



**ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**TEMA: “ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DEL ATENUADOR DE  
IMPACTO FABRICADO CON MATERIALES COMPUESTOS  
DEL VEHÍCULO PROTOTIPO PARA COMPETENCIA EN LA  
FÓRMULA SAE”**

**AUTORES: CRISTIAN PAÚL MÉNDEZ BORJA  
CARLOS FERNANDO PEÑAFIEL HERNÁNDEZ**

**DIRECTOR: ING. HENRY IZA**

**LATACUNGA**

**2018**



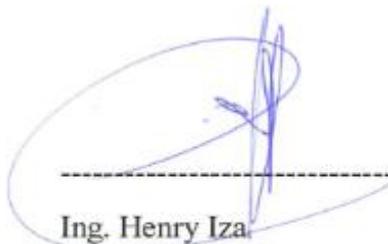
**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DEL ATENUADOR DE IMPACTO FABRICADO CON MATERIALES COMPUESTOS DEL VEHÍCULO PROTOTIPO PARA COMPETENCIA EN LA FÓRMULA SAE” realizado por los señores CARLOS FERNANDO PEÑAFIEL HERNÁNDEZ Y CRISTIAN PAÚL MÉNDEZ BORJA , ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores CARLOS FERNANDO PEÑAFIEL HERNÁNDEZ Y CRISTIAN PAÚL MÉNDEZ BORJA para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, 10 de enero del 2018

  
-----  
Ing. Henry Iza  
**DIRECTOR**



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, CRISTIAN PAÚL MÉNDEZ BORJA y CARLOS FERNANDO PEÑAFIEL HERNÁNDEZ, con cédula de ciudadanía N°1721836102 y N°0604256313 respectivamente, declaramos que este trabajo de titulación, “ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DEL ATENUADOR DE IMPACTO FABRICADO CON MATERIALES COMPUESTOS DEL VEHÍCULO PROTOTIPO PARA COMPETENCIA EN LA FÓRMULA SAE” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 10 de enero del 2018

-----  
CARLOS PEÑAFIEL HERNÁNDEZ

C.C.: 0604256313

-----  
CRISTIAN MÉNDEZ BORJA

C.C.: 1721836102



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros, CRISTIAN PAÚL MÉNDEZ BORJA y CARLOS FERNANDO PEÑAFIEL HERNÁNDEZ, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DEL ATENUADOR DE IMPACTO FABRICADO CON MATERIALES COMPUESTOS DEL VEHÍCULO PROTOTIPO PARA COMPETENCIA EN LA FÓRMULA SAE” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, 10 de enero del 2018

-----  
CARLOS PEÑAFIEL HERNÁNDEZ

C.C.: 0604256313

-----  
CRISTIAN MÉNDEZ BORJA

C.C.: 1721836102

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo a mis padres, Rosario y Fernando, por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida y a mi abuela, Blanca, que siempre supo brindarme las palabras correctas para seguir adelante.

**Carlos Fernando Peñafiel Hernández**

## **DEDICATORIA**

La presente investigación dedico a mis padres Patricio Méndez y Germania Borja por todo el apoyo brindado a lo largo de mis estudios, por todos los consejos que han servido de guía en mi vida y por los valores que me han inculcado para ser una mejor persona, y a mi esposa e hijo, que son la motivación para seguir adelante y cumplir con nuestros objetivos.

**Cristian Paúl Méndez Borja**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis padres y familiares que han sabido guiarme a lo largo de los años y a mi novia por ser una persona incondicional.

**Carlos Fernando Peñafiel Hernández**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por ayudarme a llegar a este instante de mi vida con salud para lograr mis objetivos, a mis padres, hermanos y mi esposa por la ayuda que me supieron brindar a lo largo de este camino.

**Cristian Paúl Méndez Borja**

# ÍNDICE DEL CONTENIDO

CARÁTULA .....	i
CERTIFICACIÓN .....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vii
ÍNDICE DEL CONTENIDO .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xv
ABREVIATURAS .....	xvii

## CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Planteamiento del problema .....	2
1.2.1 Árbol de problemas .....	3
1.3 Descripción resumida del proyecto .....	3
1.4 Justificación e Importancia .....	4
1.5 Objetivos .....	5
1.5.1 Objetivo general .....	5
1.5.2 Objetivos específicos .....	5
1.6 Metas .....	6

## CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO .....	7
2.1 Fundamentación teórica .....	7
2.1.1 Estado del Arte .....	7

2.1.2	Fórmula SAE .....	12
2.1.3	Atenuador de impacto.....	14
2.1.4	Energía de absorción .....	19
2.1.5	Deformación en materiales.....	19
2.1.6	Materiales compuestos .....	21
2.2	Hipótesis.....	35
2.3	Operacionalización de variables.....	35
2.3.1	Variable independiente.....	35
2.3.2	Variable dependiente .....	36
2.4	Metodología de desarrollo del proyecto .....	37

### **CAPÍTULO III**

3.	<b>DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA.....</b>	<b>39</b>
3.1	Diseño computacional. ....	39
3.1.1	Diseño CAD. ....	39
3.1.2	Simulación CAE.....	40
3.1.3	Resultados.....	42
3.1.4	Matriz de selección de material.....	48
3.2	Implementación de la propuesta.....	51
3.2.1	Análisis del proceso de manufactura. ....	52
3.2.2	Construcción de la propuesta.....	55
3.2.3	Cuadro de procesos.....	59

### **CAPÍTULO IV**

4.	<b>PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>60</b>
4.1	Prueba de aplastamiento cuasi estático. ....	60
4.2	Pruebas y análisis. ....	61
4.2.1	Obtención de datos. ....	61
4.2.2	Comparación con resultados.....	63

4.2.3	Análisis de resultados.....	63
4.3	Comprobación de la hipótesis.....	65
<b>CAPÍTULO V</b>		
5.	<b>MARCO ADMINISTRATIVO .....</b>	<b>66</b>
5.1	Recursos.....	66
5.1.1	Recursos humanos.....	66
5.1.2	Recursos tecnológicos.....	67
5.1.3	Recursos materiales.....	67
5.2	Costo total del proyecto.....	68
5.3	Cronograma.....	69
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>70</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		<b>71</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>72</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>77</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Atenuador de impacto de fibra de carbono.....	7
Figura 2 Atenuador de impacto deformado por prueba, deformado por simulación... 8	8
Figura 3 Forma del Atenuador de Impacto UPM Racing. ....	8
Figura 4 Atenuador de impacto UPM Racing.....	9
Figura 5 Atenuador de impacto de balsa prototipo 1. ....	9
Figura 6 Atenuador de Impacto de balsa prototipo 2.....	9
Figura 7 Atenuador de impacto de aluminio – poliestireno expandido .....	10
Figura 8 Atenuador de impacto FESPE 2011. ....	11
Figura 9 Atenuador de impacto FESPE 2012. ....	11
Figura 10 Atenuador de impacto FESPE 2014. ....	12
Figura 11 Vehículo prototipo Fórmula SAE Alemania. ....	13
Figura 12 Plano Atenuador de impacto estándar FSAE. ....	14
Figura 13 Atenuador de impacto estándar FSAE.....	15
Figura 14 Atenuador de impacto.....	15
Figura 15 Plano atenuador de impacto de Al y espuma de poliuretano.....	16
Figura 16 Atenuador de impacto antes del experimento, después del experimento.. 16	16
Figura 17 Atenuador de impacto con ondulaciones.....	17
Figura 18 Atenuador de impacto diseñado en LS DYNA.....	18
Figura 19 Deformación de un atenuador de impacto de fibra de carbono. ....	20
Figura 20 Energía disipada en una deformación.....	20
Figura 21 Atenuador de impacto metálico, Fuerza vs Desplazamiento.....	21
Figura 22 Fuerza vs Deformación en atenuador de material compuesto. ....	21
Figura 23 De izquierda a derecha. Fibra de Vidrio, Carbono y Kevlar. ....	21
Figura 24 Estructura de un material compuesto reforzado con fibras largas.....	22
Figura 25 Sección transversal de un laminado de carbono/epoxi. ....	25
Figura 26 Tejidos en fibra de aramida .....	27
Figura 27 De izquierda a derecha; Fibra de Sisal, Kenaf y Abaca. ....	27
Figura 28 Clasificación de materiales compuestos. ....	28
Figura 29 Productos de cinta y tela. ....	28
Figura 30 Efecto del diámetro de la fibra sobre la resistencia. ....	29
Figura 31 Propiedades de los materiales bidireccionales y unidireccionales. ....	30

Figura 32 Material cosido (no tejido).....	31
Figura 33 Lámina y laminados.....	31
Figura 34 Procesos de fabricación de compuestos de matriz polimérica.....	33
Figura 35 Procesos de fabricación de compuestos de matriz metálica. ....	33
Figura 36 Procesos de fabricación de compuestos de matriz cerámica. ....	34
Figura 37 Avión comercial Boeing 787 Dreamliner.....	35
Figura 38 Atenuador de Impacto.....	39
Figura 39 Dimensiones del Atenuador de Impacto.....	40
Figura 40 Mallado del Atenuador de Impacto. ....	41
Figura 41 E. Cinética - E. Interna vs. Desplazamiento Fibra de Vidrio. ....	43
Figura 42 E. Cinética - E. Interna vs. Desplazamiento Aramida. ....	44
Figura 43 E. Cinética - E. Interna vs. Desplazamiento Fibra de Carbono. ....	44
Figura 44 Desaceleración vs. Desplazamiento Fibra de Vidrio. ....	45
Figura 45 Desaceleración vs. Desplazamiento Aramida.....	46
Figura 46 Desaceleración vs. Desplazamiento Fibra de Carbono.....	46
Figura 47 Tipos de Eensayo para materiales compuestos.....	49
Figura 48 Fibra de Carbono vs Fibra de Impacto Ensayo Charpy.....	51
Figura 49 Atenuador de Impacto en Fibra de Carbono.....	51
Figura 50 Molde en poliestireno expandido del Atenuador de Impacto.....	55
Figura 51 Capas de Fibra de Carbono.....	55
Figura 52 Materiales para la fabricación del atenuador de impacto al vacío.....	56
Figura 53 Proporción de resina y catalizador.....	56
Figura 54 Impregnado con resina y recubrimiento del molde .....	57
Figura 55 Molde recubierto de fibra, Ubicación de acoples, Sellado hermético .....	57
Figura 56 Proceso de curado en bolsa de vacío. ....	57
Figura 57 Fin del proceso de curado y remoción del molde.....	58
Figura 58 Atenuador de impacto.....	58
Figura 59 Cuadro de procesos.....	59
Figura 60 Máquina universal de ensayos Tinius Olsen 1000 kN. ....	60
Figura 61 Test de Aplastamiento Cuasi Estático 350 segundos. ....	61
Figura 62 Fuerza vs. Tiempo Test Cuasi Estático.....	61
Figura 63 E. Absorbida vs. Desplazamiento Test Cuasi Estático.....	62
Figura 64 Desaceleración vs. Desplazamiento Test Cuasi Estático.....	62
Figura 65 Superposición de curvas Desaceleración vs. Desplazamiento .....	63

Figura 66 Deformación y Daño en el análisis por elementos finitos. ....	64
Figura 67 Deformación y Daño Test Cuasi Estático.....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resultados obtenidos simulación y pruebas dinámicas. ....	10
Tabla 2 Características del atenuador de impacto de Al y espuma de poliuretano. ...	17
Tabla 3 Denominación y características de las fibras de vidrio comerciales. ....	25
Tabla 5 Variable independiente: Material Compuesto .....	35
Tabla 4 Variable dependiente: Reglamento FSAE .....	36
Tabla 6 Comparación entre las medidas mínimas y las medidas del prototipo. ....	39
Tabla 7 Propiedades mecánicas de materiales compuestos. ....	40
Tabla 8 Propiedades físicas Fibra de Vidrio. ....	42
Tabla 9 Propiedades físicas Aramida. ....	42
Tabla 10 Propiedades físicas Fibra de Carbono. ....	43
Tabla 11 Resultados del análisis Fibra de Vidrio. ....	43
Tabla 12 Resultados del análisis Aramida. ....	44
Tabla 13 Resultados del análisis Fibra de Carbono. ....	45
Tabla 14 Resultados de la desaceleración Fibra de Vidrio. ....	45
Tabla 15 Resultados de la desaceleración Aramida. ....	45
Tabla 16 Resultados de la desaceleración Fibra de Carbono. ....	46
Tabla 17 Daño y peso Fibra de Vidrio. ....	47
Tabla 18 Daño y peso Aramida. ....	47
Tabla 19 Daño y peso Fibra de Carbono. ....	47
Tabla 20 Comparación de resultados de los prototipos analizados. ....	48
Tabla 21 Matriz de selección del material. ....	48
Tabla 22 Parámetros de ensayo Charpy. ....	49
Tabla 23 Resultados de ensayo Charpy. ....	50
Tabla 24 Resultados estadísticos ensayo Charpy. ....	50
Tabla 25 Comparación de Fibra de Carbono vs Fibra de Vidrio .....	51
Tabla 26 Elementos de seguridad personal. ....	52
Tabla 27 Materiales y equipos empleados en la fabricación. ....	53
Tabla 28 Hoja de procesos. ....	54
Tabla 29 Resultados Test Cuasi Estático. ....	62
Tabla 30 Resultados de la desaceleración Test Cuasi Estático. ....	63
Tabla 31 Comparación de resultados Test vs Simulación. ....	63

Tabla 32 Resultados Atenuador FESPE 2011 vs Atenuador CF. ....	65
Tabla 33 Recursos humanos.....	67
Tabla 34 Recursos tecnológicos.....	67
Tabla 35 Recursos materiales.....	68
Tabla 36 Costo de los materiales de fabricación.....	68
Tabla 37 Costo total del proyecto. ....	68

## ABREVIATURAS

g = gravedad

GPa = giga pascal

Hz = hercio

in = pulgada

J = joule

kg = kilo gramo

kJ = kilo joule

m = metro

mm = milímetro

oz = onza

T = tonelada

yd = yarda

E1 = módulo de elasticidad en X

E2 = módulo de elasticidad en Y

E3 = módulo de elasticidad en Z

$\nu_{12}$  = coeficiente de poisson en XY

$\nu_{13}$  = coeficiente de poisson en XZ

$\nu_{23}$  = coeficiente de poisson en YZ

$G_{12}$  = módulo de corte en XY

$G_{13}$  = módulo de corte en XZ

$G_{23}$  = módulo de corte en YZ

$X_t$  = resistencia a la tracción longitudinal

$X_c$  = resistencia a la compresión longitudinal

$Y_t$  = resistencia a la tracción transversal

$Y_c$  = resistencia a la compresión transversal

$S_{12}$  = resistencia a la cizalladura longitudinal

$S_{13}$  = resistencia a la cizalladura transversal

$G_{ft}$  = energía longitudinal de fractura por tracción

$G_{fc}$  = energía longitudinal de fractura por compresión

$G_{mt}$  = energía transversal de fractura por tracción

$G_{mc}$  = energía transversal de fractura por compresión

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La Fórmula *Student* es una competencia de universidades a nivel mundial, que consiste en el diseño y construcción de un vehículo monoplace de tipo fórmula al que se le realiza diversas pruebas para evaluar cada parámetro en su estructura, de esta manera se promueve en sus concursantes el realizar un trabajo de ingeniería impecable (SAE, SAE INTERNACIONAL, 2017).

Garantizar la seguridad de un piloto a bordo de un monoplace tipo Fórmula es uno de los trabajos más importantes de ingeniería debido a las altas velocidades y fuerzas generadas por la competencia misma. En el caso de colisiones frontales se producen energías de impacto de tal magnitud que ponen en riesgo la seguridad del piloto, para este particular, todo vehículo monoplace tipo Fórmula debe tener instalado un atenuador de impacto que por diseño se ubica en la parte frontal de tal manera que asegure la absorción de una cantidad de energía de impacto considerable y lo haga de forma rápida y constante para que al momento de suscitarse la colisión el monoplace tenga una mejor resistencia estructural y amortiguación (Wang, y otros, 2016).

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE ha participado en los años 2011, 2012 y 2014 en la Fórmula *Student* Alemania, utilizando prototipos de atenuador de impacto de diferentes materiales como poliestireno, kevlar en forma de panel de abeja y cinta metálica (2011), aluminio 2024 junto con kevlar como material base (2012) y aluminio 6061 en conjunto con cápsulas plásticas (2014), otorgando en las 3 oportunidades un desempeño óptimo y estando a la par de las mejores universidades del mundo.

## 1.2 Planteamiento del problema

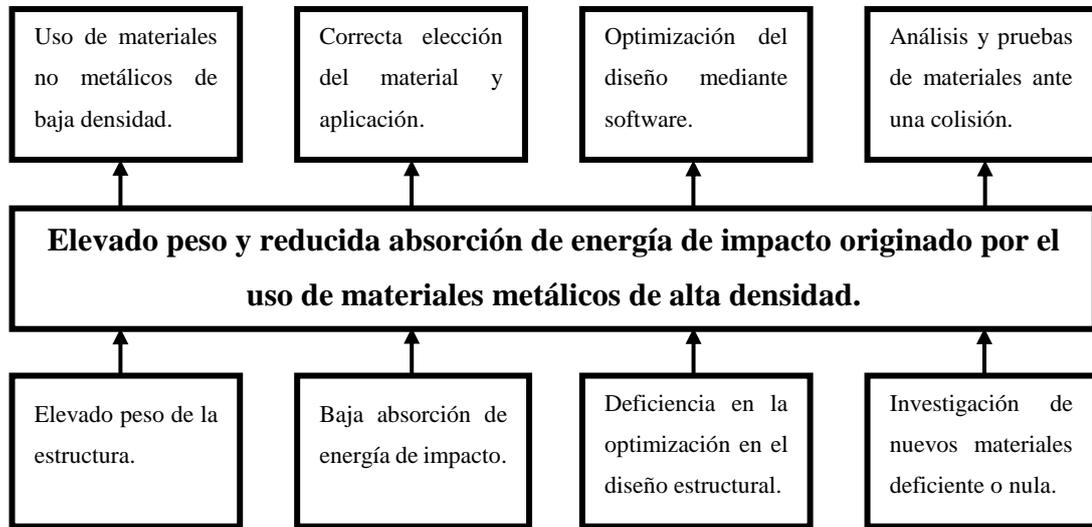
Un atenuador de impacto es un elemento de seguridad pasiva que actúa en el momento de una colisión frontal haciendo que el monoplaza desacelere de forma constante y amortiguando la carga producida por la energía de impacto, esto se logra utilizando materiales que sean ligeros, capaces de absorber y disipar energía por diferentes métodos, ya sea por fractura estructural, pandeo y daños materiales (Belingardi & Chiandussi, 2011).

Los materiales empleados en la construcción del atenuador de impacto del vehículo presentado en la competencia Fórmula *Student* Alemania 2011 superaron los lineamientos establecidos como son el dimensionamiento, deformación y absorción de energía, 7350 Joules a una velocidad de impacto de 7 m/s (SAE, FORMULA SAE, 2017). Para dejar de lado al tradicional acero y optimizar el diseño del atenuador de impacto del prototipo 2011 se ha optado por un rediseño tanto geométricamente como en los materiales utilizados para su fabricación.

La utilización de elementos metálicos que poseen alta densidad, la escasez de materia prima en el mercado ecuatoriano y los requerimientos de manipulación y conformación de los materiales compuestos, que son ligeros como el plástico y tan resistentes como el acero, ha motivado al equipo FESPE a evolucionar en el uso de nuevos materiales para el diseño de su prototipo con el cual se encontrarán a la par de sus competidores que residen en países con mayor desarrollo de la industria de aplicación de materiales (FORMULA STUDENT GERMANY, 2017).

Al impulsar el análisis de la eficiencia de un atenuador de impacto fabricado con materiales compuestos se espera la obtención de un elemento estructural que logre absorber la energía de impacto de una manera eficaz y que cumpla con todos los requerimientos establecidos para la competencia optimizando el peso total.

### 1.2.1 Árbol de problemas



### 1.3 Descripción resumida del proyecto

La presente investigación propone analizar la eficiencia de un atenuador de impacto fabricado con materiales compuestos para un vehículo prototipo Fórmula *Student*. Para tener una mejor perspectiva de los aspectos que intervienen en el diseño estructural, la simulación por software y la prueba de aplastamiento cuasi estático se procederá a la recolección de información de diferentes fuentes científicas tanto teóricas como prácticas para así tener un fundamento para el presente estudio.

Se realizará el diseño computacional del atenuador de impacto utilizando todos los lineamientos vigentes en la Fórmula SAE y para el material compuesto se realizará una matriz de selección con el fin de determinar el que mejor cumple con los requerimientos. Tomando en cuenta aspectos importantes como la geometría, la disposición de las fibras, características físicas y mecánicas, se realizará un análisis por elementos finitos en software de simulación CAE y seguidamente se procederá a la optimización en el diseño con el fin de obtener resultados acertados.

Utilizando los lineamientos establecidos en la Fórmula SAE para la prueba de aplastamiento cuasi estático, se establece una masa máxima del prototipo de 300 kg, velocidad de 7 m/s, desaceleración de 20 g promedio, 40 g pico y una absorción de

energía de 7350 Joules como mínimo (SAE, FORMULA SAE, 2017), se procede a realizar la prueba en la máquina universal de ensayos Tinius Olsen de 1000 kN para validar la simulación por elementos finitos.

Se efectúa el análisis de resultados de la prueba de aplastamiento cuasi estático frente a los resultados de la simulación computacional, finalmente se compara los valores obtenidos del modelo fabricado en materiales compuestos frente al diseño presentado en la competencia Fórmula *Student* Alemania 2011.

#### **1.4 Justificación e Importancia**

La investigación por realizar sobre la eficiencia de un atenuador de impacto fabricado con materiales compuestos tiene como propósito principal tener un fundamento científico sobre el comportamiento de este tipo de materiales en condiciones de impacto y analizar los datos obtenidos para cuantificar la cantidad de absorción de energía que presenta frente a un anterior diseño elaborado en materiales metálicos.

El diseño se cimienta en la optimización de componentes estructurales formados de materiales que requieren altas prestaciones, debido a la insuficiente información sobre los métodos de obtención, manipulación y aplicación de materiales compuestos aplicados en el campo automotriz, y particularmente en el área estructural.

La identificación, diseño, optimización y análisis de materiales compuestos de altas prestaciones con características físicas promisorias es uno de los aspectos fundamentales para esta investigación debido a que es un factor que contribuye en el desarrollo tecnológico y sustentable de nuestro país.

Es un objetivo primordial establecer una base científica confiable acerca de la aplicación de los materiales compuestos en estructuras automotrices sometidas a impacto, para de esta manera poder impulsar hacia el siguiente nivel al equipo de competición Fórmula *Student* ESPE, con un atenuador de impacto totalmente optimizado y garantizando la completa seguridad del piloto ante una posible colisión.

El análisis del comportamiento de los materiales compuestos ante las pruebas de impacto dispuestas por la FSAE busca establecer un sustento sólido para la utilización de un material alternativo al tradicional acero, utilizado en estructuras automotrices. Al encontrar las ventajas y desventajas que presenta este material, se tendrá una documentación técnica que ayude a promover futuros proyectos que impulsen alternativas viables en el diseño de componentes estructurales automotrices.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo general**

- Analizar de la eficiencia del atenuador de impacto fabricado con materiales compuestos del vehículo prototipo para competencia en la Fórmula SAE.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Recopilar información técnica-científica referente a las propiedades, características y procedimiento de aplicación de los materiales compuestos en estructuras automotrices.
- Realizar el diseño computacional CAD y simulación CAE del comportamiento del atenuador de impacto en las condiciones vigentes en la normativa SAE para prototipos Fórmula *Student*.
- Mediante la utilización de una matriz de decisión establecer el material más adecuado para la realización del atenuador de impacto.
- Recolectar los datos obtenidos de la prueba de aplastamiento cuasi estático mediante la utilización de la máquina de ensayos universal Tinius Olsen.
- Analizar los resultados obtenidos en la investigación para validar la eficiencia que posee el atenuador de impacto fabricado con materiales compuestos y comparar su desempeño con la propuesta presentada en la competencia Fórmula *Student* Alemania 2011.

## 1.6 Metas

- Recopilar información técnica-científica acerca de las propiedades, características y procedimiento de aplicación de los materiales compuestos en estructuras automotrices.
- Realizar una matriz de decisión y seleccionar el material compuesto idóneo para la presente aplicación.
- Diseñar un prototipo de atenuador de impacto en software CAD y simular una condición de aplastamiento cuasi estático para valorar su desempeño.
- Evaluar los datos obtenidos en la simulación y elegir la geometría que más se adapte a las condiciones requeridas.
- Construir un modelo de prueba para evaluar en condiciones reales el comportamiento de los materiales compuestos frente a un impacto frontal.
- Recolectar los datos obtenidos en la prueba de aplastamiento cuasi estático y analizar la deformación, desplazamiento y absorción de energía de impacto frente al diseño presentado en 2011.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

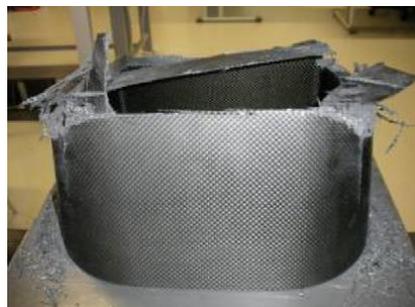
#### 2.1 Fundamentación teórica

##### 2.1.1 Estado del Arte

En este capítulo se realizará una investigación de los fundamentos en los que se respalda este proyecto a través de una sustentación teórica de trabajos relacionados a los atenuadores de impacto.

El atenuador de impacto es un elemento primordial en la construcción de un vehículo prototipo Fórmula *Student*, ya que este sirve para resguardar la integridad principalmente del piloto y también del vehículo.

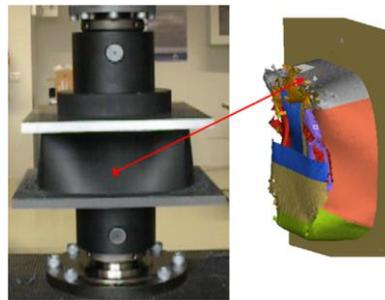
Investigadores experimentados sugieren la fabricación de atenuadores de impacto de fibra de carbono. (Belingardi, Boria, & Obradovic, 2012) afirman que los compuestos especialmente los de fibra de carbono son capaces de trabajar de manera excelente al momento de una colisión y se están utilizando para fabricar componentes dedicados de absorción de energía. En la figura 1 se muestra el atenuador de impacto deformado posterior a la prueba de aplastamiento.



**Figura 1 Atenuador de impacto de fibra de carbono.**

**Fuente** (Belingardi, Boria, & Obradovic, 2012)

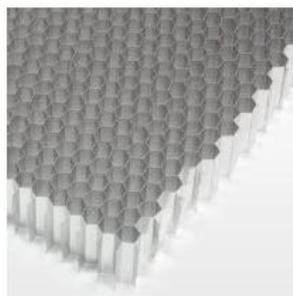
El atenuador de impacto presentado por (Belingardi, Boria, & Obradovic, 2012) presentó un comportamiento estable de la estructura frente a la fuerza de desplazamiento, casi constante, y un límite de desaceleración por debajo de 20 g. Este valor cumple con el reglamento de la Fórmula SAE ya que se exige que la desaceleración del vehículo no exceda de 20 g en promedio. En la figura 2 se muestra la deformación tras realizar la prueba de aplastamiento cuasi estático en comparación con la deformación obtenida en la simulación por elementos finitos.



**Figura 2 Atenuador de impacto deformado por prueba, deformado por simulación.**

**Fuente** (Belingardi, Boria, & Obradovic, 2012)

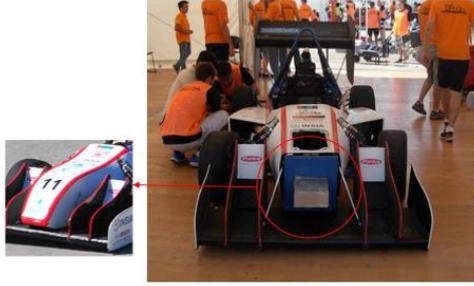
El equipo de la Universidad Politécnica de Madrid que lleva el nombre de UPM Racing utiliza un atenuador de impacto en forma de nido de abeja ya que es un material especial para absorción de energía.



**Figura 3 Forma del Atenuador de Impacto UPM Racing.**

**Fuente** (Azcárate, 2017)

El atenuador de impacto mostrado en la figura 4 tiene la ventaja de poseer bajo peso, la absorción de energía de impacto supera los lineamientos establecidos en la competencia y presenta una desaceleración constante.



**Figura 4 Atenuador de impacto UPM Racing**

**Fuente** (Azcárate, 2017)

En la investigación realizada para la construcción del atenuador de impacto de la Universidad Politécnica Salesiana en el año 2013, se fabricaron tres atenuadores con los siguientes materiales:

- Diseño de balsa prototipo 1.



**Figura 5 Atenuador de impacto de balsa prototipo 1.**

**Fuente** (Luna, Pucha , & Valencia , 2013)

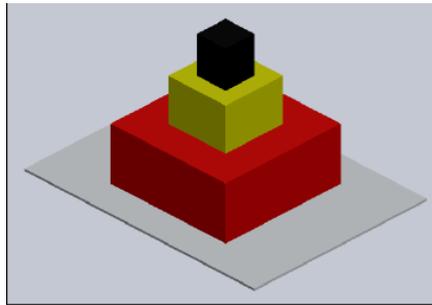
- Diseño de balsa prototipo 2.



**Figura 6 Atenuador de Impacto de balsa prototipo 2.**

**Fuente** (Luna, Pucha , & Valencia , 2013)

- Diseño aluminio – poliestireno expandido



**Figura 7 Atenuador de impacto de aluminio – poliestireno expandido**

**Fuente** (Luna, Pucha , & Valencia , 2013)

El diseño presentado en la figura 7 consta de tres cajas de aluminio de diferente tamaño en las cuales se realizan agujeros y se introduce poliestireno expandido en aerosol.

A continuación, en la tabla 1 se muestra los resultados de los tres modelos tanto en simulación en software como en pruebas dinámicas.

**Tabla 1**

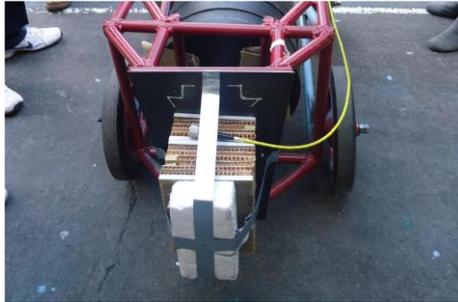
**Resultados obtenidos simulación y pruebas dinámicas.**

Atenuadores.	Software.			Pruebas Dinámicas.	
	Von Mises (GPa)	Desplazamiento (mm)	Energía (J)	Desplazamiento (mm)	Deformación (mm)
<b>Diseño Balsa Prototipo 1.</b>	2.75	215.4	7800	201.6	12
<b>Diseño Balsa Prototipo 2.</b>	1.43	202.4	25000	209.6	3.5
<b>Diseño aluminio.</b>	67	198	5500	171.2	27

**Fuente** (Luna, Pucha , & Valencia , 2013)

Los diseños de balsa cumplen los requerimientos del reglamento SAE, el diseño de aluminio – poliestireno expandido no cumple con las especificaciones del reglamento por lo que se lo descarta para la competencia Fórmula SAE.

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE el equipo FESPE ha participado en la Fórmula *Student* Alemania con tres modelos de atenuador de impacto. El primero se diseñó en el año 2011, los materiales usados fueron poliestireno (espuma flexible), Kevlar en forma de panal de abeja y cinta metálica para recubrir el atenuador de impacto, el plato anti-intrusión fue de acero dulce 1020. En la figura 8 se puede observar el diseño presentado para la competencia del año 2011.



**Figura 8 Atenuador de impacto FESPE 2011.**

**Fuente** (Iza, Formula Student Germany. Impact attenuator form, 2011)

En el año 2012 el atenuador de impacto mantuvo como material base el Kevlar en forma de panal de abeja, pero esta vez se reforzó con aluminio 2024 en forma de panal de abeja, el plato anti-intrusión fue de acero dulce 1020. En la figura 9 se muestra el atenuador de impacto empleado en el año 2012.



**Figura 9 Atenuador de impacto FESPE 2012.**

**Fuente** (Iza, 2012)

El atenuador de impacto que se fabricó en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en el año 2014 fue construido con espuma de poliestireno y cápsulas de plástico, adicionalmente el monocasco fue de aluminio 6061. El plato anti-intrusión fue de acero dulce 1020. En la figura 10 se muestra el atenuador presentado en el año 2014.



**Figura 10 Atenuador de impacto FESPE 2014.**

**Fuente** (Iza, 2014)

### **2.1.2 Fórmula SAE**

La fórmula SAE es una competición que se realiza entre estudiantes de distintas universidades del mundo, según (SAE International, 2016) es un desafío de diseño e ingeniería dedicado a estudiantes de pregrado y posgrado de diferentes universidades del mundo. La competición ayuda a los estudiantes a mejorar sus habilidades de diseño, ingeniería y administración de proyectos aplicando los conocimientos aprendidos en clase en una competencia rigurosa.

La competición de la Fórmula SAE es un evento que se realizó por primera vez en Estados Unidos en la Universidad de Texas, Austin, el año 1981 con 6 equipos participantes con un total de 40 estudiantes. La última competencia se realizó en Michigan International Speedway, Brooklyn, en el año 2016 con un total de 120 equipos y 2470 estudiantes de diferentes universidades del mundo.

Las universidades que participan en la competencia deben de desarrollar y construir un prototipo de vehículo de carreras monoplaza aplicando los conocimientos adquiridos en las aulas sobre investigación, diseño, construcción, desarrollo y marketing.

El grupo de estudiantes que desea participar en la Fórmula SAE tiene que diseñar, construir y realizar diferentes pruebas al prototipo Fórmula *Student* cumpliendo una serie de reglas creadas para asegurar un proceso normal del evento en el sitio y así impulsar la resolución de problemas de manera eficaz y eficiente (SAE International, 2016).

Para la participación en la competencia Fórmula SAE, el monoplaza tiene que ser previamente revisado en una serie de pruebas estáticas y garantizar el cumplimiento del reglamento, posterior a su aprobación el monoplaza será sometido a una serie de pruebas de rendimiento en pista como muestra la figura 11.

Los eventos relacionados de manera oficial a la Fórmula de la serie SAE bajo el reglamento de la Fórmula SAE son:

- Fórmula SAE Australasia
- Fórmula SAE Brasil
- Fórmula SAE Italia
- Fórmula *Student* Reino Unido
- Fórmula *Student* Austria
- Fórmula *Student* Alemania
- Fórmula SAE Japón.



**Figura 11 Vehículo prototipo Fórmula SAE Alemania.**

**Fuente** (FORMULA STUDENT GERMANY, 2017)

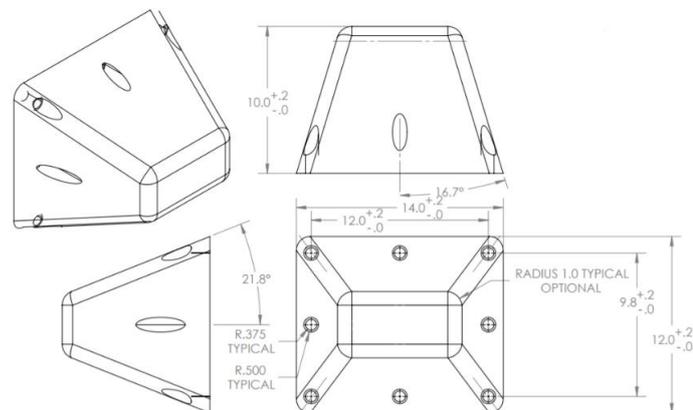
#### **2.1.2.1 Reglamento Fórmula *Student* 2018 para atenuador de impacto**

El atenuador de impacto en un vehículo monoplaza es un elemento que ayuda a amortiguar un choque, el atenuador se deforma y se encarga de absorber energía para prevenir daños graves al piloto y al vehículo.

Para la fabricación del atenuador de impacto la Fórmula SAE ha impuesto una serie de reglas que se describen en el Artículo 3, apartado T3.20: Atenuador de impacto y T3.21: Requisitos del atenuador de impacto.

- El atenuador de impacto se monta en la parte delantera de un vehículo con una masa total de 300 kg (661 libras) con una velocidad de impacto de 7.0 metros/segundo (23,0 pies/s), la desaceleración del vehículo no debe exceder los 20 g en promedio y 40 g de pico. La energía absorbida en este evento debe alcanzar o exceder 7350 Joules.
- Al menos 200 mm (7.8 in) de largo, con su longitud orientada a lo largo del eje delantero/posterior.
- Al menos 100 mm (3.9 in) de alto y 200 mm (7.8 in) de ancho.

Además, debe contar con un plato anti intrusión de acero sólido de 1.5 mm (0.060in) o de aluminio sólido de 4 mm (0.157in) y debe ser colocado firmemente en la parte frontal del vehículo. El reglamento de la Fórmula SAE brinda un diseño estándar de atenuador de impacto que puede ser utilizado por los equipos que crean conveniente o caso contrario se debe realizar un diseño propio de dicho elemento, a continuación, se muestra el diseño estándar del atenuador de impacto FSAE:



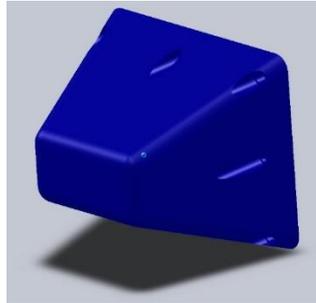
**Figura 12 Plano Atenuador de impacto estándar FSAE.**

**Fuente** (SAE International, 2017)

### 2.1.3 Atenuador de impacto

Un atenuador de impacto es una estructura diseñada para absorber energía en caso de una colisión y de esta manera mejorar la seguridad del conductor, (Castro, 2016) define al atenuador de impacto como un elemento utilizado para desacelerar al prototipo Fórmula *Student* de manera controlada hasta que se detenga completamente, adicionalmente (Wang, y otros, 2016) afirma que un atenuador de impacto es capaz de

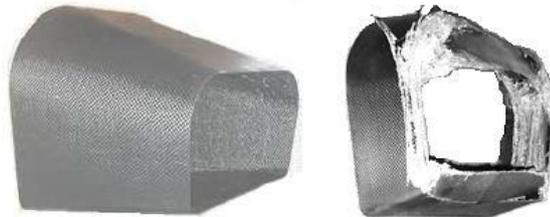
asegurar el frente del vehículo absorbiendo una cierta cantidad de energía al momento del impacto y además mejora la resistencia estructural del vehículo en una colisión. En conclusión, el atenuador de impacto debe absorber energía de manera rápida y gradual para amortiguar el impacto tanto del piloto como del vehículo en una colisión.



**Figura 13 Atenuador de impacto estándar FSAE.**

**Fuente** (Formula SAE, 2016)

Para (Belingardi, Boria, & Obradovic, 2012) el atenuador de impacto es un elemento de vital importancia en el monoplaza ya que este debe garantizar la seguridad del piloto en caso de una colisión, este elemento está diseñado para absorber la energía de impacto y limitar la desaceleración que actúa sobre el piloto.



**Figura 14 Atenuador de impacto.**

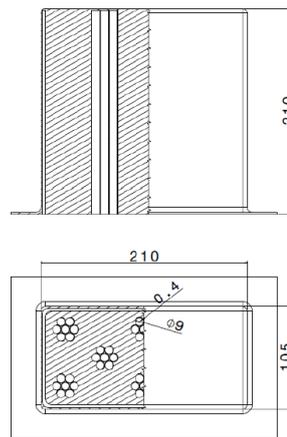
**Fuente** (Obradovic, Belingardi, & Boria, 2015)

### **2.1.3.1 Diseño de atenuadores**

El diseño del atenuador de impacto es fundamental para cumplir con el reglamento FSAE que se explicó anteriormente, se han realizado varios estudios sobre este importante elemento, los cuales son fabricados con diferentes materiales, geometrías y dimensiones. A continuación, se detallan los diferentes diseños de atenuadores.

### 2.1.3.1.1 Atenuador de impacto de aluminio – espuma de poliuretano.

En el estudio realizado por (Castro, 2016) muestra un diseño de atenuador de impacto que consiste en ocho grupos de siete tubos de aluminio cada uno, el núcleo del atenuador es de espuma de poliuretano de baja densidad ( $40 \text{ Kg/m}^3$ ) y con cuerpo exterior de un material compuesto llamado aramida, las dimensiones se muestran en la figura 15.



**Figura 15 Plano atenuador de impacto de Al y espuma de poliuretano.**

**Fuente** (Castro, 2016)

El presente diseño obtuvo un peso elevado y una capacidad de absorción limitada con valores de desaceleración y deformación que apenas cumplían con el reglamento Fórmula SAE. En la figura 16 se muestra el atenuador de impacto antes y después del experimento:



**Figura 16 Atenuador de impacto antes del experimento, después del experimento.**

**Fuente** (Castro, 2016)

**Tabla 2**

**Características del atenuador de impacto de Al y espuma de poliuretano.**

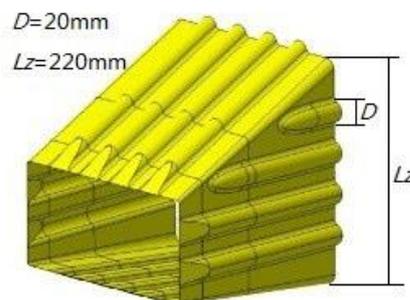
<b>Peso</b>	0.833 kg
<b>Sección frontal</b>	210 x 105 mm <sup>2</sup>
<b>Altura</b>	210 mm
<b>Máxima desaceleración</b>	37.06 g
<b>Desaceleración media</b>	14.86 g
<b>Energía absorbida</b>	7890 J
<b>Máxima deformación</b>	23.9 mm

**Fuente** (Castro, 2016)

**2.1.3.1.2 Atenuador de impacto de resina epoxi y fibra de carbono.**

En la investigación realizada por (Wang, y otros, 2016) se realizó un atenuador de impacto con la sección frontal en forma rectángulo con una altura de 100 mm y de ancho 200 mm. Teniendo en cuenta la instalación, la longitud del atenuador de impacto se fija en 200 mm.

Este atenuador de impacto tiene una forma diferente a los diseños anteriores. (Wang, y otros, 2016) presentan un atenuador el cual posee en su estructura vigas onduladas como se muestra en la figura 17, el presente diseño se lo realiza para conseguir una desaceleración continua y óptima absorción de energía. Para la fabricación de este modelo se utilizó compuestos de resina epoxi reforzados con fibra de carbono con un espesor de 0.2 mm en el ondulado.



**Figura 17 Atenuador de impacto con ondulaciones.**

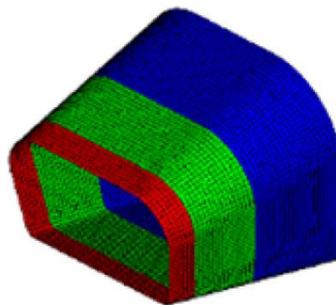
**Fuente** (Wang, y otros, 2016)

En la figura 17 se muestra el diseño del atenuador de impacto con sus dimensiones, las ondulaciones tienen 20 mm de diámetro y la longitud total es de 220 mm, además, tiene un ángulo de inclinación de 0° y 45° para asegurar la máxima utilización del material y la eficiencia de absorción de energía.

Los resultados obtenidos al realizar las pruebas muestran que, en el proceso de aplastamiento cuasi estático la energía absorbida fue de 9975.81 J, mientras que la carga media fue de 72376.8 N. En la prueba dinámica de impacto por caída de peso, la desaceleración media fue de 10.7 g y la desaceleración máxima de 18.7 g, con 7910.78 J de energía absorbida, tanto la prueba cuasi estática como la dinámica satisfacen los valores impuestos en el reglamento SAE.

#### **2.1.3.1.3 Atenuador de impacto de fibra de carbono – resina epoxi**

El diseño de (Belingardi, Boria, & Obradovic, 2012) consiste en una estructura piramidal truncada con una sección casi rectangular. La estructura piramidal hace posible obtener una mayor estabilidad durante un impacto progresivo, mientras que la sección rectangular, como se muestra en la figura 18, tiene bordes redondeados para evitar concentraciones de tensión, adicionalmente el atenuador cumple con el dimensionamiento mínimo y se fabricó con fibra de carbono y resina epoxi.



**Figura 18 Atenuador de impacto diseñado en LS DYNA.**

**Fuente** (Obradovic, Belingardi, & Boria, 2015)

#### **2.1.3.2 Requisitos de los materiales**

Los materiales que deben usarse para la fabricación de atenuadores de impacto deben de cumplir con los siguientes requisitos:

- Buena capacidad de absorción de energía.
- Deformación constante.
- Baja densidad y alta tenacidad.
- Buena resistencia a la compresión.
- Buena resistencia a la tensión.

#### **2.1.4 Energía de absorción**

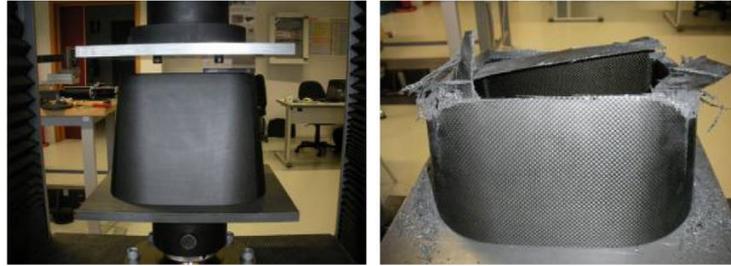
La absorción de energía en los atenuadores de impacto depende de las propiedades del material de fabricación, la geometría y sus dimensiones. (Romero García, 2002) afirma que la energía es la capacidad de un cuerpo para realizar un trabajo. El trabajo se representa como el producto de una fuerza por la distancia en la dirección de actuación de la fuerza aplicada.

Al momento de una colisión el encargado de absorber toda la energía del impacto es el atenuador, (Fazilati & Alisadeghi, 2016) complementa que los atenuadores de impacto son elementos utilizados para reducir los efectos de accidentes. El atenuador de impacto absorbe energía cinética, al momento del impacto esta se transforma en otros tipos de energía mayormente en energía de deformación plástica a través de grandes deformaciones de material.

En la investigación de (Milan, Kulísek, & Bogomolov) se afirma que los materiales metálicos emplean la deformación plástica como técnica de absorción de energía, sin embargo, los materiales compuestos incorporan la fractura de las fibras, lo que provoca una absorción de energía superior a la que presentan los materiales metálicos.

#### **2.1.5 Deformación en materiales**

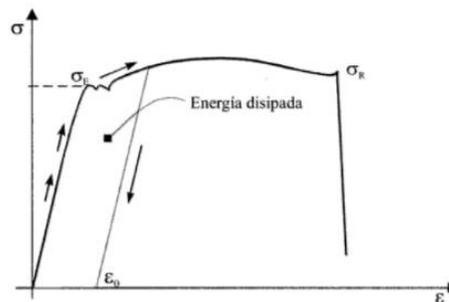
El atenuador de impacto tiende a deformarse para de esta manera absorber energía, es muy importante conocer la deformación en los materiales, según (Romero García, 2002) las deformaciones se producen porque los materiales necesitan variar las distancias entre sus átomos para ser capaces de transmitir fuerzas.



**Figura 19 Deformación de un atenuador de impacto de fibra de carbono.**

**Fuente** (Belingardi, Boria, & Obradovic, 2012)

Al deformarse el atenuador de impacto disipa la energía, en la figura 20 se muestra la energía disipada mediante un diagrama esfuerzo-deformación. (Romero García, 2002) afirma que el área bajo el diagrama esfuerzo-deformación, indica la capacidad de un material para absorber energía hasta producirse su fractura. La mayor parte de la energía es disipada en la deformación del material y se pierde en forma de calor.

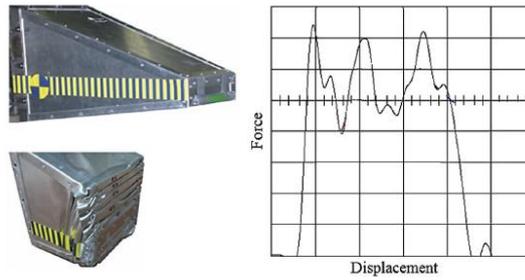


**Figura 20 Energía disipada en una deformación.**

**Fuente** (Romero García, 2002)

El atenuador de impacto en una colisión se deforma de manera plástica por lo que la energía del impacto es absorbida y disipada en forma de calor. Según (Belingardi, Boria, & Obradovic, 2012) en los atenuadores metálicos la absorción de energía se consigue por deformación plástica y en los materiales compuestos se basa en la fractura difusa material.

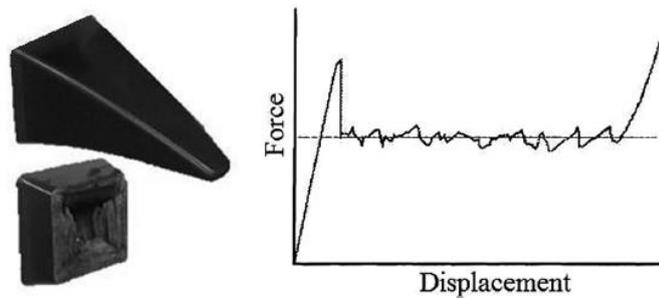
(Boria S. , Pettinari, Giannoni, & Cosimi, 2015) afirma que los materiales compuestos son ideales para la absorción energía tras haber realizado un test con una carga de aplastamiento casi constante, además que, en estos materiales pueden ocurrir diferentes fallas como rotura de la fibra, deformación, craqueo de la matriz, desprendimiento, extracción de la fibra y delaminación.



**Figura 21 Atenuador de impacto metálico, Fuerza vs Desplazamiento.**

**Fuente** (Boria & Pettinari, 2014)

En la figura 22 se muestra la deformación de un atenuador de impacto fabricado con materiales compuestos y la curva Fuerza vs Desplazamiento.

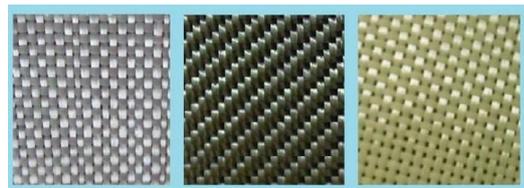


**Figura 22 Fuerza vs Deformación en atenuador de material compuesto.**

**Fuente** (Boria & Pettinari, 2014)

### 2.1.6 Materiales compuestos

Según (Campbell, 2010) un material compuesto puede definirse como una combinación de dos o más materiales que da como resultado otro material de mejores propiedades que las de los componentes individuales.



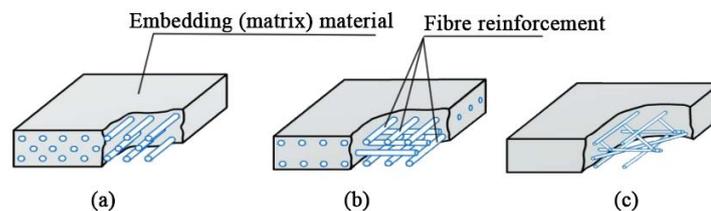
**Figura 23 De izquierda a derecha. Fibra de Vidrio, Carbono y Kevlar.**

**Fuente** (Randjbaran, et al., 2013)

En contraste con las aleaciones metálicas, cada material retiene sus propiedades químicas, físicas y mecánicas separadas. Las principales ventajas de los materiales compuestos son su alta resistencia y rigidez, combinada con baja densidad, en comparación con los materiales a granel, lo que permite la reducción de peso en la pieza terminada. Los dos componentes de un material compuesto son un refuerzo y una matriz.

### 2.1.6.1 Matriz

Para (Stupenengo, 2011) la matriz es la fase continua en la que el refuerzo queda inmerso. (Mallick, 2007) afirma que las matrices mantienen y protegen las fibras de daños ambientales y físicos. Mantener las fibras separadas disminuye el agrietamiento y redistribuye la carga por igual entre todas las fibras. La capacidad de los compuestos para soportar el calor, para conducir el calor o la electricidad depende principalmente de las propiedades de la matriz ya que esta es la fase continua.



**Figura 24 Estructura de un material compuesto reforzado con fibras largas  
(a) orientado, (b) normal entre sí, (c) orientado aleatoriamente.**

**Fuente (Peters, 1998)**

#### 2.1.6.1.1 Matriz Polimérica

En síntesis (Sinha, 2006) menciona que los polímeros son mucho más populares que los otros dos materiales de la matriz, como son, los metales y la cerámica. Casi todos los refuerzos, inorgánicos y orgánicos, se pueden utilizar con polímeros para producir una amplia gama de plásticos reforzados o compuestos de polímero.

Los polímeros son particularmente atractivos debido a varias razones:

- Las densidades de los polímeros son usualmente muy bajas.
- Los polímeros son fácilmente procesables.
- La temperatura de procesamiento y curado está normalmente en un rango bajo, y en algunos casos, la temperatura ambiente será suficiente.

#### **2.1.6.1.1 Termoplásticos**

En cuanto a un termoplástico (Sinha, 2006) lo define como una colección de moléculas lineales o ramificadas de alto peso molecular. Se ablandan al calentar a temperaturas por encima de la temperatura de transición vítrea, pero recuperan su resistencia al enfriarse. La ventaja principal con los polímeros termoplásticos es que pueden ser formados repetidamente por calor y presión.

#### **2.1.6.1.2 Termoestable**

Por otro lado (Mallick, 2007) indica que, en un polímero termoestable, las moléculas se unen químicamente mediante enlaces cruzados, formando una estructura de red tridimensional rígida. Una vez que estos enlaces cruzados se forman durante la reacción de polimerización, el polímero termoestable no puede fundirse por aplicación de calor. Sin embargo, si el número de reticulados es bajo, todavía puede ser posible suavizarlos en temperaturas elevadas.

#### **2.1.6.1.2 Matriz Metálica**

Al realizar una comparación entre matriz polimérica y metálica (Sinha, 2006) expresa que los compuestos de matriz polimérica se utilizan hasta 180 °C y rara vez a más de 350 °C. Las matrices metálicas pueden ampliar el alcance de usar compuestos en una amplia gama de temperaturas, además, los compuestos de matriz metálica permiten la adaptación de varias propiedades útiles que no son realizables en aleaciones metálicas convencionales.

Alta resistencia específica y rigidez, baja expansión térmica, buena estabilidad térmica y mejor resistencia al desgaste son algunas de las características positivas de los compuestos de matriz metálica. Los compuestos metálicos proporcionan mejores propiedades transversales y mayor tenacidad en comparación con los poliméricos.

#### **2.1.6.1.3 Matriz Cerámica**

La cerámica es conocida por su estabilidad a altas temperaturas, alta resistencia a los golpes térmicos, alta dureza, alta resistencia a la corrosión y baja densidad. Sin embargo (Mallick, 2007) menciona además que son materiales quebradizos y poseen baja resistencia a la propagación de grietas, que se manifiesta en su baja tenacidad a la fractura. La razón principal para reforzar una matriz cerámica es aumentar su tenacidad a la fractura.

#### **2.1.6.2 Refuerzo**

La resistencia, rigidez y densidad del material compuesto depende en gran medida del material de refuerzo. Para (Stupenengo, 2011) la resistencia a la tracción final de un compuesto es el resultado de la sinergia entre el refuerzo y la matriz, en complemento (Sinha, 2006) agrega que la selección del tipo de fibra, la fracción de volumen de la fibra, la longitud de la fibra y la orientación de la fibra es muy importante ya que influye en las siguientes características de un material compuesto:

- Densidad
- Resistencia a la tracción
- Fuerza compresiva
- Resistencia a la fatiga
- Conductividades eléctricas y térmicas

##### **2.1.6.2.1 Fibra de Vidrio**

Según (Mallick, 2007) las fibras de vidrio son las más comunes de todas las fibras de refuerzo para compuestos de matriz polimérica. Las principales ventajas de las

fibras de vidrio son el bajo costo, alta resistencia a la tracción, alta resistencia química y excelentes propiedades aislantes. Las desventajas son el módulo de tracción relativamente bajo, la alta densidad, la sensibilidad a la abrasión durante la manipulación, la resistencia a la fatiga relativamente baja y la alta dureza.

**Tabla 3**

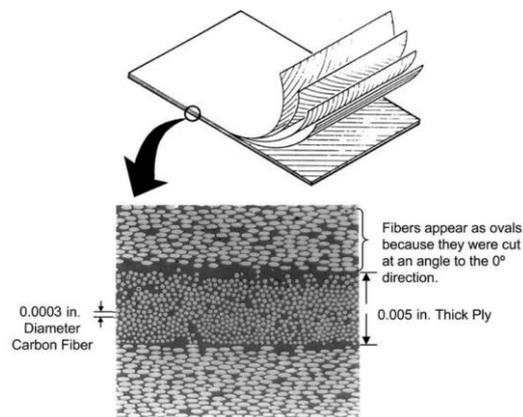
**Denominación y características de las fibras de vidrio comerciales.**

Letra de designación	Propiedades características
E, <i>Electrical</i>	Baja conductividad eléctrica
S, <i>Strength</i>	Alta resistencia
C, <i>Chemical</i>	Alta resistencia química
M, <i>Modulus</i>	Alta rigidez
A, <i>Alkali</i>	Alta alcalinidad
D, <i>Dielectric</i>	Constante dieléctrica baja

**Fuente** (Watson, Li, & Wallenberger, 2001)

#### 2.1.6.2.2 Fibra de Carbono

Para (United States Department of Transportation, 2014) las fibras de carbono son muy rígidas y fuertes, 3 a 10 veces más rígidas que las fibras de vidrio.



**Figura 25 Sección transversal de un laminado de carbono/epoxi.**

**Fuente** (Campbell, 2010)

Las ventajas incluyen su alta resistencia a la tracción y a la corrosión. Pueden soportar temperaturas extremadamente altas sin pérdida de mucha fuerza y rigidez. La conductividad térmica es alta y al mismo tiempo el coeficiente de expansión térmica es casi insignificante. Estas características térmicas los convierten en excelentes

materiales candidatos para aplicaciones de alta temperatura. Las desventajas incluyen una menor conductividad que el aluminio y alto costo.

#### **2.1.6.2.3 Fibra de Silicio**

(Sinha, 2006) señala que las fibras de sílice y cuarzo tienen propiedades térmicas superiores en comparación con las fibras de vidrio. Tienen una conductividad térmica extremadamente baja, pueden soportar cambios extremos en ambientes térmicos, pueden ser calentados a una temperatura muy alta sin afectar su trabajo. Estas propiedades las convierten en materiales ideales para la aplicación en estructuras calientes, como escudos térmicos, toberas de cohetes, etc.

#### **2.1.6.2.4 Fibra de Boro**

En su investigación (Schwartz & Schwartz, 1967) establece que las fibras de boro tienen cerca de seis veces el módulo de elasticidad y aproximadamente la misma resistencia y densidad que las fibras de vidrio. Estas fibras han sido desarrolladas para ser utilizadas como refuerzos en plásticos estructurales para vehículos aeroespaciales y otras aplicaciones de alto rendimiento.

#### **2.1.6.2.5 Fibra de Alúmina**

(Sinha, 2006) define que las fibras de alúmina son compatibles con matrices de metal y resina. Estas fibras poseen una alta temperatura de punto de fusión, 2040 °C. También soportan temperaturas de hasta 1000 °C sin pérdida de resistencia y propiedades de rigidez.

#### **2.1.6.2.6 Fibra de Aramida**

Sobre las fibras de aramida (Mallick, 2007) establece que son fibras de poliamida aromática altamente alifática que tienen la menor densidad y la mayor relación de resistencia a la tracción entre las fibras de refuerzo actuales. Como refuerzo, las fibras de aramida se utilizan en muchas aplicaciones marinas y aeroespaciales debido a las características que estas ofrecen, tales como: bajo peso, alta resistencia a la tracción y

resistencia al impacto. Los principales inconvenientes de las composiciones de fibras de aramida son su bajo grado de compresión y dificultad en el corte o mecanizado.



**Figura 26 Tejidos en fibra de aramida**

**Fuente** (Ozgur, Mohanty, & Misra, 2017)

#### **2.1.6.2.7 Fibra Natural**

Para (Wallenberger & Weston, 2004) las fibras naturales pueden obtenerse de fuentes vegetales, animales y minerales. Ejemplos de fibras naturales son el yute, el lino, el cáñamo, el remi, el sisal, la fibra de coco y la fibra de banano. Todas estas fibras se cultivan como plantas agrícolas en diversas partes del mundo y se utilizan comúnmente para hacer cuerdas, respaldo de alfombra, bolsas, etc. Los componentes de las fibras naturales son microfibrillas de celulosa dispersas en una matriz amorfa de lignina y hemicelulosa.

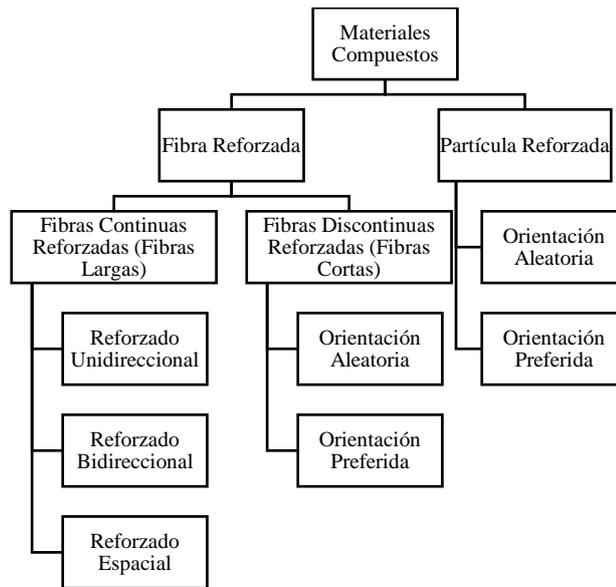


**Figura 27 De izquierda a derecha; Fibra de Sisal, Kenaf y Abaca.**

**Fuente** (Jawaid & Qaiss, 2016)

#### **2.1.6.3 Clasificación de los Materiales Compuestos**

(Altenbach, Altenbach, & Kissing, 2004) en su investigación indican la siguiente clasificación:

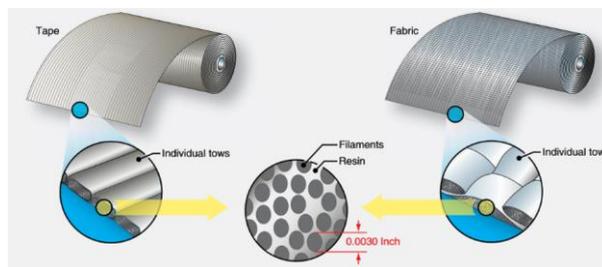


**Figura 28 Clasificación de materiales compuestos.**

**Fuente** (Altenbach, Altenbach, & Kissing, 2004)

#### 2.1.6.4 Filosofía del diseño

Los componentes principales de los materiales compuestos estructurales son el refuerzo y la matriz. (Sinha, 2006) señala que el refuerzo, que es más fuerte y más rígido, se dispersa en un material de matriz comparativamente menos fuerte y rígido. El refuerzo comparte la carga principal y en algunos casos, especialmente cuando un compuesto consiste en un refuerzo de fibra dispersado en una matriz débil, las fibras transportan casi toda la carga.



**Figura 29 Productos de cinta y tela.**

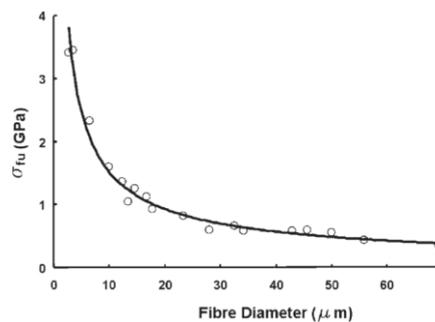
**Fuente** (United States Department of Transportation, 2014)

Por lo tanto, la resistencia y la rigidez de los materiales compuestos se controlan por la resistencia y rigidez de las fibras constituyentes. La tarea principal de una matriz es actuar como medio de transferencia de carga entre un refuerzo y el otro.

#### 2.1.6.4.1 Longitud y diámetro de Fibras

Según (Hoa, 2009) las fibras tienen un diámetro muy pequeño, aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ , para las aplicaciones de ingeniería es necesario fabricar componentes con un espesor del orden de milímetros o centímetros, aproximadamente 1000 veces el diámetro de la fibra. Por lo tanto, se necesitan millones y millones de estas fibras para hacer un componente de ingeniería de tamaño significativo.

Una fibra tiene una longitud que es mucho mayor que su diámetro. (Campbell, 2010) define que a relación longitud-diámetro se conoce como relación de aspecto y puede variar enormemente, de esta manera las fibras continuas tienen relaciones de aspecto largas, mientras que las fibras discontinuas tienen relaciones de aspecto cortas.



**Figura 30 Efecto del diámetro de la fibra sobre la resistencia.**

**Fuente** (Hoa, 2009)

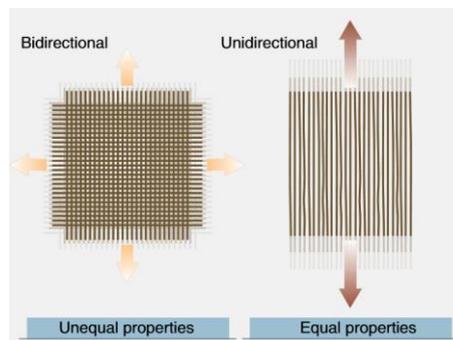
Como regla general (Campbell, 2010) establece que cuanto menor sea el diámetro de la fibra, mayor será su resistencia, pero a menudo el coste aumenta a medida que el diámetro se hace más pequeño, además, las fibras de alta resistencia de menor diámetro tienen mayor flexibilidad.

#### 2.1.6.4.2 Cantidad de Fibras

(Campbell, 2010) indica que los compuestos de fibra continua se hacen a menudo en laminados apilando hojas de fibras continuas en diferentes orientaciones para obtener las propiedades de resistencia y rigidez deseadas con volúmenes de fibra de hasta 60 a 70 por ciento. Las fibras forman materiales compuestos de alta resistencia debido a su pequeño diámetro y a la cantidad de fibras embebidas en la matriz.

### 2.1.6.4.3 Orientación de Fibras

(Blanc, Germain, Da costa, Baylou, & Cataldi, 2006) manifiestan en su investigación que la orientación de las fibras es esencial para las propiedades físicas de los materiales compuestos. Los parámetros teóricos de un refuerzo dado suelen ser conocidos y ampliamente utilizados para predecir el comportamiento del material, sin embargo, las operaciones de fabricación tales como el tejido o la aguja pueden producir desviaciones o fluctuaciones de fibras alrededor de las direcciones principales esperadas.

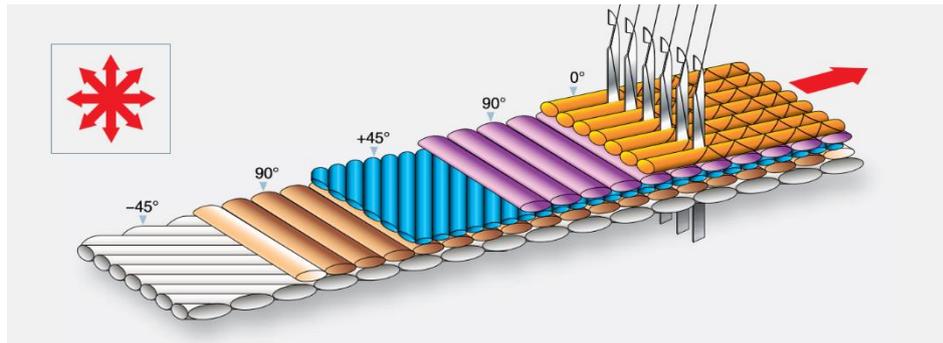


**Figura 31 Propiedades de los materiales bidireccionales y unidireccionales.**

**Fuente** (United States Department of Transportation, 2014)

En lo que se refiere a la disposición de las fibras (Hoa, 2009) menciona que las fibras individuales por sí mismas son muy flexibles y frágiles por lo que tienden a enrollarse y formar piezas enredadas no alineadas. Para que sus propiedades se utilicen de manera efectiva las fibras deben estar alineadas y ligeramente tensadas para así poder soportar una magnitud significativa, millones de fibras necesitan alinearse y funcionar simultáneamente, además, las fibras necesitan ser rectas y una pequeña cantidad de tensión puede ser necesaria para mantenerlas rectas.

Para (Steinmann & Saelhoff, 2016) las fibras son una clase única de materiales debido a su anisotropía, tienen una longitud alta en comparación con su diámetro. Además del aspecto geométrico de la anisotropía, los tipos de fibras más importantes también tienen una estructura anisotrópica por lo que son direccionalmente dependientes, lo que significa poseer diferentes propiedades según la dirección, cuando se analiza a lo largo de diferentes ejes cualidades como la elasticidad, temperatura, conductividad varían según la dirección en análisis.

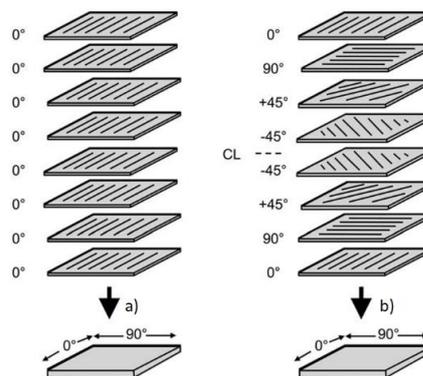


**Figura 32 Material cosido (no tejido).**

**Fuente** (United States Department of Transportation, 2014)

(Campbell, 2010) expresa que cuando hay una sola capa en la misma orientación, la disposición se llama lámina y cuando las capas se apilan en varios ángulos, la disposición se llama laminado. Tomando en cuenta estas consideraciones se establece que:

- Las láminas unidireccionales a  $0^\circ$  son extremadamente fuertes y rígidas en esta dirección. Sin embargo, son muy débiles en la dirección de  $90^\circ$  porque la carga debe ser transportada por la matriz polimérica que es mucho más débil.
- Un laminado equilibrado que tiene igual número de capas en las direcciones de  $0^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $-45^\circ$  y  $90^\circ$  es llamado un laminado cuasi-isotrópico, porque lleva cargas iguales en las cuatro direcciones.



**Figura 33 Lámina y laminados.**

**Fuente** (Campbell, 2010)

### **2.1.6.5 Propiedades de los Materiales Compuestos**

Las propiedades de los materiales compuestos según lo expresado por (Altenbach, Altenbach, & Kissing, 2004) requieren un conocimiento amplio de las características y propiedades del material utilizado tanto para refuerzos como para matrices, así como de su método de fabricación.

#### **2.1.6.5.1 Fibra de Vidrio**

(Watson, Li, & Wallenberger, 2001) sobre las características de la fibra de vidrio expresan que son los materiales industriales más versátiles actualmente conocidos ya que se producen fácilmente y presentan propiedades a granel útiles tales como dureza, transparencia, resistencia al ataque químico, estabilidad e inercia y propiedades de fibra tales como resistencia, flexibilidad y rigidez.

#### **2.1.6.5.2 Fibra de Carbono**

Según la (FCMA, 2013) las características de la fibra de carbono son las siguientes:

- Liviano en peso y fuerte
- Gran estabilidad dimensional y resistencia al calor
- Excelente conductor eléctrico
- Buena permeabilidad a los rayos X

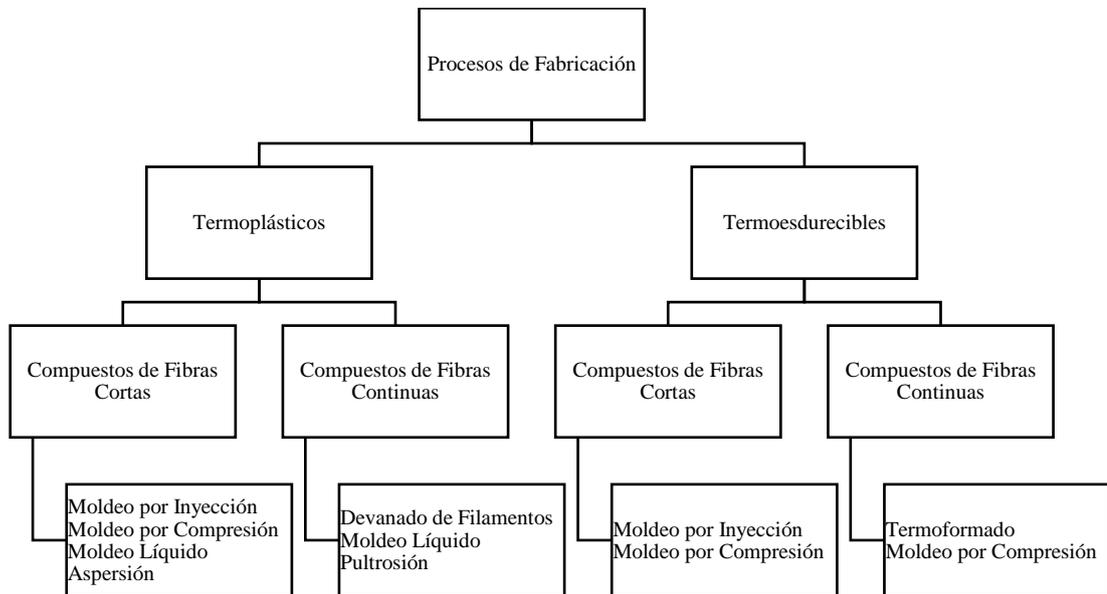
#### **2.1.6.5.3 Fibra de Aramida**

Las características de las fibras de aramida según (Chang & Du Pont, 2001) son:

- El módulo de tracción está en función de la orientación molecular, característicamente desde 62 a 131 GPa.
- La resistencia a la tracción está en orden de 3.1 a 4.6 GPa.
- Resistencia a la fatiga estática y dinámica.
- Alta estabilidad térmica.
- Aislante eléctrico.

### 2.1.6.6 Métodos de Fabricación

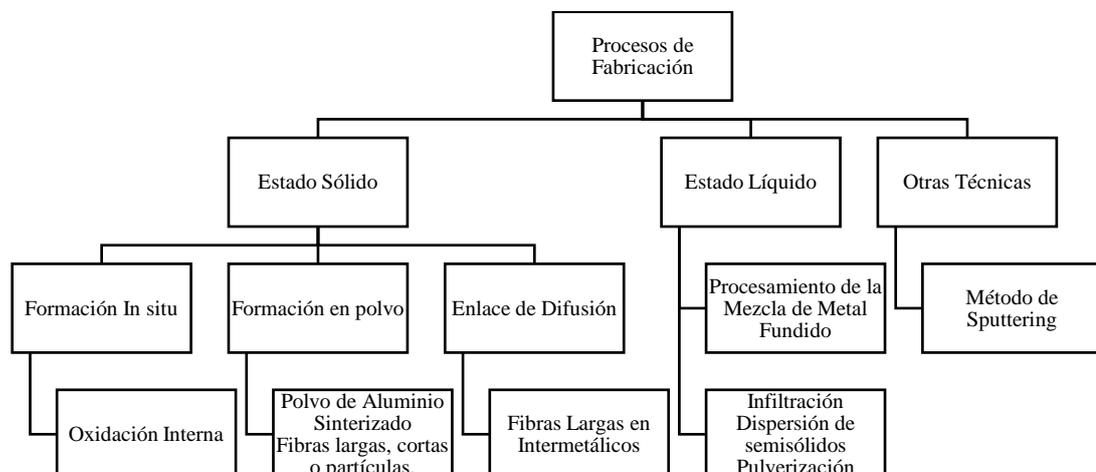
Para la fabricación de los diferentes materiales compuestos con matriz polimérica (Campbell, 2010) propone lo siguiente:



**Figura 34 Procesos de fabricación de compuestos de matriz polimérica.**

**Fuente** (Campbell, 2010)

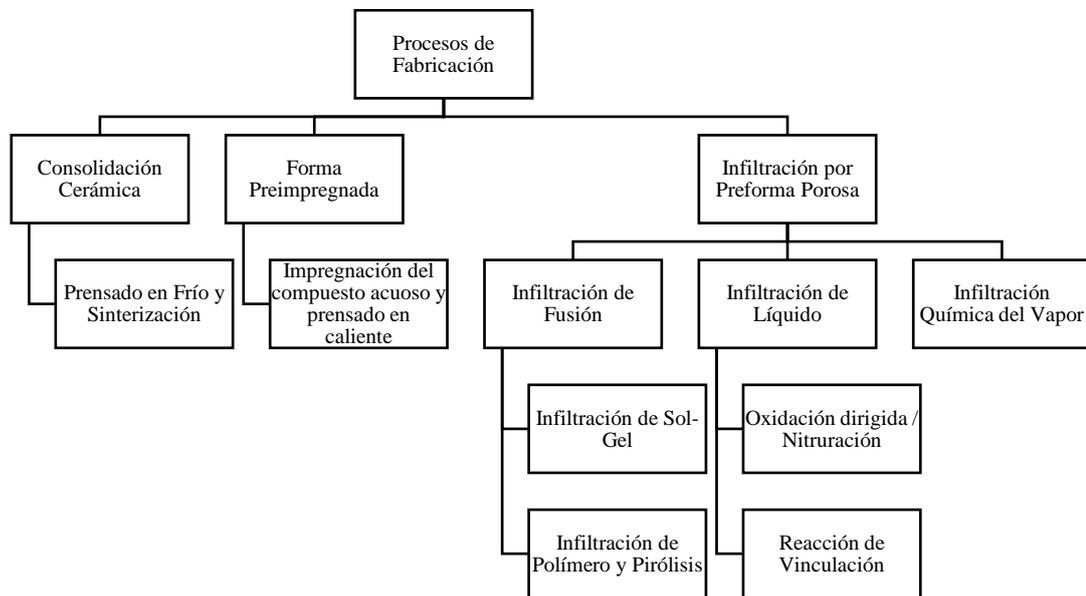
En lo que se refiere a la fabricación de materiales compuestos con matriz metálica (Preetkanwal, Sarabjeet, & Payal, 2016) establecen los siguientes métodos de fabricación:



**Figura 35 Procesos de fabricación de compuestos de matriz metálica.**

**Fuente** (Preetkanwal, Sarabjeet, & Payal, 2016)

En lo que se refiere a materiales compuestos con matriz cerámica se establecen los siguientes métodos de formación según (Bracho, 2014):



**Figura 36 Procesos de fabricación de compuestos de matriz cerámica.**

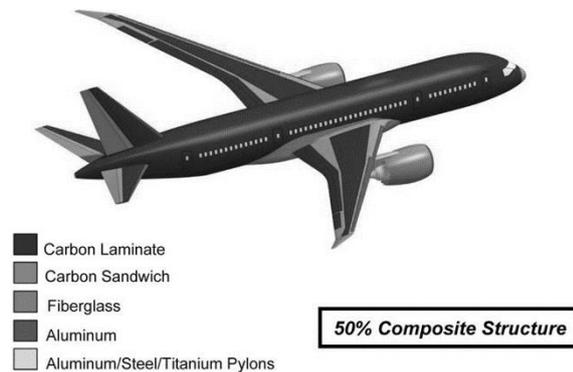
**Fuente** (Bracho, 2014)

### 2.1.6.7 Aplicaciones

Las aplicaciones incluyen componentes aeroespaciales, medios de transporte, construcción, apartados deportivos e infraestructura. Entre las aplicaciones más relevantes (Campbell, 2010) destaca las siguientes:

- En aviones militares, el bajo peso es un factor decisivo por razones de rendimiento y carga útil, y los materiales compuestos a menudo se aproximan al 20 al 40 por ciento del peso total. En las últimas décadas helicópteros fuselajes han sido construidos de compuestos de fibra de carbono.
- El ahorro de peso debido al uso de materiales compuestos en aplicaciones aeroespaciales generalmente oscila entre el 15 y el 25 por ciento.
- Los principales fabricantes de automóviles acuden cada vez más a los materiales compuestos para cumplir con los requisitos de rendimiento y peso, ayudando a mejorar la eficiencia del combustible.

- En la Fórmula 1, los monoplazas son de alto rendimiento, debido a que la mayoría del chasis, incluyendo el monocasco, la suspensión, las alas y la cubierta del motor, está hecho de compuestos de fibra de carbono.
- La corrosión es un factor que afecta a la industria marina y genera gastos elevados. Los materiales compuestos ayudan a minimizar estos problemas, debido a que no se corroen como metales o se pudren como la madera.



**Figura 37** Avión comercial Boeing 787 Dreamliner.

**Fuente** (United States Department of Transportation, 2014)

## 2.2 Hipótesis

El atenuador de impacto fabricado con un material compuesto tendrá un desempeño óptimo, superando los estándares impuestos por la FSAE y contribuirá a reducir el peso del vehículo prototipo Fórmula *Student*.

## 2.3 Operacionalización de variables

### 2.3.1 Variable independiente

Material Compuesto

**Tabla 4**

**Variable independiente: Material Compuesto**

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
A las uniones de dos materiales de	Tipos de materiales	Deformación	K	Medición	Software Calibrador vernier

**CONTINÚA ►**

diferentes características que se forman para obtener unos nuevos que presenten mejores prestaciones que los originales se los denomina materiales compuestos.	Energía de Absorción	J	Medición	Software Experimental
	Desplazamiento	mm	Medición	Software Experimental
	Módulo de elasticidad	GPA	Visual	Especificaciones de fabricación
	Tejido	N/A	Visual	Especificaciones de fabricación
	Peso	gr	Medición	Balanza e Instrumento de Laboratorio
	Espesor	mm	Medición	Especificaciones de fabricación

### 2.3.2 Variable dependiente

Reglamento FSAE

**Tabla 5**

**Variable dependiente: Reglamento FSAE**

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
El reglamento que rige a todos los equipos participantes en la Fórmula <i>Student</i> y contiene todos los parámetros que deben cumplir los vehículos prototipos, pilotos y equipos.	Competencia Fórmula <i>Student</i>	T3.20.2	mm/in	Medición	2017-18 Fórmula SAE® Rules
		T3.20.3	mm/in	Medición	2017-18 Fórmula SAE® Rules
		T3.20.4	mm/in	Medición Visual	2017-18 Fórmula SAE® Rules
		T3.20.5	mm/in	Visual	2017-18 Fórmula SAE® Rules
		T3.20.6	mm/in	Medición Cálculo	2017-18 Fórmula SAE® Rules
		T3.21.2	Joules	Medición	2017-18 Fórmula SAE® Rules
		T3.21.3	mm/in	Medición	2017-18 Fórmula SAE® Rules
		T3.21.4	g	Medición Cálculo	2017-18 Fórmula SAE® Rules
		T3.21.5	mm/in	Medición Cálculo	2017-18 Fórmula SAE® Rules

## 2.4 Metodología de desarrollo del proyecto

En la investigación del análisis de la eficiencia de un atenuador de impacto que se pretende construir con materiales compuestos para reducir el peso y elevar la absorción de energía para un vehículo prototipo Fórmula *Student*, se utilizarán los métodos de investigación científica que se disponen a continuación.

- **Método analítico**

En esta investigación se analizarán las propiedades de diferentes materiales compuestos, su comportamiento en la absorción de energía de impacto y su peso para construir un atenuador de impacto eficiente que cumpla con el reglamento FSAE.

- **Método comparativo**

Se utilizará este método para comparar los materiales compuestos con los cuales se pretende realizar la fabricación del atenuador de impacto para diferenciar sus propiedades y caracterizarlos en función de la absorción de energía, peso, desplazamiento y costo para posteriormente elegir el más apropiado.

- **Método de síntesis**

En la investigación se utilizará el método de síntesis para representar el proceso de diseño, pruebas y comportamiento de los materiales compuestos frente a un impacto, y a partir de los resultados obtenidos determinar el material adecuado para la construcción del atenuador de impacto.

- **Método deductivo/inductivo**

Por el método deductivo se examinará en que influye la utilización de materiales compuestos en la fabricación del modelo. Por método inductivo se determinarán las características y propiedades de diferentes materiales, a partir de esta información se establecerá el material compuesto más apropiado para la fabricación del atenuador de impacto.

- **Método experimental**

Se utilizará este método para determinar el comportamiento de los materiales compuestos frente a un impacto realizando pruebas, mediciones, aplicando protocolos, reglamentos e instrumentos necesarios.

- **Método de medición**

A través del método de medición se obtendrán los valores de peso, absorción de energía y deformación de los materiales compuestos, además se determinarán las unidades en que se manejarán los datos.

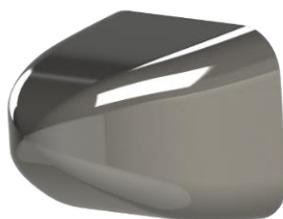
## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA

#### 3.1 Diseño computacional.

##### 3.1.1 Diseño CAD.

Para modelamiento se emplea el software CAD, SolidWorks 2018, en el cual se modela la geometría mostrada en la figura 38, la cual es utilizada para la realización y análisis de la propuesta. Se presenta un modelo en forma rectangular en la parte posterior y forma de cono a medida que se aproxima a la parte frontal, con el objetivo de evitar picos de desaceleración excesivos al momento del impacto, adicionalmente, los bordes son redondeados para evitar concentraciones de tensión.



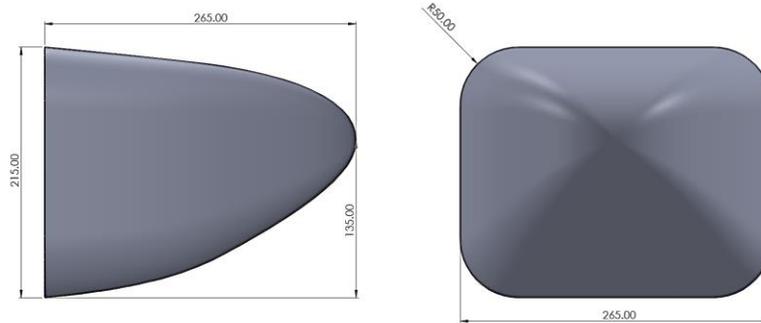
**Figura 38 Atenuador de Impacto.**

El diseño CAD se lo realiza como superficie debido es un requisito indispensable para realizar de la simulación por elementos finitos en materiales compuestos. Las dimensiones del prototipo son las siguientes:

**Tabla 6**

**Comparación entre las medidas mínimas y las medidas del prototipo.**

	SAE	Atenuador de Impacto
<b>Largo</b>	$\geq 200$	265 mm
<b>Ancho</b>	$\geq 200$	265 mm
<b>Altura</b>	$\geq 100$	215 mm



**Figura 39 Dimensiones del Atenuador de Impacto.**

### 3.1.2 Simulación CAE.

Para realizar la simulación se emplea el software de análisis por elementos finitos, Abaqus, mismo que se utiliza para determinar los requerimientos del atenuador para el proceso de fabricación. Abaqus hace uso del criterio de daño (Hashin, 1980) para el análisis de materiales compuestos y para determinar su comportamiento a medida que transcurre el tiempo se establece la energía de daño de evolución del material.

**Tabla 7**

#### Propiedades mecánicas de materiales compuestos.

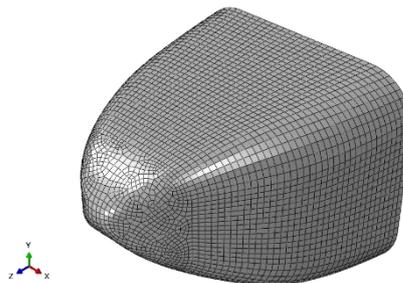
Propiedades	Vidrio/Epoxy (a)	Aramida/Epoxy (b)	CF/Epoxy (c)
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1800	1440	1453
E1(GPa)	26	67	53.572
E2 (GPa)	26	47	55.158
E3 (GPa)	8	47	48.608
G <sub>12</sub> (GPa)	3.8	2	2.854
G <sub>13</sub> (GPa)	2.8	2	1.427
G <sub>23</sub> (GPa)	2.8	1.586	2.854
v <sub>12</sub>	0.1	0.34	0.042
v <sub>13</sub>	0.25	0.34	0.028
v <sub>23</sub>	0.25	0.45	0.033
X <sub>t</sub> (MPa)	414	1420	612
X <sub>c</sub> (MPa)	458	312	653
Y <sub>t</sub> (MPa)	414	36	641
Y <sub>c</sub> (MPa)	458	145	562
S <sub>12</sub> (MPa)	105	53	84
S <sub>13</sub> (MPa)	65	53	84
G <sub>ft</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	10	81.5	160
G <sub>fc</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	1.562	106.3	25
G <sub>mt</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	0.625	0.28	10
G <sub>mc</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	0.14	1.31	2.25

**Fuente** (a) (b) (Balkumar, Iyer, & Ramasubramanian, 2016), (c) (Cruz & Shah, 1996)

Para garantizar una respuesta cuasi estática se debe asegurar que la energía cinética sea menor o igual al 5% de la energía interna al final del análisis (Rappolt, 2015).

### 3.1.2.1 Variables de Análisis CAE

La superficie modelada en SolidWorks fue importada a Abaqus, el atenuador de impacto fue asignado al tipo “superficie deformable”, también se creó un elemento de tipo “rígido analítico”, el cual representa a la superficie de impacto y no es necesario realizar su mallado por lo que se reduce el costo computacional del análisis. Para el mallado se utilizó el control de malla de tipo barrido y libre debido a la complejidad de la superficie y se estableció un tamaño de 6 mm, con esta medida se obtuvo una correcta convergencia en la malla y se garantizaron que los resultados sean correctos. En la figura 40 se muestra el mallado del modelo con el cual se realizó el análisis.



**Figura 40 Mallado del Atenuador de Impacto.**

El ensamble de la simulación se lo realiza a una distancia de 15 mm entre el atenuador, que se mantuvo fijo durante el análisis, y la superficie de contacto, la cual tiene una velocidad de 45 mm/s, la duración del evento se establece en 4.5 segundos, con esta duración se garantiza que la superficie de impacto tenga un desplazamiento mayor a 200 mm. El coeficiente de fricción y de amortiguamiento se definen en 0.1 y 0.2 respectivamente de acuerdo con la investigación realizada por (Rappolt, 2015).

Se establecieron dos definiciones de contacto que consisten en la superficie interna del atenuador con la superficie de impacto y del mismo modo con la superficie externa del atenuador. En variables de salida se seleccionó U3 (desplazamiento eje z), RF3 (fuerza de reacción eje z), STATUS (elementos que cumplen el criterio se consideran fallidos y se eliminan del modelo), DAMAGEFC (daño de fibra a compresión),

DAMAGEFT (daño de fibra a tensión), EMSF (factor de escalamiento de masa), ALLKE (energía cinética) y ALLIE (energía interna) como registros del análisis.

### 3.1.3 Resultados.

A continuación, se presentan los tres modelos a evaluar con sus propiedades físicas:

**Tabla 8**

**Propiedades físicas de la Fibra de Vidrio.**

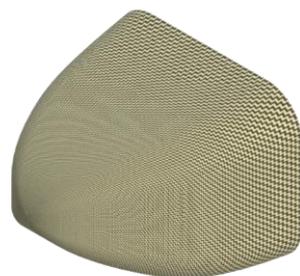
Fibra de Vidrio	
Orientación de las fibras	0-90
Peso	3.64 oz / yd <sup>2</sup>
Espesor	0.0059 in
Tipo de tejido	Llano



**Tabla 9**

**Propiedades físicas de la Aramida.**

Aramida	
Materia prima	1140 denier Kevlar 49
Orientación de las fibras	0-90
Patrón de tejido	2 x 2 <i>Twill</i> <sup>1</sup>
Peso	5.3 oz / yd <sup>2</sup>
Espesor	.011 in

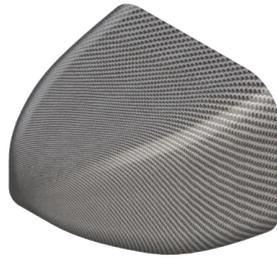


<sup>1</sup> *Twill*.- es un tipo de tejido con un patrón diagonal paralelo.

**Tabla 10**

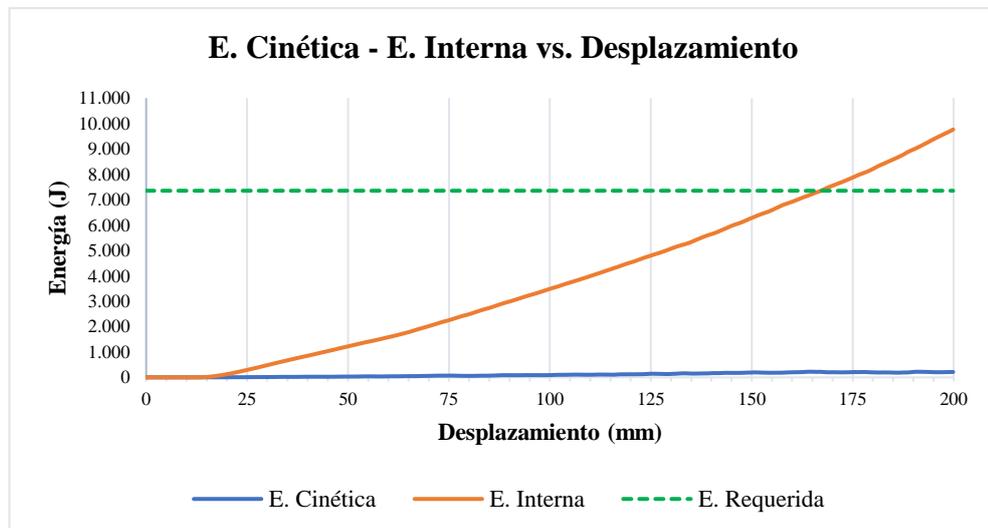
**Propiedades físicas de la Fibra de Carbono.**

Fibra de Carbono	
Orientación de las fibras	0-90
Patrón de tejido	2 x 2 <i>Twill</i>
Peso	5.7 oz / yd <sup>2</sup>
Espesor	.011 in
Elongación	1.75-1.95%



**3.1.3.1 Energía Absorbida.**

- **Fibra de Vidrio**



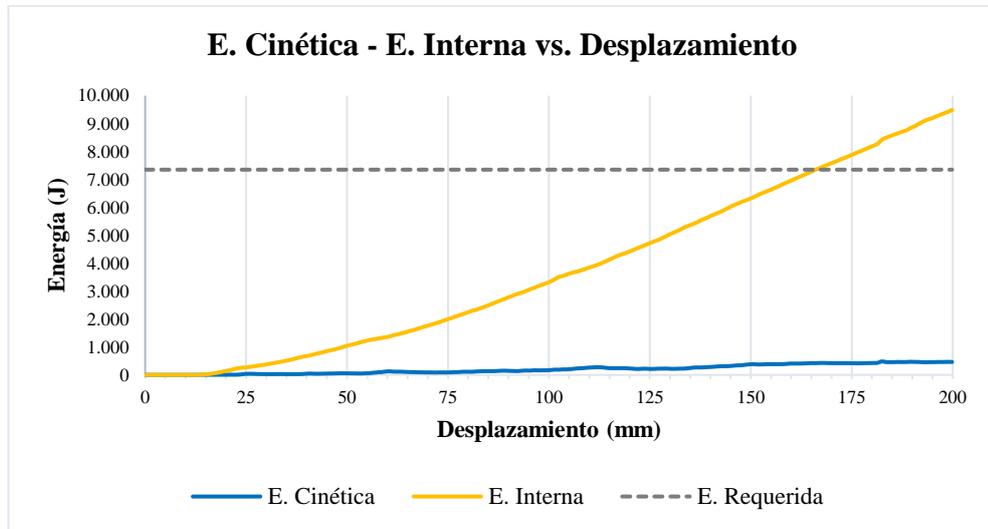
**Figura 41 E. Cinética - E. Interna vs. Desplazamiento Fibra de Vidrio.**

**Tabla 11**

**Resultados del análisis Fibra de Vidrio.**

Análisis CAE	
Energía requerida	7350 J
Desplazamiento	167 mm
Proporción Energía	2.1 %

- **Aramida**



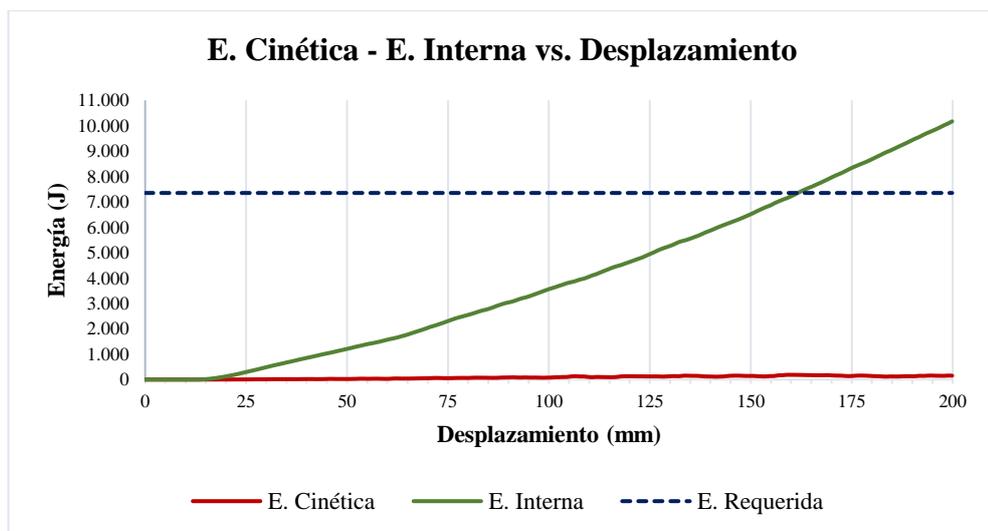
**Figura 42 E. Cinética - E. Interna vs. Desplazamiento Aramida.**

**Tabla 12**

**Resultados del análisis Aramida.**

Análisis CAE	
Energía requerida	7350 J
Desplazamiento	166 mm
Proporción Energía	4.8 %

- **Fibra de Carbono**



**Figura 43 E. Cinética - E. Interna vs. Desplazamiento Fibra de Carbono.**

**Tabla 13**

**Resultados del análisis Fibra de Carbono.**

Análisis CAE	
Energía requerida	7350 J
Desplazamiento	161 mm
Proporción Energía	1.9 %

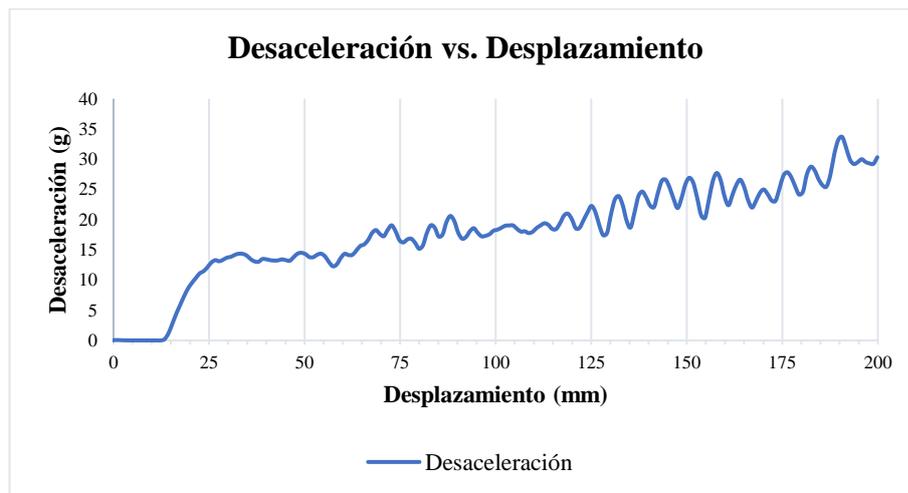
**3.1.3.2 Desaceleración.**

- **Fibra de Vidrio**

**Tabla 14**

**Resultados de la desaceleración Fibra de Vidrio.**

	SAE	Simulación CAE
Pico	$\leq 40$ g	33.69 g
Promedio	$\leq 20$ g	17.57 g



**Figura 44 Desaceleración vs. Desplazamiento Fibra de Vidrio.**

- **Aramida**

**Tabla 15**

**Resultados de la desaceleración Aramida.**

	SAE	Simulación CAE
Pico	$\leq 40$ g	29.63 g
Promedio	$\leq 20$ g	17.49 g



**Figura 45 Desaceleración vs. Desplazamiento Aramida.**

- **Fibra de Carbono**

**Tabla 16**

**Resultados de la desaceleración Fibra de Carbono.**

	SAE	Simulación CAE
<b>Pico</b>	$\leq 40$ g	31.47 g
<b>Promedio</b>	$\leq 20$ g	18.47 g



**Figura 46 Desaceleración vs. Desplazamiento Fibra de Carbono.**

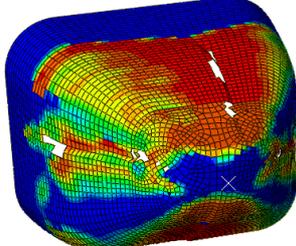
### 3.1.3.3 Peso y Daño del material.

- **Fibra de Vidrio**

**Tabla 17**

**Daño y peso Fibra de Vidrio.**

Capas	19 capas
Espesor (c/u)	0.1498 mm
Ángulo	0 – 90 grados
Área	0.182822 m <sup>2</sup>
Volumen (c/u)	2.73868e-05 m <sup>3</sup>
Densidad (c/u)	1800 kg / m <sup>3</sup>
Masa (c/u)	0.049296 kg
Masa Total	0.93662 kg

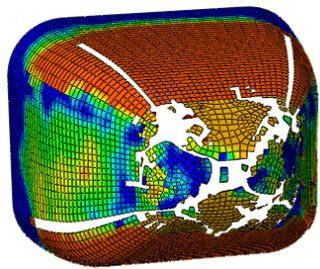


- **Aramida**

**Tabla 18**

**Daño y peso Aramida.**

Capas	18 capas
Espesor (c/u)	0.2794 mm
Ángulo	0 – 90 grados
Área	0.182822 m <sup>2</sup>
Volumen (c/u)	5.10805e-05 m <sup>3</sup>
Densidad (c/u)	1440 kg / m <sup>3</sup>
Masa (c/u)	0.07355 kg
Masa Total	1.3239 kg

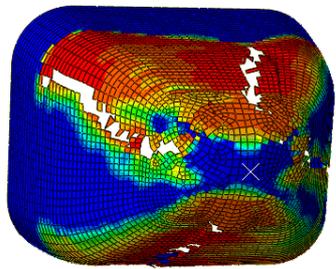


- **Fibra de Carbono**

**Tabla 19**

**Daño y peso Fibra de Carbono.**

Capas	9 capas
Espesor (c/u)	0.2794 mm
Ángulo	0 – 90 grados
Área	0.182822 m <sup>2</sup>
Volumen (c/u)	5.10805e-05 m <sup>3</sup>
Densidad (c/u)	1453 kg / m <sup>3</sup>
Masa (c/u)	0.07422 kg
Masa Total	0.66798 kg



### 3.1.3.4 Resumen del análisis computacional.

**Tabla 20**

#### **Comparación de resultados de los prototipos analizados.**

	<i>Vidrio/Epoxy</i>	<i>Aramida/Epoxy</i>	<i>CF/Epoxy</i>
Energía de Absorción	7350 J	7350 J	7350 J
D. Pico	33.69 g	29.63 g	31.47 g
D. Promedio	17.57 g	17.49 g	18.47 g
Peso	0.93662 kg	1.3239 kg	0.66798 kg

### 3.1.4 Matriz de selección de material.

Los parámetros que van a formar parte de la matriz de selección del material son los siguientes:

- Energía de absorción: es un factor sumamente importante debido a la reglamentación impuesta para la competencia por lo cual se requiere una cantidad de energía igual o superior a 7350 Joules.
- Peso: debido a que la presente investigación busca la optimización del atenuador de impacto, conseguir el menor peso es un factor decisivo.
- Manufactura: el proceso de fabricación del atenuador de impacto debe ser viable según el material que se seleccione, considerando el manejo de equipos y el tiempo requerido para la fabricación.
- Adquisición del material: existencia en el mercado ecuatoriano o importación del material.
- Costo: total de recursos económicos empleados para la fabricación del atenuador de impacto.

**Tabla 21**

#### **Matriz de selección del material.**

<b>Ítem (valor)</b>	<i>Vidrio/Epoxy</i>	<i>Aramida/Epoxy</i>	<i>CF/Epoxy</i>
Energía de Absorción (5)	5	5	5
Peso (5)	3	1	5
Manufactura (4)	3	2	2
Adquisición del material (3)	3	3	3
Costo (3)	3	3	3
<b>TOTAL</b>	17	14	18

Después de analizar los 3 materiales compuestos, se preselecciona la fibra de carbono y la fibra de vidrio como materiales para la fabricación del atenuador de impacto debido a su elevada capacidad de absorción de energía y a su bajo peso en comparación con la aramida.

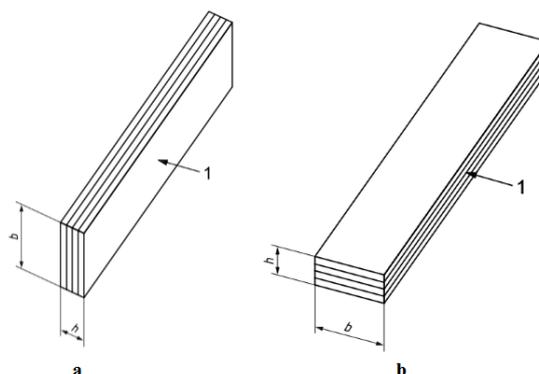
Posteriormente se realizó un análisis de impacto Charpy para la caracterización de la fibra de carbono, para lo cual se empleó la máquina de ensayos Metrotec IC-25/IA perteneciente al Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero de la ciudad de Ambato bajo la norma ISO 179-1:2010 para determinar las propiedades de impacto Charpy en materiales compuestos. El ensayo se realizó bajo los parámetros mostrados en la tabla 22.

**Tabla 22**

**Parámetros de ensayo Charpy.**

Parámetro	Descripción
Norma de calidad	ISO 17025
Norma Técnica	ISO 179-1:2010
Temperatura	22.1 ° C
Humedad Relativa	51.4 %
Martillo ISO-Charpy	R6 – 15 J
Ángulo de disparo	145°
Material	Fibra de Carbono/Epoxi <i>Twill 2x2</i>
Número de probetas	12

Bajo la norma ISO 179-1:2010 se realizaron dos grupos de ensayos como lo muestra la figura 47.



**Figura 47 Tipos de ensayo para materiales compuestos.**

**Fuente (ISO 179-1:2010)**

Donde  $h$  es el espesor,  $b$  el ancho y  $l$  es la dirección del impacto. Además, para la realización del ensayo de la figura 47b (*edgewise*) se realizó el maquinado de la muesca bajo la norma ISO 2818, Preparación de muestras de prueba por mecanizado, en el caso del ensayo de impacto de la figura 47a (*flatwise*) no se debe realizar el maquinado de la muesca.

**Tabla 23**

**Resultados de ensayo Charpy.**

Probeta	Energía (J)	Resistencia (KJ/m <sup>2</sup> )	Tipo de ensayo
1	6.83	284.38	<i>Flatwise</i>
2	4.60	191.76	
3	4.78	199.07	
4	5.35	222.72	
5	5.35	222.72	
6	4.32	180.15	
7	1.87	78.05	<i>Edgewise</i>
8	5.17	215.29	
9	4.50	187.39	
10	4.57	190.45	
11	4.19	174.45	
12	4.40	183.15	

A partir de los resultados mostrados en la tabla 23 se realizó el cálculo estadístico para posteriormente proceder a la comparación con los resultados de la investigación realizada por (Erklig, Furkan, & Bulut, 2017) acerca de la absorción de energía de la fibra de vidrio al realizar un ensayo de impacto de baja velocidad.

**Tabla 24**

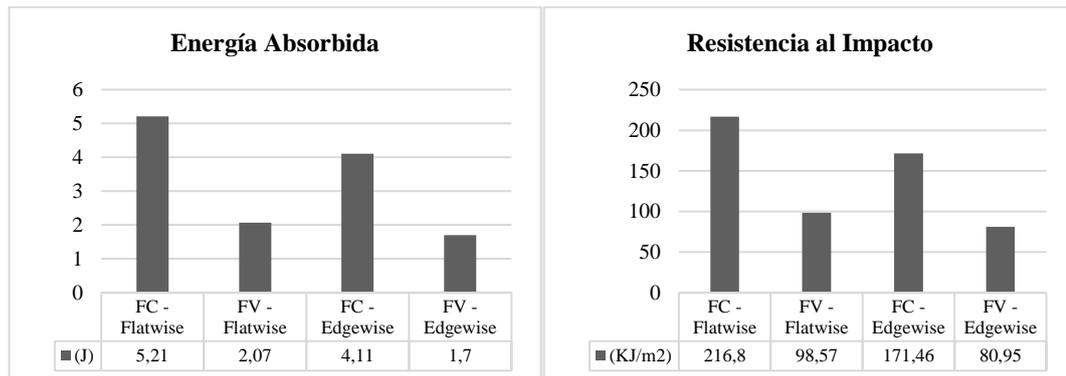
**Resultados estadísticos ensayo Charpy.**

	Media		Desviación Estándar		Coeficiente de Variación	
	Energía (J)	Resistencia (KJ/m <sup>2</sup> )	Energía (J)	Resistencia (KJ/m <sup>2</sup> )	Energía (%)	Resistencia (%)
<i>Flatwise</i>	5.21	216.8	0.82	33.96	0.16	0.15
<i>Edgewise</i>	4.11	171.46	1.05	43.60	0.25	0.25
<b>Promedio</b>	4.81	194.13	0.93	38.76	0.21	0.20

**Tabla 25**

**Comparación de Fibra de Carbono vs Fibra de Vidrio.**

	Fibra de Carbono		Fibra de Vidrio		Variación Porcentual	
	Energía (J)	Resistencia (KJ/m <sup>2</sup> )	Energía (J)	Resistencia (KJ/m <sup>2</sup> )	Energía (%)	Resistencia (%)
<i>Flatwise</i>	5.21	216.8	2.07	98.57	151.6	119.9
<i>Edgewise</i>	4.11	171.46	1.70	80.95	141.7	111.8

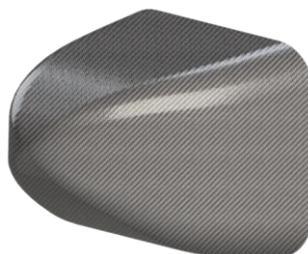


**Figura 48 Fibra de Carbono vs Fibra de Impacto Ensayo Charpy.**

Acorde a los resultados mostrados en la tabla 25 y en la figura 48 se puede determinar que, el material más adecuado para la fabricación del atenuador de impacto es la fibra de carbono, debido a que la absorción de energía es mayor en comparación con la fibra de vidrio, siendo superior en 151.6 % y 141.7 % en el ensayo de impacto Charpy de tipo *Flatwise* y *Edgewise* respectivamente.

**3.2 Implementación de la propuesta**

Para fabricación del atenuador de impacto, el material seleccionado es fibra de carbono, debido a los resultados sobresalientes obtenidos en la simulación computacional.



**Figura 49 Atenuador de Impacto en Fibra de Carbono.**

### 3.2.1 Análisis del proceso de manufactura.

#### 3.2.1.1 Implementos de seguridad.

Debido a los riesgos químicos existentes al manipular la fibra de carbono y resinas que se emplean para la fabricación de una pieza, se requieren los siguientes implementos de seguridad:

**Tabla 26**

#### **Elementos de seguridad personal.**

Ítem	Descripción	Gráfico
Gafas	Impiden que las partículas desprendidas de la fibra de carbono tengan contacto con los ojos.	
Mascarilla	Impiden que las partículas desprendidas de la fibra de carbono ingresen al sistema respiratorio.	
Loción protectora	Se adhiere a la capa más externa de células muertas de la piel y ayuda en la capacidad de la piel para protegerse de irritantes y alérgenos externos.	
Overol de Protección	Es un overol que ofrece una barrera protectora de partículas y que a su vez es flexible, transpirable y liviano.	
Guantes	Fabricados en látex impiden que las partículas desprendidas de la fibra de carbono tengan contacto con la piel.	

#### 3.2.1.2 Materiales y equipos.

Para realizar la fabricación de la pieza en fibra de carbono fue necesario la utilización de los siguientes materiales y equipos:

**Tabla 27**

**Materiales y equipos empleados en la fabricación**

Ítem	Descripción	Gráfico
Fibra de Carbono	<i>Twill</i> 2x2 de 3000 filamentos continuos. Las fibras de contienen hasta 95% de carbono.	
<i>Nylon Release Peel Ply</i>	Se encuentra entre la fibra de carbono y el papel film perforado, permite el paso del exceso de resina sin pegarse a la fibra.	
Film perforado	Papel film perforado que permite a la fibra retener únicamente el 40% de resina. Se coloca entre el <i>Nylon Release Peel Ply</i> y el Manta de aireación/absorción.	
Manta de aireación/absorción	Es la encargada de absorber el exceso de resina de la pieza y permite la respiración de la misma, es la última capa que se coloca.	
Cinta sellante	Se la utiliza para hermetizar la pieza a formar otorgando un pegado del plástico film continuo y sin fugas de aire.	
Plástico Film	Se lo utiliza para formar la funda en la que se coloca la pieza de fibra de carbono. Forma un ambiente hermético en conjunto con la cinta sellante.	
Resina Epoxi PR2032	Resina de viscosidad media, está diseñada para aplicaciones estructurales. Las aplicaciones típicas incluyen cubiertas de aeronaves, componentes de estructuras, piezas de prototipos.	
Catalizador PH3660	Son catalizadores que se emplean en la fabricación de piezas de alto rendimiento. Tiene un tiempo de trabajo de una hora y se lo puede emplear en piezas de cualquier tamaño.	
Diluyente	Empleado para la remoción del molde de la pieza a fabricar.	

CONTINÚA ►

Balanza	Elemento de medición utilizado para realizar la mezcla de la resina y el catalizador en función del peso de la fibra.	
Acoples	Se utilizan para conectar el compresor a la bolsa de vacío y tener un control de la presión existente.	
Compresor	Extrae el todo el aire contenido en el plástico film y mantiene una máxima presión de vacío a pesar de fugas existentes.	
Lijadora	Elemento abrasivo que se utiliza para otorgar un mejor acabado a la pieza.	

### 3.1.2.3 Hoja de procesos.

El tiempo empleado en la construcción del atenuador de impacto se detalla a continuación:

**Tabla 28**

#### Hoja de procesos.

Nº Op.	Descripción	Máquina	Herramienta	Tiempo (h)
1	Diseño CAD	-	SolidWorks	3.5
2	Simulación CAE	-	Abaqus	7.2
3	Manufactura del molde	Lijadora	Lija	16
4	Preparación de equipos	-	-	1
5	Preparación de materiales	-	Tijeras	2
6	Proceso de construcción	-	Balanza - Brocha	2.8
7	Curado de la pieza	Compresor	-	25
8	Acabado superficial	Lijadora	Lija	3.3
<b>TOTAL</b>				<b>60.8</b>

### 3.2.2 Construcción de la propuesta.

La técnica de la bolsa de vacío fue seleccionada para la fabricación del atenuador de impacto debido a que ofrece la retención exacta de resina epoxi en el refuerzo y se obtiene un laminado con bajo índice de porosidades (Arruti, 2016). El proceso de construcción se lo realizó en tres etapas, cada una de las etapas se detalla a continuación:

#### a) Preparación del material y molde

En primera instancia se procedió a realizar el molde en poliestireno expandido, mostrado en la figura 50, se seleccionó este material debido a la disposición que este posee para ser moldeado y a la facilidad con la que se puede desmoldar una vez realizada la pieza.



**Figura 50 Molde en poliestireno expandido del Atenuador de Impacto.**

Una vez conocida la superficie en la cual va a ser impregnada la fibra se procedió a recortar las capas del material que conformó la pieza, para este caso, al ser el molde positivo, se requiere cuatro partes para completar la superficie, en la figura 51 se detallan las capas y su disposición.



**Figura 51 Capas de Fibra de Carbono.**

Como paso final, al conocer las dimensiones del molde y definir el espacio necesario para la realización del atenuador de impacto, se realiza el corte del *Nylon Release Peel Ply*, film perforado, manta de aireación/absorción, cinta sellante y plástico film como se muestra en la figura 52.



**Figura 52 Materiales para la fabricación del atenuador de impacto al vacío.**

### **b) Fabricación del Atenuador de Impacto**

Para la fase de fabricación del atenuador de impacto se procedió en primera instancia a la preparación de la mezcla de resina epoxi con el catalizador. Para establecer la cantidad de resina y catalizador a utilizar, se determinó el peso de fibra de carbono mostrado en la figura 53 y posteriormente se realizó la mezcla con la proporción; 27 partes de catalizador por cada 100 partes de resina epoxi (Anexo B).



**Figura 53 Proporción de resina y catalizador**

El peso total de la fibra de carbono empleado en la realización del atenuador de impacto fue de 582 gramos por lo que se utilizó la misma cantidad en peso de resina epoxi y 157 gramos de catalizador para realizar la mezcla. Seguidamente, se procedió a cubrir cada una de las 9 capas de fibra de carbono con la mezcla antes descrita en el lapso de una hora, debido a que este es el tiempo máximo de trabajo de la resina y el catalizador (Anexo B). Este proceso es mostrado en la figura 54.



**Figura 54 Impregnado con resina y recubrimiento del molde**

Una vez que se cubrió toda la superficie del molde con la fibra de carbono impregnada con la mezcla de resina epoxi y catalizador, se procede a ubicar el conjunto en el espacio destinado para el curado. Se coloca el *Nylon Release Peel Ply*, papel film perforado, manta de aireación/absorción como primera segunda y tercera capa respectivamente, seguidamente se colocan los acoples como muestra la figura 55 y se selló herméticamente la bolsa.



**Figura 55 Molde recubierto de fibra, Ubicación de acoples, Sellado hermético**

Para el proceso de curado se procedió a conectar la bomba de vacío Roc-R con los acoples anteriormente instalados en la bolsa de vacío, esquema mostrado en la figura 56, durante la fase inicial de funcionamiento se observó como el plástico film se contrae hacia la maqueta a medida que el aire es expulsado, al transcurrir unos minutos se evidenció el trabajo que realiza la manta de aireación/absorción al extraer la cantidad excedente de la mezcla de resina epoxi y catalizador, teniendo como finalidad la extracción del 60% de la mezcla empleada inicialmente.



**Figura 56 Proceso de curado en bolsa de vacío.**

### c) Curado de la resina y acabado final

Transcurridas 24 horas del proceso de curado se realizó la desconexión de la bomba de vacío y la extracción del modelo de la bolsa de vacío, seguidamente se procedió a retirar la manta de aireación/absorción, papel film perforado y *Nylon Release Peel Ply*.



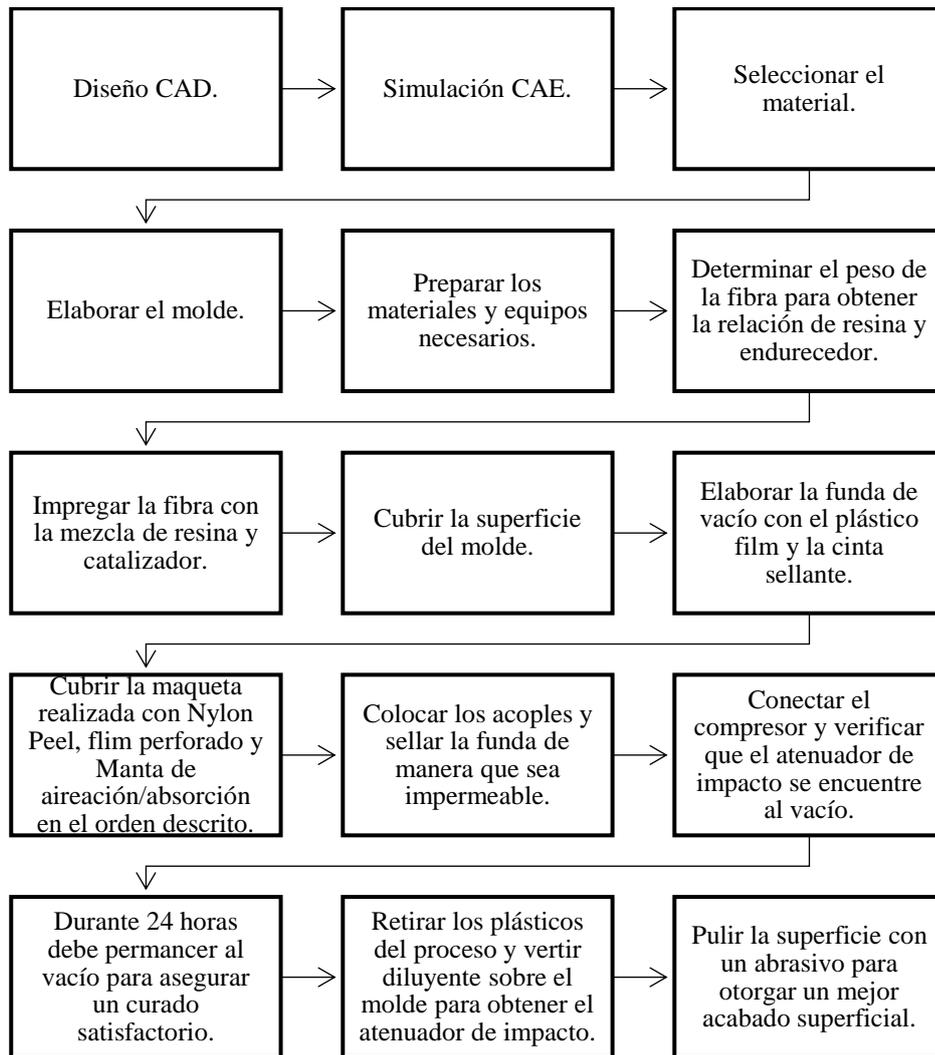
**Figura 57 Fin del proceso de curado y remoción del molde.**

En la remoción del molde se utilizó diluyente, mostrado en la figura 57, debido a que el material de fabricación del molde fue poliestireno expandido. Para otorgar un mejor acabado superficial se hizo uso de un abrasivo el cual eliminó impurezas y rugosidades de la superficie para mejorar su aspecto visual, figura 58.



**Figura 58 Atenuador de impacto.**

### 3.2.3 Cuadro de procesos.



**Figura 59 Cuadro de procesos.**

## CAPÍTULO IV

### 4. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1 Prueba de aplastamiento cuasi estático.

La prueba de aplastamiento cuasi estático fue seleccionada como prueba física para la verificación de la eficiencia del atenuador de impacto. Un ensayo se considera cuasi estático cuando se aplica una carga, dependiente del tiempo, lo suficientemente lenta para que los efectos inerciales sean insignificantes.

Para la realización el Test de Aplastamiento Cuasi Estático se hizo uso de la máquina universal de ensayos Tinius Olsen de 1000 kN, mostrada en la figura 60, con una frecuencia de obtención de datos de 10 Hz mediante el software MTESTQuattro, la velocidad de descenso del cabezal se estableció en 12 mm/min, el desplazamiento del cabezal al final del test fue de 200 milímetros.



Figura 60 Máquina universal de ensayos Tinius Olsen 1000 kN.

## 4.2 Pruebas y análisis.

La duración del test de Aplastamiento Cuasi Estático fue aproximadamente de 1000 segundos en los cuales el cabezal logró un desplazamiento de 200 milímetros, en la figura 61 se puede apreciar el recorrido del cabezal al haber transcurrido 350 segundos de iniciado el test.



Figura 61 Test de Aplastamiento Cuasi Estático 350 segundos.

### 4.2.1 Obtención de datos.

- **Fuerza**

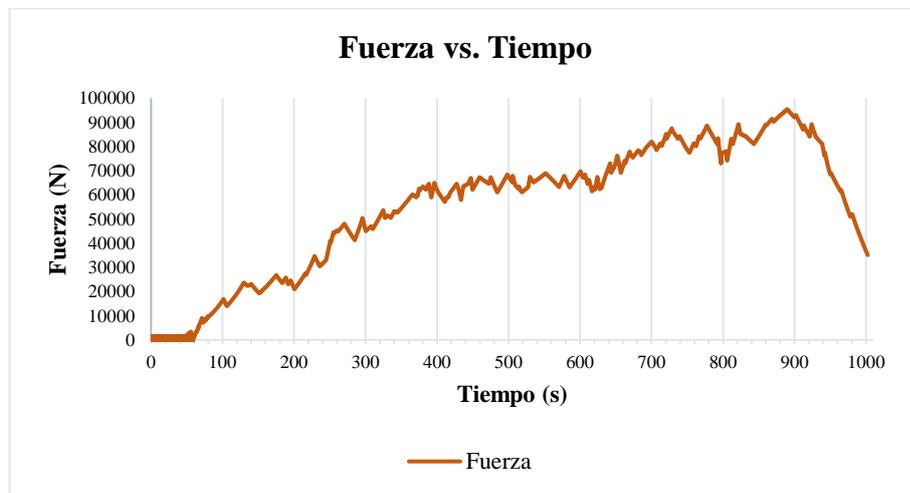


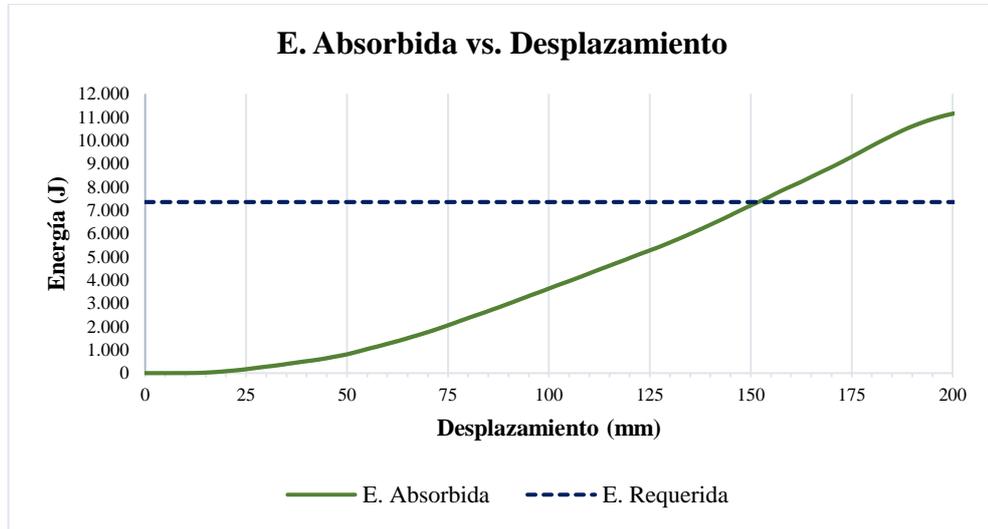
Figura 62 Fuerza vs. Tiempo Test Cuasi Estático.

- **Energía**

Para calcular la energía absorbida se procedió a emplear la fórmula (4-1) descrita en la investigación realizada por (Rappolt, 2015) la cual expresa:

$$E = \sum_{i=1}^n (F_i * (d_i - d_{i-1})) \quad (4-1)$$

Donde  $n$  es el número total de incrementos,  $F_i$  y  $d_i$  es la fuerza y el desplazamiento en el incremento  $i$  respectivamente. A continuación, se muestra la curva de energía absorbida en función del desplazamiento al realizar el análisis del atenuador de impacto:



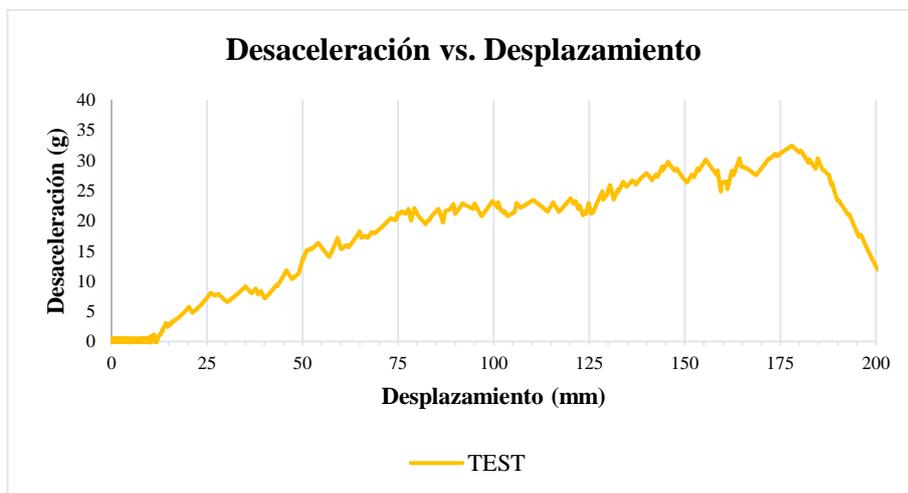
**Figura 63 E. Absorbida vs. Desplazamiento Test Cuasi Estático.**

**Tabla 29**

**Resultados Test Cuasi Estático.**

Análisis CAE	
Energía requerida	7350 J
Desplazamiento	151 mm

- **Desaceleración**



**Figura 64 Desaceleración vs. Desplazamiento Test Cuasi Estático.**

**Tabla 30**

**Resultados de la desaceleración Test Cuasi Estático.**

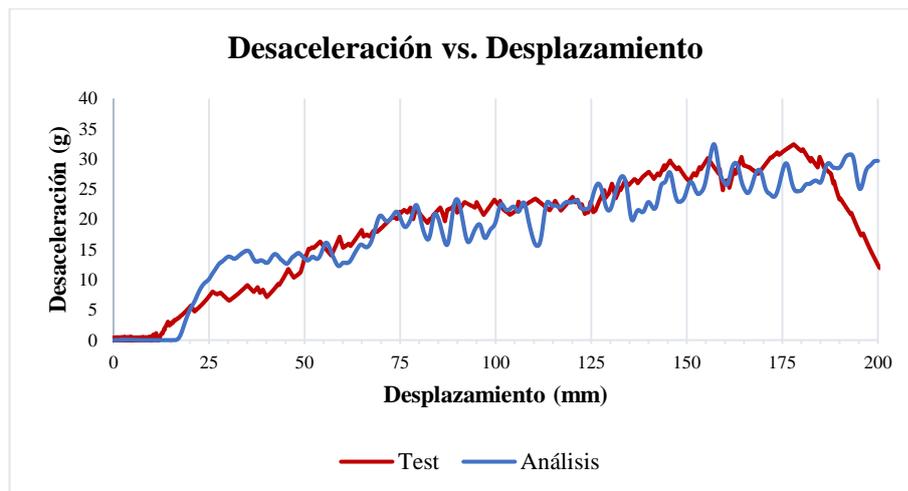
	SAE	Test Cuasi Estático
<b>Pico</b>	<= 40 g	32.42 g
<b>Promedio</b>	<= 20 g	18.91 g

**4.2.2 Comparación con resultados.**

**Tabla 31**

**Comparación de resultados Test vs Simulación.**

	Test Cuasi Estático	Simulación CAE	Porcentaje de error
<b>Desplazamiento @ 7350 Joules</b>	151 mm	161 mm	6.62 %
<b>Desaceleración Pico</b>	32.42 g	31.47 g	- 2.93 %
<b>Desaceleración Promedio</b>	18.81 g	18.47 g	- 1.84 %

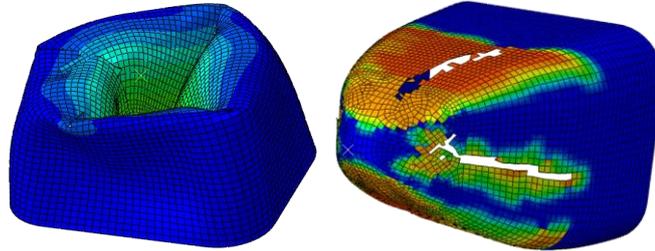


**Figura 65 Superposición de curvas Desaceleración vs. Desplazamiento Test Cuasi Estático y Simulación Computacional.**

**4.2.3 Análisis de resultados.**

Al finalizar el análisis por elementos finitos, se observó la deformación que el atenuador de impacto sufría a medida que se desplazaba la superficie de impacto, al aproximarse a los 40 milímetros de desplazamiento se pudo visualizar las primeras fracturas del material y al alcanzar la energía de absorción mínima requerida de 7350 Joules, a los 161 milímetros de desplazamiento, fue evidente el daño y la deformación causada en el material, de igual manera al analizar las curvas de fuerza y realizar los

cálculos necesarios para la obtención de la curva de aceleración, los resultados mostrados en la tabla 16 son satisfactorios ya que se encuentran dentro de los parámetros requeridos por la normativa SAE.



**Figura 66 Deformación y Daño en el análisis por elementos finitos.**

Posterior a la implementación de la propuesta el peso final del modelo fabricado en fibra de carbono y resina epoxi fue de 826 gramos lo cual indica que el proceso de fabricación con bolsa de vacío retira aproximadamente el 60% de exceso de resina presente en el atenuador de impacto, lo que provoca que el peso final del atenuador de impacto disminuya en comparación con otros métodos de fabricación.

Tras realizar el test de aplastamiento cuasi estático se puede aseverar que los resultados obtenidos en el análisis por elementos finitos son correctos debido al bajo porcentaje de error que estos presentan al ser contrastados con los resultados alcanzados en la prueba cuasi estática, estos valores se los detalla en la tabla 31. En lo que se refiere al daño y la deformación causada en el material, se puede verificar que tanto en el análisis computacional como en el test de aplastamiento cuasi estático el material sufrió gran cantidad de fracturas y desprendimiento de capas de fibra de carbono, evento que, al comparar el modelo de la simulación computacional con el modelo fabricado, tiende a ser semejante por lo que se deduce que los parámetros de tamaño de malla, coeficiente de fricción y coeficiente de amortiguamiento fueron acertados para realizar el presente análisis.



**Figura 67 Deformación y Daño Test Cuasi Estático.**

Los resultados de la prueba de impacto realizada al atenuador de impacto de equipo FESPE 2011 en comparación con el atenuador de impacto fabricado en la presente investigación se detallan a continuación:

**Tabla 32**

**Resultados Atenuador FESPE 2011 vs Atenuador CF.**

	SAE	Atenuador 2011	Atenuador CF
<b>Pico</b>	<= 40 g	39.8 g	32.42 g
<b>Promedio</b>	<= 20 g	12 g	18.81 g
<b>Energía</b>	=> 7350 J	7540 J	7350 J

### 4.3 Comprobación de la hipótesis.

El atenuador de impacto fabricado con fibra de carbono tiene un desempeño óptimo, ya que supera los estándares impuestos por la FSAE y contribuye a reducir el peso del vehículo prototipo Fórmula *Student*. Los valores del peso, energía absorbida, desaceleración promedio y pico del modelo en fibra de carbono desarrollado en la presente investigación se muestran en las tablas 29 y 30 respectivamente. Además, tras haber caracterizado al material mediante el ensayo de impacto Charpy se verificó que la fibra de carbono es superior en comparación a la fibra de vidrio, valores mostrados en la tabla 25.

## CAPÍTULO V

### 5. MARCO ADMINISTRATIVO

#### 5.1 Recursos.

Para el desarrollo satisfactorio del presente proyecto fue preciso la utilización de diferentes tipos de recursos tanto humanos, tecnológicos y materiales tanto para realizar el análisis computacional por elementos finitos como para la fabricación del atenuador de impacto en fibra de carbono y su posterior prueba de aplastamiento cuasi estático. A continuación, se detallan los recursos utilizados a lo largo de la realización del proyecto.

##### 5.1.1 Recursos humanos.

En el transcurso de la realización del presente proyecto se contó con la intervención de las siguientes personas:

Asesoramiento por parte de Ing. Henry Iza designado como director del proyecto, quien de manera muy acertada supo encaminarnos en la investigación a realizar en cada una de sus etapas.

Asesoramiento por parte de Tecnólogo Mecánico Cabo Segundo Cristhian Flores, perteneciente a la Estación Aeronaval de Manta, quien compartió sus conocimientos en la fabricación de elementos estructurales utilizando materiales compuestos.

Asesoramiento por parte de Ing. Esteban López, perteneciente al Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero de la ciudad de Ambato, quien compartió sus conocimientos para la realización del ensayo de impacto Charpy bajo de la norma ISO 179-1:2010.

**Tabla 33****Recursos humanos.**

<b>N.</b>	<b>Nombre</b>	<b>Función</b>
1	Carlos Peñafiel Hernández	Autor del proyecto
2	Cristian Méndez Borja	Autor del proyecto
3	Ing. Henry Iza	Director del proyecto
4	Cabo Segundo Cristhian Flores	Asesor en materiales compuestos
5	Ing. Esteban López	Asesor en ensayo de material

**5.1.2 Recursos tecnológicos.**

En el desarrollo del proyecto fue preciso adquirir y utilizar diferentes recursos tecnológicos, los cuales se detallan a continuación:

**Tabla 34****Recursos tecnológicos.**

<b>Recursos</b>	<b>Nombre</b>
<b>Informáticos</b>	Computador
	Software CAD
	Software CAE
	Impresora
	Escáner
<b>Bibliográficos</b>	Libros
	Artículos Científicos
	Tesis
	Manuales Técnicos
<b>Equipos y Herramientas</b>	Loción protectora
	Overol de Protección
	Guantes
	Gafas
	Mascarilla
	Balanza
	Acoples
	Compresor
	Maquina Universal de Ensayos

**5.1.3 Recursos materiales.**

A continuación, en la tabla 35 se detallan todos los materiales utilizados en la fabricación del atenuador de impacto.

**Tabla 35****Recursos materiales.**

N.	Nombre
1	Fibra de Carbono <i>Twill 2x2</i>
2	<i>Nylon Release Peel Ply</i>
3	Film perforado
4	Manta de aireación/absorción
5	Cinta sellante
6	Plástico Film
7	Resina Epoxi PR2032
8	Catalizador PH3660
9	Diluyente
10	Poliestireno Expandido

**5.2 Costo total del proyecto.**

En la fabricación del atenuador de impacto se hizo uso de los materiales detallados de manera más amplia a continuación.

**Tabla 36****Costo de los materiales de fabricación.**

N.	Material	Unidad	Cantidad	C. Unitario	C. Total
1	Fibra de Carbono <i>Twill 2x2</i>	m	8	\$ 80.00	\$ 640.00
2	<i>Nylon Release Peel Ply</i>	m	4	\$ 21.65	\$ 86.60
3	Film perforado	m	4	\$ 13.45	\$ 53.80
4	Manta de aireación/absorción	m	4	\$ 11.95	\$ 47.80
5	Cinta sellante	rollo	4	\$ 11.65	\$ 46.50
6	Plástico Film	m	15	\$ 4.5	\$ 67.5
7	Resina Epoxi PR2032	galón	$\frac{3}{4}$	\$ 149.65	\$ 149.65
8	Catalizador PH3660	galón	$\frac{1}{4}$	\$ 65.25	\$ 65.25
9	Diluyente	galón	1	\$ 2.00	\$ 2.00
10	Poliestireno Expandido	m	2	\$ 10.00	\$ 20.00
<b>TOTAL</b>					<b>1,179.10</b>

**Tabla 37****Costo total del proyecto.**

Descripción	Costo
Materiales de fabricación	\$ 1,179.10
Asesoría en materiales compuestos	\$ 600.00
Prueba de aplastamiento cuasi estática	\$ 150.00
Ensayo de Impacto Charpy	\$ 160.00
Investigación	\$ 500.00
Otros (Transporte, Impresiones, Hospedaje, etc.)	\$ 400.00
Imprevistos	\$ 300.00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 3289.10</b>

### **5.3 Cronograma.**

Ver Anexo C.

## CONCLUSIONES

Al finalizar la presente investigación se concluye lo siguiente:

- Los materiales compuestos presentan propiedades mecánicas muy por encima del tradicional acero con un peso reducido y un coeficiente de dilatación bajo por lo que son idóneos para elementos estructurales automotrices.
- Tanto en el diseño CAD como en la simulación por elementos finitos del modelo, se cumplió las condiciones de la normativa SAE obteniendo una desaceleración pico y promedio de 31.47 g y 18.47 g respectivamente con una absorción de energía de impacto de 7350 J.
- El material seleccionado fue la fibra de carbono, la cual es 40% y 98% más ligera en comparación con la fibra de vidrio y aramida respectivamente, además de ser superior en 146% al absorber energía en el test de impacto Charpy frente a la fibra de vidrio.
- La retención de resina epoxi en el refuerzo fue aproximadamente del 42% lo que indica que el proceso realizado al vacío ofrece resultados idóneos.
- Los resultados de la prueba de aplastamiento cuasi estático tuvieron una variación de 6.62 %, 2.93 % y 1.84 % en desplazamiento, desaceleración pico y desaceleración promedio respectivamente, en comparación con el análisis por elementos finitos, lo que valida la simulación computacional.
- El atenuador de impacto ofrece una desaceleración constante en un desplazamiento reducido, 151 mm, ya que su desaceleración promedio se mantiene 8.2 % por debajo del límite máximo permitido de 20 g.
- Referente al modelo 2011, la diferencia entre la desaceleración promedio y la desaceleración pico es de 27.8 unidades lo que representa un 104.2 % de la diferencia del modelo de la presente investigación, lo que en el modelo 2011 produce una desaceleración inconstante.

## RECOMENDACIONES

Al concluir el presente proyecto es pertinente presentar las siguientes recomendaciones:

- Determinar al tamaño de malla óptimo para la realización del análisis por elementos finitos debido a que valores muy grandes (10 mm) generan resultados inexactos y valores muy pequeños (3 mm) aumentan el costo computacional.
- Impregnar las capas de fibra de carbono con la mezcla de resina epoxi y catalizador en el transcurso de una hora para obtener óptimos resultados.
- Utilizar el método de bolsa de vacío en la fabricación de piezas en fibra de carbono debido a la baja porosidad y retención adecuada de resina por parte de la fibra al final del proceso.
- Realizar el test cuasi estático de aplastamiento y el ensayo de impacto Charpy con la asesoría de un técnico laboratorista para evitar errores durante el mismo.
- Aprovechar esta investigación para la realización de futuros trabajos en el desarrollo de elementos estructurales con materiales compuestos en el campo automotriz.
- De manera obligatoria se debe utilizar el equipo de seguridad necesario para trabajar en la fabricación de piezas con materiales compuestos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altenbach, H., Altenbach, J., & Kissing, W. (2004). Classification of Composite Materials. *Mechanics of Composite Structural Elements*, 1-14. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-662-08589-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-08589-9_1)
- Arruti, J. (2016). Vacuum bag in vacuum chamber technique for epoxy matrix composite materials fabrication. *Revista Ingenier'ia UC*, 22-29.
- Azcárate, L. (2017). *Análisis de la capacidad de un atenuador de impacto y consecuencias para los pilotos de un vehículo FSAE*. Madrid.
- Balkumar, K., Iyer, A., & Ramasubramanian, A. (2016). Numerical Simulation of Low Velocity Impact Analysis of Fiber Metal Laminates. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 515-530.
- Belingardi, G., & Chiandussi, G. (2011). Vehicle Crashworthiness Design — General Principles and Potentialities of Composite Material Structures. (S. Abrate, Ed.) *Impact Engineering of Composite Structures*, 526, 193-264. doi:10.1007/978-3-7091-0523-8\_5
- Belingardi, G., Boria, S., & Obradovic, J. (2012). Lightweight design and crash analysis of composite frontal impact energy. *Composite Structures*, 423 - 430.
- Blanc, R., Germain, C., Da costa, J., Baylou, P., & Cataldi, M. (2006). Fiber orientation measurements in composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(2), 197-206. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.04.021>
- Boria, S., & Pettinari, S. (2014). *Mathematical design of electric vehicle impact attenuators: Metallic vs composite material*.
- Boria, S., Pettinari, S., Giannoni, F., & Cosimi, G. (2015). *Analytical and numerical analysis of composite impact attenuators*. doi:[dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.032](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.032)
- Bracho, D. (2014, Diciembre 2). *University of BRISTOL*. Retrieved from Faculty of Engineering: <http://www.bristol.ac.uk/engineering/news/2014/66.html>

- Campbell, F. (2010). *Structural Composite Materials*. ASM International. Retrieved Septiembre 1, 2017, from ASM International: [http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05287G\\_Sample\\_Chapter.pdf](http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05287G_Sample_Chapter.pdf)
- Castro, V. (2016). *Diseño de un atenuador de impactos para un vehículo Fórmula SAE*. Madrid.
- Chang, K., & Du Pont, E. (2001). Aramid Fibers. *ASM Handbook Volume 21, Composites (ASM International)*, 41-45.
- Cruz, J., & Shah, C. (1996). Properties of Two Carbon Composite Materials Using LTM25 Epoxy Resin. *NASA Technical Memorandum 110286*, 1-24.
- Erklig, A., Furkan, N., & Bulut, M. (2017). Charpy Impact Response of Glass Fiber Reinforced Composite with Nano Graphene Enhanced Epoxy. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 341-346. doi:10.21533/pen.v5i3.121
- Fazilati, J., & Alisadeghi, M. (2016). *Multiobjective crashworthiness optimization of multi-layer honeycomb energy absorber panels under axial impact*. doi:doi.org/10.1016/j.tws.2016.06.008
- FCMA. (2013, enero 2013). *Carbon Fiber's Special Features and its Characterizing Performances*. Retrieved Septiembre 3, 2017, from Japan Carbon Fiber Manufacturers Association: <http://www.carbonfiber.gr.jp/english/material/feature.html>
- Formula SAE*. (2016). Retrieved Septiembre 04, 2017, from <https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=193613e4-fff1-4ea9-97ec-eb1c07fbe3c0>
- FORMULA STUDENT GERMANY. (2017, Abril 5). *FORMULA STUDENT GERMANY*. Retrieved from <https://www.formulastudent.de/fsg/fsc-2014/results/>
- Hashin, Z. (1980). Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites. *Journal of Applied Mechanics*, 329-334.

- Hoai, S. (2009). *PRINCIPLES of the MANUFACTURING OF COMPOSITE MATERIALS*. Pennsylvania: DEStech Publications.
- ISO 179-1:2010. (n.d.). *ISO 179-1:2010*. International Organization for Standardization.
- Iza, H. (2011). *Formula Student Germany. Impact attenuator form*. Latacunga.
- Iza, H. (2012). *Formula Student Germany. Impact Attenuator*. Latacunga.
- Iza, H. (2014). *Formula Student Germany. Impact Attenuator Data*. Latacunga.
- Jawaid, M., & Qaiss, A. (2016). *Nanoclay Reinforced Polymer Composites*. (R. Bouhfid, Ed.) Singapore : Springer.
- Luna, J., Pucha , M., & Valencia , F. (2013). *Diseño y construcción de un atenuador de impacto para un vehiculo monoplaaza Formula Student*. Cuenca.
- Mallick, P. (2007). *FIBER REINFORCED COMPOSITES* (3rd ed.). Michigan: Taylor & Francis.
- Milan, R., Kulísek, V., & Bogomolov, S. (n.d.). *Development of composite energy absorber*.
- Obradovic, J., Belingardi, G., & Boria, S. (11 de abril de 2015). Experimental and numerical investigations of the impact behaviour of composite frontal crash structures. *Composites Part B*, 20-27. doi:10.1016/j.compositesb.2015.04.016
- Ozgun, M., Mohanty, A., & Misra, M. (2017). *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*. India: Woodhead.
- Peters, S. (1998). *Handbook of Composites*. Boston: Springer. doi:[https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6389-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6389-1_1)
- Preetkanwal, S., Sarabjeet, S., & Payal, H. (2016). Fabrication and Machining of Metal Matrix Composites: A Review. *Materials and Manufacturing Processes*, 553-573. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2015.1025976>
- Randjbaran, E., Zahari, R., Majid, D. L., Abdul, N., Vaghei, R., & Ahmadi, R. (2013). The Effects of Stacking Sequence Layers of Hybrid Composite Materials in Energy Absorption under the High Velocity Ballistic Impact Conditions: An Experimental Investigation . *Material Science & Engineering* , 2-8.

- Rappolt, J. (2015). *ANALYSIS OF A CARBON FIBER REINFORCED POLYMER IMPACT ATTENUATOR FOR A FORMULA SAE VEHICLE USING FINITE ELEMENT ANALYSIS*. California: San Luis Obispo.
- Romero García, M. (2002). *Resistencia de materiales*. Universitat Jaume I.
- SAE. (2017, Marzo 17). *FORMULA SAE*. Retrieved from <https://www.fsaeonline.com>
- SAE. (2017, Abril 4). *SAE INTERNACIONAL*. Retrieved from <http://students.sae.org/cds/formulaseries/about/>
- SAE International*. (2016). Retrieved Agosto 30, 2017, from SAE International: <http://students.sae.org/cds/formulaseries/about/>
- SAE International. (2017, Septiembre 7). *Reglamento Formula SAE 2017 - 2018*. Retrieved Agosto 30, 2017, from <http://www.fsaeonline.com/content/2017-18%20FSAE%20Rules%209.2.16a.pdf>
- Schwartz, R., & Schwartz, H. (1967). Characteristics of Boron Fibers and Boron-Fiber-Reinforced. *AIAA JOURNAL*, 286-295. doi:<https://doi.org/10.2514/3.3954>
- Sinha, P. (2006). *COMPOSITE MATERIALS AND STRUCTURES*. Kharagpur: Indian Institute of Technology Kharagpur.
- Steinmann, W., & Saelhoff, A. (2016). Essential Properties of Fibres for Composite Applications. *Fibrous and Textile Materials for Composite Applications*, 39-73. doi:[https://doi.org/10.1007/978-981-10-0234-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-0234-2_2)
- Stupenengo, F. (2011). *Materiales y Materias Primas*. Buenos Aires.
- United States Department of Transportation. (2014, Mayo 15). *Aviation Maintenance Technician Handbook - Airframe*. Retrieved Septiembre 1, 2017, from Federal Aviation Administration: [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aircraft/amt\\_airframe\\_handbook/media/ama\\_Ch07.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/ama_Ch07.pdf)
- Wallenberger, F., & Weston, N. (2004). *Natural Fibers, Plastics and Composites*. Massachusetts: Springer.

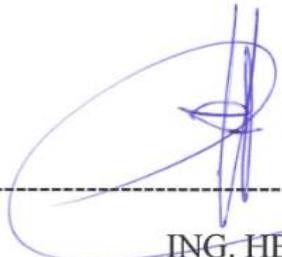
- Wambua, P., Ivens, J., & Verpoest, I. (2003). Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, 1259–1264. doi:10.1016/S0266-3538(03)00096-4
- Wang, J., Yang, N., Zhao, J., Wang, D., Wang, Y., Li, K., . . . Wang, B. (2016, Mayo 1). Design and experimental verification of composite impact attenuator for racing vehicles. *Composite Structures*, 149, 39-49. doi:10.1016/j.compstruct.2016.01.013
- Watson, B., Li, H., & Wallenberger, F. (2001). ASM Handbook Volume 21, Composites (ASM International). *ASM Handbook*, 27 - 34.

# **ANEXOS**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**CERTIFICACIÓN**

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores Cristian Paúl Méndez Borja y Carlos Fernando Peñafiel Hernández bajo mi supervisión.



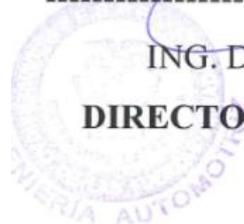
---

ING. HENRY IZA  
**DIRECTOR**



---

ING. DANILO ZAMBRANO  
**DIRECTOR DE LA CARRERA**



---

DR. FREDDY JARAMILLO  
**SECRETARIO ACADÉMICO**