

***UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE  
EXTENSIÓN LATACUNGA***

***Departamento de Energía y Mecánica  
Carrera de Ingeniería Automotriz***

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

***AUTORES: Carlos Peñafiel Hernández  
Cristian Méndez Borja***

***DIRECTOR: Ing. Henry Iza Tobar***

***Latacunga, 2018***



*No hay secretos para el éxito. Éste se alcanza preparándose, trabajando arduamente y aprendiendo del fracaso.*

*- Colin Powell*



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

# 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.



# Objetivos

## – Objetivo General

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

## – 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.



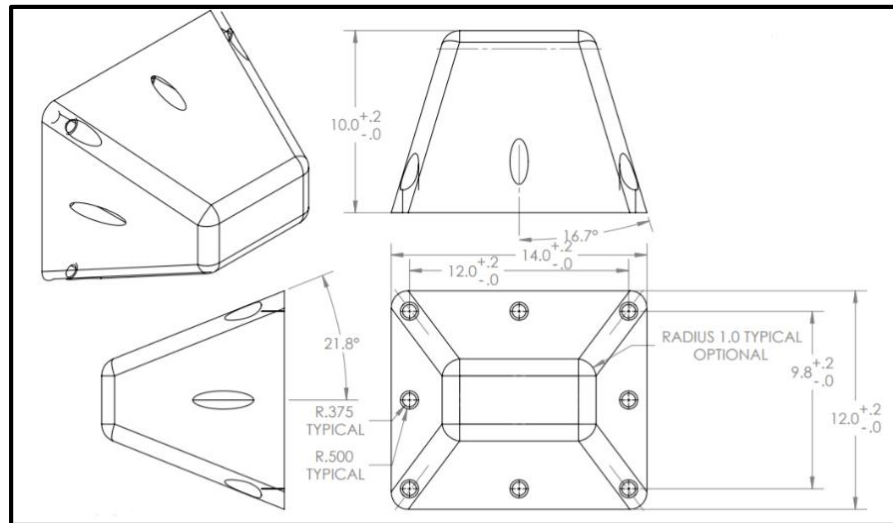
## – **Objetivos Específicos**

- 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.



# Fórmula SAE

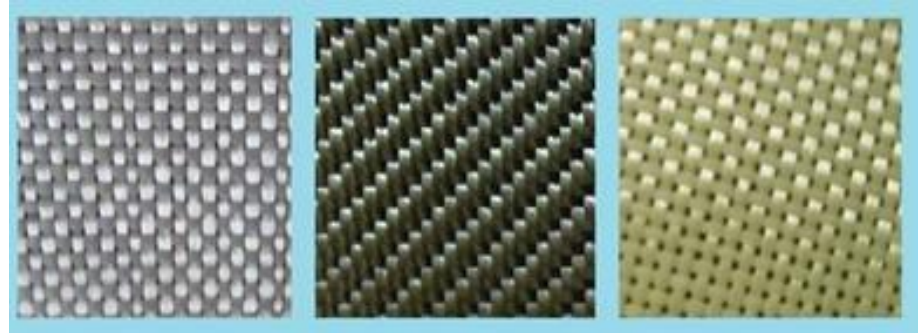
- La Fórmula Student es una competición que ayuda a los estudiantes a mejorar sus habilidades de diseño, ingeniería y administración de proyectos aplicando los conocimientos aprendidos en clase en una competencia rigurosa.



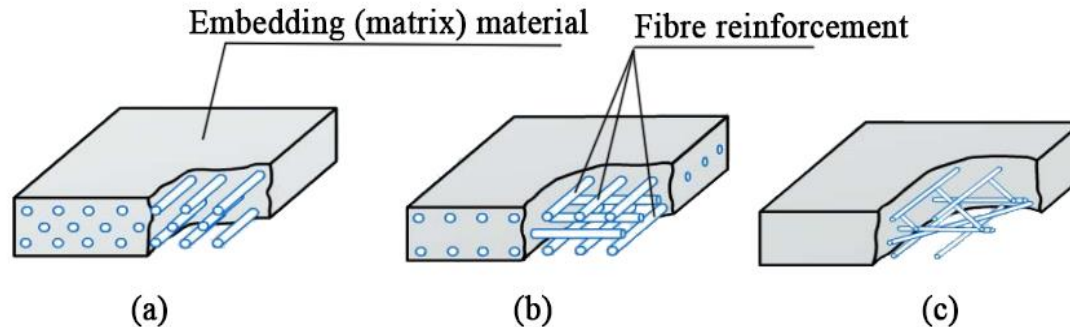
	SAE
<b>Largo</b>	$\geq 200$ mm
<b>Ancho</b>	$\geq 200$ mm
<b>Altura</b>	$\geq 100$ mm
<b>Energía Requerida</b>	7350 J
<b>D. Pico</b>	$\leq 40$ g
<b>D. Promedio</b>	$\leq 20$ g



# *Materiales Compuestos*



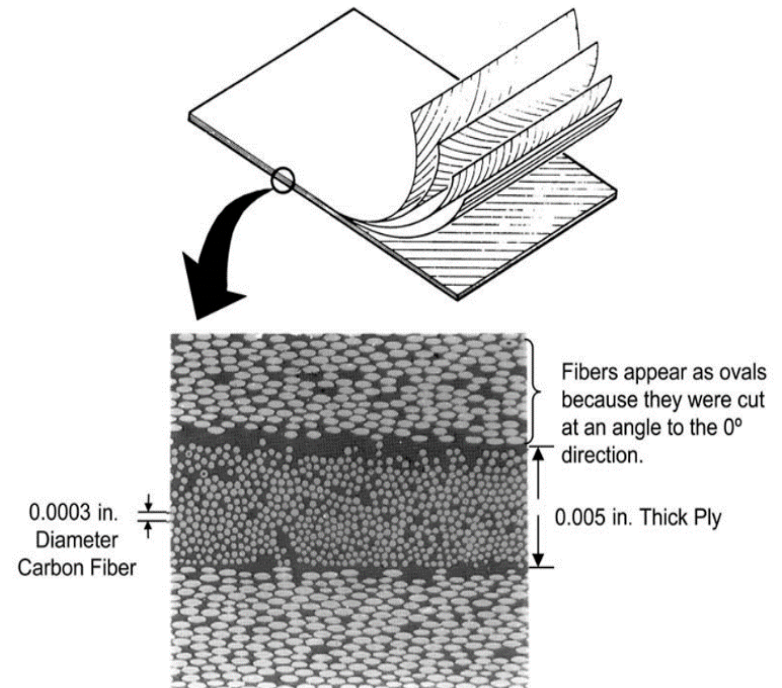
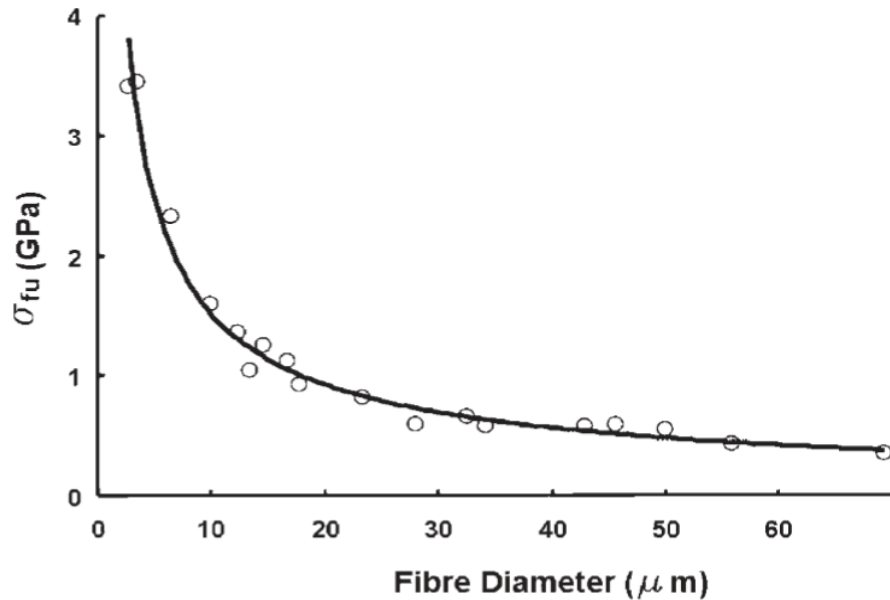
- Los dos componentes de un material compuesto son un refuerzo y una matriz.



# Materialles Compuestos

## – Longitud y diámetro de fibras

- Las fibras tienen un diámetro muy pequeño, aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ .

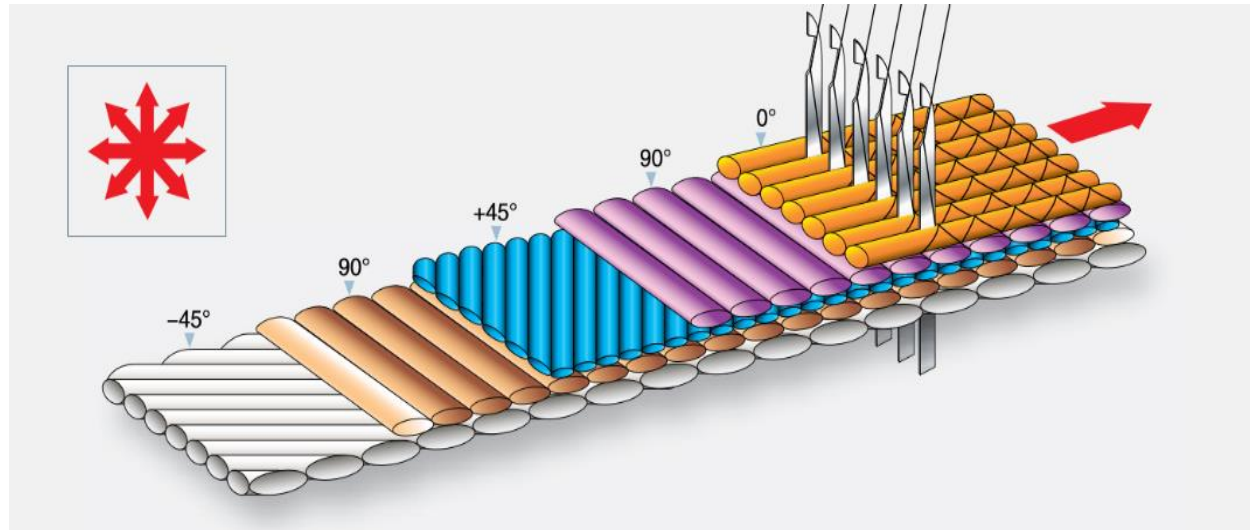




# *Materiales Compuestos*

## – Orientación de las fibras

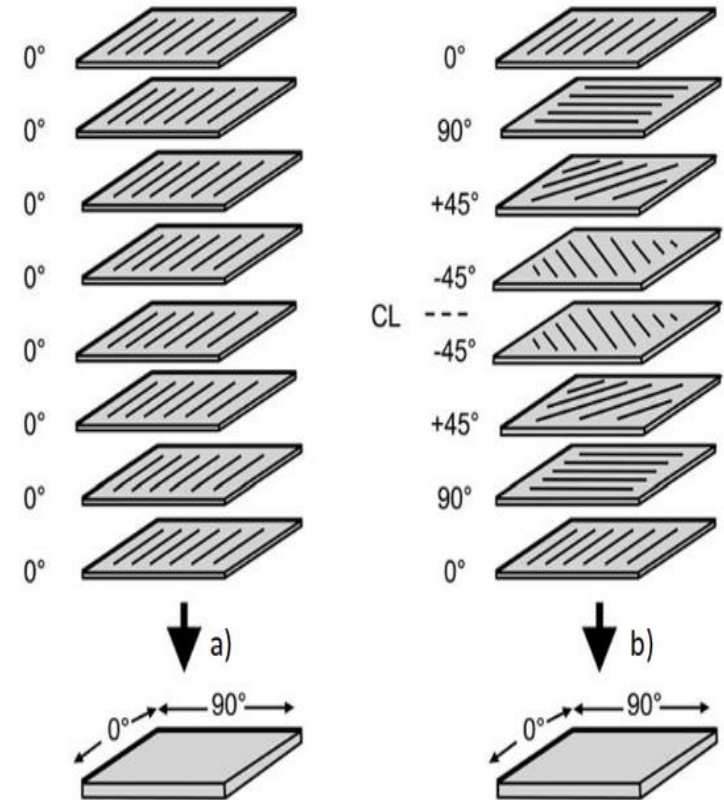
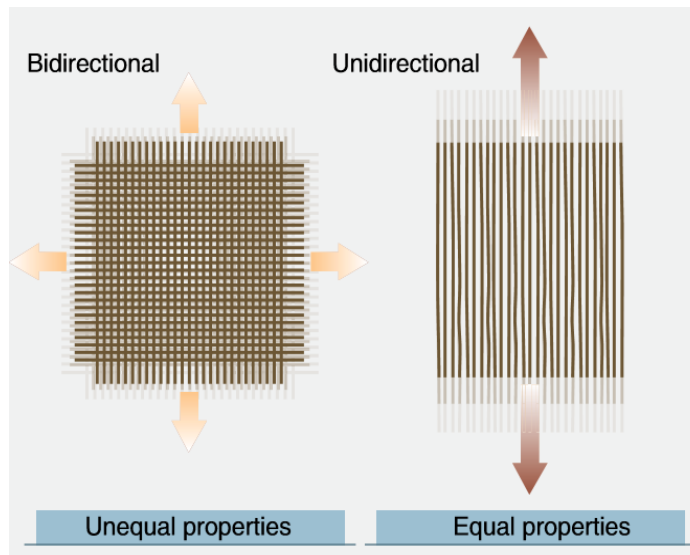
- Las fibras individuales por sí mismas son muy flexibles y frágiles por lo que tienden a enrollarse y formar piezas enredadas no alineadas. Para que sus propiedades se utilicen de manera efectiva las fibras deben estar alineadas y ligeramente tensadas.



# Materialles Compuestos

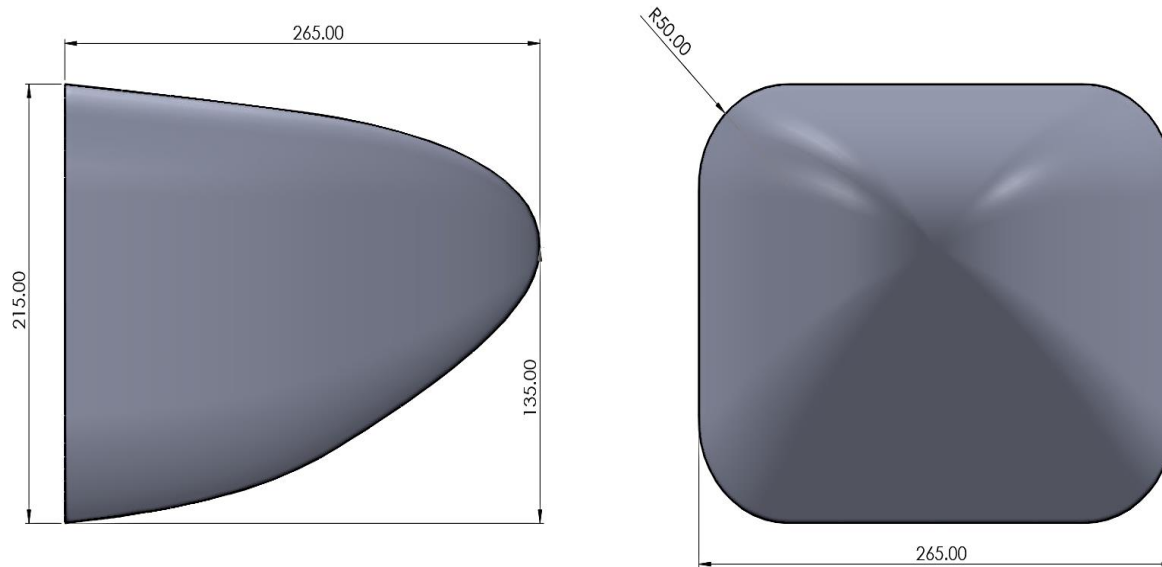
## – Orientación de las fibras

- 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.



# Diseño CAD

- Para modelamiento se emplea el software CAD, SolidWorks 2018, en el cual se modela la siguiente geometría.



	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



# Simulación por elementos finitos

- 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 construcción.

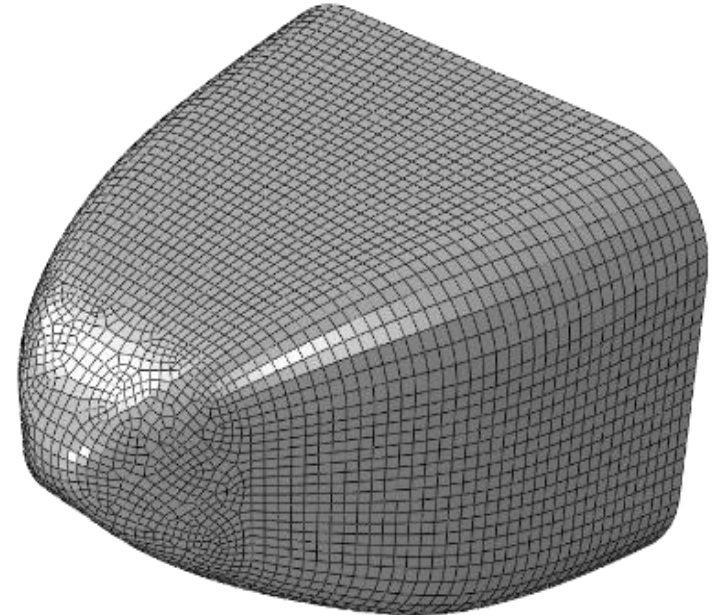
Propiedades	Vidrio/Epoxy (a)	Aramida/Epoxy (b)	CF/Epoxy (c)
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1800	1440	1453
E1(GPa)	26	67	53.572
E2 (GPa)	26	47	55.158
E3 (GPa)	8	47	48.608
G <sub>12</sub> (GPa)	3.8	2	2.854
G <sub>13</sub> (GPa)	2.8	2	1.427
G <sub>23</sub> (GPa)	2.8	1.586	2.854
v12	0.1	0.34	0.042
v13	0.25	0.34	0.028
v23	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



# Simulación por elementos finitos

## – Variables de Análisis CAE

Ítem	Valor
Malla	6 mm
Tiempo del evento	4.5 seg
Velocidad	45 mm/s
C. Fricción	0.1
C. Amortiguamiento	0.2



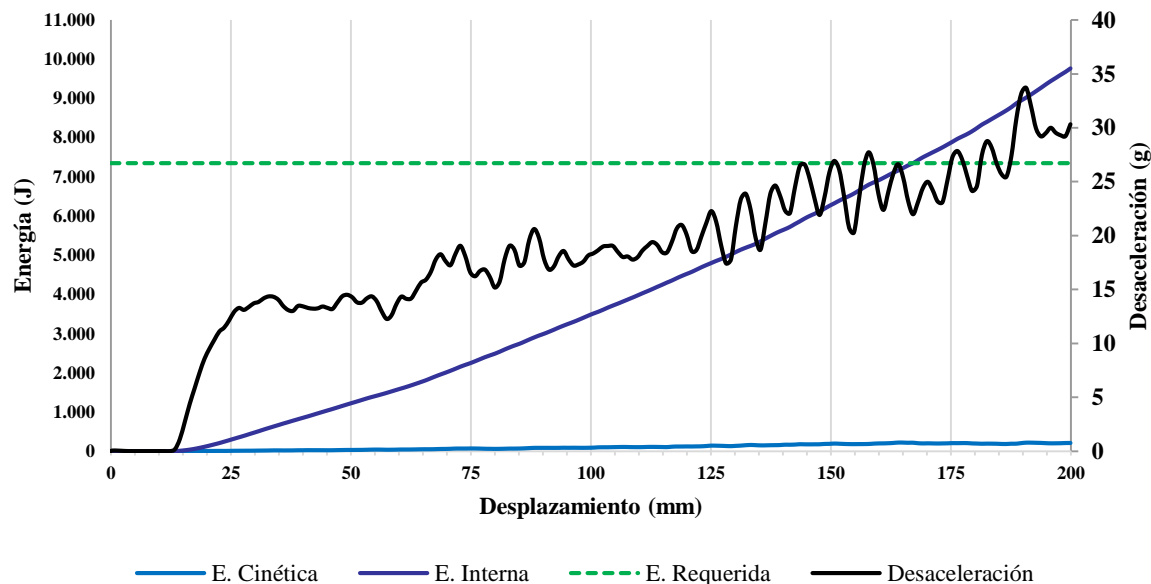
- Para garantizar una respuesta cuasi estática se debe asegurar que la energía cinética sea menor o igual al 5% de la energía interna al final del análisis.



# Resultados de simulación por elementos finitos

## – Fibra de Vidrio

E. Cinética - E. Interna - Desaceleración vs. Desplazamiento



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

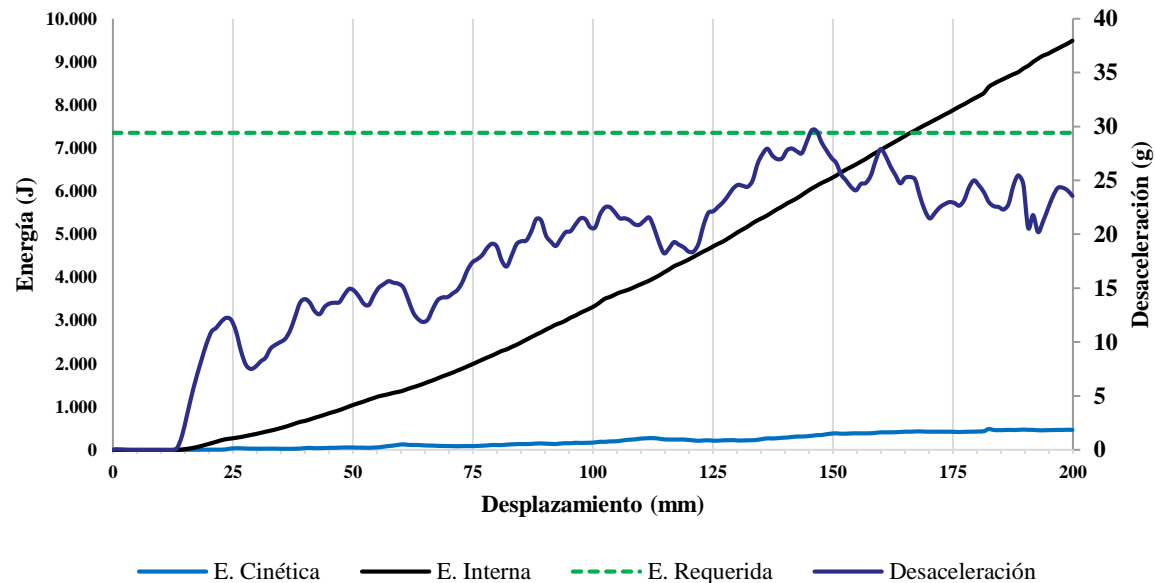
	SAE	Simulación CAE
Pico	$\leq 40$ g	33.69 g
Promedio	$\leq 20$ g	17.57 g



# Resultados de simulación por elementos finitos

## – Fibra de Aramida

E. Cinética - E. Interna - Desaceleración vs. Desplazamiento



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

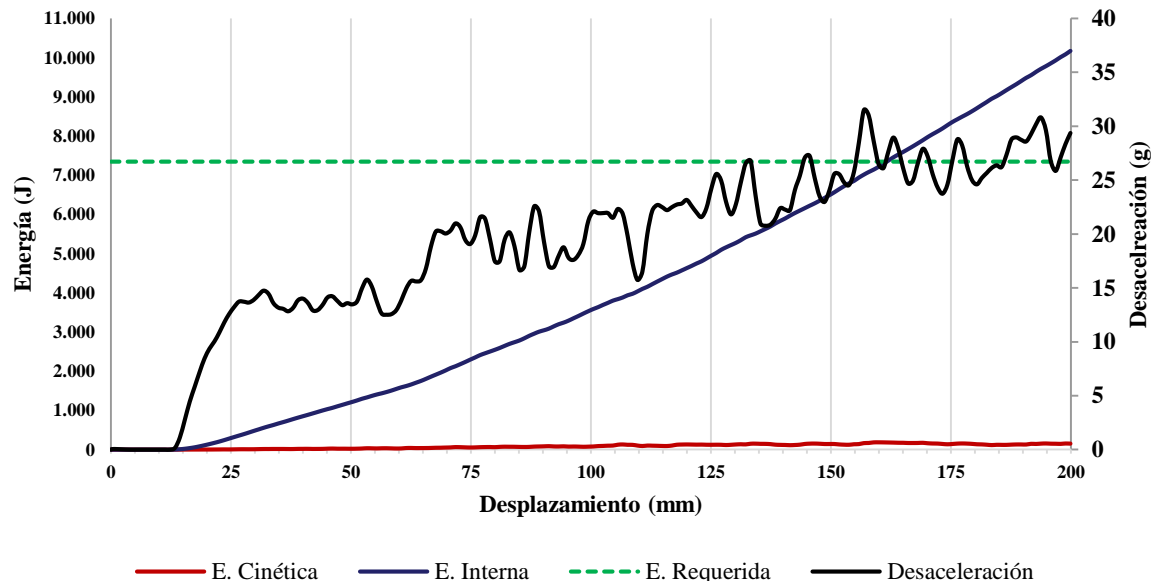
	SAE	Simulación CAE
Pico	$\leq 40$ g	29.63 g
Promedio	$\leq 20$ g	17.49 g



# Resultados de simulación por elementos finitos

## – Fibra de Carbono

E. Cinética - E. Interna - Desaceleración vs. Desplazamiento



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

	SAE	Simulación CAE
Pico	$\leq 40$ g	31.47 g
Promedio	$\leq 20$ g	18.47 g

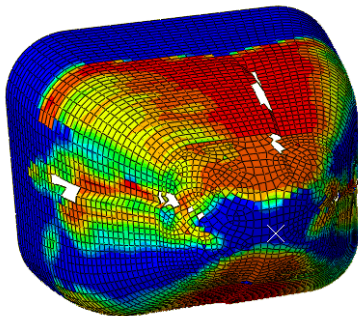




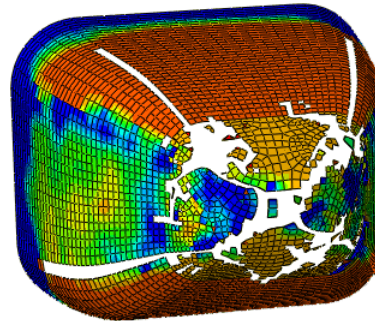
# Resultados de simulación por elementos finitos

## – Comparación de resultados

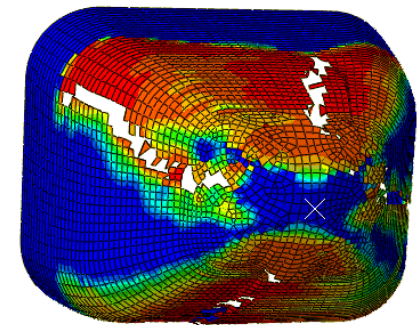
	Vidrio/Epoxy	Aramida/Epoxy	CF/Epoxy
Energía de Absorción	7350 J	7350 J	7350 J
D. Pico	33.69 g	29.63 g	31.47 g
D. Promedio	17.57 g	17.49 g	18.47 g
Peso	0.93662 kg	1.3239 kg	0.66798 kg
Capas	19	18	9



Vidrio/Epoxy



Aramida/Epoxy



CF/Epoxy



# Selección del material

## – Matriz de selección del material

Ítem (valor)	Vidrio/Epoxy	Aramida/Epoxy	CF/Epoxy
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



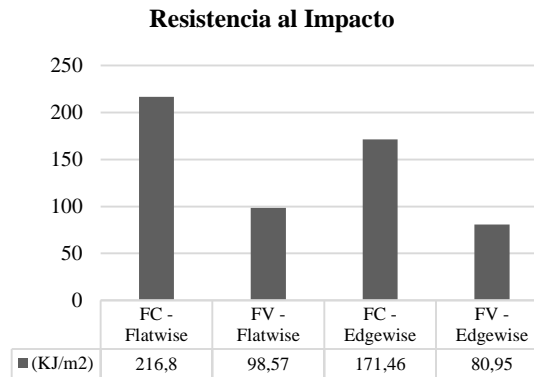
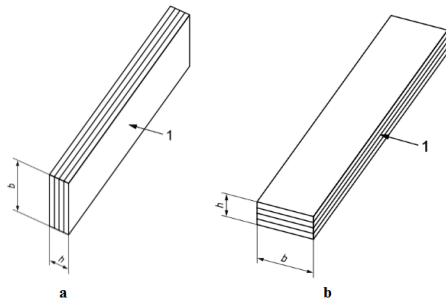


# Ensayo Charpy

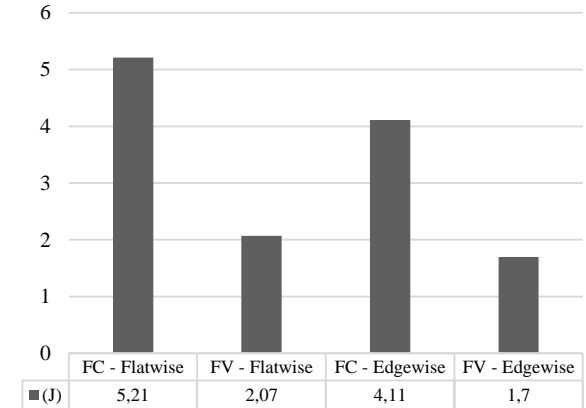


Parámetro	Descripción
Norma de calidad	ISO 17025
Norma Técnica	ISO 179-1:2010
Temperatura	22.1 ° C
Humedad Relativa	51.4 %
Martillo ISO-Charpy	R6 – 15 J
Ángulo de disparo	145°
Material	Fibra de Carbono/Epoxi Twill 2x2
Número de probetas	12

	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 (%)
Flatwise	5.21	216.8	2.07	98.57	151.6	119.9
Edgewise	4.11	171.46	1.70	80.95	141.7	111.8



**Energía Absorbida**



# Implementación de la propuesta

## – Materiales y Equipos necesarios.

Fibra de Carbono
<i>Nylon Release Peel Ply</i>
Film perforado
Manta de aireación/absorción
Cinta sellante
Plástico Film
Resina Epoxi PR2032
Catalizador PH3660
Diluyente
Balanza
Acoples
Compresor
Lijadora

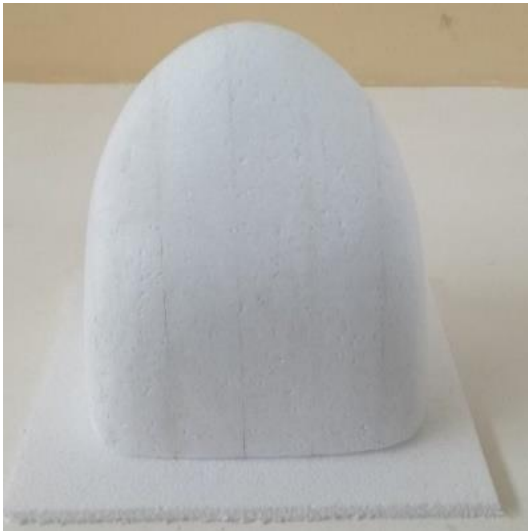
Fibra de Carbono	
Orientación de las fibras	0-90
Patrón de tejido	2 x 2 Twill
Peso	5.7 oz/ yd <sup>2</sup>
Espesor	.011 in
Elongación	1.75-1.95%



# *Implementación 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 un bajo índice de porosidades.

## **a) Elaboración del molde y material**



# Implementación de la propuesta

## b) Fabricación del Atenuador de Impacto

- Relación: 27 partes de catalizador por cada 100 partes de resina epoxi.



# Implementación de la propuesta

## b) Fabricación del Atenuador de Impacto

- Sellado hermético y conexión de la bomba de vacío.



# Implementación de la propuesta

## c) Curado de la resina y acabado final

- 24 horas de curado a temperatura ambiente.





# Análisis Cuasi Estático

- Un ensayo se considera cuasi estático cuando se aplica una carga, dependiente del tiempo, lo suficientemente lenta para que los efectos inerciales sean insignificantes.

Parámetro	Descripción
Equipo	Tinius Olsen 1000 KN
Interfaz	MTESTQuattro
Velocidad	12 mm/min
Desplazamiento	200 mm
Tiempo	1000 segundos
Frecuencia	10 Hz





# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



# ESPE

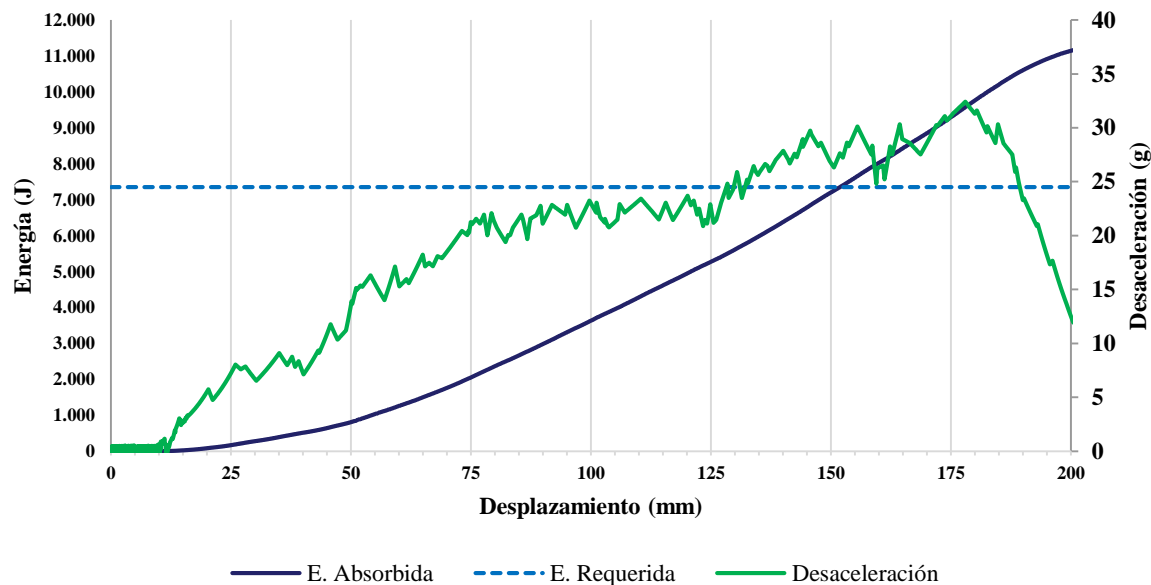
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Resultados del análisis cuasi estático

Para calcular la energía absorbida se procedió a emplear la fórmula.

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

**E. Absorbida - Desceleración vs. Desplazamiento**



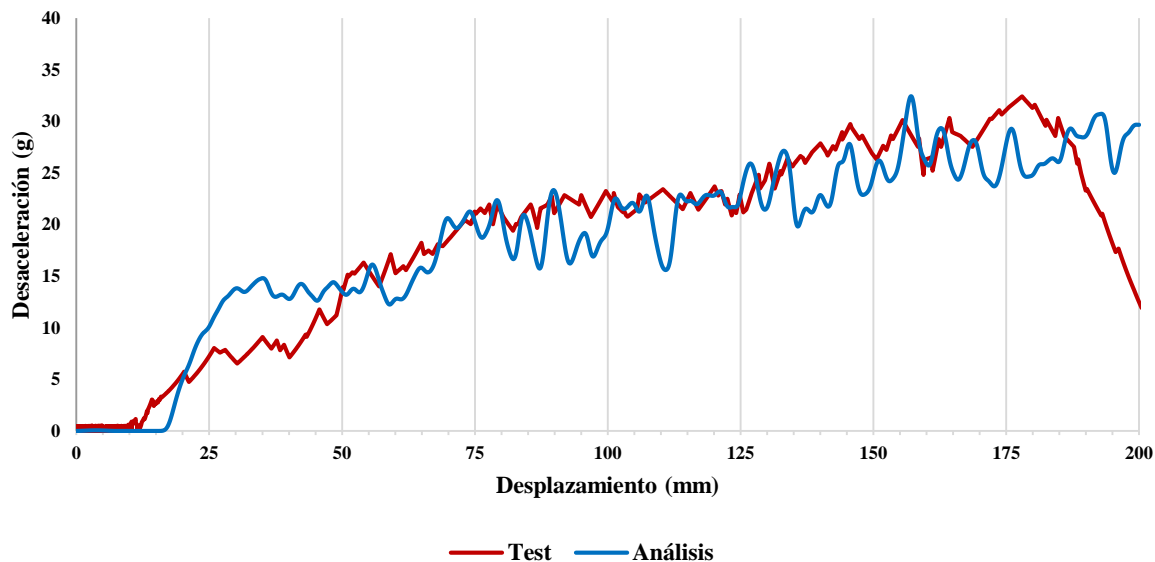
	Test Cuasi Estático
Energía requerida	7350 J
Desplazamiento	151 mm

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



# Comparación de resultados Test vs Simulación

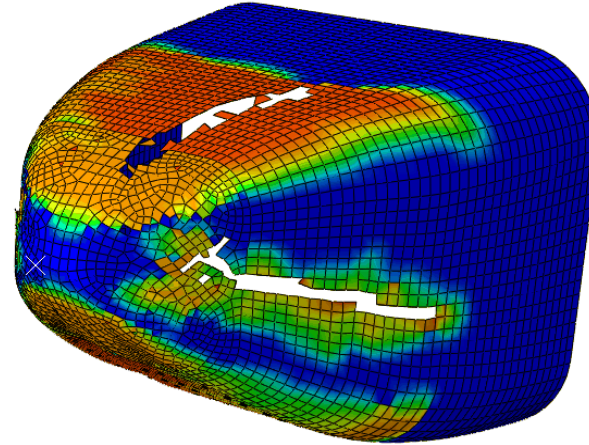
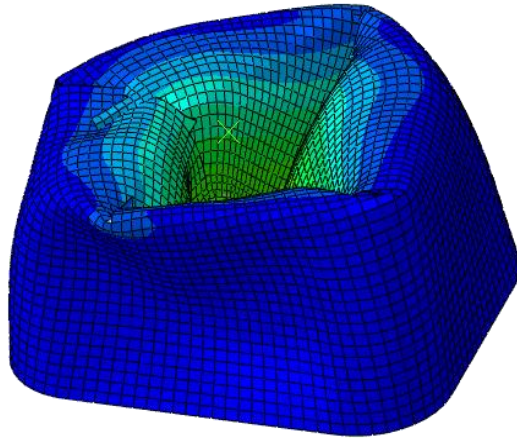
## Desaceleración vs. Desplazamiento



	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 %



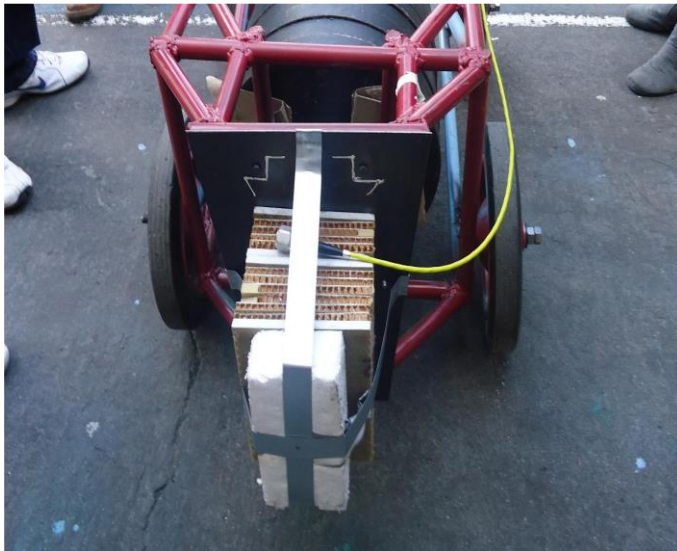
# *Análisis de resultados*



# Análisis de resultados

## – Resultados Atenuador FESPE 2011 vs Atenuador CF

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



# Conclusiones

- Los materiales compuestos presentan propiedades mecánicas, muy por encima del tradicional acero con un peso reducido y 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 ensayo 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.



# Conclusiones

- 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 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 variable.





# Recomendaciones

- Determinar al tamaño de malla óptimo para la realización del análisis por elemento 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.
- 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.



*El secreto del éxito en la vida de un hombre está en prepararse para aprovechar la ocasión cuando se presente.*

*- Benjamin Disraeli*



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

# GRACIAS



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