

Universidad de Ingeniería y Tecnología

## TESIS DE PREGRADO

**Estudio comparativo de la absorción de energía de impacto frontal entre parachoques de 3 vehículos sedán, para una propuesta de diseño más segura y liviana a los pasajeros**

Pinedo Quintana, Newton

*Award date:*  
2023

[Link to publication](#)

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA ABSORCIÓN DE  
ENERGÍA DE IMPACTO FRONTAL ENTRE  
PARACHOQUES DE 3 VEHÍCULOS SEDÁN, PARA  
UNA PROPUESTA DE DISEÑO MÁS SEGURA Y  
LIVIANA A LOS PASAJEROS**

**TESIS**

Para optar el título profesional de ingeniero mecánico

**AUTOR(ES)**

Newton Pinedo Quintana (ORCID: 0000-0003-1742-7652)

**ASESOR(ES)**

PhD. Samuel Charca Mamani (ORCID: 0000-0002-8302-7393)

Lima – Perú

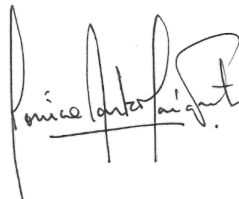
2023

## DECLARACIÓN JURADA

Yo, Mónica Cecilia Santa María Fuster identificada con DNI No 18226712 en mi condición de autoridad responsable de validar la autenticidad de los trabajos de investigación y tesis de la UNIVERSIDAD DE INGENIERIA Y TECNOLOGIA, DECLARO BAJO JURAMENTO:

Que la tesis denominada “ESTUDIO COMPARATIVO DE LA ABSORCIÓN DE ENERGÍA DE IMPACTO FRONTAL ENTRE PARACHOQUES DE 3 VEHÍCULOS SEDÁN, PARA UNA PROPUESTA DE DISEÑO MÁS SEGURA Y LIVIANA A LOS PASAJEROS” ha sido elaborada por el señor Newton Pinedo Quintana, con la asesoría de Samuel Charca Mamani, identificado con DNI 24717255, y que se presenta para obtener el título profesional de Ingeniero mecánico, ha sido sometida a los mecanismos de control y sanciones anti plagio previstos en la normativa interna de la universidad, encontrándose un porcentaje de similitud de 0%.

En fe de lo cual firmo la presente.



Dra. Mónica Santa María Fuster  
Directora de Investigación

En Barranco, el 13 de febrero de 2023

*Dedicatoria:*

A mis hermanas y padres quienes están presentes desde el comienzo de mis días. A mi asesor y a todos los maestros que me instruyeron a lo largo de la carrera universitaria en UTEC.

*Agradecimientos:*

Agradecimiento especial a mi asesor Samuel Charca por su orientación para el logro del presente trabajo y por confiar en mi para el desarrollo de investigación desde el año 2021.

# TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>RESUMEN .....</b>	<b>11</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>12</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>27</b>
1.1.    Estadística de los choques vehiculares .....	27
1.1.1.    Reducción de víctimas mortales en los últimos 20 años .....	27
1.1.2.    Personas y vehículos más afectados .....	30
1.1.3.    Tipos de choques y sus frecuencias .....	31
1.2.    Regulaciones y pruebas a automóviles .....	32
1.2.1.    Regulaciones internacionales, americanas y europeas .....	33
1.2.2.    Pruebas de impacto frontal .....	34
1.2.3.    Análisis de elementos finitos para evaluación de impacto frontal .....	39
1.3.    El parachoques en automóviles sedán .....	42
1.3.1.    Componentes .....	42
1.3.2.    La viga .....	44
1.3.3.    Crash box .....	45
1.3.4.    Fabricación de viga .....	47
1.4.    Análisis de impacto frontal en parachoques .....	48
1.4.1.    Indicadores de performance .....	49
1.4.2.    Parachoque convencional reportado .....	52
1.4.3.    Método experimental .....	54
1.4.4.    Método computacional .....	56
1.4.5.    Relación entre variables .....	57
<b>CAPÍTULO II METODOLOGÍA .....</b>	<b>60</b>

2.1.	Caracterización de la investigación .....	60
2.2.	Fuentes y técnicas de recolección de información .....	60
2.3.	Variables de la investigación.....	61
2.4.	Diseño experimental .....	62
2.4.1.	Selección de modelos FE de automóviles sedán .....	63
2.4.2.	Extracción de parachoques .....	65
2.4.3.	Asignación de propiedades al parachoques .....	65
2.4.4.	Preprocesamiento de simulación .....	66
2.4.5.	Simulación de impactos.....	67
2.4.6.	Posprocesamiento de simulación.....	68
2.4.7.	Criterios de evaluación a parachoques y sus componentes .....	69
2.4.8.	Reducción del desplazamiento máximo (DM) al componente crítico .....	70
<b>CAPÍTULO III RESULTADOS .....</b>		<b>71</b>
3.1.	Selección y generación de modelos.....	71
3.2.	Análisis de impacto a parachoques.....	73
3.3.	Análisis de impacto a viga y crash box .....	78
3.4.	Análisis de modificaciones al modelo base.....	80
<b>CONCLUSIONES .....</b>		<b>83</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>85</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>92</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.1</b> Resumen de reporte de accidentes vehiculares en USA, 2019-2020 .....	28
<b>Tabla 1.2</b> Frecuencias de los tipos de choques en un automóbiles sedán. [36].....	31
<b>Tabla 1.3</b> Efecto de posición inicial sobre la fuerza de impacto máxima. [13].....	55
<b>Tabla 1.4</b> Fuerzas de reacción y tiempo para las 3 alturas de posición inicial [13] .....	57
<b>Tabla 1.5</b> Variables independientes identificadas en la literatura .....	58
<b>Tabla 1.6</b> Variables dependientes identificadas en la literatura .....	58
<b>Tabla 2.1</b> Definición de variables de investigación.....	61
<b>Tabla 2.2</b> Unidades de medidas empleadas .....	62
<b>Tabla 2.3</b> Criterios de selección de modelo FE .....	63
<b>Tabla 2.4</b> Matriz morfológica para selección de modelos FE .....	64
<b>Tabla 2.5</b> Criterios de evaluación de parachoques .....	69
<b>Tabla 2.6</b> Criterios de evaluación de componentes .....	69
<b>Tabla 3.1</b> Resumen de los 3 modelos de automóbiles [44] .....	72
<b>Tabla 3.2</b> Propiedades de los tres parachoques .....	73
<b>Tabla 3.3</b> Comparación de parachoques .....	77
<b>Tabla 3.4</b> Criterios de evaluación de componentes .....	80
<b>Tabla 3.5</b> Resultados obtenidos del modelo base y las tres modificaciones .....	81



# ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.1</b> Fatalidades y tasa de fatalidad por 100 millones VMT en USA, 1975-2020 ....	28
<b>Figura 1.2</b> Tendencia general de muertes en carreteras en 33 países, 2010-2020.....	29
<b>Figura 1.3</b> Distribución del tipo de vehículos afectados en accidentes, 2020 .....	30
<b>Figura 1.4</b> Tipos de choques a automóviles sedán. [36].....	32
<b>Figura 1.5</b> Tipos de pruebas realizadas a automóviles para cumplir regulaciones. [37].....	32
<b>Figura 1.6</b> Pilares del plan de acción de la ONU, 2011-2020. [7] .....	33
<b>Figura 1.7</b> Organización de trabajo de la WP.29. [39].....	34
<b>Figura 1.8</b> Vista de vehículo y dummy tras accidente (puerta desconectada). [40].....	35
<b>Figura 1.9</b> Barrera de impacto de la prueba IIHS. [41].....	36
<b>Figura 1.10</b> Vehículo contactando barrera de la prueba NCAR. [42].....	36
<b>Figura 1.11</b> Daños innecesarios por parachoque bajo. [43] .....	37
<b>Figura 1.12</b> Parachoque desalineado y alineado. [43].....	37
<b>Figura 1.13</b> Vehículo en prueba Euro NCAP. [40] .....	38
<b>Figura 1.14</b> Dummies desarrollados para estudiar a respuesta en personas. [40] .....	39
<b>Figura 1.15</b> Modelo CAD de automóvil sedán. [46].....	40
<b>Figura 1.16</b> Configuración de compresión en crash box. [47] .....	40
<b>Figura 1.17</b> Análisis de viga aislada. [46] .....	41
<b>Figura 1.18</b> Modelos de parachoques y pared rígida. [19].....	41
<b>Figura 1.19</b> Vista del parachoques tras retirar fascia en vehículo sedán. [21] .....	42
<b>Figura 1.20</b> Componentes del parachoques. [48] .....	43
<b>Figura 1.21</b> Vista interna de vehículo sin parachoques. [21] .....	43

<b>Figura 1.22</b> Configuraciones de parachoques comunes. [49] .....	44
<b>Figura 1.23</b> Secciones transversales comunes de la viga del parachoques. [49].....	45
<b>Figura 1.24</b> Vistas del Crash box en parachoques a) vista lateral [50], b) vista posterior [51], c) vista iso. [52]. .....	46
<b>Figura 1.25</b> Crash box y viga de parachoques tras impacto de baja velocidad. [53] .....	46
<b>Figura 1.26</b> Crash box de parachoques tras impacto de alta velocidad: a) antes, b) después. [54] .....	47
<b>Figura 1.27</b> Proceso de perfilado de lámina metálica con rodillos. [55].....	47
<b>Figura 1.28</b> Conformado en caliente de plancha metálica. [49].....	48
<b>Figura 1.29</b> Curva característica de deformación en función de tiempo en impacto. [56]..	49
<b>Figura 1.30</b> Pulso típico de aceleración en un choque de automóvil. [57].....	50
<b>Figura 1.31</b> Curvas de la fuerza de impacto. [47] .....	51
<b>Figura 1.32</b> Modelo Fe de parachoques a) viga y crash box, b) perfil de viga, y c) perfil de crash box. [19] .....	52
<b>Figura 1.33</b> Configuración de colisión a parachoques. [19].....	53
<b>Figura 1.34</b> Capturas en milisegundos del impacto. [19].....	53
<b>Figura 1.35</b> Resultados obtenidos del experimento de colisión al parachoques. [19].....	54
<b>Figura 1.36</b> Viga sujeta con brackets en los extremos. [13] .....	54
<b>Figura 1.37</b> Vista de los transductores y set del experimento. [13] .....	55
<b>Figura 1.38</b> Generación del modelo CAD y FE del parachoques. [13].....	56
<b>Figura 2.1</b> Diagrama del proceso de investigación .....	62
<b>Figura 2.2</b> Configuración de impacto frontal a parachoques .....	66
<b>Figura 3.1</b> Modelos FE de automóviles sedán: a) modelo A, b) modelo B, c) modelo C... 71	
<b>Figura 3.2</b> Parachoques de los vehículos sedán de: a) modelo A, b) modelo B, c) modelo C .....	72

<b>Figura 3.3</b> Perfil de viga de los parachoques de: a) modelo A, b) modelo B, c) modelo C	72
<b>Figura 3.4</b> Distribución de energías durante impacto frontal de 4 km/h a modelo A	74
<b>Figura 3.5</b> Distribución de energías durante impacto frontal de 20 km/h a modelo A	75
<b>Figura 3.6</b> Deformación de parachoques en cuatro velocidades de impacto	75
<b>Figura 3.7</b> Desplazamiento máximo en función de la velocidad de impacto a los parachoques	76
<b>Figura 3.8</b> Absorción de energía específica en función de la velocidad de impacto a parachoques	77
<b>Figura 3.9</b> Respuesta de componentes del parachoques modelo A	78
<b>Figura 3.10</b> Respuesta de componentes del parachoques modelo B	78
<b>Figura 3.11</b> Respuesta de componentes del parachoques modelo C	79
<b>Figura 3.12</b> Comparación de SEA en vigas de parachoques	79
<b>Figura 3.13</b> Deformación inicial del modelo base	80
<b>Figura 3.14</b> Vista de modelo base y modificaciones	81
<b>Figura 3.15</b> Comparación de SEA en modelo base y modificación 3	82

## ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
<b>Anexo 1:</b> Selección de modelos FE de automóviles .....	91
<b>Anexo 2:</b> Distribución de energías en impacto frontal a los tres parachoques.....	92
<b>Anexo 3:</b> Respuesta mecánica de modelo base y modificaciones con mapas de calor ....	96

## **RESUMEN**

El parachoques es un componente vehicular que absorbe energía de impacto frontal en un accidente mediante su deformación y protege tanto a los pasajeros y a la propiedad. En este estudio, la absorción de energía (EA), absorción de energía específica (SEA) y deformación máxima (DM) son comparados en tres modelos de parachoques al realizar colisiones simuladas con la configuración de la prueba Euro NCAP: Front Full Width Rigid Barrier Test. Dichos modelos fueron obtenidos de tres automóviles sedán digitalizados para investigación por la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico de Carreteras (NHTSA) de USA. El programa empleado fue LS-DYNA y se identificó que la viga absorbe mayor energía en impactos frontales a bajas velocidades, mientras que el crash box absorbe más energía a mayores velocidades. Después, las tres vigas fueron analizadas y se realizó una propuesta de diseño a la de menor DM y mayor SEA. Así, la viga modificada redujo un 6.77% la deformación máxima a costa de un peso 0.37% mayor, respecto a la viga original.

### **PALABRAS CLAVES:**

Parachoques; Vehículos Sedán; Impacto a baja velocidad; Absorción de energía; Evaluación comparativa; Optimización

# **ABSTRACT**

## **COMPARATIVE STUDY OF THE FRONT IMPACT ENERGY ABSORPTION BETWEEN THE BUMPER OF 3 SEDAN VEHICLES, FOR A SAFER AND LIGHTER DESIGN PROPOSAL FOR PASSENGERS**

The bumper is a vehicle component that absorbs frontal impact energy in an accident by deforming and protects both passengers and property. In this study, energy absorption (EA), specific energy absorption (SEA) and maximum deformation (DM) are compared in three bumper models when performing simulated collisions with the Euro NCAP test configuration: Front Full Width Rigid Barrier Test. These models were obtained from three digitized sedan cars for research by the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) of the USA. The program used was LS-DYNA and it was identified that the beam absorbs more energy in frontal impacts at low speeds, while the crash box absorbs more energy at higher speeds. Afterwards, the three beams were analyzed and a design proposal was made for the one with the lowest DM and the highest SEA. Thus, the modified beam reduced the maximum deformation by 6.67% at the cost of a 0.37% higher weight, compared to the original beam.

### **KEYWORDS:**

Bumper; sedan vehicles; low-speed impact; energy absorption; benchmark; optimization.

# INTRODUCCIÓN

Desde el comienzo de la existencia, el ser humano tuvo la necesidad de transportarse para explorar y cazar. Actualmente, dicha necesidad es vigente para otras actividades por vías como la terrestre, aérea y acuática, por lo que diversos vehículos de transporte fueron inventados y desarrollados como automóviles, barcos y aviones. De estos, el más producido es el automóvil por su mayor comodidad para las personas, tamaño, espacio, entre otras razones [1]. Para 1960 en Estados Unidos existieron alrededor de 62 millones de automóviles [2], para el 2020 alrededor de 194 millones de unidades [3]. Por otro lado, de acuerdo con los datos tan solo en el año 2021 se concretó la venta de más de 56 millones de unidades a nivel global [4].

Dada la existencia y mayor producción de automóviles año tras año, en EE.UU. el Departamento de Transporte y su Administración Nacional de Seguridad del Tráfico de Carreteras (NHTSA) declaró crisis nacional el registro de muertes por accidentes vehiculares de alrededor de 32 mil personas en los nueve primeros meses del año 2021, un 12% mayor al valor del año anterior y un récord no visto desde el año 2006 [5]. En Perú, la Superintendencia de Transportes Terrestre, Carga y Mercancías (SUTRAN) reportó 883 personas fallecidas en accidentes vehiculares de enero a noviembre del 2021, un 46% superior al año 2020; asimismo, en este mismo periodo se registraron 5175 accidentes de tránsito, un 47% superior al año anterior y un 27% superior respecto al año 2019 [6]. De acuerdo con el último reporte estadístico, la modalidad de ocurrencia más frecuente en Perú es el choque con 47%, seguido de despiste con 45%; donde los vehículos que participaron más son Autos y camionetas pick up con 39% y Carga con 34%. A partir de esta información, la pérdida de vidas asciende a decenas de miles de personas en choques de tránsito, representa un problema global y por ello las Naciones Unidas presentó un plan de acción, normas y asistencia técnica a los países y productores de vehículos [7] como parte de los objetivos y metas de desarrollo sostenible relacionado con la seguridad vial.

Respecto a los automóviles, en las últimas décadas el desarrollo interno de sistemas de seguridad activos y pasivos logró reducir la fatalidad de los accidentes vehiculares [8]. Así, un pasajero tiene más probabilidad de sobrevivir a un impacto frontal en el presente que hace 30 años, cuando no existían estos sistemas. Por consiguiente, el desarrollo y mejora de estos es un objetivo de los productores de automóviles y dado la mayor frecuencia de impactos frontales, los parachoques aún representan una oportunidad de mejora. Este es un sistema de seguridad pasivo porque funciona durante un accidente frontal y protege tanto a la persona y a la propiedad. La función principal de este es la protección de los pasajeros en impactos de baja velocidad, así como también proteger el capó, la cajuela, los sistemas de combustible, enfriamiento, escape y los faros delanteros [9]. Por consiguiente, el parachoques requiere ser estudiado y analizado, con el fin de determinar si los modelos actuales son los óptimos con respecto a sus capacidades de absorción de energía específica (SEA) en impactos de baja velocidad.

## **Alcance**

Este trabajo de investigación busca realizar un estudio comparativo entre tres parachoques de vehículos sedán. El estudio se centrará en la respuesta de los parachoques y sus dos componentes principales: la viga y crash box, en impactos frontales a las velocidades de cuatro, ocho, doce y veinte kilómetros por hora con la configuración de la prueba Euro NCAP: Front Full Width Rigid Barrier Test [10]. Estas colisiones serán desarrolladas de forma computacional por análisis de elementos finitos con el programa LS-DYNA.

Los modelos de elementos finitos de los tres parachoques serán obtenidos de tres automóviles sedán digitalizados y disponibles en el repositorio de la Administración Nacional de Seguridad de Seguridad del Tráfico en las Carreteras (NHTSA) de EE.UU [11], los cuales fueron simulados y validados por la institución con pruebas experimentales. Asimismo, estos modelos cuentan con tamaño de malla y materiales validados tanto para la viga y crash box, por lo que garantizan un correcto estudio comparativo de los parachoques.



La comparación de los parachoques estará basada en los siguientes indicadores: Absorción de Energía (EA), Absorción de Energía Específica (SEA). y deformación máxima (DM). Estos serán visibles en el postprocesamiento de cada prueba simulada y caracterizarán a cada parachoque, la viga y crash box que lo conforman. La validación de la simulación por análisis de elementos finitos en el programa LS-DYNA será dado por el replicamiento de los experimentos reportados en [12] y [13]. Finalmente, valores de deformación máxima y peso de los componentes serán verificados de acuerdo con la norma americana reportado en [14].

## **Antecedentes**

Los automóviles son evaluados de forma experimental y computacional por empresas automotivas como VOLVO en su Crash Test Laboratory [15], centros de investigación como Thatcham Research [16] e institutos y agencias como IIHS, NHTSA, NCAP, EURONCAP, RCAR. Estas agencias califican la seguridad de los automóviles y, a partir de ello, informan y también influyen en la compra de vehículos a los ciudadanos; en ese sentido, las empresas automotivas buscan producir unidades vehiculares que obtengan una calificación alta y así sean más adquiridas [17]. La calificación es dada mediante la respuesta del vehículo a experimentos controlados de colisión, estos son realizados con unidades disponibles al público y también mediante análisis computacional a modelos virtualizados de automóviles detallados, los cuales incluyen cada parte y material [15]. Por consiguiente, cada experimento de colisión controlado busca representar un accidente real, son de alto costo y son financiados por las asociaciones de seguro de autos. Los procedimientos siguen la norma de cada agencia y ello permite su replicabilidad y confiabilidad. A diferencia de los experimentos, el uso de análisis computacional para simular impactos en los vehículos representa un menor costo, por lo que son repetidos en mayor cantidad, previo a los experimentos y posteriormente validados.

Para los parachoques se desarrolló una prueba específica llamada Bumper Test and Rating Protocol por la institución IIHS en EE.UU [10]. En europa, por otro lado, la agencia RCAR desarrolló una prueba llamada Bumper Test para evaluar también este sistema de

seguridad pasivo [18]. A partir de estas pruebas normadas, diversos artículos científicos las usaron como referencia para realizar sus propios ensayos de forma experimental y simulada. Por ejemplo, Xu [19] utilizó la norma de la IIHS como referencia para evaluar una geometría transversal nueva en la viga del parachoques, mientras que Taylor [14] utilizó la norma RCAR para optimizar y evaluar geometrías transversales de parachoques.

De acuerdo con el reporte de evaluación de parachoques de la NHTSA, actualmente estos componentes en los automóviles presentan deficiencias en cuestión de tamaño, altura y resistencia a baja velocidad [20]. De acuerdo con el reporte, las unidades no presentan protección en las esquinas ya que la viga del parachoques solo se encuentra hasta los extremos conectados al crash box. Esta ausencia en las esquinas ocasiona que durante un impacto de baja velocidad se afecten los faros, el tanque de líquido limpiaparabrisas y las ruedas, además de la fascia delantera. Respecto a la altura, una gran cantidad de automóviles fueron reportados con diferentes alturas del parachoques frontal, por lo que, en la prueba de impacto, así como en un escenario real de colisión, el parachoques no realiza su función y daños innecesarios al vehículo son ocasionados. Finalmente, automóviles con una deficiente resistencia fueron reportados en impacto frontal a baja velocidad debido a que la intrusión de la viga del parachoques afectó al radiador y otros componentes de alto costo. De acuerdo con el reporte, muchos ciudadanos prefieren un automóvil económico, pero no es económico que un choque a baja velocidad ocasione una reparación de un tercio del costo del vehículo.

Un parachoques con baja absorción de energía específica (SEA) ocasiona graves daños al motor, radiador y otros componentes, y con ello un alto costo de reparación tras un accidente vehicular de baja velocidad. A lo largo de la historia, este componente fue evolucionando en forma y material mediante investigación para aumentar su SEA [21]. Así, en la última década, diversos investigadores presentaron interés en crear esta estructura con prestaciones de absorción de energía cada vez superior y, por tanto, exhibieron propuestas de mejora, definiendo teorías y variables independientes y dependientes en el fenómeno de la colisión. De acuerdo con lo reportado en [22], se analizaron y simularon geometrías biomiméticas a la flora y fauna. Por ejemplo, estructuras basadas en la microestructura de

escarabajos y hierbas de zonas con corrientes de viento de velocidad elevada. Esta tendencia de innovaciones está basada en la naturaleza porque la evolución de siglos que llevan consigo las especies animales y vegetales han demostrado ser las más óptimas posibles. De modo similar, el bambú, un material compuesto natural, presenta una microestructura jerarquizada; en específico, a lo largo de su espesor posee un incremento de densidad de fibras, generalmente del interior hacia el exterior [23], lo cual demostró considerables propiedades mecánicas para su protección del entorno en la dirección longitudinal y transversal [24].

Cuando se trata de estudios de impacto a parachoques de forma computacional, dos programas son los más usados: LS-DYNA y ABAQUS. De acuerdo con lo reportado por Muhammad et al. [25] los estudios realizados de impacto a parachoques en estos dos programas son los preferidos por los investigadores por la gran precisión y convergencia de resultados con los hallados experimentalmente. Por consiguiente, simular la colisión de un parachoques puede ser llevado a cabo de diversas formas con referencia a las normas dadas por IIHS y RCAR. Por ejemplo, Guangyong [26] analizó la viga de un parachoques de tres celdas en tres tipos de impacto: frontal hacia pared, a columna en centro y a 40% de área de impacto en extremo frontal. Obteniendo como resultado una absorción de energía mayor en el primer tipo de impacto, uno intermedio en el tercero y uno inferior en el segundo, lo cual demostró que la energía cinética de impacto es disipada de forma efectiva cuando el área de impacto es mayor en la viga del parachoques.

Asimismo, la investigación realizada por Zarei [27] analizó la absorción de energía específica en colisión de tubos de aluminio vacíos y con foam del mismo material en su interior. Así, realizó una optimización en el programa LS-DYNA de 0.5 hasta 3.5 mm de espesor del tubo y logró equiparar la capacidad de absorción de un tubo vacío de espesor 3.5 mm a un tubo de 3.2 mm con foam en su interior, pero este último con un 28% de peso menor. Por otro lado, Zhang [28] analizó una viga en forma de tubo hueco de paredes delgadas reforzada con nervaduras y demostró numéricamente que el empleo de nervaduras en parachoques presenta una mejora de la absorción de energía en 11% y una fuerza de colisión inicial menor a la reportada en los tubos vacíos y rellenos con foam.

Después, Marzbanrad [29] analizó tres materiales: acero comercial bare-CS, aluminio 3105-H18 y magnesio AZ31B, de los cuales el que presenta menor módulo de Young con 68.9 MPa y mayor esfuerzo de fluencia con 193 MPa es el aluminio. Esta investigación determinó que aquellos materiales con un bajo módulo de elasticidad y alto esfuerzo de fluencia tienden a un buen comportamiento en impacto puesto que los esfuerzos máximos en la estructura de la viga del parachoques durante un impacto serán menores al esfuerzo de fluencia. Entonces el material de Aluminio fue definido como ideal para la estructura del parachoques y el autor sugiere dos parámetros de diseño: una deflexión menor a 50 mm y que el esfuerzo máximo sea menor al esfuerzo de fluencia del material. Por otro lado, Brown [30] demuestra que para impactos de mayor velocidad se requiere una mayor resistencia de la viga del parachoques por lo que con aluminio se requiere un mayor espesor y en el caso de acero uno de grado más resistente. De esta manera, el reporte concluye que los aceros de altos grados de resistencia son superiores al aluminio en términos de peso y precio en condiciones críticas.

## **Justificación y motivación**

3000 personas fallecen cada día a causa de los accidentes vehiculares y alrededor de 50 millones de personas sufren lesiones por esto en un año. Aún peor, 1.35 millones de personas cada año fallecen a causa de estos choques y es la causa principal de fallecimiento de personas de 5 a 29 años [7]. La evolución de la seguridad en los automóviles tiene como objetivo proteger a los pasajeros y a la unidad vehicular antes y durante un accidente. Por ello, sistemas de protección fueron introducidos a los vehículos tales como bolsas de aire, sistemas de frenos inteligentes y estructuras más resistentes [31]. La institución IIHS registró ensayos de colisión frontal y comparó los automóviles antiguos con los actuales [32]; los resultados indican una significativa mejora de la protección a los pasajeros por una activación más rápida de las bolsas de aire y menor aplastamiento frontal del vehículo. Dicho menor aplastamiento se debe al uso de estructuras con una absorción de energía de impacto superior a las antiguas, donde el parachoques es el principal y primer componente en sufrir el impacto.

A partir de ello, el parachoques también evolucionó desde una simple barra de acero hasta estructuras más complejas y efectivas [21].

Este estudio comparte dicho objetivo puesto que en la actualidad los parachoques de automóviles pueden ser analizados para conocer sus prestaciones mecánicas durante un impacto de baja velocidad. Asimismo, el presente trabajo se alinea con el pilar Safer vehicles del plan de acción propuesto por las Naciones Unidas [7]. Teniendo en cuenta esto, se buscó desarrollar un estudio comparativo en los parachoques de tres automóviles sedán. Por consiguiente, la importancia de esta investigación radica en la futura posibilidad de ser empleada como referencia para el desarrollo de nuevas propuestas. En ese sentido, futuras propuestas de diseño de parachoques serán capaces de comparar sus resultados a los presentados en este estudio. Asimismo, se presenta la escalabilidad de la investigación a otros tipos de vehículos como camiones, pickups, entre otros, por lo que se incentiva una mayor investigación, caracterización y desarrollo de los parachoques.

## **Objetivo general**

Realizar un estudio comparativo entre parachoques de tres automóviles sedán sobre la absorción de energía al impacto frontal a baja velocidad, para una propuesta de diseño más segura y liviana a los pasajeros.

## **Objetivos específicos**

- Seleccionar y generar tres modelos de parachoques de vehículos sedán, incluyendo los materiales de los componentes.

- Identificar qué componente en los tres parachoques, viga o crash box, presenta mayor Absorción de Energía ( $EA^1$ ) en impactos tipo frontal completo a bajas velocidades.
- Determinar qué parachoques presenta el componente con mayor Absorción de Energía Específica ( $SEA^2$ ) y menor deformación máxima (DM) en impacto frontal a 4 km/h.
- Realizar una propuesta de diseño al componente crítico del parachoques identificado para reducir la deformación máxima (DM) en impactos frontales a 4 km/h.

---

<sup>1</sup> Energy Absorption

<sup>2</sup> Specific Energy Absorption

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

En este capítulo se detalla el fundamento teórico en el que se basó el estudio realizado. En primer lugar, la estadística de los choques vehiculares será examinado; luego, el parachoques y normas de seguridad en automóviles serán descritos. Después, el impacto frontal en parachoques será explicado y finalmente materiales de este sistema serán definidos.

### **1.1. Estadística de los choques vehiculares**

En esta sección se presenta información sobre el registro de víctimas por accidentes de tránsito, el grupo de personas y vehículo más afectado, y finalmente los tipos de choques y sus frecuencias de acontecimiento.

#### **1.1.1. Reducción de víctimas mortales en los últimos 20 años**

La Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras (NHTSA<sup>3</sup>) es una agencia del Departamento de Transporte de los EE. UU. fundada con el objetivo de reducir las muertes, lesiones y los costos económicos debido a los accidentes automovilísticos [33]. Para ello, este organismo nacional definió pruebas de impacto para vehículos y así evaluó y calificó modelos disponibles para el público. A partir de esto, compradores cuentan con la información disponible en una base de datos, son capaces de tomar decisiones informadas y los productores buscan obtener modelos de clasificación sobresaliente en cada evaluación realizada por la NHTSA. Adicionalmente, empresas de seguro vehicular financian agencias externas para determinar el precio de prima del seguro que ofrecerán en función del daño a la propiedad vehicular. Por consiguiente, el último

---

<sup>3</sup> National Highway traffic Safety Administration

reporte publicado por la NHTSA corresponde al año 2020 y sus hallazgos orientados a la presente investigación son presentados en la tabla 1.1.

---

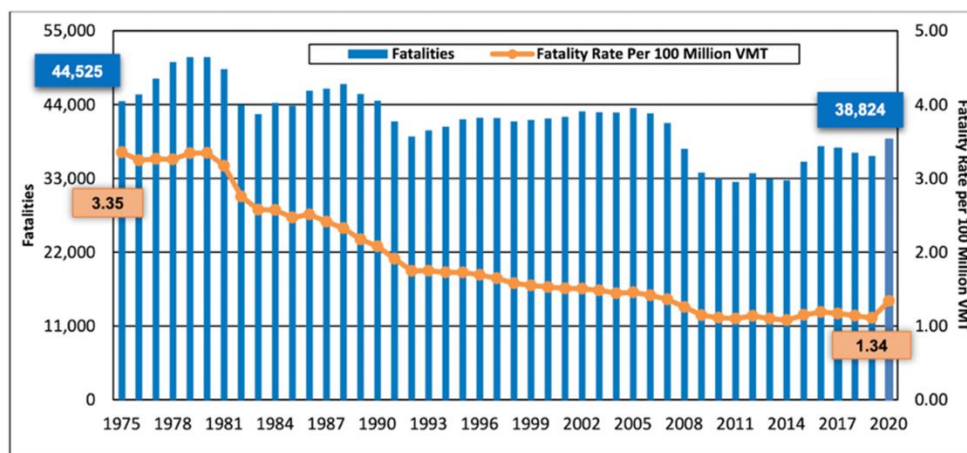
Hallazgos de la NHTSA en el periodo 2019-2020

---

- Las muertes aumentaron y las personas lesionadas disminuyeron.
  - Aumentaron las muertes relacionadas con el no uso del cinturón de seguridad, la conducción bajo los efectos del alcohol y exceso de velocidad.
  - Las muertes urbanas aumentaron un 8,5 por ciento; mientras las muertes rurales en un 2,3 por ciento.
  - Las muertes nocturnas (6 p. m. a 5:59 a. m.) se incrementó en un 12 por ciento; las muertes por accidentes de tránsito diurno (6 a. m. a 5:59 p. m.) aumentaron un 1,4 por ciento.
- 

**Tabla 2.1** Resumen de reporte de accidentes vehiculares en USA, 2019-2020  
Fuente: Overview of motor vehicle crashes in 2020 [33]

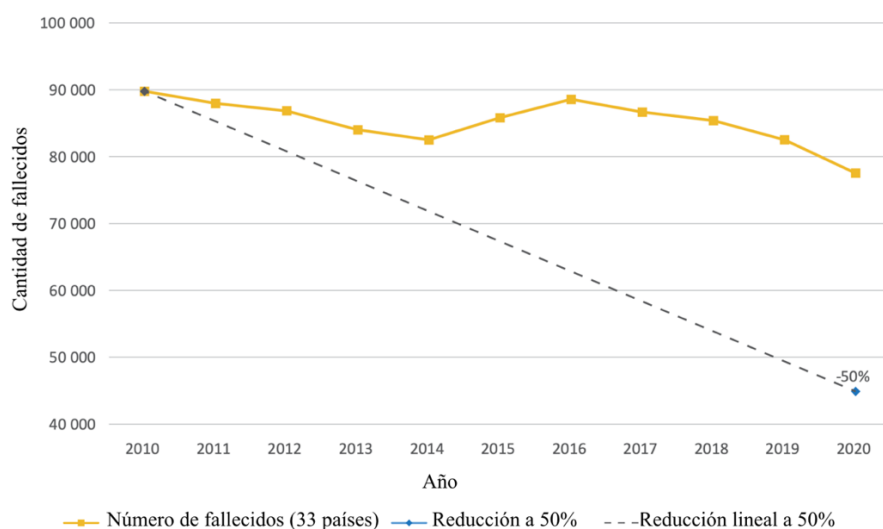
A partir de estos hallazgos (Tabla 1.1), es posible contextualizar el panorama de los accidentes en dicho periodo; sin embargo, para conocer la tendencia se requiere de un periodo de tiempo mayor. La figura 1.1 muestra la fatalidad y su tasa, entre los años 1975 al 2020, por 100 millones de millas recorridas de un vehículo, VMT por sus siglas en inglés.



**Figura 2.1** Fatalidades y tasa de fatalidad por 100 millones VMT en USA, 1975-2020  
Fuente: Overview of motor vehicle crashes in 2020 [33]



A partir de la Figura 1.1, se observa que la tendencia de fatalidades en accidentes vehiculares disminuyó de una tasa de 3.35 a un valor de 1.34, entre los años 1975 a 2020 en los Estados Unidos de América. Sin embargo, en el año 2020 este valor de tasa fue el más alto registrado desde el año 2007, lo cual llamó la atención de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para impulsar la toma de medidas porque el progreso ha sido insuficiente para tratar la falta de seguridad en las carreteras del mundo [34]. Esta afirmación parte de conocer el panorama mundial, del cual la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, OECD por sus siglas en inglés, brinda registro de accidentes de 33 países [35], los cuales proveen estadísticas periódicas de seguridad vial para la Base de Datos Internacional de Tráfico y Accidentes (IRTAD<sup>4</sup>) con sede en Alemania.



**Figura 2.2** Tendencia general de muertes en carreteras en 33 países, 2010-2020  
Fuente: Road Safety Annual Report [35]

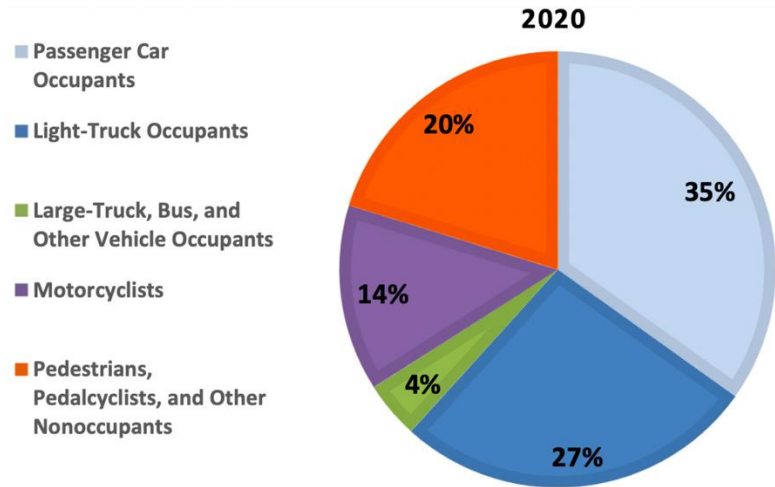
La Figura 1.2. muestra el número de muertes en carretera desde el año 2010 hasta el 2020 para 33 países de forma agrupada. Se observa que la tendencia es a una menor cantidad de fatalidades reportadas con la línea amarilla. Sin embargo, a pesar de la reducción excepcional de las muertes en carretera en 2020 por el confinamiento ocasionado por el virus

<sup>4</sup> The International Road Traffic and Accident Database

de Covid-19, las líneas punteadas que representan el objetivo del Decenio de las Naciones Unidas de Acción por la Seguridad Vial [7] para reducir a la mitad el número de víctimas mortales para 2020 no se ha logrado seguir.

**1.1.2. Personas y vehículos más afectados**

El Sistema de Informes de Análisis de Fatalidades (FARS<sup>5</sup>) fue desarrollado por el Departamento de Transporte de los Estados Unidos como un censo nacional que provee de datos a la NHTSA, al Congreso y al público americano sobre accidentes de tránsito de vehículos motorizados. El reporte del año 2020 indica los tipos de personas que fallecieron o fueron heridas.



**Figura 2.3** Distribución del tipo de vehículos afectados en accidentes, 2020  
Fuente: FARS overview of motor vehicle crashes in 2020 [33]

De acuerdo con la Figura 1.3, las personas del tipo más afectado son los pasajeros de automóviles con un 35% y las menos afectadas son los pasajeros de buses y camiones con un 4%. Por consiguiente, los tipos de vehículos más afectados son los automóviles catalogados como “passenger car”. Con esta categoría, los reportes e imágenes en la base de datos de la por la NHTSA indican que se trata de vehículos tipo sedán.

<sup>5</sup> Fatality Analysis Reporting System

### 1.1.3. Tipos de choques y sus frecuencias

El Programa de Evaluación de Automóviles Nuevos de Australasia (ANCAP<sup>6</sup>), es una institución responsable de proveer soporte analítico y estadístico en áreas como los tipos de choques y sus frecuencias, puesto que los accidentes vehiculares que implican una colisión pueden llevarse a cabo de diversas maneras en múltiples escenarios. En la tabla 1.2 se presentan los tipos de colisiones y la frecuencia a la que ocurren en valor porcentual.

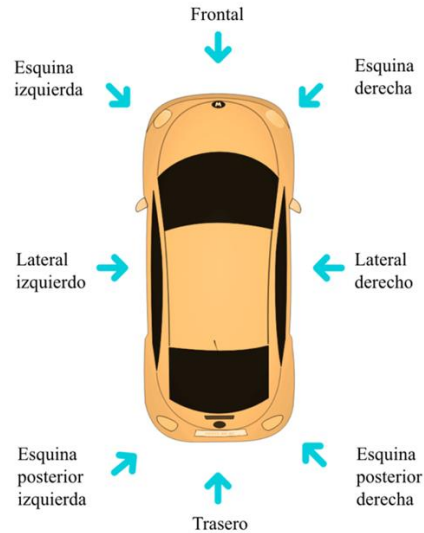
Tipo de choque	Frecuencia (%)
Frontal	35
Trasero	10
Lateral izquierdo	9
Lateral derecho	7
Esquina izquierda	20
Esquina derecha	15
Esquina posterior izquierda	2
Esquina posterior derecha	2

**Tabla 2.2** Frecuencias de los tipos de choques en un autom6viles sed6n. [36]

Como se observa en la Tabla 1.2, el choque m6s frecuente es el frontal con un 35%, seguido del choque a las esquinas frontales izquierda y derecha con un 20 y 15% de frecuencia, respectivamente. A partir de esto, un parachoques con mayor absorci6n de

<sup>6</sup> The Australasian New Car Assessment Program

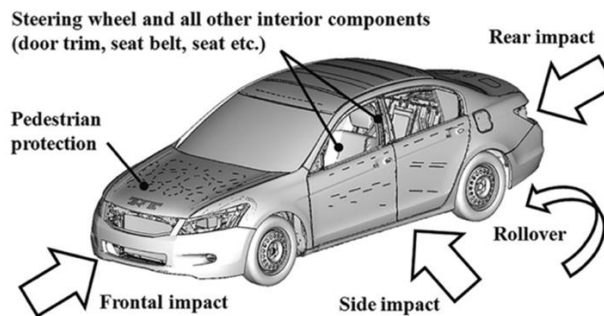
energía es requerido analizar en vehículos sedán sometidos a impacto frontal. La Figura 1.4 presenta de forma visual cada uno de los tipos de colisiones.



**Figura 2.4** Tipos de choques a automóviles sedán. [36]

## 1.2. Regulaciones y pruebas a automóviles

Los productores de automóviles requieren cumplir las normas de seguridad y protección a pasajeros de los países donde operen sus ventas. A partir de ello, un modelo puede llegar a ser distinto en Europa y en Estados Unidos a pesar de regir normas similares, pero no iguales. En este apartado se presentan las regulaciones en estas 2 regiones y en la Figura 1.5 se presentan las pruebas principales a las que se someten las unidades vehiculares.



**Figura 2.5** Tipos de pruebas realizadas a automóviles para cumplir regulaciones. [37]

En la Figura 1.5 se observan pruebas como impacto frontal, lateral, posterior, volcadura, de protección a peatón y pruebas interior como apertura de puerta, silla y cinturón de seguridad.

### 1.2.1. Regulaciones internacionales, americanas y europeas

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) y organismos asociados promueven la mejora continua en la seguridad vial. Reportes de los avances y estadística en torno a este tema son publicados de forma anual y en la última década del año 2011 al 2020 se definió un plan de acción para que en conjunto los países miembros logren disminuir al 50% la cantidad de fallecidos por accidentes proyectados al 2020 [7]. La Figura 1.6 presenta los pilares de dicho plan de acción.



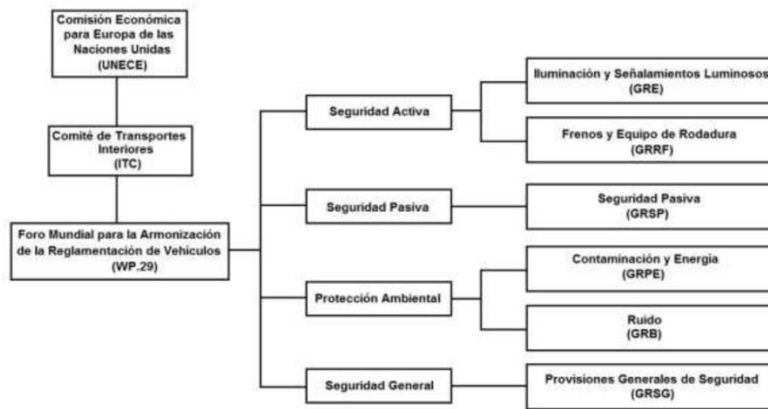
**Figura 2.6** Pilares del plan de acción de la ONU, 2011-2020. [7]

Como se observa en la Figura 1.6, se busca una superior gestión de la seguridad vial, respuesta posterior a choques y carreteras, vehículos y usuarios más seguros. Por consiguiente, se presentó las Regulaciones Técnicas Globales de la Naciones Unidas (GTR).

Las regulaciones permitieron aumentar la seguridad en los automóviles en cada dirección de posible impacto. Estados Unidos de América cuenta con Estándares Federales de Seguridad de Vehículos Motorizados de América del Norte (FMVSS) y la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras (NHTSA), la cual busca generar leyes en el congreso para prevenir y reducir los choques de automóviles [38]. Asimismo, el Instituto de Seguros para la Seguridad Vial (IIHS), financiada por las empresas de seguros vehiculares, busca calificar a las unidades para definir el tipo de seguro que venderá a los usuarios. Asimismo, la IIHS concientiza la ciudadanía sobre la compra de vehículos seguros a través de acceso a las calificaciones que asignan después de las pruebas. De esta manera,

en impactos de baja velocidad los gastos de reparación vehicular deben ser mínimos y, por otro lado, en impactos de alta velocidad los pasajeros deben sobrevivir.

De igual manera, regulaciones de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE) y su documento sobre el Foro Mundial para la Armonización de la Reglamentación en Vehículos (WP.29) [39] establecieron acuerdos administrativos y elaboración de normas. En la Figura 1.7 se presenta la organización del grupo de trabajo sobre la fabricación de vehículos.



**Figura 2.7** Organización de trabajo de la WP.29. [39]

Como se observa en la Figura 1.7, la UNECE regula la seguridad activa, pasiva, ambiental y general en los vehículos a través del Comité de Transportes Interiores (ITC) y WP.29. En ese sentido, los fabricantes europeos producen unidades con la capacidad de cumplir estos requerimientos. Cabe mencionar que en otras zonas del planeta también se implementaron regulaciones y estándares como la KMVSS, AIS, CONTRAN para la República de Corea, India y Brasil respectivamente.

### 1.2.2. Pruebas de impacto frontal

Conocidas las regulaciones de seguridad, los fabricantes requirieron verificar que sus automóviles las cumplan. En un principio, el Programa de Evaluación de Autos Nuevos (NCAP), actualmente dada por la NHTSA, fue el que estableció los protocolos para evaluar impacto en distintas direcciones. Actualmente, existen nueve organizaciones en el planeta

[39] que siguen este programa como la EuroNCAP, ANCAP, IIHS, JNCAP, KNCAP, C-NCAP, Latin NCAP y otros, en Europa, Australia, USA, Japón, República de Korea, China y Latinoamérica y el Caribe, respectivamente. Debido a que el impacto más frecuente es el frontal, a continuación, las pruebas principales se presentan de este tipo de colisión.



**Figura 2.8** Vista de vehículo y dummy tras accidente (puerta desconectada). [40]

En la Figura 1.8 se presenta el resultado de un experimento de colisión controlado por la agencia Euro NCAP la cual incluye un dummie o muñeco representativo de una persona adulta en el asiento del conductor, la puerta de ingreso al asiento del conductor fue retirada para una visualización interna. Se observa cómo el impacto frontal afecta no solo al pasajero sino a la propiedad vehicular.

#### **1.2.2.1. Prueba de impacto completo frontal a parachoques a 4 km/h (IIHS)**

Publicada en septiembre del 2010, la prueba versión 8 de impacto frontal del El Instituto de Seguros para la Seguridad Vial (IIHS) tiene como objetivo reducir los costos de daños a la propiedad asociados con choques a baja velocidad. La configuración de experimento se resume en el impacto frontal de un automóvil a 4km/h hacia una barrera estática presentativa al parachoques de otro vehículo. El documento [41] indica las dimensiones de la barrera, así como también la altura de 406 milímetros desde el suelo. En la Figura 1.9 se presenta la barrera.



**Figura 2.9** Barrera de impacto de la prueba IIHS. [41]

La calificación de los automóviles es dada por bueno, aceptable, marginal y pobre. Esto es otorgado por expertos luego de ponderar la suma de los resultados de impacto completo frontal y posterior por dos y luego añadir los resultados en las 2 esquinas frontales y posteriores. Esta multiplicación por dos de los impactos completos se debe a que son más probables a acontecer que en las esquinas.

#### **1.2.2.2. Prueba de impacto completo frontal a parachoques a 5 km/h (RCAR)**

Publicada en febrero del 2020, la prueba de impacto frontal de la RCAR tiene como objetivo impulsar a los fabricantes de vehículos a producir parachoques con vigas y crash box de absorción de energía altas, con instalación a alturas comunes y protección del vehículo en impactos de baja velocidad [42]. Asimismo, busca promover que la viga de los parachoques sea más larga y proteja las esquinas.



**Figura 2.10** Vehículo contactando barrera de la prueba NCAR. [42]



En la Figura 1.10 se observa la barrera de impacto y la parte frontal de un vehículo, la cual contiene internamente al parachoques en una altura equivalente al de la barrera. Por consiguiente, la prueba consiste en el impacto de un automóvil a 5km/h hacia una barrera representativa de parachoques. La altura definida de esta barrera es 300 milímetros y las dimensiones se encuentran dentro del documento [42]. La Figura 1.11 presenta visualmente cómo se ocasionan costos excesivos e innecesarios de reparación por parachoques de baja altura.



**Figura 2.11** Daños innecesarios por parachoque bajo. [43]

De acuerdo con la Figura 1.11, cuando el parachoques presenta una baja altura, la estructura cosmética, los faros y el radiador son gravemente dañados en un impacto de baja velocidad. A partir de ello, la Asociación Internacional de Centros de Investigación Automotriz (RCAR) desarrolló esta prueba para evitar costos innecesarios en reparación promoviendo una altura estándar y así las empresas automotivas obtengan una mayor calificación de sus unidades vehiculares.



**Figura 2.12** Parachoque desalineado y alineado. [43]

En la Figura 1.12 se presentan dos escenarios, en la parte izquierda una prueba de parachoques RCAR con mala alineación de altura y en la parte derecha uno con alineación adecuada e indicativa con colores rojos y amarillo a la viga y crash box, respectivamente.

### 1.2.2.3. Prueba de impacto completo a parachoques a 50 km/h (Euro NCAP)

Publicada en noviembre del 2015, el Programa Europeo de Evaluación de Autos Nuevos (Euro NCAP) presentó el protocolo de prueba de impacto frontal de ancho completo [40]. La prueba consiste en el impacto de un automóvil a 50 km/h hacia una barrera plana con masa de 70 toneladas métricas y dimensiones 1.5 metros de altura, 3 metros de ancho y un espesor que logre la masa definida. La Figura 1.13 presenta de forma visual la configuración de la prueba.



**Figura 2.13** Vehículo en prueba Euro NCAP. [40]

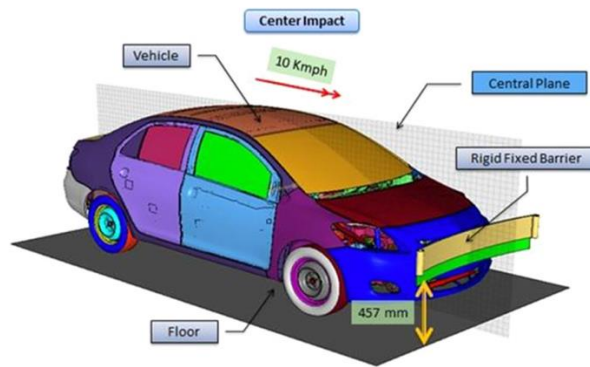
Como se observa en la Figura 1.13, este tipo de prueba buscan evaluar los sistemas de seguridad activos y pasivos para proteger a las personas en la vida real. Los muñecos o dummies están equipados con sensores y pueden representar niños, adultos y ancianos. Los sensores no solo se encuentran en los muñecos sino también en el interior y exterior del vehículo, en conjunto los resultados indican si en un escenario real el pasajero sufriría algún tipo de daño físico y dónde se ubicarían en el cuerpo. Los resultados son presentados de forma sencilla a la ciudadanía en una escala de 5 estrellas, donde 5 es calificativo de bueno. En la Figura 1.14 se presentan modelos de dummies desarrollados por euro NCAP.



**Figura 2.14** Dummies desarrollados para estudiar a respuesta en personas. [40]

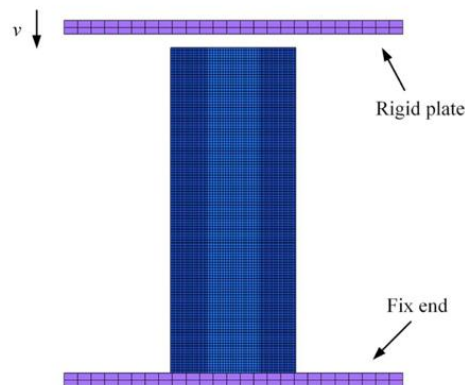
### **1.2.3. Análisis de elemento finitos para evaluación de impacto frontal**

Queda evidente que existen diversas pruebas para evaluar el impacto de un automóvil en cierta dirección y el alto costo de realizar cada una. A partir de ello, se busca una manera de replicar estas pruebas usando la mecánica computacional empleando el análisis por elementos finitos (FEA). En la actualidad, las empresas productoras de automóviles cuentan con sus modelos digitalizados por diseño asistido por computadora (CAD) [15], incluyendo los materiales de cada pieza. Asimismo, la institución NHTSA en asociación con la Universidad de George Washington y la empresa EDAG desarrollaron modelos CAD de automóviles para investigación y los validaron [44]. De todos estos, una parte fue publicada y se encuentran disponibles en el repositorio de la NHTSA. Estos modelos pueden ser abiertos con LS-DYNA, un programa de elementos finitos utilizado por las industrias automotriz, aeroespacial, de construcción, manufacturera y de bioingeniería [45], por lo que incluyen el modelo del automóvil, materiales y la posibilidad de configuración de colisiones. Tras un choque simulado, el programa LS-PrePost permite visualizar los resultados de LS-DYNA y a partir de ellos evaluar el automóvil o un sistema de este con respecto a la absorción de energía. La Figura 1.15 presenta una simulación de impacto frontal usando simulación.



**Figura 2.15** Modelo CAD de automóvil sedán. [46]

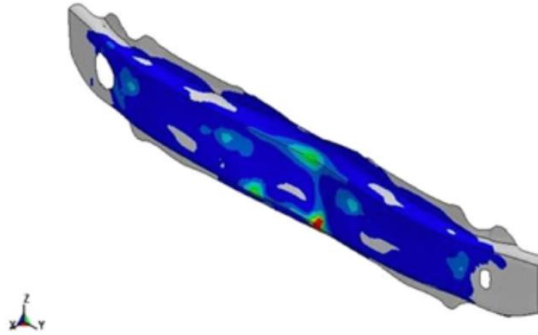
En la Figura 1.15 se encuentra etiquetado el plano del piso, el vehículo y su plano central, la barrera rígida y la velocidad de impacto de 10 kilómetros por hora en la dirección longitudinal del vehículo hacia la barrera. Esta forma de evaluar vehículos en impactos es la más aceptada en la industria automotriz por su similitud a las pruebas reales. Para fines de investigación, otras formas de evaluación por análisis computacional se reportan en la literatura, como la que se presenta en la Figura 1.16.



**Figura 2.16** Configuración de compresión en crash box. [47]

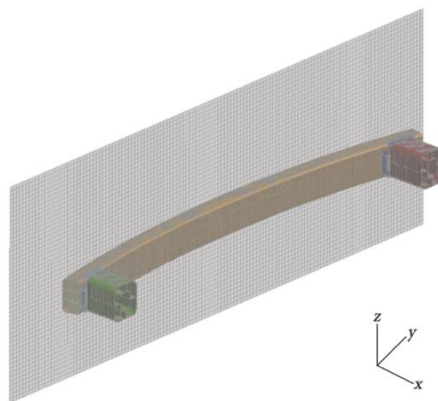
En la Figura 1.16 se observa un crash box sometido a una prueba de compresión a baja y constante velocidad, como si se tratase de un ensayo de compresión hidráulica, para determinar su capacidad de absorción de energía. De acuerdo con la literatura [13], [47], el crash box de un parachoques puede ser analizado de forma independiente bajo compresión

al 70% a 1.1 m/s y así evaluar su respuesta mecánica con el solver LS-DYNA. La Figura 1.17 presenta la viga de un parachoques sometida a impacto frontal sin la vista del impactor.



**Figura 2.17** Análisis de viga aislada. [46]

En la Figura 1.17 se muestra una viga de parachoques con un mapa de color que representa las zonas más afectadas del componente. La evaluación de impacto a la viga incluye el análisis de la deformación máxima (DM), fuerza máxima de impacto (PCF), absorción de energía (AE) y absorción de energía específica (SEA). Para ello, la viga es fijada e impactada con una pared rígida en movimiento con una velocidad inicial basada en pruebas de impacto por agencias como NCAP. Finalmente, la evaluación de parachoques a impacto frontal por análisis de elementos finitos también puede ser dado como se muestra en la Figura 1.18.



**Figura 2.18** Modelos de parachoques y pared rígida. [19]

En base a la Figura 1.18, una evaluación integral de la viga y crash box es la presentada por Xu [19] donde el ensamble es impactado por una pared rígida en movimiento. De esta manera, la respuesta mecánica posee mayor precisión dada la similitud a un escenario de impacto real.

### 1.3. El parachoques en automóviles sedán

La evolución del sistema de parachoques junto al desarrollo de otros sistemas como las bolsas de aire, freno inteligente, cinturones de seguridad, entre otros, significó en la historia salvar miles de vidas humanas, de acuerdo con la tendencia bajista presentada en el apartado 1.1.1. Según la OMS, más vidas se podrían salvar si se promueven nuevas medidas en todos los países, puesto que el informe presentado del estado mundial de la seguridad vial del año 2018 muestra que los daños ocasionados por el tránsito son en la actualidad la principal causa de muerte en los niños y jóvenes [34].

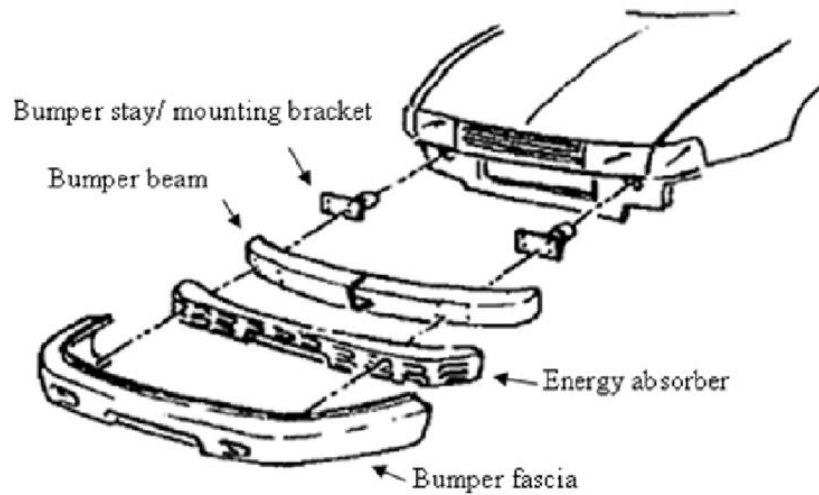


**Figura 2.19** Vista del parachoques tras retirar fascia en vehículo sedán. [21]

En la Figura 1.19 se muestra a una persona sosteniendo la fascia de un vehículo y, en consecuencia, el parachoques se encuentra descubierto con sus dos componentes principales: la viga y crash box en los extremos.

#### 1.3.1. Componentes

El parachoques cuenta con cuatro componentes: la fascia, el absorbedor de impacto, la viga y los crash box. En la Figura 1.20 se presenta de forma visual estos componentes.



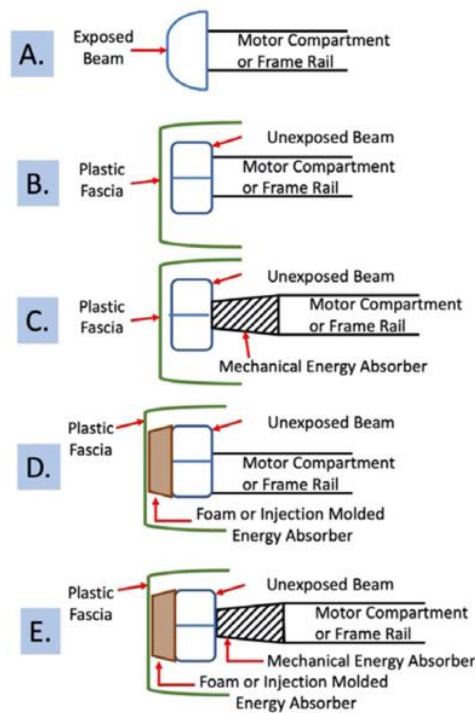
**Figura 2.20** Componentes del parachoques. [48]

El parachoques es conectado al chasis, el cual se une mediante los crash box a la viga. La Figura 1.21 presenta el chasis sin el parachoques, en el cual también se aprecia el radiador, el motor, las ruedas y otros componentes.



**Figura 2.21** Vista interna de vehículo sin parachoques. [21]

De acuerdo con lo reportado [21], la viga junto al crash box son los componentes que absorben la mayor cantidad de energía en un impacto. Fueron inicialmente incorporados a los vehículos como una viga de acero con espesor considerable, y desde entonces evolucionó en distintas formas y configuraciones a partir de regulaciones de seguridad, ver la Figura 1.22.



**Figura 2.22** Configuraciones de parachoques: a) viga expuesta, b) con fascia, c) con crash box, d) con absorbedor, e) con crash box y Absorbedor de Foam [49]

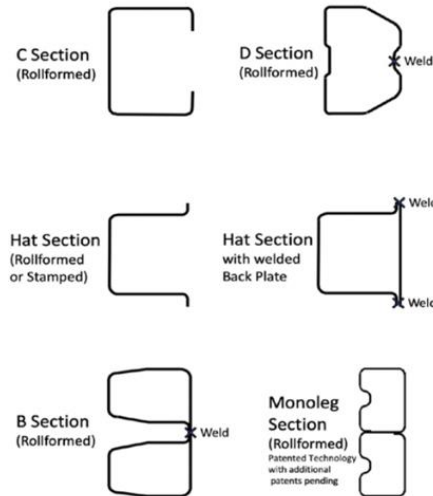
Como se observa la Figura 1.22, se incorporaron cuatro nuevas configuraciones de parachoques (b, c, d y e), los cuales en la actualidad son identificados en distintos vehículos sedán conectados al chasis. Estos arreglos e incorporación de nuevos componentes como crash box, absorbedor de energía hecho de foam y fascia externa no solo se halla en este tipo de vehículo, por lo que se evidencia que aún se encuentra en desarrollo el parachoques en la industria automotriz. Una posible razón es la evolución continua de pruebas de impacto de agencias, como la NCAP, cada vez con mayores requerimientos de protección a pasajeros a altas velocidades y protección a la propiedad vehicular a bajas velocidades.

### 1.3.2. La viga

La viga del parachoques requiere soportar impactos a baja y alta velocidad, en el primer escenario busca proteger a la propiedad vehicular, mientras que en el segundo tipo de impacto requiere alta resistencia para proteger a los pasajeros. Esto es logrado a través de la



geometría transversal de la viga o también llamado perfil de viga. A continuación, se presentan los perfiles de viga usuales que presentan los modelos sedán.



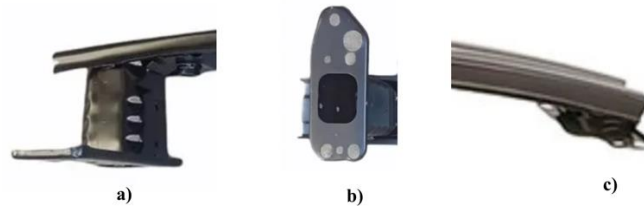
**Figura 2.23** Secciones transversales comunes de la viga del parachoques. [49]

En la Figura 1.23 se presentan seis perfiles para la viga en un parachoques. Gracias al uso de nuevos perfiles, los parachoques actuales brindan a los vehículos la capacidad de absorber mayor energía de impacto frontal que aquellos del pasado hechos únicamente con fines estéticos [21]. Estos perfiles son simétricos y tienen una menor resistencia a la flexión lo cual brinda la capacidad de deformarse y así absorber mayor energía, un escenario contrario a ser vigas rígidas y el impacto se transmite de forma directa a los pasajeros y la propiedad vehicular. El material empleado en la viga definirá el comportamiento de dicha deformación, en base al módulo de elasticidad y la curva de esfuerzo-deformación.

### 1.3.3. Crash box

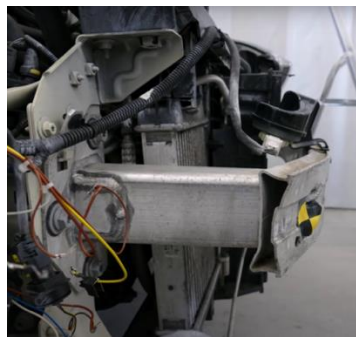
El crash box es el componente del parachoques encargado de transformar la energía cinética de los impactos a energía interna absorbida por su deformación, permitiendo que las fuerza impacto máxima sean las mínimas y los pasajeros no experimenten una desaceleración significativa [36]. De acuerdo con la Figura 1.20, este es el componente más interno del parachoques y se conecta al chasis del vehículo. La geometría transversal del crash box

usualmente es cuadrado con paredes de poco espesor. La siguiente imagen presenta crash box identificados en automóviles sedán.



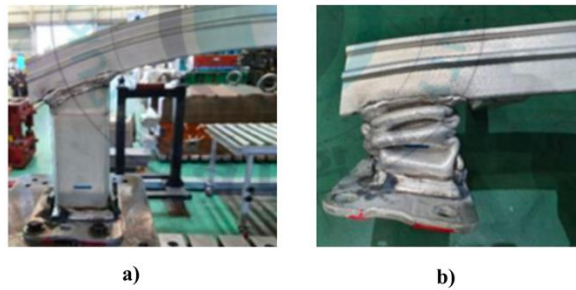
**Figura 2.24** Vistas del Crash box en parachoques a) vista lateral [50], b) vista posterior [51], c) vista iso. [52].

En la Figura 1.24 se presentan tres vistas de los crash box de los automóviles Hyundai Grand, Accent y Kia Cerato C, respectivamente. Estas fotografías fueron disponibles en una plataforma de ventas y permiten conocer visualmente este componente. En a) se aprecia la geometría cuadrada con bordes suavizados del crash box del primer automóvil, en b) la base para su unión al chasis y en c) un diseño más pequeño unido a la viga del parachoques. En la Figura 1.25 se presenta una vista de este componente unido a la viga en un automóvil sedán.



**Figura 2.25** Crash box y viga de parachoques tras impacto de baja velocidad. [53]

A bajas velocidades el sistema de protección pasivo del parachoques muestra daños poco significativos. Sin embargo, a altas velocidades de impacto, el crash box debe deformarse de tal manera que absorba la mayor cantidad de energía, como se presenta en la Figura 1.26, antes y después.

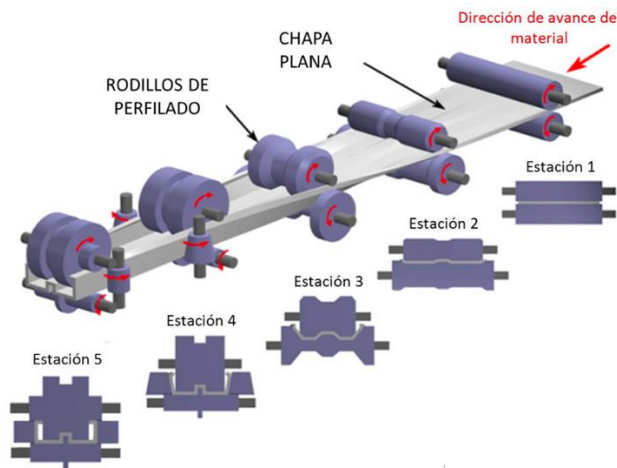


**Figura 2.26** Crash box de parachoques tras impacto de alta velocidad: a) antes, b) después. [54]

En la Figura 1.26 se observa como el crash box se plegó tras absorber energía de impacto. Por consiguiente, este componente del parachoques garantiza protección en impactos frontales a los pasajeros de automóviles sedán.

### 1.3.4. Fabricación de viga

La viga de un parachoques presenta un perfil definido el cual tiene la posibilidad de ser manufacturado por el perfilado como se muestra en la Figura 1.27. Para ello, se emplean rodillos los cuales de forma progresiva moldean la lámina de acero para conformar un perfil de viga definido.

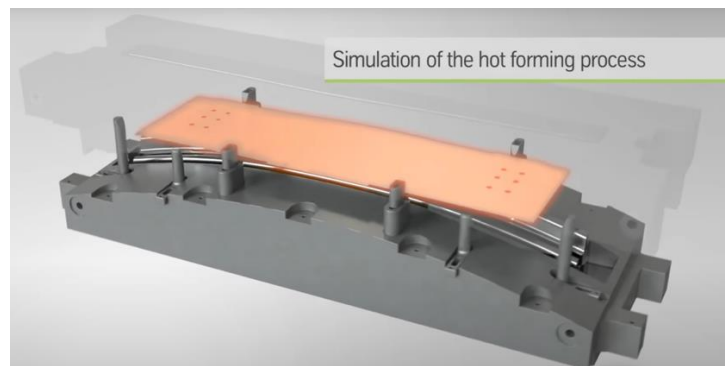


**Figura 2.27** Proceso de perfilado de lámina metálica con rodillos. [55]

Como se observa en la Figura 1.27, este proceso es práctico y a su vez empleado para la producción en serie de la viga de parachoques de cientos de automóviles sedán. Por

consiguiente, los diseños propuestos por investigadores deben cumplir con este requerimiento; caso contrario, una geometría o perfil complejo implicaría un proceso adicional de mayor costo, difícil reemplazo y un peso mayor del vehículo, lo cual ocasiona un mayor consumo de combustible y contaminación ambiental [49].

Adicionalmente, otros tipos de fabricación de la viga existen como el conformado en caliente el cual consiste en convertir una lámina de metal en una viga con geometría transversal predefinida por un molde. La Figura 1.28 presenta este proceso de forma visual.



**Figura 2.28** Conformado en caliente de plancha metálica. [49]

Como se ve en la Figura 1.28, una plancha de acero a altas temperaturas es colocada y seguidamente presionada contra un molde que posee el perfil de viga de parachoques requerida. Usualmente el material empleado para el parachoques es acero de alto grado de dureza, lo cual permite proteger a pasajeros en impactos de alta velocidad y soportar impactos de baja velocidad.

#### **1.4. Análisis de impacto frontal en parachoques**

En este apartado se presentan indicadores de performance para evaluar el diseño de un parachoques y, luego, los resultados experimentales de un ensayo de impacto frontal a un parachoques de automóvil sedán reportado por Tao Xu et.al [19]. Además, para validar en la presente tesis el modelo generado por elementos finitos de un parachoques y su simulación de impacto frontal con el programa LS-DYNA, se presenta los resultados de dos métodos:

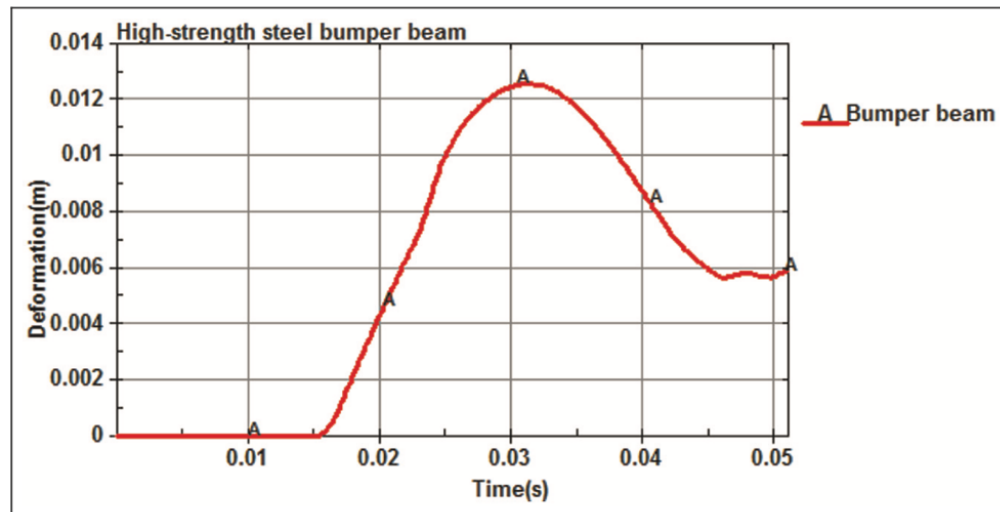
experimental y computacional, por el cual Yucheng Liu and Michael [13] analizaron la viga de un parachoques Volkswagen del año 1980.

#### 1.4.1. Indicadores de performance

Para evaluar la resistencia a los choques de diferentes estructuras, primero se definen los principales indicadores de resistencia a impacto, como la Deformación Máxima (DM), Fuerza Máxima de Impacto (PCF), Absorción de Energía (EA), Absorción de Energía Específica (SEA).

##### 1.4.1.1. Deformación máxima (DM)

La deformación del parachoques durante un impacto frontal no es lineal y presenta una variación en función del tiempo. La siguiente figura presenta la gráfica característica del desplazamiento o deformación en función del tiempo.



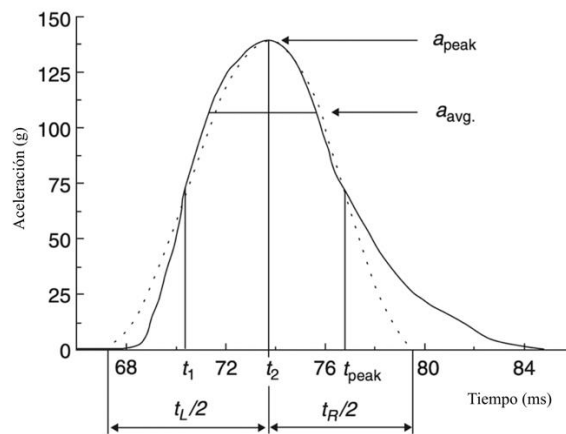
**Figura 2.29** Curva característica de deformación en función de tiempo en impacto. [56]

Como se observa en la Figura 1.29, la deformación en función del tiempo presenta un valor máximo y luego se estabiliza. El primer valor es definido como la deformación máxima en las pruebas de impacto y el segundo como la deformación permanente. Cabe

mencionar que el desplazamiento al no regresar a valor cero indica que deformación plástica aconteció.

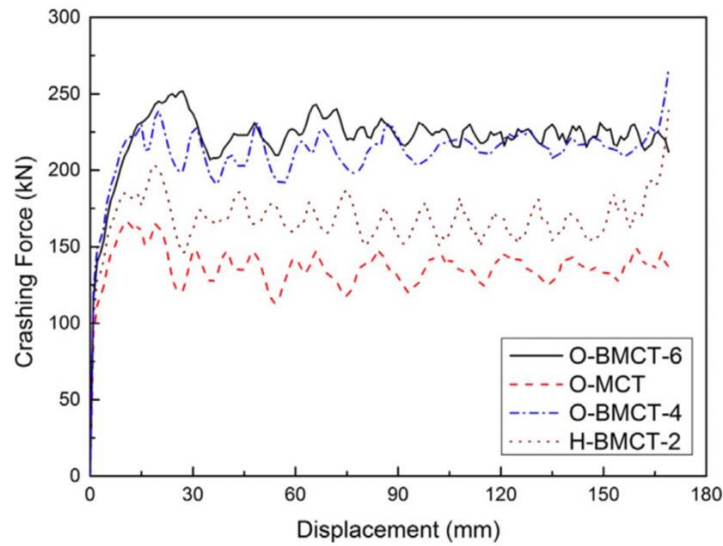
#### 1.4.1.2. Fuerza Máxima de Impacto (PCF)

Para evaluar la resistencia a los choques de diferentes estructuras multiceldas con o sin relleno, primero se definen los principales indicadores de resistencia a impacto, como la Fuerza Máxima de Impacto (PCF), Absorción de Energía (EA), Absorción de Energía Específica (SEA).



**Figura 2.30** Pulso típico de aceleración en un choque de automóvil. [57]

Como se observa en la Figura 1.30, la cabeza humana durante un impacto frontal vehicular presenta una carga y descarga rápida de fuerza G. Esta carga es la principal causa de lesiones y muertes a los pasajeros [57], por lo que reducir la magnitud de fuerza G es demandado. Por este motivo, se crearon y buscaron mejorar sistemas de protección como los parachoques y bolsas de aire, entre otros, los cuales permiten lograr este objetivo y proteger la vida humana. Bajo este criterio de análisis de PCF, Carney [58] determinó el umbral recomendado de velocidad de impacto del ocupante a 12 m/s y la desaceleración de descenso a 20 G, respectivamente. La Figura 1.31 presenta la ubicación usual de la PCF y su evolución con el desplazamiento por deformación plástica en la colisión.



**Figura 2.31** Curvas de la fuerza de impacto. [47]

En la Figura 1.31 se presenta una gráfica de fuerza máxima de impacto (PCF) en función del desplazamiento para cuatro modelos de crash box. La PCF ocurre en los primeros milisegundos del impacto frontal y es rápidamente identificable por ser el pico más alto al principio.

#### 1.4.1.3. Absorción de energía (EA)

La EA es la energía total absorbida de un objeto mediante deformación plástica durante un impacto, matemáticamente es expresada en la ecuación 1.1.

$$EA = \int_0^x F(x)dx \quad (1.1)$$

Por consiguiente, calcular la EA de una estructura significa conocer primero cómo evoluciona la fuerza de impacto con el desplazamiento por deformación en esta. A partir de ello, la EA es calculada como el área bajo una de las curvas graficadas en la figura 1.31.

#### 1.4.1.4. Absorción de energía específica (SEA)

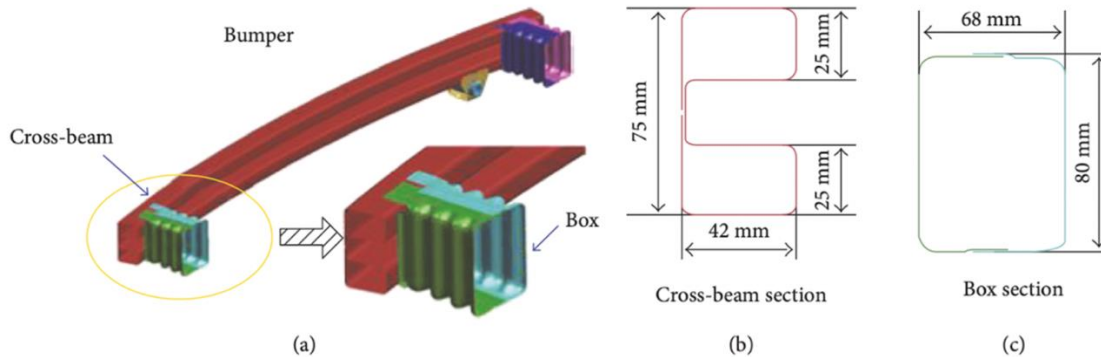
La absorción de energía específica es definida como la relación entre el EA y la masa de la estructura, definida de la siguiente manera:

$$SEA = EA/m \quad (1.2)$$

En ese sentido, conocer la SEA implica conocer cómo varía la EA durante un impacto y la masa  $m$  de la estructura analizada. Esto permite describir objetivamente que tan efectiva es una estructura respecto a otras en la absorción de energía de impacto.

#### 1.4.2. Parachoque convencional reportado

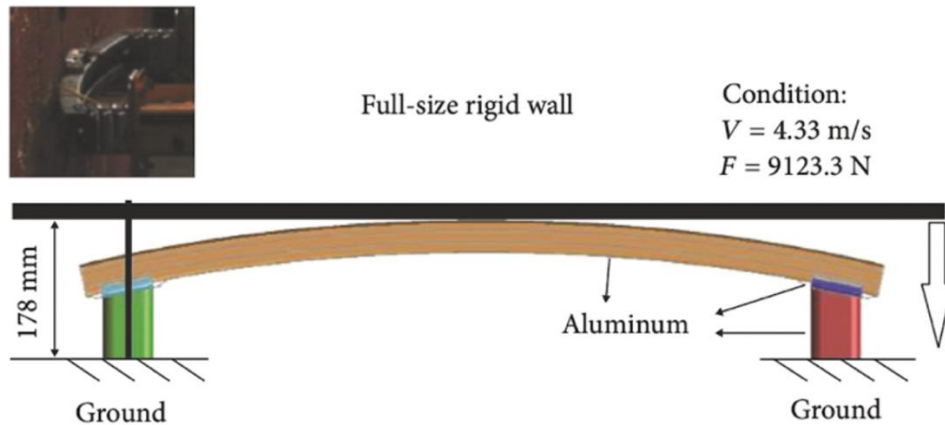
Tao Xu, et al. [19] analizó la Fuerza Máxima de Impacto (PCF) y la Absorción de Energía Específica (SEA) de la viga y crash box de un parachoque convencional del automóvil sedán. En la Figura 1.32 se muestran las dimensiones de estos dos componentes.



**Figura 2.32** Modelo Fe de parachoques a) viga y crash box, b) perfil de viga, y c) perfil de crash box. [19]

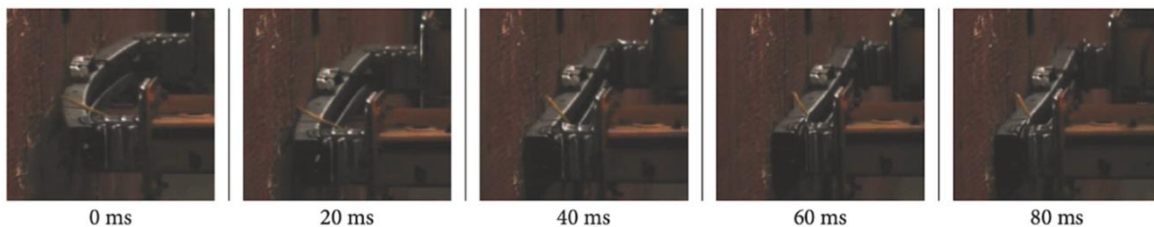
Como se aprecia en la Figura 1.32, la viga del parachoques es de perfil “B” y el crash box de forma rectangular. Ambos elementos de acuerdo con el reporte cuentan con un espesor de 1.8 mm y el material es acero trip 800 y st 280, respectivamente. En la Figura 1.33 se presenta la configuración del experimento llevado a cabo.





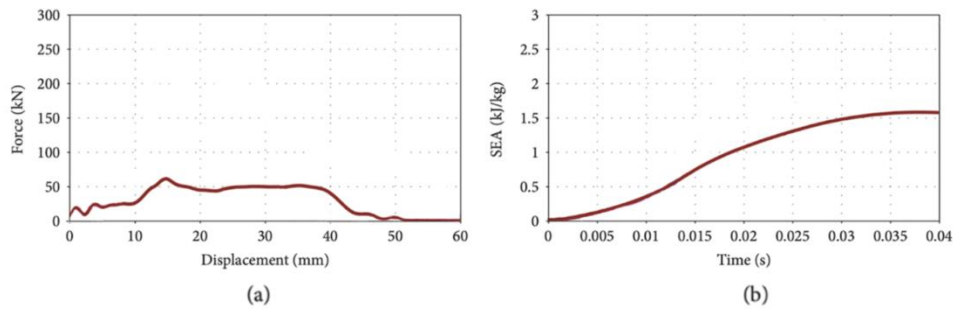
**Figura 2.33** Configuración de colisión a parachoques. [19]

Como se observa en la Figura 1.33, el parachoques fue fijado e impactado por una placa con peso de 9123.3 N a una velocidad de 4.33 m/s. Esta configuración representa una colisión de forma simulada, el peso definido de la placa rígida en movimiento equivale a la del vehículo sin el parachoques y las bases de los crash box fueron fijados como en un ensamble real donde estos son conectados al chasis. La figura 1.34 presenta la deformación del parachoques en cinco tiempos registrados por fotografía.



**Figura 2.34** Capturas en milisegundos del impacto. [19]

En la Figura 1.34 se observa en el tiempo 20 ms después del impacto que la viga curva se torna plana; luego, en el momento 40 ms, el crash box se comprime; después, en 60 ms, ambos componentes son deformados en su totalidad y; finalmente, en 80 ms, se observa que la deformación fue plástica por lo que el parachoques no volvió a su estado original. A partir de ello, ambos componentes absorben la energía del impacto y la viga se deforma inicialmente y luego los crash box. En la Figura 1.35 se presentan los resultados obtenidos de PCF y SEA.

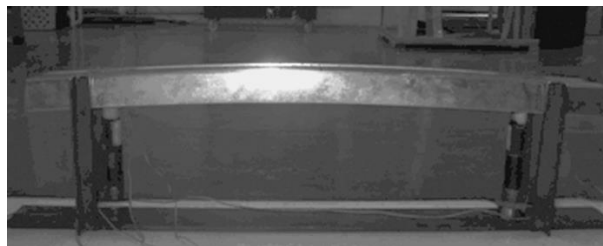


**Figura 2.35** Resultados obtenidos del experimento de colisión al parachoques: a) PCF, b) SEA [19]

Como se observa en la Figura 1.35, en a) se presenta la gráfica de la fuerza máxima de impacto (PCF) en función del desplazamiento y el valor máximo registrado es 60 kN, por otro lado, en b) se presenta la absorción de energía específica (SEA) en función del tiempo y se registra el valor final de 1.5 kJ/kg. Estas gráficas representan el fenómeno físico de impacto frontal a un parachoques, en a) se evidencia que la fuerza de impacto se torna nula al final del experimento mientras que la absorción de energía específica se incrementa conforme la viga y el crash box se deforman.

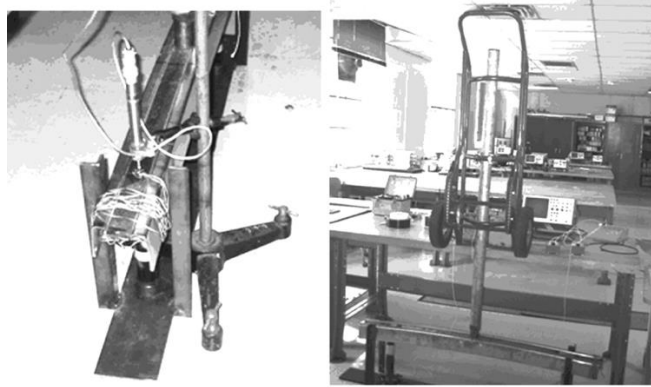
### 1.4.3. Método experimental

Yucheng Liu y Michael [13], realizaron un estudio de impacto a la viga de un parachoques extraído de un Volkswagen del año 1980. La finalidad de dicha investigación fue revelar la respuesta al impacto del sistema de parachoques de un automóvil y no solo de forma experimental, sino también de forma computacional y analítica de acuerdo con teorías previas que se presentan en los siguientes apartados. En la siguiente figura se presenta la viga del parachoques analizado.



**Figura 2.36** Viga sujeta con brackets en los extremos. [13]

La configuración del experimento consistió en sujetar y ubicar transductores de carga dinámica en los extremos de la viga. En la Figura 1.37 se muestran los transductores unidos a los extremos, los cuales permiten medir las fuerzas de reacción.



**Figura 2.37** Vista de los transductores y set del experimento. [13]

Asimismo, en la imagen de la derecha en la Figura 1.37 se muestra la ubicación de un tubo vacío sobre el centro de la viga, por donde se soltaría una masa de 3.8 kg de hierro a diferentes alturas. Adicionalmente, un sensor de desplazamiento (DVRT) se usó para medir la fuerza de impacto y el desplazamiento localizado en el centro de la viga, la cual emplea la conversión de señales generadas con un amplificador para su visualización en un computador con el programa Labview. El experimento consistió en medir la fuerza y desplazamiento durante 0.1 segundos de impacto para una masa liberada desde el reposo a 0.075 m, 0.1 m y 0.15 m sobre el centro de la viga. Por consiguiente, se obtuvieron gráficas y el resumen se presenta en la Tabla 1.3.

Posición inicial (in)	Velocidad inicial (in/s)	Fuerza máxima (lb)	Tiempo (s)
3	48,12	311,69	0,0017
4	55,57	370,72	0,002
6	68,06	483,15	0,002

**Tabla 2.3** Efecto de posición inicial sobre la fuerza de impacto máxima. [13]

Como se observa en la Tabla 1.3, la Fuerza Máxima de Impacto (PCF) fue registrada para las tres alturas de inicio y se determinó que a mayor velocidad de impacto mayor es el

pico de fuerza registrada. En consecuencia, esta investigación identifica experimentalmente la relación directa entre la velocidad y la fuerza de impacto.

#### 1.4.4. Método computacional

El análisis computacional de impacto frontal a la viga de un parachoques inicia con la generación del modelo CAD usando técnicas como reflexión, trazado, barrido y descascarillado. En la siguiente figura se presenta el modelo CAD generado por Yucheng Liu y Michael [13] con el programa IDEAS.



**Figura 2.38** Generación del modelo CAD y FE del parachoques. [13]

El siguiente paso consistió en convertir el modelo CAD en formato IGES y transferirlo al entorno del programa ANSYS para generar un modelo de elementos finitos para su análisis computacional. En ese sentido, por convergencia de precisión y velocidad de procesamiento se definió 230 elementos y 357 nodos para una malla del tipo “shell”, el cual es un elemento de 4 nodos con 6 grados de libertad y es ideal para análisis de estructuras de espesor pequeño a moderado. Se definieron los materiales y el modelo FE es presentado en la figura 1.38.

Por consiguiente, se replicó la configuración del experimento detallado en el apartado 1.4.3 (Método Experimental) y mediante un análisis transiente se obtuvo las fuerzas de impacto y desplazamiento. El tiempo de cálculo fue de 0.1 segundos, el cual es el mismo realizado en el experimento, y el bloque fue directamente ubicado en superficie de la viga con una velocidad de impacto determinada por la siguiente ecuación.

$$v^2 = 2gh \quad (1.3)$$

Donde  $v$  es la velocidad de impacto vertical del bloque al centro de la viga del parachoques,  $g$  la aceleración de la gravedad  $9.8 \text{ m/s}^2$  y  $h$  la altura a la cual fue soltada el bloque en el experimento físico. En la Tabla 1.4 se presenta los resultados obtenidos mediante los tres métodos: experimental, computacional y analítico. Asimismo, los resultados de los últimos dos métodos son comparados respecto al primero.

Resultados	Fuerza Máxima (kN)					
	0,075	Error (%)	0,1	Error (%)	0,15	Error (%)
Altura inicial (m)	0,075	-	0,1	-	0,15	-
Experimental	1,39	-	1,65	-	2,15	-
Computacional	1,47	5,9	1,64	-0,9	2,08	-3,1
Analítico	1,41	1,7	1,66	0,9	2,03	-5,5

**Tabla 2.4** Fuerzas de reacción y tiempo para las 3 alturas de posición inicial [13]

En la Tabla 1.4 se presenta los valores registrados de fuerza máxima para tres alturas de impacto, los métodos computacional y analítico son comparados al método experimental y se observa la precisión del método computacional frente al analítico para determinar los valores de PCF (error relativo de 0.9 a 5.9%).

#### 1.4.5. Relación entre variables

Hasta ahora en el apartado 1.4 (análisis de impacto frontal), distintas variables fueron presentadas para realizar un análisis de impacto frontal a un parachoques. Ahora, se sintetiza la relación entre ellas definiéndolas como independientes y dependientes.

VARIABLES EN PARACHOQUE	NOMENCLATURA	TIPO DE VARIABLE
Perfil de viga	PV	Independiente
Perfil de crash box	PC	Independiente
Material	M	Independiente
Velocidad de impacto	v	Independiente

**Tabla 2.5** Variables independientes identificadas en la literatura

En la Tabla 1.5 se definen cuatro variables independientes para el análisis de impacto en parachoques. Cada una de estas afectará la respuesta final del parachoques y las variables dependientes cuantificarán el performance. A continuación, dichas variables se presentan en la Tabla 1.6.

VARIABLES EN PARACHOQUE	NOMENCLATURA	TIPO DE VARIABLE
Fuerza de impacto	F(t)	Dependiente
Deformación de impacto	D(t)	Dependiente
Fuerza Máxima de Impacto	PCF	Dependiente
Absorción de energía	EA	Dependiente
Absorción de energía específica	SEA	Dependiente

**Tabla 2.6** Variables dependientes identificadas en la literatura

En la Tabla 1.6 se presentan cinco variables dependientes que pueden ser empleadas para el análisis comparativo de parachoques. Cada variable independiente definida en la Tabla 1.5 afecta al conjunto presentado en la Tabla 1.6. En ese sentido, perfiles reportados de viga y crash box con geometrías complejas absorben más energía de impacto que aquellos de perfil simple y por ende registran mayor fuerza durante la colisión. Asimismo, el peso de la estructura varía en función del material y por ende también la absorción de energía específica de acuerdo con la ecuación 1.2. Además, aquellos materiales con un bajo módulo

de elasticidad y alto esfuerzo de fluencia tienden a un buen comportamiento en impacto puesto que los esfuerzos máximos en la estructura de la viga del parachoques durante un impacto serán menores al esfuerzo de fluencia. Finalmente, la velocidad de impacto define si se trata de un accidente de alta o baja velocidad.

# **CAPÍTULO II**

## **METODOLOGÍA**

En este capítulo se presenta el procedimiento experimental que desarrolló la presente tesis para cumplir los objetivos planteados. En primer lugar, el tipo y enfoque de la investigación fueron definidos; luego, las fuentes y técnicas de registro de información. Después, las variables y el diseño experimental fueron planteados y detallados.

### **2.1. Caracterización de la investigación**

Dado que la investigación buscó comparar la respuesta de tres parachoques en impactos frontales a cuatro velocidades, 4, 8, 12 y 20 km/h, estos se simulan para cuantificar las variables dependientes (EA, SEA, DM). De esta manera, cada parachoque fue caracterizado y, por consiguiente, comparado. Esta investigación es de tipo aplicado porque buscó solucionar un problema comparativo aplicando teorías y variables previamente descubiertas.

Asimismo, el tipo de enfoque de la investigación es cuantitativo, puesto que a partir de experimentos normados se simularon colisiones frontales a parachoques por análisis de elementos finitos los cuales dirigieron las variables independientes y se obtuvieron las variables dependientes como el desplazamiento máximo (DM), los cuales son valores medibles. A partir de ello, se definieron las capacidades de cada parachoques por lo que el alcance es descriptivo con un análisis comparativo.

### **2.2. Fuentes y técnicas de recolección de información**

La configuración de las colisiones simuladas a los parachoques fue comprendida bajo la prueba Full Width Rigid Barrier Test por la agencia Euro NCAP, por lo que fue considerada una fuente primaria. En esta, la configuración, parámetros e indicadores son



definidos de forma precisa, para su replicabilidad de forma física y simulada. Asimismo, el repositorio de modelos FE de la NHTSA fue empleada para la obtención de los tres parachoques, por lo que también representa una fuente primaria.

Además, las investigaciones presentadas en el marco teórico son fuentes secundarias para la presente investigación. Estas se emplearon para explicar de manera concisa los fundamentos teóricos y la relación de las variables presentadas. Con respecto a la recolección de los datos, mediante el programa LS-DYNA se desarrollaron las simulaciones de impacto y el posprocesamiento de data permitió obtener gráficas de cada variable dependiente.

### 2.3. Variables de la investigación

Las variables consideradas para realizar las pruebas de colisión y comparar parachoques fueron recopiladas de diferentes investigaciones y normas expuestas en el marco teórico. De estas, se definieron dos tipos: independientes y dependientes. La Tabla 2.1 presenta cada una de ellas.

Variables en parachoque	Nomenclatura	Tipo de variable
Perfil de viga	PV	Independiente
Perfil de crash box	PC	Independiente
Material	M	Independiente
Velocidad de impacto	v	Independiente
Desplazamiento máximo	DM	Dependiente
Absorción de energía	EA	Dependiente
Absorción de energía específica	SEA	Dependiente

**Tabla 2.1** Definición de variables de investigación.

La variable controlada es la velocidad de impacto de 4, 8, 12 y 20 km/h. Las unidades empleadas para EA y SEA son kJ y kJ/kg, respectivamente. En el presente estudio, las unidades consistentes de medida para el programa LS-DYNA se presentan en la siguiente tabla.

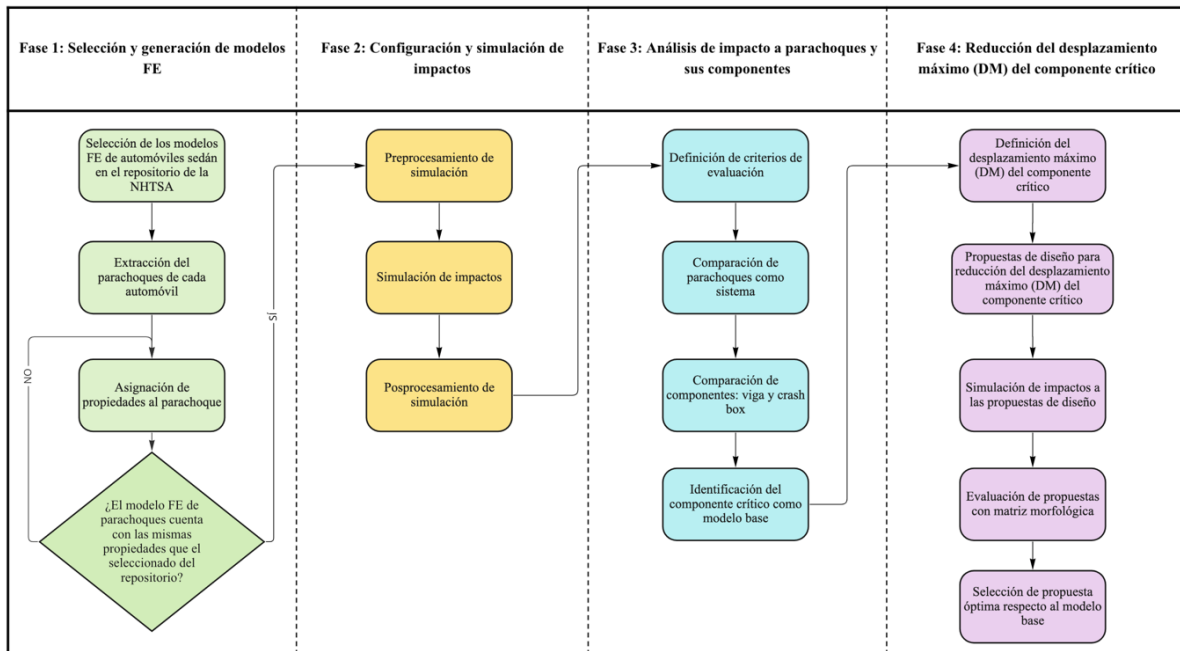
Masa	Longitud	Tiempo	Fuerza	Velocidad	Esfuerzo	Energía	Densidad	Módulo de Young
kg	mm	ms	kN	mm/ms	GPa	kN-mm	kg/mm <sup>3</sup>	KN/mm <sup>2</sup>

**Tabla 2.2** Unidades de medidas empleadas

Como se observa en la Tabla 2.2, las unidades de medida de la velocidad y energía son equivalentes a m/s y kJ, respectivamente. Adicionalmente, la definición de todas estas unidades será de utilidad para realizar conversiones de propiedades de componentes que inicialmente contaban con otras.

## 2.4. Diseño experimental

El diseño experimental de esta investigación está basado en la metodología propuesta por Chandrakant [46], la cual analiza la respuesta al impacto de un parachoques en el programa LS-DYNA. En la Figura 2.1, el diagrama del proceso de investigación es presentado y contiene cuatro fases, alineadas al logro de los objetivos específicos.



**Figura 2.1** Diagrama del proceso de investigación

**Fuente:** Elaboración propia

Cada una de estas fases abarcan una serie de actividades consecutivas y organizadas para el logro de los objetivos planteados. Por consiguiente, dichas actividades son detalladas.

#### 2.4.1. Selección de modelos FE de automóviles sedán

Dentro del repositorio de la NHTSA se encuentran disponibles diversos modelos de elementos finitos (FE) de automóviles, los cuales fueron desarrollados, analizados y verificados por simulación de impacto con experimentos reales. De esta manera, estos modelos fueron publicados con el fin de promover la investigación y, por consiguiente, en el presente estudio se seleccionan los modelos de vehículos sedán por ser el tipo con mayor frecuencia de accidentes de tráfico de acuerdo con lo presentado en el apartado 1.1.2. (Personas y vehículos más afectados). Criterios adicionales para la selección de modelos se presentan en la Tabla 2.3.

Criterios de selección	Peso
Es vehículo sedán	10
Materiales definidos y validados	20
Modelo FE validado con experimentos reales	25
Modelo enmallado y en formato de LS-DYNA	20
Disponibilidad de reportes de consulta	5
No es necesario conseguir el parachoques y escanearlo	10
Detalles técnicos del modelo disponible	10
<b>Resultados de calificación</b>	<b>100</b>

**Tabla 2.3** Criterios de selección de modelo FE

**Fuente:** Elaboración propia

La definición de materiales en cada modelo FE fue un criterio de significativa importancia puesto que se busca determinar la respuesta mecánica de cada componente, la validación implicó que hayan sido caracterizados por ensayos de tracción y la curva de

esfuerzo-deformación unitaria se encuentre disponible. Luego, el criterio que indica al modelo FE haber sido validado con experimentos reales significa que el ensamble del vehículo virtual con enmallado, uniones, secciones y materiales validados responda como un vehículo en colisión real. Después, el criterio de modelo enmallado y en formato de LS-DYNA implica que el modelo esté listo para configurar en impacto con un pre y post procesador para utilizar el solver. Asimismo, reportes de consulta disponibles del modelo FE fueron requeridos para comprender el desarrollo previo de cada uno. Los últimos dos criterios sirvieron para desarrollar la investigación de forma virtual y no ser limitado por la accesibilidad a los parachoques que representan las alternativas. A partir de estos criterios, una matriz morfológica fue empleada para evaluar las opciones disponibles. Estos modelos seleccionados fueron los que se sometieron después a análisis por elementos finitos para identificar la respuesta mecánica a impactos frontales de velocidad inicial de impacto controlada a 4, 8, 12 y 20 km/h. La matriz empleada se define a continuación en la Tabla 2.4.

Parámetros	Peso	Alternativas			
		Alternativa	Alternativa	Alternativa	Alternativa
		1	2	3	n
Es vehículo sedán	10				
Materiales definidos y validados	20				
Modelo FE validado con experimentos reales	25				
Modelo enmallado y en formato de LS-DYNA	20				
Disponibilidad de reportes de consulta	5				
No es necesario conseguir el parachoques y escanearlo	10				
Detalles técnicos del modelo disponible	10				
<b>Resultados de calificación</b>	<b>100</b>				

**Tabla 2.4** Matriz morfológica para selección de modelos FE

La alternativa con mayor puntuación fue seleccionada junto a otras alternativas que cumplen todos los criterios. Aquellos modelos que no cumplan uno de los criterios, serán

automáticamente considerados fuera de selección, mientras los que lo hagan forma parcial tendrán una puntuación proporcional.

#### **2.4.2. Extracción de parachoques**

Luego de seleccionar los modelos FE, el primer procedimiento fue registrar en cada parachoques la distancia de separación entre la parte interna de la viga y el radiador. Después, cada uno de los parachoques fueron extraídos empleando el programa LS-PrePost, el cual es un editor de modelos, pre y post procesador de análisis de elementos finitos con el solver LS-DYNA. Para ello, los componentes externos al parachoques fueron retirados y se mantuvieron dos componentes por cada vehículo: la viga y el crash box en los extremos de dicha viga. Tras retirar lo indicado, las secciones, materiales y uniones quedaron sin referencia por lo que todas estas tuvieron que también ser retiradas, en su totalidad.

#### **2.4.3. Asignación de propiedades al parachoques**

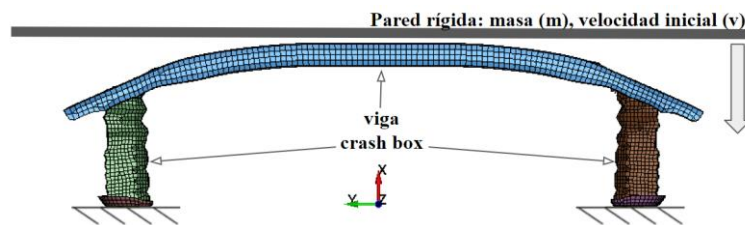
Los materiales, secciones y uniones de cada componente de los parachoques extraídos se definieron empleando como referencia el modelo FE original del vehículo. Para ello, en cada modelo inicial se habilitó la visibilidad de solo el parachoques y de esta manera se registró las propiedades de la viga y crash box. Sin embargo, como los modelos iniciales trabajaron con unidades consistentes de otra magnitud, como la masa en toneladas, entonces esta y otras medidas tuvieron que ser convertidas a las unidades definidas en la sección 2.3.

Como se trata de un modelo de elementos finitos (FE) de cada parachoques, debe interpretarse que previo a la creación de estos modelos existieron modelos CAD generados por computadora o de forma escaneada. En ese sentido, los modelos empleados ya fueron enmallados y el tamaño de malla, de acuerdo con los reportes de consulta de cada modelo del repositorio de la NHTSA [44], indican encontrarse entre 4 y 6 milímetros, los cuales fueron valores obtenidos luego de un análisis de calidad de malla por convergencia de resultados experimentales. Cabe mencionar que, a menor tamaño de malla, el tiempo de procesamiento de una simulación aumenta significativamente puesto que el intervalo del

paso del tiempo será menor para cada cálculo y por ende mayor será la cantidad de intervalos a procesar para el solver LS-DYNA. Por consiguiente, el enmallado de los modelos obtenidos del repositorio fueron considerados válidos por los resultados presentados en los reportes de cada modelo y la similitud de estos a impactos frontales reales de cada vehículo. Respecto a los materiales, los reportes de consulta de cada modelo indican haber caracterizado los materiales de los componentes del vehículo. Por consiguiente, cada componente contó con propiedades definidas como densidad, módulo de Young, esfuerzo de fluencia y la curva característica del material de esfuerzos y deformación unitaria. Por consiguiente, se registraron las masas de parachoques, de la viga y del crash box en sus extremos.

#### 2.4.4. Preprocesamiento de simulación

Luego de definir el modelo FE de los parachoques, el escenario de impacto frontal tuvo que ser configurado. En base a la prueba Full Width Frontal Impact Test de la agencia Euro NCAP [40], el experimento de colisión se representó como una pared rígida en movimiento dirigida hacia un parachoques fijado en la base de los crash box. La Figura 2.2 presenta la configuración del experimento simulado.



**Figura 2.2** Configuración de impacto frontal a parachoques

**Fuente:** Elaboración propia

Por consiguiente, la pared rígida en movimiento fue generada en Ls-PrePost con una masa equivalente al peso del vehículo tratado menos el del parachoques. Respecto a la velocidad inicial de la pared, esta se definió a los valores de 4, 8, 12 y 20 km/h; en ese orden cada parachoques requirió cuatro simulaciones de forma independiente. La ubicación inicial de la pared fue lo más cercana al parachoques, en un rango de cinco a diez milímetros de separación.

De acuerdo con los reportes de consulta de los modelos FE, el tiempo en el que culmina el impacto está en un rango de 100 a 120 milisegundos, por lo que se definió el tiempo de cálculo al mayor de estos, cuando la energía de absorción de parachoques ya se estabilizó. Asimismo, se habilitó la integración de la energía hourglass en el cálculo para después validar que sea menor al 5% de la energía absorbida. Este tipo de energía cuantifica los efectos de la calidad de malla. Por otro lado, para que exista contacto entre la pared y los componentes del parachoques se habilitó el contacto entre todos los elementos con coeficientes de fricción estático y dinámico de 0.2 y 0.1, respectivamente, valores previamente definidos en modelo FE original y en los reportes de consulta [11]. De esta forma, el contacto logra el principio de impenetrabilidad y la energía debida a la fricción o también llamada energía por contacto es registrada con un valor superior a cero y requiere ser corroborada.

Adicionalmente, en el preprocesamiento de la simulación fue necesario habilitar que variables serán calculadas y presentadas con gráficas en el posprocesamiento. Entonces, el balance de energía se activó e incluye la energía total, energía cinética, energía interna debido a la absorción de energía (EA), energía hourglass y de contacto. Asimismo, fue habilitada la absorción de energía (EA) de cada componente del parachoques de forma independiente. No fue necesario activar el seguimiento de nodos para determinar el desplazamiento máximo (DM), puesto que inicialmente no se conocen los nodos que tendrán mayor DM y además el solver LS-DYNA calcula las deformaciones y, así, en el posprocesamiento será posible determinar esta variable. Respecto a la absorción de energía específica (SEA), este valor fue calculado mediante la división de la EA con la masa del componente tratado. Finalmente, el intervalo de tiempo para cada cálculo fue definido a determinado automáticamente por el solver, de esta manera las gráficas de las variables serán continuas en el posprocesamiento.

#### **2.4.5. Simulación de impactos**

Luego de haber definido los modelos FE con las propiedades y realizar el preprocesamiento, por cada parachoque se obtuvieron cuatro archivos con formato .key, los cuales contaron con las velocidades de impacto de 4, 8, 12 y 20 km/h. Estos archivos para

el solver LS-DYNA fueron de entrada y se definió el uso de la máxima cantidad de núcleos del computador, ocho, para resolver cada uno. Cada simulación tomó alrededor de quince minutos en completarse y los archivos de salida del solver se ubican de forma predeterminada en la misma carpeta del archivo de entrada. Para el posprocesamiento fue solo necesario abrir aquél de nombre “d3plot” con el programa Ls-PrePost.

#### **2.4.6. Posprocesamiento de simulación**

Tras la apertura del archivo “d3plot” de cada simulación en Ls-PrePost, la animación de la colisión será visible y los resultados se encuentran disponibles. Primero, la gráfica del balance de energía se habilitó y se registraron el valor máximo y final de la curva de energía interna, la cual representa la absorción de energía (EA) del parachoques como valor máximo y estabilizado, respectivamente. Luego, la gráfica de energía interna de la viga y crash box se habilitaron de forma separada y se registraron nuevamente los valores máximos y finales en las curvas. Con respecto a la absorción de energía específica (SEA), esta fue determinada dividiendo los valores registrados de EA máximos y estabilizados con la masa del parachoques, la viga y crash box.

El desplazamiento máximo (DM) de cada parachoques fue hallado habilitando un mapa de calor de la deformación en la dirección del movimiento de la pared rígida hacia el parachoques; de esta manera, por inspección visual se identificó el área con mayor deformación en color rojo y se habilitó el desplazamiento de aquellos nodos para cuantificar el desplazamiento máximo (DM). La información registrada hasta este punto correspondió a los resultados del impacto a una de las cuatro velocidades, por lo que este posprocesamiento debe realizarse en total cuatro veces por cada parachoque analizado.

Por consiguiente, la absorción de energía (EA), absorción de energía específica (SEA) y desplazamiento máximo (DM) para los parachoques y sus componentes fueron registrados y son presentados como gráficas de la propiedad en función de cuatro velocidades de impacto.



#### 2.4.7. Criterios de evaluación a parachoques y sus componentes

Criterios de evaluación fueron requeridos para analizar la respuesta al impacto frontal de cada uno de los parachoques a las cuatro velocidades: 4, 8, 12 y 20 km/h. Estos se presentan en la siguiente tabla.

Criterios de evaluación	Peso
Parachoque ligero	15
Parachoque con alta EA	15
Parachoque con alta SEA	30
Parachoque con menor DM	40
<b>Resultados de calificación</b>	<b>100</b>

**Tabla 2.5** Criterios de evaluación de parachoques

Como se observa en la Tabla 2.5, cada uno de los criterios de evaluación emplean las variables dependientes definidas para determinar cuál de los parachoques impactados por simulación presentó una respuesta superior en impactos frontales completos. Una matriz morfológica fue empleada para realizar la comparación. Por otro lado, la absorción de energía específica (SEA) de los componentes: viga y crash box, fue el criterio empleado para determinar qué componente, viga o crash box, es el crítico o aquél que absorbe más energía en impactos de menor velocidad. Conocido de qué componente se trató, se procedió a compararlo en cada parachoques bajo los siguientes criterios bajo impacto a las cuatro velocidades de impacto frontal con el objetivo de definir el modelo base.

Criterios de evaluación	Peso
Componente ligero	20
Componente con alta SEA	30
Componente con menor DM	50
<b>Resultados de calificación</b>	<b>100</b>

**Tabla 2.6** Criterios de evaluación de componentes

El componente crítico de respuesta superior en base a estos criterios fue definido como el modelo base a modificar con el objetivo de reducir el desplazamiento máximo.

#### **2.4.8. Reducción del desplazamiento máximo (DM) al componente crítico**

Tras determinar el componente crítico como modelo base, se tuvo como objetivo reducir el desplazamiento máximo (DM) para incrementar la protección a los sistemas de enfriamiento, combustible y escape, dado que a bajas velocidades el daño principal es hacia estos en la propiedad vehicular. Para ello, el análisis de cada simulación que incluye al componente crítico fue analizado por inspección visual con un mapa de color de deformación y se registraron capturas de estas en las cuatro velocidades de impacto frontal. Por consiguiente, se obtuvieron cuatro capturas con vista posterior y mostraron qué áreas presentaron mayor deformación en la dirección del movimiento del impactor. Finalmente, el desplazamiento máximo en las cuatro simulaciones fue hallada y registrada.

En base a la deformación del modelo base, se propusieron tres modificaciones para reducir el DM. Por consiguiente, cada propuesta de diseño fue ejecutada realizando los cambios en el modelo FE con el programa Ls-PrePost y simulada a la menor velocidad de impacto, 4 km/h, en el solver LS-DYNA con el mismo pre y post procesamiento previamente detallado. Tras obtener los resultados, se cuantificaron las variables dependientes en cada modificación como el desplazamiento máximo, absorción de energía y absorción de energía específica. Por consiguiente, la respuesta al impacto de cada propuesta de diseño fue evaluada en función de la variación porcentual de la masa, SEA y DM respecto al modelo base, en una tabla. Determinado la propuesta óptima para reducir el desplazamiento máximo (DM), esta se simuló a las velocidades de impacto restantes: 8, 12 y 20 km/h para evaluar que el componente se mantiene como el crítico a bajas velocidades.

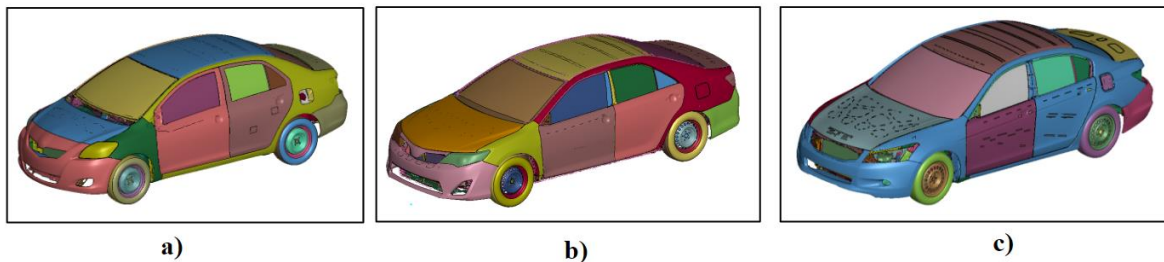
## CAPÍTULO III

### RESULTADOS

A continuación, se presentarán los resultados y el análisis tras seguir la metodología planteada. Los modelos de parachoques de vehículos sedán son seleccionadas; luego, los resultados del análisis computacional de impacto son presentados y analizados. Finalmente, tres modificaciones al componente crítico fueron analizados y comparados para la selección de una propuesta de diseño.

#### 3.1. Selección y generación de modelos

De acuerdo con la metodología, la selección y generación de modelos fue dado mediante una matriz morfológica. Los resultados obtenidos en base a los criterios de evaluación se presentan en el anexo 1. Por consiguiente, tres alternativas fueron las que obtuvieron el puntaje máximo y, por tanto, estas fueron considerados para el análisis y se denominan en adelante como: modelo A, modelo B y modelo C. La Figura 3.1 muestra los modelos de elementos finitos (FE) de estos vehículos.



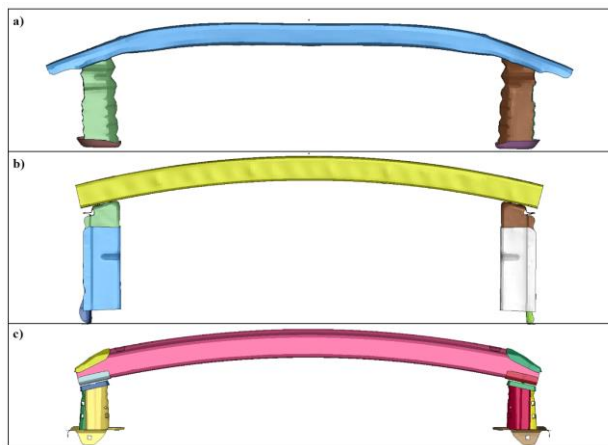
**Figura 3.1** Modelos FE de automóviles sedán: a) modelo A, b) modelo B, c) modelo C.

Como cada modelo cuenta con un reporte de consulta donde los resultados de impactos real y simulado fueron validados, entonces las características de cada modelo, como la cantidad de elementos, partes y peso, se encuentran disponibles y se presentan en la siguiente tabla.

Modelo	Elementos	Partes	Peso (kg)
A	1,519,587	940	1,078
B	2,257,280	1,086	1,452
C	1,487,424	596	1,480

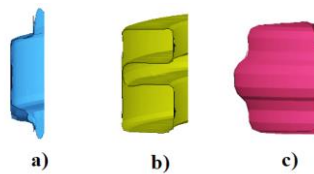
**Tabla 3.1** Resumen de los 3 modelos de automóviles [44]

Cabe mencionar que el tamaño de elementos es de 6 a 8 mm en promedio, lo cual fue definido mediante convergencia de resultados por simulación FEA y experimentos reales. Por consiguiente, los parachoques de cada vehículo fueron extraídos con los componentes viga y crash box. La siguiente figura presenta los tres parachoques.



**Figura 3.2** Parachoques de los vehículos sedán de: a) modelo A, b) modelo B, c) modelo C

Como se observa en la figura, cada parachoques cuenta con la viga y crash box en sus extremos. Las vigas presentaron distintos perfiles y son presentados en la siguiente figura.



**Figura 3.3** Perfil de viga de los parachoques de: a) modelo A, b) modelo B, c) modelo C

En base a la Figura 3.3, el modelo A presenta un perfil de viga del tipo “sombbrero”, el modelo B el tipo “B” y el modelo C el tipo “C”. Respecto a los crash box, la sección transversal es similar en los tres con la forma de cuadrilátero. Por consiguiente, se asignaron los materiales, secciones y uniones en cada modelo FE y consecuentemente se registraron la masa de los parachoques, sus componentes y el espacio interno de separación hasta el radiador.

Propiedad	Parachoques		
	Modelo	Modelo	Modelo
	A	B	C
Peso parachoques (kg)	8,6	8,1	6,1
Peso viga (kg)	4,9	4,5	3,8
Peso crash box (kg)	3,8	3,6	2,3
Espacio hasta radiador (mm)	110	140	154

**Tabla 3.2** Propiedades de los tres parachoques

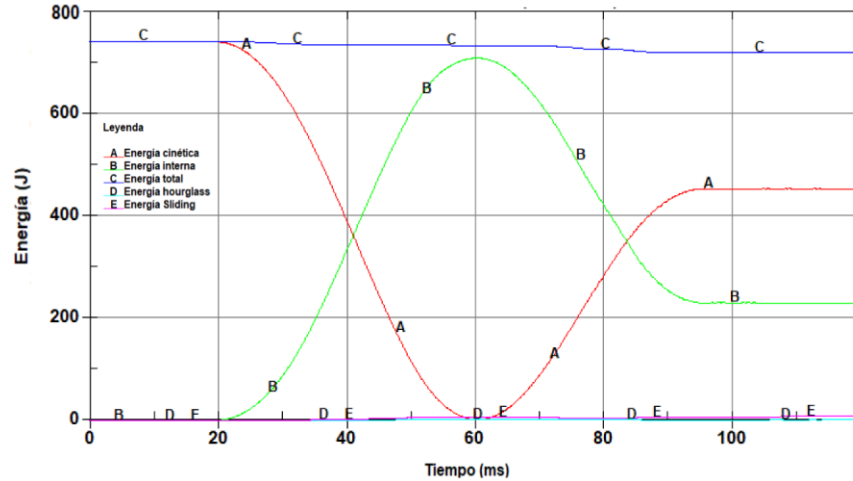
A partir de esta tabla se puede afirmar que el modelo C es el parachoques más ligero, luego el modelo B y después el modelo A.

### 3.2. Análisis de impacto a parachoques

En primer lugar, se validó el modelo computacional con los resultados experimentales y computacionales de Guangyong [12]. El objetivo fue replicar la simulación y obtener un valor similar o idéntico de absorción de energía (EA) de un crash box bajo compresión. Las medidas fueron de un cuadrado de 75 mm con altura de 200 m y material aluminio AA60601-O. Los resultados del reporte indicaron una EA de 1 kJ al finalizar la compresión y el valor obtenido tras la réplica fue de 1.01 kJ. Por consiguiente, este análisis permitió validar al solver LS-DYNA y emplearlo para replicar fenómenos físicos de impacto.

Como fueron tres los modelos de parachoques analizados entonces se simuló 12 impactos. Los resultados de pre y post procesamiento se presentan a continuación y en el

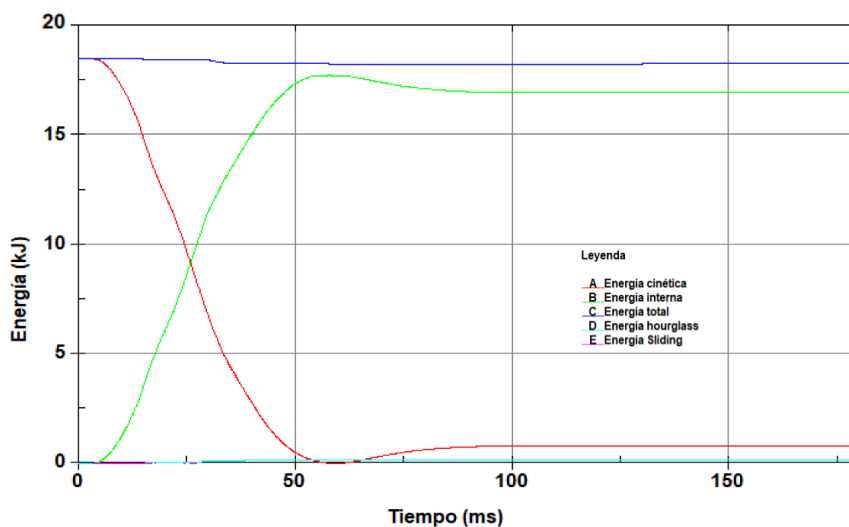
anexo 2; en primer lugar, el balance de energía de cada impacto tuvo la forma de la siguiente gráfica.



**Figura 3.4** Distribución de energías durante impacto frontal de 4 km/h a modelo A

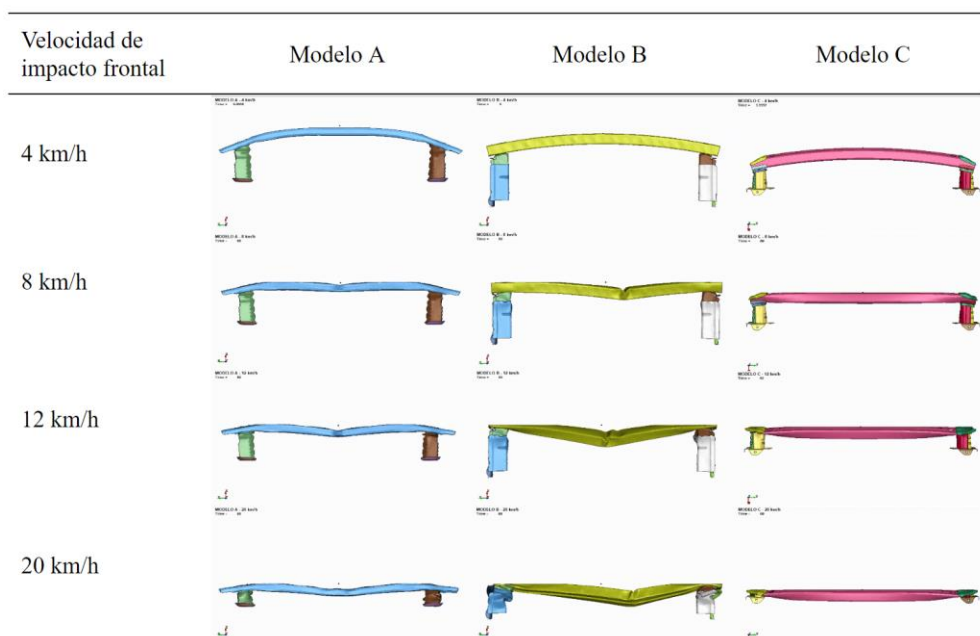
La Figura 3.4 presenta cinco curvas que describen la transformación de la energía en una colisión. La pared posee una masa y una velocidad inicial de 4 km/h, por consiguiente, esta contó con una energía cinética la cual fue transferida al parachoques mediante un impacto frontal. Dicha energía se tornó para cada modelo en energía cinética, interna por absorción de energía, energía por hourglass debido a la calidad de la malla y energía de contacto debida a la fricción. Respecto a estas últimas dos energías, se corroboró que la primera sea menor a 5% de la energía interna y la segunda tenga un valor positivo. En la Figura 3.4 se observó también que el impacto al parachoques tiene un punto máximo de absorción de energía interna la cual coincide con el valor mínimo de la energía cinética. Además, que estas dos energías se estabilizan a un determinado valor.

Para las otras tres velocidades, en las gráficas de balance de energía se observó una menor restitución de energías al estabilizarse conforme la velocidad de impacto se incrementó. De esta manera, para el impacto de 20 km/h la gráfica obtenida se presenta a continuación.



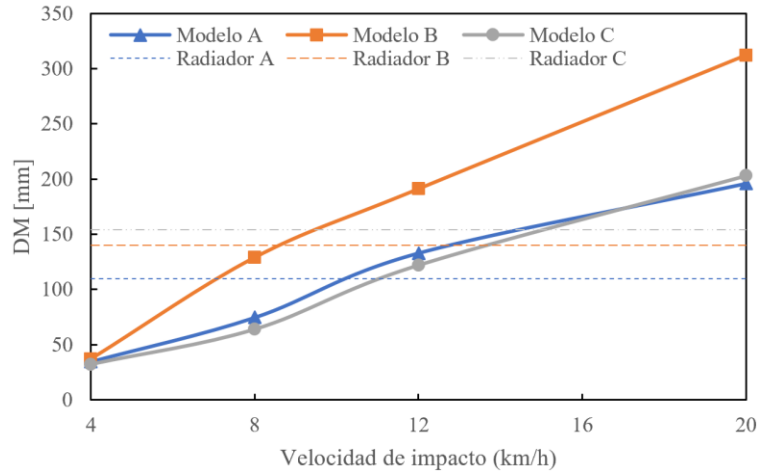
**Figura 3.5** Distribución de energías durante impacto frontal de 20 km/h a modelo A

En la Figura 3.5 se observa que es mínima la restitución de la energía cinética e interna desde sus valores mínimos y máximos, respectivamente. Por consiguiente, esto correspondió a la mayor deformación plástica que ocurre a mayor velocidad de impacto. La Figura 3.6 presenta la deformación de cada uno de los tres parachoques en cada velocidad de impacto.



**Figura 3.6** Deformación de parachoques en cuatro velocidades de impacto

Como se observa en la Figura 3.6, a mayor velocidad de impacto la deformación plástica fue mayor en cada uno de los tres modelos de parachoques. Por consiguiente, el desplazamiento máximo (DM) en función de la velocidad de impacto en cada parachoques es presentada en la Figura 3.7.

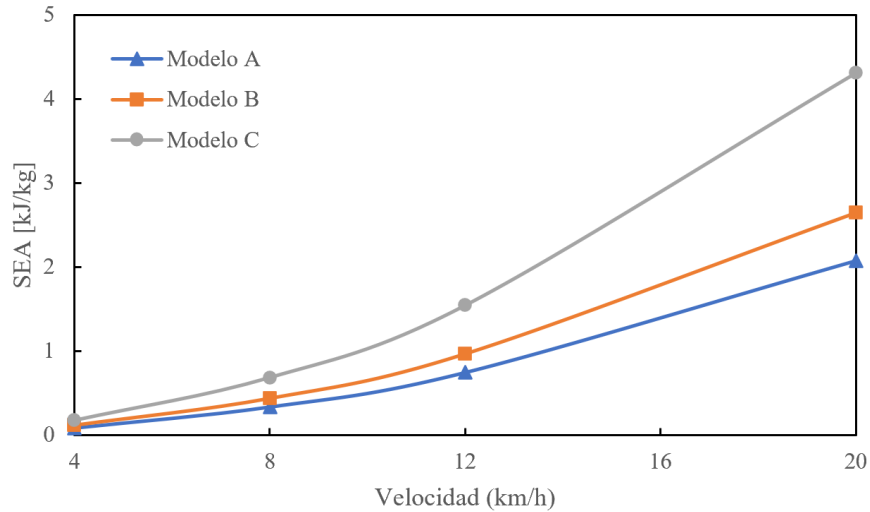


**Figura 3.7** Desplazamiento máximo en función de la velocidad de impacto a los parachoques

En la Figura 3.7 se presentaron las curvas del desplazamiento máximo (DM) de cada parachoques; asimismo, las líneas horizontales indicaron la distancia interna para contactar y afectar el radiador en cada modelo. A partir de esto, conforme se incrementó la velocidad de impacto, el DM también lo hizo y el modelo que registró un menor valor fue el modelo C. Este modelo también presentó una mayor distancia hacia el radiador. En ese sentido, el primer parachoques a dañar el radiador fue el modelo A a una velocidad aproximada de 11 km/h, luego el modelo B a una velocidad aproximada de 13 km/h y finalmente el modelo C a una de 15 km/h, aproximadamente. A partir de esto, estos modelos son capaces de no contactar a componentes internos de alto costo, como el radiador, en las pruebas de impacto a 4 y 5 km/h de las agencias IIHS y la RCAR detalladas en la sección 1.2.2.

Los resultados de absorción de energía específica (SEA) en función de las cuatro velocidades de impacto a cada modelo se presentan a continuación. Los modelos A, B y C son comparados y se definió qué modelo presenta mayor SEA.





**Figura 3.8** Absorción de energía específica en función de la velocidad de impacto a parachoques

A partir de la Figura 3.8 se evidencia que el modelo C presenta una mayor capacidad de absorción de energía (EA) por cada kilogramo de masa, luego se encuentra el modelo B y finalmente el modelo A. En el rango de 4 a 8 km/h de velocidad de impacto, los modelos A y B presentan un valor similar de SEA y después la diferencia es considerable. Cabe mencionar que estos valores obtenidos presentan magnitudes coherentes al ser comparadas a lo reportado en la sección 1.4.2, parachoque convencional reportado. Caracterizado la respuesta mecánica de los tres modelos de parachoques, se utilizaron los criterios de evaluación de la tabla 2.4 y una matriz morfológica para seleccionar cuál de estos tuvo un desempeño superior.

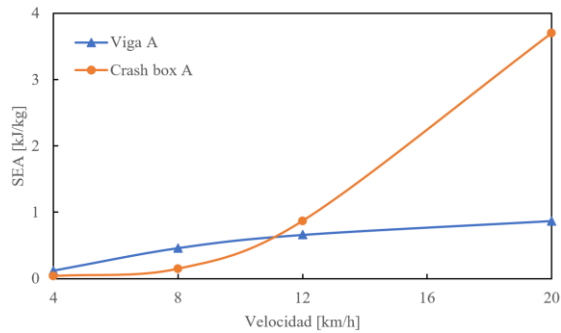
Criterios de evaluación	Peso	Parachoques		
		Modelo A	Modelo B	Modelo C
Parachoque ligero	15	10	12	15
Parachoque con alta EA	15	9	12	13
Parachoque con alta SEA	30	9	11	15
Parachoque con menor DM	40	35	22	37
<b>Resultados de calificación</b>	<b>100</b>	<b>63</b>	<b>57</b>	<b>80</b>

**Tabla 3.3** Comparación de parachoques

A partir de la Tabla 3.3, el modelo C fue seleccionado como el parachoques de superior performance. Cabe mencionar que pese a la mayor absorción de energía del modelo B que el modelo A, este registró un elevado desplazamiento máximo por lo que fue el primer parachoques en impactar al radiador de acuerdo con la Figura 3.7.

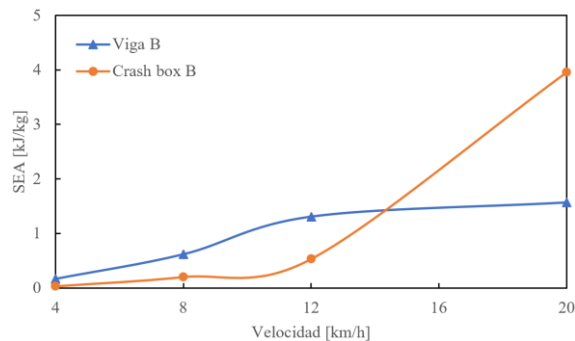
### 3.3. Análisis de impacto a viga y crash box

Ahora, se determinará cuál componente del parachoques, viga o crash box, absorbe mayor energía específica a bajas velocidades de impacto frontal. La Figura 3.9 presenta la respuesta de estos componentes en cada una de las cinco velocidades de impacto frontal en el modelo A.



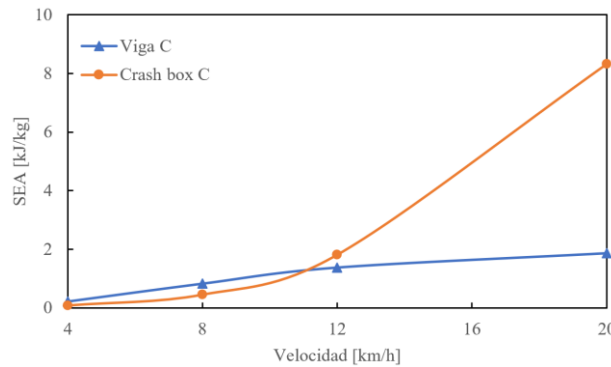
**Figura 3.9** Respuesta de componentes del parachoques modelo A

De acuerdo con la Figura 3.9, para el modelo A, a bajas velocidades de impacto el componente registrado con mayor absorción de energía específica (SEA) fue la viga. Conforme se incrementó esta velocidad, los crash box absorbieron mayor SEA. Asimismo, para este modelo los crash box presentan mayor SEA desde los 11 km/h, aproximadamente.



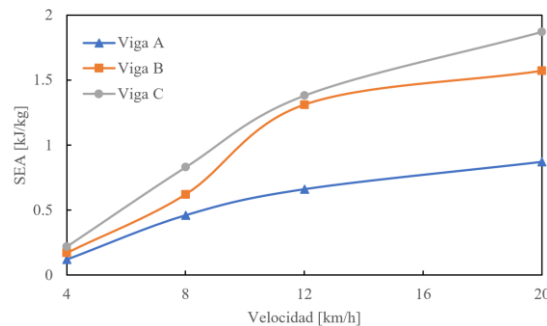
**Figura 3.10** Respuesta de componentes del parachoques modelo B

De acuerdo con la Figura 3.10, en el modelo B a bajas velocidades de impacto el componente registrado con mayor absorción de energía específica (SEA) es la viga. La velocidad de impacto donde el crash box inicia a poseer mayor SEA es desde los 14 km/h. La curva descrita por la viga indicó que la SEA se estabiliza desde el momento que el crash box absorbió más.



**Figura 3.11** Respuesta de componentes del parachoques modelo C

De acuerdo con la Figura 3.11, con el modelo C se confirmó una vez más que el componente que presenta mayor SEA a bajas velocidades es la viga y que a velocidades superiores a 11 km/h, aproximadamente, el crash box presenta mayor SEA. A partir de esto, la viga fue identificada como el modelo crítico tras absorber la mayor cantidad de energía en impactos de baja velocidad. Finalmente, para definir cuál viga será el modelo base, se comparó este componente en los tres modelos mediante la Figura 3.12.



**Figura 3.12** Comparación de SEA en vigas de parachoques

A partir de la Figura 3.12 se observó que en todas las velocidades de impacto la viga del modelo C presentó mayor absorción de energía específica (SEA), luego la viga del

modelo de parachoques B y después la viga del modelo A. Para seleccionar uno de estos como el modelo base a modificar, se emplearon los criterios de la tabla 2.5 y los resultados se presentan en la siguiente matriz morfológica.

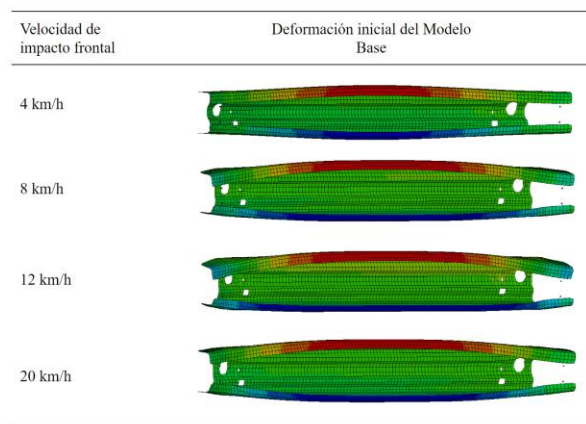
Criterios de evaluación	Peso	Vigas		
		Modelo A	Modelo B	Modelo C
Componente ligero	20	10	13	18
Componente con alta SEA	30	15	25	27
Componente con menor DM	50	42	26	44
<b>Resultados de calificación</b>	<b>100</b>	<b>67</b>	<b>64</b>	<b>89</b>

**Tabla 3.4** Criterios de evaluación de componentes

La viga del parachoques modelo C entonces fue definida como el modelo base tras obtener la máxima puntuación con los criterios definidos.

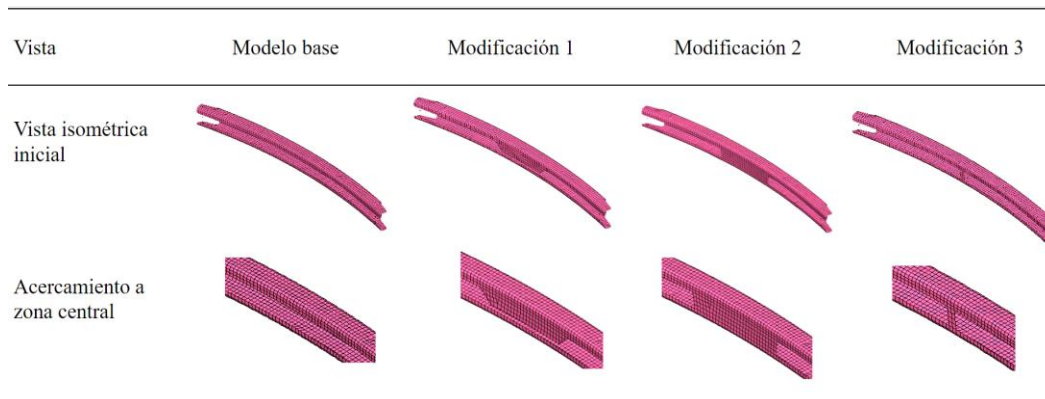
### 3.4. Análisis de modificaciones al modelo base

Por consiguiente, se desarrollaron tres modificaciones a esta viga para reducir su desplazamiento máximo (DM). De acuerdo con la figura 3.3, el perfil que posee este componente es del tipo C y conforme a lo definido en la metodología, las capturas de la deformación a cinco milisegundos de inicio del impacto frontal se presentan en la Figura 3.13.



**Figura 3.13** Deformación inicial del modelo base tras 5 milisegundos de impacto

A partir de la Figura 3.13 se determinó que la viga se expande verticalmente y, por consiguiente, reduce el segundo momento de inercia y se produce una mayor deflexión. A partir de esto, se realizaron tres modificaciones al área central de la viga que es la de mayor desplazamiento. De forma visual, la siguiente figura resumen las tres modificaciones tras editar el modelo base en Ls-PrePost.



**Figura 3.14** Vista de modelo base y modificaciones

La primera modificación consistió en una extensión de la viga en la parte central, la modificación 2 del cierre de la sección central y la modificación 3 del cierre también, pero con una menor área empleada. Tras realizar el pre y post procesamiento de modelos con las modificaciones, los resultados obtenidos para un impacto de 4 km/h se presentan en la siguiente tabla. Asimismo, en el anexo 3 se presentan mapas de color para el modelo base y las tres modificaciones.

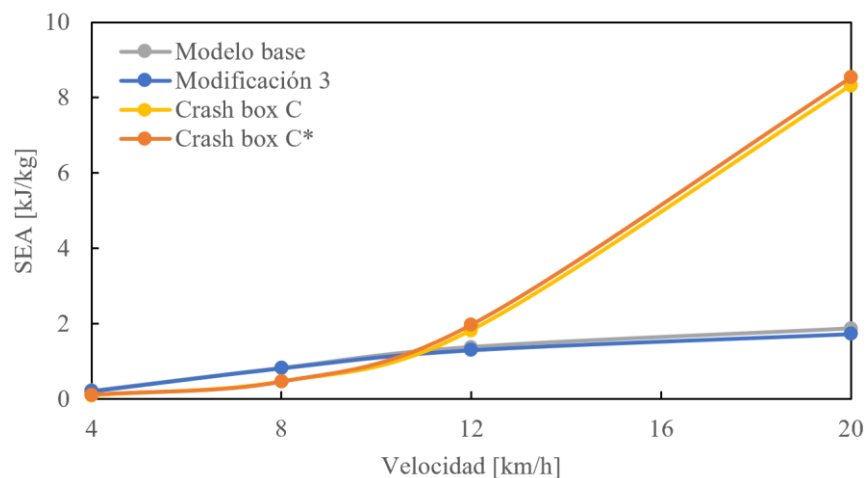
Propuestas	Masa [kg]	Variación (%)	SEA [kJ/kg]	Variación (%)	DM [mm]	Variación (%)
Modelo Base	3.76	-	0.22	-	25.50	-
Modificación 1	3.89	3.48	0.22	-3.67	32.00	25.49
Modificación 2	3.96	5.18	0.20	-10.55	22.10	-13.33
Modificación 3	3.77	0.37	0.21	-7.20	23.80	-6.67

**Tabla 3.5** Resultados obtenidos del modelo base y las tres modificaciones

En la Tabla 3.5, las masas de cada modificación del modelo de viga inicial, la absorción de energía específica (SEA) y el desplazamiento máximo (DM) son presentados

junto a la variación porcentual respecto al modelo base. La modificación 1 presenta una variación de DM positiva por lo que aumentó la variable que se buscó reducir. A partir de estos resultados, la modificación 3 es la propuesta de diseño con mayor puntaje obtenido. De esta manera, la viga del parachoques modelo C reduce el desplazamiento máximo (DM) en 6.67% a costa de un mayor peso y menor absorción de energía específica (SEA) en 0.37% y 7.20%, respectivamente. Esto significa que se logró el objetivo de reducir el DM, pero implicó que la SEA se reduzca en el mismo porcentaje de alrededor 7%, el incremento de peso es mínimo por lo que se considera que la masa del parachoques se mantuvo constante.

Adicionalmente, la viga C - modificación 3 fue analizada al resto de velocidades para determinar el efecto en la absorción de energía específica respecto al modelo base, el cual es la misma viga, pero sin modificación alguna.



**Figura 3.15** Comparación de SEA en modelo base y modificación 3

A partir de esta gráfica se observa que el efecto de la modificación 3 es mínimo en la SEA de la viga y crash box. La relación determinada donde la viga absorbe mayor energía a bajas velocidades y el crash box a mayores se mantiene.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se obtuvieron los siguientes resultados a partir de lo investigado sobre los impactos frontales a automóviles sedán.

1. Se realizó un estudio comparativo entre los parachoques de tres automóviles sedán, definidos como modelo A, B y C, sobre la absorción de energía al impacto frontal a velocidades de 4, 8, 12 y 20 km/h. Obteniendo como conclusión general que el modelo C con un perfil de viga tipo “C” puede ser utilizado sobre el perfil tipo “sombbrero” y “B” de los modelos A y B, respectivamente.
2. Se seleccionó modelos de elementos finitos (FE) de tres automóviles sedán del repositorio de investigación de la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras (NHTSA) de los Estados Unidos de América. Consecuentemente, se generaron los parachoques con las propiedades validadas de cada componente como el material, las secciones y uniones. Con ello, se pudo registrar la masa de cada componente, los perfiles de viga y la distancia interna de separación entre el parachoques y el radiador, permitiendo continuar con el preprocesamiento, simulación y posprocesamiento de impactos con la configuración de la prueba Front Full Width Rigid Barrier Test de la agencia Euro NCAP.
3. Se identificó que el componente de los parachoques con mayor absorción de energía (EA) en impactos frontales de baja velocidad es la viga. Adicionalmente, se identificó que el crash box presenta mayor EA conforme la velocidad de impacto supere los 10 km/h en promedio. Por consiguiente, en pruebas de impacto de baja velocidad, como 4 y 5 km/h conducidas por instituciones y agencias como la IIHS, RCAR y NCAP, la viga del parachoques de un automóvil deberá ser capaz de resistir el impacto con un desplazamiento máximo (DM) que no incurra en daños a partes vehiculares de alto costo como el radiador y el motor.

4. Se determinó que el parachoques modelo C presentó la viga de mayor absorción de energía específica (SEA) y menor desplazamiento máximo (DM) en impactos frontales de 4 km/h. Así, este modelo registró un valor superior de SEA en 23% y 45%, y menor de DM en 15% y 7%, a los modelos B y A, respectivamente. Esta comparación de vigas fue realizada también a 8, 12 y 20 km/h y el modelo C preservó la respuesta mecánica superior. Adicionalmente, se determinó que en impactos frontales de velocidad igual o mayor a 15 km/h, los tres parachoques incurren en contactado al radiador, ocasionado un costo de reparación elevado en un escenario real.

Se realizó una propuesta de diseño que reduce en 6.67% el desplazamiento máximo (DM) de la viga del parachoques modelo C. Para ello, tres modificaciones por separado se analizaron sobre dicha viga y se determinó que la modificación número 3 reduce el DM; esta consistió en fijar la parte central y, así, evitar la expansión vertical inicial registrada de la viga en impactos frontales de 4, 8, 12 y 20 km/h. Los resultados validaron dicha hipótesis, sin embargo, el peso de la viga se incrementó en 0.37%, el cual es considerado válido para la protección a la propiedad vehicular a velocidades de impacto de 4 km/h. Cabe mencionar que la modificación número 2 también cumplió este propósito, pero su peso mayor en 5.18% al modelo base se consideró significativo puesto que trasciende a un mayor consumo de combustible y emisión de gases contaminantes del vehículo.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. P. Rodrigue, C. Comtois, and B. Slack, *The geography of transport systems*. Taylor and Francis, 2016.
- [2] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, “Highway Statistics Summary to 1995,” *FHWA-PL-97-009 (Washington, DC: July 1997), table VM-201A*. <http://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/statistics.cfm> (accessed Jan. 03, 2022).
- [3] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, “Highway Statistics to 2020,” (*Washington, DC: Annual Issues*), table VM-1. <http://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/statistics.cfm> (accessed Jan. 03, 2022).
- [4] International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, “Sales Statistics,” 2019. <https://www.oica.net/category/sales-statistics/> (accessed Jan. 06, 2022).
- [5] (NHTSA), “Data Estimates Indicate Traffic Fatalities Continued to Rise at Record Pace in First Nine Months of 2021,” *Washington, DC, 2022*. <https://www.nhtsa.gov/press-releases/traffic-fatalities-estimates-jan-sept-2021> (accessed Jan. 09, 2022).
- [6] (SUTRAN), “Reporte Estadístico N°013-2022 - Accidentes de tránsito ocurridos en carreteras,” *Reportes Estadísticos: Accidentes de Tránsito, 2022*. [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2828227/Reporte Estadístico N°013-2022 - Accidentes de tránsito ocurridos en carreteras.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2828227/Reporte%20Estadístico%20N°013-2022%20-%20Accidentes%20de%20tránsito%20ocurridos%20en%20carreteras.pdf) (accessed Jan. 11, 2022).
- [7] United Nations, “Road Safety Strategy,” *A Partnership for Safer Journeys*, 2018. [https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/road\\_safety\\_strategy\\_booklet.pdf](https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/road_safety_strategy_booklet.pdf) (accessed Jan. 14, 2022).
- [8] N. Puthan, Pradeep and Thalya, Prateek and Lubbe, “Active and passive safety

passenger car technologies: potentials to save lives in India,” *Int. Res. Counc. Biomech. Inj.(IRCOBI Asia), Lonavala, India*, 2018.

- [9] P. V. P. M. A.S.Ashtikar, “Crash Analysis of Car Bumper Beam in Frontal Impact,” *Mech. Eng. Dep. P.V.P.I.T. Bavdhan, Pune Univ.*, vol. ISSN 2395-, 2016.
- [10] INSURANCE INSTITUTE FOR HIGHWAY SAFETY, “Bumper Test and Rating Protocol (Version VIII),” *September*, 2010. [http://www.iihs.org/ratings/protocols/pdf/test\\_protocol\\_bumper.pdf](http://www.iihs.org/ratings/protocols/pdf/test_protocol_bumper.pdf) (accessed Jan. 15, 2022).
- [11] National Highway Traffic Safety Administration, “Crash Simulation Vehicle Models,” *LS-DYNA FE*. <https://www.nhtsa.gov/crash-simulation-vehicle-models> (accessed Jan. 20, 2022).
- [12] G. Sun, T. Pang, J. Fang, G. Li, and Q. Li, “Parameterization of criss-cross configurations for multiobjective crashworthiness optimization,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 124–125, pp. 145–157, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.02.027>.
- [13] Y. Liu and M. Day, “Experimental Analysis and Computer Simulation of Automotive Bumper System under Impact Conditions,” *Int. J. Comput. Methods Eng. Sci. Mech.*, vol. 9, pp. 51–59, 2008, doi: 10.1080/15502280701759218.
- [14] T. Garret, Bautista. Chad, Hardin. Ben, “Best-in-Class Global Bumper Reinforcement Beam,” *Mechanical Engineering Department*, 2009. <https://digitalcommons.calpoly.edu/mesp/8> (accessed Jan. 24, 2022).
- [15] VOLVO, “Volvo Cars’ crash-test laboratory 10 years: The ability to replicate road accidents contributes to world-class crash safety,” 2010. <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/32451> (accessed Jan. 21, 2022).
- [16] Thatcham Research, “Vehicle Testing,” 2022. <https://www.thatcham.org/what-we-do/testing/> (accessed Jan. 24, 2022).

- [17] The Insurance Institute for Highway Safety (IIHS), “About us,” 2022. <https://www.iihs.org/about-us> (accessed Jan. 25, 2022).
- [18] RCAR, “Bumper Test Protocol,” 2020. [https://www.rcar.org/images/papers/procedures/RCAR\\_Bumper\\_Test\\_Procedure\\_2\\_2 - 2020.pdf](https://www.rcar.org/images/papers/procedures/RCAR_Bumper_Test_Procedure_2_2 - 2020.pdf) (accessed Jan. 27, 2022).
- [19] T. Xu, N. Liu, Z. Yu, T. Xu, and M. Zou, “Crashworthiness Design for Bionic Bumper Structures Inspired by Cattail and Bamboo,” *Appl. Bionics Biomech.*, vol. 2017, p. 5894938, 2017, doi: 10.1155/2017/5894938.
- [20] IIHS (USA), “Mini and microcar bumpers allow pricey damage; none of the 7 tested rates good under new system,” 2009. <https://www.iihs.org/news/archive/selected-archive> (accessed Jan. 30, 2022).
- [21] Badell’s Collision Inc, “THE EVOLUTION OF BUMPERS: AN AUTO SAFETY APPARATUS,” 2018. .
- [22] Y. Liu, K. He, G. Chen, W. R. Leow, and X. Chen, “Nature-Inspired Structural Materials for Flexible Electronic Devices,” *Chem. Rev.*, vol. 117, no. 20, pp. 12893–12941, Oct. 2017, doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00291.
- [23] S. Amada, Y. Ichikawa, T. Munekata, Y. Nagase, and H. Shimizu, “Fiber texture and mechanical graded structure of bamboo,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 28, no. 1, pp. 13–20, 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(96\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(96)00020-0).
- [24] D. S. Huang, A. P. Zhou, H. T. Li, Y. Su, and G. Chen, “Experimental Study on the Tensile Properties of Bamboo Related to its Distribution of Vascular Bundles,” *Key Eng. Mater.*, vol. 517, pp. 112–117, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.517.112.
- [25] A. and A. Storheim, Martin and Notaro, Gabriele and Johansen, “Comparison of ABAQUS and LS-DYNA in simulations of ship collisions,” *Proc. ICCGS 2016*, 2016.
- [26] G. Sun, X. Wang, J. Fang, T. Pang, and Q. Li, “Parallelized optimization design of

- bumper systems under multiple low-speed impact loads,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 167, p. 108197, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108197>.
- [27] H. R. Zarei and M. Kröger, “Bending behavior of empty and foam-filled beams: Structural optimization,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 35, no. 6, pp. 521–529, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.05.003>.
- [28] M. Zou, Y.-J. Yu, R.-R. Zhang, C.-G. Wei, and H.-X. Wang, “Simulation analysis of energy-absorption properties of thin-wall tube based on horn structure,” vol. 45, pp. 1863–1868, 2015, doi: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201506020.
- [29] J. Marzbanrad, M. Alijanpour, and M. S. Kiasat, “Design and analysis of an automotive bumper beam in low-speed frontal crashes,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 47, no. 8, pp. 902–911, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2009.02.007>.
- [30] Stu Brown, “EFFICIENT STEEL BUMPER BEAM DESIGN & Steel Bumper Systems (SBSV7),” *AISI Automot. Webinar*, 2020.
- [31] E. G. and T. S. Stanislav Evtukov, “Prospects of scientific research in the field of active and passive safety of vehicles,” *MATEC Web Conf. 239, 04018. Saint Petersburg State Univ. Archit. Civ. Eng.*, 2018.
- [32] C. Kircher, “ARE OLDER CARS SAFER? DATA DISPUTES THIS CLAIM,” *Texas Auto Writers Association and the Midwest Automotive Media Association.*, 2014. <https://motorreview.com/old-car-new-car-safer/> (accessed Feb. 05, 2022).
- [33] T. Stewart, “Overview of motor vehicle crashes in 2020 (Report No. DOT HS 813 266),” *Natl. Highw. Traffic Saf. Adm.*, 2022.
- [34] (WHO)World Health Organization, “New WHO report highlights insufficient progress to tackle lack of safety on the world’s roads,” 2018. <https://www.who.int/news/item/07-12-2018-new-who-report-highlights-insufficient-progress-to-tackle-lack-of-safety-on-the-world’s-roads> (accessed Feb. 14, 2022).
- [35] ITF, “Road Safety Annual Report 2021: The Impact of Covid-19,” *OECD Publ. Paris*,

2021.

- [36] S. Abdulqadir, “Design a new energy absorber longitudinal member and compare with S-shaped design to enhance the energy absorption capability,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.aej.2018.07.012.
- [37] Laszlo Porko & Istvan Lakatos, “Vehicle occupant safety development with finite element method,” *Dep. Road Rail Veh. Fac. Mech. Eng. Informatics Electr. Eng. Szechenyi Istvan Univ. Egy. ter 1, H-9026 Győr, Hungary*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1556/606.2021.00306>.
- [38] NHTSA, “Regulations,” 2022. <https://www.nhtsa.gov/laws-regulations/fmvss> (accessed Feb. 20, 2022).
- [39] M. VAZQUEZ VEGA, D and HERNANDEZ JIMENEZ, JR and FABELA GALLEGOS, MJ and FLORES CENTENO, O and SANCHEZ VELA, LG and MOLANO CLEMENTE, “REVISION DE LA NORMATIVIDAD SOBRE LOS REQUERIMIENTOS DE SEGURIDAD EN AUTOMOVILES,” *Inst. Mex. del Transp. ISO 90012015*, 2017.
- [40] E. N. C. A. P. (Euro NCAP), “FULL WIDTH FRONTAL IMPACT TESTING PROTOCOL No Title,” 2015.
- [41] Insurance Institute for Highway Safety (IIHS), “Bumper Test and Rating Protocol (Version VIII),” 2010.
- [42] RCAR, “Bumper Test,” 2020.
- [43] RCAR Damageability Working Group, “Regarding Effects of the Introduction of the RCAR Bumper Test,” *Informational Doc.*, 2016.
- [44] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), “Crash Simulation Vehicle Models,” 2019, [Online]. Available: <https://www.nhtsa.gov/crash-simulation-vehicle-models>.

- [45] A. LST, “LS-DYNA Information,” 2022. <https://www.lstc.com/products/ls-dyna> (accessed Mar. 11, 2022).
- [46] C. R. Sonawane and A. L. Shelar, “Strength Enhancement of Car Front Bumper for Slow Speed Impact by FEA Method as per IIHS Regulation,” *J. Inst. Eng. Ser. C*, vol. 99, no. 5, pp. 599–606, 2018, doi: 10.1007/s40032-017-0365-y.
- [47] L. Zhang, Z. Bai, and F. Bai, “Crashworthiness design for bio-inspired multi-cell tubes with quadrilateral, hexagonal and octagonal sections,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 122, pp. 42–51, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.10.010>.
- [48] M. Habtamu, “Automobile Bumper Beam Analysis to Improve Energy Absorption,” Addis Ababa University, 2017.
- [49] D. A. Sindrey, “Steel Bumper Systems for Passenger Cars and Light Trucks,” *SAE Trans.*, vol. 108, pp. 875–883, May 1999, [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/44650692>.
- [50] Mercadolibre, “Refuerzo Parachoque Delantero Hyundai Grand I10 2014-2020,” 2022. <https://acortar.link/GynoUD> (accessed Feb. 15, 2022).
- [51] Mercadolibre, “Refuerzo Parachoque Delantero Hyundai Accent 2012-2016,” 2022. <https://acortar.link/T8Xtxx> (accessed Feb. 15, 2022).
- [52] Mercadolibre, “Refuerzo Parachoque Delantero Kia Cerato C 2011 2014 G4fc,” 2022. <https://acortar.link/Dz56LY> (accessed Feb. 15, 2022).
- [53] A. Zurich, “2013 Audi A3 Sportback Vs. 2013 Renault Captur Small-Overlap Low-Speed Crash Test,” 2019. <http://www.agu.ch> (accessed Feb. 17, 2022).
- [54] L. Young-deuk, “A Study on the Applicability of Al6060S-T6 to Crash Box,” *Univ. Nac. Pukyong*, 2021, [Online]. Available: <https://repository.pknu.ac.kr:8443/handle/2021.oak/2115>.
- [55] G. . Halmos, “Roll Forming Handbook (1st ed.),” 2005, doi:







<https://doi.org/10.1201/9781420030693>.

- [56] Y. Hu, C. Liu, J. Zhang, G. Ding, and Q. Wu, “Research on carbon fiber–reinforced plastic bumper beam subjected to low-velocity frontal impact,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 7, no. 6, p. 1687814015589458, Jun. 2015, doi: 10.1177/1687814015589458.
- [57] T. Lu, Guoxing and Yu, *Energy absorption of structures and materials*. 2003.
- [58] J. R. Reddy, T.Y., Reid, S.R., Carney III, J.F. and Veillette, “Crushing analysis of braced metal ring using the equivalent structure technique,” *Int. J. Mech. Sci.* 29, 655–68., 1987.

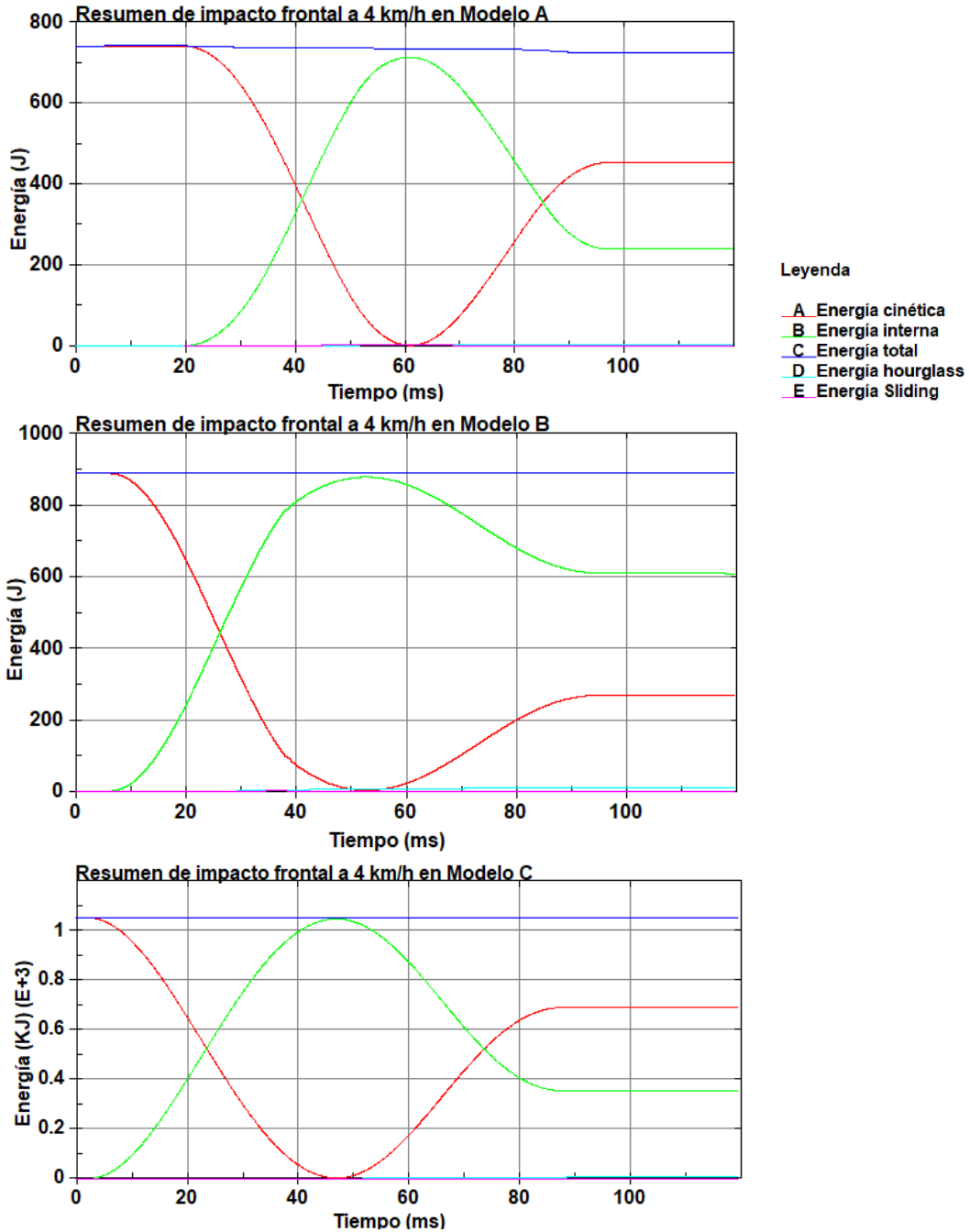
# **ANEXOS**

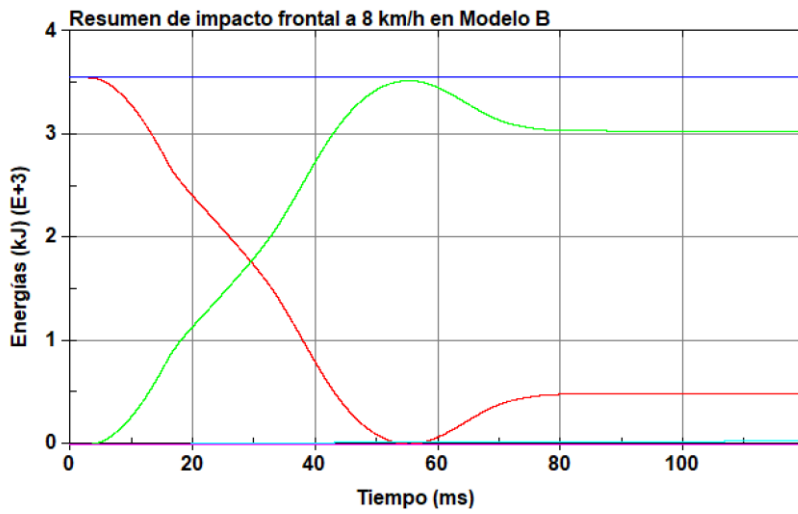
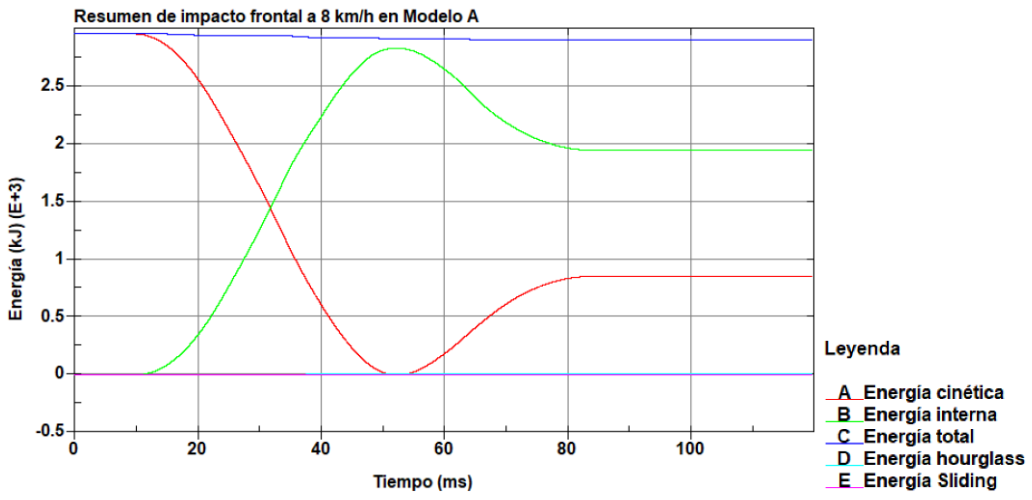


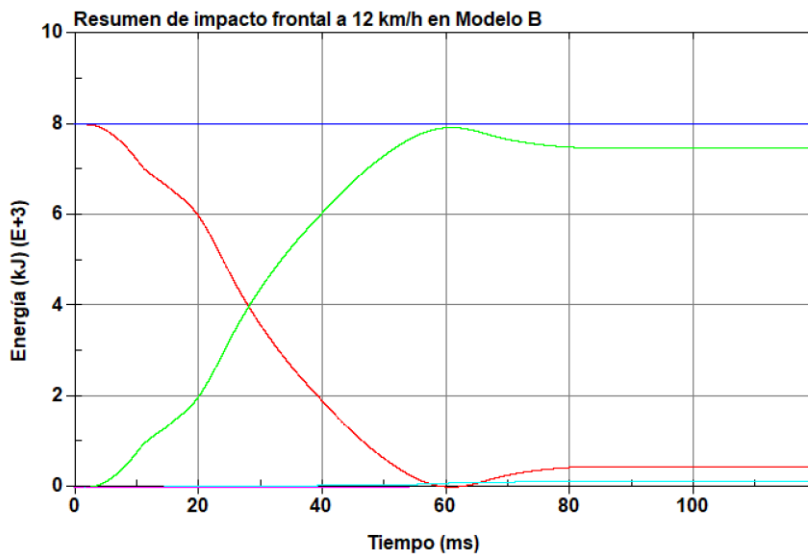
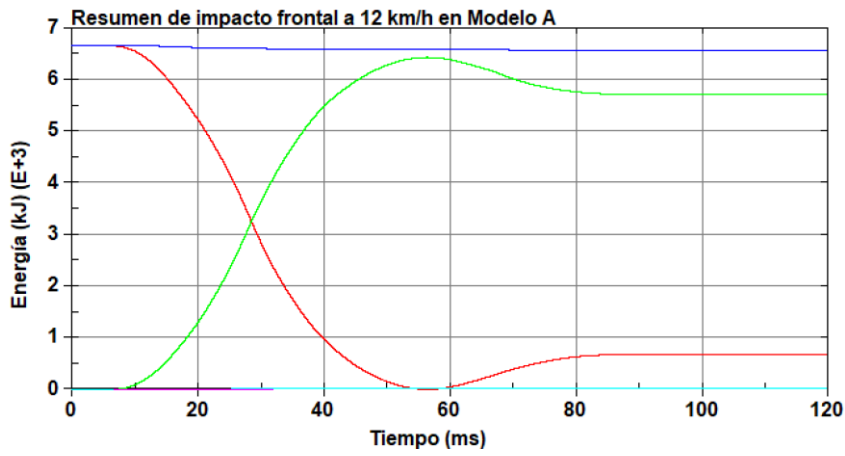
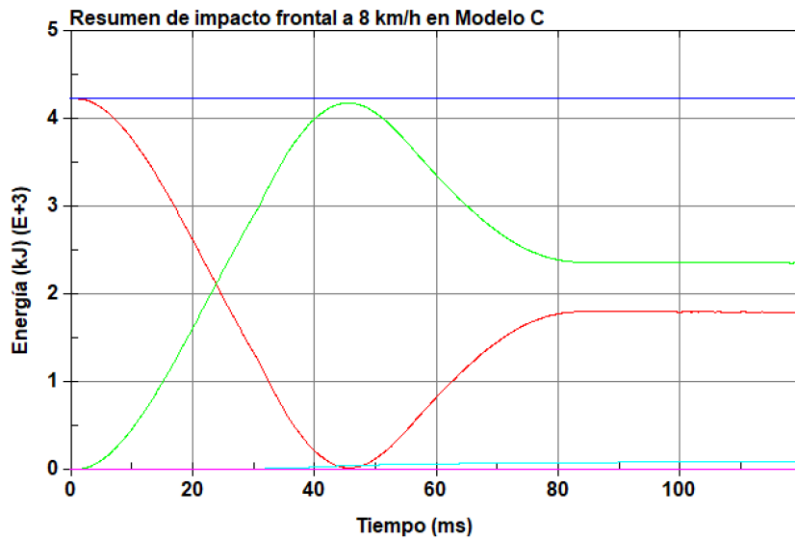
## ANEXO 1: Selección de modelos FE de automóviles

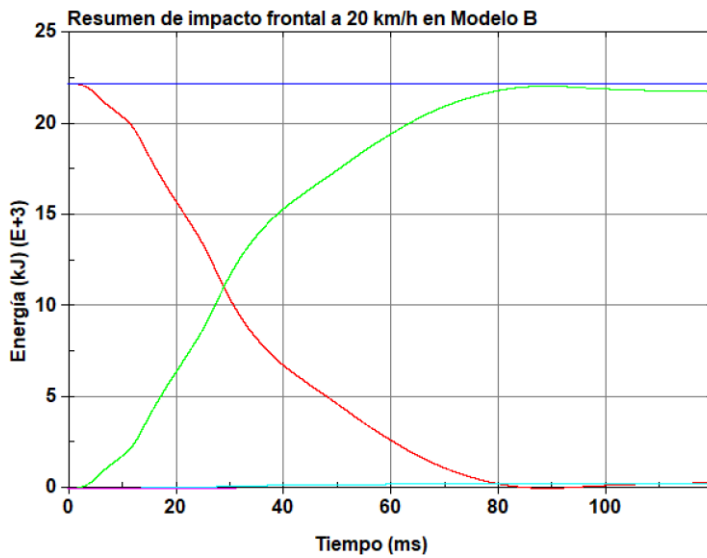
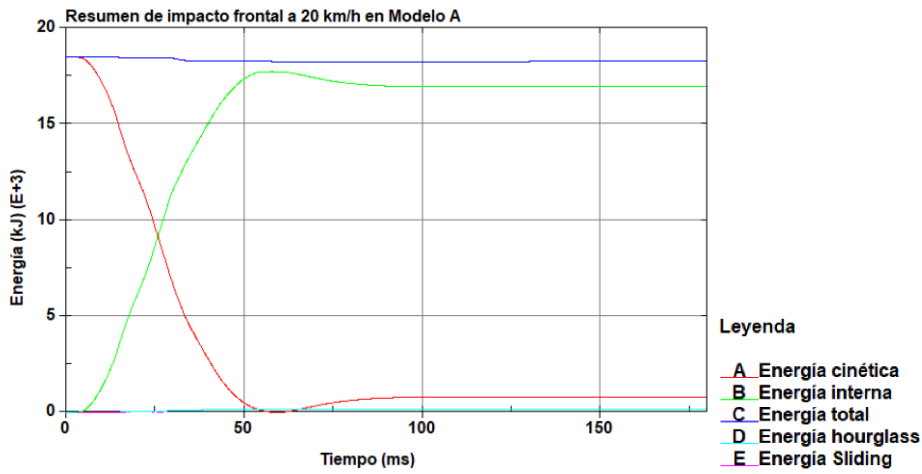
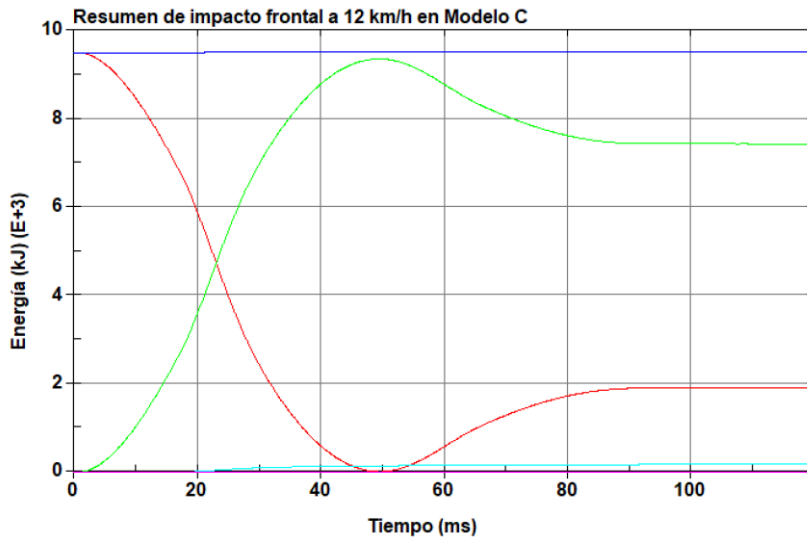
Parámetros	Peso	Alternativas					
		Hyundai Grand I10 [50]	Toyota Camry [44]	Hyundai Accent [51]	Toyota Yaris [44]	Kia Cerato C [52]	Honda Accord [44]
							
Es vehículo sedán	10	6	10	10	10	10	10
Materiales definidos y validados	20	10	20	10	20	10	20
Modelo FE validado con experimentos reales	25	0	25	0	25	0	25
Modelo enmallado y en formato de LS-DYNA	20	0	20	0	20	0	20
Disponibilidad de reportes de consulta	5	2	5	2	5	2	5
No es necesario conseguir el parachoques y escanearlo	10	3	10	3	10	3	10
Detalles técnicos del modelo disponible	10	5	10	5	10	5	10
<b>Resultados de calificación</b>	<b>100</b>	<b>26</b>	<b>100</b>	<b>30</b>	<b>100</b>	<b>30</b>	<b>100</b>

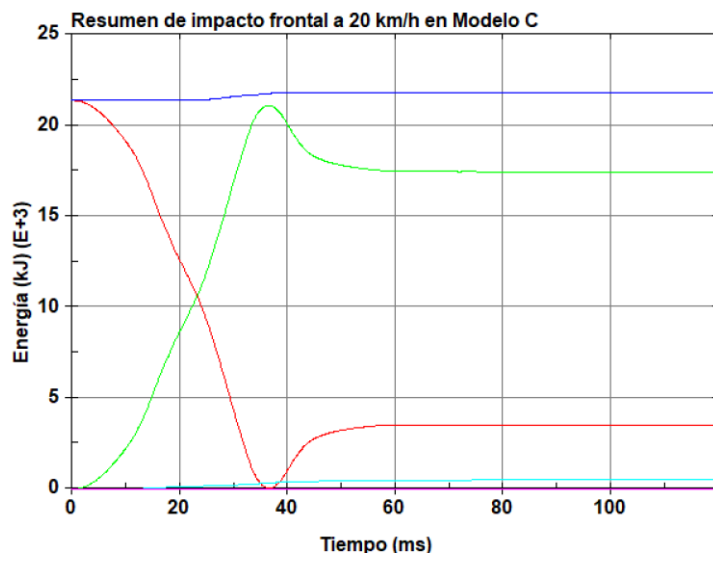
## ANEXO 2: Distribución de energías en impacto frontal a los tres parachoques











### ANEXO 3: Respuesta mecánica de modelo base y modificaciones con mapas de color

