



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,  
INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

**CENTRO DE POSTGRADOS  
MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDO POR  
COMPUTADOR**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE MAGÍSTER EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDO  
POR COMPUTADOR**

**TEMA: “DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN ATENUADOR DE  
IMPACTOS VIAL PARA VEHÍCULOS LIVIANOS TIPO M1”**

**AUTOR: PINEDA MAIGUA, DIEGO PATRICIO  
DIRECTOR: MSC. ABATTA JÁCOME, LENIN RÓMULO**

**SANGOLQUÍ**

**2020**



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y  
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSGRADOS

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, *"DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN ATENUADOR DE IMPACTOS VIAL PARA VEHÍCULOS LIVIANOS TIPO M1"* fue realizado por *Pineda Maigua, Diego Patricio*, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido, por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 12 de diciembre del 2019

Firma

ABATTA JÁCOME, LENIN RÓMULO  
DIRECTOR  
C.C. 1723180707



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y  
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSGRADOS

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Pineda Maigua, Diego Patricio* con cédula de identidad N° 1002454708, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "*Diseño y simulación de un atenuador de impactos vial para vehículos livianos tipo MI*" es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 12 de diciembre del 2019

Firma:

.....  
PINEDA MAIGUA, DIEGO PATRICIO

C.C: 1002454708



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y  
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSTGRADOS

AUTORIZACIÓN

Yo, *Pineda Maigua, Diego Patricio* autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "*Diseño y simulación de un atenuador de impactos vial para vehículos livianos tipo MI*" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 12 de diciembre del 2019

Firma:

.....  
PINEDA MAIGUA, DIEGO PATRICIO

C.C: 1002454708



## DEDICATORIA

Agradezco a Dios por darme fortaleza y mantenerme constante en mis sueños y permitirme concluir el presente trabajo.

A mis padres, por su apoyo incondicional en todo momento, gracias a ellos por preocuparse de mí formación y hacer de mí una persona de bien.

A mi esposa y a mis dos hijos porque son mi razón de vida y este ejemplo a seguir es para ustedes. Los amo mucho.

Diego



## **AGRADECIMIENTO**

Muy agradecido de la excelente calidad de educación que recibí por segunda ocasión de la Universidad de las Fuerza Armadas – ESPE, de manera especial a todos los profesores de la Maestría quienes supieron transmitir desinteresadamente sus conocimientos, logrando de esta manera fortalecer mi espíritu investigador.

Diego

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

### CARATULA

<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>I</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	<b>II</b>
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	<b>III</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>X</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XIV</b>

### CAPÍTULO I

#### INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Desarrollo del problema.....	1
1.3 Formulación del problema a resolver. ....	2
1.4 Hipótesis.....	2
1.5 Objetivos. ....	2
1.5.1 Objetivo general.....	2
1.5.2 Objetivos específicos .....	2
1.6 Antecedentes.....	3
1.7 Justificación.....	4

### CAPÍTULO II

#### MARCO TEÓRICO

2.1 Elementos de seguridad en carretera. ....	8
2.2 Situación de vías en el Ecuador .....	10
2.3 Impacto .....	11
2.4 Atenuador de impacto.....	11
2.4.1 Amortiguadores de impacto con capacidad de redireccionamiento .....	12
2.4.2 Amortiguadores de impacto sin capacidad de redireccionamiento .....	13
2.4.3 Amortiguadores de impacto móviles .....	15
2.5 Utilización de atenuadores de impacto.....	16

2.5.1	En entradas y salidas .....	16
2.5.2	En bifurcaciones .....	17
2.5.3	En plazas de cobro .....	17
2.5.4	En zonas de obras viales.....	17
2.6	Selección de amortiguadores de impacto .....	18
2.6.1	Selección según el nivel de contención.....	18
2.6.2	Según las características del sitio.....	19
2.6.3	Vida útil de los atenuadores de impacto .....	20
2.6.4	Costos de construcción.....	20
2.7	Criterios de diseño.....	20
2.8	Clasificación vehicular según la NTE INEN 2656. ....	22
2.8.1	Vehículos de tipo M1.....	22
2.9	Sistemas de seguridad en automóviles. ....	26
2.9.1	Seguridad activa.....	27
2.9.2	Seguridad pasiva. ....	28
2.10	Pruebas de impacto en automóviles .....	29
2.11	Homologación de vehículos para Europa .....	30
2.11.1	Ámbito de aplicación. ....	31
2.12	Software CAE y sus generalidades. ....	33
2.12.1	Generalidades del software CAE.....	34
2.12.2	Aplicaciones del software CAE.....	35
2.13	Método del Elemento Finito .....	35
2.13.1	Proceso para desarrollar un Análisis de Elementos Finitos .....	36
2.13.2	Mallado del componente. ....	37
2.13.3	Postprocesamiento. ....	42
2.14	Proceso matemático de resolución .....	42

### **CAPÍTULO III**

#### **METODOLOGÍA DE DISEÑO**

3.1	Selección del material. ....	45
3.1.1	Caracterización de materiales.....	45
3.1.2	Selección de materiales por etapa límite.....	47
3.1.3	Tabla de priorización .....	51
3.1.4	Matriz de decisión del material.....	52
3.2	Requerimientos de diseño .....	53



3.2.1	Tipos de atenuador de impacto.....	53
3.2.2	Identificación de necesidades.....	54
3.2.3	Establecer especificaciones – objetivo.....	55
3.2.4	Generación de conceptos.....	59

## **CAPÍTULO IV**

### **EVALUACIÓN Y SELECCIÓN**

4.1	Proceso CAD del vehículo.....	62
4.1.1	Chasis y Carrocería.....	62
4.1.2	Sistemas automotrices.....	63
4.2	Mallado.....	63
4.3	Calidad de malla del análisis.....	64
4.4	Validación del modelo.....	65
4.5	Análisis de atenuadores de impacto.....	66
4.5.1	Impacto contra una pared rígida.....	67
4.5.2	Impacto contra concepto de diseño A.....	68
4.5.3	Impacto contra concepto de diseño B.....	71
4.5.4	Impacto contra concepto de diseño C.....	73
4.6	Selección del concepto por diseñadores.....	75
4.7	Análisis de costo del atenuador de impacto vial.....	76

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1	Conclusiones.....	78
5.2	Recomendaciones.....	79

<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>80</b>
--------------------------	-----------

<b>ANEXOS.....</b>	<b>84</b>
--------------------	-----------

Anexo 1 Siniestros por causas probables a nivel Nacional en el año 2018.....	85
--	----

Anexo 2 Planos del atenuador de impacto vial.....	86
---	----

**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1</b> <i>Siniestros por causas probables a nivel Nacional en el año 2018</i> .....	6
<b>Tabla 2</b> <i>Niveles de contención mínimos según las características del tránsito</i> .....	18
<b>Tabla 3</b> <i>Calidad de los elementos de malla acorde a sus ángulos.</i> .....	40
<b>Tabla 4</b> <i>Resultados de ensayos mecánicos</i> .....	47
<b>Tabla 5</b> <i>Tabla de priorización</i> .....	52
<b>Tabla 6</b> <i>Caracterización de necesidades.</i> .....	55
<b>Tabla 7</b> <i>Listado de criterios de utilidad.</i> .....	55
<b>Tabla 8</b> <i>Jerarquización de las necesidades – objetivos</i> .....	56
<b>Tabla 9</b> <i>Lista de métricas</i> .....	57
<b>Tabla 10</b> <i>Matriz de pares</i> .....	57
<b>Tabla 11</b> <i>Objetivos ponderados</i> .....	59
<b>Tabla 12</b> <i>Resumen FEM Ford Explorer</i> .....	64
<b>Tabla 13</b> <i>Resumen propiedades malla</i> .....	64
<b>Tabla 14</b> <i>Comparación de objetivos con conceptos.</i> .....	75
<b>Tabla 15</b> <i>Costo de material</i> .....	76
<b>Tabla 16</b> <i>Costo de manufactura</i> .....	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Distribución de vehículos matriculados por marcas año 2017.....	5
<b>Figura 2.</b> Número de vehículos matriculados periodos: 2008-2017 .....	5
<b>Figura 3.</b> Atenuadores de impacto de acero usados en intercambiadores de vías.....	9
<b>Figura 4.</b> Tramo vial E35 sector Atuntaqui.....	10
<b>Figura 5.</b> Atenuador de impacto.....	12
<b>Figura 6.</b> Amortiguador de impacto con capacidad de redireccionamiento.....	13
<b>Figura 7.</b> Amortiguador de impacto sin capacidad de redireccionamiento.....	15
<b>Figura 8.</b> Amortiguador de impacto móvil sobre camión.....	15
<b>Figura 9.</b> Amortiguador de impacto redireccionable - No traspasable .....	16
<b>Figura 10.</b> Amortiguador de impacto redireccionable – Traspasable en bifurcación.....	17
<b>Figura 11.</b> Vehículo tipo M1 - Sedán.....	23
<b>Figura 12.</b> Vehículo tipo M1 - Coupé.....	23
<b>Figura 13.</b> Vehículo tipo M1 - Convertible.....	24
<b>Figura 14.</b> Vehículo tipo M1 - Hatchback.....	24
<b>Figura 15.</b> Vehículo tipo M1 - Station Wagon.....	25
<b>Figura 16.</b> Vehículo tipo M1 - Miniván.....	25
<b>Figura 17.</b> Vehículo tipo M1 - Utilitario.....	26
<b>Figura 18.</b> Vehículo tipo M1 - Limusina.....	26
<b>Figura 19.</b> Seguridad activa en vehículos.....	27
<b>Figura 20.</b> Seguridad pasiva en vehículos.....	29
<b>Figura 21.</b> Estadísticas de choques más habituales.....	30
<b>Figura 22.</b> Ensayo de impacto frontal de tipo offset .....	31

<b>Figura 23.</b> En caso de impacto frontal.....	32
<b>Figura 24.</b> Evaluación del grado de afectación de los ocupantes del vehículo. ....	33
<b>Figura 25.</b> Ejemplos de aplicación de LS - DYNA.....	34
<b>Figura 26.</b> Caracterización de malla, nodos y elementos. ....	35
<b>Figura 27.</b> Modelado de prueba de choque del sistema de retención de vehículos.....	36
<b>Figura 28.</b> Representación de una pieza solida mallada.....	37
<b>Figura 29.</b> Tipos de elementos de malla.....	38
<b>Figura 30.</b> Tipo de elemento 1D.....	38
<b>Figura 31.</b> Tipo de elemento 2D.....	39
<b>Figura 32.</b> Tipo de elemento 3D.....	39
<b>Figura 33.</b> Ángulo de oblicuidad.....	41
<b>Figura 34.</b> Ángulo de Alabeo. ....	41
<b>Figura 35.</b> Método de las diferencias centrales .....	43
<b>Figura 36.</b> Algoritmo de resolución de dinámica explícita .....	44
<b>Figura 37.</b> Curva esfuerzo alargamiento del acero A36 y aluminio A1200.....	46
<b>Figura 38.</b> Filtrado de materiales con restricciones, en software CES EduPack, 2013..	48
<b>Figura 39.</b> Filtrado de materiales por índice de material.....	51
<b>Figura 40.</b> Atenuador con capacidad de redireccionamiento .....	53
<b>Figura 41.</b> Atenuador de impacto móvil.....	54
<b>Figura 42.</b> Atenuador sin capacidad de redireccionamiento .....	54
<b>Figura 41.</b> Bosquejo del concepto A .....	60
<b>Figura 42.</b> Bosquejo del concepto B.....	60
<b>Figura 43.</b> Bosquejo del concepto C.....	61

<b>Figura 44.</b> Modelado de chasis y carrocería.....	63
<b>Figura 45.</b> Modelado del sistema de suspensión. ....	63
<b>Figura 46.</b> Comparación de la prueba FEM vs. ensayo NCAP .....	65
<b>Figura 47.</b> Diagrama esfuerzo deformación para modelo FEM y real. ....	66
<b>Figura 48.</b> Impacto en pared de concreto .....	67
<b>Figura 49.</b> Energías – impacto pared rígida.....	68
<b>Figura 50.</b> Etapas de impacto frontal con concepto A.....	69
<b>Figura 51.</b> Energías – concepto A .....	70
<b>Figura 52.</b> Velocidad durante el impacto – concepto A .....	70
<b>Figura 53.</b> Etapas de impacto frontal con concepto B.....	71
<b>Figura 54.</b> Energías – concepto B.....	72
<b>Figura 55.</b> Velocidad durante el impacto – concepto B .....	72
<b>Figura 56.</b> Etapas de impacto frontal con concepto C.....	73
<b>Figura 57.</b> Energías – concepto C.....	74
<b>Figura 58.</b> Velocidad durante el impacto – concepto C .....	74
<b>Figura 59.</b> Medición de deformación de impacto – concepto C.....	75
<b>Figura 60.</b> Deformación de impacto sin atenuador vs concepto C.....	76

## **RESUMEN**

El presente trabajo de investigación busca diseñar y simular un atenuador de impactos vial para vehículos livianos tipo M1. La principal función de un atenuador de impactos es absorber la energía que se origina ante una colisión, en este sentido se necesita tener bases sólidas en cuanto a materiales y normativas de atenuadores para reducir notablemente la gravedad del siniestro del vehículo, pero principalmente de los ocupantes y de personas situadas en las proximidades. De ahí que se elegirán materiales adecuados para absorción de energía, se diseñará la forma del atenuador y se establecerá la simulación para observar el comportamiento de los atenuadores, por último, se elegirá la mejor alternativa para la validación del proyecto. Para poder elegir el diseño más adecuado de atenuador de impacto se hace una comparación entre el comportamiento del vehículo al chocar contra una pared rígida y contra los diferentes diseños de atenuadores. Se elige el mejor diseño en base a la capacidad de disipar energía.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **ATENUADOR DE IMPACTO**
- **ENERGÍA CINÉTICA**
- **COLISIÓN**
- **SIMULACIÓN MEF**

## **ABSTRACT**

This research work seeks to design and simulate a road impact attenuator for light vehicles type M1. The main function of an impact attenuator is to absorb the energy that originates after a collision, in this sense it is necessary to have solid bases in terms of materials and regulations of attenuators to significantly reduce the severity of the accident of the vehicle, but mainly of the occupants and of people located in the vicinity. Hence, suitable materials for energy absorption will be chosen, the form of the attenuator will be designed, and the simulation will be established to observe the behavior of the attenuators, finally, the best alternative for the validation of the project will be chosen. To be able to choose the most suitable design of impact attenuator a comparison is made between the behavior of the vehicle when it hits a rigid wall and against the different designs of attenuators. The best design is chosen based on the ability to dissipate energy.

### **KEYWORDS:**

- **IMPACT ATTENUATOR**
- **KINETIC ENERGY**
- **COLLISION**
- **SIMULATION FEM**

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento del problema

La necesidad de ofrecer mayor seguridad vial ante colisiones de vehículos tipo M1 mediante atenuadores de impacto en sitios, tales como: bifurcaciones, pasos a desnivel, puentes, estaciones de peaje, de forma que permitan salvaguardar la vida de los ocupantes del automotor.

### 1.2 Desarrollo del problema

La principal finalidad de un atenuador de impactos es absorber la energía que se origina ante una colisión, mediante una combinación entre deformación plástica y colapso, disminuyendo los esfuerzos y daños ocasionados a la estructura del vehículo y por ende las consecuentes aceleraciones a las personas que se encuentran en él.

Para el desarrollo de la presente investigación se necesita tener conocimiento de los materiales a utilizarse para un atenuador de impactos, así como también el diseño óptimo que permita proporcionar mayor seguridad a las personas que se encuentran dentro del vehículo.

En el presente trabajo de investigación se desea diseñar un atenuador de impacto cuyo material y geometría pueda absorber la energía de impacto de un vehículo mediante simulación se evaluará la capacidad del atenuador para absorber dicha energía. En consecuencia, se elegirán materiales adecuados para absorción de energía, se diseñará la forma del atenuador y se establecerá la simulación para observar el comportamiento de los atenuadores, por último, se elegirá la mejor alternativa para su validación.



### **1.3 Formulación del problema a resolver.**

¿Se puede mitigar los efectos de impactos vehiculares en sitios tales como bifurcaciones, pasos a desnivel, puentes, estaciones de peaje, mediante la instalación de atenuadores de impacto vial?

### **1.4 Hipótesis.**

Se puede diseñar y validar un atenuador de impacto para vehículos livianos tipo M1 mediante simulación y herramientas CAD/CAE.

### **1.5 Objetivos.**

#### **1.5.1 Objetivo general**

Diseñar y simular un atenuador de impactos vial para vehículos livianos tipo M1.

#### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Seleccionar el material adecuado para el atenuador de impacto en base a índices de desempeño del material, por medio de diagramas de selección usando software de selección de materiales.
- Diseñar alternativas de atenuadores de impacto en base a los existentes en la bibliografía específica.
- Realizar el CAD del vehículo liviano tipo M1.
- Simular el impacto entre el vehículo liviano tipo M1 y los atenuadores mediante software de ingeniería asistida por computador CAE.
- Validar los resultados de la simulación en base a la caracterización del material elegido y una prueba de laboratorio.

- Realizar un análisis de costos de diseño, producción e instalación para el atenuador de impactos vial.

### **1.6 Antecedentes.**

En el repositorio digital de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, se encuentra la tesis de los autores Stalin Omar Caisaguano Durán & Christian Ismael Montaleza Guamán, de enero del 2018, titulada análisis diseño de un atenuador de impactos para la seguridad pasiva en vías mediante el método de los elementos finitos. Cuyos objetivos principales son determinar diseñar un terminal de atenuador mediante software de ingeniería y analizar los resultados mediante gráficas obtenidas por la simulación del diseño, y como conclusión se ha obtenido que con una configuración de las estructuras deformables con un espesor de 0,8 mm es el más adecuado para reducir el efecto de estrellamiento, además que de tres modelos probados el que mejor capacidad de absorción de energía presenta, logrando reducir la energía cinética del cuerpo rígido en un 92,72% transformándola en energía de deformación (Caisaguano & Montaleza, 2018).

En ResearchGate se encuentra una publicación del autor Adol Esquivel, titulada Barriles de absorción y contención del impacto, investigación que tiene por objeto determinar el efecto en la reducción de la mortalidad por accidentes de tránsito de la instalación de un dispositivo de absorción y contención de impacto (BAFI), en cruces de eje estrecho en la ciudad de Monterrey, México. Investigación que uso información sobre accidentes del 1 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2005 en cruces con o sin BAFI. En conclusión, mencionan que los dispositivos BAFI representan una medida rápida y de bajo costo para

reducir la mortalidad y gravedad de lesiones por accidentes en cruceros de eje estrecho (Esquivel, 2008).

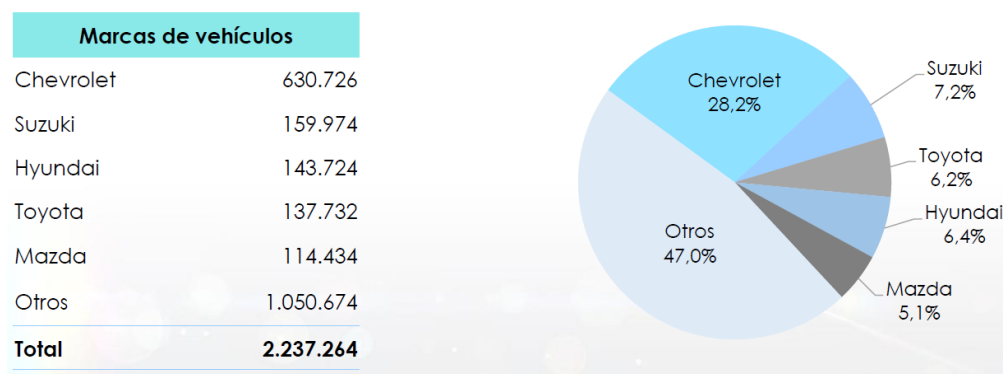
En la Universidad de Sevilla – España, se desarrolló una investigación de tema Estudio numérico y experimental de un atenuador de impacto para fórmula SAE del autor Carlos Pagola Correa, por el año del 2015. El presente trabajo tuvo como objeto el diseño y proceso de validación de un atenuador de impacto, específicamente concebido para un monoplaza presentado a las competiciones Fórmula. Teniendo como meta conseguir disipar una cantidad mínima de energía de 7350 J y limitar las aceleraciones sufridas en caso de impacto a 40 g de aceleración pico y 20 g de aceleración media. Además, se estudiaron métodos numéricos para su desarrollo y métodos de fabricación distintos hasta elegir los considerados óptimos para la pieza concreta. En conclusión, comparan el estudio numérico y experimental del ensayo de impacto mostrado por el programa LS-DYNA produce buenos resultados de manera cualitativa pero no cuantitativa (Pagola, 2015).

### **1.7 Justificación.**

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), en el 2017 se registraron una cantidad de 28967 accidentes de tránsito, existe un crecimiento del 3,2% en víctimas en comparación al año 2016. En el punto en el que se debe enfocar es el de choque que se encuentra dentro del 75,3% de los casos que corresponden a los choques, atropellos y estrellamientos.

Además, cabe mencionar que cada año el número de vehículos matriculados va en aumento, se registraron 630.726 vehículos matriculados de la marca Chevrolet representando

la mayor población del parque automotor a nivel nacional con un porcentaje del 28.2 como se muestra en la figura 1.

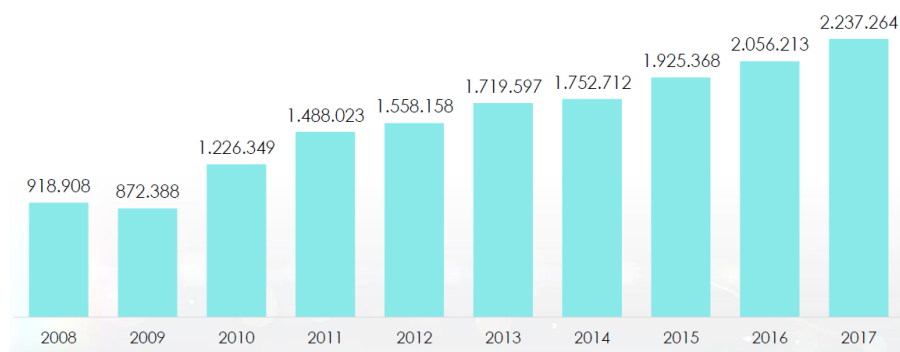


**Figura 1.** Distribución de vehículos matriculados por marcas año 2017 (Porcentajes).

Fuente: (INEC, 2018)

La necesidad de diseñar un atenuador de impactos nace de las cifras mostradas anteriormente, que son preocupantes a nivel nacional. A pesar de las normas y leyes que regulan el tránsito y transporte la tendencia a bajar los choques es muy poca.

Por otro lado, en la figura 2 se aprecia que existe un incremento de matriculación de vehículos entre los años del 2008 al 2017, notándose un crecimiento del 8.8% del 2016 al 2017.



**Figura 2.** Número de vehículos matriculados periodos: 2008-2017

Fuente: (INEC, 2018)

La idea de un atenuador de impactos resulta de gran importancia, no solo puede reducir el riesgo de mortalidad, sino que además proporciona mayor confianza al estar en una carretera frente al volante, no solo cuida la vida del chófer sino de todas las personas que lo ocupan.

El anexo 1. Muestra de forma cuantitativa el número de siniestros por causas probables a nivel nacional del año 2018, de ahí la necesidad de diseñar un atenuador de impacto; medida urgente que se debe implantar debido que se analizó los códigos anteriores en la Tabla 1. C03, C09, C10, C14, C19, C22 resultando un 42,80 % del total de siniestros, es decir 12.398 accidentes.

**Tabla 1**  
*Siniestros por causas probables a nivel Nacional en el año 2018*

Código	Causa probable	Porcentaje
C14	Conducir desatento a las condiciones de tránsito (celular, pantallas de video, comida, maquillaje o cualquier otro elemento distractor).	24,13
C09	Conducir vehículo superando los límites máximos de velocidad.	15,93
C23	No respetar las señales reglamentarias de tránsito. (Pare, ceda el paso, luz roja del semáforo, etc.).	10,85
C11	No mantener la distancia prudencial con respecto al vehículo que le antecede.	8,41
C19	Realizar cambio brusco o indebido de carril.	5,62
C06	Conduce bajo la influencia de alcohol, sustancias estupefacientes o psicotrópicas y/o medicamentos.	7,27
C12	No guardar la distancia lateral mínima de seguridad entre vehículos.	9,15
C26	No ceder el derecho de vía o preferencia de paso al peatón.	2,23
C25	No ceder el derecho de vía o preferencia de paso a vehículos.	2,75
	Otros.	13,66

Continúa 

<b>Código</b>	<b>Causa probable</b>	<b>Porcentaje</b>
	Total	100,00

Fuente: (ANT, 2019)

Finalmente, la propuesta es innovar atenuadores de impacto en lugares como: bifurcaciones, pasos a desnivel, puentes, estaciones de peaje, en términos de seguridad, al contar con un software y equipo computacional adecuado se pueden obtener resultados muy seguros y apegados a la realidad, que es otro de los puntos que se va a comprobar en el presente trabajo.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### **2.1 Elementos de seguridad en carretera.**

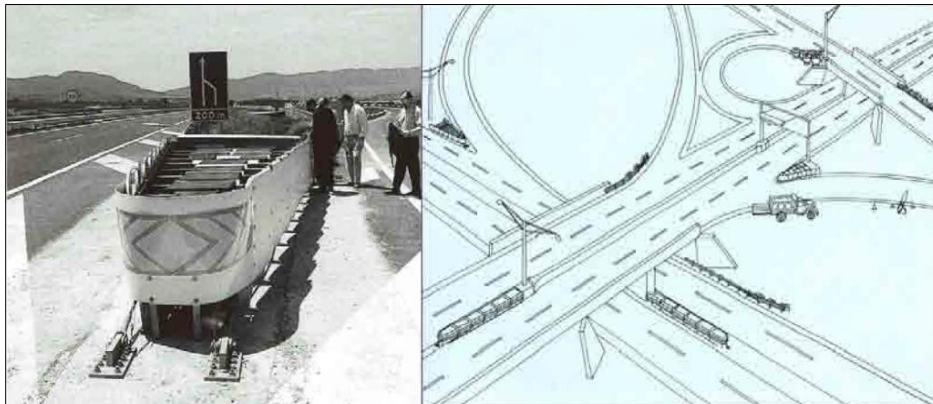
El mejoramiento de las vías de comunicación se debe al desarrollo urbano que cada ciudad supone establecer; lo que notoriamente implica la posibilidad de acoger mayor cantidad de automotores, la agilidad del desplazamiento, las uniones en sitios específicos que permitan acortar distancias y la seguridad de los usuarios de los vehículos.

Se han asociado varias ideas posibles para mejorar la velocidad de movilidad y la seguridad de los conductores. Según Arreola, Santos, Esquivel, Mock y Herrera (2008), los profesionales responsables han incluido elementos de protección como: cinturones de seguridad, bolsas auto inflables, reforzamiento de la cabina de los pasajeros, motores y eje de la dirección colapsables, paneles de vidrios anti astillables, accesorios que no protruyen hacia la cabina, reforzamiento de la carrocería con paneles de absorción de fuerza de impacto, defensas y parachoques reforzados y mejores frenos.

Además, muchas instituciones legislativas y autoridades competentes han originado leyes que regulan el uso del cinturón de seguridad, consumo de alcohol, distractores del conductor como el uso de teléfonos celulares mientras se conduce, uso de pantallas dentro de los vehículos y capacitación vial a los conductores. Finalmente, las autoridades locales y nacionales han avanzado planes de desarrollo urbano que incluyen mejores señalamientos, límites de velocidad, uso de radares o cámaras automáticas, campanas de detección de conductores alcoholizados, promoción de uso del cinturón, y estructuras de contención y absorción de fuerza de impacto como rieles o barras, ranuración del asfalto y otros más.

En varias ciudades del Ecuador, la construcción de vías rápidas y el mejoramiento de otras han mostrado una tendencia creciente, desde los pasos a desnivel hasta las vías elevadas con puentes. Casi todas estas vías incluyen rampas, divisores viales, carriles de entrada o salida, así como carriles convergentes, y obligan al conductor tomar una decisión rápida. En tal virtud, existe un riesgo inherente de impacto si el conductor no decide a tiempo si realiza cambios de carril con brusquedad o sin señalización, o bien, si frena de modo intempestivo.

Por esa razón se han diseñado varios dispositivos que sirven al mismo tiempo de señalización y tienen la capacidad de absorber el impacto como se muestra en la figura 3, Algunos de estos dispositivos son complejos y elaborados y por lo tanto costosos.



**Figura 3.** Atenuadores de impacto de acero usados en intercambiadores de vías en el estado de Texas, Estados Unidos

Es decir, que un vehículo podría estar sujeto a una serie de accidentes que se pueden ocurrir debido a fallas mecánicas, condiciones de la calzada y/o impericia del conductor, además de los factores tocados anteriormente. A través de los años se ha venido dando una mejora en lo que respecta a seguridad en los vehículos, con la implementación de cinturones de seguridad, airbags, entre otros; además de que se han establecido leyes, normas y



reglamentos que deben cumplir tanto los conductores, fabricantes de carrocerías, así como el espacio por donde se movilizan, con el fin de evitar pérdidas humanas.

## 2.2 Situación de vías en el Ecuador

Según el reporte de estado vial estatal de la subsecretaría de infraestructura del transporte en enero del 2018. En particular como caso de estudio la provincia de Imbabura cuenta con 331,97 Km de longitud de carretera de los cuales las vías E10 Vía Carolina/Salinas - Lita, E35 Vía Carolina/Salinas – Pdte Juncal se encuentran en buen estado; mientras que el tramo de carretera E29 Otavalo – Selva Alegre – Saguangal – Las Golondrinas, presentan un estado de precaución.

Actualmente la carretera consta de tres carriles en dirección norte y tres carriles en dirección sur, dando cumplimiento a las “Estrategias de Seguridad Vial” como indica la figura 4, sin embargo, un análisis profundo de las causas y factores de riesgo relacionados con el incremento de la accidentalidad en la provincia podría disminuir en daños materiales como también reducir muertes o lesiones graves en los ocupantes del automotor si se implementase atenuadores de impacto viales.



*Figura 4.* Tramo vial E35 sector Atuntaqui

### **2.3 Impacto**

Un choque entre dos cuerpos que ocurre en un intervalo muy corto de tiempo y durante el cual los dos cuerpos ejercen fuerzas relativamente grandes entre sí recibe el nombre de impacto (Johnson, 2010).

Un impacto está determinado únicamente por las fuerzas que actúan internamente (interacción entre los distintos cuerpos que colisionan) despreciando las fuerzas externas (como rozamiento, peso, etc.) de forma que la cantidad de movimiento se mantiene constante entre un instante anterior y otro posterior de la colisión de un sistema formado por dos cuerpos. Por lo tanto, la energía cinética y el momento lineal son las variables dinámicas que permiten describir el proceso de interacción Interna de un sistema de dos cuerpos (Jerry, Buffa & Bo, 2007).

### **2.4 Atenuador de impacto**

Consisten en elementos de desaceleración y redireccionamiento controlado frente a un impacto vehicular, como por ejemplo muros en vértices de bifurcaciones. Un atenuador de impacto debe ser capaz de deformarse ante un choque frontal, activando un sistema que en su conjunto es capaz de absorber la energía liberada por el accidente hasta lograr detenerlo. En síntesis, un atenuador de impacto es un sistema de contención vial cuya finalidad es detener progresivamente a vehículos fuera de control de peso no mayor a los 2000 kilogramos (vehículos M1) como muestra la figura 5, consiguiendo disminuir notablemente la gravedad del siniestro del vehículo como también de los ocupantes y de terceros situados en las proximidades.



**Figura 5.** Atenuador de impacto.

Los atenuadores de impacto se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Con capacidad de redireccionamiento
- Sin capacidad de redireccionamiento
- Móviles o fijos

#### **2.4.1 Amortiguadores de impacto con capacidad de redireccionamiento**

Tiene doble funcionalidad, para el primer caso cuando recibe un impacto frontal disipa la energía mediante deformación, permanente o temporal de los elementos que constituyen el amortiguador los cuales normalmente son piezas comprimibles o cilindros deformables de caucho, plástico o acero. El segundo caso cuando el vehículo se impacta de forma lateral actuando en forma similar al funcionamiento de una barrera metálica, logrando que el vehículo retorne en forma controlada. Se podrán instalarse sobre pavimentos de asfalto u hormigón o superficies no pavimentadas como se puede observar en la figura 6, siempre que estén niveladas y compactadas. Además, cuando existan soleras, situación que no es recomendable estas no podrán tener una altura mayor a 10 cm (Hung, 2014).



**Figura 6.** Amortiguador de impacto con capacidad de redireccionamiento.

Entre las ventajas más sobresalientes de este tipo de dispositivos se puede mencionar las siguientes:

- Eficientes ante impactos de vehículos livianos a alta velocidad (hasta 110 km/h).
- Ante impactos laterales, funciona redireccionando controladamente los vehículos livianos.
- Después de un impacto, algunos amortiguadores pueden ser rápidamente puestos en servicio.

Por otro lado, respecto a las desventajas, se pueden mencionar:

- Alto costo de adquisición y en algunos casos, también de mantenimiento, repuestos muy específicos. Algunos dispositivos requieren mantener un stock de diferentes piezas.

#### **2.4.2 Amortiguadores de impacto sin capacidad de redireccionamiento**

Son tambores de plástico con arena en su interior según figura 7, los cuales se diseñan acorde al espacio disponible, el ancho del elemento de riesgo y la energía que se requiere disipar, parámetros determinados en función de la velocidad y la masa del vehículo.

Al ser impactado los tambores se rompen y con esto se comienza a desplazar la arena contenida en ellos, transmitiéndose la energía del móvil a la arena, causando la deceleración,

manteniendo su trayectoria original y posterior detención de éste. La disposición de los tambores se realiza en orden creciente de masa en dirección hacia el obstáculo. De esta manera, se logra un dispositivo que va aumentando su resistencia. Antecedentes proporcionados por los fabricantes de estos sistemas de contención, indican que pueden detener hasta un vehículo de 2.000 kg, impactando a una velocidad de 113 km/h, sin causar daños a sus ocupantes (Hung, 2014).

Las ventajas de los atenuadores sin capacidad de redireccionamiento:

- Solución de bajo costo.
- No requiere de personal especializado para su mantenimiento y reparación.
- Repuestos versátiles. Pueden mezclarse distintos tipos de tambores.
- En general, daños razonables en los vehículos que han impactado.
- Nivel de contención incierto ante impactos no frontales.
- Requiere mantenimiento periódico.
- Necesita una superficie libre de instalación mayor que los amortiguadores con capacidad de redireccionamiento.

Las desventajas de los atenuadores sin capacidad de redireccionamiento:

- Susceptibles a vandalismo.
- Se puede instalar en pendiente máxima de 5 %,
- No se permite su instalación cuando existan soleras de altura mayor a 10 cm
- No son reutilizables
- Después de un impacto, se pueden dispersar fácilmente elementos (arena y tapas de tambores) que afecten la operación de otros vehículos.



*Figura 7.* Amortiguador de impacto sin capacidad de redireccionamiento.

### **2.4.3 Amortiguadores de impacto móviles**

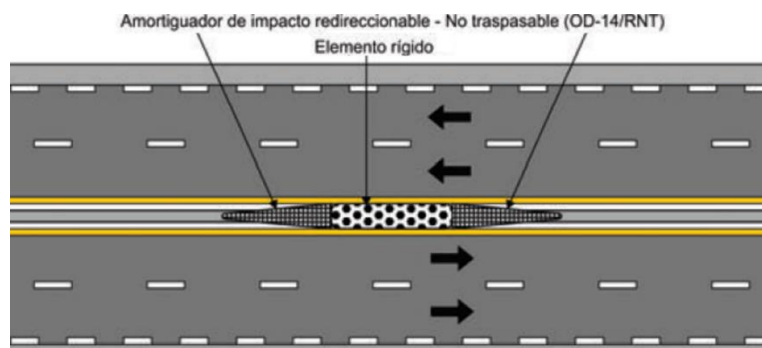
Son instalados en la parte posterior de vehículos o en plataformas como muestra la figura 8. Generalmente se acoplan a vehículos de servicio, que desarrollan trabajos en la vía o conservación de ella, que constituyen un serio obstáculo, sobre todo cuando deben transitar a bajas velocidades e incluso permanecer detenidos en la calzada y/o bermas. Se debe considerar su uso en rutas donde la velocidad de diseño u operación sea igual o superior a 100 km/h (Hung, 2014).



*Figura 8.* Amortiguador de impacto móvil sobre camión.

## 2.5 Utilización de atenuadores de impacto

Los atenuadores de impacto se deben utilizar en los siguientes casos: en las orillas de las coronas, fajas separadoras y banquetas, en los que exista algún elemento rígido como una columna, un muro, poste o árbol, entre otros, y entre ese elemento y el arroyo vial o los acotamientos, los espacios sean tan estrechos que no permitan la colocación de barreras de protección, se debe instalar un amortiguador de impacto redireccionable - no traspasable inmediatamente antes del elemento rígido en el sentido del tránsito (Chile, 2014), como se puede observar en la figura 9.



**Figura 9.** Amortiguador de impacto redireccionable - No traspasable en faja separadora.

### 2.5.1 En entradas y salidas

En las entradas y salidas de carreteras con accesos controlados y de vías primarias de circulación continua en las zonas urbanas, con o sin carriles de aceleración o desaceleración, que tengan calles laterales de servicio y en cuyas fajas separadoras que dividen la vía principal de la vialidad de entrada o salida, existan elementos rígidos como árboles, postes, columnas, muros o cualquier otro obstáculo, se debe instalar un amortiguador de impacto redireccionable - traspasable, inmediatamente antes del elemento rígido en el sentido del tránsito (Chile, 2014).

### 2.5.2 En bifurcaciones

En las bifurcaciones de carreteras y vialidades urbanas véase figura 10, con o sin carriles de desaceleración, en cuyas fajas separadoras e isletas que dividen ambas vialidades, existan elementos rígidos como árboles, postes, columnas, muros o cualquier otro obstáculo, se debe instalar un amortiguador de impacto redireccionable – traspasable, inmediatamente antes del elemento rígido en el sentido del tránsito (Chile, 2014).



*Figura 10.* Amortiguador de impacto redireccionable – Traspasable en bifurcación.

### 2.5.3 En plazas de cobro

En las plazas de cobro de carreteras y vías primarias de circulación continua en las zonas urbanas, se deben instalar amortiguadores de impacto redireccionable – no traspasable, inmediatamente antes de las casetas de peaje o de los elementos rígidos que las protegen, en el sentido del tránsito.

### 2.5.4 En zonas de obras viales

En las carreteras y vialidades urbanas, donde se realicen trabajos de construcción o conservación de poca duración, se deben utilizar amortiguadores de impacto móviles ubicados sobre el acotamiento o el carril afectado, a una distancia de seguridad de 20 a 60 m antes del sitio donde empiece la zona de trabajo, en el sentido del tránsito.



## 2.6 Selección de amortiguadores de impacto

Una vez determinados el sitio donde se instalará o utilizará un amortiguador de impacto y su modo de operación, el dispositivo se debe seleccionar considerando lo siguiente:

### 2.6.1 Selección según el nivel de contención

Con base en la composición del flujo vehicular en términos del tránsito diario promedio anual y la velocidad de operación en el subtramo donde se colocará el amortiguador de impacto, que se espera en los siguientes cinco años. Se determina el nivel de contención mínimo que debe tener ese dispositivo (Chile, 2014).

**Tabla 2**

*Niveles de contención mínimos según las características del tránsito y la velocidad de operación*

Velocidad de operación km/h <sup>[1]</sup>	Nivel de contención (NC) <sup>[2]</sup> mínimo de los amortiguadores de impacto			
	Vialidades de dos carriles, uno por sentido de circulación		Vialidades de dos o más carriles por sentido de circulación	
	Tránsito diario promedio anual (TDPA)		Tránsito diario promedio anual (TDPA)	
	< 10,000	≥ 10,000	< 10,000	≥ 10,000
Hasta 50	NC-1	NC-1	NC-1	NC-2
51 - 70	NC-2	NC-2 <sup>[3]</sup>	NC-2 <sup>[3]</sup>	NC-2 <sup>[3]</sup>
71 - 100 <sup>[5]</sup>	NC-2 <sup>[3]</sup>	NC-2 <sup>[3-4]</sup>	NC-2 <sup>[3-4]</sup>	NC-2 <sup>[3-4]</sup>
101 - 120 <sup>[5]</sup>	NC-2 <sup>[3-4]</sup>	NC-3	NC-3	NC-3

[1] Para vialidades de nueva construcción corresponde a la velocidad de proyecto.

[2] NC: Niveles de contención asociados directamente con los que se presentan en la Tabla NC.

[3] De contar con autobuses de pasajeros en un 25 % o más del tránsito promedio diario anual TDPA, se requieren Amortiguadores de impacto con nivel de contención NC-3 como mínimo.

[4] De contar con camiones de carga con masa vehicular mayor de 8,000 kg, en un 25 % o

más del TDPA, se requieren amortiguadores de impacto con nivel de contención NC-3 como mínimo.

[5] Cuando se trate de amortiguadores de impacto móviles en zonas de obras viales, la velocidad de operación corresponde a la que normalmente se tenga en el tramo cuando en él no se realicen trabajos de construcción o conservación. Si se ejecutan trabajos de conservación en movimiento, como el barrido de la superficie de rodadura, el pintado o la colocación de las marcas del señalamiento horizontal, o el sellado de grietas y fisuras del pavimento, entre otros, y los amortiguadores de impacto móviles se desplacen a una velocidad continua de 15 km/h o mayor, tendrá un nivel de contención NC-2 en cualquier caso.

### **2.6.2 Según las características del sitio**

Las características geométricas de un amortiguador de impacto redireccionable no traspasable, redireccionable traspasable o no redireccionable, definidas por su longitud y su ancho máximo, dependen de la disponibilidad de espacio en el sitio donde se deben instalar y de las dimensiones del elemento rígido ante el que se deben colocar, por lo que en cada caso se debe realizar el análisis de esas condiciones, considerando que es necesario que el ancho máximo del dispositivo en su extremo final sea igual que el del elemento rígido o mayor, por lo menos que sobresalga 75 cm a cada lado cuando se trate de un amortiguador de impacto no redireccionable, lo que se podrá reducir a hasta un mínimo de 37.5 cm para evitar invadir los acotamientos o los carriles de circulación.

### **2.6.3 Vida útil de los atenuadores de impacto**

Los amortiguadores de impacto redireccionable no traspasable, redireccionable traspasable o no redireccionable, pueden ser desechables, parcialmente reusable o reusable. La selección específica de cada uno de ellos dependerá de la probabilidad de impacto.

Se deben seleccionar amortiguadores:

- Desechables (D) cuando la probabilidad de impacto sea menor a una vez la tasa de impacto básica o hasta un impacto por año.
- Parcialmente reusables (PR) cuando la probabilidad de impacto alcance hasta tres veces la tasa básica de impacto o hasta tres impactos por año.
- Reusables (R) cuando la probabilidad de impacto exceda a tres veces la tasa básica de impacto o más de tres impactos por año.

Dicha probabilidad de impacto se debe estimar considerando las variables del tránsito y de ubicación del obstáculo según Tránsito Promedio Diario Anual (TDPA).

### **2.6.4 Costos de construcción**

Tales como los costos de adquisición, almacenamiento y transporte del dispositivo hasta el sitio de su colocación; preparación del terreno y de la cimentación, e instalación del dispositivo, así como también la dificultad, velocidad y costo de los trabajos de conservación, de reparación o reemplazo, pueden ser factores importantes para seleccionar al dispositivo idóneo, así como la facilidad y los costos de adquisición, almacenamiento y transporte hasta el sitio de su utilización, facilitaran un manejo más eficiente y económico.

## **2.7 Criterios de diseño**

Es importante entender los conceptos básicos en la cual se basa su funcionamiento.

Energía Cinética, cuando un vehículo impacta la zona frontal se provoca una desaceleración del móvil hasta que llega a detenerse. En otras palabras, la energía cinética que lleva el vehículo, previo al impacto, se disipa durante el choque, deformando el amortiguador de impacto. La energía cinética ( $K$ ) se define de la siguiente forma:

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

Donde:

$m$  : masa del vehículo (kg)

$v$ : velocidad del vehículo previo al impacto (m/s).

Los atenuadores de impacto fueron creados bajo el principio de conservación de la energía, no es creada ni destruida en el proceso. El trabajo realizado en la deformación del amortiguador de impacto y del vehículo,  $T$ , será igual a la energía cinética inicial del vehículo:

$$K = T$$

Conservación del Momento, otra clase de amortiguadores de impacto han sido diseñados utilizando un diferente principio básico de la física, el principio de la conservación del momento lineal. El momento lineal que se genera en un vehículo en movimiento, es igual al producto de la masa por la velocidad de este:

$$M = m * v$$

El resultado neto, es que la velocidad del vehículo es reducida de una forma controlada durante el impacto. Los amortiguadores de impacto que operan bajo el principio de la conservación del momento no requieren una estructura de reacción.

El funcionamiento del dispositivo es juzgado sobre la base de tres factores:

- La suficiencia estructural, es evaluada por su capacidad de contener o redireccionar en forma predecible y aceptable las condiciones de impacto especificadas.
- El riesgo de los ocupantes del vehículo está basado en la respuesta calculada de un móvil hipotético durante el impacto contra el elemento amortiguador.
- La trayectoria del vehículo después de la colisión resulta altamente relevante esto debido al gran riesgo involucrado para los diferentes usuarios de la vía.

## **2.8 Clasificación vehicular según la NTE INEN 2656.**

Esta norma establece la clasificación de vehículos automotores de circulación terrestre identificados mediante características generales de diseño y uso, excluyendo a tractores agrícolas, forestales, maquinaria industrial y equipo camionero.

Los vehículos se clasifican en las siguientes categorías:

- Categoría L. Vehículos automotores con menos de 4 ruedas.
- Categoría M. Vehículos automotores de 4 ruedas o más, diseñados y construidos para el transporte de pasajeros.
- Categoría N. Vehículos automotores de 4 ruedas o más, diseñados y construidos para el transporte de mercancías.
- Categoría O. Remolques.

Dentro de la categoría M, esta se subdivide en categorías M1, M2 y M3; el enfoque de esta investigación va dirigido a los Vehículos de tipo M1.

### **2.8.1 Vehículos de tipo M1.**

En esta subcategoría se encuentran los siguientes vehículos:

- Sedán. Posee un techo fijo hasta el parabrisas trasero, tiene 4 puertas y consta hasta 5 plazas. Un ejemplo puede observarse en la figura 11.



**Figura 11.** Vehículo tipo M1 - Sedán

Fuente: (HYUNDAI, 2018)

- Coupé. Tiene techo fijo, 2 puertas y el número de plazas es hasta 5 como se observa en la figura 12.



**Figura 12.** Vehículo tipo M1 - Coupé.

Fuente: (HDFONDOS, 2018)

- Convertible. Su principal característica es que el techo y luneta son retractiles o removibles, tienen hasta 4 puertas y el número de plazas es hasta 5. Puede observarse en la figura 13.



**Figura 13.** Vehículo tipo M1 - Convertible

Fuente: (SIXT, 2018).

- Hatchback. La principal característica es que el área de pasajeros y de carga conforman un solo volumen, tienen 5 puertas y hasta 5 plazas en 2 filas como se ilustra en la figura 14.



**Figura 14.** Vehículo tipo M1 - Hatchback.

Fuente: (HYUNDAI, 2018)

- Station Wagon. Desarrollado a partir de un Sedan, fabricado con una carrocería cerrada, techo fijo rígido extendido hasta atrás. Tiene un número de plazas de hasta 5 en 2 filas. Puede observarse en la figura 15.



**Figura 15.** Vehículo tipo M1-Station Wagon.

Fuente: (Talleres chinos, 2018)

- Miniván. Monovolumen orientado al transporte de pasajeros. Las puertas laterales posteriores pueden ser corredizas en un máximo de 9 plazas. Puede observarse en la figura 16.



**Figura 16.** Vehículo tipo M1 - Miniván.

Fuente: (TODOAutos, 2018)

- Utilitario. Vehículo orientado especialmente dentro y fuera de la carretera. Las puertas laterales deben ser abatibles en un máximo de 8 plazas. La tracción puede ser 4x2 o 4x4 como se observa en la figura 17.





**Figura 17.** Vehículo tipo M1 - Utilitario.

Fuente: (HYUNDAI, 2018)

- Limusina. Vehículo con distancia entre ejes extendida especialmente utilizado para el transporte de pasajeros como se observa en la figura 18 (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2012).



**Figura 18.** Vehículo tipo M1 - Limusina.

Fuente: (SIBARITISSIMO, 2018)

## **2.9 Sistemas de seguridad en automóviles.**

Casi al mismo tiempo que los primeros vehículos automóviles aparecen los accidentes asociados a los mismos, cuyas consecuencias van desde muertos hasta pérdidas materiales. Como reacción a estos efectos se han desarrollado líneas de investigación que tratan tanto de evitar los accidentes como mitigar sus consecuencias en caso de resultar inevitables.

Se debe distinguir dos conceptos diferentes sobre el tema de seguridad de los automóviles: seguridad activa y seguridad pasiva.

### 2.9.1 Seguridad activa.

Son todos aquellos elementos del coche que facilitan su conducción de forma segura, fácil y que previenen los accidentes. Son de carácter dinámico ya que intervienen en el guiado cómodo, seguro y efectivo del vehículo, así como en su detención en el momento y espacio que desee el conductor. La figura 19 muestra los elementos de seguridad activa en los vehículos, los cuales son:

- Sistema de frenos.
- Suspensión.
- Dirección.
- Neumáticos.
- Sistema de iluminación.
- Aerodinámica de la carrocería.
- Ergonomía de los mandos e interior.
- Visibilidad desde el puesto de conductor (Luque, Álvarez, & Vera, 2004).



**Figura 19.** Seguridad activa en vehículos.

Fuente: (Motor, 2018)

### 2.9.2 Seguridad pasiva.

Componen las distintas partes del automóvil que, en caso de accidente, intervienen evitando disminuyendo los daños que puedan recibir los ocupantes del vehículo, peatones, animales o mobiliario urbano y vial que pueda verse involucrado en una colisión. Estos elementos se pueden observar en la figura 20 los cuales son:

- Parachoques. Son los principales intervinientes cuando las colisiones son a baja velocidad, a fin de evitar daños en el impactador como en el impactado. Estos elementos presentan una geometría de baja agresividad para disminuir, en la manera de lo posible, los efectos de un atropello.
- Cinturones de seguridad. Entran en acción cuando las velocidades de impacto se incrementan, impidiendo que los pasajeros y el conductor se impacten contra el parabrisas o salgan despedidos por el mismo.
- Airbag. Se complementan con los cinturones de seguridad, son sistemas deformables que reducen las afectaciones de los pasajeros y el conductor del vehículo.
- Asientos y reposacabezas. Están diseñados para evitar que los ocupantes puedan escaparse por debajo del cinturón de seguridad, y a su vez resistan todas las sollicitaciones que aparecen en un accidente.
- Fusibles mecánicos. Son estructuras resistentes capaces de absorber la energía cinética y transformarla en energía de deformación, asegurando una zona sin intrusiones potencialmente peligrosas (Luque, Álvarez, & Vera, 2004).



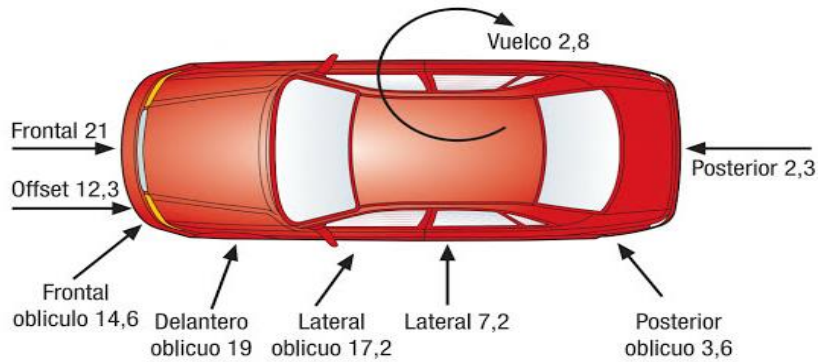
**Figura 20.** Seguridad pasiva en vehículos.

Fuente: (Peugeot,2007)

## **2.10 Pruebas de impacto en automóviles**

Con el objeto de mejorar la seguridad reduciendo las consecuencias de los accidentes, uno de los aspectos que tienen en cuenta los fabricantes de vehículos es la realización de pruebas de choque (crash test) simuladas en laboratorios, de manera que se consiguen determinar fenómenos técnicos y físicos implicados en una colisión y el comportamiento de la carrocería en caso de un impacto. Estos ensayos evalúan la eficacia global de los sistemas de seguridad pasiva del vehículo mediante la medición de los esfuerzos soportados por los maniqués antropomórficos.

El diseño de las diferentes pruebas de choque se realiza en base al estudio de las estadísticas de los tipos de choques más habituales, de esto se tiene que más de dos tercios de los accidentes producidos afectan a la parte delantera del vehículo frontalmente o de modo oblicuo. La figura 21 muestra los choques que suceden entre vehículos de distintos tamaños y a velocidades diferentes (Águeda, García, Gómez, Navarro y Gracia, 2016).



**Figura 21.** Estadísticas de choques más habituales.

Fuente:(Águeda *et al*, 2016)

Si bien existe una gran variedad de ensayos, las únicas pruebas homologadas por la reglamentación europea vigente consisten en analizar los aspectos biomecánicos y de estructura que se desprenden, en general, los objetivos que se plantean según el tipo de ensayo son los siguientes:

- Choques frontales, optimizar los refuerzos de la estructura portante y conseguir medios de retención adecuados.
- Choques laterales, evitar la intrusión en el habitáculo.
- Caso de vuelcos, limitar deformaciones del habitáculo por aplastamiento.
- Choques traseros, estudiar el comportamiento del reposacabezas, depósito de combustible y canalizaciones.

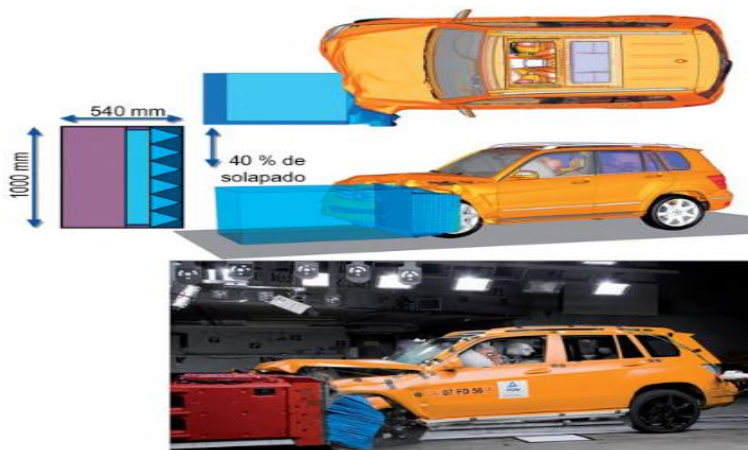
### **2.11 Homologación de vehículos para Europa**

Prescripciones uniformes sobre la homologación de los vehículos en lo relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión frontal.

### 2.11.1 Ámbito de aplicación.

El presente reglamento se aplica a los vehículos de la categoría M1, cuya masa total admisible no supera las 2,5 toneladas; podrán homologarse otros vehículos a petición del fabricante.

Las estadísticas de accidentes demuestran que casi dos terceras partes de las colisiones son frontales, y la mitad de ellas presentan una cobertura de entre 30 y 50% de la superficie frontal. Para comprobar los efectos de este tipo de colisiones se realiza un ensayo basado en el reglamento UNECE R94 que consiste en un choque frontal desalineado a una velocidad de 64 km/h contra una estructura deformable con una configuración de panel, afectando al 40% de la parte delantera del automóvil en el lado del conductor (Águeda *et al*, 2016), como se observa en la figura 22.



**Figura 22.** Ensayo de impacto frontal de tipo offset

Fuente: (Águeda *et al*, 2016)

En este tipo de choque, el desarrollo de la prueba se realiza con 2 maniqués colocados en los asientos delanteros con los correspondientes sistemas de retención, a esto se agregan una serie de sensores para medir las fuerzas y aceleraciones que se ven sometidas en las

diversas partes de su anatomía como: tórax, cabeza, cuello, tibia y fémur. Como resultado, la energía cinética es absorbida por la deformación del paragolpes delantero, frontal y en casos graves, también por la zona delantera del habitáculo como muestra la figura 23.



**Figura 23.** En caso de impacto frontal, el volante y pedales deben desplazarse para no dañar al conductor

Fuente: (Águeda *et al*, 2016)

Los aspectos de seguridad que deben superar el vehículo en este tipo de impacto son los siguientes:

- Durante el ensayo no deberá abrirse ninguna puerta ni accionarse fortuitamente los sistemas de bloqueo de las puertas delanteras.
- Después de la colisión debe abrirse como mínimo una puerta delantera y otra trasera de forma que se puedan extraer a los maniqués del vehículo liberándolos previamente de sus sistemas de retención.
- El desplazamiento del volante no será superior a 80 mm hacia arriba ni a 100 mm hacia atrás.
- Durante el impacto no se desprenderá ninguna pieza o componente interior que pueda aumentar el riesgo de lesión al impactar sobre el maniquí.

- Solo se admitirán pequeñas fugas de combustible del orden de 0,5 g/s.

La figura 24 muestra los parámetros que se miden para evaluar las consecuencias de una colisión frontal, los cuales son:

- Cabeza: según criterio HIC 36.
- Cuello: tensión, extensión y fuerza cortante.
- Tórax: compresión y criterio viscoso.
- Parte superior de la pierna: compresión de la tibia.
- Pie y tobillo intrusión de la plataforma bajo los pies y desplazamiento del pedal de freno.



**Figura 24.** Evaluación del grado de afectación de los ocupantes del vehículo.

Fuente: (Águeda *et al*, 2016)

## 2.12 Software CAE y sus generalidades.

El software de Ingeniería Asistida por Computador CAE, es una herramienta imprescindible en los procesos de diseño y optimización industrial de dispositivos y procesos. En la actualidad el software CAE se encuentra en constante desarrollo e investigación debido a la enorme cantidad de dinero que permite ahorrar a las compañías, reducir el uso de prototipos y experimentos mediante simulaciones del dispositivo en su entorno físico, y las posibles complicaciones de su uso.



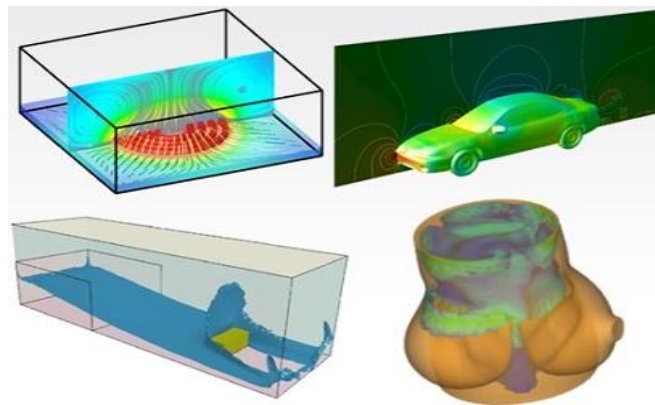
En ese contexto pasa a ser herramienta útil para integrarse en el ámbito educativo y en beneficio desarrollo productivo de la pequeña y mediana industria de nuestro país.

Entre los programas de tipo CAE, se encuentran los siguientes:

- ALTAIR HYPERWORKS.
- ANSYS.
- Autodesk Simulation.
- Inventor.
- SolidWorks.

### 2.12.1 Generalidades del software CAE.

Un software CAE de simulación multi - física permite resolver análisis dinámicos de modelos 3D mediante el método de elementos finitos, su alcance va desde análisis térmicos y fluidos, hasta modelos complejos no lineales y problemas reales como muestra la figura 25. Además de ello, puede realizar multiprocesamiento para un mejor desempeño de cálculo, por ende, es ampliamente utilizado en la industria automotriz, construcción, aeroespacial, militar, bioingeniería y manufactura.



**Figura 25.** Ejemplos de aplicación de LS-DYNA.

Fuente: (Livermore Software Technology Corporation, 2018)

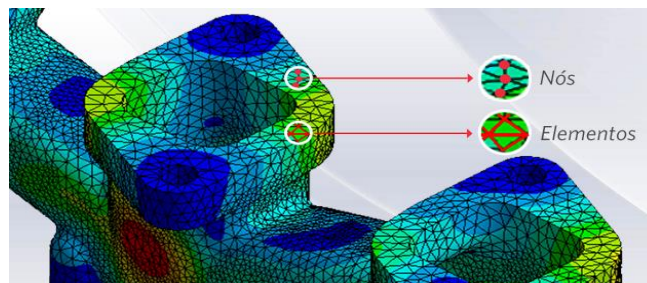
### 2.12.2 Aplicaciones del software CAE.

De las ventajas que presta el software se puede destacar las siguientes:

- Automóviles a prueba de choques y seguridad de los ocupantes. Predice el comportamiento de un coche en una colisión y sus efectos en los ocupantes de este.
- Estampado de chapa formado. Predice los esfuerzos y deformaciones que experimenta el metal, determinando si este fallará o no.
- Aplicaciones de la industria aeroespacial. Simula el impacto de aves, fallas estructurales y láminas de contención de turbinas.

### 2.13 Método del Elemento Finito

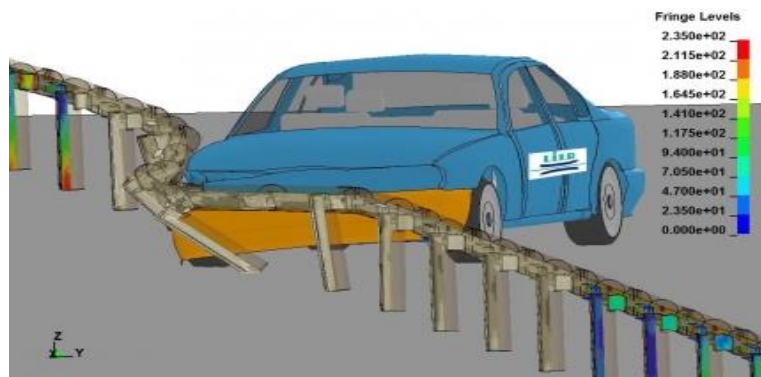
Es un método numérico que brinda solución aproximada a un sistema de ecuaciones diferenciales parciales asociadas a un problema físico en particular de gran complejidad, que resultaría incalculable resolver con cualquier método matemático manual, es decir, convierte un problema definido en términos de ecuaciones diferenciales en un problema en forma matricial que proporciona el resultado correcto para un número finito de puntos e interpola posteriormente la solución al resto del dominio, resultando finalmente en una solución aproximada.



**Figura 26.** Caracterización de malla, nodos y elementos.

Fuente: (Mirlisenna, 2018)

El conjunto de puntos donde la solución es exacta se denomina conjunto nodos como se analiza en la figura 26. Dicho conjunto forma una red, denominada malla formada por retículos. Cada uno de los retículos contenidos en dicha malla es un "elemento finito". El conjunto de nodos se obtiene dividiendo o discretizando la estructura en elementos de forma variada (pueden ser superficies, volúmenes y barras). La figura 27 representa el modelado de un choque usando el método de elemento finito.



**Figura 27.** Modelado de prueba de choque del sistema de retención de vehículos

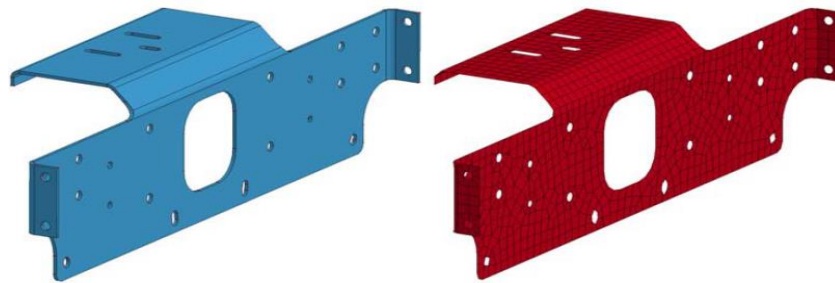
Fuente: (TRANSPOLIS, 2018)

### 2.13.1 Proceso para desarrollar un Análisis de Elementos Finitos

Con la finalidad de obtener resultados eficientes es necesario seguir un proceso que inicia en el desarrollo del modelo de dibujo asistido por computador (CAD), y su posterior exportación hacia el programa para la simulación. Este proceso se lo conoce como preprocesamiento, y en el mismo se consideran el tipo de material a emplearse, condiciones de frontera tales como soportes fijos, cargas aplicadas, velocidades, presiones y el tipo de elemento a emplearse según lo requerido por el usuario. Posterior a este proceso se procede al mallado de la geometría.

### 2.13.2 Mallado del componente.

El mallado genera un modelo matemático del problema con base en la información ingresada en el parámetro de preprocesamiento, de esta manera se genera una malla basada en la forma geométrica. La disposición de los nodos y elementos puede ser generada mediante la herramienta automática de mallado, creando una distribución homogénea y concentrada en zonas de interés según muestra figura 28.

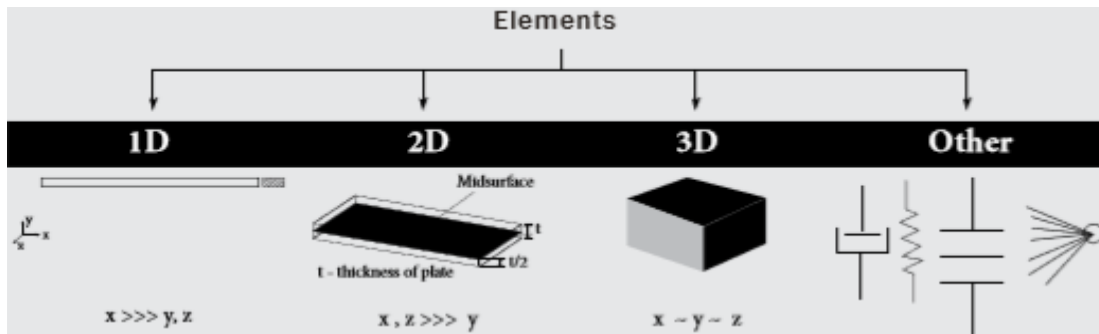


**Figura 28.** Representación de una pieza solida mallada

Fuente: (Alberson, 2016)

#### ***Tipos de elementos de mallado.***

Los tipos de elementos se clasifican según la dimensión que emplean, estos pueden ser de tipo line o barra (1D), shell o cáscara (2D), sólido (3D) y otros como masas o resortes; y su selección va conforme al tipo de geometría del componente, análisis a ejecutar y tiempo de ejecución de la simulación. La figura 29 detalla la geometría de los elementos y sus aplicaciones prácticas.



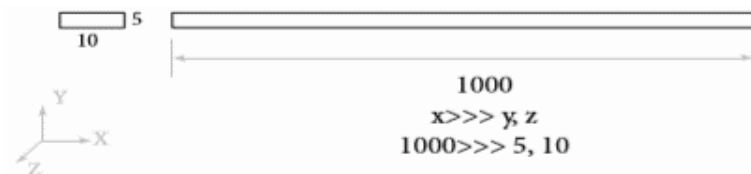
**Figura 29.** Tipos de elementos de malla.

Fuente: (Lee, 2018)

### **Tamaño y forma del elemento.**

Para un análisis de elemento finito, el programa necesita que las 3 dimensiones estén definidas, debido a que no puede realizar los cálculos respectivos. Como se explicó anteriormente, la geometría puede ser categorizada como 1D, 2D o 3D basada en las dimensiones dominantes, como se detallan a continuación:

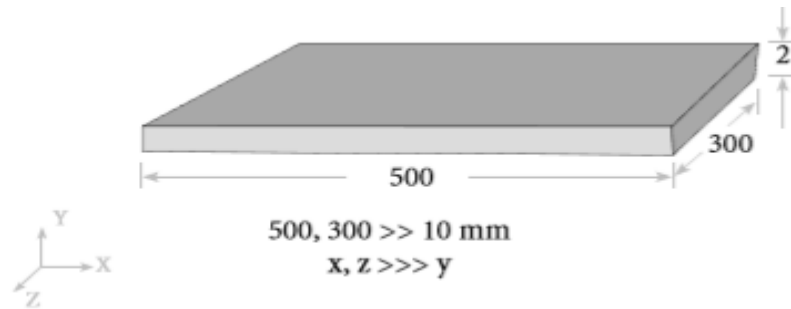
- Elemento 1D. Empleado en geometrías en la cual una de sus dimensiones es muy grande en relación con las otras 2, como se observa en la figura 30.



**Figura 30.** Tipo de elemento 1D.

Fuente: (Lee, 2018)

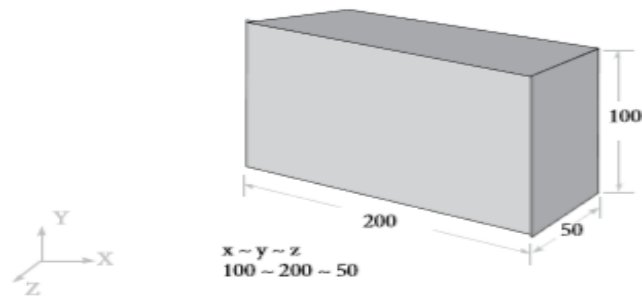
- Elemento 2D. Empleado cuando 2 de las dimensiones son muy grandes en comparación a la tercera. Un ejemplo de este elemento se puede mirar en la figura 31.



**Figura 31.** Tipo de elemento 2D.

Fuente: (Lee, 2018)

- Elemento 3D. Empleado cuando las 3 dimensiones son comparables como se observa en la figura 32.



**Figura 32.** Tipo de elemento 3D.


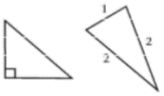
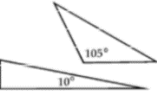
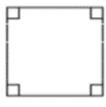
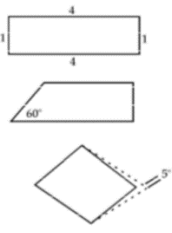
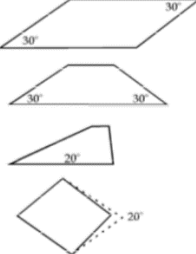
Fuente: (Lee, 2018)

### ***Control de calidad de malla.***

La calidad del elemento está relacionada directamente con la solución del análisis, la Tabla 3 clasifica la calidad de los elementos según el ángulo que poseen, nótese que los elementos de mejor calidad son los cuadrados y triángulos equiláteros.

**Tabla 3**

*Calidad de los elementos de malla acorde a sus ángulos.*

BEST	OK	VERY POOR
		
		

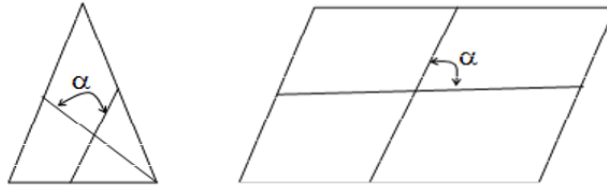
Fuente: (Lee, 2018)

Por ende, es importante realizar un respectivo control de calidad de los elementos de mallado empleando cualquier método de los que se mencionan a continuación:

- Oblicuidad.
- Relación de aspecto.
- Alabeo.
- Jacobiano.

***Oblicuidad (Skewness).***

La oblicuidad en el caso de elementos triangulares es calculada encontrando el ángulo formado entre el vector de cada nodo hacia la mitad del lado opuesto, y el vector entre los 2 lados adyacentes partiéndolos en la mitad; mientras que en elementos cuadrangulares es el ángulo mínimo entre las líneas que parten desde el punto medio de los lados opuestos de los valores antes mencionados, deben restarse  $90^\circ$  y su resultado encontrarse entre  $0^\circ$  y  $45^\circ$ . La figura 33 denota los ángulos formados mediante las líneas.



**Figura 33.** Ángulo de oblicuidad.

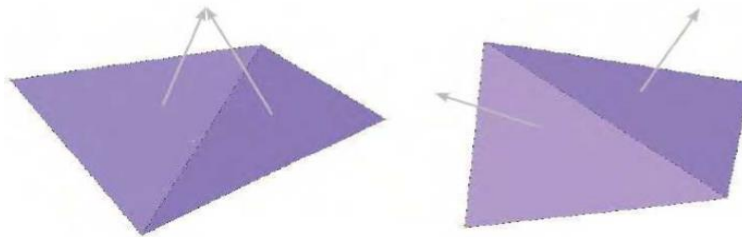
Fuente: (Lee, 2018)

### **Relación de aspecto (Aspect ratio).**

La relación de aspecto en elementos de 2 dimensiones es calculada dividiendo el lado de mayor longitud por el lado de menor longitud. El control de la relación de aspecto debe hacerse en todas las caras de un elemento tridimensional y su valor debe estar entre 1 y 5.

### **Alabeo (Warpage).**

El alabeo en elementos de 2 dimensiones es calculado partiendo un cuadrado en 2 triángulos y encontrando el ángulo formado entre los 2 planos del cual se forman los mismos véase figura 34. El cuadrado es dividido de nuevo, esta vez empleando las esquinas opuestas y formando un segundo set de triángulos, calculando nuevamente el ángulo entre los planos. El ángulo máximo calculado entre los planos es el ángulo de alabeo del elemento y su valor debe encontrarse entre  $0^\circ$  y  $10^\circ$ .



**Figura 34.** Ángulo de Alabeo.

Fuente: (Lee, 2018)



### **Jacobiano (Jacobian).**

En términos resumidos, el Jacobiano es un factor de escala que surge de la transformación del sistema de coordenadas. Los elementos son transformados desde las coordenadas globales a coordenadas locales definidas en el centroide de cada elemento para un análisis más rápido. Los valores van de 1 a 0.5.

### **2.13.3 Postprocesamiento.**

Es la etapa que se refiere al análisis y evaluación de los resultados obtenidos según las condiciones de frontera previamente establecidas; contiene rutinas sofisticadas empleadas para ordenar y trazar los resultados seleccionados, tales como: factores de seguridad, deformaciones, animaciones dinámicas del comportamiento del componente, etc. De los resultados obtenidos se procede a su validación según el caso.

## **2.14 Proceso matemático de resolución**

La ecuación de equilibrio dinámico se escribe como una ecuación diferencial de segundo orden de la siguiente manera.

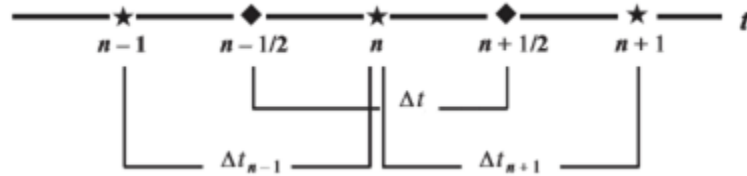
$$[M]\ddot{s}_n + [C]\dot{s}_n + [K]s_n = F_{ext}$$

Que representa, M matriz de masa, C matriz de amortiguación, K matriz de rigidez,  $F_{ext}$  fuerza de excitación externa y s el desplazamiento y sus derivadas en función del tiempo (velocidad y aceleración). Internamente el software determina la evolución de las cantidades básicas, como desplazamiento, velocidad y aceleración en función de las condiciones iniciales como desplazamiento y velocidad respecto del tiempo.

La ecuación de equilibrio dinámico se resuelve de manera explícita, utilizando un esquema matemático de diferencias centrales. Esto simplifica la complejidad del problema, mejora los

tiempos de cómputo y permite resolver problemas no lineales, con fuerzas variantes en el tiempo y altas deformaciones.

Existen varias ventajas de dicho procedimiento y la más importante es que conduce a un algoritmo que puede programarse fácilmente, no requiere ningún procedimiento de inversión de matrices y además permite computación paralela. La figura 35 representa el método de las diferencias centrales como se describe a continuación:



**Figura 35.** Método de las diferencias centrales

Fuente: (SHEN & LEI, 2012)

En base a este método se define la velocidad como  $\dot{s}_n = \frac{1}{2\Delta t} * (s_{n+1} - s_{n-1})$ , y la aceleración

como  $\ddot{s}_n = \frac{1}{\Delta t} * (\dot{s}_{n+1/2} - \dot{s}_{n-1/2})$ , que después de un proceso algebraico simple queda en la

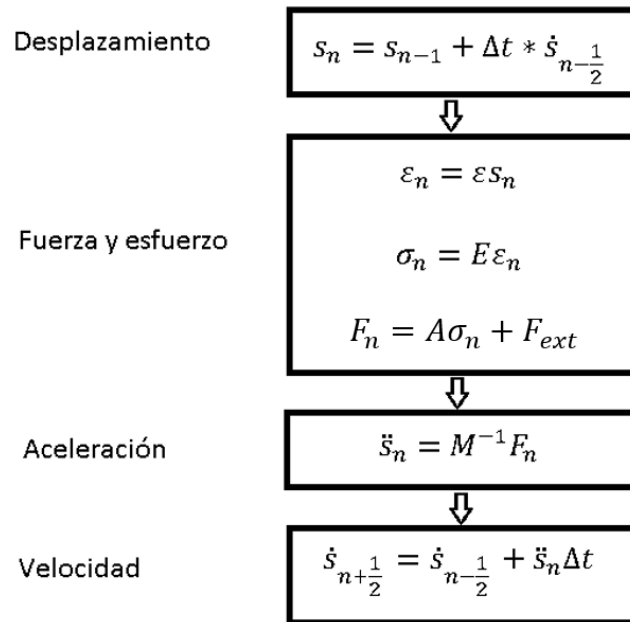
forma  $\ddot{s}_n = \frac{1}{\Delta t^2} * (s_{n+1} - 2s_n + s_{n-1})$ .

Estas ecuaciones se reemplazan en la ecuación de equilibrio dinámico obteniéndose,

$$\left(M + \frac{\Delta t}{2} C\right) s_{n+1} = \Delta t^2 F_{ext} - (\Delta t^2 K - 2M) s_n - \left(M - \frac{\Delta t}{2} C\right) s_{n-1}$$

La estabilidad de este método se basa en la longitud del time step, que en este caso se representa como variación del tiempo  $\Delta t$ .

Finalmente, la figura 36 presenta el algoritmo de resolución de dinámica explícita en forma iterativa:



**Figura 36.** Algoritmo de resolución de dinámica explícita

Fuente: (SHEN & LEI, 2012)

Durante la etapa de post proceso, se puede determinar otras variables importantes como tensión de los elementos, fuerzas de contacto y energías cinética o potencial, en función de las cantidades base.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA DE DISEÑO

#### 3.1 Selección del material.

Para seleccionar adecuadamente el material se han establecido unos requerimientos previos de diseño y se evalúan mecánicamente, por medio de un análisis de tracción dos diferentes tipos de material disponibles en el mercado nacional que pueden satisfacer las condiciones requeridas.

##### 3.1.1 Caracterización de materiales

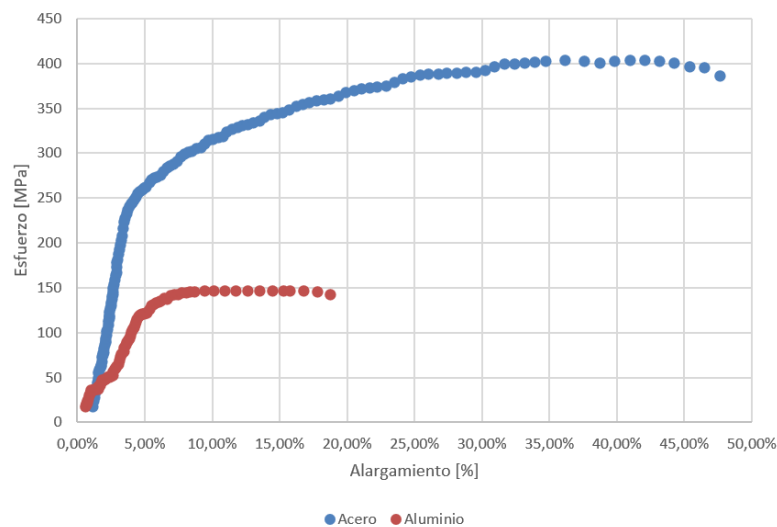
Para los diseños de atenuadores de impacto convencionales que se han analizado, se observa que los materiales más utilizados son acero y aluminio. El acero es un material de bajo costo y de gran disponibilidad, que presenta un módulo de Young y resistencia a fluencia muy elevada. El aluminio se caracteriza por su bajo peso, que, combinado con un buen diseño, puede conseguir características muy aceptables. Por este motivo se utilizarán como base de selección de material para este proyecto.

Para entender el comportamiento mecánico del acero A36 y aluminio A1200 de mercado nacional, se realizó a los dos materiales ensayos mecánicos destructivos en los laboratorios de Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Los ensayos se ejecutaron según la norma ASTM 370 para el caso del acero A36 y ASTM B557 para el aluminio A1200. En relación con la magnitud de deformación sufrida por las probetas, se puede determinar el porcentaje de alargamiento sufrido durante la prueba, por medio del siguiente cálculo matemático.

$$A_{\text{Aluminio}} = \frac{l_f - l_0}{l_0} * 100 = \frac{(59.37 - 50)mm}{50mm} * 100 = 18.74 \%$$

$$A_{Acero} = \frac{l_f - l_0}{l_0} * 100 = \frac{(73.81 - 50)mm}{50mm} * 100 = 47.62 \%$$

A continuación, la figura 37 presenta los diagramas de esfuerzo deformación, obtenidos mediante los ensayos realizados. La curva de color azul corresponde a la probeta de acero A36. La curva de color rojo corresponde a la probeta de aluminio A1200, en la cual se observa un módulo de Young de valor inferior al del acero.



**Figura 37.** Curva esfuerzo alargamiento del acero A36 y aluminio A1200.

Fuente: AUTOR

La ductilidad del material se puede conocer mediante la capacidad de deformarse plásticamente antes de romperse. Se observa en el ensayo de tracción realizado, que el acero A36 es más dúctil que el aluminio A1200, ya que el acero alcanza una deformación máxima del 47.62%, mientras que el aluminio consigue una deformación de 18.74%.

La siguiente Tabla 4 presenta un resumen de los valores obtenidos en el ensayo de tracción de los materiales, donde  $\epsilon$  representa el porcentaje de elongación del material hasta la zona de rotura,  $S_y$  es el esfuerzo de tensión y  $SUT$  el esfuerzo último de tracción, ambos medidos en mega Pascales (MPa).

**Tabla 4**  
*Resultados de ensayos mecánicos*

<b>Material</b>	<b><math>\epsilon</math> (%)</b>	<b>Sy [MPa]</b>	<b>SUT [MPa]</b>
Aluminio A1200	18.74	125	150
Acero ASTM A36	47.62	250	400

### 3.1.2 Selección de materiales por etapa límite

Para la selección del material se utiliza como referencia los valores mostrados en el apartado anterior y además la referencia brindada por el software CES EduPack (versión educativa), la cual es una base de datos integral que contiene información sobre materiales y procesos (Granta Design, 2013).

Para poder diseñar y construir un atenuador de impacto vial, se espera que el material tenga las siguientes características: deformable, económico, brindar facilidad de manufactura y ser accesible a nivel nacional.

Nótese que la característica esencial de un atenuador es la deformación y absorción de energía cinética al momento del impacto, de manera que se complemente con la estructura de cualquier vehículo y salvaguarde la vida de sus ocupantes. Debido a esto los valores que se ingresan como referencia de búsqueda y selección, se basan en los ensayos físicos realizados.

**Tabla 5**  
*Valores de referencia para software CES Edupack*

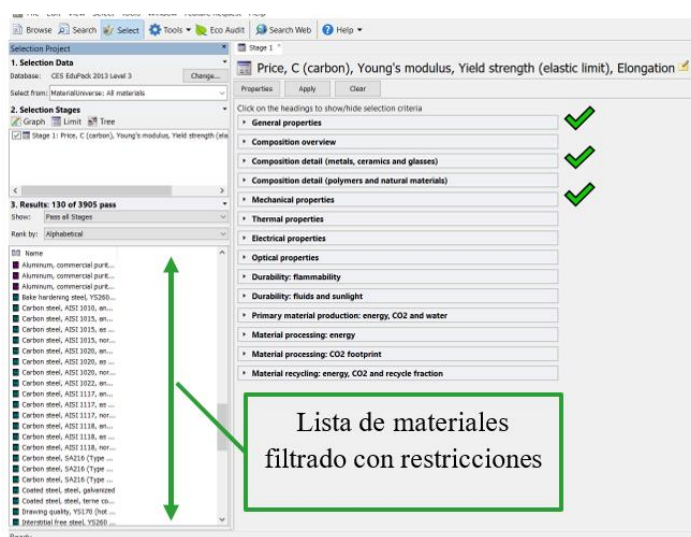
<b>Característica</b>	<b>Magnitud</b>
Precio USD/kg	0,50 – 2,50
Composición de carbón %	0,2

Continúa



Módulo de Young [GPa]	70 - 210
Límite elástico (Sy) [MPa]	28 - 315
Elongación %	8,15 -32,97

Una vez detalladas las restricciones que debe cumplir el material, se ingresa los valores de referencia de la Tabla 5 en el software CES edupack, el precio en propiedades generales, detalles de composición del material y propiedades mecánicas.



**Figura 38.** Filtrado de materiales con restricciones, en software CES EduPack, 2013

Fuente: AUTOR

De la figura 38, se puede determinar que los materiales que cumplen las condiciones requeridas para la elaboración del atenuador de impacto son: aluminio, aceros al carbón, aceros inoxidables, aceros estructurales, magnesio, zinc. Se detalla a continuación un listado de materiales según distribuidores de productos de acero localmente:

- Acero, plancha antideslizante ASTM A36
- Acero, plancha galvalume ASTM A792

- Acero, plancha galvanizada NTE INEN 115
- Acero, plancha naval ASTM A131
- Acero inoxidable AISI 201
- Acero inoxidable AISI 304
- Acero inoxidable AISI 430
- Aluminio plancha lisa ASTM A1200
- Aluminio plancha antideslizante A1060
- Zinc ASTM A653

Para confirmar la exactitud de selección del material, se procede a aplicar la *selección por índices de material* (Granta Design, 2013):

*Objetivo:* Minimizar la masa del sistema, asegurando a su vez una rigidez mayor.

*Restricciones:*

- Longitud fija
- Deber tener rigidez a flexión  $> S$
- Ecuación para las restricciones:

$$S = \frac{CEI}{L^3}; \quad \text{Pero,} \quad I = \frac{A^3}{12}$$

$$S = \frac{CEA^3}{12L^3} \quad \text{Ecuación 1}$$

$A$  = área

$L$  = longitud

$E$  = módulo de Young

$I$  = momento de inercia para una viga

$C$  = constante



*Objetivo:* Minimizar la masa,  $m$ .

$$m = AL\rho \quad \text{Ecuación 2}$$

$m$  = masa

$\rho$  = densidad

$L$  = longitud

$A$  = área

Reemplazando  $A$  de la Ecuación 2 y reemplazando en la Ecuación 1, obtenemos:

$$S = \frac{CEm^3}{12L^6\rho^3} \quad \text{Ecuación 3}$$

Despejando la masa  $m$  de la Ecuación 3, obtenemos la función métrica:

$$m = \left(\frac{12L^6S}{C}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho}{E^{\frac{1}{3}}}\right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Por lo tanto, obtenemos el índice de material.

$$M = \frac{E^{\frac{1}{3}}}{\rho} \quad \text{Ecuación 5}$$

Para filtrar los resultados en el software de selección de materiales, se requiere el valor de la pendiente de la recta, la misma que se calcula así:

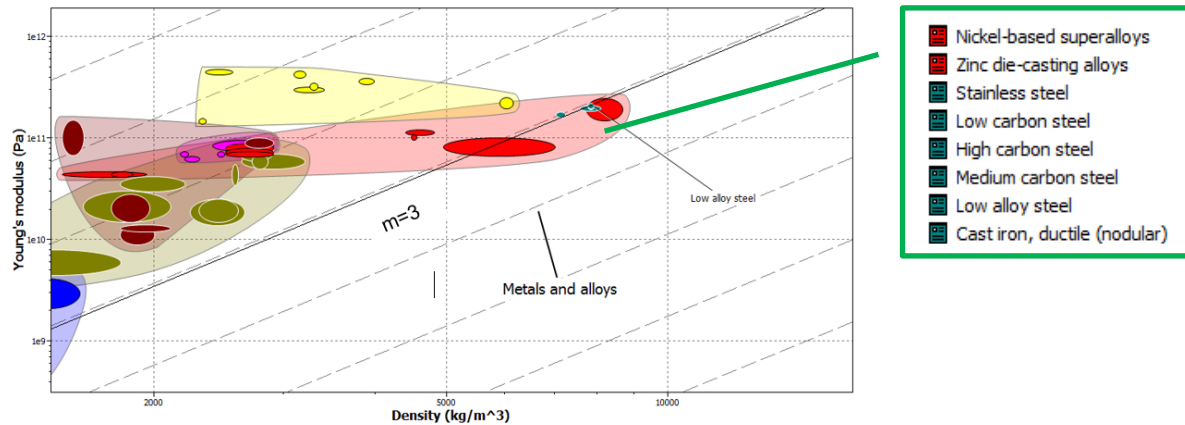
$$E = M^3\rho^3 \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\log E = 3 \log \rho + 3 \log M \quad \text{Ecuación 7}$$



Pendiente

Una vez determinado el índice de material (*Ecuación 5*), se procede a maximizar dicho índice, de este modo se minimiza la masa del sistema, asegurando a su vez una rigidez mayor; para esto se utiliza los diagramas de Ashby, graficando en el software el módulo de Young ( $E$ ) vs la densidad.



**Figura 39.** Filtrado de materiales por índice de material

Fuente: (CES EduPack, 2013)

De la Figura 39. Filtrado de materiales por índice de material, se puede determinar que los materiales que cumplen las condiciones requeridas para el atenuador de impacto vial, como los materiales son los mismos que los obtenidos por el método de etapa límite.

### 3.1.3 Tabla de priorización

En la siguiente Tabla 5, se detalla un análisis de priorización de los materiales expuestos anteriormente con los requerimientos necesarios para el diseño del terminal atenuador de impacto. Porcentaje ponderado muestra la importancia de cada uno de ellos en la toma de decisión final. El cuerpo de la matriz se llena con números que califican cada material en una escala entre 1 y 10, donde 1 es insatisfactorio y 10 muy satisfactorio. Luego, las calificaciones se multiplican por los factores de ponderación y los productos sumados dan el valor final para cada material.

**Tabla 5**  
*Tabla de priorización*

Factores Material	Costo	Elongación	Disponibilidad	Manufactura	Tenacidad	Total
	25%	25%	20%	15%	15%	100%
Aluminio ASTM A1200	6 1,5	6 1,5	8 1,60	9 1,35	8 1,20	7,15
Aceros al carbón A36	9 2,25	9 2,25	10 2	9 1,50	9 1,35	9,35
Aceros Inoxidable AISI 430	8 2	9 2,25	9 1,8	9 1,35	9 1,35	8,75
Aceros Estructurales ASTM A572	8 2	8 2	9 1,8	9 1,35	9 1,35	8,75
Magnesio ASTM AZ31	6 1,5	6 1,5	4 0,80	7 1,05	8 1,20	6,05
Zinc ASTM A653	7 1,75	7 1,75	8 1,60	9 1,35	8 1,20	7,4

### 3.1.4 Matriz de decisión del material

Según la matriz de decisiones representada, se aprecia que las mejores opciones, teniendo en cuenta los parámetros establecidos son: en primer lugar, el acero al carbón A36 con un puntaje de 9,35; en segundo lugar, acero inoxidable AISI 430 y acero estructural ASTM A572 con un puntaje de 8,75; en el tercer lugar el Zinc ASTM A653 con 7,40 de puntaje; en cuarto lugar, el aluminio ASTM A1200 con un puntaje de 7,15 y por último el magnesio ASTM AZ31 con 6.05 de puntuación.

En este proyecto se desarrolla el estudio de un único material para el diseño del terminal atenuador de impacto, de los cuales el carbón A36 es el seleccionado por la disponibilidad del material como también de la variedad en dimensiones, pero podría hacerse una combinación entre las distintas opciones mejorando sus características mecánicas y su rendimiento como atenuador.

Finalmente, escogido el material a utilizar se procede con el diseño del terminal atenuador teniendo en cuenta los puntajes obtenidos por cada uno de ellos dentro de la matriz realizada anteriormente

### **3.2 Requerimientos de diseño**

#### **3.2.1 Tipos de atenuador de impacto**

A continuación, se muestra un resumen mediante varias Tablas de las características que ofrecen diferentes diseños de atenuadores de impacto, con capacidad de redireccionamiento, sin capacidad de redireccionamiento y móvil.

##### ***Atenuador de impacto con capacidad de redireccionamiento.***

Un atenuador de impacto con capacidad de redireccionamiento es eficiente ante impactos de vehículos livianos, redirecciona controladamente los impactos laterales, sin embargo, tiene altos costos de adquisición y mantenimiento. Como muestra la figura 40 de atenuador con capacidad de redireccionamiento.



**Figura 40.** Atenuador con capacidad de redireccionamiento

##### ***Atenuador de impacto móvil***

Preserva la vida de trabajadores en la vía, soportan velocidades hasta de 100 km/h, es acoplable a sistemas luminosos, para mayor precaución en la vía. Se acoplan a vehículos de

servicio que desarrollan trabajos en la vía. Constituyen un serio obstáculo, sobre todo cuando deben transitar a bajas velocidades. La figura 41 representa el atenuador de impacto móvil.



*Figura 41.* Atenuador de impacto móvil

*Atenuador de impacto sin capacidad de redireccionamiento.*

La figura 42 representa un atenuador sin capacidad de redireccionamiento, tienen bajo costo, no requiere de personal especializado para su mantenimiento y reparación, repuestos versátiles, nivel de contención incierto ante impactos no frontales, requiere mantenimiento periódico, mayor superficie libre de instalación, no son reutilizables.



*Figura 42.* Atenuador sin capacidad de redireccionamiento

### **3.2.2 Identificación de necesidades.**

La necesidad presentada es propuesta como antecedente para el diseño a fin de ofrecer mayor seguridad vial ante colisiones de vehículos tipo M1 mediante atenuadores de impacto

en sitios tales como bifurcaciones, pasos a desnivel, puentes, estaciones de peaje, de forma que permitan salvaguardar la vida de los ocupantes del automotor. La Tabla 6 enumera las necesidades detectadas para el atenuador de impacto vial

**Tabla 6**  
*Caracterización de necesidades.*

Orden	Necesidad Detectada
1	Costo de construcción
2	Reusable
3	Rigidez
4	Peso
5	Estabilidad al impacto
6	Vida útil
7	Capacidad de contención
8	Costo de conservación

### 3.2.3 Establecer especificaciones – objetivo.

Se clasifican las necesidades de acuerdo a criterios de utilidad en la Tabla 7. Siendo metas y objetivos, necesidades relevantes que están acorde al objetivo del proyecto, restricciones, posibles limitaciones para el diseño de conceptos, funciones, actividades que cumplirán los conceptos.

**Tabla 7**  
*Listado de criterios de utilidad.*

Orden	Necesidad Específica	Metas y/o objetivos	Restricciones	Funciones
1	Costo de construcción	X		
2	Reusable		X	
3	Rigidez			X
4	Peso	X		
5	Estabilidad al impacto	X		

Continúa



Orden	Necesidad Específica	Metas y/o objetivos	Restricciones	Funciones
6	Vida útil	X		
7	Capacidad de contención			X
8	Costo de conservación	X		

Se realiza en la Tabla 8 una jerarquización de las necesidades – objetivos seleccionados en la Tabla 7, considerando tres criterios conceptuales: económico, deformable, fácil manufactura y accesible a nivel nacional, donde 1 representa una relación baja y 5 una relación alta.

**Tabla 8**  
*Jerarquización de las necesidades – objetivos*

Orden	Objetivo	Interpretación del Objetivo	Criterios conceptuales			
			Económico	Deformable	Fácil manufactura	Accesible a nivel nacional
1	Costo de construcción	Valor económico de producción	3			
2	Reusable	Luego de ser impactado el atenuador, permita ser reparado parcialmente			5	
3	Rigidez	Capacidad absorber energía de deformación antes de llegar al punto de rotura por impacto		5		
4	Peso	Liviano				3
5	Estabilidad al impacto	Permite atenuar el impacto de forma gradual		5		
6	Vida útil	Dependerá de la probabilidad y magnitud de impacto			5	
7	Capacidad de contención	Carga máxima que podrá detener en función del peso del vehículo tipo M1		3		
8	Costo de conservación	Mantenimiento a condiciones climáticas	3			

Se describen en la Tabla 9, las especificaciones métricas que debe cumplir el prototipo con el objetivo de determinar sus características precisas y medibles que satisfagan las necesidades detectadas.

**Tabla 9**  
*Lista de métricas*

Número de necesidad	Número de necesidad	Métrica	Unidades	Valores
1	1,2,6	Costo de construcción	Dólares	Por definir
2	1,5,7	Reusable	N/A	N/A
3	5,7	Rigidez	Pascal	Por definir
4	5,7	Peso	Kg	Por definir
5	7	Estabilidad al impacto	N/A	N/A
6	1,5,7	Vida útil	N/A	N/A
7	5	Capacidad de contención	Pascal	Por definir
8	1,2,5,7	Costo de conservación	Dólares	Por definir

Se realiza una matriz de pares, la misma que permite dar un peso en relevancia a cada objetivo descrito en la Tabla 10.

**Tabla 10**  
*Matriz de pares*

OBJETIVOS	Costo de construcción	Reusable	Rigidez	Peso	Estabilidad al impacto	Vida útil	Capacidad de contención	Costo de conservación	Total	Total Normalizado	Total, en Porcentaje
Costo de construcción		1	1	1	0	1	0	1	5	6	19,35%
Reusable	1		1	0	1	1	0	0	4	5	16,13%
Rigidez	0	1		0	1	0	1	0	3	4	12,90%
Peso	1	0	0		0	0	0	0	1	2	6,45%
Estabilidad al impacto	0	1	1	0		0	1	0	3	4	12,90%
Vida útil	1	1	0	0	0		0	0	2	3	9,68%
Capacidad de contención	0	1	1	0	0	0		1	3	4	12,90%
Costo de conservación	1	1	0	0	0	0	0		2	3	9,68%
TOTAL									23	31	100%



De la matriz de pares, se deduce que los objetivos que superen el 10 % serán de mayor importancia y considerados en el diseño del atenuador:

- Costo de construcción = 19,35%
- Reusable = 16,13%
- Rigidez = 12,90%
- Estabilidad al impacto = 12,90%
- Capacidad de contención = 12,90%

En resultado,

a) El primer criterio conceptual que presenta mayor peso de ponderación porcentual, descrito en la **Tabla 8** es:

Deformable	38.70%
------------	--------

El cual contiene tres objetivos, cuya ponderación en la **Tabla 11**, es:

1. Rigidez	12.90%
2. Estabilidad al impacto	12.90%
3. Capacidad de contención	12.90%

b) El segundo criterio conceptual que presenta mayor peso de ponderación porcentual, descrito en la **Tabla 8** es:

Económico	29.03%
-----------	--------

El cual contiene dos objetivos, cuya ponderación en la **Tabla 11**, es:

1. Costo de construcción	19.35%
--------------------------	--------

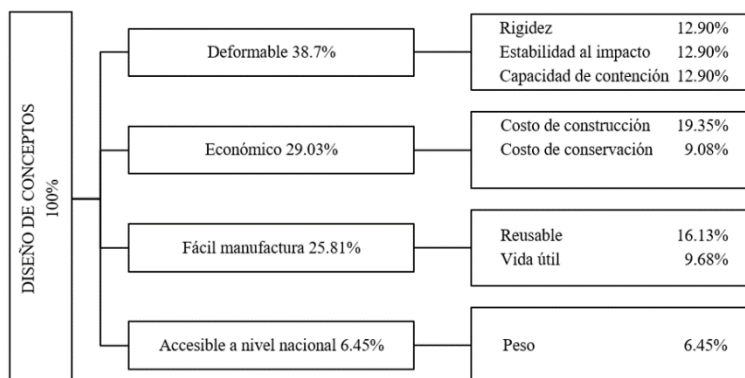
c) El tercer criterio conceptual que presenta mayor peso de ponderación porcentual, descrito en la **Tabla 8** es:

Fácil manufactura 25.81%

Entonces, de la matriz de pares con sus respectivos resultados en porcentajes se indica el 100% distribuidos en la jerarquización de necesidades – objetivos, en el siguiente cuadro sinóptico de la **Tabla 11**.

**Tabla 11**

*Objetivos ponderados*



Cabe mencionar que para el diseño del atenuador de impacto se deben considerar todos los objetivos antes definidos, pero primordialmente las que tienen mayor ponderación.

Según la metodología propuesta por (Ulrich & Eppinger, 2013), y considerando la información anterior, se procede con la generación de conceptos de productos.

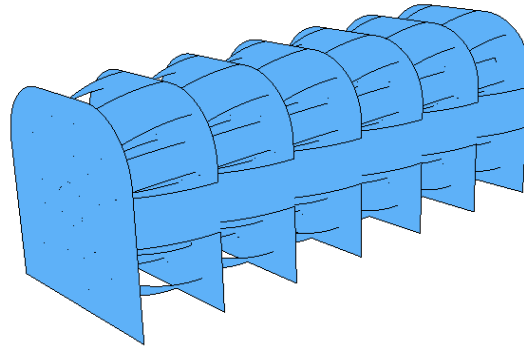
### 3.2.4 Generación de conceptos

A partir del análisis realizado a las necesidades, se proponen los siguientes conceptos:

#### **Concepto A.**

La figura 43 muestra el concepto A. Es un tipo de amortiguador de impacto frontal, no redireccionable, el cual se basa en un diseño de láminas de acero baroladas y dispuestas en forma hexagonal, repitiéndose en secciones a lo largo del atenuador. El doblado de las láminas está previsto para no generar rigidez en la estructura, sino todo lo contrario, para lograr que

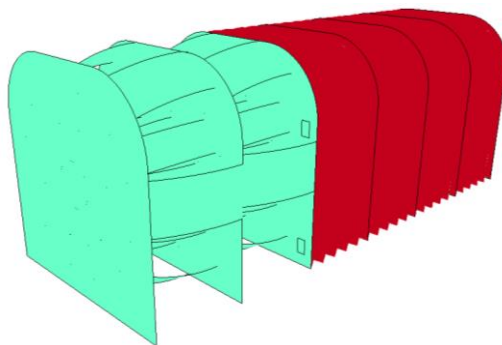
la estructura sea muy deformable. La estructura de protección está diseñada para dar resguardo en vías sinuosas.



**Figura 43.** Bosquejo del concepto A

### **Concepto B**

La figura 44 muestra el concepto B. Este concepto a diferencia del anterior, tiene un mayor grado de rigidez a partir del tercer módulo, ya que se ha implementado un refuerzo en x, armado con tubo de perfil rectangular y una cubierta superior. Permite un mayor control de deformación ante diferentes velocidades de impacto, pues su rigidez será diferente en los módulos sencillos y reforzados. Si la velocidad es muy baja la deformación alcanzará únicamente las dos primeras secciones, para velocidades mayores se podría llegar a la zona reforzada posterior.

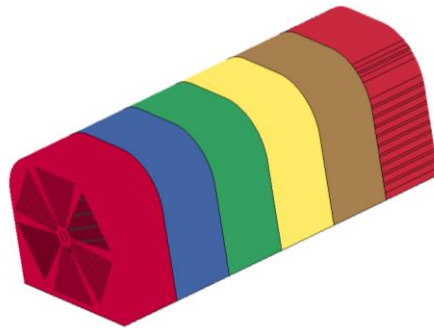


**Figura 44.** Bosquejo del concepto B

### *Concepto C*

La figura 45 muestra el concepto C. Finalmente se propone un diseño en el cual se ha modulado por completo las zonas de rigidez, teniendo un módulo bajo en la primera sección que irá en aumento hasta llegar al final, los módulos están formados de láminas de espesor de 2 mm con un ligero rolado para inducir la deformación. Este amortiguador también tiene una sección de refuerzo con tubo de perfil rectangular de 40x40x2 mm en el módulo cuatro y cinco.

Finalmente se incorpora una estructura de alta rigidez que es honey comb, la cual solo llega a trabajar en caso de que todo el resto de la estructura colapse. Este módulo tiene una baja densidad estructural y alta rigidez, se recomienda un diámetro de tubería de 76 mm con un espesor máximo de 2 mm para facilitar la deformación y la absorción de energía.



*Figura 45.* Bosquejo del concepto C

En este estudio se realiza una simulación con cada concepto de diseño planteado. De forma posterior al estudio, se llevará a cabo la evaluación final de resultados con lo que se podrá elegir de manera adecuada el diseño óptimo para el atenuador de impacto, que cumpla los objetivos planteados de diseño.

## CAPÍTULO IV

### EVALUACIÓN Y SELECCIÓN

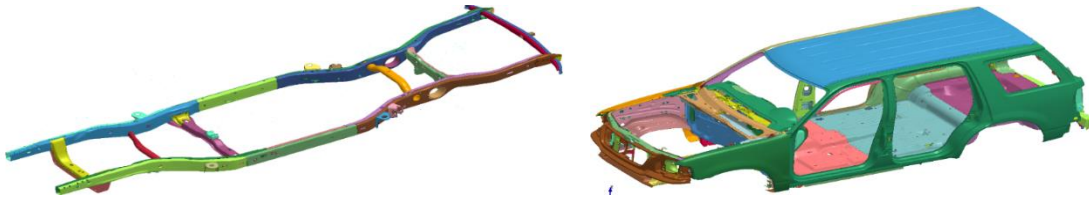
#### **4.1 Proceso CAD del vehículo**

El vehículo que se emplea para el ensayo de impacto frontal es un Ford Explorer. Este vehículo es de fabricación estadounidense y a lo largo de los años ha tenido varias versiones con diferentes niveles de equipamiento. Se ha seleccionado este automotor porque según la NCAP tiene una excelente capacidad de resistencia ante impacto frontal. En los siguientes apartados se describe el proceso de modelado.

##### **4.1.1 Chasis y Carrocería.**

El chasis es la estructura principal de soporte del vehículo, sobre este se sobreponen todos los demás componentes como tren de potencia, carrocería y demás sistemas de equipamiento y confort. Se constituye por dos largueros principales y varios travesaños, de soporte.

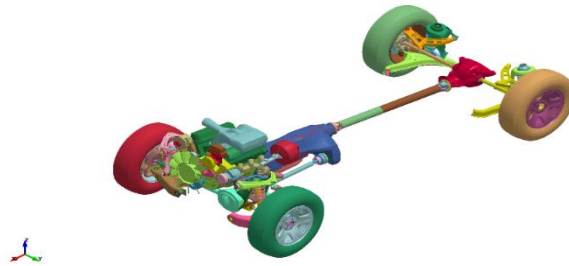
La carrocería, es el elemento que da confort y seguridad a los pasajeros, los separa del medio circundante, entrega forma y estética al vehículo y forma el habitáculo de seguridad. La figura 46 muestra el modelado de chasis y carrocería, el cual es un elemento capaz de absorber gran cantidad de energía durante un impacto, funcionando como cápsula de seguridad para los ocupantes del vehículo. Se compone de varias partes de chapa metálica estampada y unida mediante suelda de puntos, esto se simula con elementos de tipo bidimensionales.



*Figura 46.* Modelado de chasis y carrocería

#### 4.1.2 Sistemas automotrices

Como indica la figura 47, en esta etapa se modelan los diferentes sistemas vehiculares, como transmisión, dirección, suspensión, frenos y motor. Los elementos de mayor masa después del chasis son el motor y la transmisión, que son modelados como elementos sólidos, además de otros elementos que conservan inercia en caso de un impacto. El resto de los elementos se modelan como elementos de tipo cascarón es decir bidimensionales.



*Figura 47.* Modelado del sistema de suspensión.

#### 4.2 Mallado

Después de realizar el proceso CAD, se procede a realizar el mallado del modelo, para lo cual se utiliza el software LS Prepost. La densidad de malla que se utilice en este estudio será crucial para la buena ejecución del análisis, enlazando el tiempo de procesamiento con la calidad de resultados. Una malla demasiado fina optimiza los resultados, pero puede extender el tiempo de procesamiento de forma indeterminada, una malla muy gruesa hace lo contrario,

minimiza tiempos, empobrece resultados. La siguiente Tabla 12 muestra un resumen del modelo FEM del vehículo.

**Tabla 12**  
*Resumen FEM Ford Explorer*

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>
Número de partes	923
Número de nodos	724628
Elementos unidimensionales	14
Elementos bidimensionales	680288
Elementos sólidos	11
Número total de elementos	714205

#### 4.3 Calidad de malla del análisis.

Posterior al mallado se debe asegurar que el proceso se ha ejecutado de manera satisfactoria, para lo cual se realiza un análisis de calidad de malla, este análisis consiste en analizar la geometría de los elementos generados en base a diferentes criterios, siendo los cuatro mostrados en la siguiente Tabla 13 los más utilizados.

**Tabla 13**  
*Resumen propiedades malla*

<b>Característica</b>	<b>Límite permisible</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Elementos violados (%)</b>
Relación de aspecto	10	1	7.79	0 (0%)
Distorsión (Warpage)	10	0	20.5	9604 (1.34%)
Desviación (Skew)	45	0	64	170 (0.0236%)
Jacobiano	0.6	0.303	1	2675(0.372%)

Nótese que una vez determinados los factores permisibles de calidad de malla, se observa en la parte derecha que el máximo error estaría concentrado en la distorsión de tipo

“warpage” que representa apenas el 1,34 % del total de elementos. Esto nos da una clara visión de la calidad del ensayo que se está trabajando.

#### 4.4 Validación del modelo

El siguiente proceso es muy importante pues permite evaluar la calidad del estudio. Se plantea un esquema de validación que consiste en comparar un análisis computacional con un experimento real llevado a cabo por laboratorios certificados que emiten boletines de información de libre acceso, con fines informativos y académicos.

En Europa la entidad encargada para este fin es la EURONCAP (New Car Assessment Program), por tanto, se toman las pruebas 3730 y 5034 para realizar el estudio comparativo y la validación. Estas pruebas consisten en impactar al vehículo completo contra una pared rígida a una velocidad de 15 m/s, para posteriormente medir sus deformaciones.

La figura 48 representa ambas condiciones, el ensayo FEM y el ensayo real según la NCAP. Podemos observar que los resultados tienen una gran similitud en el aspecto físico, sin embargo, hay que observar también las magnitudes de esfuerzo y deformación registradas por los equipos de comprobación.

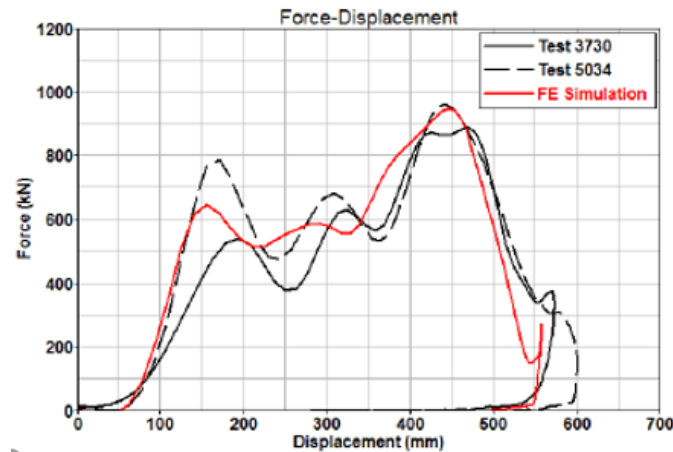


**Figura 48.** Comparación de la prueba FEM vs. ensayo NCAP

La figura 49 muestra los datos registrados en el choque real, en comparación a los obtenidos en el choque simulado. La línea roja, corresponde a los datos extraídos del software y las



líneas negras corresponden a la prueba real. Como podemos observar los modelos tienen un comportamiento muy parejo, por tanto, se puede dar validez al presente estudio.



*Figura 49.* Diagrama esfuerzo deformación para modelo FEM y real.

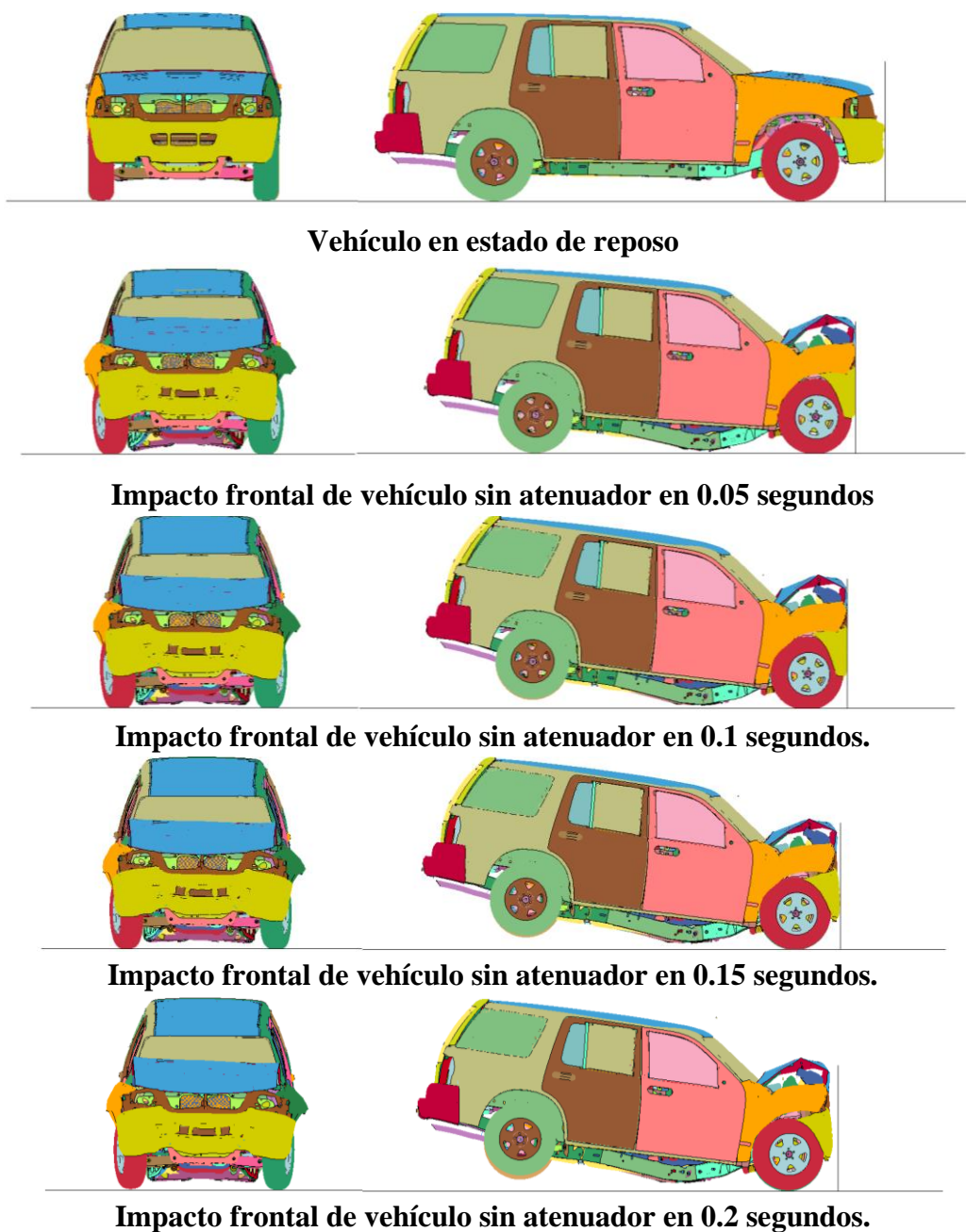
#### 4.5 Análisis de atenuadores de impacto

Una vez que se tiene un modelo válido para la prueba, se procede a realizar el análisis de las opciones de diseño planteadas en el capítulo 3. Las pruebas se realizarán en condiciones virtuales similares con el fin de comparar únicamente el grado de deformación del vehículo sometido a la prueba de impacto, midiendo el grado de disipación de energía de cada concepto.

La prueba de impacto frontal se realizará con el vehículo desplazándose en la dirección del eje x positivo a una velocidad de 60km/h, se ejecuta en 200 ciclos con un paso de 0.001 segundos con un tiempo total de cálculo de 0.2 segundos. El tiempo promedio de trabajo es de 9 horas.

#### 4.5.1 Impacto contra una pared rígida

En este análisis, no se encuentra implementado el atenuador de impactos, de manera que el vehículo impactará una pared de concreto, y su afectación en el vehículo se observa en la siguiente figura 50.

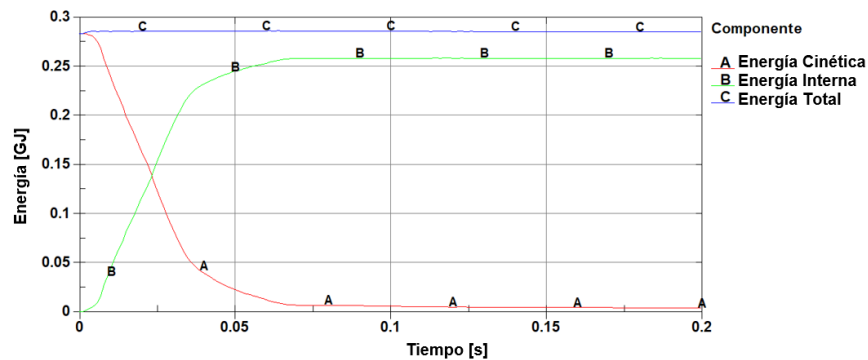


*Figura 50.* Impacto en pared de concreto

Como se observa en la figura 50, el impacto contra el concreto llega a afectar en gran parte a la carrocería del vehículo, nótese que el chasis de este llega a deformarse afectando todos los componentes. Como resultado, este vehículo contiene una afectación en más del 60% de su carrocería, lo que lo convierte en inutilizable y su reparación sería exorbitante, además del daño al habitáculo y a los pasajeros que se encuentran dentro de este.

Para el análisis del atenuador de impactos se procede a examinar las gráficas de energía disipada en el tiempo de duración del análisis, localizando el punto de intersección de la energía cinética e interna y el tiempo de ocurrencia.

Para el caso de impacto sin atenuador, se observa en la figura 51, que la energía cinética e interna se entrecruzan en el tiempo 0.025 segundos, produciendo una desaceleración muy brusca en el vehículo y sus pasajeros.



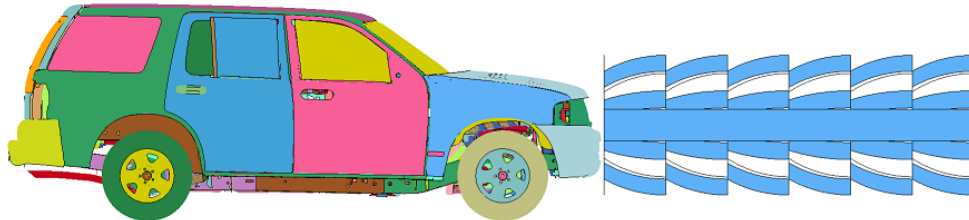
*Figura 51.* Energías – impacto pared rígida.

#### 4.5.2 Impacto contra concepto de diseño A

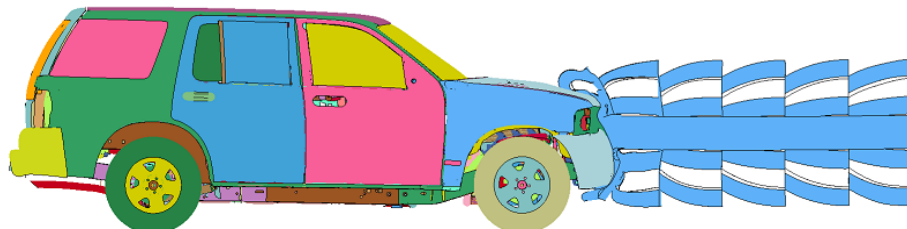
En este caso se observa en la figura 52 las etapas de impacto frontal del concepto A, en la cual la rigidez del modelo planteado es baja con relación al peso del automóvil. Tomando en cuenta que en una carretera se puede estrellar cualquier tipo de vehículo, no se recomendaría

el uso de este diseño a menos que tenga una modificación en su estructura con un tipo de refuerzo.

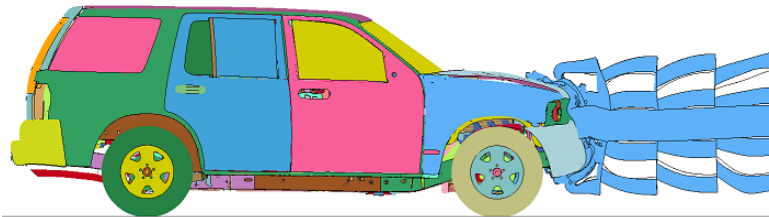
### CONCEPTO A



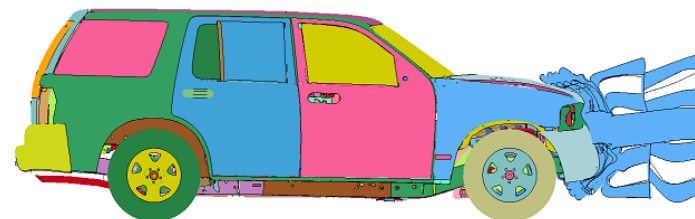
#### Estado inicial



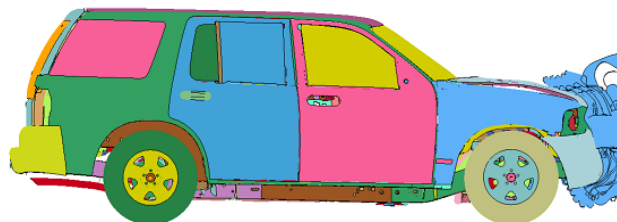
Impacto frontal de vehículo con amortiguador en 0.05 segundos.



Impacto frontal de vehículo con amortiguador en 0.10 segundos

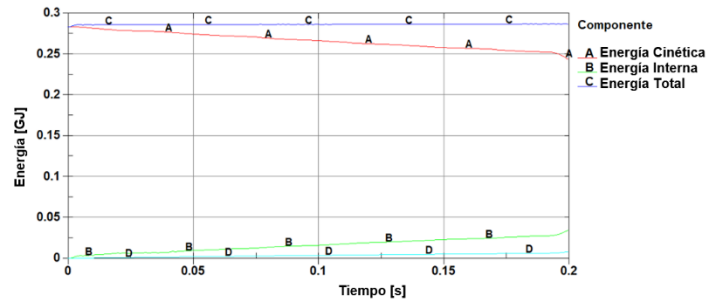


Impacto frontal de vehículo con amortiguador en 0.15 segundos



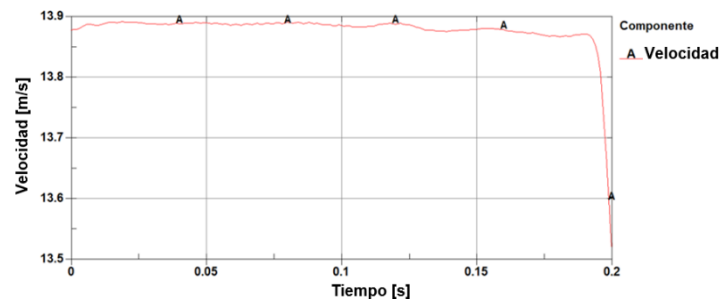
Impacto frontal de vehículo con amortiguador en 0.20 segundos

**Figura 52.** Etapas de impacto frontal con concepto A



**Figura 53.** Energías – concepto A

En este caso de un impacto frontal contra el atenuador de impacto - concepto A, se observa en la figura 53, que la energía cinética e interna no llegan a entrecruzarse en el tiempo establecido de prueba de 0.2 segundos, es decir no se alcanza a disipar toda la energía cinética del vehículo. El diseño necesitaría más módulos para detener el vehículo o mayor rigidez estructural.

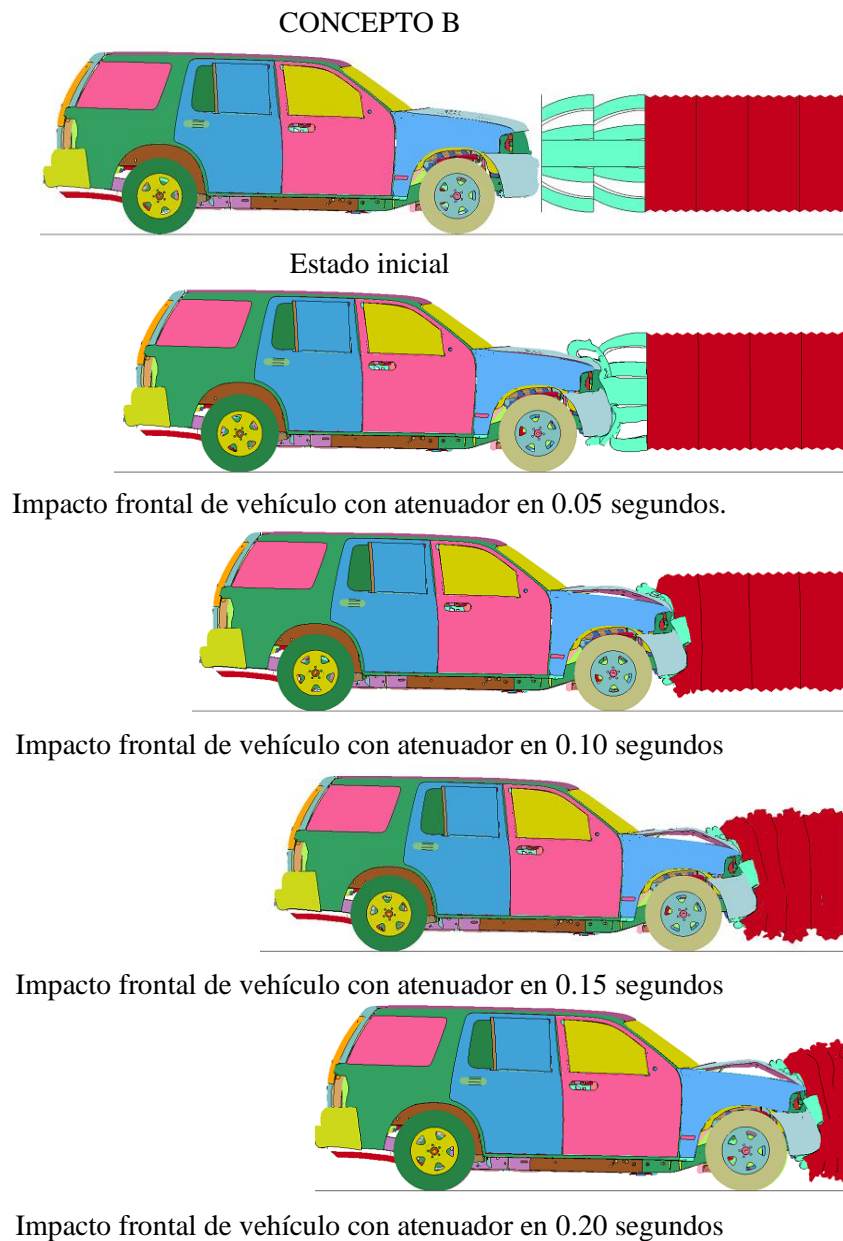


**Figura 54.** Velocidad durante el impacto – concepto A

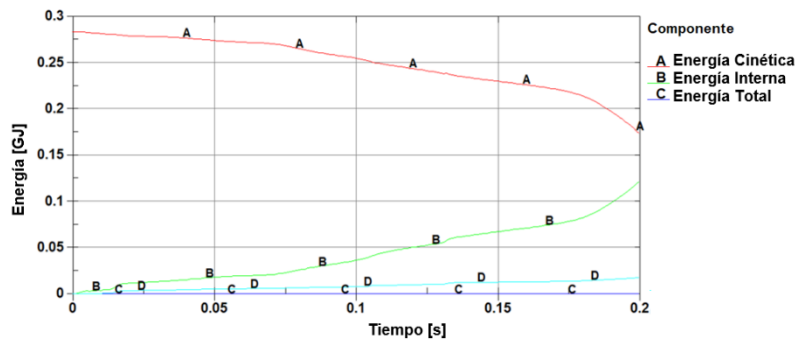
Se puede observar en la figura 54, que la velocidad durante el impacto del concepto A, se mantuvo relativamente constante durante el tiempo de 0.18 segundos con un valor de 13,88 m/seg multiplicado por un factor de 3,6 la velocidad es de 49.96 km/h. y al final la velocidad disminuye de forma violenta a cero, debido que llega a impactar la pared rígida de contención del atenuador

### 4.5.3 Impacto contra concepto de diseño B

Se observa que la rigidez del atenuador sigue siendo baja con relación al peso del automóvil. Si se toma en cuenta que el peso de un vehículo tipo M1 se encuentra en promedio a una tonelada, no se recomendaría el uso de este diseño a menos que tenga una modificación en su estructura.

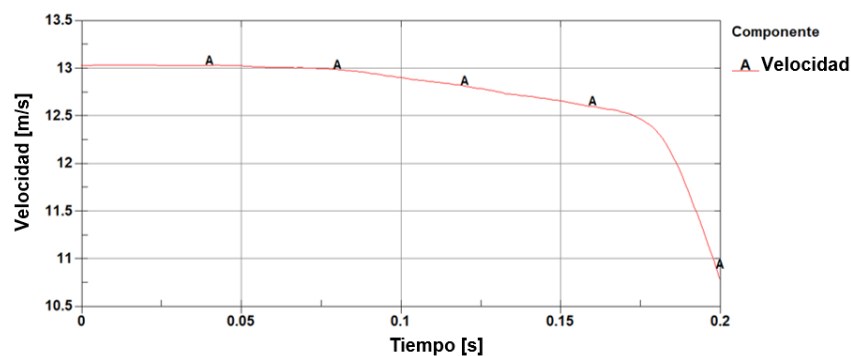


**Figura 55.** Etapas de impacto frontal con concepto B



**Figura 56.** Energías – concepto B

En este caso el atenuador de impacto concepto B, se observa que la energía cinética e interna mostrada en la figura 56, llegan a entrecruzarse luego del tiempo establecido de prueba aproximadamente a 0.25 segundos y a 0.15 GJ aproximadamente, el diseño necesitaría más módulos para detener el vehículo.

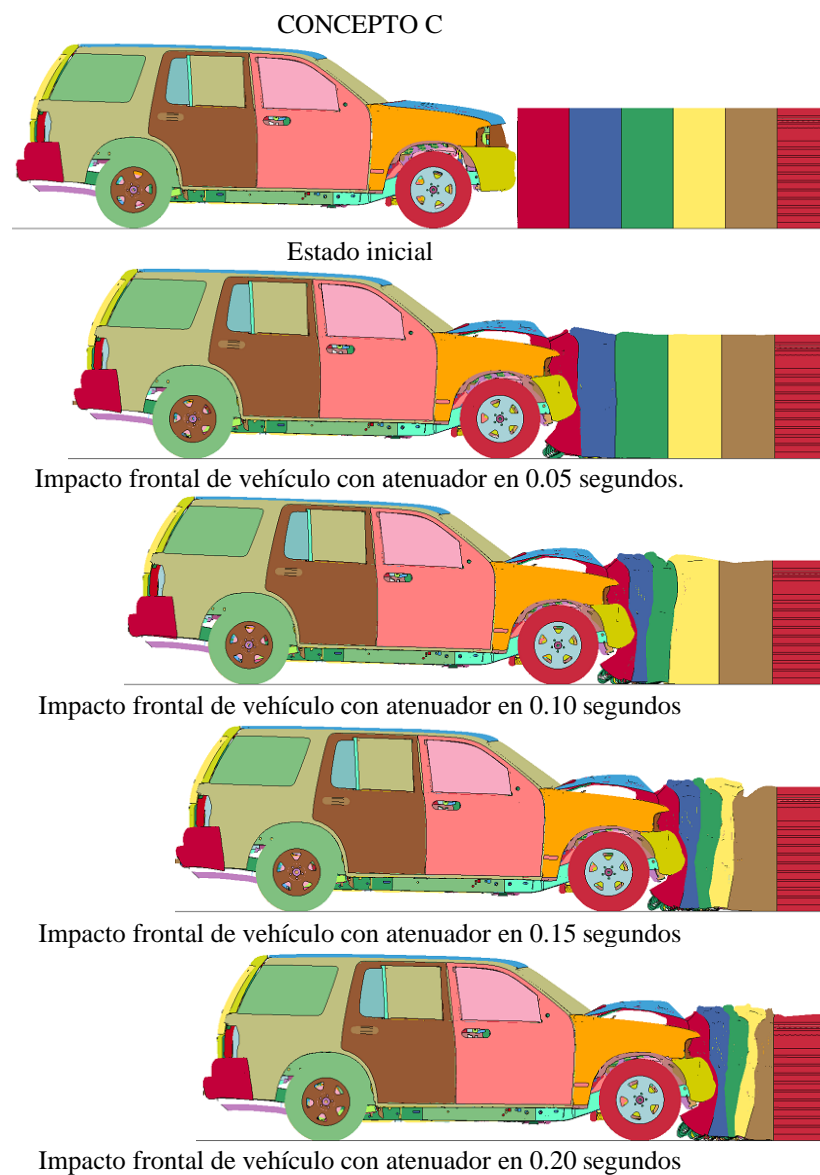


**Figura 57.** Velocidad durante el impacto – concepto B

En la figura 57 se observa que la curva de velocidad es mucho menos pronunciada. Es decir, el cambio de velocidad es menos brusco que en el caso anterior. Se nota un mayor grado de disipación de energía, sin embargo, no es suficiente para lograr detener por completo la marcha del vehículo. Inicia con un valor de 13 m/s, luego de un tiempo de 0.17 segundos la velocidad reduce a 12.5 m/s y a partir de allí la velocidad disminuye con una pendiente más pronunciada, debido que al final del atenuador es completamente rígido.

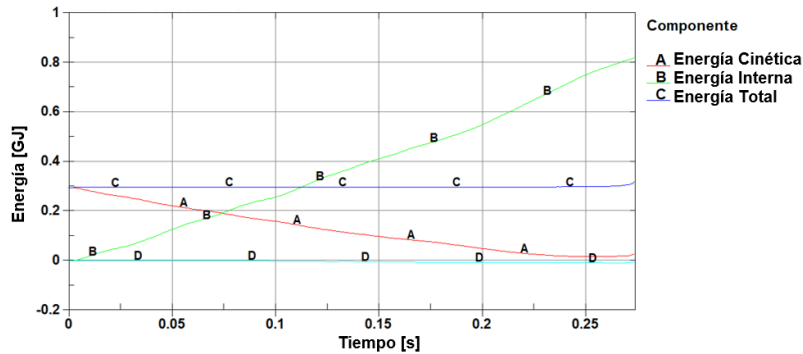
#### 4.5.4 Impacto contra concepto de diseño C

Se observa en la figura 58 las etapas de impacto frontal del concepto B, donde la rigidez va en aumento debido a su diseño multicapa con relación al peso del vehículo. Tomando en cuenta que el peso del vehículo tipo M1 se encuentra en promedio a una tonelada, se recomienda el uso de este concepto debido a que en el transcurso de impacto la deformación se comporta de forma gradual y además el impacto no llega al módulo final del atenuador.



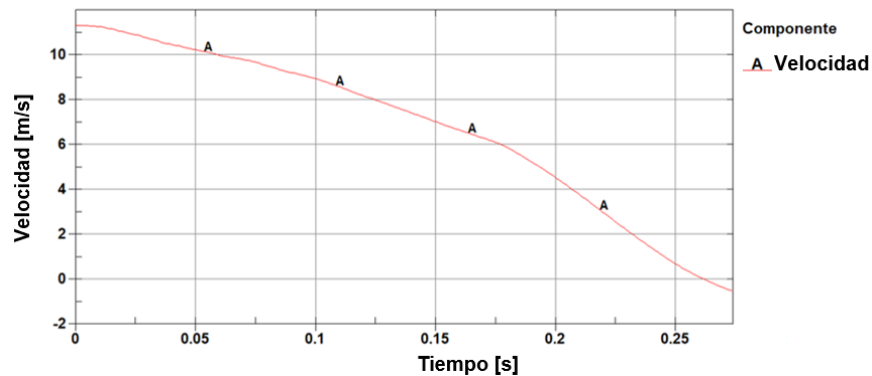
**Figura 58.** Etapas de impacto frontal con concepto C





**Figura 59.** Energías – concepto C

En este caso de un impacto frontal contra el atenuador de impacto concepto C, se observa en la figura 59, que la energía cinética e interna llegan a entrecruzarse en 0.08 segundos, y la energía cinética continúa disminuyendo hasta llegar a cero en el tiempo establecido.



**Figura 60.** Velocidad durante el impacto – concepto C

Se observa en la figura 60 que la velocidad del impacto del concepto C, inicia con un valor de 11 m/s, luego la velocidad reduce gradualmente, sin formar picos de desaceleración brusca hasta el tiempo de impacto de 0.25 segundos, sin tener la necesidad de impactar el módulo final del atenuador.

#### 4.6 Selección del concepto por diseñadores

A continuación, los resultados de los criterios de diseño del atenuador de impacto se presentan en la Tabla 14. Donde se escogerá el concepto que, bajo criterio como diseñadores, tenga mayor ponderación en una escala de 1 a 5, siendo:

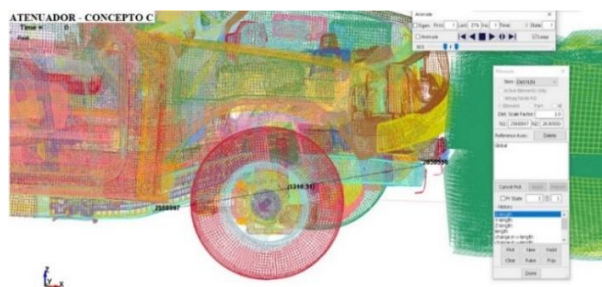
1 = No cumple            3 = Medianamente cumple            5 = Si cumple

**Tabla 14**

*Comparación de objetivos con conceptos.*

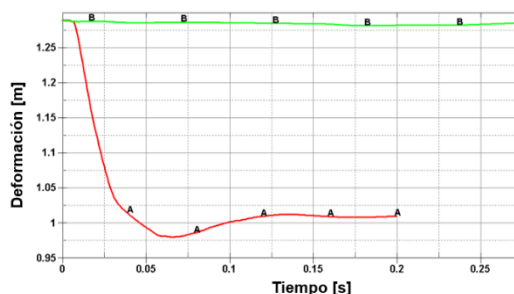
OBJETIVOS / CONCEPTOS	Costo de construcción	Reusable	Rigidez	Estabilidad al impacto	Capacidad de contención	TOTAL	PONDERACIÓN %
Concepto A	5	1	1	1	3	11	44.0 %
Concepto B	3	1	3	1	3	11	44.0 %
Concepto C	3	3	3	5	5	19	76.0 %

De acuerdo a los resultados obtenidos, el concepto C tiene la máxima ponderación del 76.00 %. En cuanto al criterio de deformación con relación a la capacidad de contención y estabilidad al impacto son los que mejor comportamiento y calificación han obtenido. Se concluye que el concepto C cumple los objetivos de diseño descritos razón por la cual queda seleccionado bajo criterio de diseñador y se puede observar en anexo 2. Adicional a esto se da mayor sustento a los resultados midiendo la distancia de deformación en milímetros desde la punta frontal del chasis hasta la altura de inicio de la cabina de pasajeros como lo muestra la figura 61.



**Figura 61.** Medición de deformación de impacto – concepto C

La figura 62, muestra las curvas medidas de deformación donde la curva de color rojo es la medición del impacto sin atenuador, con un valor inicial de 1290 mm y la medida final 980.41 mm. La curva de color verde es la medición del impacto con el concepto C, con un valor inicial de 1290 mm y la medida final 1282.2 mm



**Figura 62.** Deformación de impacto sin atenuador vs concepto C

#### 4.7 Análisis de costo del atenuador de impacto vial

A continuación, la Tabla 15 realiza un análisis de costos del atenuador de impacto. Mediante el peso en kilogramos de la estructura, calculado por software CAD, se determina el precio total en base al costo unitario por unidad de masa de material.

**Tabla 15**

*Costo de material*

Material	Cantidad (kg)	Costo unitario (USD/kg)	Costo total (USD)
Planchas Acero ASTM A36	2020	0.90	1818.00
Tubo cuadrado ASTM A36	5	0.90	4.5
Total:			1822.5

Adicional al costo de material, se debe analizar el costo de los procesos de manufactura, uso de maquinaria y mano de obra para construcción e instalación. En la Tabla 16 se hace el análisis de estos costos, específicamente, cortes, rolado de láminas, soldadura y armado general del atenuador de impacto. Finalmente, el precio total de la estructura se consigue por

la unión de los costos de material y manufactura, obteniéndose un valor global de 5078.05 dólares americanos.

**Tabla 16**

*Costo de manufactura*

Proceso	Cantidad	Costo unitario	Costo total (USD)
Cortes	690	0.60	414.00
Roladora	690	0.35	241.50
Dobladora	172	0.40	68.80
Mano de obra (Soldadura, Armado/Ensamblado)	2025 kg	1.25 USD/kg	2531.25
	Total		3255.55

El proceso de corte recomendado es mediante plasma CNC, para lograr cortes precisos, alta eficiencia y bajo costo de producción. El costo del proceso se obtiene mediante el análisis de los costos individuales, de utilización de equipo, materiales fungibles, energía eléctrica y mano de obra utilizada. En base a este análisis se ha determinado que el costo promedio por el corte de cada placa es de 0.60 USD.

Los procesos de rolado y doblado demandan menor capacidad tecnológica, sin embargo, los tiempos de trabajo son mayores, pues deben realizarse de manera individual para cada parte, por este motivo se encarecen. Se ha determinado un costo de 0.35 y 0.40 USD respectivamente para cada uno de estos procesos en base a los precios de mercado establecidos.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

En glosas finales se puede decir que el proyecto logró cumplir con los objetivos planteados, en cuanto a diseño y simulación del atenuador de impactos vial para vehículos livianos tipo M1.

- Mediante el proceso de selección de material por índice de desempeño y diagramas de Ashby, se destacó el acero A36 como principal opción para la construcción del atenuador de impacto debido a que cumplió las características planteadas como deformabilidad, tenacidad, bajo costo, facilidad de manufactura y accesibilidad.
- El mejor concepto de diseño fue el “C” el cual presenta el mejor comportamiento ante la prueba de impacto. Fue el diseño de mayor solidez y mejor resiliencia, siendo capaz de disipar toda la energía cinética del vehículo al cabo de 0.2 segundos. La deformación total del vehículo decreció 301.79 mm que representa una disminución del 23,5% en relación al impacto contra una pared rígida.
- Se ha simulado mediante software de ingeniería asistida por computador CAE, el impacto frontal de un vehículo Ford Explorer contra diferentes diseños de atenuadores de impacto, con el fin de establecer diseños óptimos en función de la forma, ángulo y espesor de material en el diseño, con el fin de no poner en riesgo a los ocupantes del vehículo.
- Se validó el estudio computacional por medio de un choque real contra una pared rígida, ejecutado por la NCAP. Se comparan los resultados obtenidos en ambas

pruebas y se encontró, un alto nivel de convergencia, por tanto, se da validez a este estudio.

- Se ha realizado un análisis de costos unitarios de producción en base al proceso, utilización de equipos y materiales fungibles y mano de obra calificada. Se ha llegado a determinar un costo total de producción de 5078.05 USD.

## **5.2 Recomendaciones**

- Ingresar los valores de material conforme a los resultados establecidos en las pruebas de laboratorio, ayudará a simular y corregir diseños del atenuador de impacto de una manera más cercana a lo real.
- Para el diseño del atenuador de impacto se debe considerar la forma, espesor, disponibilidad del material, así como también de los procesos de manufactura que implicaría construir.
- El diseño de los atenuadores de impacto debe considerar la superficie frontal de los vehículos tipo M1, más que nada la parte que contiene el chasis y la altura en promedio donde inicia el parachoques delantero hasta el capot del vehículo.
- Se recomienda futuros estudios que contemplen la capacidad de redireccionar al vehículo siniestrado de los atenuadores.

## BIBLIOGRAFÍA

- Águeda Casado, E., García Jiménez, J. L., Gómez Morales, T., Navarro, J. M., & Gracia, J. G. (2016). *Elementos estructurales del vehículo*. Madrid, España: Paraninfo.
- Alberson, R. (2016). AutoMesher for Ls Dyna. *International Ls Dyna*, 10.
- ANT, A. (2019). *Estadísticas sobre Siniestros de Tránsito - Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador - ANT*. Obtenido de <https://www.ant.gob.ec/index.php/noticias/estadisticas>
- Arreola-Rissa, C., Santos-Guzman, J., Esquivel-Guzman, A., Mock, C., & Herrera-Escamilla, A. (2008). *Barriles de absorción y contención del impacto: reducción de mortalidad por accidentes de tránsito*. México.
- Caisaguano Durán, S. O., & Montaleza Guamán, C. (2018). *Diseño de un terminal atenuador de impactos para la seguridad pasiva en las vías*. Cuenca.
- Castro Fernández, V. (2016). *Diseño de un atenuador de impactos para un vehículo Fórmula SAE*. España.
- Chile, M. d. (2014). *Manual de Carreteras*. Chile: Consultoria R&Q.
- Esquivel, A. (2008). Barriles de absorción y contención del impacto:. *ResearchGate*, 6.
- Food safety innovation. (Agosto de 2012). *El uso de utensilios y materiales de plástico en la industria alimenticia*. Obtenido de El uso de utensilios y materiales de plástico en la industria alimenticia:  
<http://www.ideafoodsafetyinnovation.com/newsletters/2012/08/el-uso-de-utensilios-y-materiales-de-plastico-en-la-industria-alimenticia/>
- Granta Design. (2013). CES EduPack. *Material's selection*. Cambridge, Reino Unido: Granta Desing.

- HDFONDOS. (13 de Junio de 2018). *HDFONDOS*. Obtenido de <http://www.hdfondos.eu/imagen/766567/jaguar-f-type-coupe-coche-coches-de-color-rojo-vehiculo-fondo-gris-vista-lateral>
- Hung, C. P. (2014). Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad. *Secretaría de Comunicaciones y Transportes*, 770.
- HYUNDAI. (13 de Junio de 2018). *www.hyundai.com.ec*. Obtenido de <https://www.hyundai.com.ec/showroom/grand-i10-sedan/>
- INEC. (Diciembre de 2018). *Ecuador en cifras*. Obtenido de [http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_Economicas/Estadistica de Transporte/2017](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Estadistica_de_Transporte/2017)
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2012). *NTE INEN 2656 Clasificación Vehicular*. Quito.
- Johnson, B. (2010). *Mecánica Vectorial para Ingenieros Dinámica*. México: Mc Graw Hill.
- Juarez, I. (1991). *Los atenuadores de impacto*. España.
- Lee, G. (13 de Junio de 2018). *Altair University*. Obtenido de <https://altairuniversity.com/wp-content/uploads/2014/02/meshing.pdf>
- Livermore Software Technology Corporation. (14 de Junio de 2018). *Livermore Software Technology Corporation*. Obtenido de <http://www.lstc.com/>
- Luna Bacuilima, J. L., Pucha Tampo, M. V., & Valencia Palomeque, F. J. (2013). *Diseño y construcción para un atenuador de impacto para un vehículo monoplaza Formula Student*. Cuenca.
- Luque Rodríguez, P., Álvarez Mántaras, D., & Vera, C. (2004). *Ingeniería del Automóvil: Sistemas y comportamiento dinámico*. España: Paraninfo.



- Menghini, M., Tambur, D. L., & Mundo, L. M. (2015). *Diseño y validación de sistema de atenuación de impacto mediante estructura colapsable*. Buenos Aires.
- Mirlisenna, G. (14 de Junio de 2018). *ESSS*. Obtenido de <https://www.esss.co/blog/es/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>
- Motor. (13 de Junio de 2018). *Motor*. Obtenido de <http://www.motor.com.co/actualidad/tecnologia/prestele-atencion-seguridad-activa-pasiva-carro/20915>
- Oliver, J. (2005). *Implantación de una unidad productiva dedicada a la fabricación de estructuras soldadas de aluminio*. España.
- Pagola Correa, C. (2015). *Estudio numérico y experimental de un atenuador de impacto para Fórmula SAE*. Sevilla.
- Quieroapuntes. (13 de Junio de 2018). *Quieroapuntes*. Obtenido de [http://www.quieroapuntes.com/seguridad-pasiva-y-activa-en-el-automovil\\_1.html](http://www.quieroapuntes.com/seguridad-pasiva-y-activa-en-el-automovil_1.html)
- Shen, W., & Lei, G. (2012). *Introduction to the explicit finite element method for nonlinear transient dynamics*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- SIBARITISSIMO. (13 de Junio de 2018). *SIBARITISSIMO*. Obtenido de <http://www.sibaritissimo.com/hyundai-equus-limousine-limousina-de-lujo-made-in-corea/>
- SIXT. (13 de Junio de 2018). *SIXT rent a car*. Obtenido de <https://www.sixt.es/alquiler-descapotable/>
- Talleres chинаres. (13 de Junio de 2018). *Talleres chинаres*. Obtenido de <http://www.tallereschinas.com/vehiculo-nuevo-talleres-chinas/flat-tipo-station-wagon>

Todoautos. (13 de Junio de 2018). *Todoautos*. Obtenido de

<http://www.todoautos.com.pe/portal/autos/178-lanzamientos/10030-dfsk-presenta-nueva-minivan-con-capacidad-para-7-pasajeros>

TRANSPOLIS. (7 de Marzo de 2018). *TRANSPOLIS*. Obtenido de TRANSPOLIS:

<http://www.transpolis.fr/en/n/Medias/News/LIER-participant-to-the-9th-European-LS-DYNA-Conference-June-3th-2013-i424.html>