centígrados.
- Alta resistencia al corte y a la abrasión.
- Excelente resistencia química.
- Baja inflamabilidad.

Las fibras de aramida de kevlar son conocidas por su versatilidad y resistencia, están disponibles en una variedad de tipos, cada uno con propiedades únicas adaptadas para diferentes aplicaciones industriales. En la Tabla 3 se presenta una comparación de tres tipos comunes de Kevlar.

Tabla 3

Propiedades mecánicas de diferentes fibras de aramida

Material	Clase	Densidad [kg/m ³]	Módulo elástico [GPa]	Tensión rotura [GPa]	Deformación rotura [%]
Kevlar 29	P-aramida	1440	70.5	2.92	3.6
Kevlar 49	P-aramida	1440	112	3.0	2.4
Kevlar 129	P-aramida	1450	99	3.4	3.3

Nota. La tabla hace referencia a las propiedades mecánicas que presentan las distintas fibras de kevlar. Tomado de *Análisis experimental y numérico del comportamiento mecánico del material compuesto base aramida empleado en protecciones personales* (pg.38), por (Díaz, 2021)

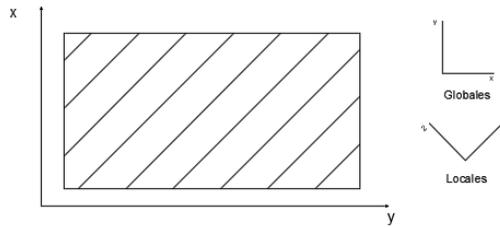
Análisis de una lámina de material compuesto

Se debe partir de una lámina de material compuesto el cual está constituido por una matriz y un material de refuerzo el cual consta de fibras las cuales poseen dirección con respecto a un eje definido.

Estas fibras pueden trabajar en las direcciones globales x-y como se observa en la figura 5, o en direcciones locales 1-2 (Poseen una dirección), en este caso en la dirección de las fibras.

Figura 5

Direcciones locales de una lámina de material compuesto



Según (Vasiliev & Morozov, 2001) para el análisis de las propiedades mecánicas de una lámina de material compuesto se necesitarán ciertas propiedades tanto de la matriz como del refuerzo que son:

Matriz:

E_m : Módulo elástico del material de la matriz

σ_m : Módulo de corte del material de la matriz

ν_m : Módulo de poisson del material de la matriz

Refuerzo: $E_f, \sigma_f, \nu_f, V_f, \theta$

E_f : Módulo elástico del material del refuerzo

σ_f : Módulo de corte del material del refuerzo

ν_f : Módulo de poisson del material del refuerzo

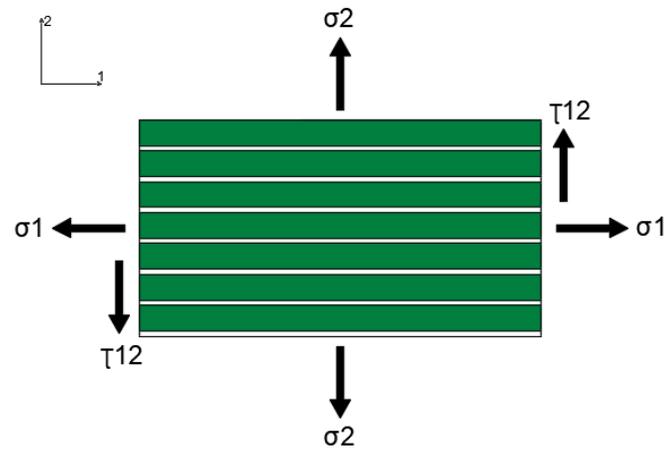
V_f : Cantidad de volumen de las fibras

θ : Dirección de las fibras

Para este análisis, es necesario desarrollar un modelo de esfuerzos, como se muestra en la Figura 6, que representa las posibles cargas a las que el material compuesto podría estar sometido.

Figura 6

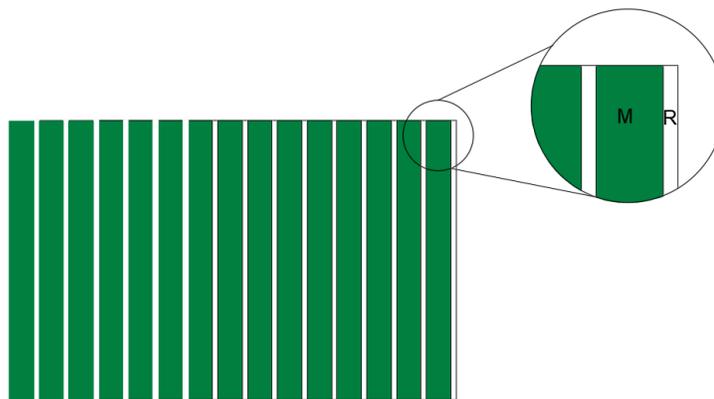
Diagrama de esfuerzos de un material compuesto



Se debe entender que al tener un material compuesto estará constituido por dos o más materiales, en la figura 7, se muestra el corte transversal de un material compuesto conformado por 2 materiales (matriz y refuerzo):

Figura 7

Corte transversal de un material compuesto



Se obtendrá el volumen del refuerzo utilizando la fórmula para el análisis de la densidad:

$$\rho_r = \frac{m_{re}}{V_r} \quad (1)$$

Despejando el volumen del refuerzo nos da como resultado:

$$V_{re} = \frac{m_r}{\rho_r} \quad (2)$$

De igual manera se utilizará el mismo concepto para encontrar el volumen de la matriz:

$$\rho_m = \frac{m_m}{V_m}$$

$$V_m = \frac{m_m}{\rho_m} \quad (3)$$

Al entender el principio de un material compuesto obtenemos la siguiente ecuación para encontrar el volumen total del material compuesto:

$$V_{MC} = V_m + V_{re} \quad (4)$$

Con esto se encontrará la cantidad del volumen de fibras el cual indicará el porcentaje que posee la fibra en el material compuesto.

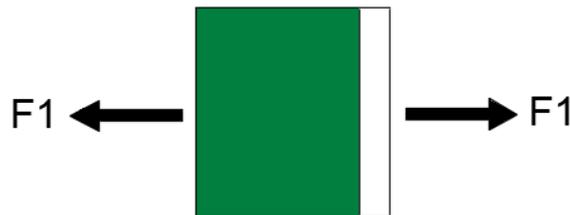
$$V_r = \frac{V_{re}}{V_{MC}} \quad (5)$$

Características mecánicas en las direcciones locales (1-2)

Módulo de tracción en dirección 1. Para encontrar el módulo de tracción en la dirección 1, al material compuesto se le somete a tracción como se ilustra en la figura 8:

Figura 8

Material compuesto sometido a tracción en la dirección 1



La fuerza aplicada ejercerá en todo el material compuesto es decir en la parte de la matriz y del refuerzo.

Realizando sumatoria de fuerzas en la dirección 1 dará como resultado:

$$\sum F_1 = 0 \quad (6)$$

$$F_1 - F_m - F_r = 0$$

$$F_1 = F_m + F_r \quad (7)$$

Se cambiará a la ecuación en función de los esfuerzos

$$\sigma_1 * A_1 = \sigma_m * A_m + \sigma_r * A_r \quad (8)$$

Aplicando la Ley de Hooke la cual describe el comportamiento elástico de un material al ser sometido a una carga, relaciona el módulo de elasticidad y la deformación lineal producida por la fuerza aplicada.

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (9)$$

$$E_1 * A_1 * \varepsilon_1 = E_m * A_m * \varepsilon_m + E_r * A_r * \varepsilon_r \quad (10)$$

La deformación lineal se puede expresar de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l_o} \quad (11)$$

Se debe tomar en cuenta que la longitud inicial será la misma para la matriz y el refuerzo

$$E_1 * A_1 * \frac{\delta_1}{l_o} = E_m * A_m * \frac{\delta_m}{l_o} + E_r * A_r * \frac{\delta_r}{l_o} \quad (12)$$

$$E_1 = E_m * A_m * \delta_m + E_r * A_r * \delta_r$$

$$E_1 = E_m * V_m + E_r * V_r \quad (13)$$

Donde:

$$V_m = 1 - V_r$$

$$E_1 = E_m * (1 - V_r) + E_r * V_r \quad (14)$$

Módulo de tracción en dirección 2. Para determinar el módulo de tracción en la dirección 2 del material compuesto, este se somete a tracción en las fibras transversales, tal como se muestra en la figura 9:

Figura 9

Material compuesto sometido a tracción en la dirección 2



Debido que en la dirección transversal el material se comporta de igual forma al tener la característica de material isotrópico se puede decir:

$$\sigma_2 = \sigma_m = \sigma_r \quad (15)$$

Dando como resultado:

$$E_2 = \frac{E_m * (1 + 2 * \beta * V_r)}{1 - \beta * V_r} \quad (16)$$

Donde:

$$\beta = \frac{\frac{E_r}{E_m} - 1}{\frac{E_r}{E_m} + 2}$$

Módulo de cortadura en dirección 1-2

$$G_{12} = G_m * \frac{(G_r + G_m) + V_r * (G_r - G_m)}{(G_r + G_m) - V_r * (G_r - G_m)} \quad (17)$$

Módulo de Poisson en dirección 1-2

$$v_{12} = v_r * V_r + v_m(1 - V_r) \quad (18)$$

Módulo de Poisson en dirección 2-1

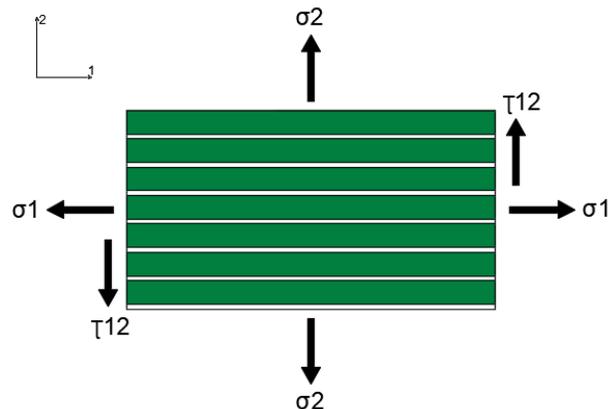
$$v_{21} = v_{12} * \left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad (19)$$

Relaciones $\sigma - \varepsilon$ en las direcciones locales 1-2

Relaciones $\sigma - \varepsilon$ paramétricas. Para esto se debe expresar de forma paramétrica la deformación global en la dirección longitudinal, en la figura 10 se observa como el esfuerzo en la dirección 1 tensiona las fibras longitudinales mientras que el esfuerzo en la dirección 2 contrae las fibras longitudinales.

Figura 10

Diagrama de esfuerzos en las direcciones locales 1-2



Teniendo en cuenta esto, se puede obtener la deformación longitudinal:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - v_{21} * \frac{\sigma_2}{E_2} \quad (20)$$

Por lo tanto, para encontrar la deformación transversal en la dirección 2 se debe tomar en cuenta el mismo principio el esfuerzo 1 contrae las fibras transversales mientras que el esfuerzo 2 tracciona las fibras transversales dando como resultado la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} - \nu_{12} * \frac{\sigma_1}{E_1} \quad (21)$$

La deformación por cortadura se expresa de la siguiente forma debido al único esfuerzo cortante presente en las fibras del material

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}}$$

Relaciones $\sigma - \varepsilon$ matricial. Para optimizar los cálculos de las propiedades mecánicas del material compuesto es recomendable hacer un arreglo matricial que da como resultado el siguiente:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

Relaciones $\sigma - \varepsilon$ en las direcciones locales 1-2

Deformaciones en el material compuesto en las direcciones 1-2

$$[\varepsilon_{12}] = [S] * [\sigma_{12}] \quad (22)$$

Donde:

Matriz de flexibilidad

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

$$[\varepsilon_{12}] = [S] * [\sigma_{12}] \quad (23)$$

Esfuerzos en el material compuesto en las direcciones 1-2

$$[\sigma_{12}] = [Q] * [\varepsilon_{12}] \quad (24)$$

Donde:

$$[Q] = [S]^{-1} \quad (25)$$

Relaciones $\sigma - \varepsilon$ en las direcciones globales x-y

Ya que se posee las características mecánicas en las direcciones locales 1-2 se puede obtener las características mecánicas del material compuesto en las direcciones globales mecánicas en las direcciones globales x-y

Se convierte los esfuerzos y deformaciones en las direcciones 1-2 a las direcciones x-y para lo cual se utiliza funciones trigonométricas.

Para la matriz de esfuerzo se obtiene una matriz de transformación de esfuerzo mientras que para las deformaciones se obtiene una matriz de transformación de deformaciones las cuales permitirán cambiar a direcciones globales las propiedades mecánicas. (Chang, y otros, 2021)

$$[\sigma_{12}] = [T_\sigma] * [\sigma_{xy}] \quad (26)$$

$$[\varepsilon_{12}] = [T_\varepsilon] * [\varepsilon_{xy}] \quad (27)$$

Para lo cual:

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} \cos^2(\theta) & \sin^2(\theta) & 2 \sin(\theta)\cos(\theta) \\ \sin^2(\theta) & \cos^2(\theta) & -2 \sin(\theta)\cos(\theta) \\ -\sin(\theta)\cos(\theta) & \sin(\theta)\cos(\theta) & \cos^2(\theta) - \sin^2(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[T_\varepsilon] = \begin{bmatrix} \cos^2(\theta) & \sin^2(\theta) & \sin(\theta)\cos(\theta) \\ \sin^2(\theta) & \cos^2(\theta) & -\sin(\theta)\cos(\theta) \\ -2 \sin(\theta)\cos(\theta) & 2 \sin(\theta)\cos(\theta) & \cos^2(\theta) - \sin^2(\theta) \end{bmatrix}$$

Estas matrices dependen de la dirección o ángulo que forman las fibras con el eje x.

Deformaciones del material en las direcciones globales x-y

Despejando de forma matricial las deformaciones en las direcciones globales se obtiene:

$$[\varepsilon_{xy}] = [T_\varepsilon]^{-1} * [\varepsilon_{12}]$$

$$[\varepsilon_{12}] = [S] * [\sigma_{12}]$$

$$[\varepsilon_{xy}] = [T_\varepsilon]^{-1} * [S] * [\sigma_{12}] \quad (28)$$

La matriz de esfuerzo en las direcciones locales en función de la matriz de transformación de esfuerzos es la siguiente:

$$[\sigma_{12}] = [T_\sigma] * [\sigma_{xy}] \quad (29)$$

Reemplazando en la última fórmula en la matriz de deformaciones globales x-y obtenemos:

$$[\varepsilon_{xy}] = [T_\varepsilon]^{-1} * [S] * [T_\sigma] * [\sigma_{xy}]$$

$$[\varepsilon_{xy}] = [\overline{S}] * [\sigma_{xy}] \quad (30)$$

Matriz de flexibilidad global

$$[\overline{S}] = [T_\varepsilon]^{-1} * [S] * [T_\sigma] \quad (31)$$

$$[\sigma_{xy}] = [\overline{Q}] * [\varepsilon_{xy}]$$

$$[\overline{Q}] = [S]^{-1} = [T_\varepsilon] * [Q] * [T_\sigma]^{-1} \quad (32)$$

Relaciones $\sigma - \varepsilon$ en direcciones locales (1-2)

$$[\varepsilon_{12}] = [S] * [\sigma_{12}]$$

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

Relaciones $\sigma - \varepsilon$ en direcciones globales(x-y)

$$[\overline{S}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix}$$

$$[\overline{S}] = [T_\varepsilon]^{-1} * [S] * [T_\sigma]$$

Características mecánicas en las direcciones globales (x-y)

$$\overline{[S]} = \begin{bmatrix} \overline{S}_{11} & \overline{S}_{12} & 0 \\ \overline{S}_{21} & \overline{S}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \overline{S}_{33} \end{bmatrix}$$

Módulo de Tracción en la dirección x

$$E_x = \frac{1}{\overline{S}_{11}} \quad (33)$$

Módulo de Tracción en la dirección y

$$E_y = \frac{1}{\overline{S}_{22}} \quad (34)$$

Módulo de Cizalla o Cortadura en la dirección x-y

$$G_{xy} = \frac{1}{\overline{S}_{33}} \quad (35)$$

Módulo de Poisson en la dirección x-y

$$v_{xy} = -E_x * \overline{S}_{21} \quad (36)$$

Módulo de Poisson en la dirección y-x

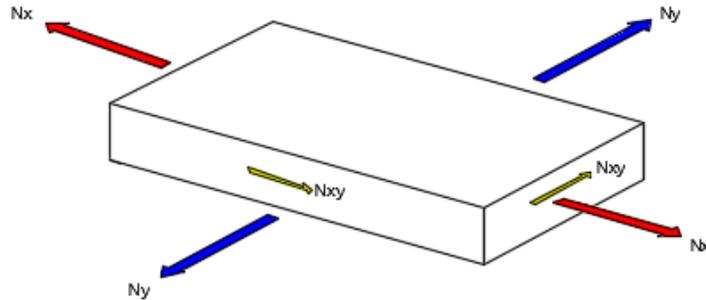
$$v_{yx} = -E_y * \overline{S}_{12} \quad (37)$$

Análisis de un laminado de material compuesto

Una vez realizado el análisis de una lámina de material compuesto se procederá a realizar un análisis de laminado formado por estructuras laminadas. En la figura 11 se representa el estado del laminado sometido a esfuerzos.

Figura 11

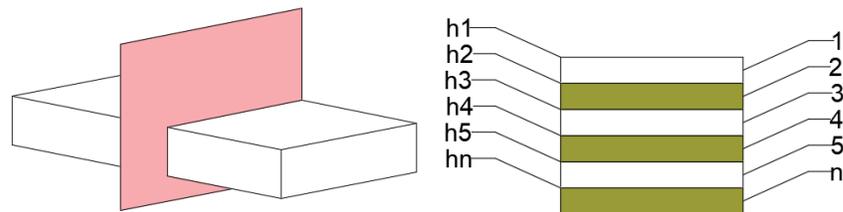
Material compuesto sometido a esfuerzos



El análisis del laminado parte de la figura 12, de igual manera que para el análisis de una lámina se necesita saber las propiedades de cada material que conforma el material compuesto y se debe tener en cuenta el número total de láminas y la dirección en la que va colocada cada lámina con respecto a un eje de coordenadas. (Staab, 2015)

Figura 12

Análisis de laminado de un material compuesto



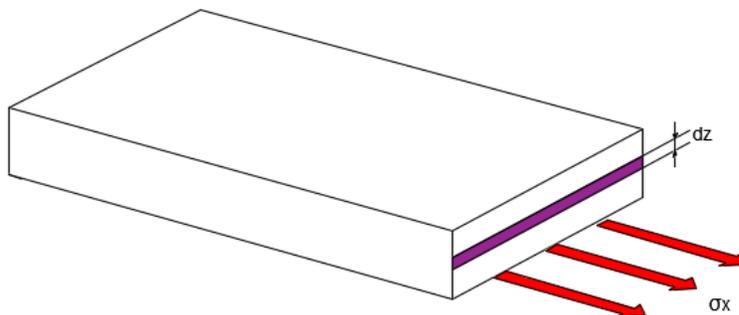
El espesor de cada lamina es:

$$e = h_i - h_{i-1} \quad (38)$$

Con este análisis se intenta obtener un resultado aproximado de las propiedades mecánicas del laminado de material compuesta, partiendo del análisis en un estado global, como se ilustra en la figura 13, donde sus ejes principales van a ser x, y, z.

Figura 13

Análisis del esfuerzo perpendicular en el eje x de un material compuesto



Se considera un elemento diferencial en el eje Z (alturas) y un esfuerzo perpendicular en el eje X, dando como resultado una fuerza expresada de la siguiente forma:

$$N_x = \int \sigma_x dz \quad (38)$$

En forma matricial su representación sería:

$$[N] = \int [\sigma] dz \quad (39)$$

Debido a que los momentos de este elemento se representaría en función de una distancia z , la expresión de momento sería:

$$[M] = \int [\sigma] * z dz \quad (40)$$

Siguiendo con el análisis de un material compuesto se puede decir que las deformaciones a una determinada altura constaran de 2 componentes una componente planar la cual sería la deformación que sufre el laminado al ser sometido a fuerzas de tracción o compresión y una componente de curvatura que producen las láminas al perder el equilibrio en acción de una fuerza, esta deformación se representa por la fórmula obtenida de (Vasiliev & Morozov, 2001):

$$\varepsilon(z) = \varepsilon + z * c \quad (41)$$

Citando la ecuación 31 del análisis de una lámina de material compuesto, que habla de la ley de Hooke se obtiene la siguiente ecuación:

$$\sigma(z) = \overline{[Q]} * [\varepsilon] + \overline{[Q]} * z * [c] \quad (42)$$

Debido a que se está realizando el análisis de un laminado, se debe proceder a encontrar las fuerzas totales que actúan sobre este.

$$\begin{aligned} [N]_T &= \sum_{i=1}^{ln} [N]_i = \sum_{i=1}^{ln} \int_{h_{i-1}}^{h_i} [\sigma]_i * dz \\ [N]_T &= \sum_{i=1}^{ln} \left\{ \overline{[Q]} * [\varepsilon] * \int_{h_{i-1}}^{h_i} dz + [Q] * [c] * \int_{h_{i-1}}^{h_i} z dz \right\}_i \\ [N]_T &= \sum_{i=1}^{ln} \left\{ \overline{[Q]} * [\varepsilon] * (h_i - h_{i-1}) + \overline{[Q]} * [c] * \frac{1}{2} * (h_i^2 - h_{i-1}^2) \right\}_i \\ [N]_T &= [A] * [\varepsilon] + [B] * [c] \end{aligned}$$

Una vez encontrado la fuerza total se debe obtener de la misma manera utilizando la ecuación 41 los momentos totales aplicados al material compuesto.

$$\begin{aligned} [M]_T &= \sum_{i=1}^{ln} [M]_i = \sum_{i=1}^{ln} \int_{h_{i-1}}^{h_i} [\sigma]_i * z * dz \\ [M]_T &= \sum_{i=1}^{ln} \left\{ \overline{[Q]} * [\varepsilon] * \int_{h_{i-1}}^{h_i} z dz + [Q] * [c] * \int_{h_{i-1}}^{h_i} z^2 dz \right\}_i \\ [M]_T &= \sum_{i=1}^{ln} \left\{ \overline{[Q]} * [\varepsilon] * \frac{1}{2} * (h_i^2 - h_{i-1}^2) + \overline{[Q]} * [c] * \frac{1}{3} * (h_i^3 - h_{i-1}^3) \right\}_i \\ [M]_T &= [B] * [\varepsilon] + [D] * [c] \end{aligned}$$

Expresado en forma paramétrica da:

$$[N]_T = [A] * [\varepsilon] + [B] * [c]$$

$$[M]_T = [B] * [\varepsilon] + [D] * [c]$$

Forma matricial:

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \varepsilon \\ c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ \beta & d \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix}$$

Si tomamos a $[M] = 0$

$$[\varepsilon] = a * [N]$$

Donde:

$$[N] = h_T * [\sigma]$$

Reemplazando el valor de las fuerzas totales en la ecuación de la deformación da:

$$[\varepsilon] = a * h_T * [\sigma]$$

Realizado una relación del análisis de una sola lamina, se usa la matriz de esfuerzo en función de la deformación y la matriz de similitud dando como resultado:

$$h_T * [a] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_x} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix}$$

Estimación de características mecánicas del laminado

$$[a] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix}$$

Módulo de Tracción en la dirección X

$$E_x = \frac{1}{a_{11} * h_T} \quad (43)$$

Módulo de Tracción en la dirección Y

$$E_y = \frac{1}{a_{22} * h_T} \quad (44)$$

Módulo de Cizalla o Cortadura en la dirección x-y

$$G_{xy} = \frac{1}{a_{33} * h_T} \quad (45)$$

Módulo de Poisson en la dirección x-y

$$v_{xy} = -E_x * a_{21} * h_T \quad (46)$$

Módulo de Poisson en la dirección y-x

$$v_{yx} = -E_y * a_{12} * h_T \quad (47)$$

Moldeo por compresión

El moldeo por compresión es un proceso de fabricación utilizado para crear piezas de plástico, caucho o materiales compuestos mediante la aplicación de calor y presión sobre un material en estado viscoso o semilíquido dentro de un molde. Durante este proceso, el material se coloca en el molde y se aplica presión para que tome la forma deseada. Esta técnica es

ampliamente utilizada en diversas industrias, como la automotriz, la aeroespacial y la de artículos deportivos, debido a su capacidad para producir piezas de gran tamaño con detalles complejos y alta resistencia mecánica. El moldeo por compresión es especialmente eficaz para la fabricación de productos que requieren una combinación de resistencia, durabilidad y bajo costo de producción. (Jaime Beltrán, 2017)

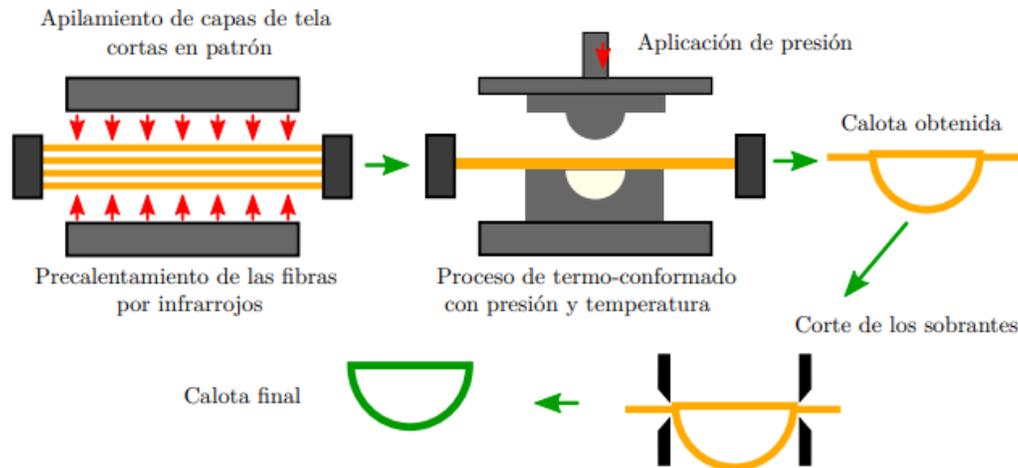
Existen varios métodos de fabricación de cascos tácticos que dependen explícitamente de los materiales empleados, sin embargo, el más ampliamente utilizado dado su versatilidad para cualquier material es el apilamiento de múltiples capas de prepegs y posterior prensado en caliente en un molde con la forma final del casco. Los prepegs son láminas de material compuesto ya preparadas, donde las fibras presentan una orientación y configuración determinada y están embebidas en resina. (Rubio, 2015)

Mediante el uso de prepegs se tiene un mayor control sobre el volumen de resina del compuesto. El número de capas utilizadas, el espesor de la capa externa del casco, depende del nivel de protección requerido y del material empleado. En primer lugar, se cortan los prepegs según el patrón empleado y se superponen sujetas por los extremos para evitar deslizamientos y arrugas. A continuación, se precalientan ya que los prepegs se almacenan en frío para conservar las propiedades de la resina y evitar que esta se cure a temperatura ambiente.

Por último, se lo coloca en una prensa, en donde el molde posee la forma final del casco. Una vez curado el material, se recortan los contornos para dar forma a los bordes del casco. El proceso de curado se realiza a una temperatura estimada de entre 120-140°C, a una presión entre 4-8 MPa. En la figura 14 se ilustra el procedimiento y cabe mencionar que estos parámetros del curado son variables y dependen de los materiales empleados. (Díaz, 2021)

Figura 14

Esquema del proceso de fabricación de un casco táctico

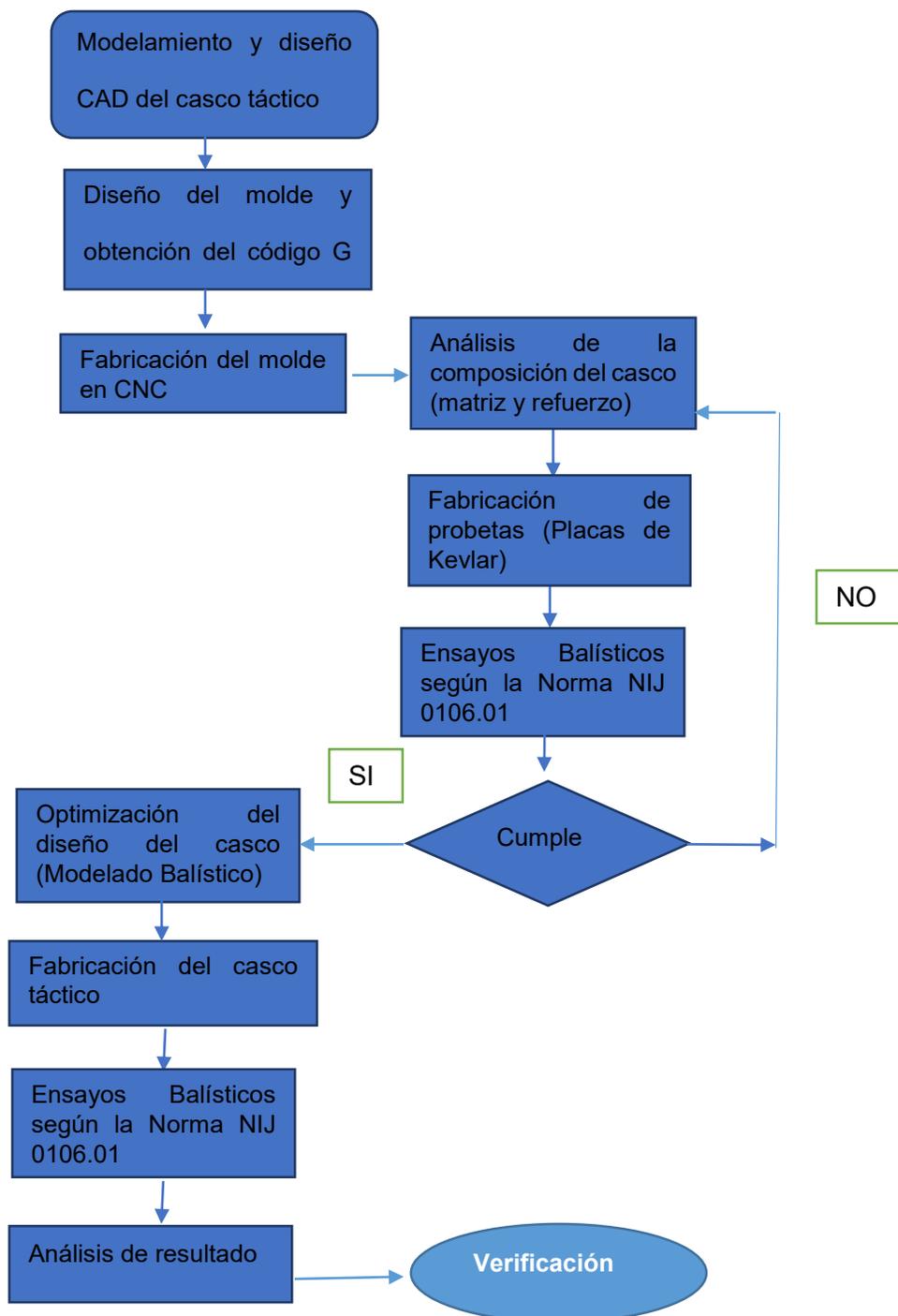


Nota. Tomado de Análisis experimental y numérico del comportamiento mecánico del material compuesto base aramida empleado en protecciones personales (pg.42), por (Díaz, 2021)

Debido a la compleja geometría curva que presenta el casco, es necesario cortar los prepegs y superponerlos para adaptar el material a la forma. Uno de los principales factores a tener en cuenta en la fabricación de cascos tácticos es como conseguir un espesor constante del casco y una cobertura completa del mismo.

Capítulo III: Metodología

El presente proyecto que trata sobre la investigación de normas, procesos de manufactura y análisis de materiales compuestos se basa en una metodología experimental, que permite obtener resultados a través de la experimentación de fenómenos o acciones.



Modelamiento y diseño CAD

La ingeniería inversa ha sido un componente esencial en el proceso de modelado en tres dimensiones del casco táctico, y el molde que servirá como matriz para la fabricación del casco. La Tabla 4 detalla el proceso minucioso que ha implicado la implementación de varios pasos. Cada uno de estos pasos ha sido cuidadosamente diseñado para capturar con precisión las dimensiones y la geometría del casco original.

Tabla 4

Proceso del diseño en 3D del Molde

Diseño del soporte para el casco

Se utilizó un software de diseño asistido por ordenador (CAD) para crear un modelo 3D del soporte, teniendo en cuenta las dimensiones y la forma del casco táctico. Se consideraron elementos como la estabilidad y centro de gravedad.

Construcción y verificación del soporte

En la construcción del soporte se aplicó técnicas de fabricación sustractiva, se preparó el casco táctico original, es decir una limpieza minuciosa del casco para eliminar cualquier suciedad, grasa o residuo que pudiera afectar al escaneado.

Colocar puntos magnéticos de referencia en la superficie del casco

El objetivo principal de estos puntos magnéticos es mejorar la precisión y la alineación durante el proceso de escaneado, lo que a su vez mejora la calidad y la exactitud de los datos obtenidos.

Escaneo de casco táctico

El escaneado 3D se realiza utilizando un dispositivo especializado (escáner GoScan 20) que captura la forma y la geometría del casco mediante láser, generando datos digitales tridimensionales que representan la superficie de este.

Ploteo de puntos a un software CAD

Los datos capturados se exportan al software Autodesk Inventor, donde se utiliza un mallado fino de 1 mm para obtener la forma precisa del casco. Luego, utilizando planos, se extraen los perfiles necesarios para el diseño del nuevo casco.

Diseño del casco táctico en Autodesk Inventor

Utilizando los perfiles obtenidos y aprovechando la herramienta "Freeform" del software, para mejorar un modelo paramétrico y crear el diseño del casco, generando una superficie esférica que se ajusta conforme al perfil deseado. Posteriormente, con el perfil modelado en un sketch en 3D se proyecta en la superficie de la esfera ya con la forma del casco, permitiendo dividir, suprimir y obtener la forma definitiva del casco.

Resultados del diseño del casco Táctico

El diseño del casco ha sido meticulosamente realizado manejando herramientas avanzadas de modelado tridimensional, lo que ha permitido lograr una forma precisa y un ajuste óptimo para adaptarse a la cabeza del usuario.

CAD del molde

El molde del casco se diseñó utilizando el software Fusión 360, aprovechando el modelo 3D previamente creado en Autodesk Inventor, generando a su vez el código G para mecanizado en CNC, permitiendo verificar la geometría del molde, identificar posibles problemas de fabricación y optimizar los parámetros de mecanizado para garantizar una producción eficiente.

Nota. Esta tabla presenta el proceso empleado para generar el diseño CAD del casco y la matriz que servirá como molde para la fabricación del casco, aplicando ingeniería inversa.

Fabricación del molde

La fabricación del molde del casco táctico constituye un aspecto crítico en esta investigación, la precisión geométrica y la calidad superficial del molde son factores esenciales que influyen directamente en la precisión y validez de los resultados obtenidos durante las pruebas y ensayos. Un molde bien diseñado y fabricado adecuadamente permite una producción más eficiente y rentable de cascos tácticos, reduciendo los costos asociados con retrabajos y desperdicios de material. En la Tabla 5 se detallan las diversas etapas del proceso, desde la selección de materiales hasta los procedimientos de moldeo y ensamblaje. Es esencial asegurar que cada una de estas etapas se lleve a cabo con precisión y cuidado, cumpliendo así con los estándares de seguridad y rendimiento exigidos.

Tabla 5

Proceso de fabricación del molde del casco táctico

Construcción del tocho de madera

La elección de la madera de quebracho colorado se basó en una cuidadosa consideración de su relación costo-calidad, así como en sus propiedades mecánicas:

Densidad: 1.10 – 1.30 g/cm^3

Resistencia a compresión: 90 - 130MPa

Resistencia a la Flexión: 140 - 180 MPa

Dureza Janka: 4,500 a 5,000 lbf.

Maquinado en CNC

El tocho se posiciona sobre la bancada de la máquina CNC, asegurándose de que esté alineado con un punto de referencia (0,0,0) en la esquina superior derecha del tocho, previamente establecido. Posteriormente, se transfiere el código G, generado durante la simulación, a la unidad de control de la CNC.

Este proceso se repite para ambos tochos, con el objetivo de fabricar las cavidades requeridas en los moldes.

Preparación del molde

Lijado y aplicación de Gelcoat

Se utiliza una serie de lijas de diferentes granos (desde 100 hasta 1200) tanto en seco como en húmedo para preparar la superficie del molde para aplicar una capa de gelcoat blanco sobre el molde lijado. El gelcoat es una resina

pigmentada que se aplica en estado líquido y luego se deja curar a temperatura ambiente, formando una capa sólida y resistente.

Encerado y aplicación de PVA

Una vez que el gelcoat esté curado se aplica una capa de cera desmoldante sobre la superficie del molde, facilitando la liberación del casco táctico una vez que esté curado.

Luego se aplica por medio de una pistola de aspersión un agente desmoldante Alcohol Polivinílico (PVA) que es un complemento perfecto para la cera desmoldante, ya que crea una película fina, flexible y antiadherente entre el molde y el casco.

Nota. Esta tabla detalla el proceso de fabricación del casco táctico y la preparación de este para el laminado de fibras de kevlar.

Composición del material compuesto para fabricación del casco táctico

Matriz

La matriz del material compuesto será el cemento de contacto africano, constituido principalmente de cloropreno (neopreno) cuyas propiedades se citarán a continuación:

- Módulo de tracción: 21 [MPa]
- Módulo de Corte (Modulo de elasticidad transversal): 9.5 [MPa]
- Módulo de Poisson: 0.4985

Refuerzo

El refuerzo del material compuesto será el tejido de aramida Style 1350 en formato Panama "Kevlar 49" cuyas propiedades se citarán a continuación:

- Módulo de tracción: 119 [GPa]

- Módulo de Corte (Modulo de elasticidad transversal): 3 [GPa]
- Módulo de Poisson: 0.36

Análisis de las propiedades mecánicas del material compuesto para fabricación de casco táctico militar

Volumen de las fibras utilizadas:

$$\rho_k = \frac{m_k}{V_k}$$

$$V_k = \frac{m_k}{\rho_k}$$

$$V_k = \frac{0.0734 [kg]}{1440 \left[\frac{kg}{m^3} \right]}$$

$$V_k = 5.09 \times 10^{-5} [m^3]$$

Volumen de la matriz utilizada:

$$\rho_m = \frac{m_m}{V_m}$$

$$V_m = \frac{m_m}{\rho_m}$$

$$V_m = \frac{0.053 [kg]}{790 \left[\frac{kg}{m^3} \right]}$$

$$V_m = 6.69 \times 10^{-5} [m^3]$$

Volumen total de probeta:

$$V_p = V_m + V_k$$

$$V_p = 6.69 \times 10^{-5} [m^3] + 5.09 \times 10^{-5} [m^3]$$

$$V_p = 1.17 \times 10^{-4} [m^3]$$

Fracción del Volumen de fibras

$$V_f = \frac{V_k}{V_p}$$

$$V_f = \frac{5.09 \times 10^{-5} [m^3]}{1.17 \times 10^{-4} [m^3]}$$

$$V_f = 0.432$$

Angulo de las Fibras

Probeta 1

$$\theta = 0^\circ$$

Probeta 2

$$\theta = 45^\circ$$

Características mecánicas en las direcciones locales (1-2)

Módulo de tracción en dirección 1

$$E_1 = E_f * V_f + E_m(1 - V_f)$$

$$E_1 = 119 [GPa] * 0.432 + 0.021 [GPa] * (1 - 0.432)$$

$$E_1 = 51.46 [GPa]$$

Módulo de tracción en dirección 2

$$E_2 = \frac{E_m * (1 + 2 * \beta * V_f)}{1 - \beta * V_f}$$

Donde:

$$\beta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + 2}$$

$$\beta = \frac{\frac{119 \text{ [GPa]}}{0.021 \text{ [GPa]}} - 1}{\frac{119 \text{ [GPa]}}{0.021 \text{ [GPa]}} + 2}$$

$$\beta = 0.999$$

$$E_2 = \frac{0.021 \text{ [GPa]} * (1 + 2 * 0.999 * 0.432)}{1 - 0.999 * 0.432}$$

$$E_2 = 0.07 \text{ [GPa]}$$

Módulo de cortadura en dirección 1-2

$$G_{12} = G_m * \frac{(G_f + G_m) + V_f * (G_f - G_m)}{(G_f + G_m) - V_f * (G_f - G_m)}$$

$$G_{12} = 0.0095 \text{ [GPa]} * \frac{(3 \text{ [GPa]} + 0.0095 \text{ [GPa]}) + 0.432 * (3 \text{ [GPa]} - 0.0095 \text{ [GPa]})}{(3 \text{ [GPa]} + 0.0095 \text{ [GPa]}) - 0.432 * (3 \text{ [GPa]} - 0.0095 \text{ [GPa]})}$$

$$G_{12} = 0.02 \text{ [GPa]}$$

Módulo de Poisson en dirección 1-2

$$v_{12} = v_f * V_f + v_m(1 - V_f)$$

$$v_{12} = 0.36 * 0.432 + 0.4985(1 - 0.432)$$

$$v_{12} = 0.44$$

Módulo de Poisson en dirección 2-1

$$v_{21} = v_{12} * \left(\frac{E_2}{E_1}\right)$$

$$v_{21} = 0.44 * \left(\frac{0.07 [GPa]}{51.46 [GPa]} \right)$$

$$v_{21} \approx 5.98 \times 10^{-4}$$

Relaciones $\sigma - \varepsilon$ en las direcciones locales 1-2

Deformaciones en el material compuesto en las direcciones 1-2

$$[\varepsilon_{12}] = [S] * [\sigma_{12}]$$

Donde:

Matriz de flexibilidad

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{v_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{v_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

$$[S] = \begin{bmatrix} 0.019 & -0.009 & 0 \\ -0.009 & 14.5 & 0 \\ 0 & 0 & 42.002 \end{bmatrix}$$

$$[\varepsilon_{12}] = [S] * [\sigma_{12}]$$

$$[\varepsilon_{12}] = \begin{bmatrix} 0.019 & -0.009 & 0 \\ -0.009 & 14.5 & 0 \\ 0 & 0 & 42.002 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0.02 [GPa] \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[\varepsilon_{12}] = \begin{bmatrix} -0.0002 \\ 0.35 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Esfuerzos en el material compuesto en las direcciones 1-2

$$[\sigma_{12}] = [Q] * [\varepsilon_{12}]$$

Donde:

$$[Q] = [S]^{-1}$$

Matriz de Rigidez

$$[\sigma_{12}] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.02 \text{ [GPa]} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Lámina a $0^\circ - 90^\circ$

$$\theta = 0^\circ$$

Relaciones $\sigma - \varepsilon$ en las direcciones globales x-y

$$[\sigma_{12}] = [T_\sigma] * [\sigma_{xy}]$$

Donde:

Matriz de transformación de esfuerzos

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} \cos^2(\theta) & \sin^2(\theta) & 2 \sin(\theta)\cos(\theta) \\ \sin^2(\theta) & \cos^2(\theta) & -2 \sin(\theta)\cos(\theta) \\ -\sin(\theta)\cos(\theta) & \sin(\theta)\cos(\theta) & \cos^2(\theta) - \sin^2(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[\varepsilon_{12}] = [T_\varepsilon] * [\varepsilon_{xy}]$$

Donde:

Matriz de transformación de deformaciones

$$[T_\varepsilon] = \begin{bmatrix} \cos^2(\theta) & \sin^2(\theta) & \sin(\theta)\cos(\theta) \\ \sin^2(\theta) & \cos^2(\theta) & -\sin(\theta)\cos(\theta) \\ -2\sin(\theta)\cos(\theta) & 2\sin(\theta)\cos(\theta) & \cos^2(\theta) - \sin^2(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[T_\varepsilon] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Debido a la dirección de las fibras en la probeta 1 es 0° y 90° la matriz se convierte en identidad por lo tanto se puede asegurar que los esfuerzos y deformaciones en dirección 1-2 serán igual a los esfuerzos y deformaciones en la dirección x-y. (Hymas, Lacey, Rohrbach, Gillard, & Berkey, 2019)

Deformaciones del material en las direcciones globales x-y

$$[\varepsilon_{xy}] = [T_\varepsilon]^{-1} * [\varepsilon_{12}]$$

$$[\varepsilon_{12}] = [S] * [\sigma_{12}]$$

$$[\varepsilon_{xy}] = [T_\varepsilon]^{-1} * [S] * [\sigma_{12}]$$

$$[\sigma_{12}] = [T_\sigma] * [\sigma_{xy}]$$

Expresión de la deformación en las direcciones globales

$$[\varepsilon_{xy}] = [T_\varepsilon]^{-1} * [S] * [T_\sigma] * [\sigma_{xy}]$$

$$[\varepsilon_{xy}] = \overline{[S]} * [\sigma_{xy}]$$

Matriz de flexibilidad global

$$\overline{[S]} = [T_\varepsilon]^{-1} * [S] * [T_\sigma]$$

$$[\sigma_{xy}] = \overline{[Q]} * [\varepsilon_{xy}]$$

$$\overline{[Q]} = [S]^{-1} = [T_\varepsilon] * [Q] * [T_\sigma]^{-1}$$

Relaciones $\sigma - \varepsilon$ (1-2)

$$[\varepsilon_{12}] = [S] * [\sigma_{12}]$$

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

Relaciones $\sigma - \varepsilon$ (x-y)

$$[\overline{S}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix}$$

$$[\overline{S}] = [T_\varepsilon]^{-1} * [S] * [T_\sigma]$$

$$[\overline{S}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.019 & -0.009 & 0 \\ -0.009 & 14.5 & 0 \\ 0 & 0 & 42.002 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[\overline{S}] = \begin{bmatrix} 0.019 & -0.009 & 0 \\ -0.009 & 14.5 & 0 \\ 0 & 0 & 42.002 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[\overline{S}] = \begin{bmatrix} 0.019 & -0.009 & 0 \\ -0.009 & 14.5 & 0 \\ 0 & 0 & 42.002 \end{bmatrix}$$

Características mecánicas en las direcciones globales (x-y)

$$\overline{[S]} = \begin{bmatrix} \overline{S}_{11} & \overline{S}_{12} & 0 \\ \overline{S}_{21} & \overline{S}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \overline{S}_{33} \end{bmatrix}$$

Módulo de Tracción en la dirección x

$$E_x = \frac{1}{\overline{S}_{11}}$$

$$E_x = 51.46 [GPa]$$

Módulo de Tracción en la dirección y

$$E_y = \frac{1}{\overline{S}_{22}}$$

$$E_y = 0.07 [GPa]$$

Módulo de Cizalla o Cortadura en la dirección x-y

$$G_{xy} = \frac{1}{\overline{S}_{33}}$$

$$G_{xy} = 0.02 [GPa]$$

Módulo de Poisson en la dirección x-y

$$v_{xy} = -E_x * \overline{S}_{21}$$

$$v_{xy} = 0.44$$

Módulo de Poisson en la dirección y-x

$$v_{yx} = -E_y * \overline{S}_{12}$$

$$v_{yx} = (-41.58) * \left(-\frac{1}{198}\right)$$

$$v_{yx} = 0.001$$

Lámina a 45°

$$\theta = 45^\circ$$

Relaciones $\sigma - \varepsilon$ en las direcciones globales x-y

$$[\sigma_{12}] = [T_\sigma] * [\sigma_{xy}]$$

Donde:

Matriz de transformación de esfuerzos

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} \cos^2(\theta) & \sin^2(\theta) & 2 \sin(\theta)\cos(\theta) \\ \sin^2(\theta) & \cos^2(\theta) & -2 \sin(\theta)\cos(\theta) \\ -\sin(\theta)\cos(\theta) & \sin(\theta)\cos(\theta) & \cos^2(\theta) - \sin^2(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$[\varepsilon_{12}] = [T_\varepsilon] * [\varepsilon_{xy}]$$

Donde:

Matriz de transformación de deformaciones

$$[T_\varepsilon] = \begin{bmatrix} \cos^2(\theta) & \sin^2(\theta) & \sin(\theta)\cos(\theta) \\ \sin^2(\theta) & \cos^2(\theta) & -\sin(\theta)\cos(\theta) \\ -2 \sin(\theta)\cos(\theta) & 2 \sin(\theta)\cos(\theta) & \cos^2(\theta) - \sin^2(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[T_\varepsilon] = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Deformaciones del material en las direcciones globales x-y

$$[\varepsilon_{xy}] = [T_\varepsilon]^{-1} * [\varepsilon_{12}]$$

$$[\varepsilon_{12}] = [S] * [\sigma_{12}]$$

$$[\varepsilon_{xy}] = [T_\varepsilon]^{-1} * [S] * [\sigma_{12}]$$

$$[\sigma_{12}] = [T_\sigma] * [\sigma_{xy}]$$

Expresión de la deformación en las direcciones globales

$$[\varepsilon_{xy}] = [T_\varepsilon]^{-1} * [S] * [T_\sigma] * [\sigma_{xy}]$$

$$[\varepsilon_{xy}] = [\overline{S}] * [\sigma_{xy}]$$

Matriz de flexibilidad global

$$[\overline{S}] = [T_\varepsilon]^{-1} * [S] * [T_\sigma]$$

$$[\sigma_{xy}] = [\overline{Q}] * [\varepsilon_{xy}]$$

$$[\overline{Q}] = [S]^{-1} = [T_\varepsilon] * [Q] * [T_\sigma]^{-1}$$

Relaciones $\sigma - \varepsilon$ (1-2)

$$[\varepsilon_{12}] = [S] * [\sigma_{12}]$$

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

Relaciones $\sigma - \varepsilon$ (x-y)

$$\overline{[S]} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix}$$

$$\overline{[S]} = [T_\varepsilon]^{-1} * [S] * [T_\sigma]$$

$$\overline{[S]} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{2}{2} & \frac{2}{2} & \frac{2}{2} \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.019 & -0.009 & 0 \\ -0.009 & 14.5 & 0 \\ 0 & 0 & 42.002 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\overline{[S]} = \begin{bmatrix} 0.005 & 7.249 & -21.001 \\ 0.005 & 7.249 & 21.001 \\ 0.028 & -14.516 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\overline{[S]} = \begin{bmatrix} 14.128 & -6.873 & 0 \\ -6.873 & 14.128 & 0 \\ 0 & 0 & 14.544 \end{bmatrix}$$

Características mecánicas en las direcciones globales (x-y)

$$\overline{[S]} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & 0 \\ \bar{S}_{21} & \bar{S}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{S}_{33} \end{bmatrix}$$

Módulo de Tracción en la dirección x

$$E_x = \frac{1}{\bar{S}_{11}}$$

$$E_x = 62.5[GPa]$$

Módulo de Tracción en la dirección y

$$E_y = \frac{1}{\bar{S}_{22}}$$

$$E_y = 62.5 [GPa]$$

Módulo de Cizalla o Cortadura en la dirección x-y

$$G_{xy} = \frac{1}{\bar{S}_{33}}$$

$$G_{xy} = 0.07[GPa]$$

Módulo de Poisson en la dirección x-y

$$v_{xy} = -E_x * \bar{S}_{21}$$

$$v_{xy} = -(-60.35) * \left(\frac{1910653}{61538400} \right)$$

$$v_{xy} = 0.49$$

Módulo de Poisson en la dirección y-x

$$v_{yx} = -E_y * \bar{S}_{12}$$

$$v_{yx} = -(-60.35) * \left(\frac{1910653}{61538400} \right)$$

$$v_{yx} = 0.49$$

Fabricación de probetas “placas” para ensayo balístico bajo la norma NIJ 0106.01

El objetivo de fabricar placas de kevlar es que sirvan como probetas y que pasen un ensayo balístico antes de proceder a fabricar el casco táctico con las mismas configuraciones

es garantizar la eficacia y la seguridad del diseño del casco. Los principales objetivos de este proceso son:

Verificación de la efectividad del material

Al someter las placas de kevlar a un ensayo balístico, se evalúa su capacidad para detener o reducir la penetración de proyectiles. Esto permite confirmar que el material de kevlar utilizado es adecuado para proporcionar protección balística en el diseño del casco táctico.

Validación del diseño del casco

Al fabricar el casco táctico con las mismas configuraciones que las placas que pasaron el ensayo balístico, se garantiza que el diseño del casco ofrece una protección efectiva contra amenazas balísticas similares a las probadas en las placas de kevlar. Esto ayuda a asegurar que el casco cumpla con los estándares de seguridad requeridos para su uso previsto.

Optimización del rendimiento del casco

El proceso de fabricación de placas de kevlar y la posterior fabricación del casco con las mismas configuraciones permite realizar ajustes y mejoras en el diseño del casco en función de los resultados del ensayo balístico. Esto puede incluir cambios en el grosor del material, la disposición de las capas de kevlar o el diseño estructural del casco para mejorar su capacidad de protección balística.

Tabla 6*Proceso de fabricación de placas de kevlar***Trazado y corte de Láminas de Kevlar**

Se traza y corta el kevlar con dimensiones de 305x305 mm, estandarizado por la Norma NIJ 106.01

Este trazado se realiza con las configuraciones de las fibras a 0°-90° y 0°, 45°, 90°.

**Aplicación del cemento de contacto**

Se aplica una capa delgada y uniforme de cemento de contacto en la superficie del Kevlar esparciéndolo uniformemente con una espátula plástica. Una vez que el cemento de contacto esté seco al tacto, se unen las capas de Kevlar, aplicando presión uniforme sobre toda la superficie. Esto asegurará una unión sólida y duradera entre las capas de kevlar.

**Curado final**

Se deja que la unión de las capas de kevlar cure completamente según las instrucciones del fabricante del cemento de contacto para garantizar una adherencia óptima.



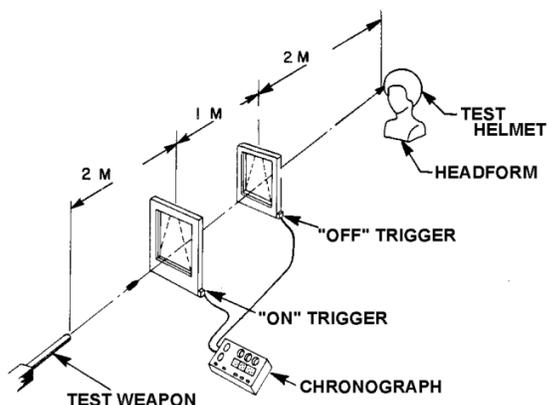
Nota. Esta tabla describe el proceso de fabricación de las placas de kevlar con cemento de contacto en base a medidas otorgadas por la Norma NIJ 0106.01

Análisis de impacto en un material compuesto

Para evaluar cómo un material compuesto resiste el impacto de una bala, se realizan pruebas específicas de balística que dicta la Norma NIJ 0106.01. Estas pruebas están diseñadas para simular las condiciones de un disparo real y determinar la capacidad del material para detener o mitigar los efectos de la bala. En la figura 15 se ilustra el ensayo que se realiza a un casco de prueba.

Figura 15

Detalles de un ensayo balístico en casco de prueba



Nota. La figura detalla la trayectoria, distancia y ángulo de incidencia del proyectil, así como su punto de impacto (casco de prueba). Tomado de *NIJ Standard for Ballistic Helmets* (pg.12), (National Institute of Justice., 1981)

La Norma NIJ 0106.01 proporciona información detallada sobre las características del proyectil, así como datos y especificaciones relevantes para llevar a cabo ensayos balísticos para un nivel de protección IIIA, y se detallan a continuación:

Característica del proyectil

- Calibre: 9 mm FMJ
- Masa: 8 gr
- Diámetro vaina: 9.06[mm]

- Diámetro base: 10 [mm]
- Longitud de vaina: 19 [mm]
- Longitud total: 29.3 [mm]

Características de la prueba

- Velocidad del proyectil: 432 ± 15 [m/s]
- Distancia de impacto: 5 [m]
- Energía total: 480 [J]

El análisis de la velocidad del proyectil a través de las capas de Kevlar implica disparar proyectiles controlados hacia una placa de Kevlar multicapa y medir la velocidad a la que el proyectil impacta cada capa como se observa en la figura 16. Este proceso proporciona información crítica sobre cómo el material de protección desacelera y detiene los proyectiles, siendo fundamental para evaluar la eficacia del Kevlar en la protección balística

Figura 16

Análisis de velocidad del proyectil a través de las capas de kevlar



Usando la figura 16 como referencia, y de acuerdo con la fórmula de balance de energía en los puntos 1 y 2, se tiene:

$$E_{mec_1} - |W_{Resistencia}| = E_{mec_2}$$

$$\frac{1}{2}mV_1^2 + mgh_1 - |F_R \cdot \Delta x \cdot \cos(180^\circ)| = \frac{1}{2}mV_2^2 + mgh_2$$

$$\frac{1}{2}mV_1^2 - |F_R \cdot \Delta x \cdot (-1)| = \frac{1}{2}mV_2^2$$

Según la fórmula para la fuerza de resistencia en un fluido (Bertin & Cummings, 2009) la resistencia experimentada por un objeto en movimiento depende de la densidad del fluido, la velocidad del objeto y el coeficiente de arrastre.

$$F_R = \frac{1}{2}\rho v^2 C_d A$$

Dónde:

- F_R es la fuerza de arrastre
- ρ es la densidad del aire
- v es la velocidad de la bala en el aire
- C_d es el coeficiente de arrastre que depende de la forma del objeto
- A es el área de proyección perpendicular a la dirección del movimiento

Coefficiente de arrastre de una bala G1. Durante los ensayos balísticos, se utilizó una bala de tipo G1 como referencia para determinar su coeficiente de arrastre. Según los estándares establecidos para esta forma particular de proyectil, el coeficiente de arrastre se estima en 0.5191 (Lewis, 2021), lo que proporciona una base sólida para la evaluación de su comportamiento balístico en diferentes condiciones y escenarios de disparo, entonces se tiene:

$$C_d = 0.5191$$

$$\rho_{aire} = 1.2 \text{ kg/m}^3$$

Cálculo del área de la sección transversal de la bala

Diámetro del proyectil: $\phi = 0.355 \text{ in} \cong 9.017 \text{ mm}$

$$A = \pi * \frac{\phi^2}{4}$$

$$A = \pi * \frac{(9.017 \text{ [mm]})^2}{4}$$

$$A = 63.86 \text{ [mm}^2] \approx 6.386 \times 10^{-5} \text{ [m}^2]$$

Reemplazando los valores para el cálculo de la fuerza de arrastre

$$F_R = \frac{1}{2} \left(1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(440 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 (0.5191) (6.386 \times 10^{-5} \text{ m}^2)$$

$$F_R = 3.85 \text{ [N]}$$

Despejando la velocidad de impacto en el punto V_2 por medio del balance de energía:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \left(\frac{1}{2} m V_1^2 - F_R \Delta x \right)}{m}}$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \left(\frac{1}{2} (0.008 \text{ kg}) \left(440 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 - (3.85 \text{ N})(5 \text{ m}) \right)}{(0.008 \text{ kg})}}$$

$$V_2 = 434.49 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Modelización balística

Los sistemas de ecuaciones, que se utilizan para determinar diversos valores, dependen de tres variables principales: la densidad del tejido, el espesor, el módulo elástico y

el límite elástico. Estos valores se utilizarán como parámetros en nuestro análisis, para encontrar Γ_0 , que es una comparación de la densidad areal del tejido con la bala.

La principal forma de caracterizar el rendimiento de un sistema fibroso es crear lo que se denomina llamada curva maestra, que es V_{50} frente a 100Γ , desarrollada por (Hymas, Lacey, Rohrbach, Gillard, & Berkey, 2019)

$$\Gamma_0 = \frac{\rho h}{m \overline{A}}$$

$$V_{50} = (1 + \Gamma_0) \sqrt{\frac{2Ah\sigma_{max}}{m\Gamma_0\varepsilon_{max}^{0.25}}}$$

- Γ_0 , comparación de la densidad areal del tejido con la bala.
- ρ , densidad del tejido
- h , espesor el tejido
- m , masa del proyectil
- A , área transversal de la bala
- V_{50} velocidad crítica en la cual un proyectil tiene una probabilidad específica de penetrar un material balístico durante pruebas estándar.
- σ_{max} es la resistencia a la tracción del tejido.
- ε_{max} es la tensión máxima que puede soportar el tejido antes de que se rompa una fibra.

Reemplazando valores se obtiene la comparación de la densidad areal del tejido con la bala Γ_0 y V_{50} .

$$\Gamma_0 = \frac{\left(1440 \frac{kg}{m^3}\right) (7.8 \times 10^{-4} m)}{\frac{0.008 kg}{(6.386 \times 10^{-5} m^2)}}$$

$$\Gamma_0 = 0.00896$$

$$V_{50} = (1 + 0.00896) \sqrt{\frac{2(6.386 \times 10^{-5} \text{m}^2)(7.8 \times 10^{-4} \text{m})(3 \times 10^9 \text{Pa})}{(0.008 \text{kg})(0.00896)(2.4)^{0.25}}}$$

$$V_{50} = 583.8 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Para que esta caracterización modelase correctamente el sistema fibroso se asumió que el tejido tenía una extensión infinita y cuasi-isótropo con las mismas propiedades elásticas lineales en el plano. Los efectos de Poisson se desprecian en estas ecuaciones porque el pandeo local y la flexión en la estructura fibrosa pueden aproximarse para aliviar todas sus tensiones.

En la Tabla 7 especifica la cantidad de capas requeridas, la cual varía de acuerdo a los estándares de V_{50} .

Tabla 7

Numero de capas necesitó para V_{50} requeridos

Requisito V_{50}	Material Usado	Número de capas
550 m/s	Aramida solamente	14
600 m/s	Aramida solamente	16
650 m/s	Aramida solamente	18

Nota. La Tabla detalla el número de capas de aramida que son requeridas dependiendo el valor de V_{50} . Tomado de *Casco de fibra aramida tipo kevlar para tropas de infantería ligera* (pg.3), (Ejercito Argentino, 2004)

Para una velocidad $V_{50} = 583.8 \left[\frac{m}{s} \right]$, se necesitaría 16 capas del tejido de kevlar 49, para la construcción del casco táctico.

Física del impacto balístico en sistemas fibrosos

Cuando una bala golpea un trozo de tela, la fuerza del impacto crea un cono en el tejido, ya que el material se desvía y se estira para absorber la fuerza. Además, la fuerza induce una onda de deformación sobre el tejido que se irradia desde la bala. Tres variables características utilizadas para describir este movimiento ondulatorio son la velocidad de la onda de tracción, la velocidad de la onda cónica transversal con respecto al suelo y ψ , que es la relación entre el radio de la onda cónica iniciada y el radio de la bala. Ψ es la caracterización más importante con respecto al modelado balístico. (Sastranegara, Halawa, & Anggraini, 2022)

Con múltiples láminas de tejido, la bala tiene cada vez menos probabilidades de penetrar en el tejido. La figura 17 muestra como las múltiples capas de tejido trabajan juntas para reducir la tensión en el tejido compartiendo la carga.

Figura 17

Esquema que muestra la forma de cono creada por una bala que golpea múltiples capas de capas de tejido. En esta representación, la capa 1 es atravesada y se activan las capas 2, 3 y 4.



Nota. Tomado de Experimental study on the performance of multi-layered bulletproof vest, por (Sastranegara, Halawa, & Anggraini, 2022)

Cuando cada nueva capa de tejido es activada por la bala, se crea una nueva onda de tensión en esta capa con una velocidad y posición diferentes a las de la onda superior. Esto puede causar interferencias perjudiciales para el V_{50} del sistema. Para los propósitos de este modelo, se asume que la interferencia es insignificante porque las capas tienen suficiente fricción entre ellas para prevenir una fuerte diferencia en las ondas.

Se puede determinar la velocidad de la bala en cada capa después de romperse, por medio de la siguiente fórmula obtenida de (Hymas, Lacey, Rohrbach, Gillard, & Berkey, 2019):

$$V_i = \frac{V_p}{1 + \Gamma_0} e^{-\frac{\sum_{i=2}^n \Gamma_0 \psi_i^2 + \Gamma_0 \psi_{i,fl}^2 - \Gamma_0}{1 + \Gamma_0}}$$

Dónde:

- V_p es la velocidad del proyectil ($V_p = 434.49 \left[\frac{m}{s} \right]$)
- ψ_i es el número de la capas activa o penetrada por la bala
- $\psi_{i,fl}$ es el número de la capa que se activa una vez que la bala atraviese la anterior capa.

En la Tabla 8 se detallan los resultados obtenidos al iterar la fórmula para determinar la velocidad con la que la bala atraviesa cada una de las capas.

Tabla 8

Velocidad de impacto del proyectil 9 mm FMJ en cada capa

Nº Capas	Velocidad $\left[\frac{m}{s} \right]$
2	305,96
3	271,68
4	231,88
5	190,22

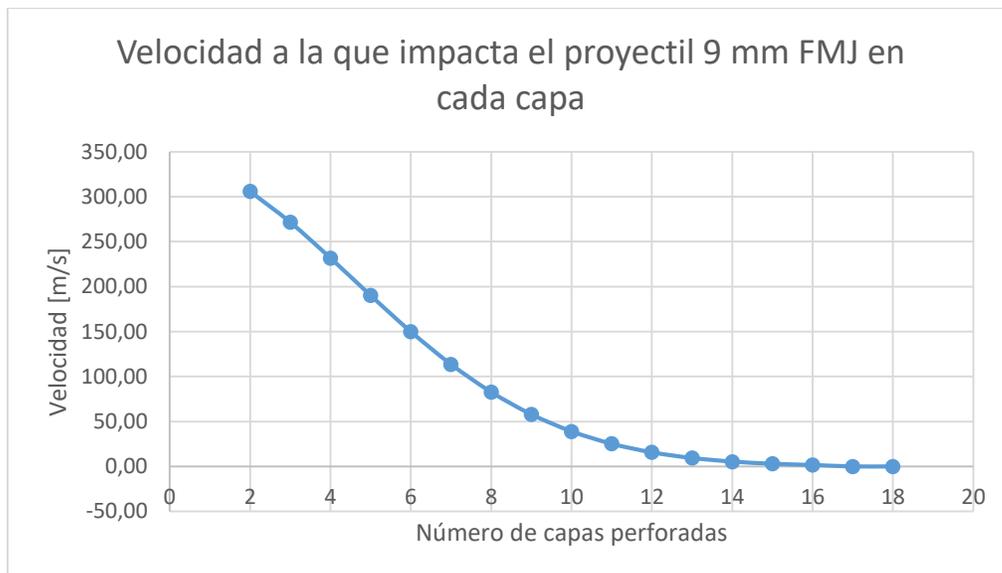
6	149,99
7	113,67
8	82,81
9	57,98
10	39,02
11	25,24
12	15,69
13	9,38
14	5,39
15	2,97
16	1,58
17	0,00
18	0,00

Nota. La tabla proporciona información detallada sobre el número de capas que la bala atraviesa y la velocidad con la que impacta en cada una de ellas.

La figura 18 muestra la curva de modelización balística que utiliza V_p , para determinar la velocidad residual de la bala después de penetrar una serie de capas de kevlar 49

Figura 18

Modelo matemático de la velocidad del proyectil 9 mm FMJ con la que impacta y penetra una serie de capas de kevlar (49).



El modelo matemático obtenido dio como resultado la velocidad a la que impacta la bala cada capa hasta llegar a la N°16, en dónde es prácticamente nula, es decir que no la penetraría, y no existiría algún trauma en ella.

Fabricación del casco táctico

La fabricación del casco táctico es un proceso complejo que involucra varias etapas clave que están detalladas en la Tabla 9, que garantiza la calidad, durabilidad y funcionalidad del producto final.

Tabla 9*Proceso de fabricación del casco táctico*

Molde Adaptado a la Forma del Casco

Partiendo del casco original, se crea una plantilla de Kevlar que, mediante cortes y trazados precisos, adquiere la forma exacta del casco. Esta plantilla se utiliza entonces como molde para cortar otras láminas de Kevlar con la misma configuración, asegurando así la reproducción fiel de la forma y dimensiones del casco en cada una de las láminas subsiguientes.



Corte de láminas

Se cortan las 16 capas de Kevlar con distintas orientaciones: 0°, 45° y 90°, según la configuración requerida. El molde se adapta precisamente a estas orientaciones para asegurar la correcta disposición de las capas y garantizar la integridad estructural del producto final.



Capa externa del Casco

Para la fabricación de la capa externa del casco, se mezclaron 120 gramos de resina con 60 gramos de dióxido de titanio, junto con el catalizador, esta mezcla se la colocó en el molde



del casco previamente preparado y el curado se lo realizó a temperatura ambiente.

Una vez curado se aplicó resina con fibra de vidrio, este paso adicional agrega una capa adicional de refuerzo para mejorar la resistencia y la durabilidad del casco.



Curado y endurecimiento

Una vez aplicada la resina con fibra de vidrio, el casco se coloca en un entorno controlado donde se permite su curado y endurecimiento. Este proceso se lleva a cabo bajo una lámpara que genera una temperatura de aproximadamente 60°C.



Adhesión de las láminas de Kevlar

Se aplica cemento de contacto en ambas caras de la capa de Kevlar, así como en la capa externa del casco. Tras este paso, se permite un periodo de tiempo determinado para que el cemento se vuelva pegajoso, lo cual facilita la adherencia entre las capas. Con un total de 16 capas por colocar, se efectúa este proceso de manera secuencial para cada una de ellas.



Mientras se coloca cada capa, se utiliza un rodillo, que, mediante presión controlada, compacta las capas recién aplicadas. Este proceso de compactación es crucial para asegurar una unión sólida y uniforme entre las capas de Kevlar y la capa externa del casco.



Resultado del Casco táctico

Después de completar la aplicación de todas las capas de Kevlar, el casco se coloca en un horno especializado para el curado. Durante este paso, se somete el casco a una temperatura controlada de 60°C.

El proceso de curado en el horno permite que el adhesivo se endurezca completamente, asegurando una unión sólida y duradera entre las capas de Kevlar y la capa externa del casco. Además, este proceso contribuye a mejorar las propiedades físicas y mecánicas del material compuesto, garantizando un resultado final de alta calidad y resistencia.



Nota. La tabla proporciona información detallada sobre el proceso minucioso de la fabricación del casco táctico.

Capítulo IV: Análisis de Resultados

Resultados Experimentales

Los resultados que se expondrán a continuación fueron presentados por la empresa Santa Barbara, en la cual se realizó los ensayos balísticos bajo la Norma NIJ 0106.01 NIVEL IIIA.

Ensayos de Probetas

Se elaboró un lote de 3 probetas, bajo las mismas condiciones de manufactura y ambiente, la fabricación de estas probetas se llevó a cabo en el laboratorio de materiales compuesto del CICTE, ubicado en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE al lado del Centro de Investigaciones.

Las probetas se presentaron en forma rectangular de 350 mm x 350 mm (medida proporcionada por la norma), estaban compuestas por matriz de cemento de contacto con refuerzo de fibras de Kevlar balístico.

Con respecto al ensayo de estas probetas se presenta la siguiente información:

- Fecha de las pruebas 01 de febrero del 2024
- Hora 10H00 a 12H00
- Lugar: Laboratorio balístico de Santa Bárbara EP
- Temperatura: 22.4 °C
- Humedad relativa: 50.6%
- Munición utilizada: SB Cal. 9mm FMJ 124 grains
- Velocidad promedio de la munición: 433 m/s para NIJ IIIA

Los parámetros que se deben cumplir para la aprobación de los ensayos bajo la norma NIJ 0106.01 NIVEL IIIA son lo que enlistara a continuación:

Parámetros norma NIJ 106.01

- Proyectil calibre 9 mm FMJ 124 grains de 448 m/s \pm 9.1 m/s
- Distancia requerida desde el cañón: 5 m
- Temperatura ambiente: Entre 20 °C – 28°C
- Humedad relativa: Entre 30% - 70%.
- 6 impactos por cada ensayo
- Angulo de incidencia 0°
- Numero de impactos: 5 (casco), 6 (probetas)

Parámetros de aprobación

- El criterio de aprobación de las pruebas se basa en la nula penetración del elemento a ensayar (probeta-casco).

Resultados del Ensayo 1***Datos técnicos***

- Dimensiones: 350 mm x 350 mm
- Refuerzo: Kevlar (49)
- Matriz: Resina Epóxica de Infusión FIBREGLAST 4500
- Configuración: 0° - 90°
- N.º láminas: 18

Este ensayo fue rechazado debido a que los 5 proyectiles atravesaron por completo a la probeta. En la figura 19 se muestra las dos probetas de placas de kevlar, que fueron fabricadas con resina epóxica, utilizando un proceso de infusión de resina, la selección de este material se basó en las propiedades de solidificación que poseía al mezclarse con las fibras de kevlar

Figura 19

Placa Kevlar 49 con resina epóxica sometida a pruebas balísticas



Estas placas de kevlar fueron rechazadas por el laboratorio de calidad de la empresa Santa Barbara ya que no cumplieron con los parámetros de la Norma NIJ, debido a que los 5 proyectiles atravesaron por completo la probeta. La dureza que alcanzo el material compuesto hizo que la probeta se vuelva frágil, por lo tanto, la fuerza de impacto que genero el proyectil fue más grande que la resistencia que poseía el material a la penetración, sin embargo, la manufactura que se utilizaría en este proceso permitiría una mejor compactación de material.

Resultados del Ensayo 2

Datos técnicos

- Dimensiones: 350 mm x 350 mm
- Refuerzo: Kevlar (49)
- Matriz: Cemento de contacto "Africano"
- Configuración: 0° - 45° - 90°
- N.º láminas: 16

La figura 20 muestra que el estado de este ensayo fue satisfactorio, debido a que ningún proyectil atravesó la probeta, esto permitió la aprobación del ensayo por parte del laboratorio de calidad de Santa Barbara,

Figura 20

Placa de kevlar con cemento de contacto sometida a pruebas balísticas



Las condiciones de la probeta para su manufactura son:

- Configuración 0°-45°-90°.
- Se utilizó un rodillo para obtener un recubrimiento homogéneo alrededor de toda la superficie de las láminas.
- La velocidad fue 6 m/s más bajo que el anterior ensayo, sin embargo, estaba dentro de los parámetros de la norma.

Análisis de las láminas

Se identificó la capa específica de Kevlar afectada por cada proyectil penetrante, para las láminas 13, 14, 15, 16 presentaron deformaciones mas no penetraciones por lo tanto la probeta ensayada fue aprobada bajo los parámetros establecidos por la Norma NIJ 0106.01.

En la figura 21 se presenta la vista posterior de la probeta después del ensayo, donde se observa que la bala no atravesó y se produjeron deformaciones. Estas deformaciones deben ser medidas para determinar el nivel de trauma causado por los impactos de los proyectiles.

Figura 21

Vista posterior de la placa de kevlar del segundo ensayo sometida a pruebas balísticas



La medición se lleva a cabo de manera manual, ya que durante el ensayo se colocó una placa de plastilina detrás de la probeta para registrar las deformaciones resultantes como se observa en la figura 22. Es importante destacar que la plastilina no afectó la trayectoria de los proyectiles ni ofreció resistencia a la probeta, dado que es un material dúctil que se deforma fácilmente ante fuerzas de magnitudes reducidas.

Figura 22

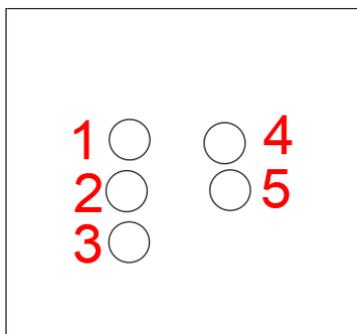
Medición del trauma balístico



Para medir las deformaciones proporcionadas por el impacto de la bala, se utiliza un calibre para obtener la profundidad de cada impacto en la plastilina. En la figura 23, se detalla la posición de cada impacto.

Figura 23

Detalle de los impactos del proyectil



Los números de impacto se posicionarán según la gráfica.

El BFD es una medida de la deformación causada por el impacto de un proyectil casco táctico. Esta medida es importante para evaluar la capacidad de un casco táctico para detener un proyectil sin que la deformación resultante cause lesiones al usuario.

EL BFD que maneja la norma NIJ es de 40 mm como deformación máxima en profundidad que puede tener la probeta o el elemento balístico, esto con el fin de no generar daños o traumas graves a las personas que utilizan estos elementos, sin embargo, esto no significa que al utilizar un elemento balístico el usuario está libre de presentar algún trauma o golpe que puede ocasionar daños graves.

En base a la norma se aprueba a la probeta, ya que la deformación que presenta esta abajo del límite de BFD.

Resultados del Ensayo 3 – Casco Táctico

Datos técnicos

- Dimensiones: Molde
- Refuerzo: Kevlar (49)
- Matriz: Cemento de contacto “Africano”

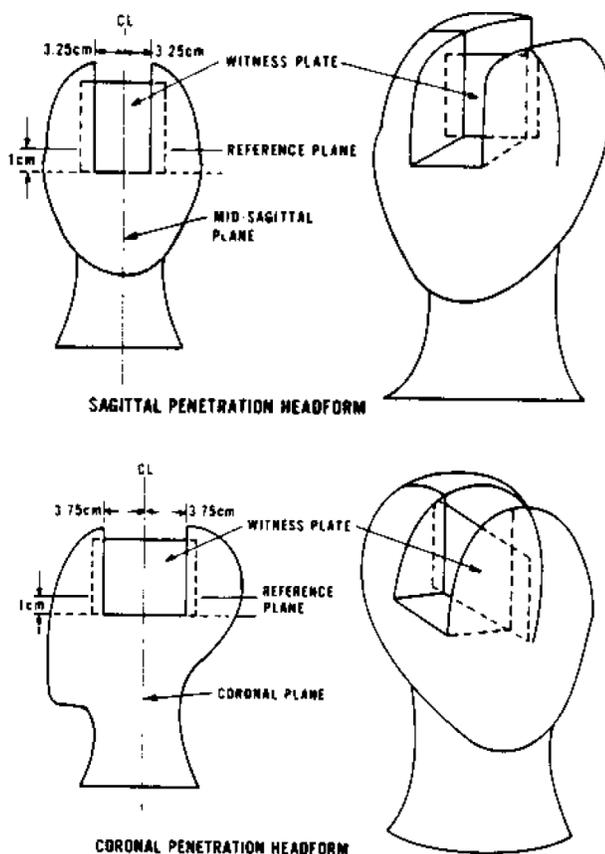
- Configuración: 0° - 45° - 90°
- N.º láminas: 16

Debido a que la probeta se realizó con el fin de obtener parámetros aceptables para la fabricación del casco, se usaron los parámetros de la probeta del ensayo 2, se intentó replicar composiciones, configuración y manufactura en lo posible para no alterar algún parámetro que pueda afectar al casco en los ensayos.

En la descripción de los ensayos bajo la norma NIJ 0101.06 explica los lugares donde debe ser impactado el casco, ya que estos son los puntos de protección más delicados. En la figura 24 se indica los lugares donde los proyectiles deben de impactar.

Figura 24

Diagrama de Evaluación de Impactos en Casco Táctico según norma NIJ 0106.01



Nota. La figura detalla el criterio de evaluación al someter el casco táctico a pruebas balísticas,. Tomado de *NIJ Standard for Ballistic Helmets* (pg.15), (National Institute of Justice., 1981)

Según las gráficas mostradas, las cuales pertenecen a la norma NIJ 106.01, nos indica que se debe realizar 5 disparos, 2 en el plano sagital tanto de frente como atrás y los otros son uno desde la vista superior y 2 en las partes laterales al filo de la sien.

Figura 25

Análisis visual de los impactos balísticos en el casco táctico



Este ensayo fue aprobado debido a que los proyectiles no traspasaron el casco por completo, se debe tomar en cuenta que las fibras del Kevlar poseían la configuración de 0°-45°-90 y que tuvo una capa de fibra de vidrio con resina, sin embargo, para el estudio no se tomó

esta capa, ya que el casco no presenta afectaciones significantes en los parámetros, esta capa fue para dar protección y definir de una mejor manera la forma del molde.

Al realizar el ensayo se dio por aprobado el casco bajo la norma NIJ 0101.06, ya que cumplió con la nula perforación de los proyectiles y las deformaciones se encuentran dentro del rango de BFD.

Capítulo V: Análisis Económico

El análisis económico que se realiza a continuación tiene como objetivo dar a conocer los costos totales que tuvieron los procesos de este proyecto, se recuerda que la institución CICTE al ser patrocinador de este proyecto intervino con un porcentaje del costo total que se indicara en la siguiente tabla, de igual manera no se presentaran los costos adicionales por cambios de materiales en el proyecto o pruebas adicionales para comparación de materiales.

Costos Directos

Tabla 10

Gastos en materia prima y herramientas utilizadas en la matriz

Ítem	Descripción	Cant	Dimensión	Valor
1	Tablones de madera Quebracho Colorado	12	m	\$105.00
2	Cola blanca "Bioplast"	3	L	\$15.00
3	Prensa en F - 2 1/2" x 24"	4	N/A	\$60.00
4	Brocha profesional Truper 2"	3	N/A	\$3.69
5	Espátula 8" plástica P/Tapicero	2	N/A	\$3.44
6	Papel limpión	1	N/A	\$3.00
7	Instrumentos de preparación de mezcla	1	N/A	\$5.00
			Total	\$195.13

Tabla 11

Gastos en el mecanizado de la matriz

Ítem	Descripción	Cant	Dimensión	Valor
1	Cepillado de 6 caras del Tocho de madera	1	N/A	\$12,00

2	Mecanizado cavidad de molde	1	N/A	\$600,00
			Total	\$612,00

Tabla 12

Gastos en probeta placa de kevlar

Ítem	Descripción	Cant	Dimensión	Valor
1	Láminas de aramida- kevlar 49	18	350x350 mm	\$277.90
2	Cemento de contacto "Africano"	3	L	\$17.50
3	Brocha profesional Truper 2"	3	N/A	\$3.69
4	Placa ASTM A-36	1	500x500x3 mm	\$1.50
5	Espátula 8" plástica P/Tapicero	2	N/A	\$3.44
			Total	\$304.03

Tabla 13

Gastos en Casco táctico MICH Nivel IIIA

Ítem	Descripción	Cant	Dimensión	Valor
1	Láminas de aramida- kevlar 49	16	450x450 mm	\$483,96
2	Cemento de contacto "Africano"	2	L	\$11,60
3	Brocha profesional Truper 2"	3	N/A	\$3,69
4	Espátula 8" plástica P/Tapicero	2	N/A	\$3,44
5	Lámina Fibra de Vidrio	1	600x600 mm	\$5,00
6	Kit Resina de Poliéster	1	gal	\$25,00
			Total	\$532,69

Tabla 14*Gastos en ensayos balísticos- empresa Santa Bárbara*

Ítem	Descripción	Cant	Dimensión	Valor
1	Ensayos Balísticos bajo norma NIJ	5	N/A	\$987,00
			Total	\$987,00

El costo total del proyecto está representado por la suma de los costos de materia prima, mecanizado en CNC de la matriz, probeta de kevlar, fabricación del casco táctico y los ensayos balísticos bajo la Norma NIJ, dando como resultado un costo total de:

Tabla 15*Costo total del proyecto*

Costo Total	
Materia prima y herramientas utilizadas en la matriz	\$195,13
Mecanizado en CNC de la matriz	\$612,00
Probeta placa de kevlar-cemento de contacto	\$304,03
Casco táctico MICH Nivel IIIA	\$532,69
Ensayos Balísticos bajo norma NIJ	\$987,00
Total	\$2.630,85

El costo aproximado del proyecto fue de \$2630.85, los insumos en stock que se usaron en el proyecto no se ubicaron en este análisis ya que no cuenta como gasto del proyecto.

Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- El análisis teórico del material compuesto permite obtener las propiedades del material compuesto, es decir refuerzo y matriz, las propiedades mecánicas tienden a disminuir aproximadamente un 2% , sin embargo, este porcentaje no afecta en el comportamiento que se quiere obtener en el material, por el contrario, esa pérdida es convalidada con las características de protección y fabricado que realiza la matriz en el refuerzo.
- La obtención de un material compuesto es fundamental para mejorar sus propiedades, como resistencia, flexibilidad, fuerza o ligereza. Sin embargo, la unión de múltiples materiales no siempre garantiza el logro de estos objetivos. En el contexto de este proyecto, se exploró el uso de resina epoxi debido a su conveniente proceso de fabricación y curado del material compuesto. Sin embargo, esta elección resultó subóptima debido a las propiedades que la resina utilizada, ya que adquiere durante el proceso de curado. La incrementada dureza del material compuesto resultante conlleva a una mayor fragilidad. Las pruebas balísticas realizadas en probetas con esta composición demostraron resultados insatisfactorios, evidenciando que los seis proyectiles impactaron y penetraron completamente la placa de manera desfavorable.
- Los ensayos realizados para la certificación del casco táctico conforme a la norma NIJ 0101.06 comprenden una evaluación exhaustiva tanto cualitativa como cuantitativa. La evaluación cualitativa se centra en garantizar que el casco no sufra perforaciones ante el impacto de proyectiles. Por otro lado, la evaluación cuantitativa implica medir la profundidad del impacto en una placa de plastilina, estableciendo un límite máximo de 40 mm para prevenir lesiones graves en el usuario del casco. Este criterio de profundidad se fundamenta en la presencia de accesorios internos del casco diseñados para mantener la cabeza del usuario alejada de la superficie del casco, reduciendo así

el riesgo de lesiones en caso de impacto. Dado que el casco superó exitosamente esta prueba al no presentar perforaciones y al demostrar que el trauma resultante del impacto fue menor a 40 mm, se confirma su idoneidad y seguridad para su uso en situaciones tácticas y militares.

- Según el análisis de velocidad, al impactar el proyectil contra la primera capa del material compuesto, se registra una pérdida de velocidad del 11.2%. Esta disminución se incrementa significativamente en la quinta capa, llegando aproximadamente a un 62%, y finalmente, en la capa 16, se observa una velocidad residual de 0 m/s, indicando la detención total del proyectil y la interrupción de su capacidad de perforación. En contraste, durante el ensayo balístico, los proyectiles mantienen una velocidad constante desde su disparo inicial. Sin embargo, se observa una variación en la profundidad de penetración en las diferentes capas del material. Este fenómeno se atribuye a factores externos como la resistencia al aire y otras condiciones ambientales. Es relevante señalar que el proyectil que logró perforar la mayor cantidad de capas se detuvo en la capa 12, lo que sugiere una concordancia cercana entre los resultados experimentales y los cálculos teóricos.

Recomendaciones:

- Para la optimización continua del diseño, se debe continuar refinando el diseño del casco táctico mediante la retroalimentación de pruebas y evaluaciones adicionales, con el objetivo de mejorar su rendimiento y protección.
- Es importante mantener un seguimiento continuo de los estándares de calidad y seguridad en la fabricación y producción del casco táctico, asegurando que cumpla con los requisitos necesarios para su uso en situaciones tácticas y de combate.

- Realizar investigaciones adicionales sobre materiales innovadores y técnicas de fabricación avanzadas que puedan mejorar aún más la resistencia y la protección del casco táctico en futuras iteraciones del diseño.
- Es fundamental proporcionar capacitación adecuada al personal militar sobre el uso y mantenimiento del casco táctico, garantizando su correcta utilización y prolongando su vida útil en el campo.

Bibliografía

- Sastranegara, A., Halawa, E., & Anggraini, L. (2022). *Experimental study on the performance of multi-layered bulletproof vest*. Obtenido de <https://media.neliti.com/media/publications/558581-experimental-study-on-the-performance-of-7abf171c.pdf>
- AIMPLAS. (2021). *Materiales compuestos*. Obtenido de <https://www.aimplas.es/blog/tipos-de-materiales-compuestos/>
- Bertin, J., & Cummings, R. (2009). *Aerodynamics for Engineers* (5th ed.). Pearson.
- Castro, L. (2018). *Tipos de Calibres*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/elizagomez3551380/balistica-108725763>
- Chang, Cheng-Hung, Jhu-Lin, Meng-Jey, Yih-Ming, & Ming-Der. (2021). *Preparation and Ballistic Performance of a Multi-Layer Armor System Composed of Kevlar/Polyurea Composites and Shear Thickening Fluid (STF)-Filled Paper Honeycomb Panels*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/18/3080>
- Díaz, I. (2021). *Análisis experimental y numérico del comportamiento mecánico del material compuesto base aramida empleado en protecciones personales*. Obtenido de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/33280/tesis_ignacio_rubio_diaz_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ejercito Argentino. (2004). *Casco de fibra aramida tipo kevlar para tropas de infantería ligera*.
- Gamboa, R. (2011). *Estudio y caracterización de un blindaje termoplastico a partir de fibras de aramida*. Obtenido de https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1331/1/PMP_M_Tesis_2011_Ricardo_Gamboa_Castellanos.pdf

Hymas, C., Lacey, S., Rohrbach, K., Gillard, S., & Berkey, C. (2019). *Novel PBA-Grafted Carbon Nanotube Soft Body Armor*. Obtenido de <https://mse.umd.edu/sites/mse.umd.edu/files/Soft%20Body%20Armor.pdf>

Jaime Beltrán. (2017). Obtenido de Moldeo por compresión: <https://todoenpolimeros.com/2017/03/03/moldeo-por-compresion-2/>

Lewis, E. (2021). *Cómo calcular el coeficiente balístico de la forma de una bala*. Obtenido de https://www.ehowenespanol.com/calcular-coeficiente-balistico-forma-bala-como_217947/

Matt Reece. (2021). *El casco de combate moderno*. Obtenido de <https://tiradoresprecision.com/el-casco-de-combate-moderno-y-cuando-usar-uno/>

National Institute of Justice. (1981). *NIJ Standard for Ballistic Helmets*. Department of Justice.

Nick Hohman. (2022). *Guía de casco balístico*. Obtenido de <https://firstsourcewireless.com/es/blogs/blog/ballistic-helmet-guide#:~:text=No%20importa%20el%20tipo%2C%20todos,que%20participan%20en%20operaciones%20t%C3%A1cticas.>

Rubio, D. (2015). *Modelado y resolución del problema de distribución óptima de piezas en un autoclave*. Obtenido de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/60268/fichero/PFC+-+Modelado+y+resoluci%C3%B3n+del+problema+de+distribuci%C3%B3n+%C3%B3ptima+de+piezas+en+un+autoclave.pdf>

Stopforth, R. (2019). *Experimental study of bullet-proofing capabilities of Kevlar, of different weights and number of layers, with 9 mm projectiles*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914718301727>

TECNOpeg. (2023). *Fibras de aramida*. Obtenido de <https://www.tecnopeg.com/fibras-de-aramida/>

Apéndices