

**DISEÑO Y SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE UNA ESTRUCTURA INTERNA
PARA PROTECTOR DE ESPALDA PARA MOTOCICLISTAS**

JORGE ANDRES CABRERA SALAMANCA

**Proyecto integral de grado para optar el título de
INGENIERO MECÁNICO**

ORIENTADOR

LEONEL ALVEYRO TERÁN LLORENTE

INGENIERO MECÁNICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ D.C.

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente Jurado

Firma Jurado

Firma Jurado

Bogotá D.C. agosto de 2023

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. ALEXANDRA MEJIA GUZMAN

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretario General

Dr. JOSÉ LUÍS MACÍAS RODRÍGUEZ

Decana de la Facultad de Ingenierías

Ing. NALINY GUERRA PRIETO

Directora del Programa de Ingeniería Mecánica

Ing. MARÍA ANGÉLICA ACOSTA PÉREZ, Ph.D.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS	17
1.1 Objetivo general	17
1.2 Objetivos específicos	17
2. ANTECEDENTES	18
3. MARCO TEÓRICO	22
3.1 Normativa	22
3.1.1 <i>Dimensiones mínimas de las zonas de protección</i>	23
3.1.2 <i>Atenuación de impactos</i>	24
3.1.3 <i>Equipo de ensayo</i>	25
3.1.4 <i>Número de ensayos</i>	27
3.1.5 <i>Ensayos</i>	29
3.2 Figuras geométricas para protectores	29
3.2.1 <i>Figuras geométricas</i>	29
3.3 Materiales	35
3.3.1 <i>Generalidades</i>	35
3.3.2 <i>Materiales propuestos para el estudio</i>	39
4. METODOLOGÍA	45
4.1 Generación de la geometría	45
4.2 Generación de la malla	45
4.2.1 <i>Enmallado</i>	47
4.2.2 <i>Generación de malla</i>	47

4.2.3	<i>Mallado del sistema percutor – yunque</i>	51
4.2.4	<i>Enmallado tipo Shell</i>	54
4.2.5	<i>Enmallado Solid</i>	58
4.2.6	<i>Configuración de la simulación</i>	62
4.2.7	<i>Procedimientos de cálculo – variables</i>	63
5.	RESULTADOS	73
5.1	Estudio de independencia de malla	74
5.2	Resultados de las simulaciones	75
5.3	Análisis de resultados y evaluación	77
6.	CONCLUSIONES	84
	BIBLIOGRAFÍA	85
	ANEXOS	92

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 <i>Dimensiones corporales</i>	23
Figura 2 <i>Dimensiones mínimas de las zonas de protección</i>	24
Figura 3 <i>Geometría del Percutor</i>	26
Figura 4 <i>Geometría del Yunque</i>	27
Figura 5 <i>Posición de los Puntos de Impacto</i>	28
Figura 6 <i>Sistema de protección vial React M(Valtir)</i>	30
Figura 7 <i>Secuencia de deformación de una estructura diseñada con círculos</i>	31
Figura 8 <i>Octágono circunscrito en unacircunferencia</i>	32
Figura 9 <i>Estructura octagonal para atenuación de impactos</i>	33
Figura 10 <i>Deformación de una estructura diseñada con octágonos (percutor, estructura octagonal, yunque)</i>	33
Figura 11 <i>Sistema “Scorpion II” (TraFFix Devices)</i>	34
Figura 12 <i>Deformación de una estructura diseñada con óvalos</i>	35
Figura 13 <i>Protector rígido elaborado en polipropileno (1)</i>	36
Figura 14 <i>Protector rígido elaborado en polipropileno (2)</i>	37
Figura 15 <i>Placa articulada en polipropileno y espuma</i>	38
Figura 16 <i>Protector en espuma D3O</i>	39
Figura 17 <i>Mapa de Ashby. Módulo de Young – Tenacidad a la Fractura</i>	40
Figura 18 <i>Mapa de Ashby. Resistencia – Tenacidad a la Fractura</i>	41
Figura 19 <i>Mapa de Ashby. Densidad - Resistencia</i>	42
Figura 20 <i>Opciones de elementos tridimensionales para enmallado.</i>	47
Figura 21 <i>Elemento con baja calidad de malla</i>	48
Figura 22 <i>Elemento con alta calidad de malla.</i>	49
Figura 23 <i>Triángulos con diferentes proporciones de aspecto</i>	50
Figura 24 <i>Ejemplo de enmallado en Explicit Dynamics</i>	51
Figura 25 <i>Enmallado Percutor</i>	52
Figura 26 <i>Enmallado Yunque</i>	53
Figura 27 <i>Enmallado Protector Shell Circular</i>	55

Figura 28 <i>Enmallado Protector Shell Octagonal</i>	56
Figura 29 <i>Mallado Protector Shell Ovalo</i>	57
Figura 30 <i>Enmallado Protector Solid Círculo</i>	59
Figura 31 <i>Enmallado Protector Solid Octágono</i>	60
Figura 32 <i>Enmallado Protector Solid Ovalo</i>	61
Figura 33 <i>Explicit Dynamics – Partes de la Simulación</i>	63
Figura 34 <i>Gráfico de deformación plástica- esfuerzo en el modelo “Multilinear Isotropic Hardening”</i>	65
Figura 35 <i>Tabla de madera con eje de coordenadas según dirección de la fibra.</i>	66
Figura 36 <i>Tejido liso de fibra de carbono</i>	67
Figura 37 <i>Soporte fijo yunque (Explicit Dynamics)</i>	69
Figura 38 <i>Error Máximo de Energía en Explicit Dynamics</i>	71
Figura 39 <i>Configuración del análisis de la fibra de carbono</i>	72
Figura 40 <i>Estudio de independencia de malla</i>	74
Figura 41 <i>Esfuerzo equivalente protector fibra de carbono</i>	78
Figura 42 <i>Desplazamiento vertical del percutor en un protector ovalado de fibra de carbono</i>	78
Figura 43 <i>Esfuerzo Equivalente en un protector octagonal de Policarbonato</i>	79
Figura 44 <i>Desplazamiento vertical del percutor en un protector octagonal de policarbonato</i>	80
Figura 45 <i>Esfuerzo equivalente en un protector de polietileno de alta densidad</i>	80
Figura 46 <i>Desplazamiento vertical del percutor en un protector de polietileno de alta densidad</i>	81
Figura 47 <i>Esfuerzo equivalente en un protector de Fibra de carbono</i>	82
Figura 48 <i>Desplazamiento vertical máximo del percutor en un protector de Fibra de carbono</i>	82
Figura 49 <i>Gráfica de deformación FC</i>	95
Figura 50 <i>Gráfica de deformación PC</i>	98
Figura 51 <i>Gráfica de deformación HDPE</i>	101
Figura 52 <i>Geometría generada shell (círculo)</i>	102
Figura 53 <i>Geometría generada solid (círculo)</i>	103
Figura 54 <i>Geometría generada shell (octágono)</i>	104
Figura 55 <i>Geometría generada solid (octágono)</i>	105
Figura 56 <i>Geometría generada shell (óvalo)</i>	106

Figura 57 <i>Geometría generada solid (óvalo)</i>	107
Figura 58 <i>Plano del percutor</i>	108
Figura 59 <i>Plano del yunque</i>	109

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 <i>Dimensiones mínimas de la zona de protección para el protector de espalda</i>	24
Tabla 2 <i>Niveles de Rendimiento</i>	25
Tabla 3 <i>Coordenadas de Impactos</i>	28
Tabla 4 <i>Secciones transversales de los protectores diseñados</i>	45
Tabla 5 <i>Lista de geometrías generadas según Figura geométrica y material propuesto</i>	46
Tabla 6 <i>Deformación plástica – esfuerzo</i>	64
Tabla 7 <i>Orden de las simulaciones</i>	73
Tabla 8 <i>Resultados de cada simulación</i>	75
Tabla 9 <i>Fuerza de reacción promedio de los protectores diseñados</i>	83
Tabla 10 <i>Propiedades de la fibra de carbono</i>	93
Tabla 11 <i>Propiedades del policarbonato</i>	96
Tabla 12 <i>Propiedades del HDPE</i>	99

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. Propiedades de la fibra de carbono	93
ANEXO 2. Gráfica de deformación FC	95
ANEXO 3. Propiedades del policarbonato	96
ANEXO 4. Gráfica de deformación PC	98
ANEXO 5. Propiedades del HDPE	99
ANEXO 6. Gráfica de deformación HDPE	101
ANEXO 7. Geometría generada shell (círculo)	102
ANEXO 8. Geometría generada solid (círculo)	103
ANEXO 9. Geometría generada shell (octágono)	104
ANEXO 10. Geometría generada solid (octágono)	105
ANEXO 11. Geometría generada shell (óvalo)	106
ANEXO 12. Geometría generada solid (óvalo)	107
ANEXO 13. Plano del percutor	108
ANEXO 14. Plano del yunque	109

LISTA DE ABREVIATURAS

EVA: Etil Vinil Acetato

HDPE: Polietileno de Alta Densidad

RUNT: Registro Único Nacional de

TránsitoANSV: Agencia Nacional de Seguridad Vial

RESUMEN

Dentro de los medios de transporte motorizados, las motocicletas son más vulnerables a impactos, lo cual aumenta significativamente el riesgo de accidentalidad, y por lo tanto las lesiones físicas ocasionadas a personas y la gravedad de estas. Para prevenir estas lesiones y/o disminuir su gravedad, en el mercado se consiguen protectores para motociclistas cuyo diseño está bastante estandarizado en términos de materiales, ya que para su desarrollo se suelen utilizar tipos de materiales: blandos como la espuma (usualmente D3O o goma EVA (Etil Vinil Acetato) o rígidos como el polipropileno [1]. En el caso de los protectores de espuma, estos tienen limitaciones al momento de proteger de impactos, ya que estos al ser flexibles transmiten más energía de la recomendada para evitar lesiones (Norma EN 1621-2) [2], y esta flexibilidad tampoco evita deformaciones en la columna vertebral de la persona. Por otra parte los protectores rígidos, que evitan la torsión de la espalda, suelen tener un costo mayor respecto a las protecciones de espuma. Por ejemplo, se observa que dentro de la marca “Alpinestars”, un protector rígido puede tener un costo de \$120 USD aproximadamente [3] mientras que un protector de espuma de la misma marca puede tener un valor mucho menor, de aproximadamente

\$60 USD [4], lo cual también resulta ser un precio elevado para una persona promedio en el país, ya que al momento del estudio este precio resulta ser de alrededor de \$260000 COP.

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño y simulación computacional de una estructura interna de un protector de espalda para motociclistas, cuyo desarrollo, análisis y evaluación de resultados, sirvan para obtener información que permitan mejorar los elementos de protección de motociclistas, mediante la mitigación o eliminación de los puntos débiles de protectores que se comercialicen en el futuro, y/o apoyen futuras investigaciones relacionadas con el diseño de protectores. En este estudio se usan geometrías y materiales previamente utilizados en otras aplicaciones relacionadas con la protección de impactos principalmente en la industria automotriz, ya que en este sector se elaboran elementos de protección que buscan dispersar la energía de impactos por accidentes sobre los ocupantes de vehículos, y dichos elementos resultan ser bastante efectivos para disminuir lesiones físicas en personas y sus consecuencias temporales o permanentes.

Según los resultados obtenidos del diseño y simulación desarrollados en este estudio, se pudo establecer que la fibra de carbono y el HDPE en protectores de geometría ovalada sirven para

mejorar los elementos de protección para motociclistas, ya que estos materiales son capaces de cumplir con los niveles de fuerza transmitida hacia el cuerpo establecidos por la Norma EN 1621-2 (del orden de 20 kN), atenuando inclusive un poco más de la fuerza establecida por la norma, llegando a transmitir alrededor de 15kN.

Palabras clave: Protector de espalda, Geometrías, Diseño, Simulación, Fuerza transmitida

INTRODUCCIÓN

Entre las diferentes opciones de transporte motorizado, se encuentra una opción bastante accesible para una gran parte de los actores viales, la cual según el Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT) [5], a agosto de 2022, conforma el 60% del parque automotor en Colombia. Esta opción es la motocicleta, la cual en su mayoría es usada como medio de transporte, y a su vez representa a los actores viales con más probabilidad de accidentalidad, ya que de acuerdo con las estadísticas de la Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV) [6], de enero a julio de 2022, el 56% de fatalidades y lesiones en accidentes viales ocurrieron a motociclistas. Esta alta accidentalidad se debe a su vulnerabilidad a los impactos por su falta de carrocería, y la inestabilidad de estos automotores. Adicionalmente los usuarios de estos automotores no suelen tomar las medidas de protección necesarias para mitigar algunas de estas vulnerabilidades, ya que según un sondeo efectuado por el Departamento de Transporte de los Estados Unidos [7] en el año 2021, solo un 2% de motociclistas usan los equipos de protección necesarios, y aunque las lesiones en el área lumbar no son las más comunes, si están dentro de las más mortales para el motociclista, puesto que comprometen la integridad de la columna vertebral y del tórax [7].

Con el fin de atenuar las consecuencias de los impactos en personas, mediante la dispersión de la energía generada por los mismos, se han realizado investigaciones en diferentes sectores como el militar, automotor, vial, etc., y en mayor escala, en barreras viales, protecciones instaladas en vehículos para carreras expuestos a choques a gran velocidad y vehículos particulares que circulan en autopistas y carreteras. Dependiendo del tipo de protección estudiada, los materiales usados varían desde materiales especializados, como lo son los fluidos no newtonianos [8], la fibra de carbono y algunos polímeros como la aramida [8] y el polietileno [3], hasta materiales para usos más generales, como el acero o el aluminio [9]. Adicionalmente, dichas investigaciones involucran el diseño, simulación y experimentación, lo cual facilita el desarrollo de protecciones cada vez más efectivas; sin embargo, algunas de estas investigaciones experimentales pueden resultar costosas y dispendiosas de replicar [8], [9], [10], ya que es necesario construir el elemento a probar y replicar las condiciones reales, que podrían ser simples de simular, por ejemplo, el golpe de un martillo, o más complejas, cómo sería el caso de un proyectil impactando al elemento de prueba. Por lo anterior, en varios estudios se utilizan métodos de diseño y simulación

computacional, ya que resultan útiles para evitar desperdiciar recursos al momento de construir el o los elementos a probar [9], [10]. Igualmente, estos estudios computacionales deben ser probados de forma conjunta o independiente antes de ser aplicados para la protección de motociclistas, ya que pueden desempeñarse de forma diferente a lo esperado, tal como se observa en los estudios realizados por Correa [9] o Bravo y Almeida [10]. Teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo se propone el diseño y simulación computacional para el desarrollo de la estructura interna (que en adelante se llamará “estructura”) de un protector de espalda para motociclistas (que en adelante se llamará “protector”) que cumpla las especificaciones de un protector rígido, el cual con la estructura interna correcta podría ser capaz de dispersar la energía de impactos, y de ser posible, lo haría con la efectividad mencionada en la Norma EN-1621-2 del año 2004 [2], la cual establece y evalúa los parámetros de dispersión de energía mínima para proteger de impactos al motociclista. Se debe aclarar que actualmente la norma utilizada lleva el mismo título pero fue actualizada en el año 2014, agregando impactos humedeciendo el protector, lo cual posteriormente se aclara que no se incluirá dentro de los ensayos realizados en el presente estudio [11].

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Diseñar y simular computacionalmente una estructura interna para un protector de espalda para motociclistas que disperse la energía producida por impactos, según la Norma EN-1621-2 en condiciones normales.

1.2 Objetivos específicos

1. Diseñar computacionalmente la propuesta de varias geometrías para una estructura interna, para un protector de espalda que disperse la energía de impactos en motociclistas.
2. Definir opciones de los materiales comerciales, que pueden ser utilizados para el diseño y simulación de la estructura interna para un protector de espalda para motociclistas.
3. Simular de forma computacional la reacción ante impactos de la estructura interna diseñada para un protector de espalda, que disperse la energía de impactos en motociclistas, según la Norma EN-1621-2.
4. Proponer las alternativas de diseño más viables basadas en el análisis y evaluación de resultados sobre la dispersión de energía de la estructura interna desarrollado

2. ANTECEDENTES

En razón a la necesidad de atenuar las consecuencias de los impactos sobre las personas que sufren accidentes de motociclismo, se han realizado diferentes investigaciones para desarrollar protectores que dispersen o atenúen la energía generada por impactos. Algunas de las investigaciones consultadas usan la experimentación como método de investigación, la cual suele resultar costosa y dispendiosa de replicar, por lo que en otros casos se utilizan el diseño y la simulación computacional, ya que, los resultados del método computacional suelen ser aproximados a los del método experimental, y disminuyen costos y tiempo invertido en el desarrollo de productos.

Para tener una mejor perspectiva, a continuación, se describen los principales aspectos considerados para el presente estudio, los cuales se encuentran fundamentados en las fuentes mencionadas para cada caso.

Para el presente estudio se hicieron simulaciones de forma numérica, por lo cual para analizar la precisión de la simulación numérica, incluyendo estructura, material y la aproximación de los resultados computacionales y experimentales se observaron diferentes autores, tales como Lee, et al.[12], quienes analizaron mediante simulación numérica y pruebas experimentales la protección contra impactos balísticos y caídas, usando un tejido de aramida entrelazado de forma tridimensional, lo cual permitió evaluar los resultados de ambos métodos y comprobar que existe una gran aproximación en los resultados del método numérico respecto al experimental. Adicionalmente, en el estudio realizado por Delgado [11], se diseñó y simuló numéricamente un protector de espalda, usando fibras de aramida y carbono en un sistema matriz - fibra similar a la fibra de vidrio, y el cual fue ensayado bajo la Norma UNE EN 1621-2. Este estudio permitió revisar algunos de los requisitos necesarios para hacer un estudio basado en simulaciones computacionales, tales como las propiedades de los materiales, y los parámetros a establecer para la simulación.

Dentro de los materiales y mecanismos utilizados para diseñar elementos de protección contra impactos por choques o caídas en motocicletas, en adición a los fluidos no newtonianos, la fibra de aramida y carbono mencionada, se encuentran

- Sistema Airbag: analizado por Alvarado, [13] mediante el diseño del montaje de un sistema airbag en una maleta para ser usada por motociclistas, con el fin de proteger pecho y espalda.

El desarrollo de este sistema es bastante complejo, debido a que entre diferentes factores, requiere la generación de geometrías bastante complejas.

- Espuma: de acuerdo con los artículos de Ekmekdjian, et. al [14] y Albanese, et. al [15], la espuma no brinda la protección adecuada, ya que puede transmitir la energía del impacto hacia áreas desprotegidas, o no evitar la torsión de las partes protegidas, por lo cual es necesario considerar otro tipo de material que tenga mayor rigidez.
- Materiales Rígidos: esta clase de protectores se desarrollan en polímeros rígidos en forma de placas, las cuales requieren estar en conjunto con un protector de espuma, ya que estas reciben el impacto para distribuirlo a lo largo de la placa, como lo menciona Pacek et. al [16].

Es importante conocer esta clase de protectores, pues son los que se encuentran disponibles en el mercado y es necesario saber algunas de sus características y limitaciones, para que puedan tenerse en cuenta en el diseño de la estructura propuesta en este trabajo. En este caso el protector a diseñar será rígido para evitar la torsión en la columna y tendrá una estructura diferente a una placa, con el fin de que la placa no solo distribuya el impacto sobre un protector de espuma, tal como sucede en el estudio de Nasim Et. Al [17], donde se posiciona una placa de polietileno (PE) para distribuir la fuerza del impacto sobre un bloque de caucho de nitrilo (NBR), sino que también pueda dispersar la energía del impacto mediante su estructura.

Para poder diseñar una estructura que pueda cumplir con el propósito mencionado se hace necesario revisar estudios que analicen como un material con diferentes geometrías puede ser utilizado para absorber la energía de impactos. En este caso, en el estudio realizado por Yang et al. [18], se observa como la resina foto polimérica con diferentes geometrías, como las geometrías circulares y ovaladas, sirven para absorber la energía de impactos del orden de 5 kN. También, en el estudio realizado por Liu et al. [19], se analiza una estructura de panal de abeja simulada y realizada en fibra de carbono y en donde se determinó que es capaz de dispersar la energía de impactos con una magnitud de hasta 230 J. Por otro lado, Seung.-Yeol et al. [20], analiza una estructura octagonal que se genera en espuma y sirve para la fabricación de equipos de protección para impactos en ciclistas y motociclistas

Este tipo de geometrías también han sido aplicadas en otros campos de la ingeniería, donde se han encontrado protecciones diseñadas para atenuar impactos en vehículos de carreras. En este campo Correa, [8], revisó los principios usados para la atenuación de impactos en esta clase de vehículos,

diseñando y simulando computacionalmente una estructura rectangular hueca acompañada de arcos, hecha en fibra de carbono. Luego esta estructura se construyó para comprobar que atenúa el impacto satisfactoriamente al colapsar proporcionalmente, debido a su forma geométrica. Otro estudio que usa este principio, pero con otro material, es el estudio de Bravo y Almeida [9], en el cual se diseñó y simuló computacionalmente una forma cilíndrica, compuesta de lámina de aluminio, y se comprobó experimentalmente que era efectiva como atenuador de impacto colapsable, ya que evitaba daños sobre el chasis del vehículo.

Igualmente, el estudio realizado por Agrawal, et al. [21], buscó disminuir la gravedad del impacto, pero usando una forma geométrica diferente. En este caso se diseñó y simuló computacionalmente, con experimentación real, un atenuador de impacto para chasis en forma de trapecio con punta arqueada, y se comprobó que por su geometría en forma de arco la estructura ofrece una mejor distribución del impacto a pesar de tener una menor longitud.

Otra área analizada para el diseño de esta estructura, es el área de las barreras viales actualmente usadas en carreteras de los Estados Unidos, las cuales son otra opción para la atenuación de impactos, y algunas de sus características podrían ser usadas para la protección de personas. Un ejemplo es la barrera vial “Universal TAU-II” [22] de la empresa “Barrier Systems”, elaborada con un sistema de arco metálico, el cual dispersa una pequeña cantidad de energía del impacto de un vehículo y posteriormente absorbe la energía restante mediante un sistema de cartuchos en polietileno que han de ser reemplazados luego de un impacto, ya que colapsan con la energía del impacto. Otro ejemplo es la barrera “React M” [23] de la empresa Valtir (antes conocida como Trinity Highway Products), que usa un sistema de cilindros de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) interconectados por cables de acero, para absorber gran parte del impacto y redirigir la energía restante (la cual es bastante mínima), como retroceso del objeto que la impacte. Con los anteriores sistemas se observa que los plásticos pueden ser usados para diferentes fines según la geometría que se les dé, tales como la dispersión de energía en impactos, por lo que se propone dentro de la investigación el uso de otro polímero, el Policarbonato, el cual es usado para vestimenta táctica como escudos anti impactos, gafas de seguridad o visores anti impacto.

De lo previamente mencionado, y considerando que las geometrías a ser analizadas son aplicables en tareas que manejan valores de fuerza y energía en varios rangos (50 J paraprotectores hasta 450 kJ para barreras viales) [21], [22], [24], se observa que el diseño de piezas en base a elementos o

geometrías presentes en la naturaleza o la cotidianidad pueden ser útiles para mejorar algunos elementos ya realizados según los requerimientos de la aplicación deseada. Además, estos diseños pueden ser evaluados según los estándares que los regulen mediante la simulación computacional, el cual es un método de desarrollo y evaluación aplicable en este proyecto, ya que resulta accesible, rápido y bastante confiable para el diseño de la estructura interna de un protector de espalda para motociclistas. Este debe cumplir con las especificaciones para un protector rígido, el cual con la estructura interna correcta sería capaz de dispersar la energía de impactos, y de ser posible lo haría con la efectividad establecida en la Norma EN- 1621-2 [2], donde se evalúa la dispersión de energía necesaria para proteger al motociclista de impactos, tal como se observa en el protector diseñado por Delgado [11].

3. MARCO TEÓRICO

En esta sección se describen los fundamentos teóricos sobre los que se basa este proyecto, a saber: normatividad existente, Figuras geométricas a usar, materiales propuestos, método de investigación, y paquetes computacionales para el diseño de la estructura del protector y las simulaciones de dicha estructura.

La normatividad permite evaluar de forma estandarizada la efectividad de protección de cada estructura diseñada usando diferentes Figuras geométricas, las cuales determinan la mayor o menor atenuación o dispersión de la energía del impacto en conjunto con los materiales propuestos de acuerdo con su densidad, resistencia a la tracción, elongación, etc., ya que estas propiedades proporcionan mayor o menor efectividad al protector que se diseñe; sin embargo, la elección de materiales también depende del presupuesto y tiempo asignado para la investigación y desarrollo del producto, ya que algunos materiales son más fáciles de obtener que otros (por ejemplo el aluminio vs. la aramida).

Adicionalmente, el método de investigación usado en este proyecto corresponde al método computacional, esto porque sus resultados son bastante aproximados a los del método experimental en términos del material propuesto y el comportamiento de la estructura diseñada, y resulta mucho más económico y más fácil de replicar. Por esta razón, para diseñar la estructura del protector y hacer las simulaciones respectivas, se dispone de dos paquetes computacionales, a saber: Solid Edge, para generar las geometrías de la estructura del protector en los materiales propuestos, y el equipo de ensayo (sistema yunque-percutor), y el módulo Explicit Dynamics del software ANSYS Workbench Student, que permite simular la reacción ante impactos de las estructuras internas previamente diseñadas para un protector de espalda para motociclistas, y determinar los criterios de fallo correspondientes. Lo anterior permitirá determinar la efectividad del protector para dispersar la energía de impactos, y obtener resultados para hacer el análisis y evaluación de la(s) estructura(s) diseñadas(s).

3.1 Normativa

Para el análisis del protector de espalda diseñado y simulado en este estudio, se utiliza la Norma UNE-EN 1621-2-2014, (Ropa de protección frente a impactos mecánicos para motociclistas.

Parte 2: Protectores de espalda para motociclistas), la cual establece los parámetros para ensayo de esta clase de protectores, usando una máquina formada por un sistema yunque-percutor.

Esta norma establece los criterios para el diseño y prueba de los protectores, a saber:

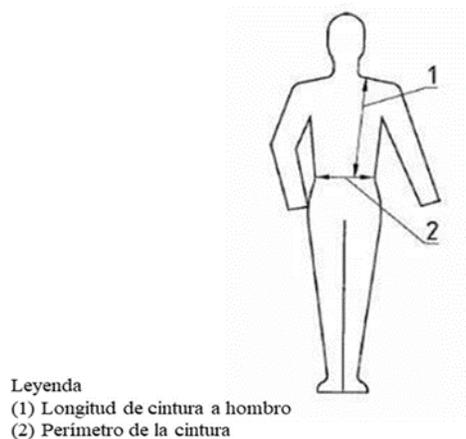
- Dimensiones mínimas de las zonas de protección (Medidas del protector)
- Niveles máximos de fuerza transmitida (Fuerza a transmitir 18 Kn)
- Equipo de ensayo (Equipo utilizado: percutor, yunque)
- Número de ensayos
- Características de los ensayos (temperatura, humedad)

3.1.1 Dimensiones mínimas de las zonas de protección

Las dimensiones de los protectores están relacionadas con la longitud cintura-hombro del usuario, según se muestra en la Figura 1. Las dimensiones mínimas del protector y proporciones respectivas se detallan en la Figura 2, y las proporciones mínimas (porcentaje de la medida cintura hombro) de la zona de protección se describen en la Tabla 1.

Figura 1

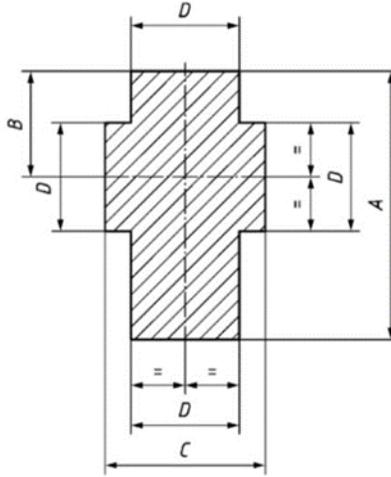
Dimensiones corporales



Nota. La figura muestra cómo se toma la medida de la persona según la norma para ser usada según las proporciones establecidas
Tomado de: Norma EN1621-2

Figura 2

Dimensiones mínimas de las zonas de protección



Nota. La figura muestra proporciones para aplicar las dimensiones mínimas de la zona de protección Tomado de: Norma EN 1621-2

Tabla 1

Dimensiones mínimas de la zona de protección para el protector de espalda

Dimensiones de la Figura 2			
A	B	C	D
72%	29%	44%	29%

Nota. Esta Tabla muestra los porcentajes utilizados en la figura 2 para la zona mínima de protección establecida por la norma.

3.1.2 Atenuación de impactos

Los niveles máximos de fuerza transmitida según el nivel de protección buscado son:

Tabla 2

Niveles de Rendimiento

Nivel 1	Nivel 2
valor medio: ≤ 18 kN golpe aislado: ≤ 24 kN	valor medio: ≤ 9 kN golpe aislado: ≤ 12 kN

Nota. Esta Tabla muestra los niveles de fuerza máxima que puede ser transmitida por el protector para ser aprobado por la norma.

La Norma establece dos niveles de protección (Nivel 1 y Nivel 2), los cuales se fijan según el uso que se le vaya a dar al protector, así:

- **Nivel 1:** aplica para protectores usados por motociclistas en la ciudad, cuya probabilidad de sufrir impactos severos es menor respecto a una persona que practique deportes de motor.
- **Nivel 2:** aplica para protectores más gruesos que los del nivel 1, los cuales transmiten al cuerpo una cantidad de fuerza significativamente menor y son usados generalmente por individuos que practican deportes de motor, cuya probabilidad de sufrir lesiones más severas es mayor que la de motociclista urbano.

Nota: El anexo 1 presenta dos valores a evaluar en las pruebas realizadas al protector; valor medio y un valor de golpe aislado. Se aclara que el promedio del valor máximo en cinco puntos de impacto no debe superar el valor medio, y cada golpe en los puntos evaluados no debe superar lo establecido para el golpe aislado. Esto quiere decir que, el valor de golpe aislado es mayor al valor medio, puesto que algunos golpes se evalúan en las orillas u otros puntos débiles que puede haber en el protector. Los valores a evaluar corresponden a fuerza transmitida, medidos con un sensor ubicado en la superficie del yunque que soporta al protector, de donde se puede evaluar cuánta energía se transmitirá a la zona protegida del motociclista con el protector.

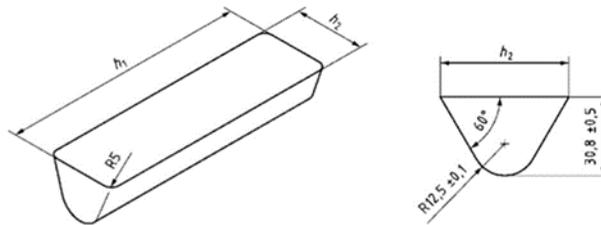
3.1.3 Equipo de ensayo

Para el ensayo numérico se deja caer una masa (que será el percutor) siguiendo un recorrido vertical guiado sobre la muestra colocada en un yunque de ensayo. El centro de la masa del peso de caída debe caer sobre el centro del yunque. Según la Norma, el conjunto de yunque-percutor debe estar hecho de acero pulido o un material similar.

3.1.3.a Percutor. El percutor debe tener la geometría mostrada en la Figura 3, la longitud h_1 debe ser de $(160 + 2)$ mm, mientras que el ancho h_2 debe ser de $(50 + 1)$ mm y el radio R de $(12,5 + 0,1)$ mm. La masa guiada y el percutor en conjunto han de tener una masa de 5 kg y su energía cinética en el impacto será de 50 J. En el ensayo, esta masa se deja caer de una altura de 1 m.

Figura 3

Geometría del Percutor

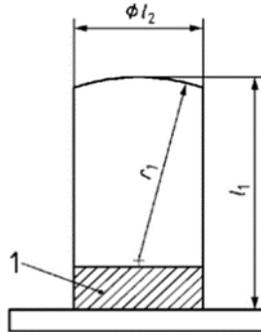


Nota. La figura muestra las dimensiones establecidas por la norma para el percutor.

3.1.3.b Yunque. El yunque debe tener la geometría descrita en la Figura 4, y las siguientes dimensiones: altura h_1 de $(190+20)$ mm, diámetro l_2 $(100 + 2)$ mm y radio r_1 de $(150 + 5)$ mm.

Figura 4

Geometría del Yunque



Nota. Esta figura muestra las dimensiones establecidas por la norma para el diseño del yunque, sobre el cual se pondrá el protector.

3.1.4 Número de ensayos

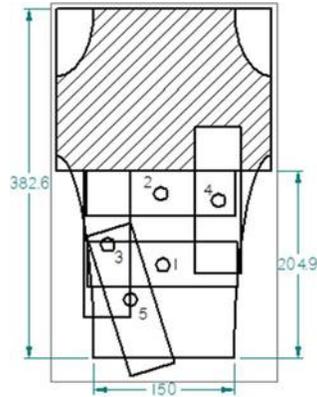
Se deben realizar cinco impactos sobre cada muestra de ensayo. Tres impactos se distribuyen aleatoriamente y dos impactos sobre las zonas que visualmente se identifiquen como las más débiles, tal como las zonas de impacto 2 y 3 (ver Figura 5). Los centros de impacto deben quedar a más de 5 cm entre ellos.

Para los impactos se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Condición 1: Impacto al menos a 9 cm del eje longitudinal dentro de la zona de la plantilla.
- Condición 2: El punto central del percutor de barra debe estar separado un centímetro o más del borde de la zona de protección.
- Condición 3: Los centros de los impactos deben estar separados entre sí más de 50 mm.

Figura 5

Posición de los Puntos de Impacto



Nota. En la figura se observan los puntos de impacto numerados al lado del centro geométrico del percutor.

En esta Figura es importante aclarar que las líneas diagonales simbolizan una sección cortada del protector para reducir el tamaño a simular y a la vez los tiempos de simulación en el software ANSYS. Este corte no interfiere en los resultados ya que tiene un área donde el percutor no sobresale por alguno de los lados.

Tabla 3

Coordenadas de Impactos

Posición Percutor	Centro Geométrico Percutor		Condición 1	Condición 2	Condición 3
	X (mm)	Y (mm)			
1	0	102,36	SI	SI	SI
2	0	180,27	SI	SI	SI
3	58,39	172,89	SI	SI	SI
4	60,04	124,51	SI	SI	SI
5	35,54	64,39	SI	SI	SI

Nota. En la Tabla se registran los puntos de impacto tomando como punto de referencia la mitad inferior del protector. En esta se observa que se cumplen las condiciones previamente establecidas.

3.1.5 Ensayos

Los ensayos de impacto se realizan a temperatura ambiente. El material se acondiciona durante 48 horas o más en un ambiente con temperatura de 23°C y una humedad relativa de 50%, junto a otras consideraciones que pueden ser referidas en la Norma.

3.2 Figuras geométricas para protectores

En el presente apartado se procede a seleccionar geometrías de estudios realizados en áreas diferentes a la de protección en motociclistas, debido a que usualmente los protectores ofrecidos para motociclistas se realizan en espuma o en polipropileno sin ninguna estructura interna y en donde se busca demostrar que el uso de estas estructuras, utilizadas en otras áreas e incluso en la naturaleza [18], son más eficientes a la hora de disipar la energía. Por lo tanto, se procede a seleccionar las geometrías descritas a continuación.

3.2.1 Figuras geométricas

Uno de los aspectos más importantes a considerar para desarrollar este estudio, es la selección de las Figuras geométricas que sirven de soporte estructural, ya que, dependiendo de la Figura escogida, habrá mayor o menor concentración o dispersión de la energía generada en los impactos. Las Figuras con arcos han demostrado ser útiles para la dispersión de energía en impactos [18], [22], mientras que las Figuras con vértices y/o ángulos demasiado pronunciados, tienen puntos concentradores de esfuerzos, que resultan adversos para la persona a proteger, ya que, en vez de deformarse y dispersar la energía del impacto, llegan a colapsar en estos vértices o ángulos pronunciados [25], lo cual no permite la dispersión de la energía del impacto. Adicionalmente, con estas con Figuras geométricas se busca la presencia de arcos en forma explícita, por ejemplo, en un círculo, o de forma implícita, por ejemplo, en un octágono, donde el arco está seccionado en varias aristas, tal como se observa en el estudio realizado por Seung- Yeol et al. [20], donde la energía de impacto es dispersada por los vértices del octágono, llegando a disipar un máximo de alrededor de 3 kJ en un protector de espalda.

Por lo anterior, para el diseño de las estructuras del espaldar de este estudio, se han escogido las siguientes Figuras geométricas: círculo, octágono y óvalo, cuyas características y propiedades se describen a continuación, y se espera que su uso permita que las estructuras sean capaces de atenuar la energía de los impactos establecidos por la Norma EN 1621-2, para así transmitir una cantidad de energía igual o menor a la mencionada por dicha Norma.

3.2.1.a Círculo. El círculo es una Figura geométrica que consiste de una curva cerrada cuyos puntos tienen la misma distancia al centro, lo cual, aunque sea obvio, es un detalle importante ya que por ende se puede confirmar la presencia de arcos en esta Figura, los cuales permiten la dispersión la energía de impactos al distribuir la energía del impacto de forma homogénea en la superficie de la Figura. Esto se puede observar en el sistema de protección vial "REACT® M" de la empresa Valtir [23]. Este sistema usa un conjunto de cilindros conectados entre sí por cuerdas de alambre de acero, lo que evita la separación de estos cilindros, los cuales a su vez se encuentran alineado por un riel fijado en el suelo, para así dar soporte a los cilindros y asegurar que la energía del impacto se distribuya entre los cilindros presentes en este sistema (Figura 6). Una representación visual de la deformación de una estructura diseñada con círculos se presenta en la Figura 7.

Figura 6

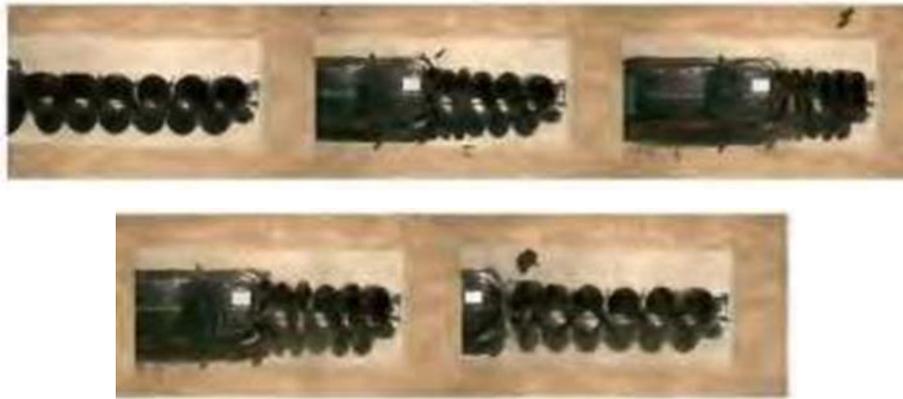
*Sistema de protección vial React M
(Valtir)*



Nota. La Figura muestra los cilindros de HDPE interconectados por cables de acero. Este conjunto está fijado a la superficie mediante soportes fijos a los extremos de los cables de acero. Tomado de: Valtir, "REACT® M". Disponible: <https://www.valtir.com/product/react-m/>

Figura 7

Secuencia de deformación de una estructura diseñada con círculos

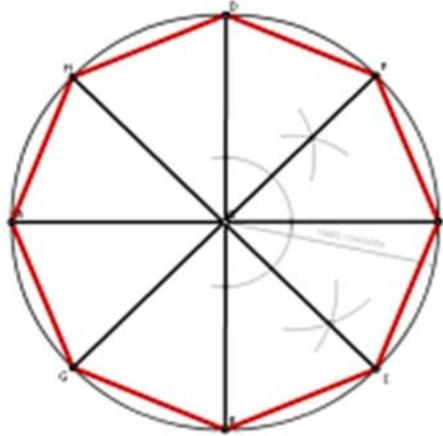


Nota. En la secuencia se observa a un vehículo colisionando con el sistema React M, el cual se deforma para dispersar la energía del impacto. Tomado de: U.S Department Of Transportation. Disponible: https://safety.fhwa.dot.gov/roadway_dept/countermeasures/reduce_cras_h_severity/barriers/pdf/cc169.pdf

3.2.1.b Octágono. Esta Figura geométrica consiste de 8 lados y 8 ángulos iguales, y puede ser obtenida dividiendo una circunferencia en 8 partes iguales y uniendo estos vértices resultantes, ya que contiene arcos de forma implícita (ver Figura 8), que es uno de los criterios considerados para seleccionar la Figura geométrica. Además, al tener caras planas, al momento de unir varias de estas Figuras unajunto a otra, pueden contener de mejor forma la energía del impacto, haciendo que entre las caras soporte (caras superiores e inferiores) se distribuya la energía del impacto y que parte de esta energía llegue a las caras laterales, para así contrarrestar el impacto con las otras caras laterales colindantes, tal como se muestra en la estructura de Figura 9, la cual se usa para una espuma anti choque. Una representación visual de la deformación de una estructura diseñada con octágonos se presenta en la Figura 10.

Figura 8

Octágono circunscrito en una circunferencia

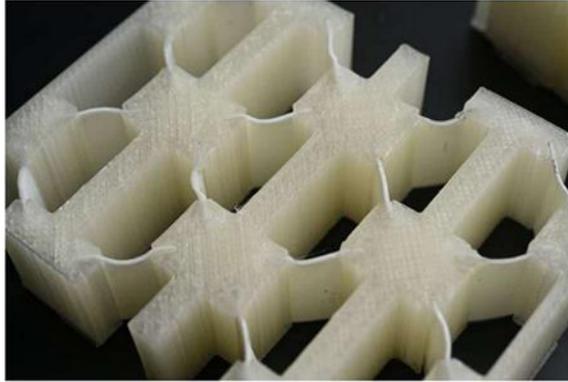


Nota. En la Figura se observa un octágono circunscrito, en el cual se ve como entre cada arista hay un arco ligeramente pronunciado. Tomado de: Profesor de Dibujo, “Octógono dada la medida del Lado”. Disponible:

<https://www.profesordedibujo.com/geometria-plana/poligonos/a-partir-de-un-lado/octogono-dada-la-medida-del-lado/>

Figura 9

Estructura octagonal para atenuación de impactos



Nota. La imagen muestra la estructura octagonal de una espuma diseñada por la universidad John Hopkins. Tomado de: phys.org, “Shock-absorbing material could lead to stronger, lighter and safer helmets and vehicles”. Disponible: <https://phys.org/news/2022-03-shock-absorbing-material-stronger-lighter-safer.html>

Figura 10

Deformación de una estructura diseñada con octágonos (percutor, estructura octagonal, yunque)



Nota. La secuencia de imágenes muestra la deformación de la estructura octagonal (en este caso se divide la estructura a la mitad). Tomado de: phys.org, “Shock-absorbing material could lead to stronger, lighter and safer helmets and vehicles”. Disponible: <https://phys.org/news/2022-03-shock-absorbing-material-stronger-lighter-safer.html>

3.2.1.c Óvalo. El óvalo es una Figura geométrica que consiste de una curva cerrada, en la cual no todos los puntos equidistan del centro, donde se puede identificar que esta Figura contiene dos grandes arcos de forma explícita. Esto la hace ideal para el presente estudio, pues al tener más pronunciados sus extremos laterales, puede contener el impacto colindando con los otros óvalos. De igual manera, esta Figura ha demostrado ser efectiva para dispersar la energía de impactos, como por ejemplo en el sistema “Scorpion II” de la marca “TraFFix Devices” [26] el cual consiste de dos óvalos de diferentes tamaños (ver Figura 11), los cuales se deforman para así dispersar la energía del impacto.

Figura 11

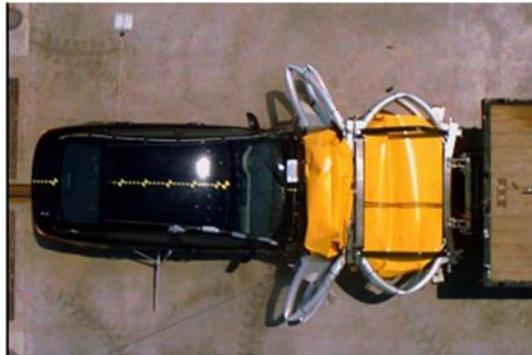
Sistema “Scorpion II” (TraFFix Devices)



Nota. En la Figura se observa el dispositivo "Scorpion II", el cual se compone de dos óvalos en acero, los cuales dispersan la energía del impacto. Tomado de: traffix devices, “Manual for Assessing Safety Hardware”. Disponible: <https://www.traffixdevices.com/products/attenuators/scorpion2-tma>

Figura 12

Deformación de una estructura diseñada con óvalos



Nota. En la Figura se observa un vehículo impactando el sistema "Scorpion II", el cual se deforma ante el impacto, dispersando la energía del mismo. Tomado de: traffix devices, "Manual for Assessing Safety Hardware". Disponible: <https://www.traffixdevices.com/products/attenuators/scorpion2-tma>

3.3 Materiales

3.3.1 Generalidades

Actualmente los materiales utilizados para la producción de protectores de espalda para motociclistas son tipo espuma, formados para adaptarse ergonómicamente al individuo que porte este elemento, ya sea incorporado en el torso de alguna prenda de vestir, por ejemplo, una chaqueta o chaleco, o incorporado exclusivamente en un chaleco diseñado para este propósito [4]. El uso comercial de estos materiales se muestra en los ejemplos descritos a continuación.

- **Protector rígido elaborado en polipropileno 1** (ver Figura 13), el cual cumple con el nivel 2 de protección establecido por la norma. Este protector es ampliamente utilizado para practicar deportes de motor debido a su factor de protección, ya que no tiene puntos articulados o significativamente más débiles, evitando así que el protector tenga algún tipo de torsión.

Figura 13

Protector rígido elaborado en polipropileno (1)



Nota. Alpinestars Nucleon KR-2iBack Protector Insert. Tomado de: revzilla. Disponible: <https://www.revzilla.com/motorcycle/alpinestars-nucleon-back-protector-insert>

- **Protector rígido elaborado en polipropileno 2** (ver Figura 14), este protector cumple con el nivel de protección 2, por lo cual se usa en el ámbito deportivo, y a diferencia del anterior, éste busca cubrir una mayor área de la espalda y proporcionar comodidad a través de articulaciones que permiten cierta flexión de la espalda al motociclista, pero no la suficiente como para evitar una torsión que pueda lesionar al individuo.

Figura 14

Protector rígido elaborado en polipropileno

(2)



Nota. Unisex Back Protector Version 59 Company 2
Manis Ducati Par Dainese, Tomado de: revzilla.
Disponible: <https://www.revzilla.com/motorcycle/alpinestars-nucleon-back-protector-insert>

- **Placas articuladas** (ver Figura 15) fabricadas en su mayoría con polipropileno extruido e integrando en su interior algún material tipo espuma, lo cual resulta en una mayor comodidad para el motociclista y puede cubrir una mayor área debido a que la espuma puede llegar a aquellas áreas donde el material rígido pueda resultar incómodo para la persona.

Figura 15

Placa articulada en polipropileno y espuma



Nota. Dainese tipo 11 D1 WaveAir Back Protector
Tomado de: Amazon. Disponible:
<https://www.amazon.com/-/es/Dainese-tipo-Wave-Protector-NEGRO/dp/B00W1WUKVY>

- **Protector en espuma** (ver Figura 16), protector en espuma que también cumple y en este caso busca exceder el nivel 2 de protección de la norma, sin embargo, al ser de espuma no evita la torsión de la espalda del usuario, lo cual no es deseable al momento de un impacto.

Figura 16

Protector en espuma D3O



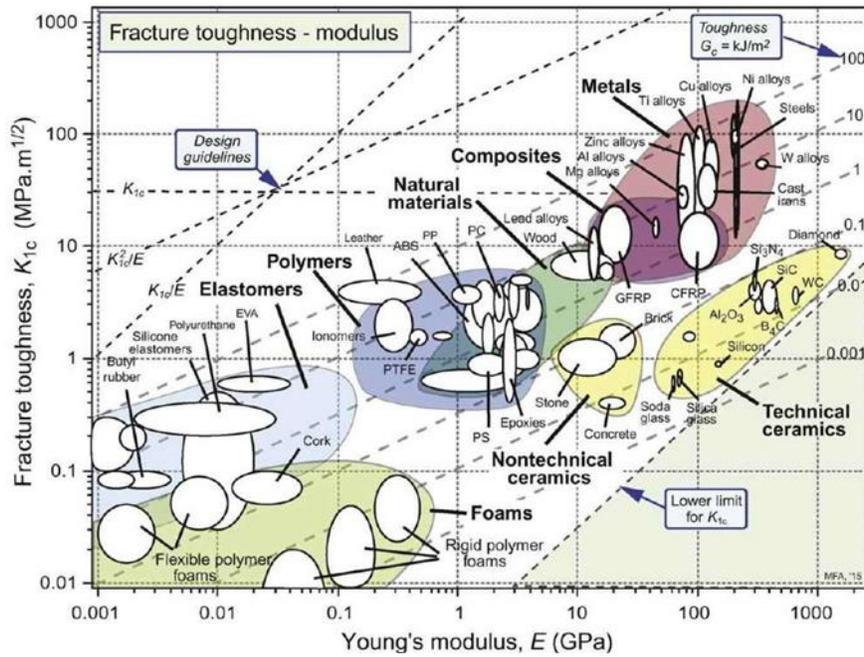
Nota. Protector de Espalda Viper Pro
Tomado de: D3O®. Disponible:
<https://www.d3o.com/partner-support/products/viper-pro-back-protector/>

3.3.2 *Materiales propuestos para el estudio*

En la actualidad, varios de los protectores de motociclistas se fabrican de espumas y estructuras de polipropileno. Siguiendo esta misma ruta se busca que el material propuesto para los nuevos diseños se encuentre en el rango de los polímeros, pues presentan un módulo de Young intermedio lo que permite cierto rango de deformación elástica, mayor que la de un metal, y que será más cómoda cuando se use sobre la espalda. Además, materiales como el policarbonato (utilizado en este trabajo), de acuerdo al diagrama de Ashby mostrado en la Figura 17, tiene de los más altos valores de tenacidad de fractura dentro de los polímeros lo que indica que será menos propenso a la fractura frágil. Además, datos de la literatura muestran que la tenacidad a la fractura del HDPE está entre 1 y 2 MPa*m^{0.5} [27], mientras que su módulo de Young alcanza los 1000 MPa [28], que son valores próximos al policarbonato (PC) aunque un poco menores, sin embargo, este material es menos costoso por lo que se consideró su selección para su estudio.

Figura 17

Mapa de Ashby. Módulo de Young – Tenacidad a la Fractura

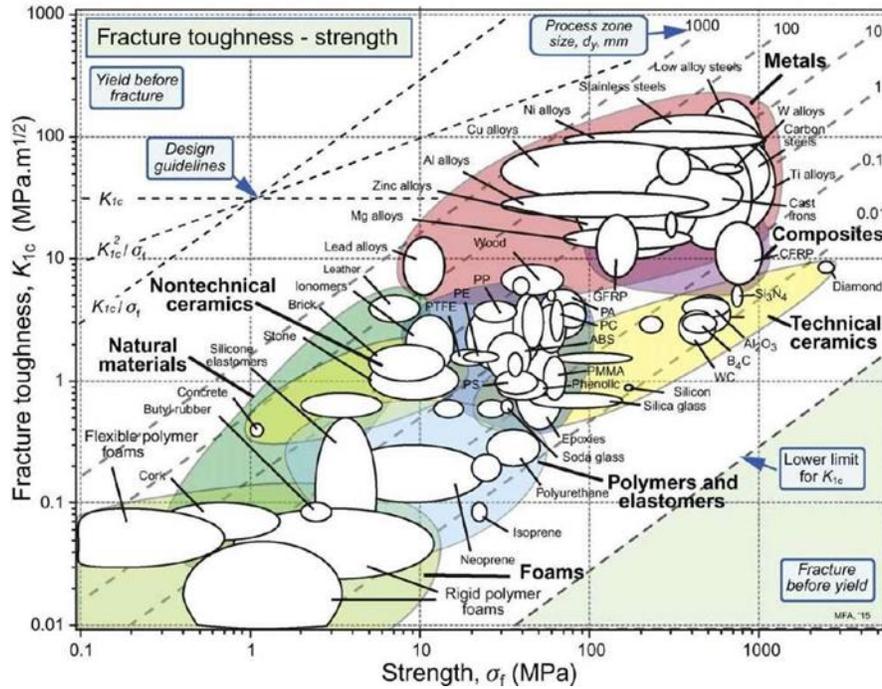


Nota. Este mapa permite escoger materiales dentro de un rango de módulo de Youngo tenacidad a la fractura según criterio.

Por otra parte, también se consideró usar fibra de carbono, ya que a pesar de ser más costoso que los materiales anteriores, en el diagrama de Ashby de la Figura 18 se nota que tiene una tenacidad a la fractura elevada, además de una alta resistencia, aunque, su módulo de Young es relativamente alto, lo que puede representar un problema de comodidad a la hora de vestir el protector pues es más rígido. Sin embargo, por su alta resistencia respecto a los polímeros (Figura 18) se decidió usar en este trabajo.

Figura 18

Mapa de Ashby. Resistencia – Tenacidad a la Fractura

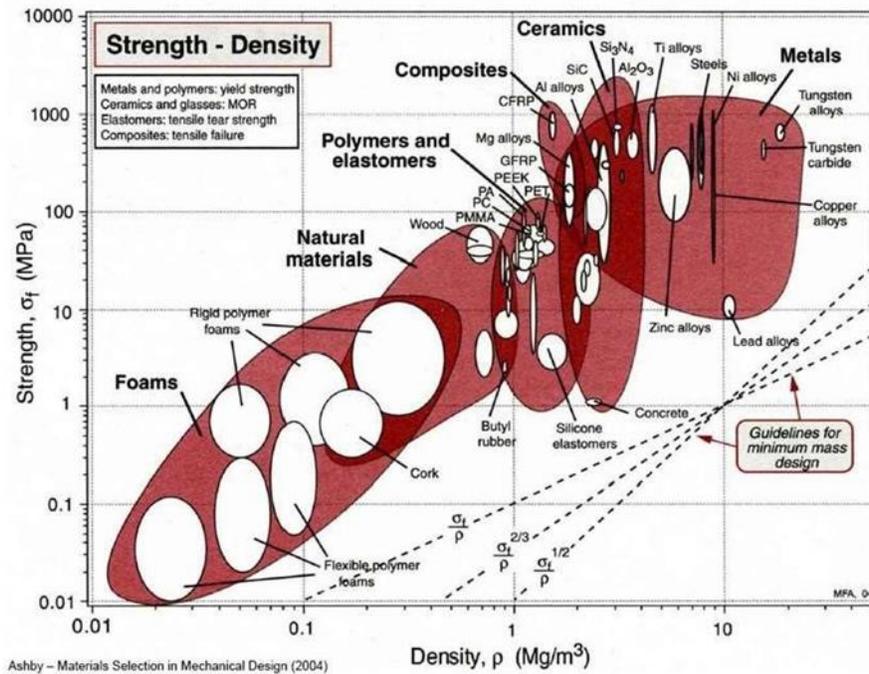


Nota. Este mapa permite escoger materiales dentro de un rango de resistencia y tenacidad a la fractura según criterio.

Otro criterio de relevancia para la selección de estos materiales es su densidad, ya que estos materiales han de ser ligeros, pero a su vez resistentes, por lo cual se observa que los polímeros y los materiales compuestos entran en este rango, al tener una densidad intermedia entre materiales tan ligeros como las espumas o materiales ya mucho más pesados y por ende incómodos para el usuario como lo son los metales, (Figura 19).

Figura 19

Mapa de Ashby. Densidad - Resistencia



Nota. Este mapa permite escoger materiales dentro de un rango de densidad o límite elástico según criterio.

Por lo anterior se seleccionan los materiales que se describen a continuación.

3.3.2.a Fibra de Carbono (FC). Se propone la fibra de carbono en forma de tejido, ya que tiene una resistencia a la tracción alta (894 MPa aprox.) y una baja densidad (1750 kg/m^3), lo que resulta en un elemento ligero con alta resistencia a cargas.

Adicionalmente, este material se usa para la atenuación de impactos en vehículos de carreras. Esto fue verificado en el estudio realizado por Correa [9] en el cual se diseñó y simuló de forma computacional una estructura rectangular hueca acompañada de arcos, hecha en fibra de carbono, y se comprobó que atenuaba el impacto satisfactoriamente, al colapsar proporcionalmente al impacto, debido a su forma geométrica (ver propiedades anexo 1).

3.3.2.b Policarbonato (PC). El policarbonato es un polímero con una menor resistencia al impacto respecto a la fibra de carbono, pero con otras propiedades que compensan esta desventaja, ya que a pesar de tener una resistencia a la tracción de solo 70 MPa, tiene una elongación de un 95%, con una densidad de apenas 1200 kg/m³. Esta elongación puede permitir que el protector sufra deformaciones que dispersen la energía del impacto, lo cual convierte a este material en una buena opción para el diseño del protector. (Ver propiedades anexo 3)

Este material es ampliamente usado para la protección contra impactos en escudos antidisturbios o visores para fuerzas armadas, o en visores y gafas que deban ser lo suficientemente flexibles y resistentes para dispersar la energía de impactos en deportes como el motociclismo y el ciclismo, o deportes que involucren algún riesgo para el rostro como el tiro olímpico.

3.3.2.c Polietileno de Alta Densidad (HDPE). El polietileno de alta densidad, al igual que el policarbonato, es un polímero, el cual a pesar de tener una resistencia al impacto de 26 MPa, posee una gran capacidad de elongación (590%), y una densidad de apenas 905 kg/m³, lo cual significa que es un material ligero y flexible. (Ver propiedades anexo 5)

Este material es ampliamente usado para el empaquetado de alimentos, y en los sistemas de barreras viales para la atenuación de impactos en autopistas, como por ejemplo en los sistemas React M y Quadguard de la empresa Valtir, [23], [29] en los cuales se usan cartuchos para absorber o dispersar la energía de un impacto, según el diseño del sistema.

De acuerdo con las características mencionadas para cada uno de los materiales propuestos (FC, PC y HDPE) y su aplicación en diferentes sistemas de protección, se observa que los materiales escogidos tienen propiedades de flexibilidad, elongación, resistencia a la tracción, etc., las cuales resultan de vital importancia para dispersar la energía del impacto, evitando que se produzcan efectos indeseados, como esquirlas y/o acumulación de calor, los cuales pueden ocurrir si se utilizaran materiales rígidos como metales (tales como el acero templado), o plásticos rígidos (ejemplo, PVC), los cuales pueden ser demasiado rígidos y no dispersar la energía necesaria para proteger del impacto o quebrarse en esquirlas que puedan hacer daño al usuario.

Los materiales seleccionados, además de tener la capacidad de dispersar la energía de impactos, evitan efectos indeseados al mantener su integridad después de su ruptura, por ejemplo, en la fibra de carbono las esquirlas son contenidas por su estructura fibrosa y la resina presente, o en los polímeros escogidos (PC y HDPE), los cuales, al llegar a su elongación máxima, sólo pierden su

forma original. Adicionalmente, los materiales escogidos no acumulan calor en exceso que incomode o lastime al motociclista en caso de que las condiciones climáticas varíen, lo cual es un parámetro importante a tener en cuenta en la selección, ya que se buscan materiales que puedan adaptarse al usuario.

4. METODOLOGÍA

4.1 Generación de la geometría

En este apartado se describe la geometría de los elementos yunque y percutor, los cuales se diseñaron siguiendo los requerimientos de la norma, según las Figuras 3 y 4, en las cuales se describen sus dimensiones. Además, la Tabla 4 muestra la geometría empleada al interior del protector. En los anexos 13 y 14 se adjuntan los planos de las estructuras de protectores diseñadas.

Tabla 4

Secciones transversales de los protectores diseñados

Figura	Sección transversal
Circulo	
Octágono	
Ovalo	

Nota. En la Tabla se observa la sección transversal de los protectores diseñados según la geometría asignada

4.2 Generación de la malla

Esta sección se describen los tipos de geometría utilizados, ya que dependiendo del material a analizar es necesario saber elegir el tipo de geometría adecuado, o de lo contrario puede haber imprecisiones en la simulación. Para estas simulaciones se usan dos tipos de geometría: geometría tipo carcasa (*Shell*), para la fibra de carbono, que se simula capa a capa con diferentes propiedades, y la geometría tipo sólido (*Solid*), para los polímeros, los cuales se simulan con propiedades isotrópicas.

- **Geometría “Shell”**, se usa para modelar y simular estructuras delgadas (donde una de las dimensiones es notoriamente más pequeña que las otras dos dimensiones). Esta geometría tipo “Shell” trabaja con el concepto de sección por capas “layered section”, el cual permite al momento de construir un elemento con fibras (en este caso de carbono), crear un emparedado de capas, a las cuales se les puede asignar ángulo y espesor de forma independiente, como se verá más adelante en el caso puntual mencionado.

Los elementos de la geometría Shell permiten determinar la deformación en la dirección normal a la superficie y a lo largo de la superficie, por lo cual funcionan bastante bien para el diseño y simulación de la estructura en fibra de carbono, ya que al definir ciertas propiedades como el espesor de cada capa para construir el protector y sus direcciones, las cuales se definen en grados de inclinación, permiten simular el comportamiento del impacto contra estas superficies.

- **Geometría “Solid”**, es una clase de geometría usada de forma general para modelar cualquier objeto, partiendo desde Figuras geométricas tridimensionales básicas como cubos, esferas, ovoides y otros, a los cuales se les pueden aplicar operaciones como vaciados, para crear cascarones. Esta clase de geometría permite la asignación de un solo material de forma homogénea, contrario a la geometría “Shell”, por lo cual se selecciona esta geometría para analizar los polímeros de este estudio (PC y HDPE), ya que estos materiales se pueden modelar como materiales isotrópicos. Del mismo modo, esta geometría se usará para construir el sistema yunque-percutor en acero pulido, con el que se simulará el protector.

Ya definidos estos tipos de geometría se asigna el tipo de geometría más adecuado de acuerdo al material propuesto, tal como se muestra en la siguiente Tabla:

Tabla 5

Lista de geometrías generadas según Figura geométrica y material propuesto

Geometría Generada	Figura Geométrica	Material(es)
Shell	Círculo	FC
Solid	Círculo	PC, HDPE
Shell	Octágono	FC
Solid	Octágono	PC, HDPE
Shell	Óvalo	FC
Solid	Óvalo	PC, HDPE
Solid	*Sistema Yunque-Percutor	Acero pulido o similar

Nota. En la Tabla se muestra el tipo de geometría asignado a los protectores según material. Se observa que para la obra de carbono se utiliza la geometría “Shell”.

4.2.1 Enmallado

Para el análisis de los sólidos o superficies, a estos elementos se les hace una discretización, que consiste en dividirlos en partes más pequeñas (llamados elementos) que pueden tener los siguientes cuerpos geométricos: tetraedros, hexaedros, pirámides y prismas (ver Figura 20)

Figura 20

Opciones de elementos tridimensionales para enmallado.



Nota. Figuras utilizadas para el enmallado de los elementos a simular en el módulo Explicit Dynamics. Tomado de: Universitat Politècnica De València, “Diseño De Un Elemento De Protección De Espalda Para Motociclistas”. Disponible: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/76178/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

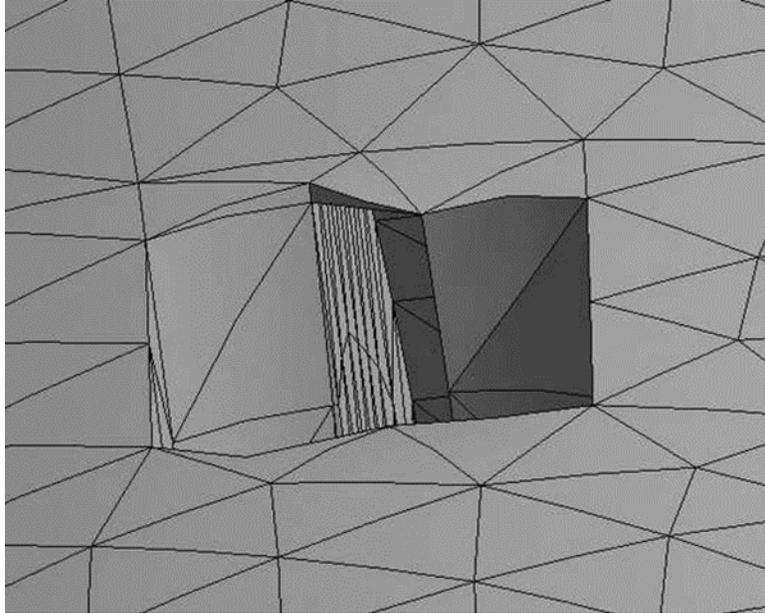
4.2.2 Generación de malla

Para simular de forma precisa y rápida, es necesario establecer un tamaño de malla intermedio, ya que entre más pequeño el tamaño de cada elemento, la simulación será más precisa, pero tomará un tiempo mayor, y en caso contrario, un tamaño demasiado grande disminuye la precisión de la simulación. Es importante aclarar que al usar la versión estudiantil de ANSYS Workbench, el sistema limita el número de nodos y elementos a 120.000.

Esta relación entre el tamaño de elemento y la precisión de la simulación se relaciona a través del concepto “Calidad de malla”, el cual mide diferentes atributos de la malla, como lo son la distribución de los nodos, la fluidez de la malla y la simetría de la misma. En la Figura 20 se observan los elementos en que se divide la geometría a analizar, los cuales al ser muy grandes se pueden llegar a deformar generando una malla con bastantes sobresaltos, lo cual a su vez deriva en una malla poco fluida [30], tal como se observa en la Figura 21, mientras que un tamaño de elemento más pequeño permite generar un enmallado más uniforme, como el mostrado en la Figura 22.

Figura 21

Elemento con baja calidad de malla

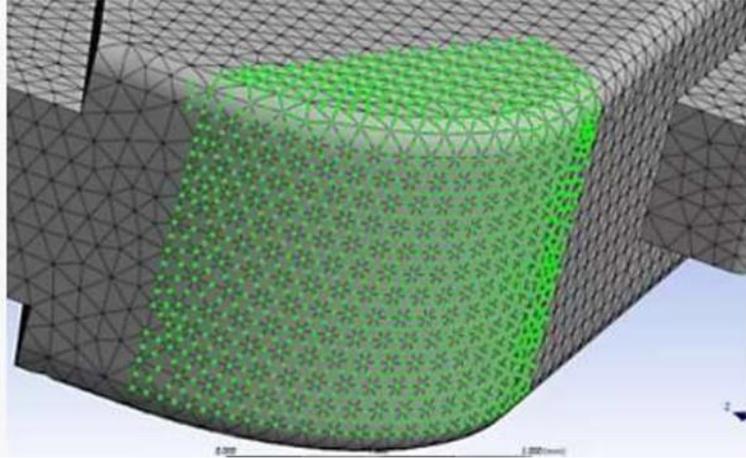


Nota. En el elemento se observa como en un punto, los triángulos en que se divide el elemento se empiezan a estirar y dejan de tener el mismo ángulo entre aristas. Fuente:

<https://forum.ansys.com/forums/topic/mesh-fail-why/>

Figura 22

Elemento con alta calidad de malla.



Nota. En el elemento se observa como en un punto, los triángulos en que se divide el elemento se empiezan a estirar y dejan de tener el mismo ángulo entre aristas. Fuente:

<https://forum.ansys.com/forums/topic/mesh-fail-why/>

Igualmente, para medir esta calidad de malla, el software resalta con colores los siguientes parámetros:

Calidad Mínima del Elemento (Minimum Element Quality):

Medida de la proporción del volumen de cada elemento escogido para el enmallado (Figura 20). Este criterio indica la proporción de pérdida de volumen de cada una de estas Figuras, indicando con un valor de 1, un elemento sin pérdida de volumen y 0 un elemento con pérdida total o negativa de volumen.

Proporción Máxima de Aspecto (Maximum Aspect Ratio):

Esta proporción relaciona la altura con el ancho de un triángulo, pudiendo tener un valor de 1 a infinito. En la Figura 23 se puede observar esta proporción en diferentes triángulos.

Figura 23

Triángulos con diferentes proporciones de aspecto



Nota. En la Figura se observa un triángulo con una proporción de 1 y a su lado un triángulo con una proporción de 20. Fuente: <https://featips.com/2022/11/21/ansys-mesh-metrics-explained/>

Dependiendo del elemento a enmallar, el programa indicara el valor máximo aceptable para simular de forma precisa.

Longitud característica mínima (Minimum Characteristic Length):

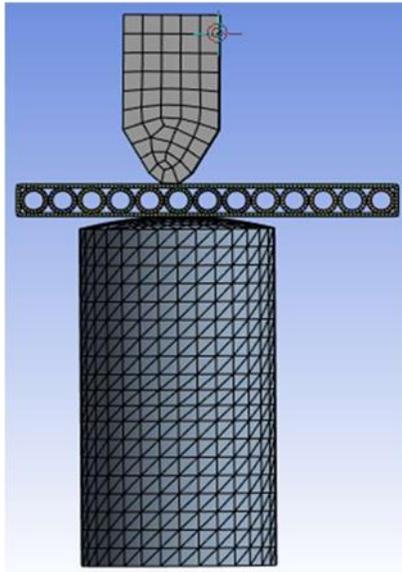
Este criterio es la proporción entre el volumen de cada elemento y su superficie, medida que es utilizada por el programa para establecer si un elemento tiene un tamaño óptimo o aceptable para recibir fuerzas en todas sus caras, ya que algunos elementos pueden tener una o más caras demasiado pequeñas o grandes, lo cual puede hacer que el sistema aplique y transmita las fuerzas de forma incorrecta. Este tamaño dependerá del elemento a enmallar y la medida asignada a cada elemento [31].

Los criterios mencionados son resaltados en colores por el programa, siendo verde una calidad óptima de enmallado, amarillo una calidad intermedia y rojo una calidad que no asegura precisión o que el sistema no permitirá simular. Por lo cual se puede determinar con facilidad la calidad de enmallado de cada elemento.

En el caso de estos elementos, al ser Figuras relativamente complejas, se deja por defecto la opción “Use Geometry Settings”, la cual establece el mejor elemento para dividir el elemento a analizar, tal como se observa en la Figura 24.

Figura 24

*Ejemplo de enmallado en
Explicit Dynamics*



Nota. En la Figura se observa el conjunto yunque percutor con el protector en medio ya enmallados.

A continuación, se describe el proceso de generación de malla, el cual consiste en dividir en partes más pequeñas cada elemento geométrico y que es necesario en la aplicación del método de elementos finitos ya implementado en el módulo de “Explicit Dynamics” de ANSYS. Es importante tener en cuenta que la discretización debe hacerse de la manera más uniforme posible, ya que de lo contrario se pueden obtener resultados erróneos. A continuación, se muestra el proceso para generar la malla de cada elemento a analizar; en las siguientes imágenes se podrá observar: a) el enmallado sobre las superficies expuestas a impacto, b) los parámetros de enmallado usados para cada elemento, y c) las métricas de calidad de enmallado (siendo verde bueno, y amarillo aceptable).

4.2.3 *Mallado del sistema percutor – yunque*

- **Mallado Percutor**

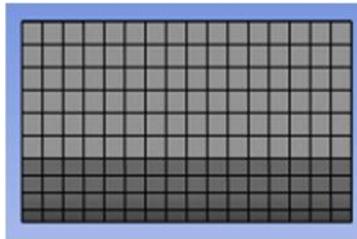
En la Figura 25, imagen (a), se puede observar como el percutor tiene un Enmallado uniforme sobre sus superficies expuestas al impacto. El tamaño establecido para cada elemento es de 10

mm, tal como se ve en la Figura (b) lo cual da una calidad de enmallado bastante alta para este elemento, ya que, al observar las estadísticas de calidad de enmallado, todas las casillas fueron evaluadas como estadísticas de buena calidad.

Figura 25

Enmallado Percutor

(a)



Nota. En las Figura se observa el enmallado del percutor en las zonas que tendrán contacto con otras superficies. Tamaño del elementode 10mm.

(b)

Mesh Quality Worksheet				
<input type="checkbox"/> Advanced View <input type="button" value="Reset"/> <input type="button" value="Load"/> <input type="button" value="Save"/>				
<input checked="" type="checkbox"/> Sheet		<input checked="" type="checkbox"/> Solid		
Error Check	Quality Criterion	Warning (Target) Limit	Error (Failure) Limit	Worst
<input checked="" type="checkbox"/>	Min Element Quality	Default (0,2)	Default (5e-04)	0,376
<input checked="" type="checkbox"/>	Max Aspect Ratio (Explicit)	Default (5)	Default (1000)	3,706
<input checked="" type="checkbox"/>	Min Characteristic Length (LS-DYNA)	1,205 mm	Default (0,1 mm)	2,612 mm
<input type="checkbox"/>	Min Tet Collapse	Default (0,1)	Default (1e-03)	0,351

Nota. Estadísticas de la calidad del enmallado, donde se ve que todas las estadísticas tienen un valor excelente para la simulación.

- **Enmallado del Yunque**

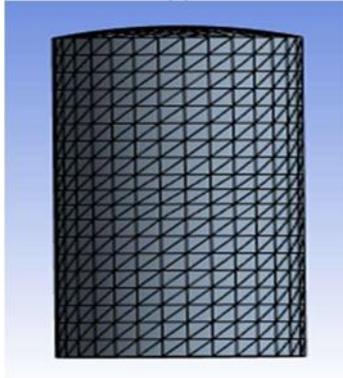
En la Figura 26, imágenes (a) y (b) se puede observar como el yunque al igual que el percutor, tiene un enmallado uniforme sobre sus superficies expuestas al impacto, esto debido a que el

tamaño de elemento establecido para los dos componentes es de 10 mm. La Figura 26 (c) muestra que la calidad de malla es adecuada para este componente.

Figura 26

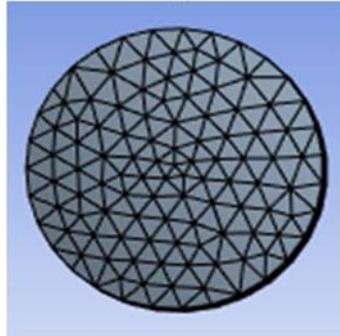
Enmallado Yunque

(a)



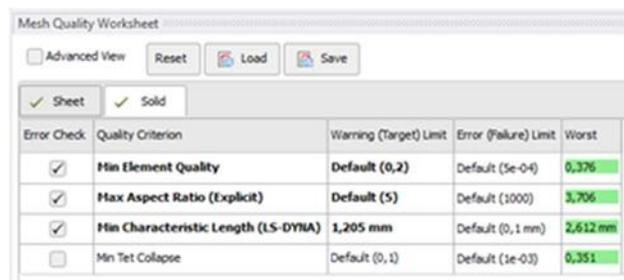
Nota. En las Figuras se observa el enmallado del yunque en las zonas que tendrán contacto con otras superficies. Tamaño del elemento de 10mm.

(b)



Nota. En las Figura se observa el enmallado del yunque en la zona superior, que tendrá contacto con otras superficies. Tamaño del elemento de 10mm.

(c)



Error Check	Quality Criterion	Warning (Target) Limit	Error (Failure) Limit	Worst
<input checked="" type="checkbox"/>	Min Element Quality	Default (0,2)	Default (5e-04)	0,376
<input checked="" type="checkbox"/>	Max Aspect Ratio (Explicit)	Default (5)	Default (1000)	3,706
<input checked="" type="checkbox"/>	Min Characteristic Length (LS-DYNA)	1,205 mm	Default (0,1 mm)	2,612 mm
<input type="checkbox"/>	Min Tet Collapse	Default (0,1)	Default (1e-03)	0,351

Nota. Estadísticas de la calidad del enmallado, donde se ve que todas las estadísticas tienen un valor adecuado para la simulación.

4.2.4 Enmallado tipo Shell

En el caso del enmallado “Shell” para todas las Figuras geométricas, se observa en sus superficies planas la uniformidad de la malla, con ciertos puntos que tienen imperfecciones, esto debido a las limitaciones del software, pues para estos se establece un tamaño de elemento de 2 mm, ya que, al hacerlo de un menor valor, se excede la cantidad de nodos permitida por el sistema. Es de aclarar, que esta restricción no impide la simulación del impacto ni afecta la calidad de la malla, tal como

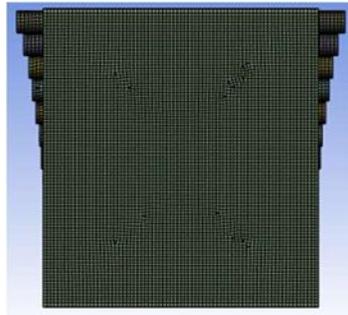
se observa en las estadísticas de enmallado, donde cada elemento se evaluó de manera positiva. En las Figuras 27 a 29 se observa que los enmallados no presentan

- **Enmallado Protector Shell Circular**

Figura 27

Enmallado ProtectorShell Circular

(a)



Nota. En las Figuras se observa el enmallado del Shell Circular en las zonas que tendrán contacto con otras superficies. Tamaño del elemento de 10mm.

(b)



Nota. En las Figura se observa el enmallado lateral del protector. Tamaño del elemento de 2mm.

(c)

Error Check	Quality Criterion	Warning (Target) Limit	Error (Failure) Limit	Worst
<input checked="" type="checkbox"/>	Min Element Quality	Default (0,2)	Default (5e-04)	0,376
<input checked="" type="checkbox"/>	Max Aspect Ratio (Explicit)	Default (5)	Default (1000)	3,706
<input checked="" type="checkbox"/>	Min Characteristic Length (LS-DYNA)	1,205 mm	Default (0,1 mm)	2,612 mm
<input type="checkbox"/>	Min Tet Collapse	Default (0,1)	Default (1e-03)	0,351

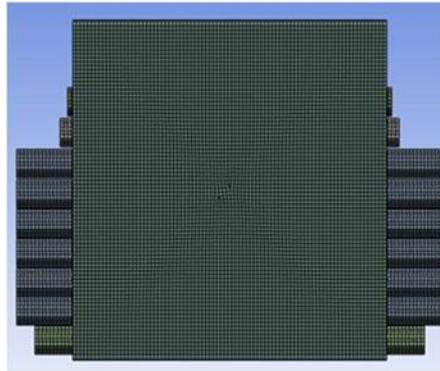
Nota. Estadísticas de la calidad del enmallado, donde se ve que todas las estadísticas tienen un valor excelente para la simulación

- **Enmallado Protector Shell Octagonal**

Figura 28

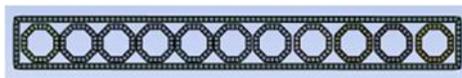
Enmallado Protector Shell Octagonal

(a)



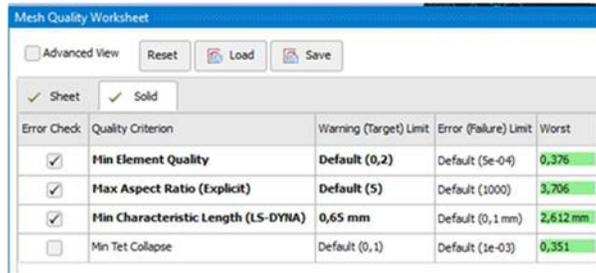
Nota. En las Figuras se observa el enmallado sobre las superficies y en los laterales del protector Shell. Tamaño del elemento de 2mm.

(b)



Nota. En las Figura se observa el enmallado lateral del protector. Tamaño del elemento de 2mm.

(c)



Error Check	Quality Criterion	Warning (Target) Limit	Error (Failure) Limit	Worst
<input checked="" type="checkbox"/>	Min Element Quality	Default (0,2)	Default (5e-04)	0,376
<input checked="" type="checkbox"/>	Max Aspect Ratio (Explicit)	Default (5)	Default (1000)	3,706
<input checked="" type="checkbox"/>	Min Characteristic Length (LS-DYNA)	0,65 mm	Default (0,1 mm)	2,612 mm
<input type="checkbox"/>	Min Tet Collapse	Default (0,1)	Default (1e-03)	0,351

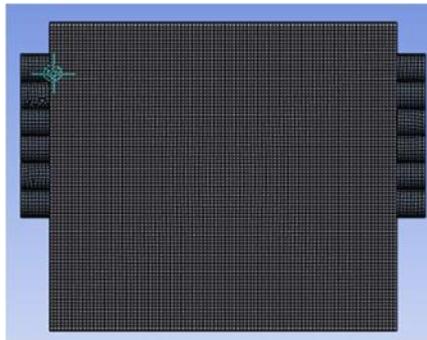
Nota. Estadísticas de la calidad del enmallado, donde se ve que todas las estadísticas tienen un valor excelente para la simulación.

- **Enmallado Protector Shell Ovalo**

Figura 29

Mallado Protector Shell Ovalo

(a)



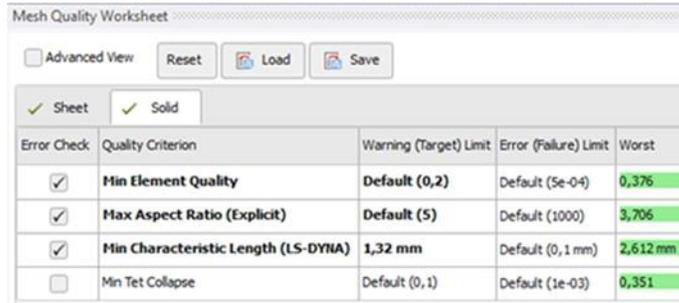
Nota. En las Figuras se observa el enmallado del Shell Ovalo en las zonas que tendrán contacto con otras superficies. Tamaño del elemento de 2mm.

(b)



Nota. En las Figuras se observa el enmallado del Shell Ovalo en las zonas que tendrán contacto con otras superficies. Tamaño del elemento de 2mm.

(c)



The screenshot shows the 'Mesh Quality Worksheet' window. It has a title bar, a toolbar with 'Advanced View' (unchecked), 'Reset', 'Load', and 'Save' buttons, and two tabs: 'Sheet' (checked) and 'Solid' (checked). Below the tabs is a table with the following data:

Error Check	Quality Criterion	Warning (Target) Limit	Error (Failure) Limit	Worst
<input checked="" type="checkbox"/>	Min Element Quality	Default (0,2)	Default (5e-04)	0,376
<input checked="" type="checkbox"/>	Max Aspect Ratio (Explicit)	Default (5)	Default (1000)	3,706
<input checked="" type="checkbox"/>	Min Characteristic Length (LS-DYNA)	1,32 mm	Default (0,1 mm)	2,612 mm
<input type="checkbox"/>	Min Tet Collapse	Default (0,1)	Default (1e-03)	0,351

Nota. Estadísticas de la calidad del enmallado, donde se ve que todas las estadísticas tienen un valor excelente para la simulación.

4.2.5 Enmallado Solid

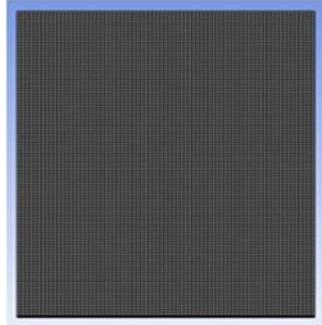
Para el caso de los protectores generados con geometría “Solid”, se encuentra un enmallado de buena calidad, con ciertas imperfecciones, tal como se ve en la vista lateral de cada geometría, ya que, al ser Solid, el enmallado encuentra dificultades al tener que encontrarse con una mayor cantidad de caras, y además se crean intersecciones entre las Figuras (círculos, octágonos u óvalos) y las superficies planas. Es de notar que esta reducción en la calidad del enmallado es aceptable, tal como se ve en las estadísticas del enmallado mostradas en la Figura 30 (c), por lo que se puede proceder a establecer los demás parámetros de simulación. Las Figuras 30 a 32 muestran el resultado del enmallado, donde se observa que los enmallados generados no presentan elementos de baja calidad que puedan afectar severamente al estudio, como los mostrados en la Figura 21.

- **Enmallado Protector Solid Círculo**

Figura 30

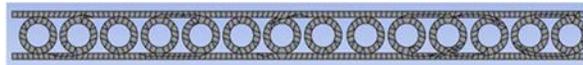
Enmallado Protector Solid Círculo

(a)



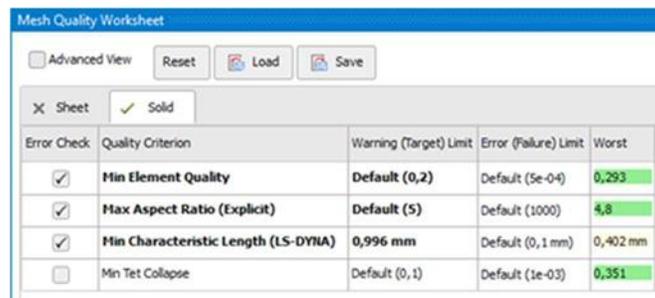
Nota. En las Figura se observa el enmallado del Solid Círculo en las zonas que tendrán contacto con otras superficies. Tamaño del elemento de 2mm.

(b)



Nota. Vista lateral del enmallado del Solid círculo

(c)



The screenshot shows a 'Mesh Quality Worksheet' window with a table of quality metrics. The table has five columns: 'Error Check', 'Quality Criterion', 'Warning (Target) Limit', 'Error (Failure) Limit', and 'Worst'. The 'Worst' column values are highlighted in green. The 'Solid' tab is selected.

Error Check	Quality Criterion	Warning (Target) Limit	Error (Failure) Limit	Worst
<input checked="" type="checkbox"/>	Min Element Quality	Default (0,2)	Default (5e-04)	0,293
<input checked="" type="checkbox"/>	Max Aspect Ratio (Explicit)	Default (5)	Default (1000)	4,8
<input checked="" type="checkbox"/>	Min Characteristic Length (LS-DYNA)	0,996 mm	Default (0,1 mm)	0,402 mm
<input type="checkbox"/>	Min Tet Collapse	Default (0,1)	Default (1e-03)	0,351

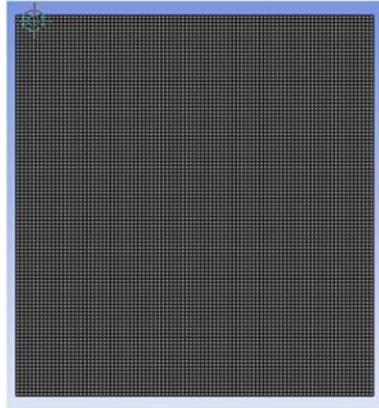
Nota. Estadísticas de la calidad del enmallado, donde se ve que todas las estadísticas tienen un valor excelente para la simulación

- **Enmallado Protector Solid Octágono**

Figura 31

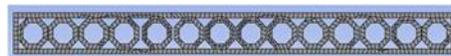
Enmallado Protector SolidOctágono

(a)



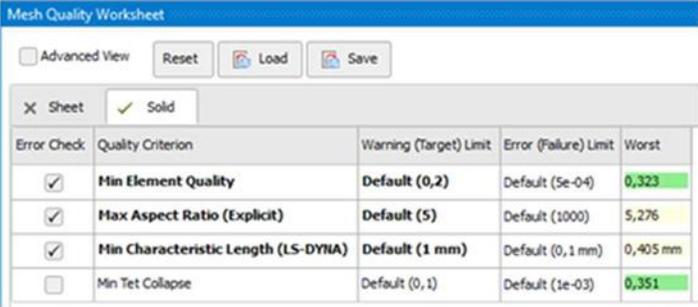
Nota. En las Figuras se observa el enmallado del Solid Octágono en las zonas que tendrán contacto con otras superficies. Tamaño del elemento de 2mm.

(b)



Nota. Vista lateral del enmallado del Solid octágono

(c)



The screenshot shows the 'Mesh Quality Worksheet' interface. It includes a header with 'Advanced View' (unchecked), 'Reset', 'Load', and 'Save' buttons. Below the header, there are tabs for 'Sheet' and 'Solid' (selected). The main content is a table with the following data:

Error Check	Quality Criterion	Warning (Target) Limit	Error (Failure) Limit	Worst
<input checked="" type="checkbox"/>	Min Element Quality	Default (0,2)	Default (5e-04)	0,323
<input checked="" type="checkbox"/>	Max Aspect Ratio (Explicit)	Default (5)	Default (1000)	5,276
<input checked="" type="checkbox"/>	Min Characteristic Length (LS-DYNA)	Default (1 mm)	Default (0,1 mm)	0,405 mm
<input type="checkbox"/>	Min Tet Collapse	Default (0,1)	Default (1e-03)	0,351

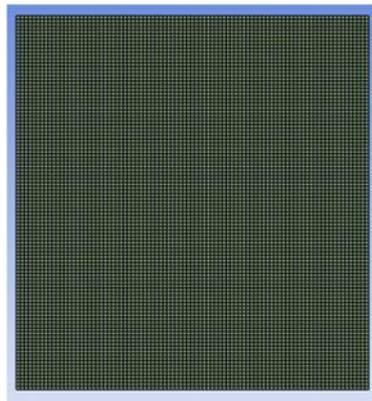
Nota. Estadísticas de la calidad del enmallado, donde se ve que todas las estadísticas tienen un valor excelente para la simulación.

- **Enmallado Protector Solid Ovalo**

Figura 32

Enmallado Protector SolidOvalo

(a)



Nota. En las Figuras se observa el enmallado del Solid Ovalo en las zonas que tendrán contacto con otras superficies. Tamaño del elemento de 2mm

(b)



Nota. Vista lateral del enmallado del Solid ovalo

(c)

Mesh Quality Worksheet

Advanced View

Sheet Solid

Error Check	Quality Criterion	Warning (Target) Limit	Error (Failure) Limit	Worst
<input checked="" type="checkbox"/>	Min Element Quality	Default (0,2)	Default (5e-04)	0,182
<input checked="" type="checkbox"/>	Max Aspect Ratio (Explicit)	Default (5)	Default (1000)	4,532
<input checked="" type="checkbox"/>	Min Characteristic Length (LS-DYNA)	Default (1 mm)	Default (0,1 mm)	0,292 mm
<input type="checkbox"/>	Min Tet Collapse	Default (0,1)	Default (1e-03)	0,351

Nota. Estadísticas de la calidad del enmallado, donde se ve que todas las estadísticas tienen un valor excelente para la simulación.

4.2.6 Configuración de la simulación

Generalidades

Para la simulación presentada en este documento se utilizará el módulo “Explicit Dynamics”, del software ANSYS Workbench, el cual consiste de los ítems mostrados en la Figura 33 y que se explicarán con mayor detalle a continuación

Figura 33

Explicit Dynamics – Partes de la Simulación

▼ A		
1	Explicit Dynamics	
2	Engineering Data ✓	
3	Geometry ✓	
4	Model ✓	
5	Setup ✓	
6	Solution ✓	
7	Results ✓	
Explicit Dynamics		

- “Engineering Data”: selección y/o edición de las propiedades de los materiales a usar en la simulación.
- “Geometry”: ingreso de la información del ensamble de la geometría, desarrollada en Solid Edge, que se analizará (en este caso se importa el conjunto yunque-percutor con el protector en medio), para luego definir las condiciones en el apartado
- “Model”: Entrada del modelo importado en “Geometry” para ser configurado en los siguientes apartados
- “Set Up”: proceso de mallado de los elementos a analizar y definición de las condiciones del problema.
- “Solution”: suministra los criterios de fallo a analizar y visualizarlos en
- “Results”: presenta los resultado de forma numérica (tabla) y visual (grafica) para los elementos analizados.

Nota. En la presente Figura se explican las secciones del módulo Explicit dynamics

4.2.7 Procedimientos de cálculo – variables

A continuación, se describen las variables utilizadas para poder simular el impacto según lo establecido por la Norma En 1621-2 en el módulo Explicit Dynamics:

- Selección y Edición de Materiales (Engineering Data)

La selección y edición de materiales se hace en este apartado, el cual provee diferentes librerías para escoger los materiales que serán asignados a los elementos que se simularán con sus respectivas propiedades y modelos de deformación en la mayoría de los materiales. Para el caso de la fibra de carbono y el policarbonato, este apartado provee la información necesaria para simular el impacto, pero en el caso del polietileno de alta densidad se hace necesario añadir un modelo de deformación, en este caso deformación plástica, ya que en este material este modelo no es provisto por el software.

Por lo anterior, para el polietileno de alta densidad se escoge el modelo de comportamiento plástico “Multilinear Isotropic Hardening” (Endurecimiento Isotrópico Multilinear), ya que es el modelo recomendado por el programa ANSYS Workbench [32] debido a que los otros modelos disponibles pueden llegar a simular el comportamiento después de la fractura del material, pero requieren la toma de datos experimentales que suelen estar disponibles para metales [33]. Este modelo toma la zona plástica de la gráfica esfuerzo-deformación del material, en la cual el material requiere un mayor esfuerzo para deformarse, hasta llegar al punto de ruptura del material, tal como se observa en el Anexo 6.

Para ingresar los datos en este modelo se debe proveer la información de deformación plástica-esfuerzo (Tabla 6). El primer punto de la curva debe ser el punto cero de la zona elástica, de aquí en adelante se pueden proveer los datos que se deseen siempre y cuando la pendiente al momento de graficar sea mayor a cero (Figura 34), por lo cual en la Tabla 6 fue necesario incrementar el valor del dato en el mínimo permitido por el programa.

Tabla 6

Deformación plástica – esfuerzo

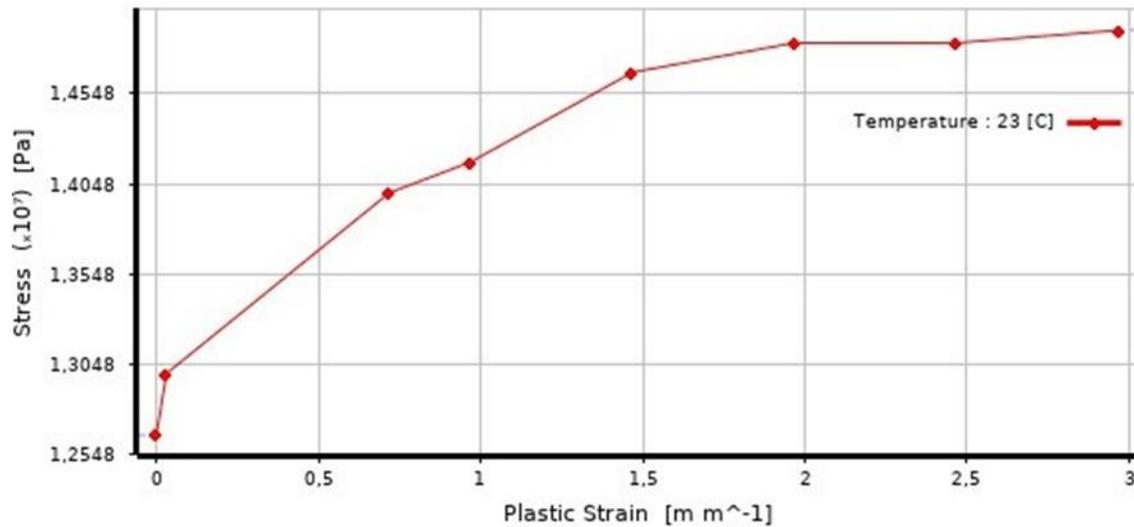
Deformación Plástica	Esfuerzo (Pa)
0	12660000
0,03125	13000000
0,71875	14000000
0,96875	14170000
1,46875	14667000
1,96875	14830000
2,46875	14830000
2,96875	14900000

Nota. La presente Tabla muestra la deformación plástica vs el esfuerzo aplicado. Estos valores se ajustaron ya que algunos de ellos no cumplían con la condición de pendiente mayor a cero.

Disponible: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_3.html

Figura 34

Gráfico de deformación plástica- esfuerzo en el modelo “Multilinear Isotropic Hardening”

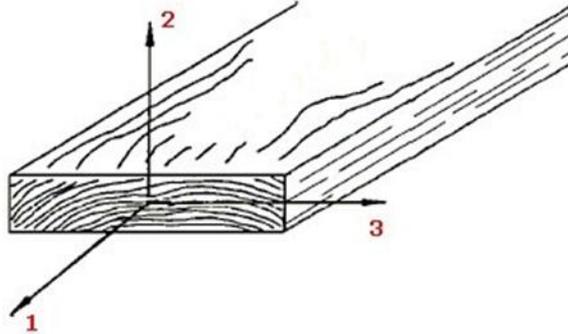


Nota. El gráfico muestra los datos de la Tabla 9 ingresados en el modelo. Se observa que la temperatura fijada es de 23°C, ya que es una temperatura ambiente donde no se observan variaciones de las propiedades. Esta Tabla fue elaborada por el autor debido a que el programa requiere ciertas condiciones previamente mencionadas.

Para el caso del modelo provisto por el programa para fibra de carbono tejida, llamado “Elasticidad Ortotropica” (Orthotropic Elasticity), el sistema provee los módulos de Young y de rigidez, además del coeficiente de Poisson, en los tres ejes del sistema de coordenadas X, Y, Z. Esto debido a que la fibra de carbono tejida, es un material ortotrópico, es decir, que sus propiedades mecánicas o térmicas son únicas e independientes en tres direcciones perpendiculares, como es el caso de la madera, tal como se observa en la Figura 35:

Figura 35

Tabla de madera con eje de coordenadas según dirección de la fibra.

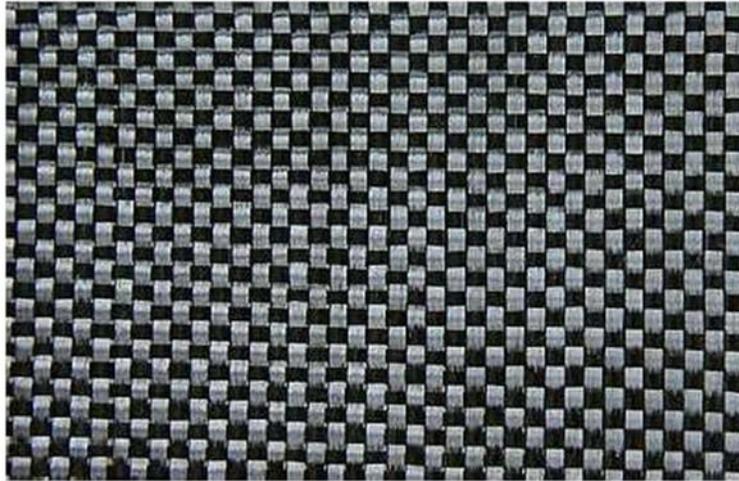


Nota. En la Figura se observa que el eje 1 es paralelo a la fibra, el eje 2 coincide con la dirección de la fibra, y el eje 3 es tangencial a los anillos de crecimiento de la madera.

Por lo anterior, para el presente estudio se estableció que en la simulación se utilizaría un tejido de fibra de carbono tal como el que se observa en la Figura 36:

Figura 36

Tejido liso de fibra de carbono



Nota. El tejido mostrado se conoce como tejido liso, un tejido básico el cuales de fácil manejo y está bastante estandarizado. Además, es el tipo de tejido utilizado en la simulación.

El tejido mostrado en la Figura 36, tiene una inclinación de 0° , por lo cual para hacerlo más resistente, se aglomeran 8 capas de este tejido sobreponiendo sobre la primera capa a 0° , dos capas demás a 45° y -45° , las cuales se cierran con otra capa a 0° y luego se repite este patrón, para obtener un total de 8 capas [11].

En contraste a los materiales ortotrópicos, se encuentran los materiales isotrópicos, en los cuales sus propiedades mecánicas o térmicas son iguales en todas las direcciones [34]. Un ejemplo de estos materiales son el vidrio, los metales y los plásticos, conteniendo este último grupo al PC y al HDPE, por lo cual se simularán tomando sus propiedades por igual en todas las direcciones.

- **Velocidad percutor y soporte fijo**

Para la simulación se requiere que el percutor se ubique relativamente cerca al protector a ser probado e inicie con una condición de velocidad inicial. Esta velocidad se calcula teniendo en cuenta las condiciones previamente mencionadas, a saber, la posición a un metro de altura del protector y considerando la fricción del aire despreciable, por lo cual se utiliza la fórmula de velocidad final para un cuerpo en caída libre, la cual es:

$$(m/s) = \sqrt{2 \times g \times h}$$

$$(m/s) = \sqrt{2 \times 9,81 \times 1} = 4,42 \text{ m/s}$$

Donde se obtiene la velocidad final de caída (v), reemplazando h por la altura inicial de la caída, y g por la gravedad estándar (9,81 m/s).

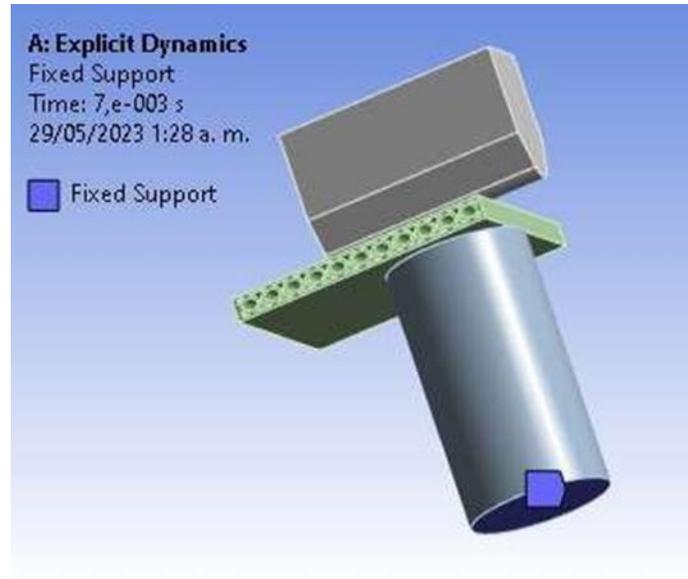
Es importante aclarar que la velocidad de caída del percutor no se calcula por simulación, ya que propiedades como la gravedad o fricción del aire, no influyen significativamente en la velocidad final de caída calculada teóricamente, y simular la caída del cuerpo en el sistema implicaría asignar recursos de cómputo innecesarios, en adición al tiempo que tomaría la máquina simulando la caída, antes de que realmente impacte al protector como se esperaría.

Igualmente, al someter a algún objeto a un impacto, es necesario que haya una condición que permita al sistema saber en qué instante debe detenerse este objeto con una velocidad definida ya que en la realidad se tienen límites físicos como el suelo o las paredes, los cuales detienen en cierto momento una caída, por lo que en el programa se debe definir un soporte fijo (Figura 37).

Teniendo en cuenta que en la prueba experimental se establece la base del yunque como soporte fijo y que esta superficie inferior del yunque va fijada al suelo, en la simulación se incluye este parámetro como se muestra en la Figura 37

Figura 37

Soporte fijo yunque (Explicit Dynamics)



Nota. En la Figura se observa que se selecciona la cara inferior del yunque como soporte fijo, tal como lo indica la flecha azul

- **Condiciones de contacto (Body Interactions)**

Para el caso de la fibra de carbono, se define el coeficiente de fricción entre metal-fibra de carbono usando un valor promedio de 0,4, el cual fue obtenido del análisis del coeficiente de fricción de una matriz de fibra de carbono, realizado por Schön,[35] , mientras que en el caso de los polímeros PC y HDPE, donde el coeficiente de fricción entre plástico-metal, el cual aunque presenta un rango bastante amplio, para este estudio se escoge un coeficiente de fricción estático sin lubricación (Static dry) de 0,3 [36], ya que la superficie no está completamente pulida como para tener un valor mínimo como 0,25, pero si lo suficiente, para tener un coeficiente de fricción entre el protector y el percutor de 0,3.

- **Error de energía máximo (Maximum Energy Error)**

En el evento de una simulación dinámica, hay una transformación de la energía generada por la caída (energía cinética) en energía de deformación (energía interna), las cuales al ser sumadas deben ser iguales a la energía total del sistema, incluyendo el calor generado o el trabajo generado

en la simulación (los cuales en el presente estudio no se tendrán en cuenta al no afectar significativamente la simulación), tal como se observa en la siguiente ecuación:

$$U_T = U_i + W + Q$$

U_T = energía total interna

U_i = energía inicial interna

W = trabajo generado por el sistema

Q = calor generado

En esta ecuación se observa que la energía del sistema se transforma, pero en el caso de una simulación dinámica, al haber rupturas puede existir cierto porcentaje de error en la energía total. Sin embargo, este error debe ser mínimo, por lo cual para medir la calidad de un análisis dinámico explícito, se mide la desviación (en términos de porcentaje) en la conservación de energía, ya que una larga desviación implica una reducción en la efectividad del modelo. Por lo tanto, el parámetro de error de energía máximo permite al usuario detener la simulación si la desviación de energía de esta se vuelve poco aceptable según lo esperado en el estudio, ya que en algunos casos no se espera la ruptura del material, mientras que en otros, como en el presente caso, se espera que el material se rompa (lo cual implicará un error de energía).

La Figura 38, muestra un valor de error de energía máximo establecido para la simulación de 0,9, pues el elemento a simular está expuesto a rupturas, las cuales convierten la energía cinética del percutor en otros tipos de energía de grandes magnitudes. [32]

Figura 38

Error Máximo de Energía en Explicit Dynamics

Step Controls	
Number Of St...	1
Current Step ...	1
Load Step Type	Explicit Time In...
End Time	7,e-003
Resume From...	0
Maximum Nu...	1e+07
Maximum Ene...	0,9
Reference En...	0

Nota. En la Tabla se observa el valor de energía máximo definido, ingresado en el sistema

- **Límite de deformación geométrico (Erosion Controls)**

Este parámetro permite remover elementos que alcancen un criterio de deformación o esfuerzo en el que el material debería fallar, según los modelos de comportamiento ingresados al programa. En el presente caso, al ingresar valores de fractura, este límite llegará hasta el momento de la fractura, por lo cual el valor se obtendrá con el porcentaje deformación al momento de la fractura, ya que es el formato utilizado por el programa. Su valor se define con un valor igual a la deformación en el cual se alcanza la ruptura del material en una prueba de tensión y que depende de las propiedades mecánicas de este. Si hay elementos que cumplan esta condición estos se eliminan [32]. Usualmente este valor de deformación se encuentra en las propiedades mecánicas provistas por el software, pero es importante comparar con los datos de la literatura y de otros experimentos, ya que en la simulación es necesario tener en cuenta efectos como el estiramiento del material, los cuales afectan el límite de elongación del material, por lo cual se comparó con ensayos experimentales de los materiales (Anexos 2, 4 y 6) y fue necesario fijar como limite el valor máximo de deformación real de estos anexos, en el criterio “on geometric strain limit”, como se observa en la Figura 39.

Figura 39

ConFiguración del análisis de la fibra de carbono

Erosion Controls	
On Geometric Strain Limit	Yes
Geometric Strain Limit	1,4e-002
On Material Failure	No
On Minimum Element Time Step	No
Retain Inertia of Eroded Material	Yes

Nota. Figura donde se muestra el parámetro “erosion controls” con un valor de 0,014 para el “geometric strain limit”

En la anterior Figura se observa que el límite de deformación fijado para la fibra de carbono (FC) es de 0,014 [35], y en el caso del policarbonato (PC) y el polietileno de alta densidad (HDPE) es de 0,6 [37] y 3 [38] respectivamente.

Con estos valores definidos para las variables mencionadas, se puede proceder a la simulación de los impactos, ya que esta propiedad permitirá revisar cómo la estructura reacciona frente al impacto debido a las propiedades del material y a la forma que se le da.

5. RESULTADOS

Siguiendo la información presentada en la Figura 33, donde se describen las entradas en los seis apartes del módulo “Explicit Dynamics”, para la simulación se ingresa la información de las geometrías a simular, asignándoles las propiedades de los diferentes materiales escogidos, las coordenadas de cada impacto y las condiciones bajo las cuales se simularán estas geometrías y materiales. Una vez ingresados los mencionados parámetros, se procede a hacer las simulaciones respectivas y se obtienen los resultados de cada simulación.

Según su orden, a cada simulación se le asigna una nomenclatura con el formato Material-Figura Geométrica-Puntos de Impacto, usando abreviaturas para el material (FC, PC, HDPE) y para la Figura geométrica (Cir, Oct, Ovl), indicando el punto de impacto respectivo (1, 2, 3, 4, 5), por ejemplo, FC-Cir-1. Dicha nomenclatura será utilizada de la misma forma para presentar los resultados de las simulaciones, tal como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7

Orden de las simulaciones

Material	Figuras	Puntos de Impacto	Nomenclatura
Fibra de Carbono	Círculo	1,2,3,4,5	FC-Cir-1,2,3,4,5
	Octágono	1,2,3,4,5	FC-Oct-1,2,3,4,5
	Óvalo	1,2,3,4,5	FC-Ovl-1,2,3,4,5
Policarbonato	Círculo	1,2,3,4,5	PC-Cir-1,2,3,4,5
	Octágono	1,2,3,4,5	PC-Oct-1,2,3,4,5
	Óvalo	1,2,3,4,5	PC-Ovl-1,2,3,4,5
Polietileno de Alta Densidad	Círculo	1,2,3,4,5	PC-Cir-1,2,3,4,5
	Octágono	1,2,3,4,5	PC-Oct-1,2,3,4,5
	Óvalo	1,2,3,4,5	PC-Ovl-1,2,3,4,5

Nota. La Tabla presente muestra la Tabla que establece el orden de presentación de las simulaciones según material, Figura y punto de impacto para establecer una nomenclatura.

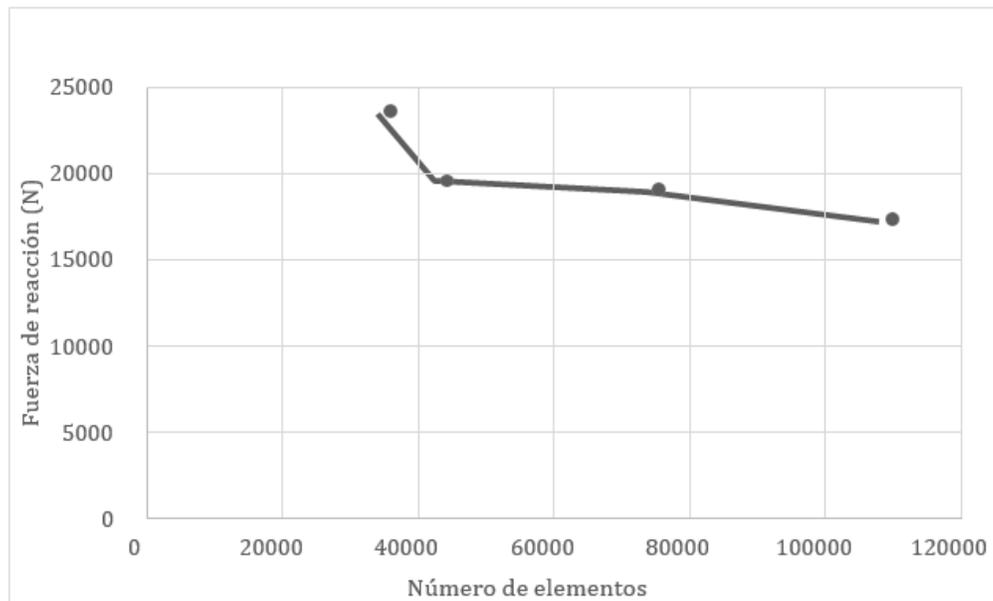
Se aclara que, para poder visualizar mejor los resultados de las simulaciones, en la siguiente sección (Resultados), la columna “Nomenclatura” reemplazará a las columnas “Material”, “Figuras Geométricas” y “Puntos de Impacto”.

5.1 Estudio de independencia de malla

Para corroborar la precisión de los resultados es necesario hacer este estudio de independencia de malla, donde se toma una de las simulaciones realizadas (en este caso se escoge la simulación PC-Cir-1) y se va cambiando el tamaño de la malla de la geometría, desde el tamaño de elemento más grande hasta el tamaño más pequeño, de forma progresiva, obteniendo una convergencia en los resultados ya que un enmallado más pequeño supone una mayor precisión en los resultados, tal como se ve a continuación:

Figura 40

Estudio de independencia de malla



Nota. En el gráfico se observa como a medida que se aumenta el número de elementos, el valor de fuerza de reacción resulta disminuyendo su variación

En esta grafica se observa como a medida que se utiliza un tamaño de elemento más pequeño, se va obteniendo un resultado bastante similar con aproximadamente una diferencia del 9,13%, lo cual es bastante aceptable y significa que el resultado obtenido está siendo preciso y no depende enteramente del tamaño de la malla. Por lo tanto, se procede a usar un enmallado de 1,8 mm para el protector de espalda y de 10 mm para el conjunto yunque-percutor, lo cual corresponde a un total de aproximadamente 65000 elementos.

5.2 Resultados de las simulaciones

En la siguiente Tabla se muestran los resultados de las simulaciones, utilizando las herramientas proveídas por el módulo “Explicit Dynamics”, las cuales permiten conocer el valor de esfuerzo y deformación en las zonas más afectadas por el impacto, además de la fuerza máxima transmitida por el protector, lo cual permite evaluar si el protector cumple con los parámetros de fuerza transmitida establecidos por la norma (ver Tabla 2).

Tabla 8

Resultados de cada simulación

Nomenclatura	Tensión equivalente (Equivalent stress) (MPa)	Desplazamiento vertical máximo del percutor (mm)	Fuerza de reacción (force reaction) (N)	Promedio de fuerza de reacción (N)
FC-Cir-1	883,62	14,12	19525	16235,26
FC-Cir-2	759,35	15,56	1315,3	
FC-Cir-3	705,16	11,25	28945	
FC-Cir-4	833,56	12,06	16189	
FC-Cir-5	737,78	10,13	15202	
FC-Oct-1	872,73	12,88	8356,8	16413,16
FC-Oct-2	877,09	15,06	27918	
FC-Oct-3	657	14,49	20269	
FC-Oct-4	696	13,07	12397	
FC-Oct-5	789,67	10,76	13125	
FC-Ovl-1	796,11	11,78	5406	11536,4
FC-Ovl-2	845,56	12,47	13401	
FC-Ovl-3	583	13,57	17319	
FC-Ovl-4	643	12,31	10229	
FC-Ovl-5	859,29	13,18	11327	

PC-Cir-1	95,5	6,03	19061	17945,2
PC-Cir-2	32	6,05	17624	
PC-Cir-3	43	5,26	15896	
PC-Cir-4	59	4,05	19375	
PC-Cir-5	86	3,87	17770	
PC-Oct-1	35,7	1,5	19210	12057,26
PC-Oct-2	37,5	4,98	8944,3	
PC-Oct-3	99,3	4,37	11182	
PC-Oct-4	29,1	3,98	10323	
PC-Oct-5	60,9	4,85	10627	
PC-Ovl-1	46,38	6,39	22264	19278,6
PC-Ovl-2	30	2,4	20364	
PC-Ovl-3	99,3	4,37	11182	
PC-Ovl-4	68,6	6,11	20699	
PC-Ovl-5	50	4,86	21884	
HDPE-Cir-1	11,3	6,95	17658	15122,6
HDPE-Cir-2	4,1	13,8	16499	
HDPE-Cir-3	12	12,48	13810	
HDPE-Cir-4	11,9	11,15	14687	
HDPE-Cir-5	13,46	10,68	12959	
HDPE-Oct-1	10,29	7,46	16294	12312,38
HDPE-Oct-2	11,5	7,27	13126	
HDPE-Oct-3	13	4,65	9582,4	
HDPE-Oct-4	12,07	6,64	9600,5	
HDPE-Oct-5	13,46	5,73	12959	
HDPE-Ovl-1	13,8	9,28	18125	
HDPE-Ovl-2	4,22	8,88	16145	

HDPE-Ovl-3	13	8,06	16382	16874,2
HDPE-Ovl-4	13,4	7,32	16450	
HDPE-Ovl-5	12	6,72	17269	

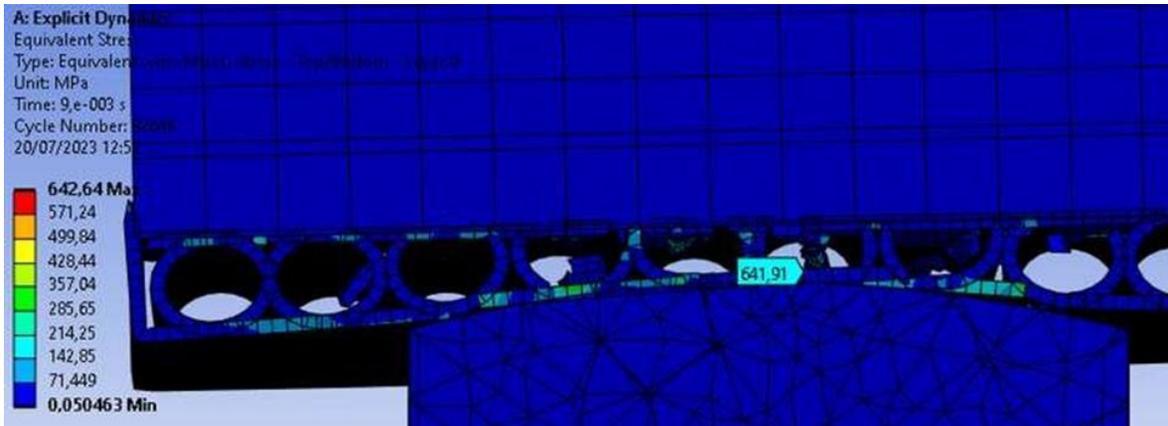
Nota. En la Tabla se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones, donde se registran las medidas de máxima deformación, y la fuerza transmitida

5.3 Análisis de resultados y evaluación

Según los resultados presentados, la estructura que más fuerza de impacto atenúa es la realizada en fibra de carbono usando óvalos, transmitiendo una fuerza promedio de 11536,4 N, lo cual es bastante menor respecto a lo establecido en la norma. Esto debido a que la fibra de carbono dentro de todos los materiales escogidos, tiene la mayor resistencia a la ruptura, por lo cual llega a resistir hasta 894 MPa, además este material al tener estructura ovalada, los cuales tienen arcos bastante pronunciados distribuyen la energía del impacto entre sus pares más cercanos, tal como se ve en las Figuras 41 y 42, que muestran el esfuerzo equivalente y el desplazamiento vertical del percutor experimentado por el protector. Esta distribución de energía se observa igualmente en el protector de octágonos realizado en PC y en HDPE, los cuales transmiten una fuerza de impacto baja (12057 N y 12182 N respectivamente) ya que a pesar de que estos materiales tienen una resistencia al impacto significativamente menor a la fibra de carbono, también tienen mayor capacidad de deformación, por lo cual los octágonos presentes en la estructura, se deforman en su parte superior e inferior, dispersando parte de la energía del impacto. La energía de impacto restante genera una deformación en las paredes laterales del octágono, y esta deformación distribuye la energía del impacto hacia las paredes laterales de los octágonos aledaños, tal como se observa en las Figuras 43 y 44 para el PC y 45 y 46 para el HDPE.

Figura 41

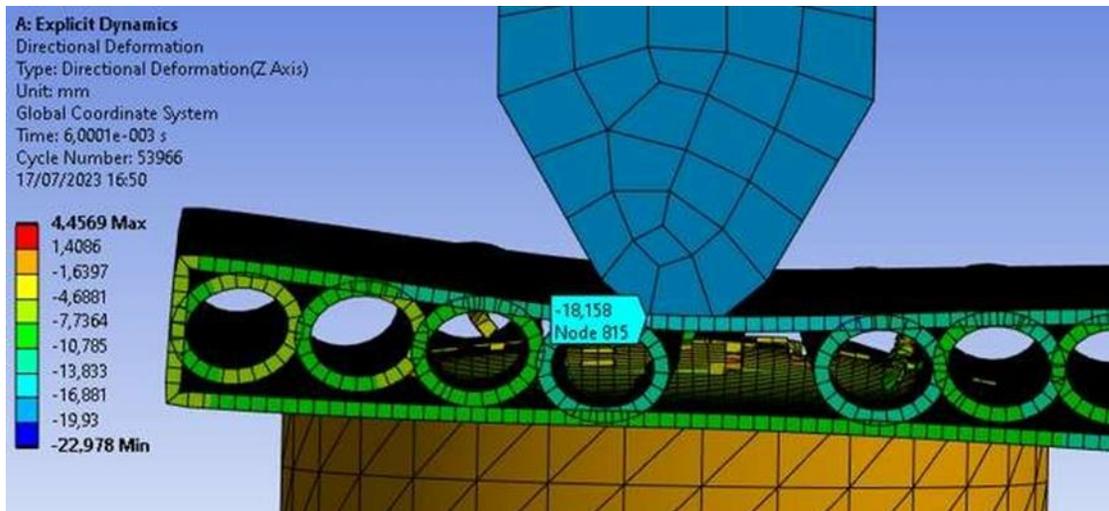
Esfuerzo equivalente protector fibra de carbono



Nota. En la secuencia se observa como el protector sufre un esfuerzo mayor al que puede resistir el material, lo cual ocasiona la ruptura del protector en estos puntos.

Figura 42

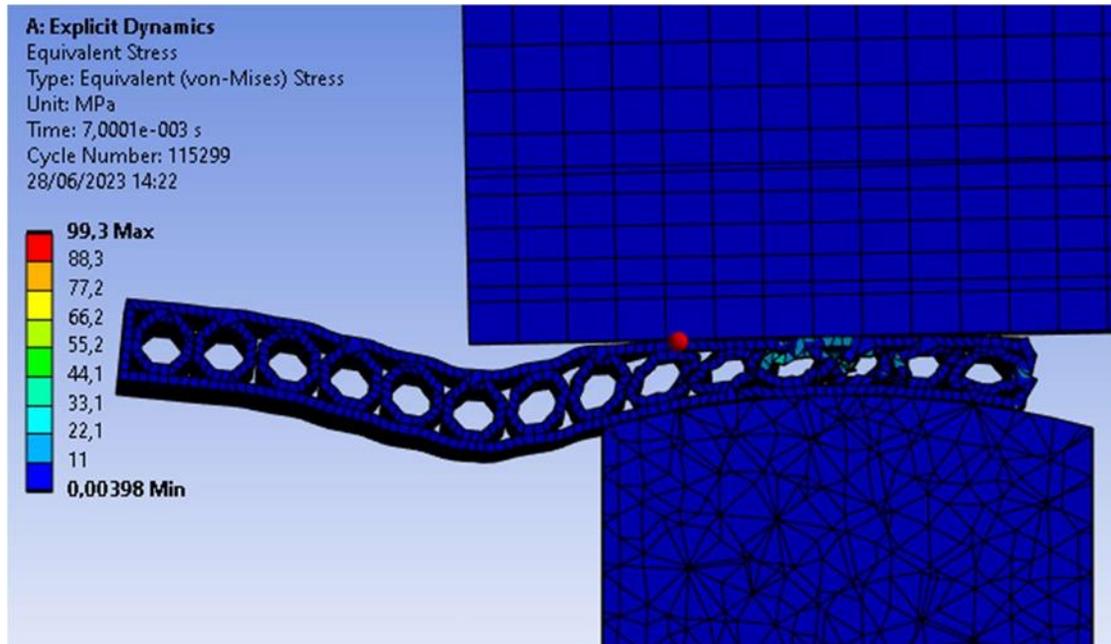
Desplazamiento vertical del percutor en un protector ovalado de fibra de carbono



Nota. En la Figura se evidencia el desplazamiento vertical máximo en un protector ovalado de fibra de carbono.

Figura 43

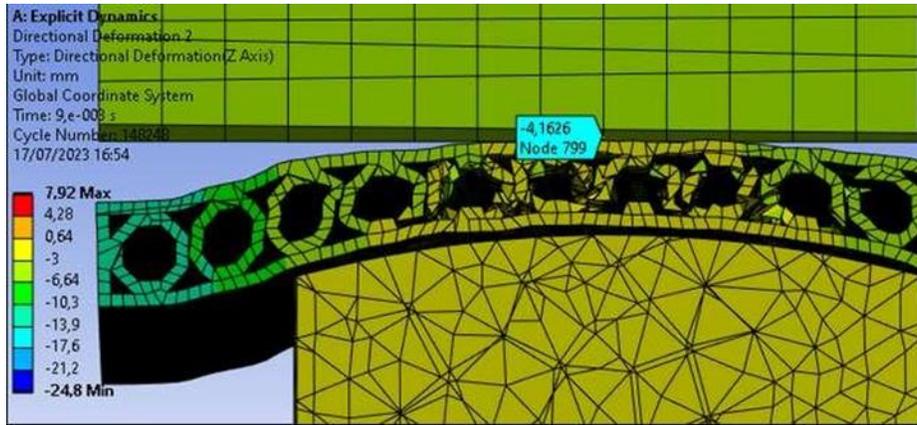
Esfuerzo Equivalente en un protector octagonal de Policarbonato



Nota. En la Figura se observa como las paredes laterales superan el límite de esfuerzo máxima a pesar de esto las paredes distribuyen la carga entre los otros octágonos y permiten evitar una mayor concentración de esfuerzos.

Figura 44

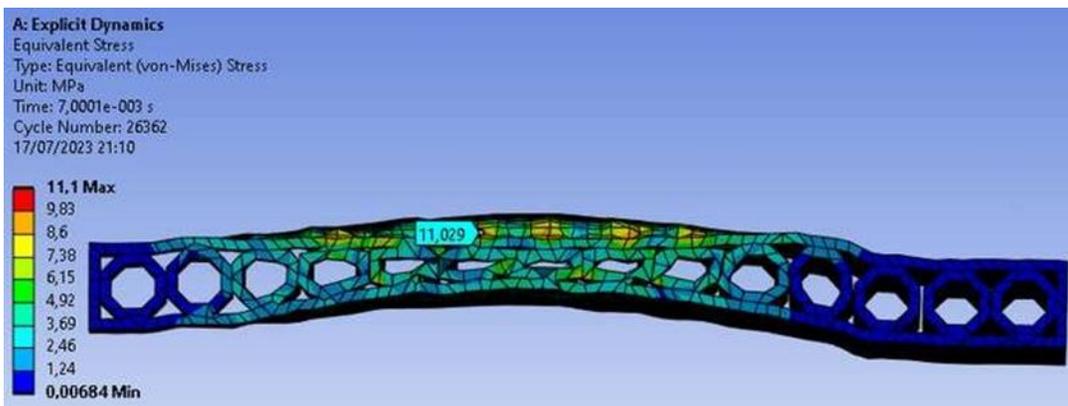
Desplazamiento vertical del percutor en un protector octagonal de policarbonato



Nota. En la Figura se evidencia el desplazamiento vertical máximo en un protector octagonal de policarbonato.

Figura 45

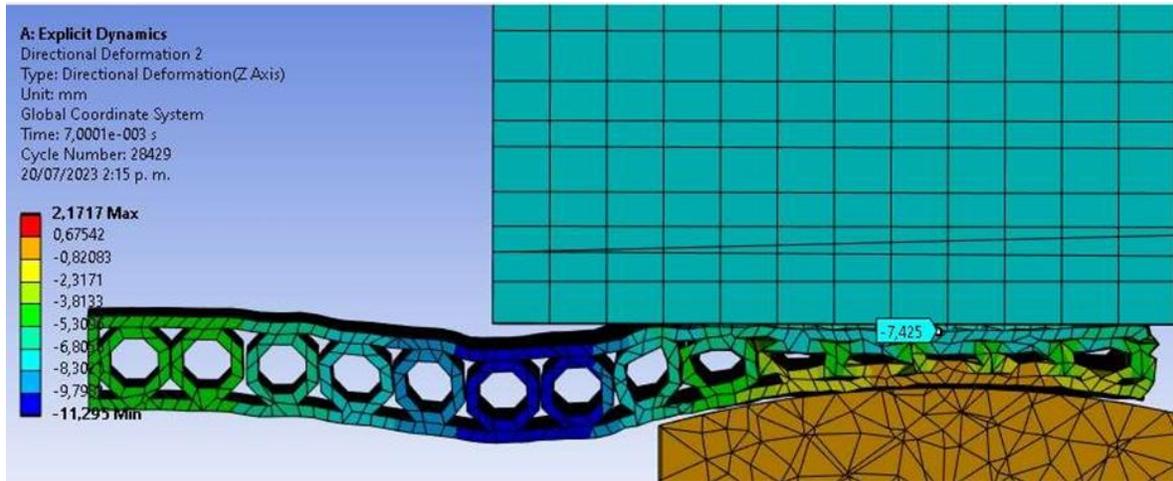
Esfuerzo equivalente en un protector de polietileno de alta densidad



Nota. En la Figura se observa como el protector se deforma en la parte superior y en sus laterales, lo cual dispersa la energía desde el centro de impacto hacia los demás octágonos.

Figura 46

Desplazamiento vertical del percutor en un protector de polietileno de alta densidad

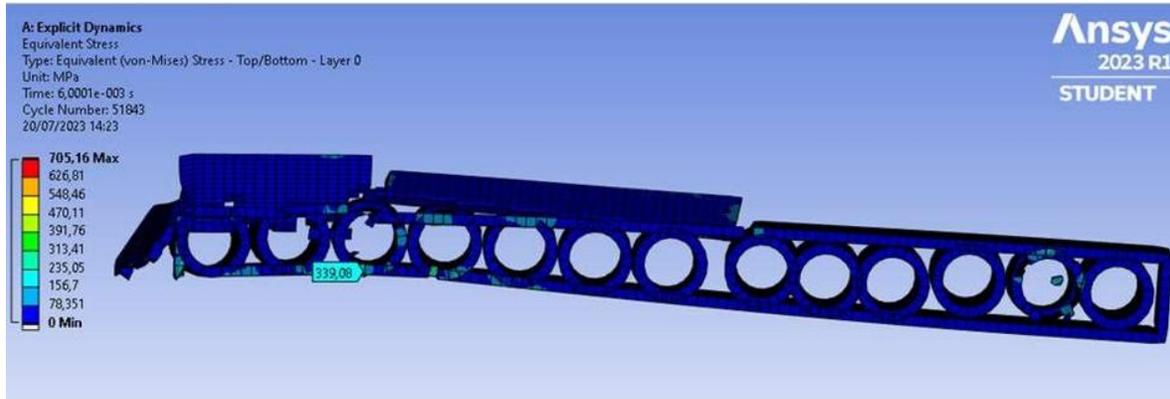


Nota. En la Figura se evidencia el desplazamiento vertical máximo en un protector octagonal de polietileno de alta densidad.

En contraste, los protectores circulares no se desempeñaron de la forma esperada, ya que transmitieron más de 17000N de fuerza de impacto en promedio, lo cual sigue siendo menor a la energía de impacto transmitida por el protector según lo establecido por el nivel 1 de protección de la norma, pero no son tan efectivas como las previamente mencionadas. Esto se puede deber a que el círculo resulta deformándose fácilmente en las partes superior e inferior al momento del impacto y no dispersa la energía en sus laterales hacia sus pares de la misma forma que lo hacen las otras Figuras. Este comportamiento se pudo observar en un protector de fibra de carbono, tal como se ve en las Figuras 47 y 48.

Figura 47

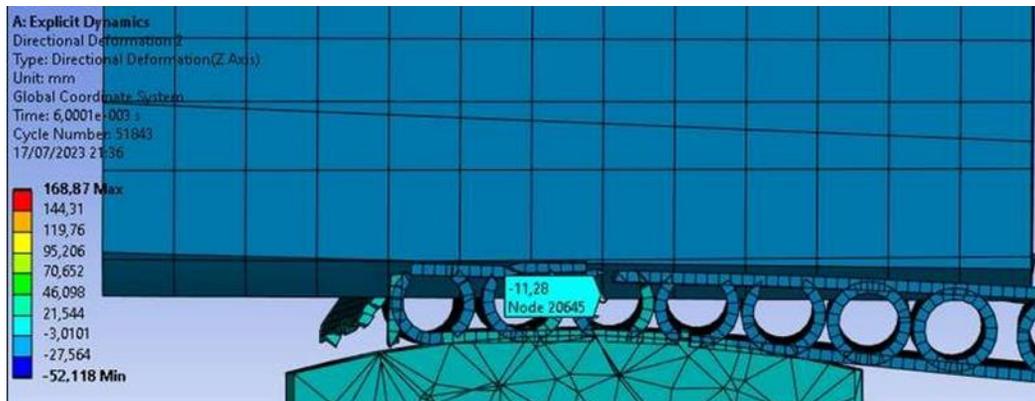
Esfuerzo equivalente en un protector de Fibra de carbono



Nota. En la Figura se observa como los laterales de los círculos superan el límite de esfuerzo y se rompen, localmente deja al círculo sin capacidad de transmitir el esfuerzo hacia los otros pares.

Figura 48

Desplazamiento vertical máximo del percutor en un protector de Fibra de carbono



Nota. En la Figura se observa el desplazamiento vertical máximo del percutor en un protector de fibra de carbono circular.

Con lo anterior se evidencia que la mayoría de los materiales y geometrías utilizadas en este estudio, según los resultados de las simulaciones, son apropiados para la protección de impactos en motociclistas que transitan en la ciudad pues cumplen los rangos establecidos por el nivel 1 de la norma (Tabla 2), sin embargo, estos no pueden ser usados por individuos que practican deportes de motor. La Tabla 9 muestra un resumen de los resultados obtenidos, en donde se indica el

porcentaje de cumplimiento de los dos niveles de la norma, y en donde se identifica que el mayor porcentaje está dado por la geometría ovalada de fibra de carbono, siendo esta una configuración prometedora en la que se puede enfocar la investigación en futuros trabajos.

Tabla 9

Fuerza de reacción promedio de los protectores diseñados

Material/Figura	Promedio "Force Reaction (N)"	% de cumplimiento respecto a la norma EN 1621-2 (Nivel 1)	% de cumplimiento respecto a la norma EN 1621-2 (Nivel 2)
FC Ovl	11536,4	35,91	-28,18
PC Oct	12057,26	33,02	-33,97
HDPE Oct	14122,10	21,54	-56,91
HDPE Cir	15122,60	15,99	-68,03
FC Cir	16235,26	9,80	-80,39
FC Oct	16413,16	8,82	-82,37
HDPE Ovl	16874,20	6,25	-87,49
PC Cir	17945,20	0,30	-99,39
PC Ovl	19278,6	-7,10	-114,21

Nota. En la Tabla se observa el promedio de la fuerza de reacción de cada impacto en los protectores diseñados, además del porcentaje de rendimiento de cada promedio respecto al límite establecido por el nivel 1 y 2 de la Norma EN 1621-2.

6. CONCLUSIONES

En base a geometrías de estructuras internas encontradas en la literatura y en la naturaleza, y que son eficientes para disipar energía, se establecieron 3 formas geométricas para ser evaluadas computacionalmente mediante una simulación de dinámica explícita en protectores para motociclistas. Dichas geometrías corresponden a arcos circulares y óvalos utilizados en aplicaciones de impactos automovilísticos y octágonos que se encuentran en estructuras naturales como panales de abeja o estructuras internas de plantas.

Para cada geometría, se utilizaron tres tipos de materiales seleccionados en base a la literatura y aplicaciones previamente probadas, por lo cual se definieron como materiales para el diseño y simulación de estos protectores la fibra de carbono, el policarbonato y el polietileno de alta densidad, los cuales han sido utilizados para el diseño de estructuras capaces de dispersar la energía de impactos de diferentes magnitudes.

Estas geometrías y materiales previamente definidas fueron implementadas en un diseño de protector de espalda y después simuladas computacionalmente utilizando un análisis de dinámica explícita y bajo la norma EN 1621-2, la cual permite evaluar la reacción ante impacto de protectores de espalda para motociclistas.

Con los resultados previamente obtenidos se puede concluir que los protectores diseñados con una estructura interna ovalada u octagonal son viables para ser utilizados en el diseño de un protector de espalda para motociclistas que transitan en la ciudad, ya que con un espesor bastante pequeño el protector de espalda transmite un valor de fuerza de impacto menor al establecido por la norma según el límite establecido por el nivel 1 de la misma. Igualmente, no se descarta la estructura diseñada con círculos, ya que también cumplió con la fuerza transmitida según la norma por debajo del límite previamente mencionado, solo que no lo hace con la misma efectividad de las otras geometrías.

Respecto a los materiales, se observa que los tres materiales son igualmente viables para el diseño del protector, ya que los tres materiales transmitieron un valor menor de fuerza al establecido por la norma dentro del límite establecido por el nivel 1, y este valor transmitido tuvo variaciones significativas en función a la geometría, no en función del material.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Back Protector Motorcycle», *Amazon*.
https://www.amazon.com/s?k=back+protector+motorcycle&s=exact-aware-popularity-ank&qid=1688094111&srefix=back+protector+%2Caps%2C544&ref=sr_st_exact-aware-popularity- (accedido 11 de julio de 2023).
- [2] AEN/CTN, «Anexo IIIV - Norma Técnica En 1621-2», 2003.
- [3] «Alpinestars 6700421-13-XL/XXL Bionic Action Chest Protector - Black/Red (X-Large)/2X», *Amazon*. https://www.amazon.com/-/es/Alpinestars-Protector-unisex-bi%C3%B3tica-adultos/dp/B08CSR14G5/ref=sr_1_7?keywords=back%2Bprotector%2Bmotorcycle&qid=1688094123&srefix=back%2Bprotector%2B%2Caps%2C544&sr=8-7&th=1&language=en_US (accedido 11 de julio de 2023).
- [4] «Alpinestars Nucleon KR-Celli Motorcycle Back Protector, Black, Large», *Amazon*.
https://www.amazon.com/-/es/Alpinestars-Nucleon-KR-Celli-Protector-motocicleta/dp/B07FRJXMKS/ref=sr_1_9?keywords=back+protector+motorcycle&qid=1688094123&srefix=back+protector+%2Caps%2C544&sr=8-9 (accedido 11 de julio de 2023).
- [5] «Balance de cifras RUNT 2022 El 74 % de la venta de vehículos nuevos en el país en 2022 fueron motocicletas», *RUNT - Registro unico de transito*.
- [6] ANSV, «Cifras año en curso», *Agencia Nacional De Seguridad Vial*.
<https://ansv.gov.co/es/observatorio/estad%C3%ADsticas/cifras-ano-en-curso> (accedido 11 de julio de 2023).
- [7] United States. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety Administration. Office of Behavioral Safety Research, «Pilot test of a methodology for an observation survey of motorcycle personal protective equipment [Traffic Tech]», *rosap.nhtsa.gov*, may 2021, doi: 10.21949/1526006.
- [8] D. Pacek y J. Rutkowski, «The composite structure for human body impact protection», *Composite Structures*, vol. 265, p. 113763, jun. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113763
- [9] T. M. L. Arístides, «Estudio numérico y experimental de un atenuador de impacto para fórmula SAE», *idUS - Depósito de Investigación Universidad de Sevilla*, 2015.

<https://idus.us.es/handle/11441/27138>

- [10] F. M. Bravo Rodríguez Y C. M. Almeida Herrera, «Diseño Y Construcción De Un Atenuador De Impactos Para Un Vehículo Monoplaza Fórmula Sae.», 2021.
- [11] R. Delgado, «Diseño De Un Elemento De Protección De Espalda Para Motociclistas», 2016.
- [12] H.-P. Lee y S. W. Gong, «Finite element analysis for the evaluation of protective functions of helmets against ballistic impact», *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, vol. 13, n.º 5, pp. 537-550, oct. 2010, doi: 10.1080/10255840903337848.
- [13] V. M. Leonardo, «Proyecto Optero: Dispositivo de protección vital para motociclistas urbanos (Tomo 2 - fase 2.0)», *hdl:20.500.12010/20003*, 2021. <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/handle/20500.12010/20003>
- [14] R. Ekmejian, P. Sarrami, J. M. Naylor, y I. Harris, «A systematic review on the effectiveness of back protectors for motorcyclists», *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*, vol. 24, n.º 1, oct. 2016, doi: 10.1186/s13049-016-0307-3.
- [15] B. Albanese *et al.*, «Energy attenuation performance of impact protection worn by motorcyclists in real-world crashes», *Traffic Injury Prevention*, vol. 18, n.º sup1, pp. S116-S121, abr. 2017, doi: 10.1080/15389588.2017.1311014.
- [16] D. Pacek y J. Rutkowski, «The composite structure for human body impact protection», *Composite Structures*, vol. 265, p. 113763, jun. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113763.
- [17] M. Nasim, M. Brasca, S. F. Khosroshahi, y U. Galvanetto, «Understanding the impact properties of polymeric sandwich structures used for motorcyclists' back protectors», *Polymer Testing*, ago. 2017, doi: 10.1016/j.polymertesting.2017.05.025.
- [18] K. Yang, Y. Chen, L. Zhang, F. Xiong, X. Hu, y C. Qiao, «Shape and geometry design for self-locked energy absorption systems», *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 156, pp. 312-328, jun. 2019, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.04.006.
- [19] Z. Liu, J. Liu, J. Liu, W. Zeng, y W. Huang, «The impact responses and failure mechanism of composite gradient reentrant honeycomb structure», *Thin-walled Structures*, vol. 182, p. 110228, ene. 2023, doi: 10.1016/j.tws.2022.110228.
- [20] S.-Y. Jeon *et al.*, «Synergistic energy absorption mechanisms of architected liquid crystal elastomers», *Advanced Materials*, vol. 34, n.º 14, p. 2200272, mar. 2022, doi:

10.1002/adma.202200272.

- [21] N. Agrawal, J. Raj, y G. Saxena, «Design and Analysis of Impact Attenuator: a review», *SSRG international journal of mechanical engineering*, dic. 2015, doi: 10.14445/23488360/ijme-v2i12p101.
- [22] «UNIVERSAL TAU-II® Crash Cushion», *Installation and Assembly Manual*.
- [23] Trinity Highway, «REACT® M - Valtir», *Valtir*, 1 de noviembre de 2022. <https://www.trinityhighway.com/product/react-m>
- [24] Trinity Highway Products, «Federal Highway Administration», *FHWA*, 23 de julio de 2021. Accedido: 15 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://safety.fhwa.dot.gov/roadway_dept/countermeasures/reduce_crash_severity/barriers/pdf/cc_169.pdf
- [25] «Mitigate stress concentration with these design tips», *Fast Radius*, oct. 2022, [En línea]. Disponible en: <https://www.fastradius.com/resources/stress-concentration-design-factors>
- [26] Traffix Devices, «Scorpion II Truck Mounted Attenuator (TMA) | Traffix Devices», *Traffix Devices*. <https://www.traffixdevices.com/products/attenuators/scorpion2-tma>
- [27] L. F. Iglésias, T. Sequeira, M. F. Da Costa, y C. A. Da Costa Neto, «Fracture Toughness Of Hdpe Evaluated By Fatigue And Notch Precracking», *ResearchGate*, jul. 2015, [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/315110385_FRACTURE_TOUGHNESS_OF_HDPE_EVALUATED_BY_FATIGUE_AND_NOTCH_PRECRACKING
- [28] «High density polyethen | Designerdata». <https://designerdata.nl/materials/plastics/thermo-plastics/high-density-polyethen>
- [29] Trinity Highway, «QuadGuard® Elite M10 - Valtir», *Valtir*, 16 de octubre de 2022. <https://www.valtir.com/product/quadguard-elite-m10/>
- [30] P. Knupp, «A Short Course on Mesh Quality.», *OSTI*, 1 de septiembre de 2007. <https://www.osti.gov/biblio/1146609> (accedido 18 de julio de 2023).
- [31] P. Newman, «Mesh Fail - Why? - Ansys Learning Forum | Ansys Innovation Space», *Ansys Learning Forum | Ansys Innovation Space*, 2 de julio de 2019. <https://forum.ansys.com/forums/topic/mesh-fail-why/> (accedido 18 de julio de 2023).
- [32] «ANSYS Mechanical User Guide», *vdocuments.mx*, sep. 2022, [En línea]. Disponible en:

<https://vdocuments.mx/ansys-mechanical-user-guide.html?page=1>

- [33] N. Tsuchida, T. Inoue, y K. Enami, «Estimations of the true stress and true strain until just before fracture by the Stepwise tensile test and Bridgman equation for various metals and alloys», *Materials transactions*, vol. 53, n.º 1, pp. 133-139, ene. 2012, doi: 10.2320/matertrans.md201112.
- [34] Instron, «Isotropic», *Instron*. <https://www.instron.com/en/resources/glossary/i/isotropic> (accedido 18 de julio de 2023).
- [35] J. Schön, «Coefficient of friction and wear of a carbon fiber epoxy matrix composite», *Wear*, vol. 257, n.º 3-4, pp. 395-407, ago. 2004, doi: 10.1016/j.wear.2004.01.008.
- [36] «Coefficient of friction, rolling resistance, air resistance, aerodynamics». <https://www.tribology-abc.com/abc/cof.htm> (accedido 18 de julio de 2023).
- [37] «Tensile true stress-strain curves for polycarbonate at...», *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Tensile-true-stress-strain-curves-for-Polycarbonate-at-different-strain-rate-From-65_fig5_341988516 (accedido 18 de julio de 2023).
- [38] «Stress-Strain for HDPE at different temperatures», *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Stress-Strain-for-HDPE-at-different-temperatures_fig1_273106907 (accedido 18 de julio de 2023).
- [39] «Carbon/Epoxy Composite Stress-Strain Curve», *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Carbon-Epoxy-Composite-Stress-%20Strain-Curve_fig1_277640805 (accedido 18 de julio de 2023).
- [40] D. Adams, «Impact testing of composite materials», *Gardner Business Media, Inc.*, 14 de febrero de 2023. Accedido: 18 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.compositesworld.com/articles/impact-testing-of-composite-materials>
- [41] M. Hasan, H. Qassim, y S. Mohd, «Perforation of Polycarbonate Sheet When Subjected to Impact Test – A Review».
- [42] Admin, «What is carbon fiber?», *Element6 Composites*, feb. 2022, [En línea]. Disponible en: <https://element6composites.com/what-is-carbon-fiber/>
- [43] S. Afquir, A. Melot, A. Ndiaye, E. Hammad, J.-L. Martin, y P.-J. Arnoux, «Descriptive analysis of the effect of back protector on the prevention of vertebral and thoracolumbar

- injuries in serious motorcycle accident», *Accident Analysis & Prevention*, vol. 135, p. 105331, feb. 2020,doi: 10.1016/j.aap.2019.105331.
- [44] «Dainese Tipo 11 D1 Wave Air Back Protector (NEGRO): Automotriz». <https://www.amazon.com/-/es/Dainese-tipo-Wave-Protector-NEGRO/dp/B00W1WUKVY> (accedido 19 de julio de 2023).
- [45] «ANSYS Intro». https://www.matweb.com/help/ansys_intro.aspx
- [46] «Equivalent Stress», *Ansys*. https://courses.ansys.com/wp-content/uploads/2019/04/1.3.4-Equivalent_-Stress_-_rebranded.pdf
- [47] Benedick, De Leonardis, Green, y Petraglia, «Pilot Test of a Methodology for an Observation Survey of Motorcycle Personal Protective Equipment», *United States Department of Transportation*, 2023. Accedido: 19 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/55732>
- [48] S. Bonilla, «Proyecto Optero : Dispositivo de protección vital para motociclistas urbanos Parte 3», *hdl:20.500.12010/20007*, 2020. <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/handle/20.500.12010> (accedido 19 de julio de 2023).
- [49] DucatiMilano, «Unisex Back Protector Version 59 Company 2 Manis Ducati PAR Dainese», *DucatiMilano Online*. https://shop.ducatomilano.com/es/189-unisex-back-protector-version-59-company-2-manis-ducato-par-dainese.html?SubmitCurrency=1&id_currency=1&id_country=145&gclid=Cj0KCQiAjbagBhD3ARIsANRrqEtSLDspGY9_PbqdeBmTpdAkrlizSpSzVCXM5THmKE6ciKPcGEILvtEaAhZ4EA Lw_wcB (accedido 19 de julio de 2023).
- [50] M. Edwards y H. Waterfall, «Mechanical and ballistic properties of polycarbonate apposite to riot shield applications», *Taylor and Francis*, vol. 37, n.º 1, pp. 1-6, feb. 2008, doi: 10.1179/174328908x283177
- [51] E. Giraldo, «Choque en moto, dolor por todas partes», *LA PATRIA*, 21 de abril de 2019. Accedido: 15 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.lapatria.com/salud/choque-en-moto-dolor-por-todas-partes-435735>
- [52] K. Balwant, K. Parminder, y K. Ankush, «Analysis of deformation of RC beam with

addition of fly ash: a Finite element based modeling», 2020.

- [53] Mariano, «PET», *Tecnología de los Plásticos*, 30 de mayo de 2011. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html> (accedido 16 de julio de 2023).
- [54] «the online Materials Information Resource», *MatWeb*. <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=501acbb63cbc4f748faa7490884cd bca&ckck=1> (accedido 17 de julio de 2023).
- [55] Shell elements», 14 de julio de 2017. https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_ShellElements.htm 1 (accedido 19 de julio de 2023).
- [56] «Octógono dada la medida del lado - profesor de dibujo», *Profesor de Dibujo*, 21 de marzo de 2020. <https://www.profesordedibujo.com/geometria-plana/poligonos/a-partir-de-un-lado/octogono-dada-la-medida-del-lado/> (accedido 19 de julio de 2023).
- [57] «Polycarbonate protective gear for tactical applications», *thomasnet*, 30 de marzo de 2018. <https://www.thomasnet.com/insights/polycarbonate-protective-gear-for-tactical-applications/> (accedido 19 de julio de 2023).
- [58] «Continuum, Shell, Beam y Truss elements, ¿Cuál utilizar? - 4RealSim», *RealSim*, 13 de agosto de 2019. <https://www.4realsim.com/es/continuum-shell-beam-truss-elements/#:~:text=Los%20elementos%20Shell%20%28o%20shell%20elements%29%20se%20utilizan,Shell%3A%20elementos%20shell%20convencionales%20y%20elementos%20shell%20continuos.> (accedido 19 de julio de 2023).
- [59] «Alpinestars Nucleon KR-2i Back Protector Insert», *RevZilla*. <https://www.revzilla.com/motorcycle/alpinestars-nucleon-back-protector-insert> (accedido 20 de julio de 2023).
- [60] «Viper Pro Back Protector | D3O», *D3O*. <https://www.d3o.com/partner-support/products/viper-pro-back-protector/> (accedido 20 de julio de 2023).
- [61] T. Rogers, «Everything you need to know about polycarbonate (PC)», 21 de agosto de 2015. <https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-you-need-to-know-about-polycarbonate-pc> (accedido 20 de julio de 2023).
- [62] W. Syed, «ANSYS mesh metrics explained», *FEA Tips*, nov. 2022, [En línea]. Disponible

en: <https://featips.com/2022/11/21/ansys-mesh-metrics-explained/>

ANEXOS

ANEXO 1.

PROPIEDADES DE LA FIBRA DE CARBONO

Tabla 10

Propiedades de la fibra de carbono

Propiedad	Valor	Unidad
Módulo De Young X Dirección	9,00E+09	Pa
Módulo De Young Y Dirección	9,18E+10	Pa
Módulo De Young Z Dirección	9,00E+09	Pa
Relación De Poisson Xy	0,05	
Relación De Poisson Yz	0,3	
Relación De Poisson Xz	0,3	
Módulo De Corte Xy	3,60E+09	Pa
Módulo De Corte Yz	3,00E+09	Pa
Módulo De Corte Xz	3,00E+09	Pa
Límites De Esfuerzo Ortotrópico		
Tracción X Dirección	8,29E+08	Pa
Tracción Y Dirección	8,29E+08	Pa
Dirección De Tracción Z	5,00E+07	Pa
Dirección X Compresiva	-4,39E+08	Pa
Dirección Y Compresiva	-4,39E+08	Pa
Dirección Z Compresiva	-1,40E+08	Pa
Cortante Xy	1,20E+08	Pa
Cortante Yz	5,00E+07	Pa
Cortante Xz	5,00E+07	Pa
Límites De Esfuerzo Ortotrópico		
Dirección X De Tracción	0,0086	
Dirección Y De Tracción	0,0086	
Dirección Z De Tracción	0,007	
Dirección X Compresiva	-0,0055	

Dirección Y Compresiva	-0,0055	
Dirección Z Compresiva	-0,012	
Cortante Xy	0,022	
Cortante Yz	0,018	
Cortante Xz	0,018	
Densidad	1480	kg m ⁻³
Elasticidad Ortótropa		
Módulo De Young X Dirección	9,18E+10	Pa

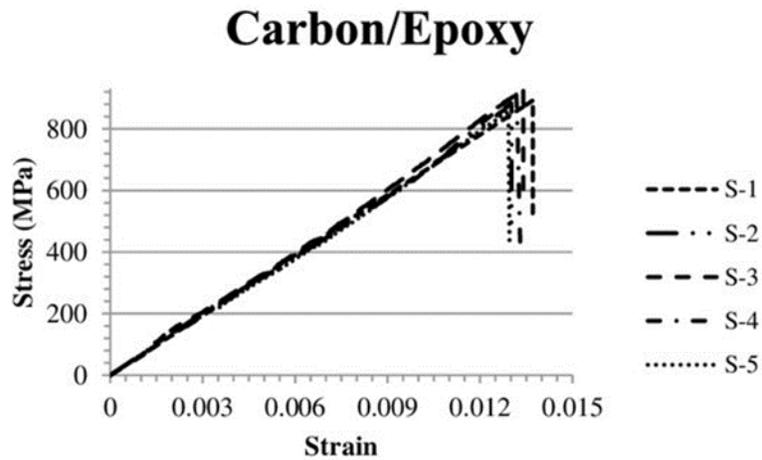
Nota. Tabla de propiedades de la fibra de carbono utilizadas en el software ANSYS Workbench. Tomado de: matweb. Disponible: https://www.matweb.com/help/ansys_intro.aspx

ANEXO 2.

GRÁFICA DE DEFORMACIÓN FC

Figura 49

Gráfica de deformación FC



Nota. En el grafico se muestra el estudio de varias muestras, de las cuales se observó que la máxima resistencia a la tracción es en promedio 894MPa, además se observa que es un material que no se comporta de forma elástica. Tomado de: Researchgate. Disponible: https://www.researchgate.net/figure/Carbon-Epoxy-Composite-Stress-Strain-Curve_fig1_277640805

ANEXO 3.

PROPIEDADES DEL POLICARBONATO

Tabla 11

Propiedades del policarbonato

Propiedad	Valor	Unidad
Módulo de young	2200	MPa
Módulo de corte	700	MPa
Resistencia a la tracción	70	MPa
Alargamiento	95	%
Fuerza compresiva	86	MPa
Fatiga	39	MPa
Resistencia a la flexión	90	MPa
Dureza	121.5	Rockwell
Fuerza de impacto	8	J/cm
Límite elástico	60	MPa
Expansión térmica	68	E-6/K
Conductividad térmica	0.2025	W/m*K
Calor específico	1380	J/kg*K
Vicaria	170	°C
Temperatura de fusión	267	°C
Temperatura del vidrio	150	°C
Temperatura mínima de servicio	-135	°C
Temperatura máxima de servicio	130	°C
Densidad	1210	kg/m ³
Resistividad	2.1e+20	Ohm*mm ² /m
Potencial de ruptura	41	kV/mm

Factor de pérdida dieléctrica	0.00075	
Coefficiente de fricción	0.445	
Índice de refracción	1.586	
Contracción	0.75	%
Absorción de agua	0.15	%

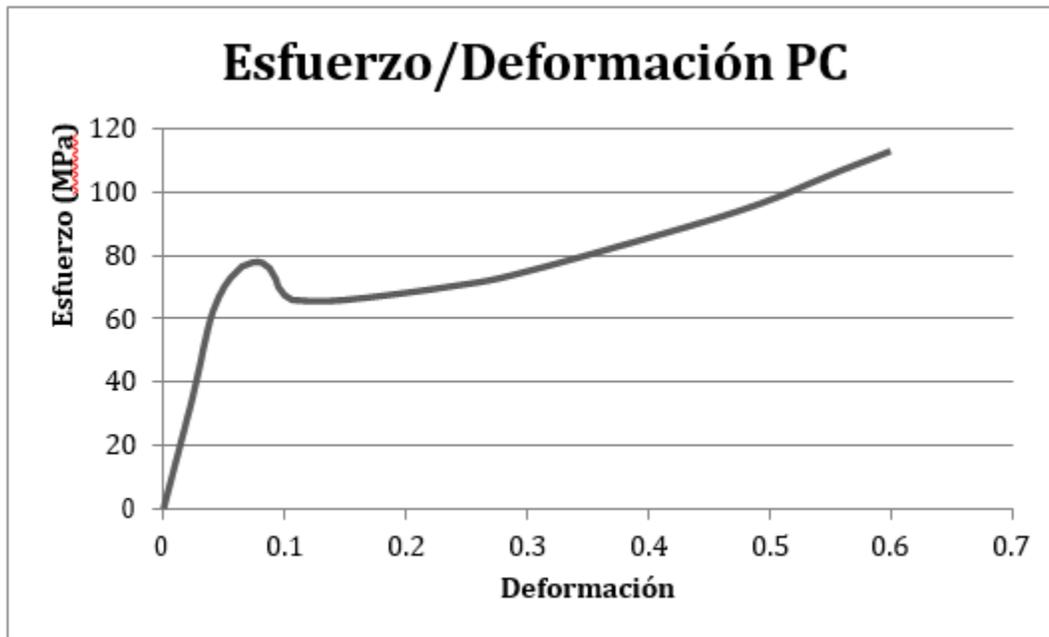
Nota. Propiedades mecánicas del policarbonato utilizadas en el software ANSYS Workbench. Tomado de: designerdata. Disponible: <https://designerdata.nl/materials/plastics/thermo-plastics/polycarbonate>

ANEXO 4.

GRÁFICA DE DEFORMACIÓN PC

Figura 50

Gráfica de deformación PC



Nota. Grafica esfuerzo deformación del policarbonato, donde se observa que el material tiene una zona de fluencia bastante amplia. Tomado de: Researchgate, Tensile true stress-strain curves for Polycarbonate. Disponible: https://www.researchgate.net/figure/Tensile-true-stress-strain-curves-for-Polycarbonate-at-different-strain-rate-From-65_fig5_341988516

ANEXO 5.

PROPIEDADES DEL HDPE

Tabla 12

Propiedades del HDPE

Propiedad	Valor	Unidad
Módulo De Young	1000	MPa
Módulo De Corte	750	MPa
Resistencia A La Tracción	26	MPa
Alargamiento	590	%
Fatiga	19	MPa
Resistencia A La Flexión	32.5	MPa
Dureza	63.5	Shore
Fuerza De Impacto	5.585	J/cm
Límite Elástico	24,5	MPa
Expansión Térmica	120	E-6/K
Conductividad Térmica	0.49	W/m*K
Calor Específico	2250	J/kg*K
Vicaria	125	°C
Temperatura De Fusión	121	°C
Temperatura Del Vidrio	-110	°C
Temperatura Mínima De Servicio	-35	°C
Temperatura Máxima De Servicio	85	°C
Densidad	952.5	kg/m ³
Resistividad	5,00E+17	Ohm*mm ² /m
Potencial De Ruptura	18.7	kV/mm
Factor De Pérdida Dieléctrica	0.00065	
Coefficiente De Fricción	0.275	

Índice De Refracción	1.525	
Contracción	3	%
Absorción De Agua	0.01	%

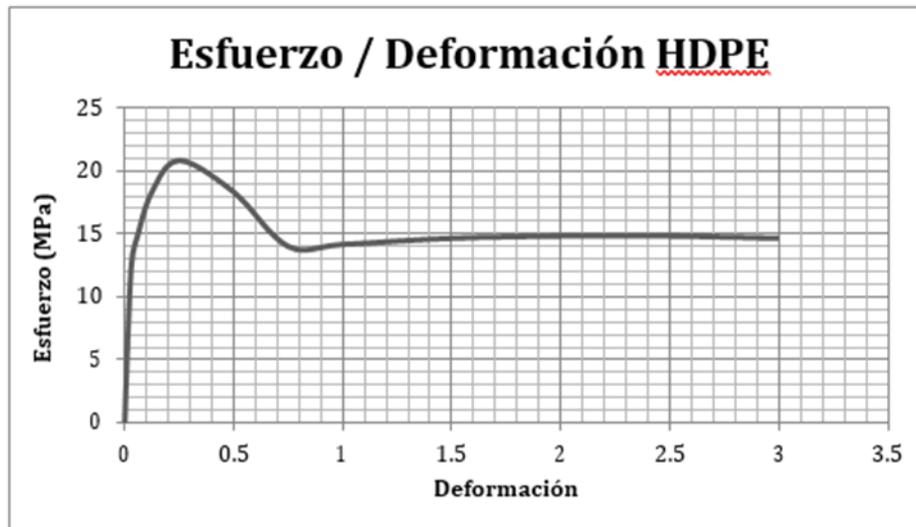
Nota. Tabla de propiedades mecánicas del polietileno de alta densidad utilizadas en el programa ANSYS Workbench. Tomado de: designerdata. Disponible: <https://designerdata.nl/materials/plastics/thermo-plastics/high-density-polyethen>

ANEXO 6.

GRÁFICA DE DEFORMACIÓN HDPE

Figura 51

Gráfica de deformación HDPE



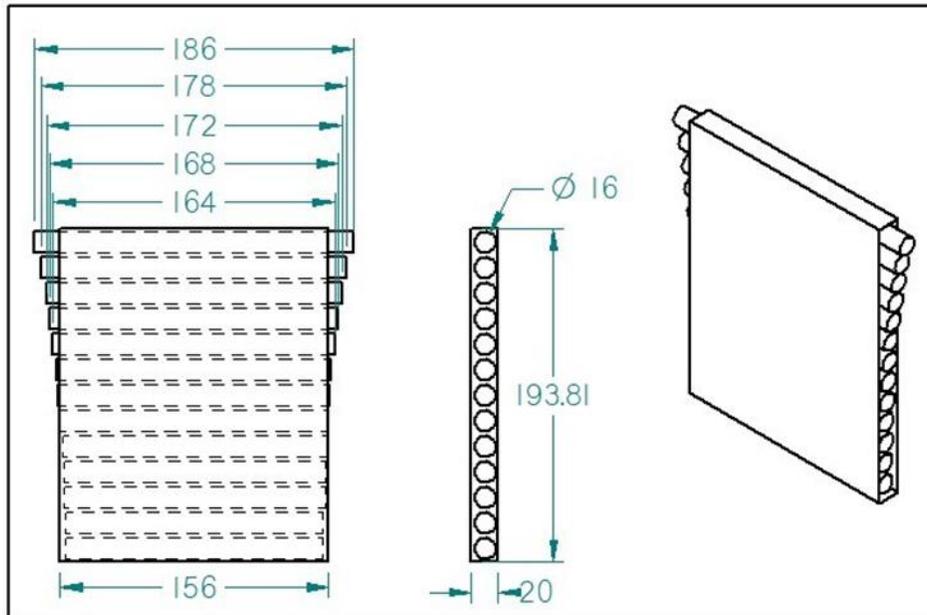
Nota. En la gráfica se observa el comportamiento del material, tal como se observa, el material tiene una zona de fluencia bastante amplia. Tomado de: Researchgate, “Unidad 15. Materiales Poliméricos y Compuestos”. Disponible: https://www.researchgate.net/figure/Stress-Strain-for-HDPE-at-different-temperatures_fig1_273106907

ANEXO 7.

GEOMETRÍA GENERADA SHELL (CÍRCULO)

Figura 52

Geometría generada shell (círculo)



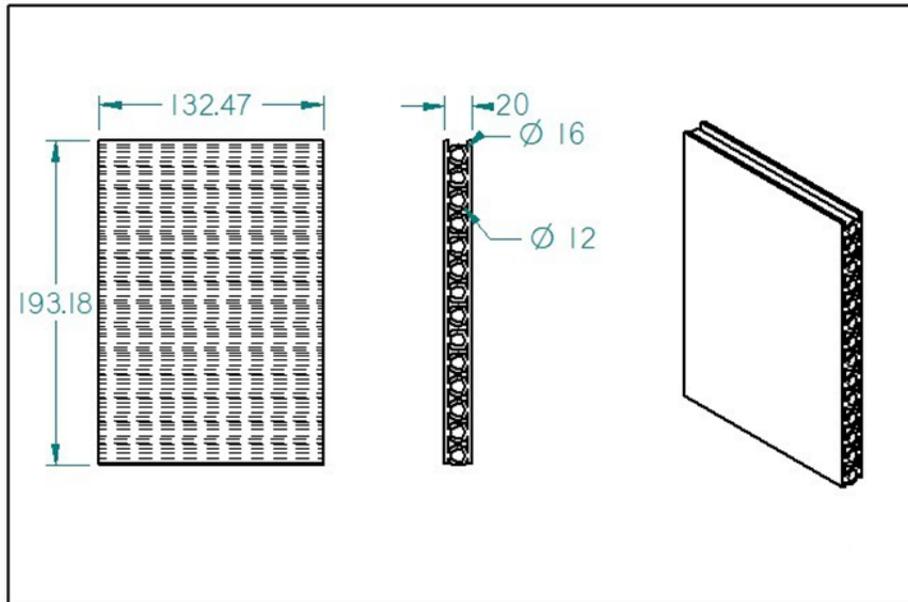
Nota. En la Figura se observa el plano del protector con geometría circular diseñado con geometría tipo “solid”

ANEXO 8.

GEOMETRÍA GENERADA SOLID (CÍRCULO)

Figura 53

Geometría generada solid (círculo)



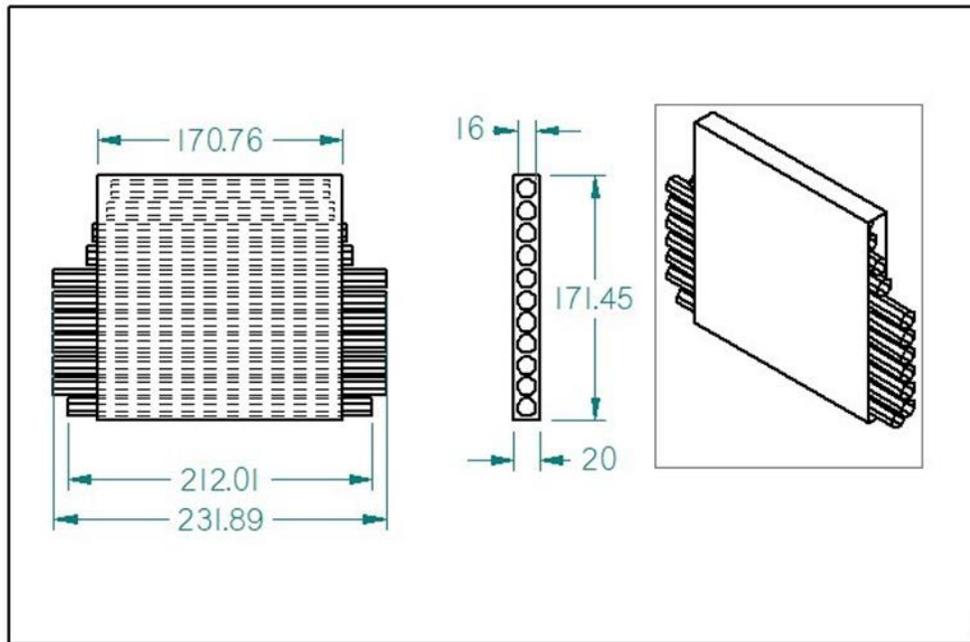
Nota. En la Figura se observa el plano del protector con geometría circular diseñado con geometría tipo “solid”

ANEXO 9.

GEOMETRÍA GENERADA SHELL (OCTÁGONO)

Figura 54

Geometría generada shell (octágono)



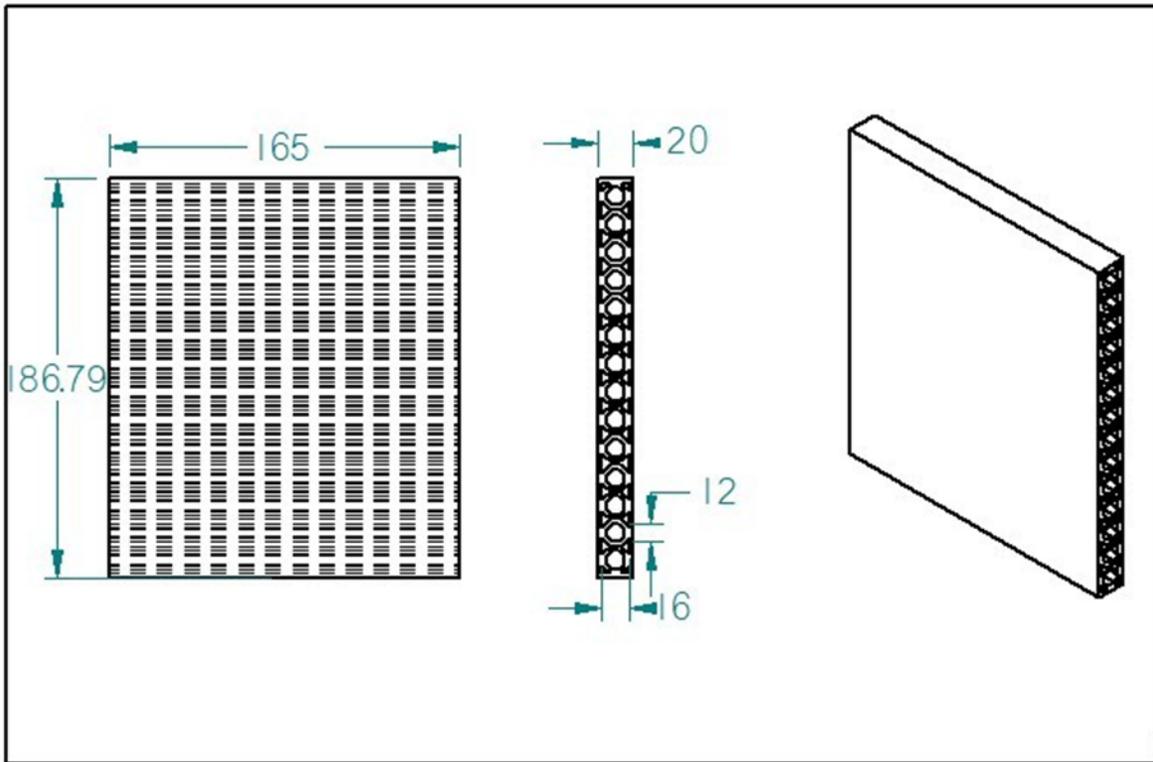
Nota. En la Figura se observa el plano del protector con geometría octagonal diseñado con geometría tipo “Shell”

ANEXO 10.

GEOMETRÍA GENERADA SOLID (OCTÁGONO)

Figura 55

Geometría generada solid (octágono)



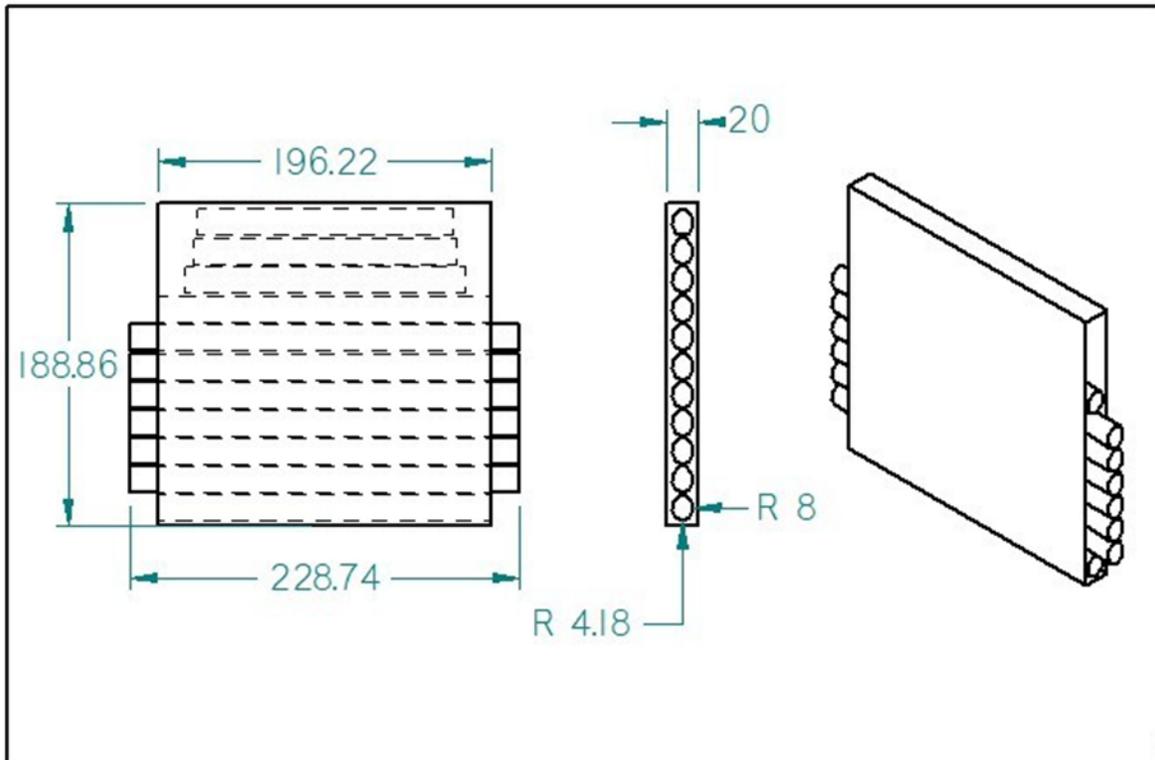
Nota. En la Figura se observa el plano del protector con geometría octagonal diseñado con geometría tipo“Solid”

ANEXO 11.

GEOMETRÍA GENERADA SHELL (ÓVALO)

Figura 56

Geometría generada shell (óvalo)



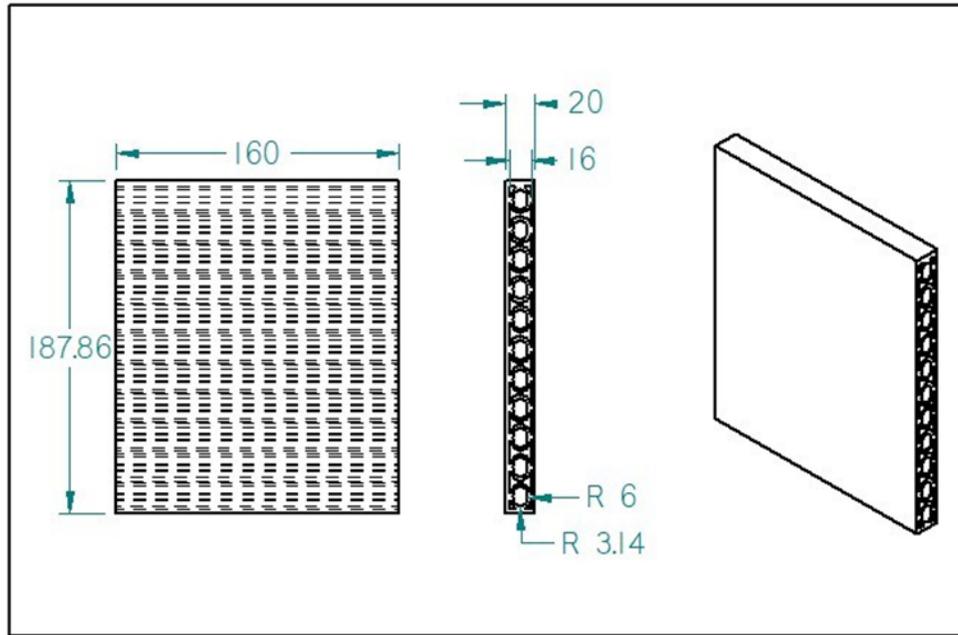
Nota. En la Figura se observa el plano del protector con geometría ovalada diseñado con geometría tipo "Shell"

ANEXO 12.

GEOMETRÍA GENERADA SOLID (ÓVALO)

Figura 57

Geometría generada solid (óvalo)



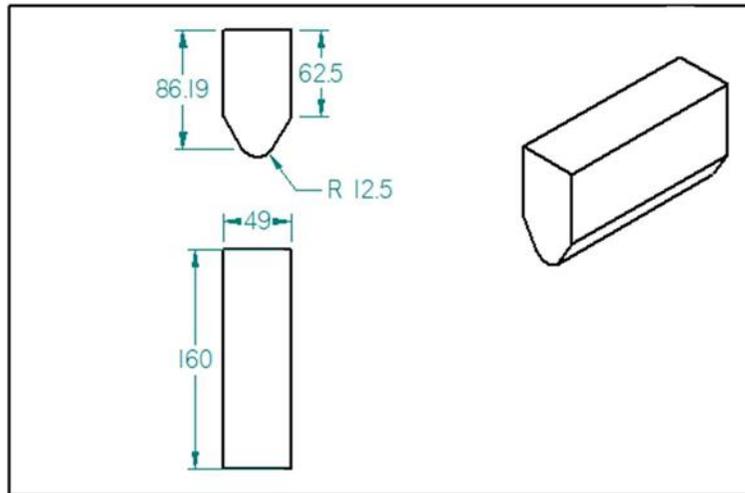
Nota. En la Figura se observa el plano del protector con geometría ovalada diseñado con geometría tipo “Solid”

ANEXO 13.

PLANO DEL PERCUTOR

Figura 58

Plano del percutor



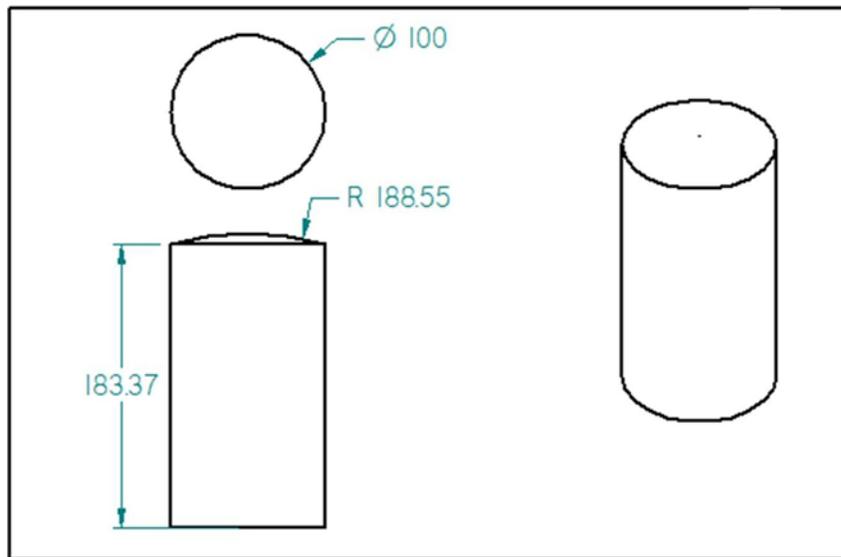
Nota. En la Figura se observa el plano del percutor diseñado con las medidas establecidas por la norma EN 1621-2.

ANEXO 14.

PLANO DEL YUNQUE

Figura 59

Plano del yunque



Nota. En la Figura se observa el plano del yunque diseñado con las medidas establecidas por la norma EN 1621-2.