



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ**

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ**

**TEMA:**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN VEHÍCULO MONOPLAZA ELÉCTRICO  
BAJO CONDICIONES DE IMPACTO MEDIANTE SOFTWARE DE  
INGENIERÍA CAD/CAE.**

**AUTORES: FRANKLIN DAVID AYALA MARTÍNEZ  
ANDERSON STALIN CHULDE MONTALVO**

**DIRECTOR: ING. ROMMEL PAUL IMBAQUINGO NAVARRETE, MSc**

**Ibarra, 2022**

## CERTIFICADO

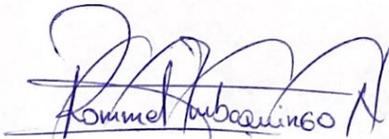
### ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

En mi calidad de director del plan de trabajo de grado, previo a la obtención del título de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz, nombrado por el Honorable Consejo Directivo de la facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas.

### CERTIFICO:

Que una vez analizado el plan de grado cuyo título es "*DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN VEHÍCULO MONOPLAZA ELÉCTRICO BAJO CONDICIONES DE IMPACTO MEDIANTE SOFTWARE DE INGENIERÍA CAD/CAE.*" presentado por los señores: Ayala Martínez Franklin David con número de cedula 0402038418 y Chulde Montalvo Anderson Stalin con número de cedula 1004191951, doy fe que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte de los señores integrantes del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Ibarra, a los 23 días del mes Marzo del 2021



Atentamente

Ing. Rommel Paul Imbaquingo Navarrete, MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**

**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN**  
**A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

En concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
<b>CEDULA DE IDENTIDAD:</b>	0402038418		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Ayala Martínez Franklin David		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Carchi - Tulcán		
<b>EMAIL:</b>	fdayalam@utn.edu.ec		
<b>TELEFONO FIJO:</b>	06 3015364	<b>TELEFONO MOVIL:</b>	+593 981776307

DATOS DE CONTACTO			
<b>CEDULA DE IDENTIDAD</b>	1004191951		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Chulde Montalvo Anderson Stalin		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Carchi - San Gabriel		
<b>EMAIL:</b>	aschuldem@utn.edu.ec		
<b>TELEFONO FIJO:</b>	06 2292388	<b>TELEFONO MOVIL:</b>	+593 968616616

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	TEMA: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN VEHÍCULO MONOPLAZA ELÉCTRICO BAJO CONDICIONES DE IMPACTO MEDIANTE SOFTWARE DE INGENIERÍA CAD/CAE.
<b>AUTORES:</b>	Ayala Martínez Franklin David Chulde Montalvo Anderson Stalin
<b>FECHA:</b>	24/03/2022
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA:</b>	<b>PREGRADO</b>
<b>TITULO POR EL QUE OPTA</b>	INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ
<b>ASESOR/DIRECTOR</b>	Ing. Rommel Paul Imbaquingo Navarrete, MSc

## 2. CONSTANCIAS

La autora manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrollo, sin violar derechos del autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es la titular de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 24 días del mes de Marzo de 2022

### AUTORES:



Franklin David Ayala Martínez

CC: 0402038418



Anderson Stalin Chulde Montalvo

CC: 1004191951

## **DEDICATORIA**

Con mucho cariño y aprecio dedico este proyecto de investigación.

A Dios por ser mi fuente de sabiduría e inspiración permitiéndome alcanzar con éxito uno de mis objetivos tan anhelados de mi formación profesional.

A mis queridos padres Amparo Martínez y Victor Ayala por ser mi apoyo incondicional, quien con su infinito amor me han acompañado durante toda mi preparación académica. Este logro alcanzado es un reflejo de todo el amor, esfuerzo y dedicación que han invertido en mí; estoy muy orgulloso de ser su hijo.

A mi hermano Kevin, por brindarme siempre su apoyo para salir adelante a pesar de las adversidades. Sobre todo, quiero dedicar este trabajo a todas las personas que vieron algo bueno en mí y que siempre tuve un hombro en el cual apoyarme en cada momento.

**Ayala Martínez Franklin David**

Dios, por darme la maravillosa oportunidad de estar vivo y estar presente en cada momento de mi vida, de igual manera por haberme hecho coincidir con personas que han sido un pilar fundamental y una excelente compañía y soporte durante todo el proceso de formación de mi carrera. Mis padres, quienes han sido mis guías, sustento y principal fuente de motivación y apoyo en el transcurso de mi educación. Porque de ellos he aprendido que el esfuerzo y la dedicación tienen su recompensa y a jamás darme por vencido, por ser mi ejemplo de superación y de motivación día a día. Mis hermanas por estar presentes en el momento que las necesito y por compartir sus conocimientos y cariño para conmigo.

**Chulde Montalvo Anderson Stalin**

## AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi gratitud a Dios y a la santísima Virgen de las Lajas por bendecirme con salud, sabiduría y fortaleza permitiéndome alcanzar con éxito este momento tan importante de mi formación profesional, agradezco la dicha de tener a mis padres compartiendo junto a mí estos momentos tan importantes, agradezco la fortuna de ser bendecido con una familia tan especial que a pesar de las adversidades siempre supieron inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y dedicación.

A mi querida madre Amparo, gracias por confiar en mí, en mis habilidades y destrezas, gracias por ser mi soporte durante todos estos años de estudio, gracias por apoyarme en todo momento sin importar los errores que he cometido.

A mi querido padre Victor, gracias por ser el pilar de mi vida y enseñarme el valor del trabajo y la constancia, gracias por confiar y creer en mis sueños, por los consejos, valores y principios que han guiado mi formación profesional y personal, gracias por ayudarme siempre tanto moral como económicamente a pesar de las dificultades que paso en algunos años.

Agradezco a mi hermano con quien he vivido grandes momentos inolvidables, el apoyo mutuo ha sido de gran ayuda para superar todos los obstáculos que se presentaron durante mi formación académica. También quiero agradecer a toda mi familia que se mantuvo apoyándome en toda esta etapa, especialmente a mis tíos Luis Ayala y Rosa Quendí quienes me han acompañado desde un inicio en esta travesía, brindándome cariño y paciencia en su hogar, siempre estaré agradecido.

Extiendo mi profundo agradecimiento a la Universidad Técnica del Norte y a toda la planta docente de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz, en especial al Ing. Rommel Imbaquingo, MSc. Director de tesis, Ing. Edwin Arroyo MSc, y al Ing. Jorge Melo, MSc., que con su esfuerzo y dedicación, sus conocimientos, su paciencia y su motivación han sido fundamentales en el desarrollo de este proyecto.

A cada uno de quienes han estado conmigo, sin importar el tiempo y el espacio del trayecto que hemos compartido. Aquellos que me han enviado un mensaje lleno de bendiciones, que me han cuestionado, que me han enseñado y rectificado. Para todos aquellos que no creyeron en mí esto es para ustedes.

**Ayala Martínez Franklin David**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por darme la oportunidad de seguir vivo y sobre todo permitir que me supere y ser una persona con valores y principios y a no darme por vencido frente a lo que quiero. A mi familia y amigos por siempre brindarme palabras de apoyo para culminar mis estudios y estar presentes en cada circunstancia de mi vida con una frase de aliento para poder continuar con más fuerzas. A la Universidad Técnica del Norte, a docentes de la Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz, los cuales compartieron conocimientos con responsabilidad y sabiduría al mismo tiempo me brindaron apoyo y amistad en el transcurso de mi trabajo de investigación.

**Chulde Montalvo Anderson Stalin**

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>RESUMEN</b>	I
<b>ABSTRACT</b>	II
<b>INTRODUCCIÓN</b>	III
<b>CAPÍTULO I</b>	5
<b>1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	5
1.1 Objetivos	5
1.1.1 Objetivo General	5
1.1.2 Objetivos Específicos	5
1.2 Justificación	5
1.3 Alcance	6
1.4 El Habitáculo de Seguridad	6
1.4.1 Zona de Supervivencia	7
1.4.2 Deformación Programada	8
1.4.3 Regiones de Contacto	9
1.5 Ensayos de Choque y Normativa	9
1.5.1 Antecedentes	9
1.5.2 Fuerzas que Interviene en una Colisión	10
1.5.3 Euroncap	11
1.6 Tipos de Pruebas de Choque ( <i>Los Crash Test</i> )	11
1.6.1 Impacto Frontal	12
1.6.2 Impacto Lateral	13
1.6.3 El Vuelco	14

1.6.4 Impacto de Alcance o Posterior	15
1.7 Sistema CAD / CAE	16
1.7.1 Aplicaciones en la Industria Automotriz	16
1.8 El Método de Elementos Finitos	16
1.8.1 Principios Básicos	17
1.8.2 Aplicaciones en la Industria Automotriz	17
1.8.3 Mallado	18
1.8.4 Ls-Dyna	19
<b>CAPÍTULO II</b>	21
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	21
2.1 Materiales	21
2.1.1 Vehículo Monoplaza Eléctrico	21
2.1.2 Softwares Utilizados	22
2.2 Metodología De La Investigación	22
2.2.1 Tipos De Investigación	23
2.2.2 Método	24
2.2.3 Población y Muestra	24
2.2.3.2 Muestra	25
2.2.4 Operación de Variables	25
2.2.4 Metodología	27
2.2 Procedimiento	29
2.2.1 Investigación de Campo	29
2.2.2 Modelado 3D / CAD	29
2.2.3 Generación de Malla para Análisis MEF	34

2.2.4 Materiales Empleados Para Validación del Estudio	40
2.2.5 Pre Procesamiento Para Análisis MEF	44
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>52</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>52</b>
3.1 Recolección de Datos	52
3.1.1 Acero Astm A-500 Grado A	52
3.1.2 Acero Astm A-500 Grado C	56
3.1.3 Acero NHTSA #1	59
3.1.4 Acero NHTSA #2	63
3.2 Análisis y Discusión de Resultados	66
3.2.1 Esfuerzo de Von Mises	67
3.2.2 Deformación del Habitáculo	72
3.2.3 Análisis de Esfuerzo vs Deformación	76
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>79</b>
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>79</b>
4.1 Conclusiones	79
4.2 Recomendaciones	81
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>82</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>87</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>PÁGINA</b>
<b>Figura 1.1</b> El habitáculo de seguridad	7
<b>Figura 1.2</b> Zona de supervivencia	8
<b>Figura 1.3</b> Transmisión de daños ante un impacto frontal	8
<b>Figura 1.4</b> Tipos de <i>crash test</i>	12
<b>Figura 1.5</b> Prueba de impacto frontal	13
<b>Figura 1.6</b> Prueba de impacto lateral	14
<b>Figura 1.7</b> Prueba de impacto al vuelco	14
<b>Figura 1.8</b> Colisión por alcance	15
<b>Figura 1.9</b> Mallado de un vehículo	18
<b>Figura 1.10</b> Aplicaciones de Ls-Dyna en la Ingeniería	19
<b>Figura 1.11</b> Crash test lateral con Ls-Dyna	20
<b>Figura 2.1</b> Renault Twizy	21
<b>Figura 2.2</b> Diagrama de flujo de diseño y simulación de impacto de un vehículo monoplaza eléctrico.	28 28
<b>Figura 2.3</b> Proceso de modelado	30
<b>Figura 2.4</b> Vistas en 2D para el diseño de la estructura del modelo del vehículo.	31
<b>Figura 2.5</b> Proceso de modelado del vehículo en SolidWorks	32
<b>Figura 2.6</b> Modelado realizado	33
<b>Figura 2.7</b> Proceso de mallado	34
<b>Figura 2.8</b> Importación del modelo del vehículo al Software Ls-PrePost	35
<b>Figura 2.9</b> Mallado de los componentes que intervienen en la simulación	36

<b>Figura 2.10</b> Número de nodos y número de elementos de los componentes de la simulación	36
<b>Figura 2.11</b> Mallado según <i>Skewness</i>	38
<b>Figura 2.12</b> <i>Jacobian Ratio</i> para cuadriláteros	38
<b>Figura 2.13</b> <i>Jacobian Ratio</i> para triángulos	39
<b>Figura 2.14</b> Mallado según <i>Jacobian Radio</i>	40
<b>Figura 2.15</b> Curva de Esfuerzo vs Deformación de Acero ASTM A-500 Grado A	41
<b>Figura 2.16</b> Curva de Esfuerzo vs Deformación de Acero ASTM A-500 Grado C	42
<b>Figura 2.17</b> Curva de Esfuerzo vs Deformación de acero NHTSA #1	43
<b>Figura 2.18</b> Curva de Esfuerzo vs Deformación de acero NHTSA #2	44
<b>Figura 2.19</b> Proceso de Pre Procesamiento para análisis MEF	44
<b>Figura 2.20</b> Contacto entre elementos del modelo del vehículo	46
<b>Figura 2.21</b> Designación de materiales para análisis MEF	47
<b>Figura 2.22</b> Contacto entre superficie vs superficie	48
<b>Figura 2.23</b> Velocidad de impacto	48
<b>Figura 2.24</b> Control de energía de <i>hourglass</i>	49
<b>Figura 2.25</b> Tiempo de simulación de impacto	49
<b>Figura 3.1</b> Impacto frontal de monoplaza eléctrico	52
<b>Figura 3.2</b> Esfuerzo de <i>Von Mises</i> del Acero ASTM A-500 Grado A	53
<b>Figura 3.3</b> Gráfica del esfuerzo de <i>Von Mises</i> vs tiempo	53
<b>Figura 3.4</b> Gráfica de Deformación vs Tiempo del habitáculo	54
<b>Figura 3.5</b> Energy Balance	55
<b>Figura 3.6</b> Impacto frontal de monoplaza eléctrico	56
<b>Figura 3.7</b> Esfuerzo de <i>Von Mises</i> del Acero ASTM A-500 Grado C	56

<b>Figura 3.8</b> Gráfica del esfuerzo de <i>Von Mises</i> vs tiempo	57
<b>Figura 3.9</b> Gráfica de Deformación vs Tiempo del habitáculo	58
<b>Figura 3.10</b> Energy Balance	58
<b>Figura 3.11</b> Impacto frontal de monoplaza eléctrico	59
<b>Figura 3.12</b> Esfuerzo de <i>Von Mises</i> del Acero NHTSA #1	60
<b>Figura 3.13</b> Gráfica del esfuerzo de <i>Von Mises</i> vs tiempo	60
<b>Figura 3.14</b> Gráfica de Deformación vs Tiempo del habitáculo	61
<b>Figura 3.15</b> Energy Balance	62
<b>Figura 3.16</b> Impacto frontal de monoplaza eléctrico	63
<b>Figura 3.17</b> Esfuerzo de <i>Von Mises</i> del Acero NHTSA #2	63
<b>Figura 3.18</b> Gráfica del esfuerzo de <i>Von Mises</i> vs tiempo	64
<b>Figura 3.19</b> Gráfica de Deformación vs Tiempo del habitáculo	65
<b>Figura 3.20</b> Energy Balance	65
<b>Figura 3.21</b> Impacto frontal – 4 simulaciones	66
<b>Figura 3.22</b> Esfuerzo de <i>Von Mises</i> 6 simulaciones	67
<b>Figura 3.23</b> Esfuerzo de <i>Von Mises</i> Vs Tiempo - 4 simulaciones	68
<b>Figura 3.24</b> Esfuerzo máximo de <i>Von Mises</i> – 4 simulaciones	71
<b>Figura 3.25</b> Deformación del habitáculo – 4 simulaciones	72
<b>Figura 3.26</b> Elementos finitos para análisis de desplazamiento	73
<b>Figura 3.27</b> Deformación del habitáculo – 4 simulaciones	73
<b>Figura 3.28</b> Comparativa de resultados de Deformación – 4 simulaciones	75
<b>Figura 3.29</b> Esfuerzo vs Deformación – 4 simulaciones	76
<b>Figura 3.30</b> Resumen de resultados – 4 simulaciones	78

## ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
<b>Tabla 2.1</b> Datos del vehículo	22
<b>Tabla 2.2</b> Variable Independiente	25
<b>Tabla 2.3</b> Variable Dependiente	26
<b>Tabla 2.4</b> Medidas del modelo del vehículo en mm	31
<b>Tabla 2.5</b> Rangos de Skewness y calidad de elementos	37
<b>Tabla 2.6</b> Resultado de la calidad del mallado según el criterio <i>Jacobian Ratio</i>	39
<b>Tabla 2.7</b> Propiedades mecánicas del Acero ASTM A-500	41
<b>Tabla 2.8</b> Propiedades mecánicas de Acero NHTSA	43
<b>Tabla 2.9</b> Unidades para programar en Ls-Dyna	45
<b>Tabla 3.1</b> Características mecánicas de los materiales de prueba	72

## ÍNDICE DE ECUACIONES

	<b>PÁGINA</b>
<b>Ecuación 2.1.</b> Cálculo de la deformación del vehículo	50
<b>Ecuación 2.2.</b> Cálculo de Control de la Energía de Hourglass	50

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>ANEXO I.</b> Planos de Vehículo Monoplaza Eléctrico	87
<b>ANEXO II.</b> Esfuerzo de Von Mises en Acero ASTM A-500 Grado A	88
<b>ANEXO III.</b> Esfuerzo de Von Mises en Acero ASTM A-500 Grado C	89
<b>ANEXO IV.</b> Esfuerzo de Von Mises en Acero NHTSA #1	90
<b>ANEXO V.</b> Esfuerzo de Von Mises en Acero NHTSA #2	91

## RESUMEN

El presente proyecto de investigación titulado “Diseño y simulación de un vehículo monoplaza eléctrico bajo condiciones de impacto mediante software de ingeniería CAD/CAE” comprende una metodología de estudio teórica, tecnológica, experimental, descriptiva y cuali-cuantitativa, haciendo referencia a los materiales estructurales de un vehículo, el cual, ha permitido proponer una alternativa en el uso de materiales para la carrocería del habitáculo de seguridad.

Se realizó el modelado CAD tanto del vehículo como del impactador utilizando el software de diseño SolidWorks considerando todas las características físicas de los mismos, después se preparó y validó el modelo aplicando condiciones de borde, asignando materiales, fuerzas, tiempo, velocidad, calidad del mallado por el método de *Jacobian Ratio*, etc. todo esto en el software de pre-procesamiento Ls-PrePost.

El estudio comprende cuatro simulaciones explícitas con distintos materiales, a una velocidad de 50 km/h ante una barrera rígida como lo determina el Programa Europeo de Evaluación de Automóviles Nuevos Euro NCAP, empleando el software de análisis dinámico Ls-Dyna en su versión estudiantil, siguiendo con un post-procesamiento que es la visualización e interpretación de los resultados del ensayo computacional con la ayuda de gráficas, tablas y muchas otras herramientas que este software ofrece. Al finalizar el análisis de los resultados por el método de elementos finitos, se determinó que el acero denominado en este estudio NHTSA #2 (designación propia de los autores), el cual es un material usado para análisis de impactos por la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras de los Estados Unidos, seguido del acero ASTM A-500 de Grado C son los materiales que presentan un mejor comportamiento ante las deformaciones presentadas después de un impacto frontal, alcanzando una deformación total de 113.73 mm y 158.87 mm respectivamente, además, se determinó que los primeros 20 ms son los más cruciales durante un choque frontal, debido a que en este lapso de tiempo los elementos más críticos de la parte frontal del vehículo alcanzan los límites de resistencia y deformación del material provocando en algunos casos la rotura permanente de dichos elementos.

**Palabras Clave:** Impacto, Simulación, CAD, CAE, Ls-Dyna, Euro NCAP

## ABSTRACT

This research project called "Single-seater electric vehicle under impact conditions design and simulation using CAD/CAE engineering software" includes a theoretical, technological, experimental, descriptive, and qualitative-quantitative study methodology, referring to vehicle structural materials, which has made it possible to propose an alternative to use of materials for the bodywork of the safety compartment.

The CAD modeling of both the vehicle and the impactor was carried out using the SolidWorks design software considering all their physical characteristics, then the model was prepared and validated by applying boundary conditions, assigning materials, forces, time, speed, mesh quality. by the Jacobian Ratio method, etc. all this in the preprocessing software Ls-PrePost.

This study has four explicit simulations with different materials, at 50 km/h speed in front of a rigid barrier as determined by the European New Car Assessment Program Euro NCAP, using the dynamic analysis software Ls-Dyna in a student version, followed by post-processing that is the visualization and interpretation of the results of the computational test, helping graphs, tables, and many other tools that this software offers. At the end of the analysis results by the finite element method, we determinate that the steel called in this study NHTSA #2 (authors' designation), which is a material used for impact analysis by the National Security Administration of Traffic on Highways in the United States, followed by ASTM A-500 Grade C steel, are the materials that present the best behavior after a frontal impact deformation, reaching a total deformation of 113.73 mm and 158.87 mm, respectively, In addition, it will be noted that the first 20 ms are the most crucial during a frontal crash, because in this period the most critical elements of the vehicle front part reach the limits of resistance and deformation of the material, causing in some cases permanent breakage of these elements.

**Keywords:** Impact, Simulation, CAD, CAE, Ls-Dyna, Euro NCAP

## INTRODUCCIÓN

A mediados del año de 1960 en Europa y Estados Unidos se iniciaron los primeros estudios de seguridad en vehículos motorizados después de sufrir impacto, pero estas pruebas de colisión además de tomar tiempo y necesitar mucho más mano de obra, desperdiciaban el material y los recursos.

En la actualidad con el método de elementos finitos y el rápido desarrollo de las computadoras, el análisis estructural de los automóviles ante una colisión se lo puede hacer mediante un ordenador, haciendo uso de un software en simulación de impactos estructurales (Diermann & Middendorf, 2019). A lo largo de la última década, los ingenieros han venido realizando varios estos estudios en la seguridad del automóvil, con el fin de mejorar la resistencia estructural del vehículo y ofrecer mejor seguridad a los ocupantes, basándose en simulación numérica de LS-DYNA.

Las simulaciones de impacto digital logran evaluar el grado de deformidad del vehículo y la validez del diseño, de acuerdo a la normativa de seguridad que se encuentre vigente. El análisis estructural en cuadríciclos pesados, se centra en las solicitudes de seguridad que necesita la zona de supervivencia del vehículo, de acuerdo a esta necesidad se selecciona escenarios reales para simular pruebas de colisión, se construye un modelo CAD detallado del vehículo de acuerdo a la información del material y otras características disponibles del fabricante. Con estos resultados de simulación se evalúa el comportamiento general de la estructura del vehículo, centrándose en la seguridad del ocupante, en términos de tensión del material y la deformación general; con todo esto se puede mejorar el diseño de la estructura del vehículo evitando el riesgo lesiones por penetración de través de la superficie (Berzi et al., 2018).

Shienmar & Melvin. (2020), en su artículo titulado “Seguridad en Coches Eléctricos y Autónomos - Simulación de Escenarios de Choques Complejos” manifiestan que las pruebas de choques digitales amplían las posibilidades de un diseño efectivo, salvaguardando así la integridad y la seguridad de los pasajeros, en la simulación de impacto se incluyen todo tipo de maniobras y escenarios con los que se puede impactar un vehículo. El software de simulación puede integrar diferentes entornos de diseño, para permitir que los ingenieros comiencen las pruebas de seguridad durante las primeras fases del desarrollo, esto permite a los fabricantes de automóviles reducir su dependencia de pruebas físicas costosas que además requieren de mucho tiempo, lo que ahorra

costos y acelera el desarrollo de vehículos. Adicionalmente, el software de simulación también presenta modelos de humanos precisos para cada ensayo de choque, lo que permite realizar un análisis más profundo con mejores resultados que los maniqués de prueba de choque convencionales.

Los vehículos eléctricos (EV) han cambiado significativamente la industria del automóvil en todo el mundo, el rápido desarrollo de nuevas tecnologías en baterías ha impulsado el crecimiento de EV. En el Ecuador el parque automotor de vehículos eléctricos cada año ha ido creciendo y tomado mayor acogida por parte de las compañías de transporte urbano, en el 2020 se vio reflejado que el 94.17% del mercado de vehículos eléctricos en el país lo tienen las provincias de Guayas, Pichincha y Galápagos. En Guayaquil se estima que 100 taxistas de diferentes compañías se han cambiado al sistema eléctrico enfocados en el ahorro de combustible y en ahorros de mantenimientos de su vehículo, además los taxistas manifiestan que con la mayor circulación de vehículos eléctricos en la ciudad se reducirá las emisiones de gases contaminantes, contribuyendo así al bienestar social de la ciudad (AEADE, 2020).

Como solución al tráfico vehicular y una reducción a la contaminación ambiental, el parque automotor ha desarrollado nuevas fuentes de movilidad alternativas, como por ejemplo los vehículos tipo L7e de propulsión eléctrica o más conocidos como cuadríciclos, este tipo de transporte son buena opción para movilizarse entre distancias cortas, gracias a sus prestaciones como: fáciles de manejar, compactos, versátiles y económicos (Torres & Carrillo, 2021).

Gracias a las cualidades que presentan los softwares de simulación por elementos finitos y el aumento de movilización de cuadríciclos eléctricos en el Ecuador, se ha visto importante encontrar la metodología más adecuada para realizar un análisis estructural a este tipo de vehículos L7e, aplicando como materiales de prueba aceros estructurales que se encuentran disponibles en el Ecuador bajo la normativa NTE INEN 2415, como son el Acero ASTM A-500 Grado A y ASTM A-500 Grado C, además, se pone a prueba dos materiales de la biblioteca de aceros estructurales, que principalmente son usados para análisis de impactos por la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras de los Estados Unidos (NHTSA), proponiendo así una alternativa de diseño para la estructura del habitáculo con materiales sustitutos y con excelentes prestaciones mecánicas ante la deformación estructural después de un impacto frontal.

## CAPÍTULO I

### 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 1.1 OBJETIVOS

##### *1.1.1 OBJETIVO GENERAL*

Diseñar y simular condiciones de impacto de un vehículo monoplaza eléctrico bajo normativa y un software de ingeniería CAD/CAE, para así determinar el comportamiento del modelo y su validez del diseño.

##### *1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS*

- ❖ Diseñar la estructura mediante el uso de software CAD, para digitalizar las geometrías y las características de diseño.
- ❖ Simular condiciones de choque frontal mediante software CAE estableciendo condiciones que representen un choque real.
- ❖ Evaluar el comportamiento de la estructura mediante la aplicación de ciertos materiales, para poder determinar su viabilidad en cuanto a su resistencia vs deformación.
- ❖ Evaluar los resultados de deformación estructural de la aplicación de varios materiales, mediante la comparación con las diferentes características mecánicas de los materiales y poder determinar el más idóneo.

#### 1.2 JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de la presente investigación busca conocer el grado de seguridad en los vehículos eléctricos tipo *buggy* frente a un incidente de tránsito, analizando la resistencia estructural del vehículo frente a los posibles impactos en la carretera. Además, con esta investigación se podrá conocer y analizar las diferentes características mecánicas de los materiales con los que cuenta este tipo de vehículos eléctricos, para poder analizar el grado de seguridad en el que se encuentran los ocupantes del vehículo, como también de los ocupantes de otros vehículos y los posibles peatones implicados en la colisión automovilística.

Este estudio se sustenta en lo acordado en el objetivo 9 del Plan Nacional de Creación de Oportunidades 2021-2025 implementado por el actual gobierno del Ecuador, que hace referencia

a Garantizar la seguridad ciudadana, orden público y gestión de riesgos, además en este objetivo se menciona una política que se relaciona con el desarrollo de la presente investigación, que se refiere a Fortalecer la seguridad de los sistemas de transporte terrestre y aéreo, promoviendo ambientes seguros; política que plantea como meta Disminuir la tasa de mortalidades por accidentes de tránsito, in situ, de 12.62 a 11.96 por cada 100.000 habitantes (SNP, 2021).

De igual manera esta investigación pretende ser una guía para la implementación de nuevas políticas en sistemas de seguridad y homologación de estructuras de nuevos vehículos que ingresen al país.

### **1.3 ALCANCE**

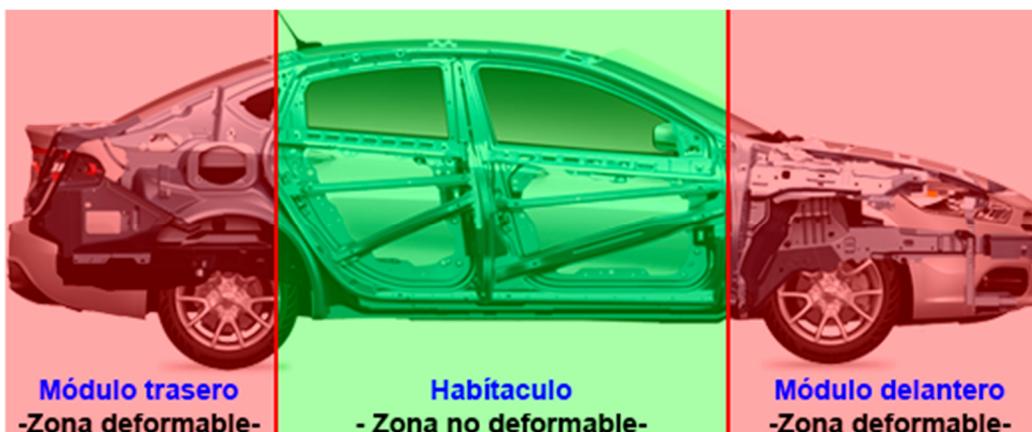
La presente investigación busca analizar el grado de deformidad de la estructura de un vehículo eléctrico antes, durante y después de un incidente de tránsito, con el uso de un software de simulación de elementos finitos.

En este caso de estudio, la simulación de impacto estará enfocado en el análisis estructural de un vehículo eléctrico basado en el modelo del Renault Twizy, en el cual se realizará pruebas de impactos frontales, a una velocidad de 50 km/h basados en la normativa EURO NCAP.

Este estudio se lo realizará en la Universidad Técnica del Norte, el modelado tridimensional del vehículo eléctrico se lo hace mediante el software de diseño Solidworks, mientras que la simulación de impacto se realizará mediante el software de simulación LS-DYNA en su versión estudiantil. En esta investigación se podrá conocer el grado de seguridad que tiene el vehículo frente a un incidente de tránsito y poder realizar un enfoque de daños que pueden llegar a afectar a los ocupantes del vehículo. Además, con este estudio se podrá conocer cuál es el material que brinda mayor seguridad para la protección de los ocupantes en caso de un incidente de tránsito.

### **1.4 EL HABITÁCULO DE SEGURIDAD**

El habitáculo de seguridad es el módulo central del automóvil, en el que viajan el conductor y los ocupantes del vehículo, el cual en su interior se encuentra acolchado y dotado cada vez más de sistemas de retención como lo son el cinturón de seguridad y los distintos airbags tanto frontales, laterales y de techo (Chamba, 2018). *“Mientras que las zonas delantera y trasera de un vehículo se diseñan para que se deformen de forma programada”* (Jara, 2014) .



**Figura 1.1** El habitáculo de seguridad

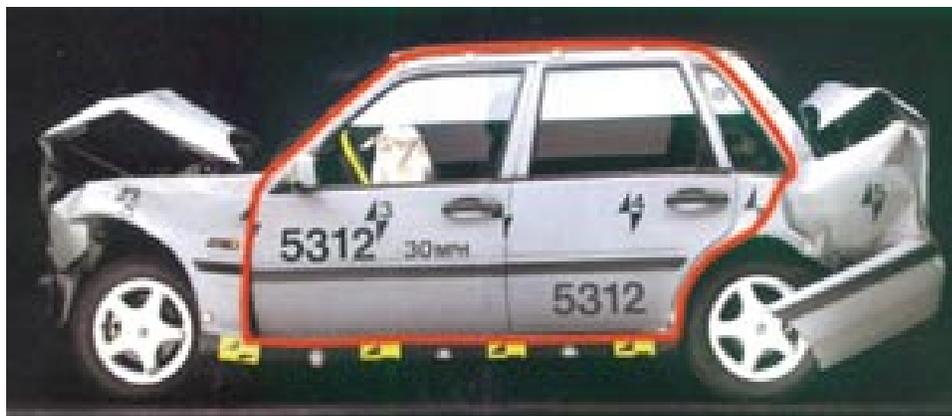
Fuente: (Tecnología del Automóvil, 2019)

La Figura 1.1 indica la distribución de las diferentes zonas de diseño de un vehículo, en caso de un incidente de tránsito.

El diseño del habitáculo de seguridad debe ser lo más rígido e indeformable posible para que en caso de una colisión la estructura pueda soportar los esfuerzos de flexión, torsión, aceleraciones, y todos los tipos de esfuerzos que implican la conducción del vehículo. Sin embargo, un punto clave para reducir las lesiones en los accidentes, es la capacidad de energía que el vehículo pueda absorber mediante los puntos de deformación programada. Por lo tanto, para garantizar la seguridad de los ocupantes del vehículo, la carrocería debe estar diseñada con puntos zonas deformables con el fin absorber y distribuir la mayor cantidad posible de energía liberada en el impacto y evitar la deformación de la estructura hacia dentro, o en caso de vuelco aplastarse, afectando la integridad de sus ocupantes (Paolo & Daniel, 2015).

#### ***1.4.1 ZONA DE SUPERVIVENCIA***

Un diseño adecuado de la estructura y carrocería garantizan la integridad del habitáculo a pesar de la deformación de los extremos del vehículo. Para esto la carrocería del vehículo se encuentra diseñada con una zona de supervivencia la cual garantiza la existencia de un espacio seguro, en donde los ocupantes del vehículo pueden refugiarse durante un accidente, con la ayuda de los sistemas de retención que son el cinturón de seguridad y el airbag.



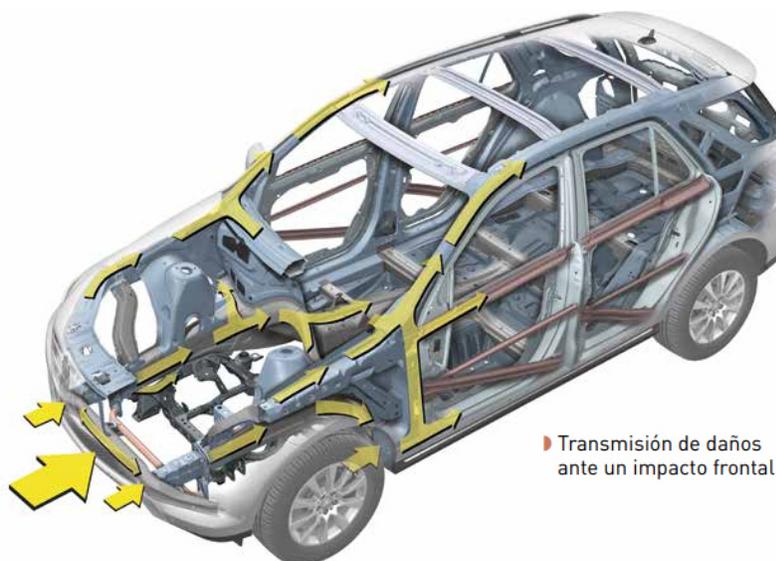
**Figura 1.2** Zona de supervivencia

Fuente: (Soria, 2000)

La zona de supervivencia viene a ser la parte central de la carrocería de los vehículos como se indica en la Figura 1.2, en la cual los travesaños y largueros son fabricados de materiales de alta resistencia que reciben la fuerza impacto sin deformarse, con el único fin de proteger a los ocupantes de aplastamientos que puedan originarse en la colisión (Sánchez & Aranda, 2017).

#### **1.4.2 DEFORMACIÓN PROGRAMADA**

*“Los vehículos deben ser diseñados de tal forma que las deformaciones ocurran fuera del habitáculo de seguridad, con el objetivo de aumentar las posibilidades de supervivencia de los ocupantes después de un accidente de tránsito”* (Pérez, 2016).



**Figura 1.3** Transmisión de daños ante un impacto frontal

Fuente: (CESVIMAP, 2014)

La deformación programada son las zonas de la carrocería que se deforman progresivamente, absorbiendo la energía de la colisión, como se observa en la Figura 1.3. Los ejemplos más claros son los largueros y travesaños tanto delanteros como traseros del vehículo, la absorción de la energía de impacto se consigue empleando progresivamente aceros de distintas resistencias y variando la geometría de la pieza formando curvas con puntos fusibles (muescas, relieves, taladros o perforaciones), estos puntos fusibles se hacen con el fin de debilitar o de reforzar una determinada zona de la pieza, para que ante un impacto se funda y se deforme la pieza absorbiendo la energía de impacto en estos puntos (CESVIMAP, 2014).

### ***1.4.3 REGIONES DE CONTACTO***

Susilo et al. (2016) en un estudio realizado en la Universidad Sebelas Maret, demostró que tras una simulación de impacto frontal a 57 km/h la mayor parte de la energía de impacto frontal la absorbe la parte del chasis, debido a que recibe el 76.2% de la energía, siguiendo con la parte de la base que absorbe el 11.3%, mientras que el resto de la estructura del vehículo recibe el resto de la energía de impacto en un porcentaje menor.

## **1.5 ENSAYOS DE CHOQUE Y NORMATIVA**

Al realizar un ensayo de choque contra objetos fijos, permite reproducir el comportamiento que tiene un vehículo ante las gamas de configuraciones, como es en la dirección del impacto, conocer el nivel de ocupación del vehículo como de los objetos contra los que se colisiona el mismo (Fierro & Ordóñez, 2018).

Los ensayos de choque están contemplados por legislaciones de seguridad como son las de tipo LATIN NCAP y EURO NCAP, así mismo los fabricantes utilizan sus propios ensayos para ver el comportamiento de los sistemas de seguridad (Alonso, 2015).

### ***1.5.1 ANTECEDENTES***

A mediados del año de 1960 en Europa y Estados Unidos se iniciaron los primeros estudios sobre la seguridad en el impacto en vehículos motorizados, en estas pruebas de colisión además de tomar tiempo y necesitar mucho más mano de obra se desperdiciaba el material y los recursos.

En la actualidad con el método de elementos finitos y el rápido desarrollo de las computadoras, el análisis estructural de los automóviles ante una colisión se lo puede hacer

mediante un ordenador haciendo uso de un software en simulación de impactos estructurales (Diermann & Middendorf, 2019).

Estos estudios se los realiza con el fin de mejorar la resistencia estructural del automóvil basándose en simulación numérica LS-DYNA analizando el efecto y reacción de la estructura del automóvil (Thuong, 2018).

El análisis estructural en vehículos eléctricos se centra en las solicitudes de seguridad que necesita el equipo de baterías, de acuerdo a esta necesidad se selecciona escenarios reales para simular pruebas de colisión, se construye un modelo detallado del vehículo en CAD de acuerdo a la información del material disponible del fabricante. Con estos resultados de simulación se puede evaluar el comportamiento general de la estructura del vehículo centrándose en el sistema de almacenamiento de energía, en términos de tensión del material y la deformación general, con esto se puede mejorar el diseño de la estructura evitando el riesgo de penetración a través de la superficie de la batería (Berzi et al., 2018).

A lo largo de la última década, los vehículos eléctricos (EV) han cambiado significativamente la industria del automóvil en todo el mundo, el rápido desarrollo de nuevas tecnologías en baterías ha impulsado el crecimiento de EV. Sin embargo, el riesgo de incendio y el peligro asociado con la batería de alta energía se ha convertido en un problema de seguridad importante para los EV. Una colisión ante un vehículo eléctrico puede producir fallas en la batería, que puede estar acompañada por la liberación de gas tóxico, fuego, llamas en chorro y explosión (Sun et al., 2020). A medida que crece la demanda de EV en la carretera, es probable que aumente su participación en accidentes e incidentes de tráfico, sin una mejora de resistencia en la estructura del automóvil esto puede representar una amenaza para los ocupantes y los socorristas involucrados en las operaciones de recuperación y salvamento del vehículo (Bisschop et al., 2020). Los socorristas se involucran en el accidente al no saber cómo desconectar la energía eléctrica y cómo entrar en un automóvil eléctrico accidentado, sin riesgo de encontrar alto voltaje, qué gases tóxicos pueden liberarse y la probabilidad de explosión (Stave & Carlson, 2017).

### ***1.5.2 FUERZAS QUE INTERVIENE EN UNA COLISIÓN***

Al momento de recibir un impacto, la carrocería del vehículo se deforma, al estar sometida a una serie de fuerzas que están involucradas en la colisión. Estas fuerzas son:

- La fuerza externa. - Esta fuerza es ejercida ya sea por el vehículo u objeto con el cual fue la colisión, este objeto es el que se opone a la fuerza del vehículo que está en movimiento, por tal razón se provoca la deformación por reacción del impacto directo.
- La fuerza interna. - Esta fuerza es la que se provoca por la misma inercia del vehículo, provocando deformaciones internas por la transmisión de los daños (CEVIMAP, 2014).

### **1.5.3 EURONCAP**

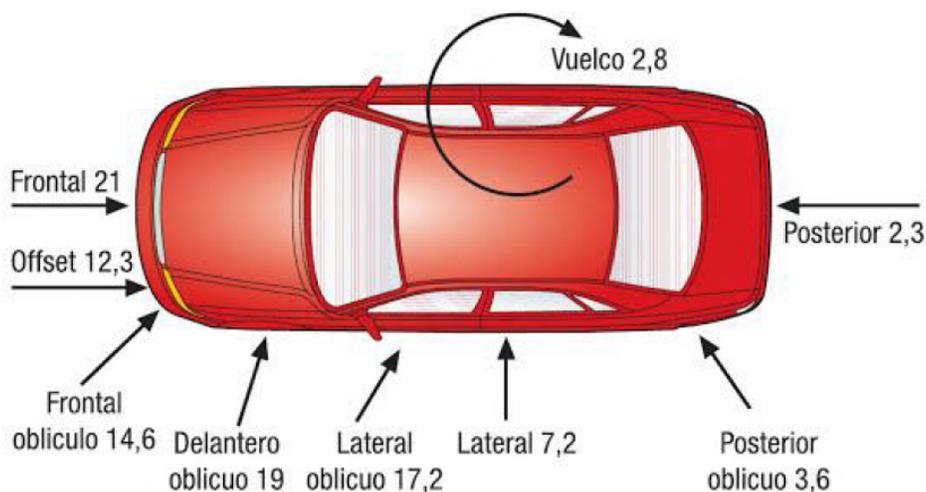
Las organizaciones NCAP (Programa Europeo de Evaluación de Automóviles Nuevos) se forman por diferentes entidades y tienen como objetivo verificar la seguridad de los vehículos nuevos que se lanzan al mercado. Euro NCAP es el organismo independiente de evaluación de seguridad de los vehículos comercializados en Europa más conocido en el continente europeo, su programa de seguridad brinda información de acceso público, referente a los diferentes *crash test* realizados en cada uno de los vehículos existentes en el mercado (Arriaga, 2015).

Euro NCAP nació en 1997, por iniciativa de los gobiernos de Suecia y Reino Unido, no tardó en recibir el apoyo oficial de la Unión Europea, así como de varios gobiernos y organizaciones de consumidores de sus estados miembros. Actualmente se puede afirmar que veinte años después del inicio de programa, Euro NCAP se ha convertido en una parte de la actualidad del automóvil. Se han evitado miles de accidentes, la demanda de seguridad de los consumidores es elevada, los fabricantes compiten por obtener los mejores resultados de seguridad y las normas de seguridad en los vehículos siguen mejorando (Olona, 2018).

## **1.6 TIPOS DE PRUEBAS DE CHOQUE (LOS CRASH TEST)**

*“El objetivo principal de un ensayo de choque es garantizar que los vehículos sean más seguros para los ocupantes y para el resto de usuarios de la carretera”* (Thuong, 2018). En el análisis de vehículos se realiza un enfoque al impacto estructural y a la biomecánica de ocupantes, considerando la alta tasa de accidentes reales en distintos escenarios y las múltiples velocidades de impacto que alcanza el automóvil en la carretera, además analizando los diferentes objetos con los que se puede llegar a colisionar ya sean fijos, móviles y con diferente resistencia deformable. Para ello, los fabricantes recurren a la simulación virtual de más de 40 tipos de pruebas diferentes,

seleccionando escenarios de prueba en base al estudio de las estadísticas de los tipos de colisiones más frecuentes (Rodríguez & López, 2009).



**Figura 1.4** Tipos de *crash test*

Fuente: (Gómez et al., 2016)

En la Figura 1.4 se puede observar los diferentes tipos de pruebas de choque que se realizan a un vehículo, con la finalidad de garantizar la seguridad de sus ocupantes.

### **1.6.1 IMPACTO FRONTAL**

“El objeto es optimizar los refuerzos de la estructura portante y de los sistemas de retención, debido a que los ocupantes están sometidos a las fuerzas producidas por deceleraciones bruscas” (Cuasapud, 2018). El impacto frontal se realiza a 64 km/h, en el cual el vehículo se impacta contra una barrera deformable de configuración de panel, en esta prueba de choque se coloca dos dummies que van sentados en los asientos delanteros del vehículo, estos dummies están equipados de sensores en la cabeza, fémur, tórax y tibia con el objetivo de captar las fuerzas de desaceleración por el impacto, además estos dummies deben ir colocados sus respectivos sistemas de sujeción. Este tipo de prueba está regulado por la legislación vigente en la directiva 96/79/CE del Parlamento Europeo, para la mejora de la seguridad de los vehículos (Gómez et al., 2016). En esta prueba se pueden obtener cinco calificaciones que se dividen en buena (verde), correcta (amarilla), aceptable (naranja), débil (marrón) y deficiente (rojo), el valor máximo en esta prueba es de 16 puntos y para medirlos EuroNCAP tiene en cuenta las partes de los dos dummies que más daños han sufrido (AUTOFÁCIL, 2013).



**Figura 1.5** Prueba de impacto frontal

Fuente: (Euro NCAP, 2021)

En la Figura 1.5, se puede observar el resultado de un vehículo tipo sedán tras una prueba de impacto frontal realizada por el Programa Europeo de Evaluación de Automóviles Nuevos.

### ***1.6.2 IMPACTO LATERAL***

Este impacto se simula con una barrera deformable móvil de 1,5 metros de anchura y 0,5 metros de grosor, que se lanza contra la puerta del conductor a una velocidad de 50 km/h y en el interior del vehículo se coloca un *dummy* en el asiento del conductor para poder estudiar los daños en cabeza, tórax, abdomen y cadera después de la colisión. En esta prueba se aplican las cinco calificaciones del test frontal y se puede sumar hasta un máximo de 8 puntos (Centeno et al., 2020). Este tipo de prueba esta regulado por la legislación vigente en la directiva europea 96/27/CE, para realizar un enfoque de daños por la deformación de las puertas o por fallas en el anclaje del cinturón de seguridad, además con un ensayo de choque frontal se puede determinar la eficacia de los airbags laterales y el comportamiento del capo (Gómez et al., 2016).



**Figura 1.6** Prueba de impacto lateral

Fuente: (Euro NCAP, 2021)

La Figura 1.5 indica el resultado de un vehículo tipo sedán tras una prueba de impacto lateral realizada por el Programa Europeo de Evaluación de Automóviles Nuevos.

### **1.6.3 EL VUELCO**



**Figura 1.7** Prueba de impacto al vuelco

Fuente: (Patrascu, 2010)

Los test de vuelco están enfocados en asegurar la rigidez de la estructura del techo para evitar deformaciones por aplastamiento. Este tipo de *crash test* se realiza lanzando el vehículo a 50 km/h a una plataforma con una cierta inclinación, y es esta inclinación la que ocasiona que el

vehículo salga despedido y de vueltas de campana, como se indica en la Figura 1.7, otra forma de realizar este *crash test* es someter al vehículo a una caída libre desde 50 cm de altura sobre la esquina delantera del techo. De esta manera se pone a prueba la eficacia del techo del habitáculo evitando deformaciones graves que pongan en peligro la integridad de los ocupantes (Gómez et al., 2016).

#### 1.6.4 IMPACTO DE ALCANCE O POSTERIOR



**Figura 1.8** Colisión por alcance

Fuente: (Euro NCAP, 2021)

En noviembre de 2008 se iniciaron unas pruebas de accidente trasero para valorar la protección de los apoyacabezas frente al latigazo cervical, en el cual se hacía chocar una carretilla a 35 km/h para evaluar los daños del ocupante tras un impacto de alcance. Hoy día estas pruebas no se realizan y se puede considerar que formaron parte de un estudio puntual sobre la eficacia de los apoyacabezas más que de una modificación en los métodos de valoración de Euro NCAP. En la actualidad las pruebas de eficacia de los apoyacabezas se realizan con la ayuda de las nuevas tecnologías, con un asiento montado sobre un raíl monitorizado lo que evita la prueba de colisión trasera y economiza gastos, como se indica en la Figura 1.8 (Galán Miguel, 2019). *“Desde el punto de vista de la ingeniería, se realiza un análisis de esfuerzos, aceleraciones y momentos, experimentados durante la colisión de alcance, para determinar el nexa causal de la aparición de lesiones en el cuello”* (Pequerul, 2011).

## 1.7 SISTEMA CAD Y CAE

El desarrollo de nuevos productos de diseño y manufactura que se basan en métodos de producción, y de esta necesidad nace el trabajo conocido como manufactura aditiva. Con estos sistemas de CAD y CAE se realiza una integración de manufactura aditiva a las nuevas formas de operación, cuyo objetivo es tener un enfoque de precisión en la ingeniería asistida por computadora, con la ayuda de un método de elementos finitos y así mismo con los procesos que conlleva, obteniendo el producto deseado y reduciendo el costo de pruebas reales y de tiempo de procesamiento.

*“Para ello se introduce el uso de sistemas CAD/CAE, que por sus siglas en inglés significan lo siguiente: Computer Aided Design (CAD), Computer Aided Engineering (CAE), como herramienta de diseño y manufactura de procesos”* (Zamora & Lira Hernández, 2020). Estos sistemas se ven implementados como una herramienta en lo que es la Industria 4.0, en estos sistemas de elementos finitos se dan modelos en tres dimensiones, de igual manera se puede realizar pruebas de funcionalidad de prototipos en distintos escenarios y situaciones, de esta manera se obtiene resultados que son confiables de cualquier tipo de diseño y de cualquier sistema tecnológico e innovador.

### 1.7.1 APLICACIONES EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

La tecnología de CAD y CAE, se las puede aplicar a la mayoría de industrias, así es como la industria automotriz necesita de manera hiperactiva la utilización de estos sistemas, por la gran variedad de productos, por su gran producción, la competitividad y por su agresividad de tratar de llegar a los usuarios en una gran demanda de calidad y precio.

En la industria automotriz hace uso del CAD y CAE debido a que tiene que afrontar: *“Altísima competitividad, demanda creciente en calidad y precios, gran variabilidad de modelos, atender la alta demanda de repuestos y escaso tiempo para introducir modificaciones sustanciales en modelos y componentes”* (Cheko EG, 2017).

## 1.8 EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Este principio surge como respuesta a la creación de los primeros ordenadores digitales en la década de los cincuenta, con la finalidad de realizar cálculos automáticos de estructuras sin tener que recurrir a complicados métodos de resolución. En la actualidad es un método básico y

fundamental para el cálculo de problemas de mecánica estructural o mecánica de sólidos (Núñez, 2018).

El método de elementos finitos permite reducir el problema con infinitos grados de libertad, a un resultado numérico aproximado con una geometría definida, en este problema finito se encuentran definidas las respectivas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral, considerando las características propias y específicas del problema del análisis. Además, cada elemento del problema contiene una serie de puntos característicos denominados nodos, si dos nodos son adyacentes se considera que pertenecen al mismo elemento finito, por lo tanto, el mismo nodo podría ser parte de dos o más elementos finitos. Estos puntos característicos (nodos) en conjunto conforman la malla, sobre la cual se colocan las características propias y específicas del problema de análisis, el dimensionamiento de esta malla influye directamente en la precisión de los resultados, es por ello que se debe considerar un estudio detallado en el tamaño de la malla para mejorar el grado de detalle de la solución del problema (Huapaya, 2019).

### ***1.8.1 PRINCIPIOS BÁSICOS***

El método de elementos finitos (MEF), consiste en un método potente de cálculo, en el cual la separación por elementos del sistema permite el análisis del problema en varias partes en común llamados nodos. Para esto las ecuaciones dependientes entre elementos se relacionan con las ecuaciones necesarias según la información de resultados que se desea obtener, además, se debe considerar las condiciones externas existentes como procesos de fabricación, condiciones de carga y propiedades de los materiales que en muchas ocasiones resultan imposibles de medir y/o caracterizar, todo este sistema de ecuaciones que permiten la solución al problema de análisis. En la actualidad gracias al gran desarrollo computacional es posible obtener la solución de dicho sistema de ecuaciones de una manera cómoda y rápida, evitando el factor de posible error de cálculo humano. Esto genera una gran optimización de tiempo y recursos humanos, materiales y económicos (Salvador de Cruz, 2020).

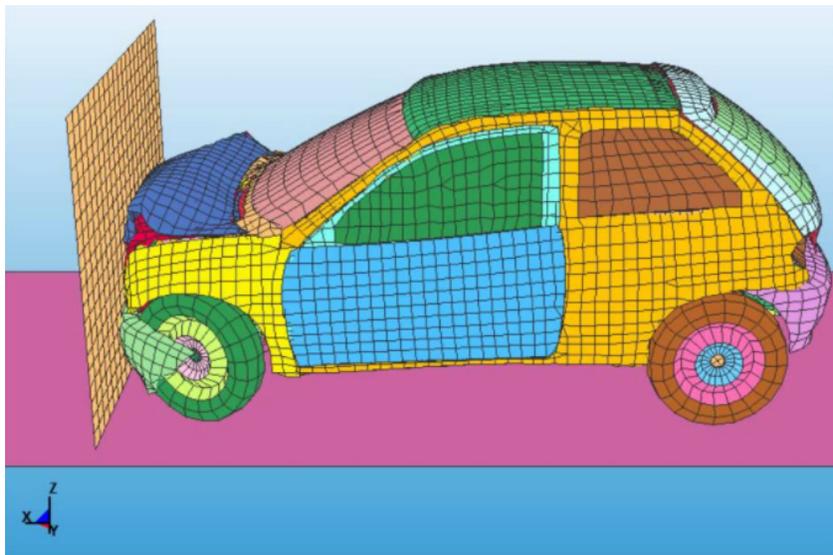
### ***1.8.2 APLICACIONES EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ***

La implementación de método de elementos finitos en la ingeniería ha mejorado la autonomía en el diseño y el cálculo problemas complejos, con este método se facilita el cálculo de problemas de ingeniería automotriz de diversa índole, como puede ser el cálculo estructural estático y/o dinámico, o para el análisis de funcionamiento y comportamiento de cualquier material

sólido o máquina, así como también para el análisis térmico de sistemas eléctricos, neumáticos, entre otros. Una herramienta aplicada para el análisis de este tipo de problemas es el software Ls-Dyna (Salvador de Cruz, 2020).

### 1.8.3 MALLADO

Los elementos finitos están conectados entre sí por nodos y a todo este conjunto de nodos se conoce como malla. La precisión del resultado utilizando este método de análisis depende de la cantidad de nodos, el dimensionamiento y los tipos de elementos por malla. Por esto mismo, entre más divisiones tenga, más precisos serán los resultados (Seismous, 2019). El mallado del sistema de análisis se crea en la etapa inicial de la modelación definiendo las distintas variables del problema. Cada nodo dispone sus distintos grados de libertad, lo que permiten recrear con más certeza la situación real del problema a simular (Salvador de Cruz, 2020)



**Figura 1.9** Mallado de un vehículo

Fuente: (grupoays, 2016)

La Figura 1.9 indica el mallado de todos los componentes de un vehículo para un ensayo de impacto asistido por computador.

El mallado de una pieza en los inicios del MEF demandaba de un gran esfuerzo, tiempo y de un amplio conocimiento. En la actualidad con la implementación de los automalladores en los paquetes de MEF hacen que el mallado del sistema a resolver sea más fácil y logrando reducir el tiempo de pre procesamiento del espécimen a evaluar, esto se debe a que los paquetes de MEF

permiten importar la geometría del modelo CAD ya sea 2D o 3D, para mallar la pieza de forma automática con el automallador. Dependiendo del problema malla 2D es sustituida con una malla con cuadriláteros lineales o dominantes y adicionando triángulos en las regiones donde lo requiere la forma del modelo a simular. Además, en los nuevos paquetes de MEF el mallado de la pieza se puede hacer manualmente seleccionando los elementos a mallar. El mallado de los elementos cada vez es menos problemático en la medida del desarrollo de mejores computadoras inteligentes.

#### 1.8.4 LS-DYNA

Ls-Dyna fue desarrollado por *Livermore Software Technology Groupes* a mediados de la década de los setenta. Este programa resuelve problemas de análisis dinámico real CAE de modelos 3D por el método de elementos finitos.

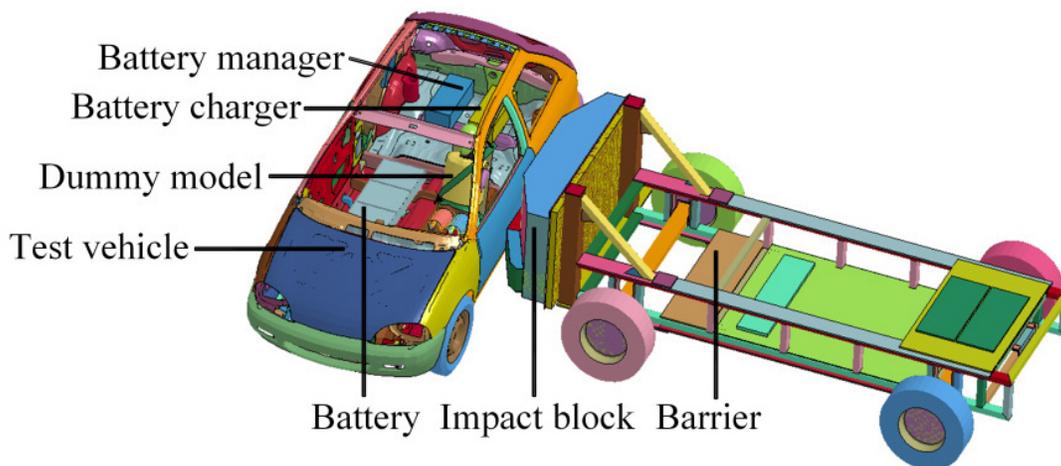
El software de LS-DYNA permite el análisis de deformaciones no lineales que ocurren en milisegundos, como ejemplo de aplicación en la industria automotriz es el análisis estructural de vehículos ante diferentes eventos de choque, con el programa se puede predecir con precisión las tensiones, deformaciones y tendencias de fallas en los materiales de la estructura del vehículo. Además, Ls-Dyna cuenta con una biblioteca de herramientas que facilitan la rápida evaluación numérica como: cinturones de seguridad, diferentes tipos de sensores, acelerómetros, airbags, dummy, entre otros (Vetturazzi, 2020).



**Figura 1.10** Aplicaciones de Ls-Dyna en la Ingeniería

Fuente: (Vetturazzi, 2020)

En la Figura 1.10, se indica algunas de las aplicaciones en la rama de Ingeniería haciendo uso del software de simulación explícita Ls-Dyna.



**Figura 1.11** Crash test lateral con Ls-Dyna

Fuente: (Wu et al., 2019)

Las pruebas de choque digitales amplían las posibilidades de simulación, para mejorar la seguridad de los pasajeros en vehículos eléctricos, en la simulación de impacto se incluye maniobras de vehículos adicionales y escenarios de accidentes, el software de simulación puede integrar diferentes entornos de diseño para permitir que los ingenieros comiencen las pruebas de seguridad durante las primeras fases del desarrollo, como se observa en la Figura 1.11. Esto permite a los fabricantes de automóviles reducir su dependencia de pruebas físicas costosas y que requieren mucho tiempo, lo que ahorra costos y acelera el desarrollo de vehículos. El software de simulación también presenta modelos humanos precisos, que permiten un análisis más profundo y proporcionan mejores resultados que los maniquíes de prueba de choque convencionales (Shienmar & Melvin, 2020).

## CAPÍTULO II

### 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo presenta los materiales y la metodología que fueron utilizados para desarrollar el diseño y simulación de condiciones de impacto frontal, en el vehículo monoplaza eléctrico.

#### 2.1 MATERIALES

Los materiales que intervienen en el desarrollo del presente proyecto de grado han sido seleccionados de acuerdo con las necesidades de detalles en el diseño y simulación computacional, además se han clasificado como se muestra a continuación:

- Vehículo monoplaza eléctrico basado en el modelo Renault Twizy 2016.
- Softwares:
  - Solidworks
  - Ls-Prepost
  - Ls-Dyna

##### *2.1.1 VEHÍCULO MONOPLAZA ELÉCTRICO*



**Figura 2.1** Renault Twizy

Fuente: (infotaller.tv, 2017)

El vehículo empleado para esta simulación de impacto frontal es un cuadriciclo eléctrico con las dimensiones y características del vehículo Renault Twizy. Figura 2.1.

En la Tabla 2.1 podemos ver algunos datos del vehículo que son de gran utilidad para el estudio, diseño y apartados posteriores.

**Tabla 2.1** Datos del vehículo

<b>CARACTERÍSTICAS :</b>	Motor: Eléctrico 4/8 kW Caja de velocidades: Caja con Reductor Peso en vacío: 475 kg Tipo de transmisión : 4x2
<b>RENDIMIENTOS :</b>	Potencia máxima (HP): 13 kW (17 HP) @ 7250 rpm Autonomía ZE (Km): 80 Torque máximo (Nm) : 57 @ 2100 rpm
<b>CONSUMO :</b>	CO2 (g/km) : 0

Fuente: (Renault, 2017)

### **2.1.2 SOFTWARES UTILIZADOS**

Para el desarrollo del proyecto se han utilizado tres softwares como lo son: Solidworks, Ls-Prepost y Ls-Dyna. Para realizar el diseño del modelo del vehículo se utiliza Solidworks, en el proceso de simulación de impacto se emplea el software de Ls-Dyna y como herramienta para preparar los datos de entrada que Ls-Dyna va usar se emplea Ls-Prepost, además con esta herramienta también se visualiza los resultados finales de la simulación.

## **2.2 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

En el presente capítulo se encuentran detallados los distintos procesos y métodos que fueron empleados, para llevar a cabo el correcto desarrollo del proyecto de grado. La metodología empleada en esta investigación garantiza la validez científica a cada proceso ejecutado, así como la validez de los resultados obtenidos en los diferentes procesos de simulación computacional, logrando cumplir con los objetivos previamente establecidos en la investigación.

La metodología implementada en el desarrollo del presente proyecto de grado es de orden cuantitativo, debido a que los resultados en esta investigación se obtuvieron datos numéricos en los diferentes ensayos de simulación computacional. Estos resultados posteriormente son analizados, verificados y tabulados de acuerdo a las necesidades de detalles en los resultados. Así como también corresponde a un enfoque transversal, por el hecho en que los resultados fueron

obtenidos en un determinado tiempo y con resultados inmediatos que permitieron conocer el comportamiento estructural de los materiales del vehículo ante un impacto frontal.

### ***2.2.1 TIPOS DE INVESTIGACIÓN***

En el desarrollo de la investigación se encuentra comprendido diferentes tipos de investigación como son: bibliográfica, tecnológica, experimental, transversal, descriptiva y cuantitativa, que a través un análisis técnico de cada una de estas investigaciones se puede llegar a una solución de forma cualitativa y cuantitativa, en donde exista la proyección de consideraciones lógicas.

#### **2.2.1.1 Bibliográfica**

Para el desarrollo del presente proyecto fue indispensable realizar una indagación técnica en las diferentes fuentes de investigación, tales como artículos científicos, revistas, libros, tesis, páginas web, videos, normativas e informes técnicos, de manera que la información obtenida sea confiable, con un respaldo técnico y profesional, que contribuya al desarrollo del proyecto de grado de forma más eficaz con información actualizada acorde al tema de investigación establecido.

#### **2.2.1.2 Tecnológica**

El proyecto se elaboró con herramientas de ingeniería computacional, utilizando programas de diseño mecánico y de simulación dotados de una amplia biblioteca en materiales y herramientas para la simulación estructural, con el fin de cubrir todas las necesidades requeridas para el desarrollo adecuado de la presente investigación.

#### **2.2.1.3 Experimental**

De tipo experimental en el proceso de simulación de impacto frontal evaluando aplicación de varios materiales, comparando las diferentes características mecánicas de los materiales con el fin de poder determinar el material más idóneo para este tipo de vehículos.

#### **2.2.1.4 Transversal**

De tipo transversal, ya que la investigación se logró realizar en un rango de tiempo determinado, en el cual se logró obtener la información de manera inmediata, para poder analizar los resultados del comportamiento mecánico de los diferentes materiales ante un impacto frontal,

de manera que se pueda evaluar las ventajas y desventajas que brinda cada material de prueba en la investigación.

#### **2.2.1.5 Descriptiva**

De tipo descriptivo, en el análisis de los resultados producto de la simulación de impacto frontal, como también en el análisis comparativo de los resultados en aplicación de ciertos materiales en las simulaciones de impacto con el software de ingeniería Ls-Dyna, detallando las distintas resistencias mecánicas de los materiales de prueba.

#### **2.2.1.6 Cuantitativa**

De orden cuantitativo, para la determinación y valoración de los resultados de desplazamientos lineales en la estructura del vehículo después de la colisión frontal, proyectando las diferentes características mecánicas que dispone cada material de prueba en la simulación de impacto.

### ***2.2.2 MÉTODO***

Con la simulación computacional, en base a modelos matemáticos, se podrá predecir de manera eficaz cómo reaccionará la estructura del vehículo bajo un entorno de choque real, para así tener una idea clara y poder determinar sus cualidades o características de este vehículo y de ser el caso en un futuro poder dar cierto grado de confiabilidad a estos modelos de vehículos.

### ***2.2.3 POBLACIÓN Y MUESTRA***

#### **2.2.3.1 Población**

La población en la que se encuentra la presente investigación está enfocada en la subcategoría de vehículos L7e de código CM2 según la norma NTE INEN 2656, los cuales son vehículos automotores de cuatro ruedas diseñados y construidos para el transporte de personas, cuya masa vehicular sea inferior o igual a 550kg sin incluir la masa de las baterías para los vehículos eléctricos, y potencia máxima inferior o igual a 15 kW, para el caso de VE (INEN, 2016a).

### 2.2.3.2 MUESTRA

Para el desarrollo de esta investigación se analiza los antecedentes de siniestros de tránsito en el sector automotor como también las deformaciones estructurales presentadas ante una colisión, siendo importantes para la elección de una simulación de impacto frontal bajo normativa Euro NCAP.

### 2.2.4 OPERACIÓN DE VARIABLES

#### 2.2.4.1 Variable Independiente

**Tabla 2.2** Variable Independiente

Variable	Contextualización	Categorías	Indicadores	Índice	Técnicas e instrumentos
Digitalizar las geometrías y características del diseño de la estructura	El diseño 3D es una representación gráfica de un modelo con el fin de poder explicar la geometría, entender o mejorar un sistema.	Modelado CAD	Planos 2D	mm	<ul style="list-style-type: none"> <li>Investigación bibliográfica</li> <li>Observación y Registro de datos</li> </ul>
Simular un choque frontal bajo condiciones de un choque real	Una simulación computación consiste en imitar el funcionamiento o comportamiento de cualquier tipo de operación o proceso del mundo real a través del ejercicio de modelos matemáticos .	Tiempo de simulación de impacto.	Tiempo	0,15 Segundos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Investigación bibliográfica</li> <li>Registro de datos</li> <li>Observación</li> <li>Medición</li> <li>Norma EURO NCAP</li> </ul>
		Impacto frontal	Velocidad de impacto frontal	50 km/h	
		Material de la estructura	Material deformable	Acero estructural	

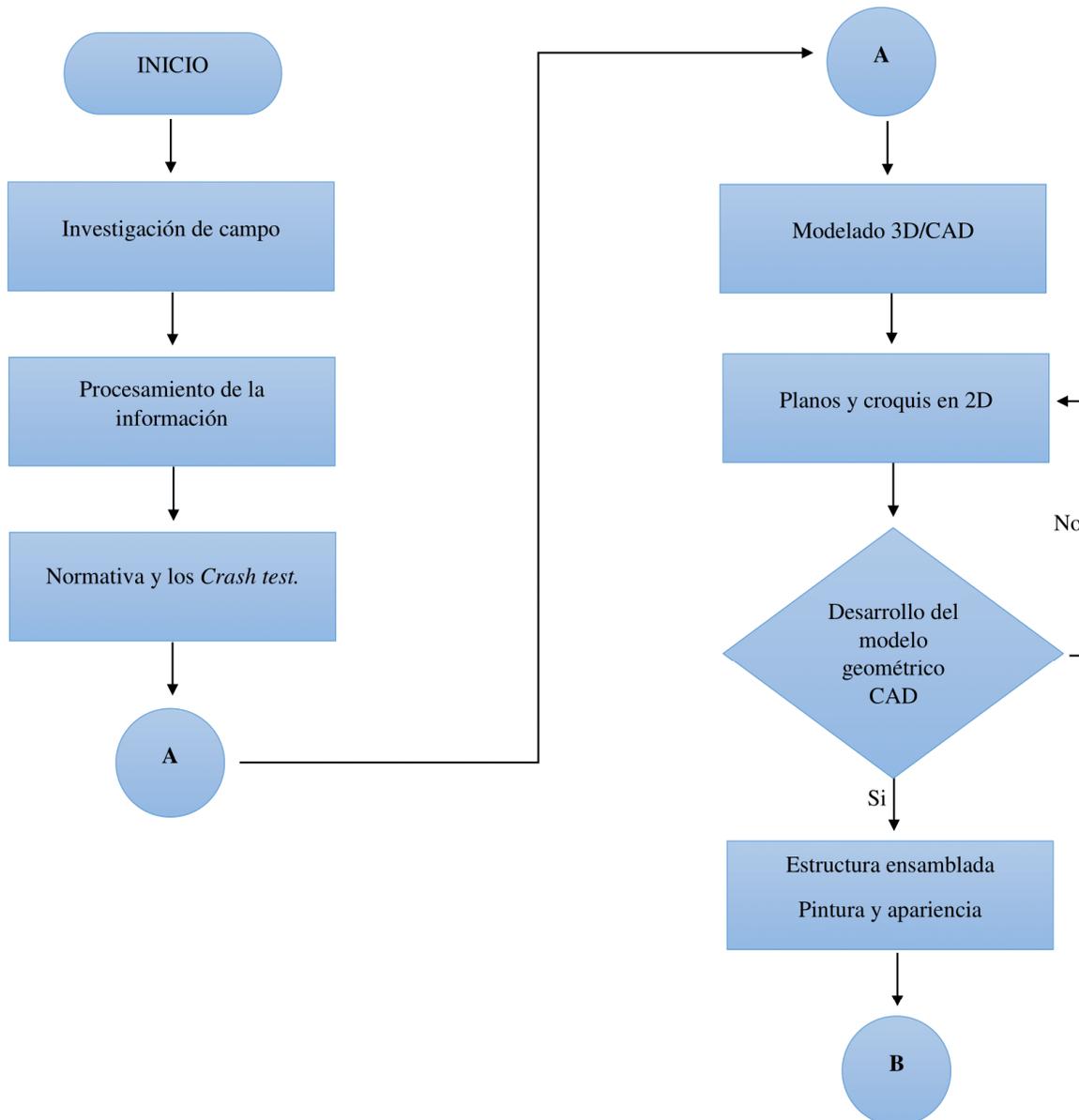
### 2.2.4.2 Variable Dependiente

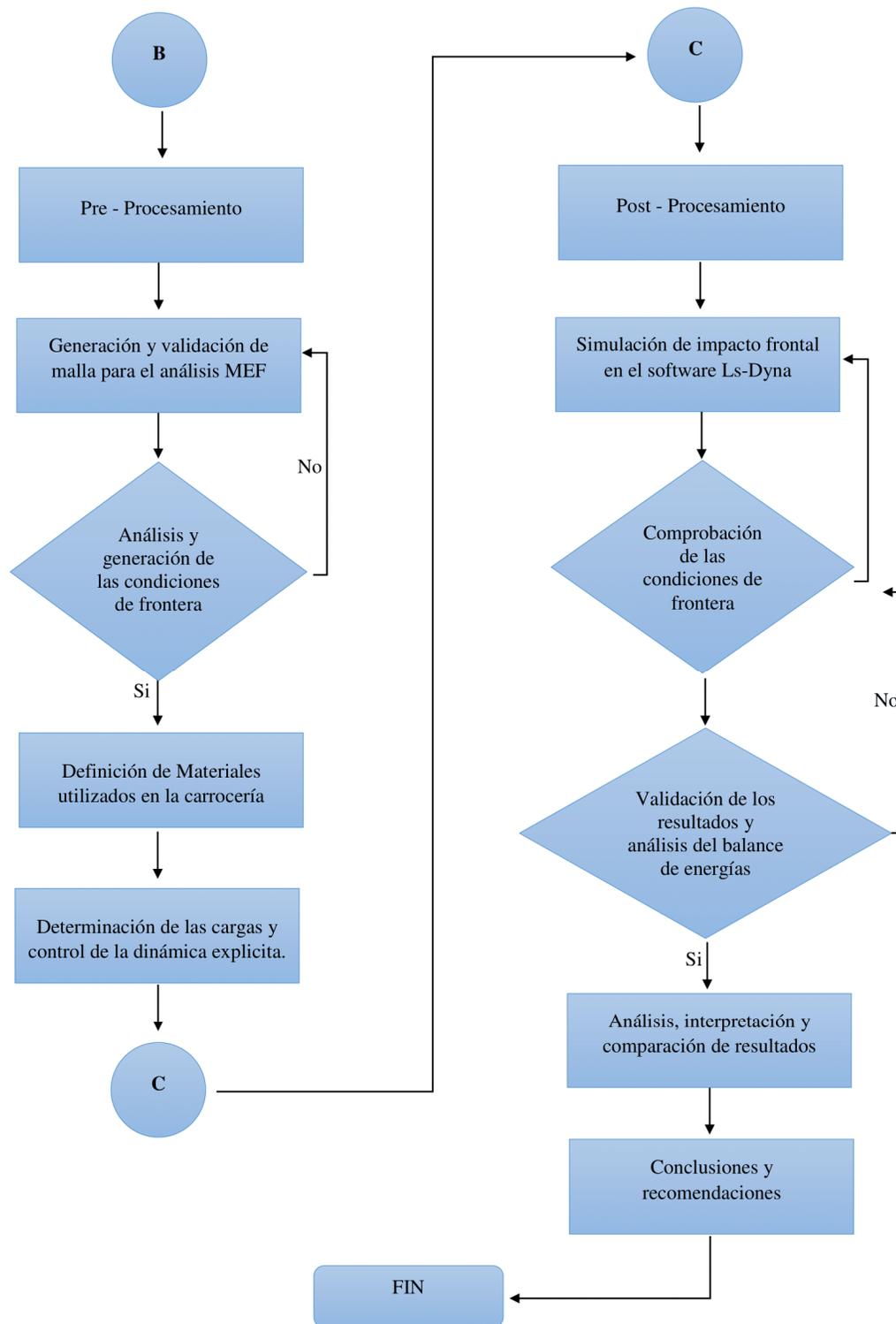
**Tabla 2.3** Variable Dependiente

Variable	Contextualización	Categorías	Indicadores	Índice	Técnicas e instrumentos
Analizar el comportamiento de los materiales tras una simulación de impacto	Mediante una simulación por el método de elementos finitos se determinará la deformación que experimentará el cuadríciclo eléctrico ante un impacto frontal, teniendo en cuenta los criterios de aceptación bajo normativa Euro NCAP.	<p>Evaluación de propiedades mecánicas</p> <p>Análisis computacional</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformaciones</li> <li>• Esfuerzos</li> </ul> <p>Graficas de esfuerzo vs deformación</p>	<p>Deformación máxima</p> <p>Módulo de elasticidad en tracción</p> <p>¿Qué material presenta mejores características mecánicas y mejor seguridad tras el impacto?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Observación</li> <li>• Registro de datos</li> <li>• Medición</li> <li>• Análisis a través del método por elementos finitos.</li> </ul>

### 2.2.4 METODOLOGÍA

Proceso de diseño y simulación de impacto frontal de un vehículo monoplaza eléctrico categoría L7e.





**Figura 2.2** Diagrama de flujo de diseño y simulación de impacto de un vehículo monoplane eléctrico.

## **2.2 PROCEDIMIENTO**

### ***2.2.1 INVESTIGACIÓN DE CAMPO***

La información recolectada para el desarrollo y sustentación del presente proyecto de grado tuvo como base la indagación bibliográfica de diferentes fuentes de investigación tales como artículos científicos, revistas, libros, tesis, páginas web, videos, normativas e informes técnicos, los cuales facilitaron datos técnicos y resultados de estudios realizados con anterioridad, como ensayos de choque realizados a todo tipo de vehículos tanto livianos como pesados.

#### ***2.2.2.1 Los Crash Test***

Los *crash test* son pruebas de choque que consisten en realizar ensayos destructivos a los vehículos, con el fin de poder garantizar que vehículo cumpla con las normas de seguridad deseables, estos ensayos destructivos ayudan considerablemente en la reducción de incidentes de tránsito que ocurren diariamente en las calles y carreteras. Dicho de otra manera se trata de destrozarse un vehículo en diferentes escenarios para poder conocer la resistencia de su estructura (GM Chamorro, 2021).

#### **2.2.1.2 Normativa EURO NCAP**

El vehículo empleado para esta simulación de impacto es de tipo cuatriciclo que viene a ser un medio de transporte práctico y económico al ser de propulsión eléctrica. Este cuatriciclo se encuentra en la categoría de cuatriciclos pesados L7 debido a que su peso supera los 350 kg.

La EURO NCAP (2014) en su publicación “Seguridad de los cuatriciclos” describe que los ensayos de choque frontal para este tipo de vehículos no tienen la obligación de superar los estrictos controles de seguridad que se aplican a los vehículos tipo turismo convencionales. En el ensayo de choque frontal, el cuatriciclo es sometido a un impacto ante una estructura deformable situada en un bloque de hormigón a una velocidad de 50 km/h, de manera que toda la parte frontal (anchura) choque ante la estructura deformable.

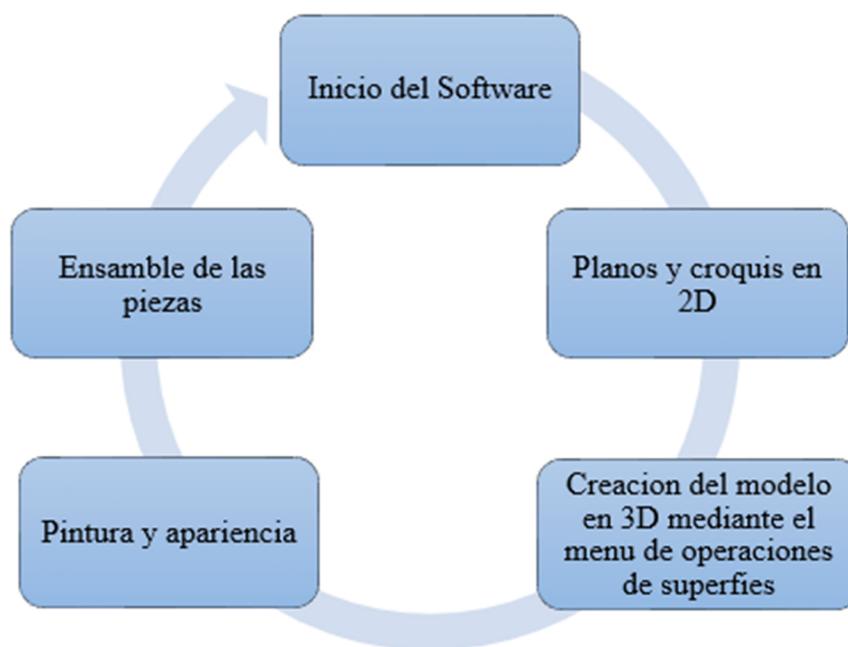
#### ***2.2.2 MODELADO 3D / CAD***

El diseño de la estructura y carrocería del modelo basado en el vehículo Renault Twizy son modelados en el software SolidWorks, que es un software CAD 3D que está a nuestro alcance y forma parte de la malla curricular de nuestra carrera, de manera que se cuenta con los

conocimientos previos para el diseño del modelo del vehículo. Este software muy utilizado en el diseño de piezas, ensambles en 3D y planos en 2D gracias a su interfaz y herramientas de dibujo que facilitan modelar geometrías complejas de manera rápida y sencilla, además permite modificar las operaciones sin ser necesario rediseñar nuevamente la geometría.

Los elementos estructurales de la carrocería son modelados como elementos tipo cáscaras (shell) debido a que presentan una mejor estimación de esfuerzos y deformaciones. Se debe considerar todos los detalles del diseño de manera correcta, para asegurar el éxito del ensayo computacional y la confiabilidad de los resultados dados por el software.

### 2.2.2.1 Proceso de modelado del vehículo



**Figura 2.3** Proceso de modelado

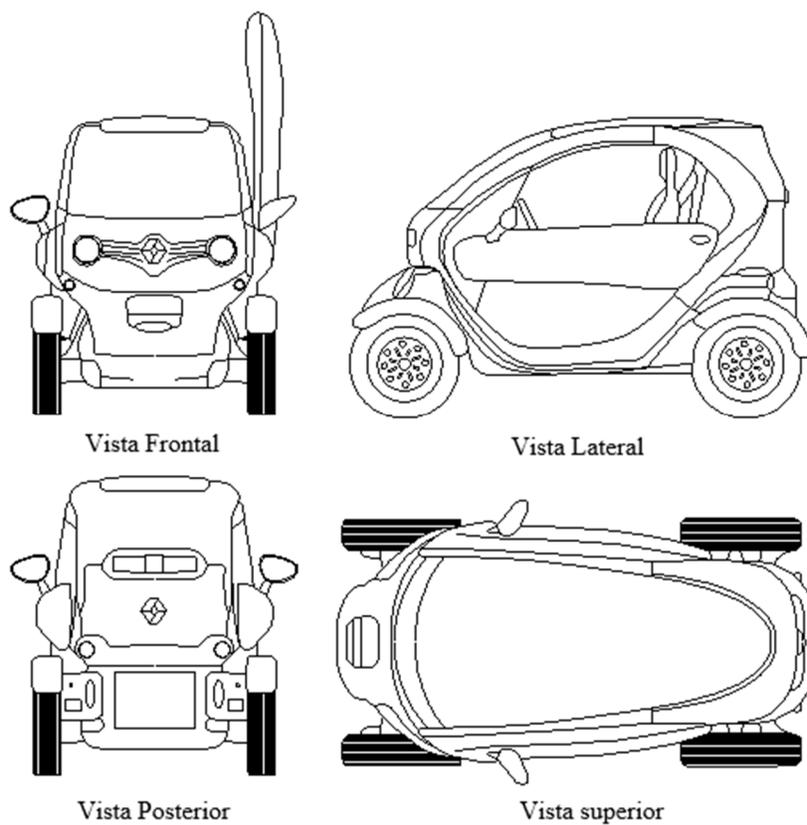
Para realizar el diseño del vehículo monoplaza eléctrico basado en el modelo Renault Twizy 2016, se siguió el proceso indicado en la Figura 2.3.

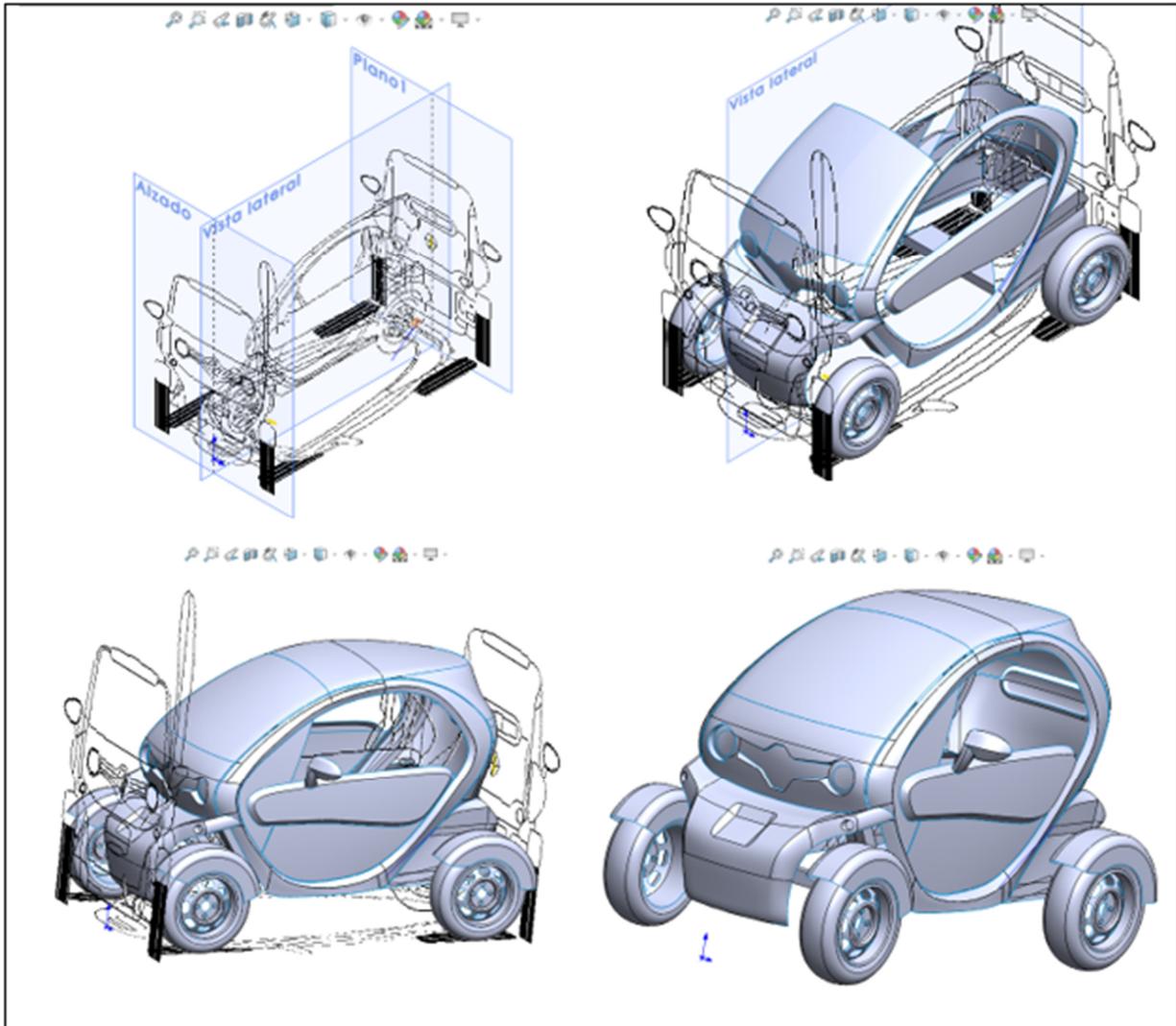
En el diseño de la carrocería se hace necesario la obtención de planos y medidas superficiales del modelo del vehículo, a continuación, en la Tabla 2.4 se detalla las principales medidas superficiales en mm, como también los planos en las diferentes vistas tanto frontal, lateral, superior y posterior, para mayor detalle del dimensionamiento de la carrocería, revise la sección de anexos donde se encuentran cada uno de los planos respectivos, Anexo I.

**Tabla 2.4** Medidas del modelo del vehículo en mm

CARACTERÍSTICAS	MEDIDAS (mm)
Anchura (Con espejos)	1381
Anchura (Sin espejos)	1237
Ancho vía delantera	1094
Ancho vía trasera	1080
Batalla	1686
Longitud total	2337
Altura	1454
Altura del suelo al larguero inferior	107
Altura del larguero inferior al asiento	315
Altura del asiento al larguero superior	882

Fuente: (infotaller.tv, 2017)

**Figura 2.4** Vistas en 2D para el diseño de la estructura del modelo del vehículo.



**Figura 2.5** Proceso de modelado del vehículo en SolidWorks

A continuación, se comenzó el modelado del vehículo categoría L7e en el software de diseño SolidWoks, haciendo uso de las herramientas de croquis y operaciones de superficies, considerando las dimensiones superficiales anteriormente expuestas, para obtener la geometría deseada lo más cercano a la realidad, como se puede visualizar en la Figura 2.5.



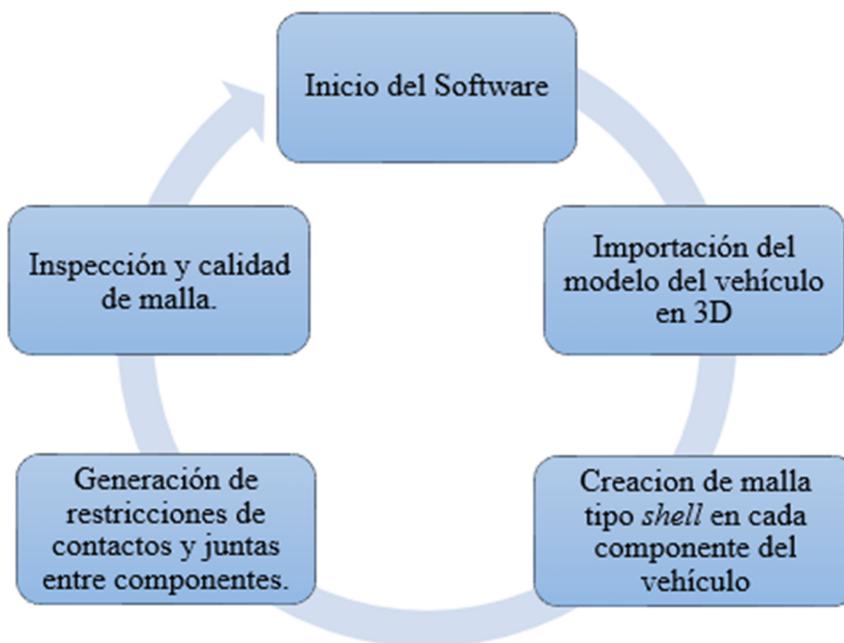
**Figura 2.6** Modelado realizado

Una vez finalizada con todas las operaciones requeridas para el modelado del cuatriciclo se obtendrá el diseño final de modelo del vehículo a prueba Figura 2.6.

No se incluyen elementos de detalle como cinturón del conductor o partes internas del habitáculo. Es muy importante indicar que no se debe incluir ningún tipo de unión entre los elementos, estos solamente deben quedar a tope; incluir elementos soldados genera un alto gasto computacional que es totalmente innecesario en este estudio. Además, se recomienda dar colores diferentes a cada sección estructural para optimizar la vista del modelo y poder diferenciar

rápidamente cada parte, es preferible utilizar colores vivos y vistosos que den un buen contraste entre sí.

### 2.2.3 GENERACIÓN DE MALLA PARA ANÁLISIS MEF



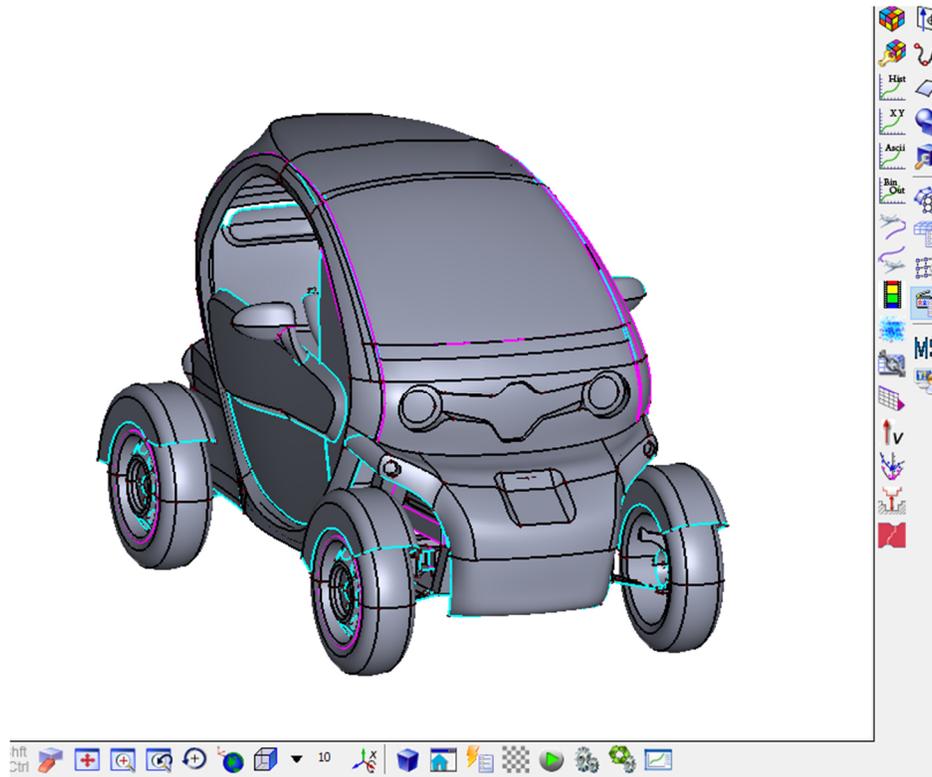
**Figura 2.7** Proceso de mallado

Para la generación de malla de cada uno de los componentes del vehículo se siguió el siguiente proceso: Importación del modelo del vehículo en 3D, creación de mala tipo Shell en cada componente del vehículo, generación de restricciones de contactos y juntas entre componentes, inspección y calidad de malla. Figura 2.7.

El mallado es generar un modelo matemático de todo el conjunto de superficies, enfocado a la información que se ingresó al software, para realizar la simulación. En los softwares de elementos finitos solo se utiliza la malla que se ha obtenido del modelado CAD, de esta manera dejando a un lado la geometría 2D.

Para la importación del modelo del vehículo y poder obtener un correcto mallado de todo el conjunto del vehículo, se debe verificar previamente que no haya aberturas ni irregularidades en el modelado caso contrario esto provocaría errores indefinidos en el programa y no se efectuará correctamente la simulación, produciendo inseguridades en los resultados.

Además, el modelo CAD preparado no se le asigna ningún espesor, esto se lo asigna durante el mallado indicando al programa que la superficie del modelado corresponde a una capa intermedia, es decir el espesor en ambos lados, ya que cuando son elementos de vaciado se diferencian tres capas.

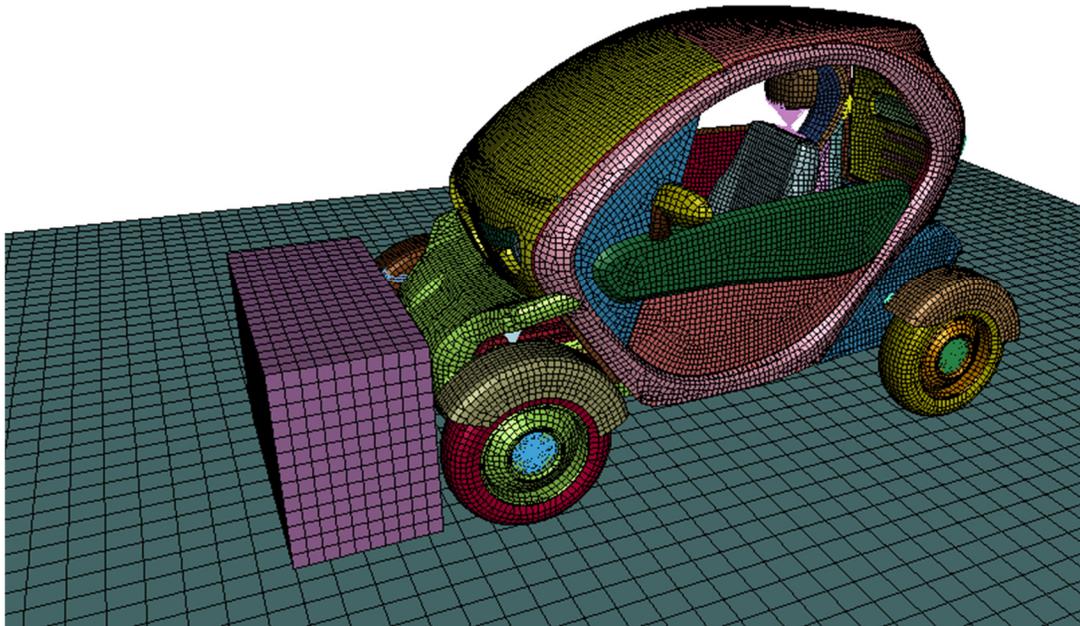


**Figura 2.8** Importación del modelo del vehículo al Software Ls-PrePost

En la Figura 2.8, se puede observar la importación del modelo CAD al software de pre procesamiento Ls-PrePost.

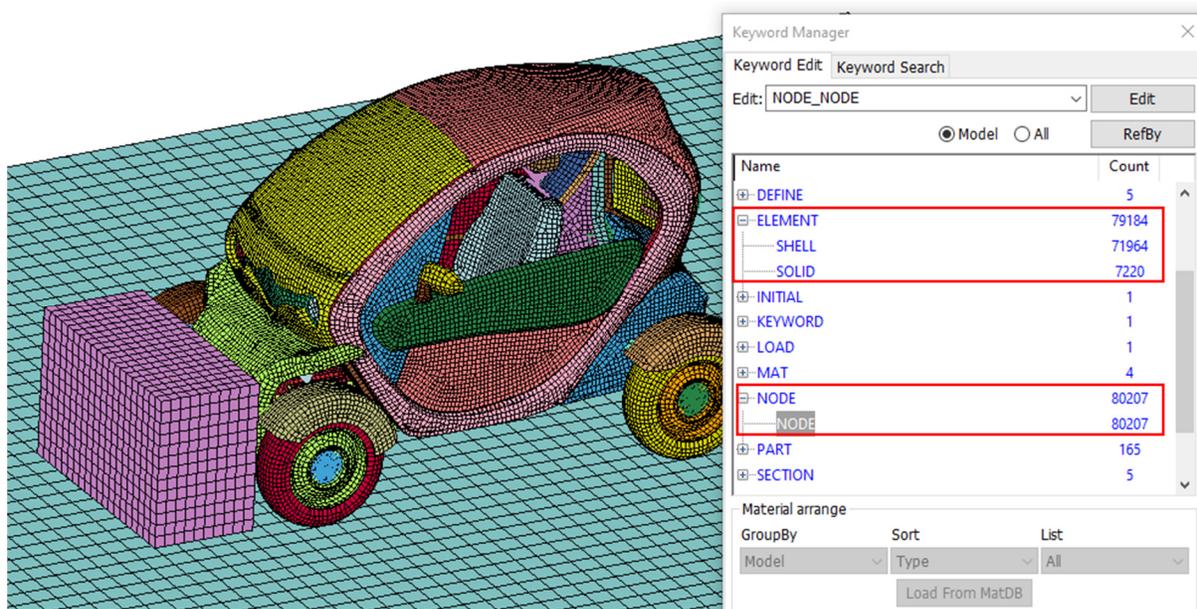
Al tener que trabajar empleando software de Ls-Dyna permite trabajar con tres tipos de elementos entre los más importantes se tiene: el unidimensional 1D (*beams*), el bidimensional 2D (*shells*), y el tridimensional 3D (sólidos), cada uno costa de distintas aplicaciones de acuerdo al tipo y fenómeno físico que se pretenda realizar el análisis.

Para ahorrar tiempo y recursos informáticos, se ha decidido utilizar elementos tipo *shell*, también llamados láminas, con esto se puede ahorrar recursos informáticos y acortar el tiempo de respuesta para la resolución de problemas en la simulación computacional.



**Figura 2.9** Mallado de los componentes que intervienen en la simulación

La carrocería y chasis del cuadríciclo eléctrico que es el principal elemento de análisis, se le asignó un tamaño de elemento de cara de 20 mm, mientras que al impactador un valor de 50 mm, y al piso un tamaño de elemento de 100 mm, dado que el piso no es relevante a considerar en el análisis se establece este valor. Figura 2.9



**Figura 2.10** Número de nodos y número de elementos de los componentes de la simulación

Tomando en cuenta tanto el volumen, área de superficie y otros detalles geométricos del vehículo, el impactador y el piso, el tamaño de la malla generada es: número de nodos 80 207 y número de elementos 79 184, como se indica en la figura 2.10.

El mallado es un paso clave en el análisis de elementos finitos, por lo que se deben considerar los estándares de calidad de malla requeridos. Estos estándares están definidos por los parámetros geométricos de cada elemento, por lo general, si uno de estos parámetros falla en un elemento, todos los demás elementos también fallarán, por el contrario, si se califica considerablemente un parámetro, todos los demás parámetros estarán en las mismas condiciones. ANSYS proporciona una serie de herramientas para evaluar estos valores de calidad de malla, tales como:

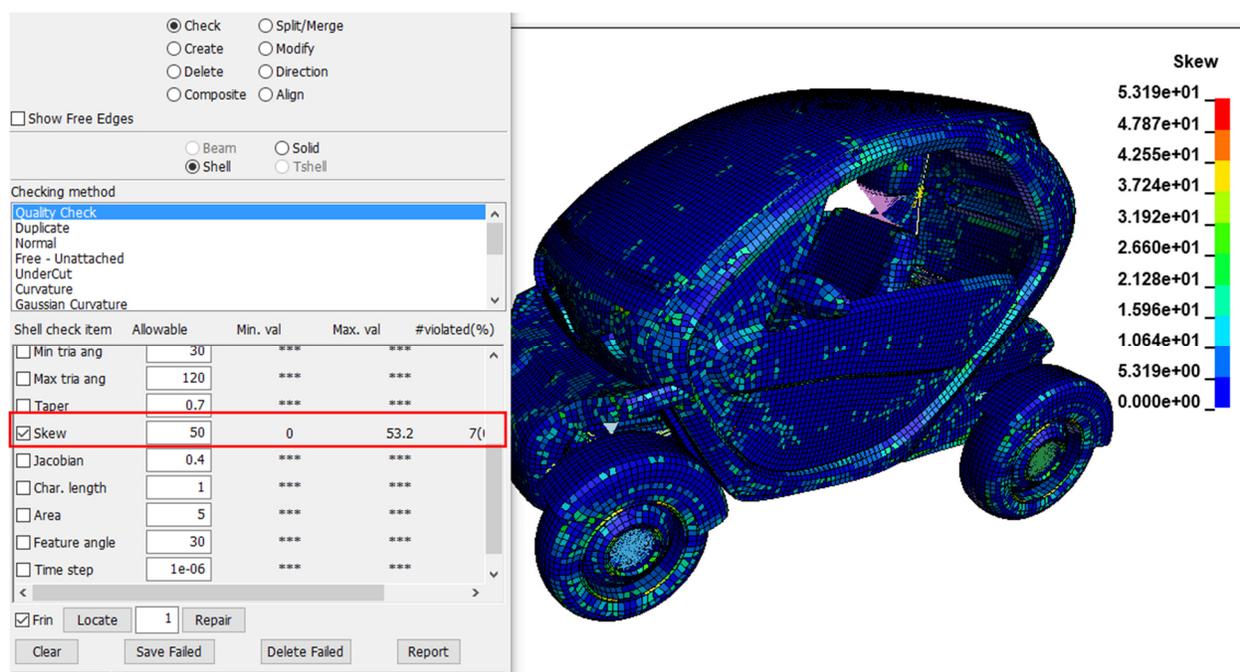
- Skewness
- Jacobian Ratio
- Element Quality
- Aspect Ratio
- Orthogonal Quality
- Parallel Deviation
- Maximum Corner Angle

En este estudio al trabajar con elementos cuadriláteros se evalúa la calidad de malla utilizando el primer criterio, que es el método de la desviación del ángulo *Skewness* (oblicuidad), este criterio de calidad varía desde 0 a 1, donde un valor cercano o igual a 1 se considera malo, por otro lado, al tener un valor bajo próximo o igual a 0 es considerado como bueno. Los diferentes criterios de aceptación bajo el criterio de *Skewness* se pueden observar en la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5** Rangos de Skewness y calidad de elementos

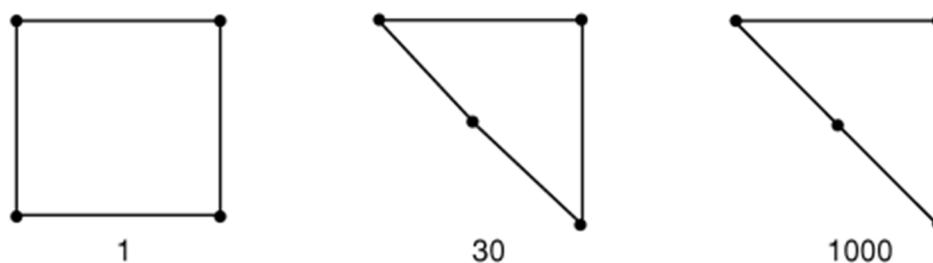
Skewness	Calidad de mallado
1	Degradado
$0.9 < 1$	Malo
0.75 - 0.9	Pobre
0.5 - 0.75	Razonable
0.25 - 0.5	Bueno
$> 0 - 0.25$	Excelente
0	Equilátero

Fuente: Calidad de mallado según Ansys 18.0



**Figura 2.11** Mallado según *Skewness*

El *Skewness* máximo del modelado del vehículo es de 0.532, lo cual es aceptable según los criterios de evaluación de la Tabla 2.5, por lo que tiene una buena calidad de malla, esto se consigue refinando la malla en algunos elementos como la carrocería, asiento, pared rígida y chasis del cuadríciclo. Se recomienda mallar los elementos por separado para comprobar si existe alguna interferencia entre entidades. Figura 2.11.



**Figura 2.12** *Jacobian Ratio* para cuadriláteros

**Fuente:** (ANSYS, 2017)

Otra forma de comprobar la calidad de la malla es a través de la métrica “*Jacobian Ratio*”, que viene a ser la medida de la desviación de un elemento dado de su forma original. Por ejemplo, para cuadriláteros se espera que todos sus lados sean paralelos entre sí formando un ángulo de 90 grados, para obtener un valor perfecto de *Jacobian Ratio* igual a 1, la eficiencia de un elemento

varía en función del movimiento de los nodos de cada esquina del cuadrilátero como se observa en la Figura 2.12 (ANSYS, 2017).



**Figura 2.13** *Jacobian Ratio* para triángulos

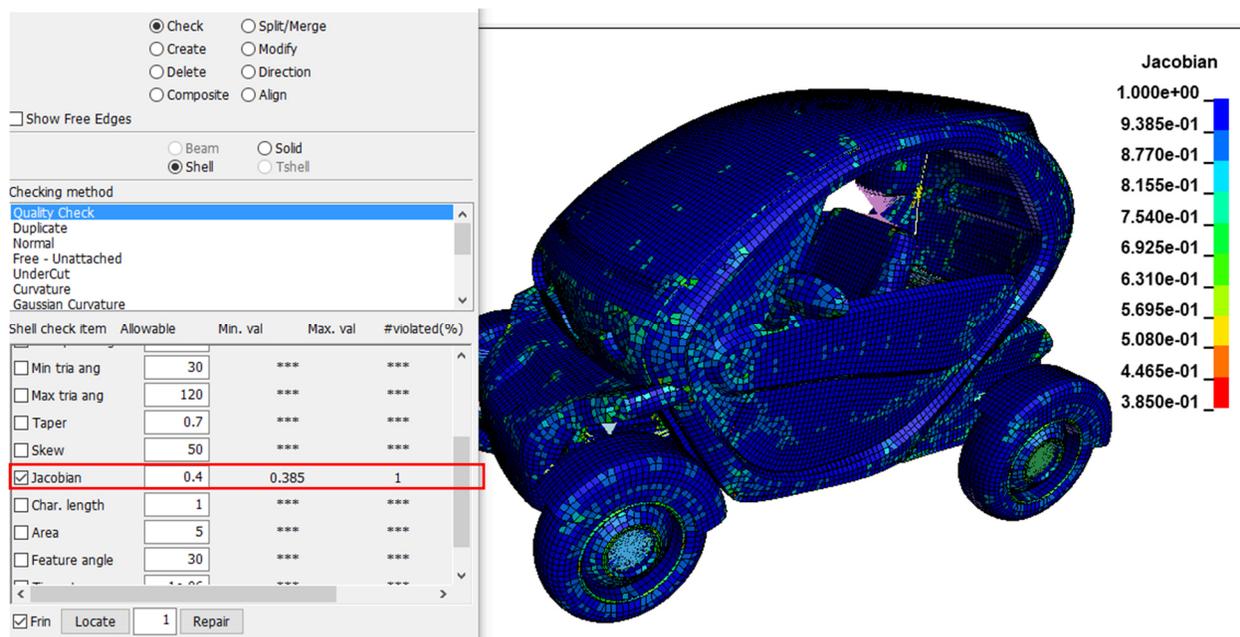
**Fuente:** (ANSYS, 2017)

Para elementos finitos de forma triangular, se espera que cada lado forme un ángulo de 60 grados para obtener un valor perfecto de *Jacobian Ratio* igual a 1. Figura 2.13.

En la Tabla 2.6 se indica los resultados de evaluación de los elementos del modelado del vehículo bajo la métrica *Jacobian Ratio*, en la cual se evalúa con valores entre 1.0 a -1.0, donde un valor próximo o igual a 1.0 se considera como el elemento de malla perfecto, por otro lado, si un elemento indica un valor próximo o inferior a 0 este elemento refleja ineficiencia, lo que puede producir fallas en la simulación con resultados erróneos y fuera de la realidad, para evitar esto Ansys recomienda utilizar elementos con un valor superior o igual a 0.33. Si el promedio del modelado computacional a evaluar se acerca a 1.0 indica que el mallado de elementos finitos es altamente fiable.

**Tabla 2.6** Resultado de la calidad del mallado según el criterio *Jacobian Ratio*

Calidad de mallado	<i>Jacobian Ratio</i>
Máximo	1.0
Promedio	0.69
Mínimo	0.385



**Figura 2.14** Mallado según *Jacobian Ratio*

La Figura 2.14 muestra el valor mínimo del elemento fuera de rango con el parámetro *Jacobian Ratio* que se encuentra 3.85, indicando con esto, que no es probable que existan jacobianos negativos. Además, en la figura se observa como la mayor parte de los elementos es de color azul, que demuestran que el mallado del modelado se encuentra en óptimas condiciones para realizar la simulación, indicando una alta probabilidad de garantía en los resultados obtenidos durante el tiempo de simulación del impacto.

Una vez validado todos los parámetros se establece que la malla generada es aceptable, por lo que se procede a realizar el pre procesamiento de la simulación del impacto frontal del cuadríciclo eléctrico bajo normativa Euro NCAP.

## **2.2.4 MATERIALES EMPLEADOS PARA VALIDACIÓN DEL ESTUDIO**

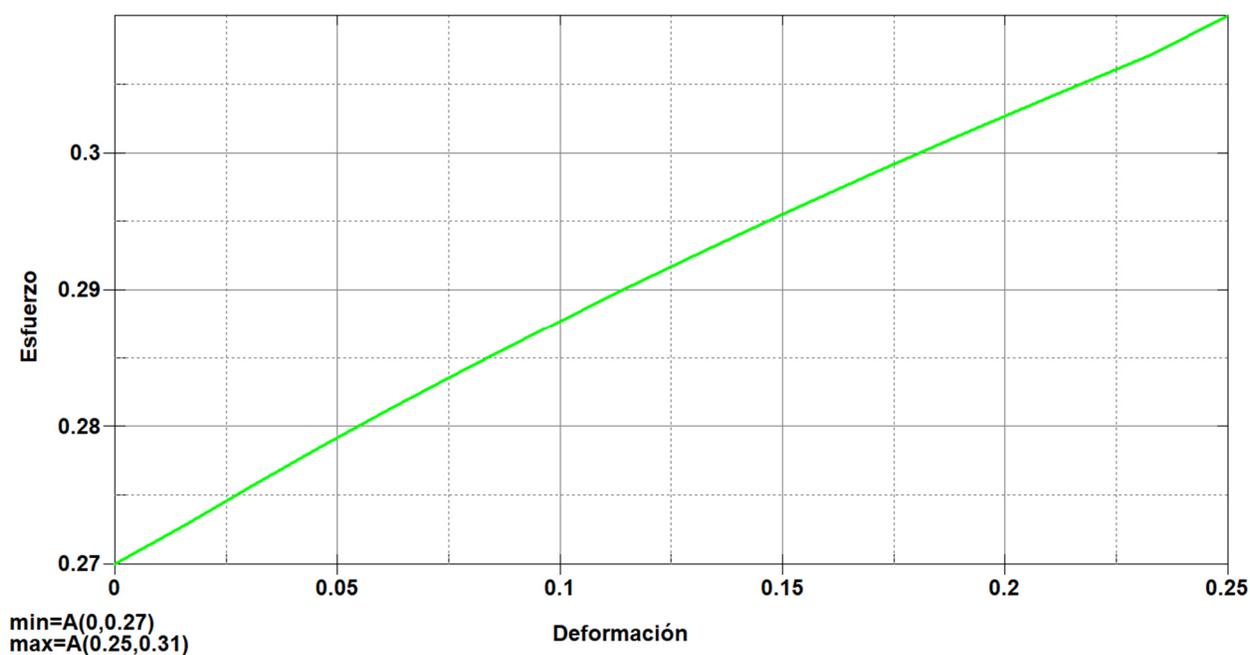
### **2.2.4.1 Acero estructural ASTM A-500**

Es un acero estructural al carbono que gracias a sus propiedades y características mecánicas contempla varias aplicaciones en la industria, como la construcción de estructuras metálicas, puentes, torres de energía, carrocería de vehículos y muchas otras industrias. En el Ecuador el acero ASTM A-500 es comercializado bajo la normativa NTE INEN 2415 que regula los requisitos que deben cumplir los tubos de acero al carbono tanto negros como galvanizados para aplicaciones

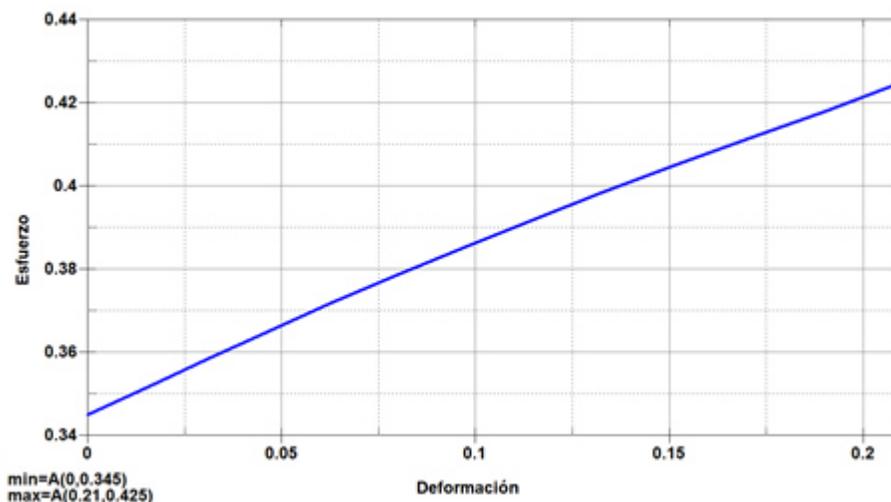
estructurales y usos generales (INEN, 2016b). A continuación, en la Tabla 2.7 se detallan las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de acero A-500 empleados en la simulación.

**Tabla 2.7** Propiedades mecánicas del Acero ASTM A-500

Propiedades del material	Acero ASTM A-500 Grado A Acero ASTM A-500 Grado C	
	Valor	Valor
Densidad (kg/mm3)	7.83e-06	7.83e-06
Módulo de elasticidad (GPa)	207	207
Radio Poisson	0.3	0.3
Límite de fluencia (GPa)	0.27	0.345
Resistencia ultima a la tracción (GPa)	0.31	0.425
Deformación unitaria máxima en tracción	0.25	0.21



**Figura 2.15** Curva de Esfuerzo vs Deformación de Acero ASTM A-500 Grado A



**Figura 2.16** Curva de Esfuerzo vs Deformación de Acero ASTM A-500 Grado C

En las Figuras 2.15 y 2.16 se puede apreciar el comportamiento del material tras una simulación de prueba de tracción, en la cual se puede observar la resistencia última a la tracción del material como también la deformación unitaria máxima en tracción, todo esto en GPa y en mm/mm correspondientemente.

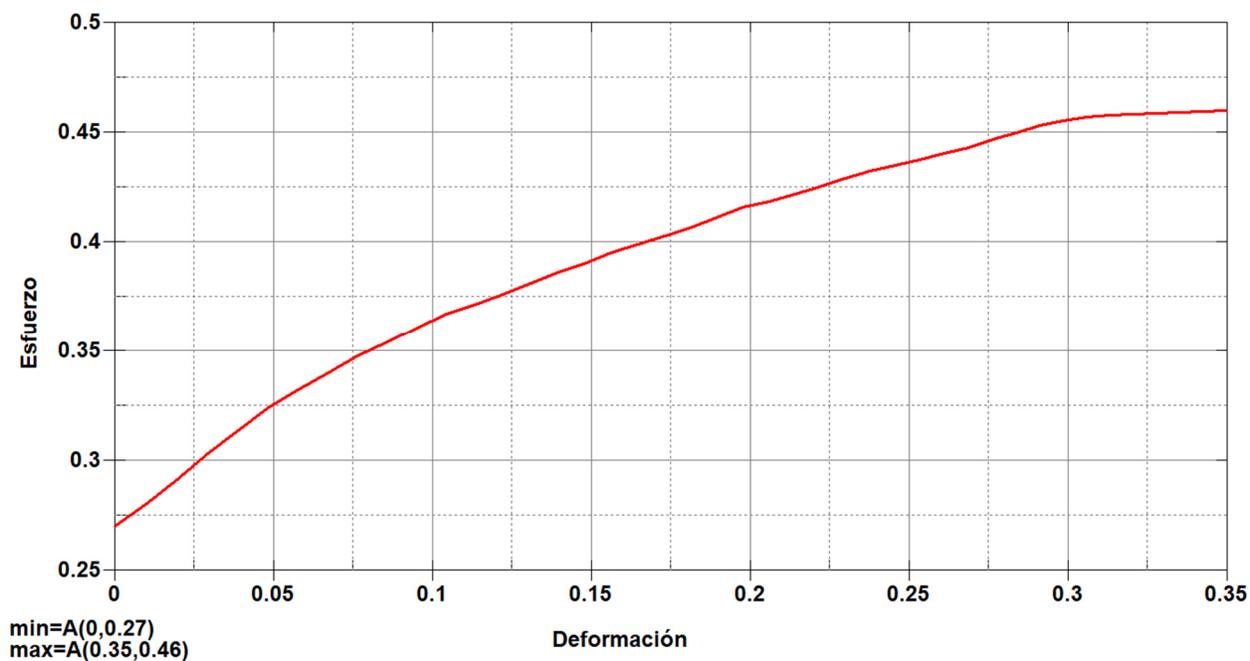
#### 2.2.4.2 Acero estructural usado para análisis FEM por la NHTSA

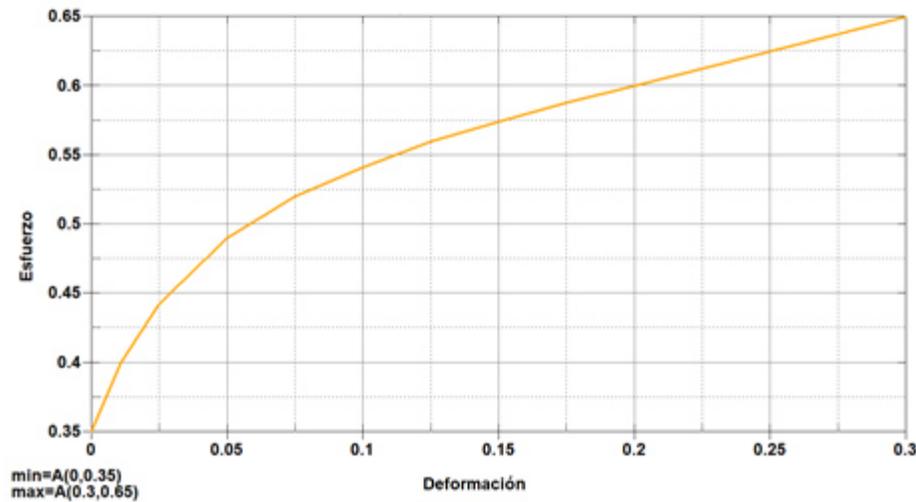
La Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras en conjunto con el Departamento de Transporte de los Estados Unidos, son encargados de hacer cumplir los estándares de rendimiento de los vehículos y las asociaciones con los gobiernos estatales y locales. Gracias a una simulación computacional previa la NHTSA ha logrado reducir considerablemente la tasa de muertes, lesiones y pérdidas económicas por choques de vehículos motorizados (NHTSA, 2021).

Esta simulación de impacto asistida por un computador se la realiza bajo una biblioteca de materiales que se asemejan aproximadamente en un 90% al comportamiento mecánico de los materiales reales de cada automóvil, materiales que están disponibles para análisis de elementos finitos en la página web de la NHTSA. A continuación, en la Tabla 2.8 se detallan las propiedades mecánicas de los materiales a prueba en esta simulación, a los cuales se les ha denominado a denominado acero NHTSA #1 y acero NHTSA #2.

**Tabla 2.8** Propiedades mecánicas de Acero NHTSA

	Acero NHTSA #1	Acero NHTSA #2
<b>Propiedades del material</b>	<b>Valor</b>	<b>Valor</b>
Densidad (kg/mm3)	7.89e-06	7.89e-06
Módulo de elasticidad (GPa)	210	200
Radio Poisson	0.3	0.3
Límite de fluencia (GPa)	0.27	0.35
Resistencia ultima a la tracción (GPa)	0.46	0.65
Deformación unitaria máxima en tracción	0.35	0.3

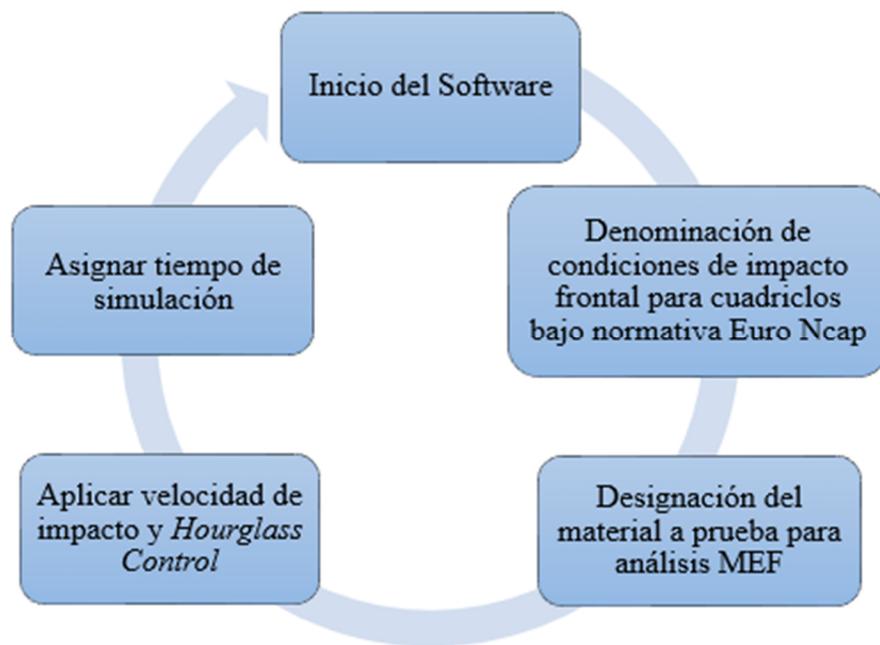
**Figura 2.17** Curva de Esfuerzo vs Deformación de acero NHTSA #1



**Figura 2.18** Curva de Esfuerzo vs Deformación de acero NHTSA #2

En las Figuras 2.17 y 2.18 se puede observar el comportamiento mecánico de los aceros denominados NHTSA ante una simulación a tracción, todo esto con el fin de poder determinar el límite de fluencia, la resistencia última a la tracción y la deformación unitaria máxima en tracción.

### 2.2.5 PRE PROCESAMIENTO PARA ANÁLISIS MEF



**Figura 2.19** Proceso de Pre Procesamiento para análisis MEF

Para la asignación de todos los datos del ensayo de impacto en el software de pre procesamiento Ls-PrePost, se siguió cuidadosamente un proceso como se indica en la Figura 2.19, todo esto con la finalidad de definir correctamente los parámetros de fuerzas, materiales y diferentes entidades de la simulación de impacto.

### 2.2.5.1 Unidades en Ls Dyna

Los programas de simulación que trabajan por el método de los elementos finitos, son adimensionales, es decir, no trabajan con unidades; las distintas magnitudes de trabajo son a dimensionar. Para esto el programador debe conocer las diferentes unidades y relaciones internas programadas, con el fin de evitar errores en el ingreso de datos en el pre procesamiento y los resultados de lectura en el pos procesamiento. Para el análisis de este estudio se aplica las unidades descritas en la Tabla 2.9.

**Tabla 2.9** Unidades para programar en Ls-Dyna

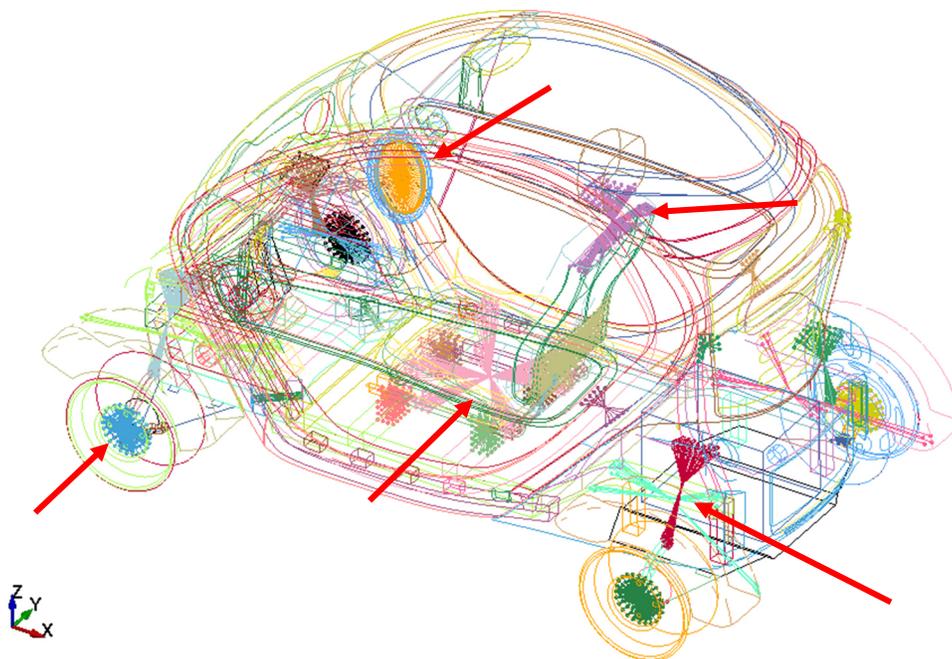
MAGNITUD	UNIDAD
Masa	Kg
Longitud	mm
Tiempo	ms
Fuerza	kN
Esfuerzo	GPa
Energía	kN-mm
Densidad	kg/mm <sup>3</sup>
Módulo de Young	GPa
Velocidad	m/s
Gravedad	mm/ms <sup>2</sup>

Fuente: (LS-DYNA Support, 2021a)

### 2.2.5.2 Contacto entre Elementos

La designación de geometrías de contacto es un paso importante en el análisis MEF, al aplicar la herramienta de topología compartida evita designaciones de juntas soldadas, uniones con

pernos o sujeción de elementos complejos como la suspensión del vehículo. Todo esto se lo realiza con el fin de evitar el alto gasto computacional en análisis de estructuras complejas.



**Figura 2.20** Contacto entre elementos del modelo del vehículo

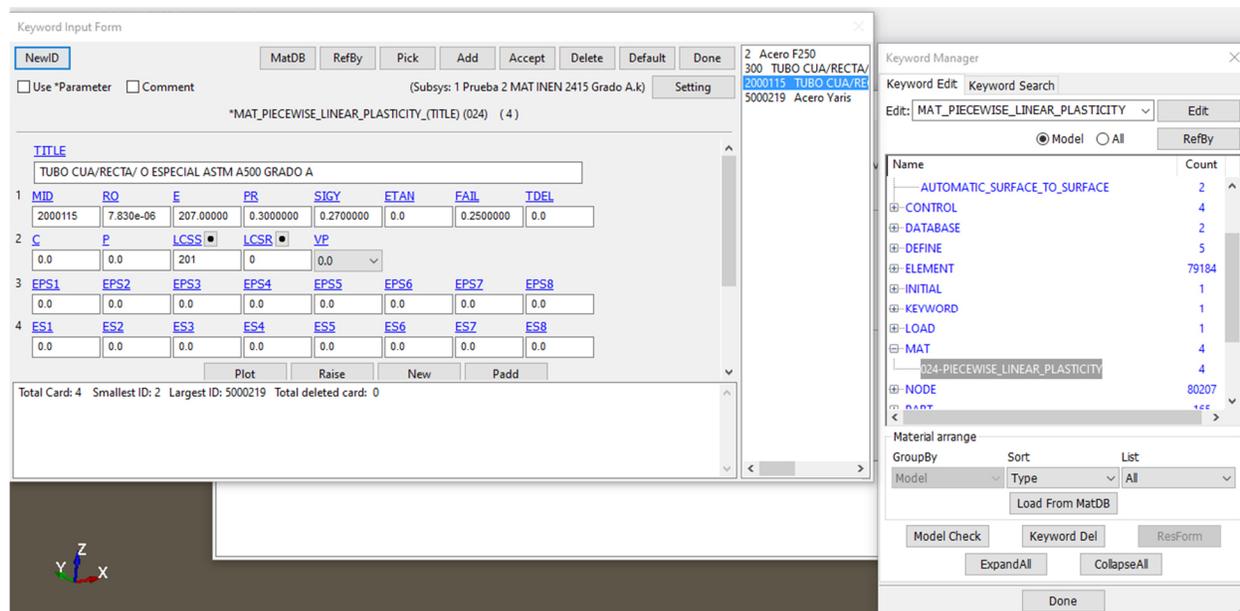
En la Figura 2.20 se puede observar los diferentes contactos realizados en el vehículo, estas uniones reemplazan cada uno de los elementos de unión de un automóvil, como las bisagras de la puerta, superficies soldadas y uniones con pernos.

La herramienta de topología compartida le indica al programa CAE que existen uniones entre los elementos seleccionados, esta unión entre elementos debe realizarse correctamente, para que no produzca desuniones o desfases de manera inoportuna en las simulaciones posteriores, evitando errores en los resultados del análisis MEF.

### 2.2.5.3 Material

Generalmente, todos los programas que trabajan por el método de elementos finitos incluyen una biblioteca de materiales precargada que son utilizados para el análisis MEF, pero además también se puede optar por incluir características propias de cada material de construcción real del vehículo, pero para esto es necesario realizar probetas de ensayo para poder determinar las características propias del material a prueba.

Para este estudio de caso, se realizarán cuatro asignaciones de materiales diferentes como son: acero ASTM A-500 grado A, acero ASTM A-500 grado C, acero NHTSA #1 y acero NHTSA #2. Los dos primeros materiales son elegidos por ser aceros estructurales comercializados en el Ecuador bajo normativa NTE INEN 2415, mientras que los dos materiales restantes son materiales usados para análisis de elementos finitos por el Departamento de Transporte de los Estados Unidos (NHTSA).



**Figura 2.21** Designación de materiales para análisis MEF

La Figura 2.21 indica la carta de control \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PASTICITY\_24 la cual permite asignar las propiedades mecánicas de cada material para análisis MEF.

Se asigna cuatro diferentes materiales al modelo del vehículo, con la finalidad de comprobar si los materiales seleccionados cumplen o no con la selección de calidad y requisitos de seguridad adecuados. Los diferentes comportamientos mecánicos ante el impacto se compararán en la sección de resultados.

#### 2.2.5.4 Condiciones de Borde

En el modelo realizado se deberá tener claro y presente los nodos que estarán fijos y los que estarán en movimiento durante el estudio del mismo, en este caso al obstáculo se le da la característica de barrera fija con la cual se va a impactar el vehículo monoplaza, al igual que se determinara la velocidad de circulación de la estructura.

\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_(ID/TITLE/MPP)\_(THERMAL)

1	auto con impactador						
		<input type="checkbox"/> MPP1			<input type="checkbox"/> MPP2		
IGNORE	BCKET	LCBCKT	NS2TRK	INITITR	PARMAX	UNUSED	CPARI
0	200		3	2	1.0005		0
UNUSED	CHKSEGS	PENSF	GRPABLE				
	0	1.0	0				
SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
1	2	2	2	0	0	0	0

**Figura 2.22** Contacto entre superficie vs superficie

En la figura 2.22 se puede observar la determinación del esclavo y del master, siendo 1 la activación del esclavo y 2 la activación del master, es decir que el esclavo viene a ser el impactador o barrera fija la cual no va tener ningún movimiento durante la simulación, mientras que el master es el vehículo y tiene movimiento durante toda la simulación.

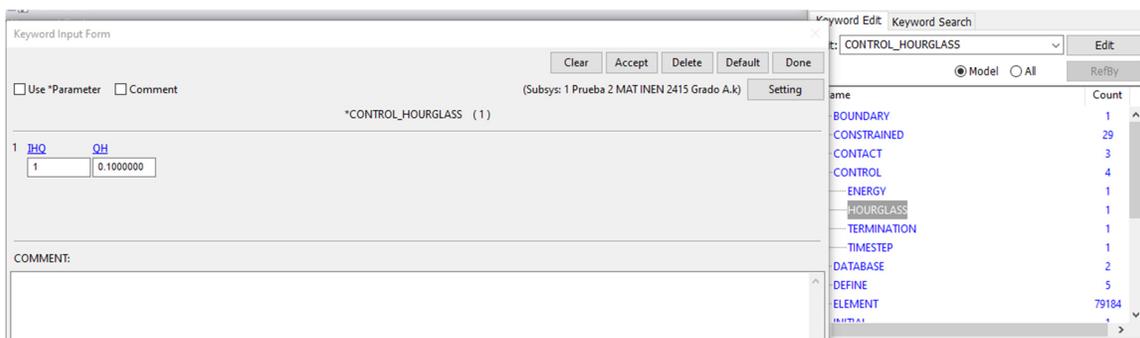
The image shows two windows from a software interface. The left window is the 'Keyword Input Form' for 'INITIAL\_VELOCITY (1)'. It has a table with two rows. The first row is for '1' and the second row is for '2'. The 'VX' field in the second row is highlighted with a red box and contains the value '-13.888900'. The right window is the 'Keyword Manager' showing a list of keywords and their counts. The 'INITIAL\_VELOCITY' keyword is listed with a count of 1.

Name	Count
ELEMENT	79184
INITIAL_VELOCITY	1
KEYWORD	1
LOAD	1
MAT	4
024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY	4
NODE	80207
PART	165
SECTION	5
SET	34
SET	1

**Figura 2.23** Velocidad de impacto

La velocidad lineal asignada a la cual se desplazará es de 13,8888 m/s que esto equivale a 50 Km/h, se desplazará en el eje “x” negativo, en cumplimiento a la norma Euro Ncap, esto registrará para todos los nodos de la estructura del cuadríciclo eléctrico. Figura 2.23.

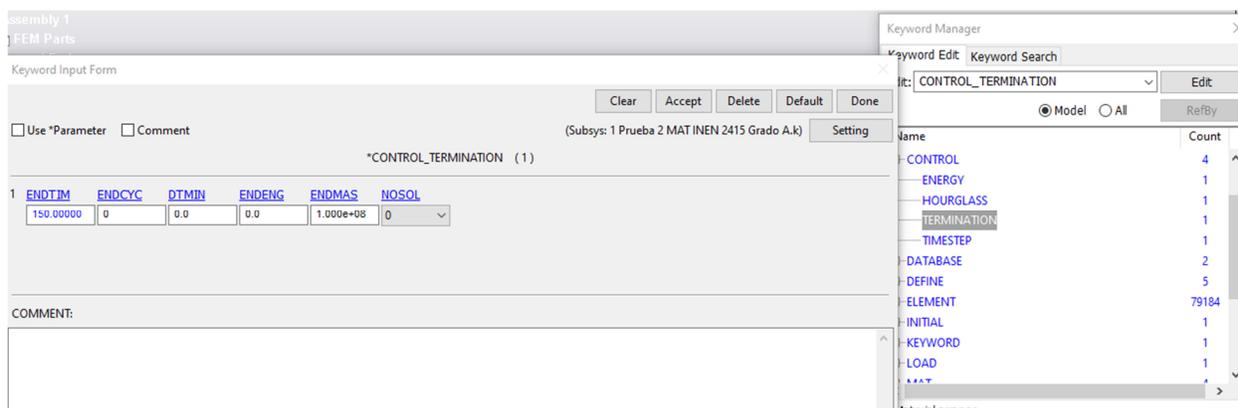
### 2.2.5.5 Control de Energía



**Figura 2.24** Control de energía de *hourglass*

Para poder calcular las energías internas cada elemento y la energía de *Hourglass*, se debe asignar un valor de control de energía del modelo, como se indica en la Figura 2.24. La energía *Hourglass* corresponde a un valor netamente teórico que permite evaluar la calidad del estudio; la energía de *hourglass* debe ser inferior al 10% de la energía interna para que el estudio sea válido. Ls Dyna proporciona una carta de control que permite programar el control de energía de *hourglass* para reducir sus efectos dañinos en el análisis MEF.

### 2.2.5.6 Tiempo de Ensayo



**Figura 2.25** Tiempo de simulación de impacto

En estudios de simulaciones de impacto posteriores que se asemejan a la simulación de este estudio, los tiempos promedio de dicha programación se encuentran en valores entre 100 ms y 150 ms, en los cuales 70 ms primeros son los más críticos para realizar el estudio ya que se dan los picos de la liberación de la energía que disipa el modelo. La programación del tiempo del ensayo será de 150 ms, en este tiempo se evaluará todo el impacto, no se deberá exceder este

tiempo porque el computador va a perder el tiempo de cálculo y no obtendrá los resultados correctos y más relevantes. Figura 2.25.

### 2.2.5.7 Cálculo de la deformación general de la carrocería

Para obtención del resultado de la deformación del habitáculo, se lo hace mediante la diferencia entre la longitud inicial del vehículo y la longitud final después del impacto mediante la siguiente ecuación [2.1]:

$$\Delta L = L_f - L_o \quad [2.1]$$

**Ecuación 2.1.** Cálculo de la deformación del vehículo

Dónde:

$\Delta L$  = Variación de longitud del vehículo (mm)

$L_f$  = Longitud final (mm)

$L_o$  = Longitud inicial (mm)

### 2.2.5.8 Validación de resultados y balance de energías

Para la validación de cada ensayo se lo hace mediante la relación entre la energía interna de deformación de impacto versus el valor de la energía de *Hourglass*; se considera una solución aceptable cuando la energía de *Hourglass* no supera el 10% de la energía interna (LS-DYNA Support, 2021b).

Para el cálculo de la relación entre la energía interna vs la energía *Hourglass* se utiliza la siguiente ecuación [2.2]:

$$H = \frac{EH}{EI} \times 100\% \quad [2.2]$$

**Ecuación 2.2.** Cálculo de Control de la Energía de Hourglass

Donde:

$H$  = Control de energía de Hourglass (%)

$EH$  = Energía de Hourglass (kN-mm)

$EI$  = Energía Interna (kN-mm)

### **2.2.5.9 Procesamiento**

Una vez que se concluya con la etapa del pre procesamiento del modelo del vehículo y de igual manera establecidos todos los parámetros, se procederá a finalizar con la ejecución del análisis. Para la realización del pre procesamiento del modelo del vehículo se utilizó un equipo de tipo Work Group Dell Precision i5-3337U con 4,00 GB de memoria RAM.

## CAPÍTULO III

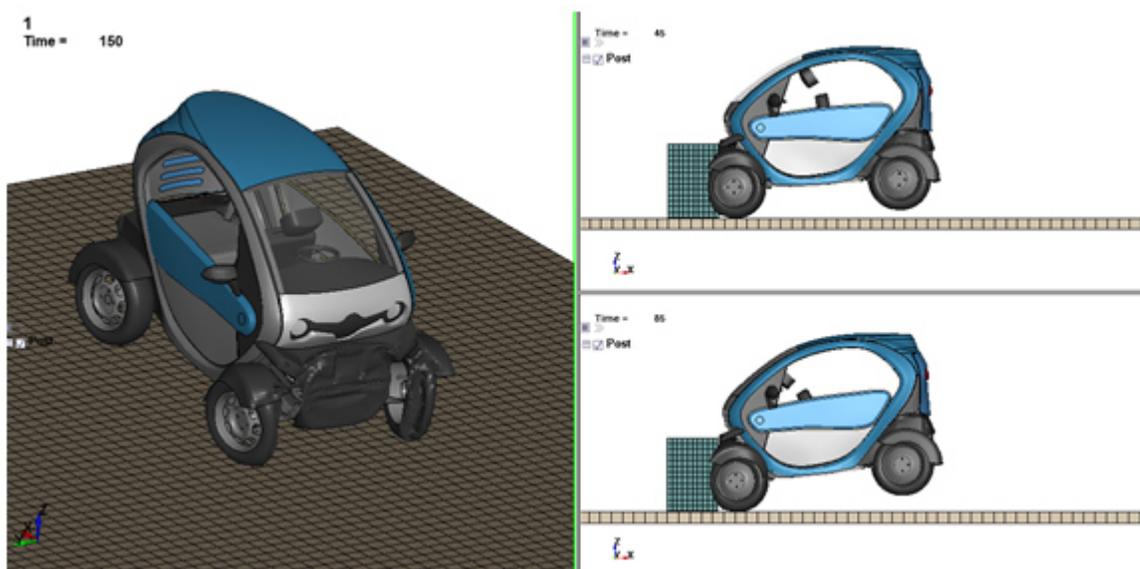
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se detallan los resultados obtenidos tras la simulación computacional, resultados que permiten analizar el comportamiento de la estructura del vehículo frente a un posible impacto frontal.

#### 3.1 RECOLECCIÓN DE DATOS

##### 3.1.1 ACERO ASTM A-500 GRADO A

En el primer ensayo de simulación de impacto frontal, se emplea como material de prueba un acero estructural ASTM A-500 de Grado A, en la Figura 3.1 se puede observar el resultado del vehículo tras el impacto. Además, se puede apreciar como el material no presenta gran deformación en la zona de seguridad del ocupante.



**Figura 3.1** Impacto frontal de monoplaza eléctrico

En la Figura 3.2 se puede observar como el esfuerzo principal de *Von Mises* en la carrocería del vehículo fluctúa hasta los 0.31 GPa en el transcurso del impacto, considerando las características mecánicas del material anteriormente expuestas, su esfuerzo máximo es de 0.31 GPa, lo que sugiere que el material durante la colisión presenta un comportamiento plástico.

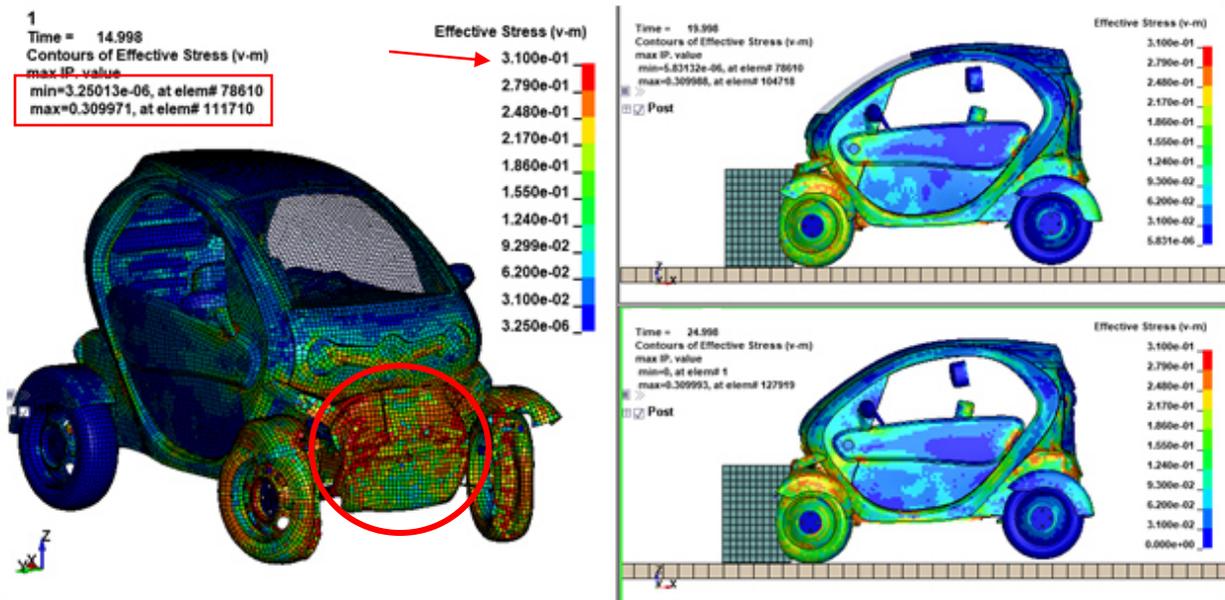


Figura 3.2 Esfuerzo de *Von Mises* del Acero ASTM A-500 Grado A

Además, la Figura 3.2 muestra el comportamiento ante la tensión de *Von Mises* de los elementos finitos más críticos de la parte frontal del vehículo, indicando que el elemento E111710 recibe el máximo esfuerzo, como también indica que el elemento E78610 que recibe el mínimo esfuerzo en los primeros 15 ms.

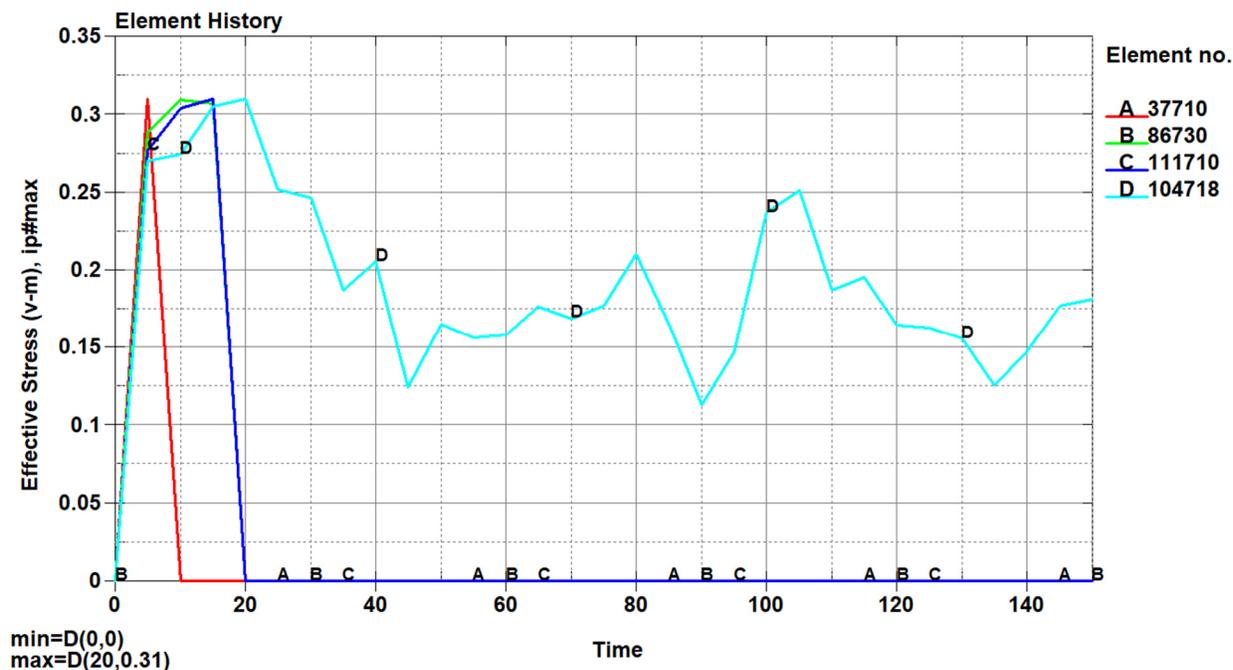
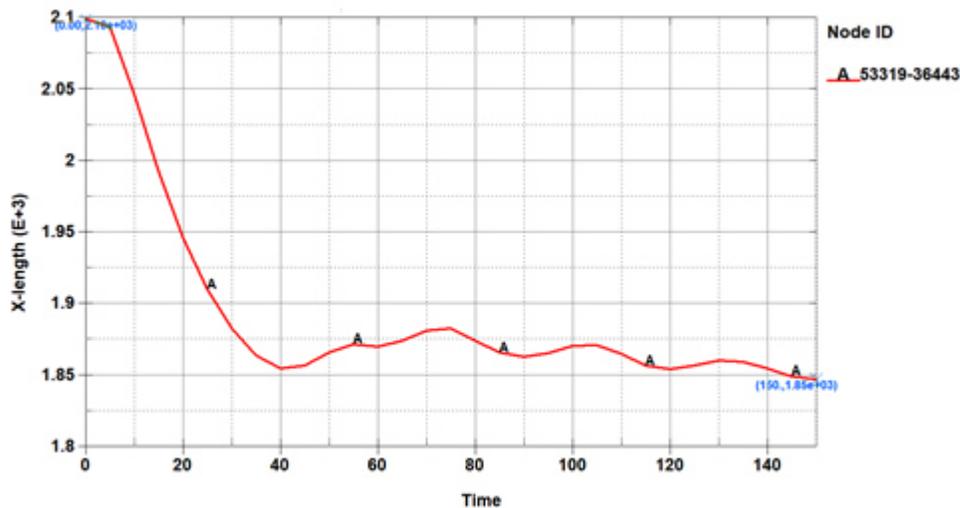


Figura 3.3 Gráfica del esfuerzo de *Von Mises* vs tiempo

En la Figura 3.3 se puede observar la gráfica del esfuerzo de *Von Mises* en función del tiempo, en los elementos más críticos de la parte frontal de la carrocería del vehículo, estos elementos son: E37710, E86730, E111710 y E104718 en la cual se puede apreciar como fluctúa el esfuerzo en dichos elementos a lo largo del ensayo computacional, obteniendo valores de 0.31 GPa en los primeros 5 ms en el elemento E37710, de igual manera el elemento E86730 y E111710 alcanzan los 0.31 GPa a los 10 ms y 15 ms respectivamente, para posteriormente decaer hasta 0 GPa de manera repentina, por otro lado el elemento E104718 alcanza los 0,31 GPa a los 20 ms y posteriormente pasa a experimentar fluctuaciones de esfuerzo hasta finalizar el ensayo computacional.

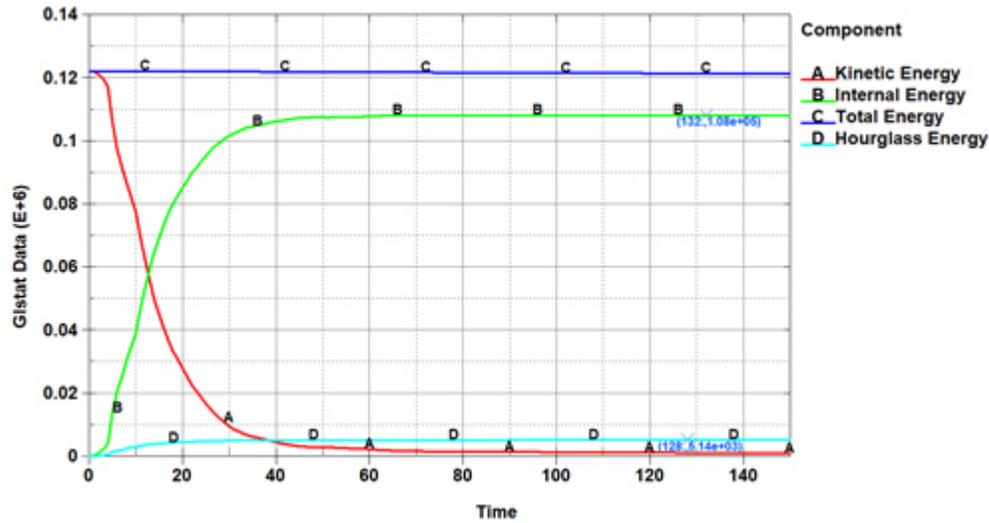


**Figura 3.4** Gráfica de Deformación vs Tiempo del habitáculo

En el transcurso del ensayo de impacto frontal, la carrocería sufre una deformación irregular, en la Figura 3.4 se puede observar la gráfica de Deformación vs Tiempo en la cual se puede apreciar como el habitáculo se va deformando durante el ensayo, llegando hasta una deformación de 218.3 mm en los 150 ms, este valor se obtiene haciendo uso de la ecuación [2.1].

$$\Delta L = 2101.45 - 1883.15$$

$$\Delta L = 218.3 \text{ mm}$$



**Figura 3.5** Energy Balance

En Figura 3.5 se puede observar el balance de energías del primer ensayo de simulación de impacto, obteniendo valores de  $1.08e+5$  kN-mm de energía interna y  $5.14e+3$  kN-mm de energía de *Hourglass* a un tiempo de 130 ms respectivamente.

Una vez obtenido los valores de energía del primer ensayo se procede a calcular el porcentaje de la energía de *Hourglass* frente a la energía interna utilizando la Ecuación [2.2].

$$H = \frac{5.14e + 3 \text{ kNmm}}{1.08e + 5 \text{ kNmm}} \times 100\%$$

$$H = 4.75\%$$

$$H < 10\%$$

La energía de *Hourglass* es menor al 10% de la energía interna por lo que las condiciones establecidas para este ensayo de simulación son válidas.

### 3.1.2 ACERO ASTM A-500 GRADO C

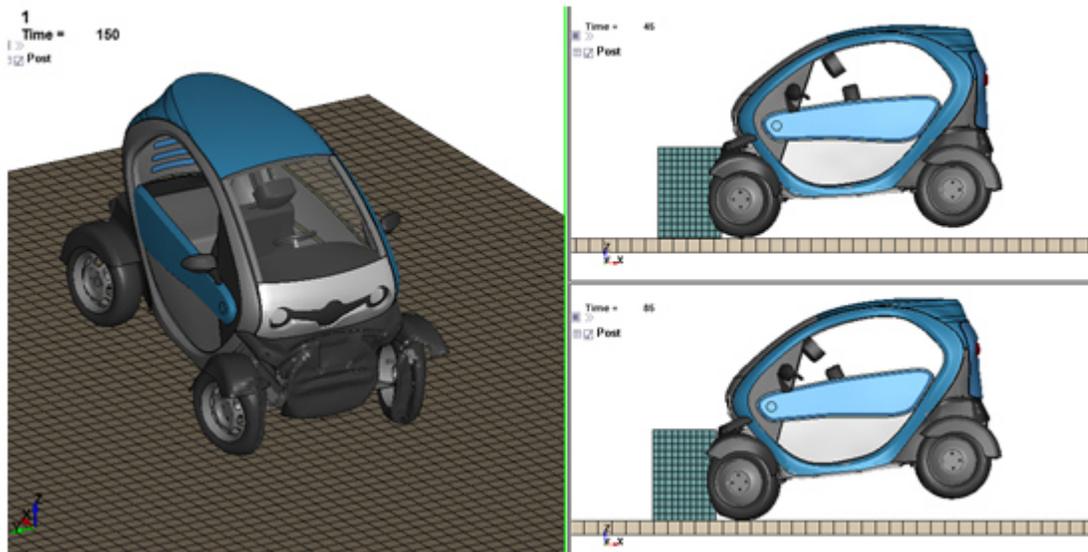


Figura 3.6 Impacto frontal de monoplaza eléctrico

Para el segundo ensayo se emplea como material de prueba un acero estructural ASTM A-500 de Grado C, en la Figura 3.6 se puede observar el resultado del vehículo tras el ensayo de impacto frontal, como también se puede apreciar como el habitáculo no presenta gran deformación en la zona de seguridad del ocupante.

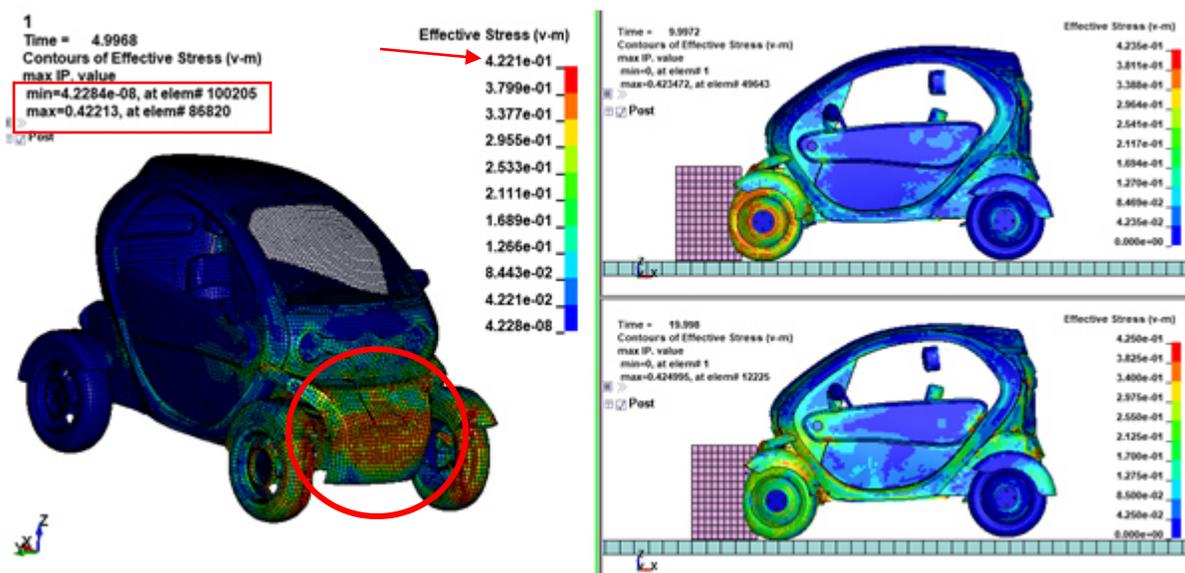
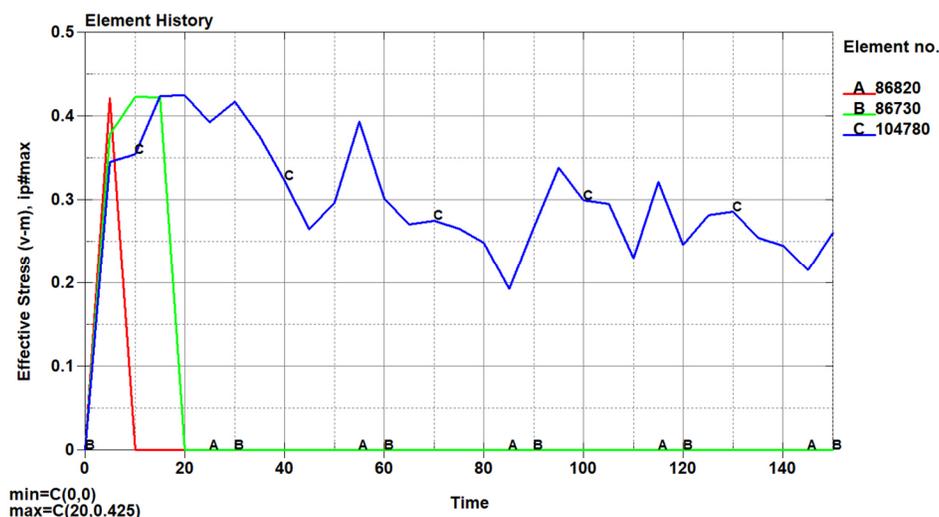


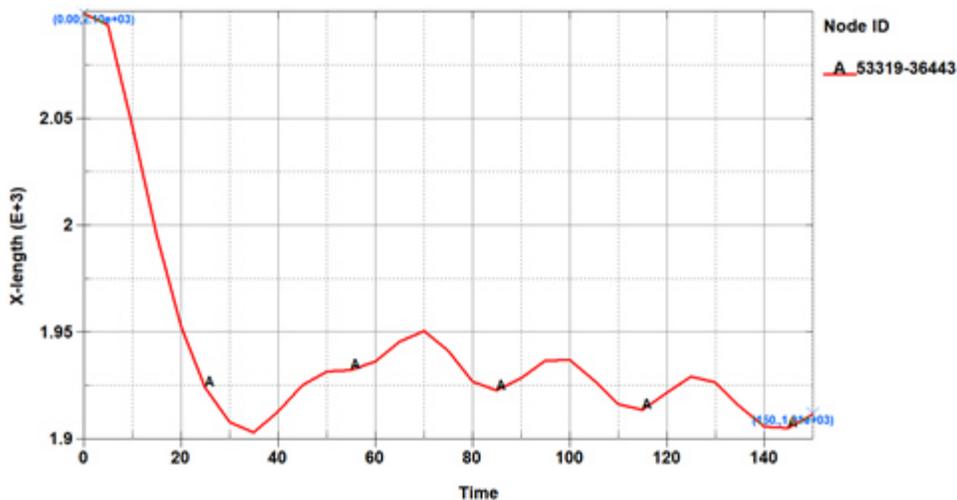
Figura 3.7 Esfuerzo de *Von Mises* del Acero ASTM A-500 Grado C

En la figura 3.7 se puede observar como el esfuerzo principal de *Von Mises* en la carrocería del vehículo fluctúa hasta los 0.425 GPa en el transcurso del impacto, considerando las características mecánicas del material anteriormente expuestas, su esfuerzo máximo es de 0.425GPa, lo que sugiere que el material durante la colisión presenta un comportamiento plástico. Además, la Figura 3.7 muestra el comportamiento ante la tensión de *Von Mises* de los elementos finitos más críticos de la parte frontal del vehículo, indicando que elemento E86820 recibe el máximo esfuerzo en el instante exacto que se produce el impacto.



**Figura 3.8** Gráfica del esfuerzo de *Von Mises* vs tiempo

En la Figura 3.8 se puede observar la gráfica del esfuerzo de *Von Mises* en función del tiempo, en los elementos más críticos de la parte frontal de la carrocería del vehículo, estos elementos son: E86820, E86730 y E104780 en la cual se puede apreciar como fluctúa el esfuerzo en dichos elementos a lo largo del ensayo computacional, obteniendo valores de 0.4241 GPa en los primeros 5 ms en el elemento E86820, de igual manera el elemento E86730 alcanza los 0.4234 GPa a los 10 ms y se mantiene hasta los 15 ms, para posteriormente decaer hasta 0 GPa de manera repentina, por otro lado el elemento E104780 alcanza los 0,4244 GPa a los 15 ms y posteriormente pasa a experimentar fluctuaciones de esfuerzo hasta finalizar el ensayo computacional.

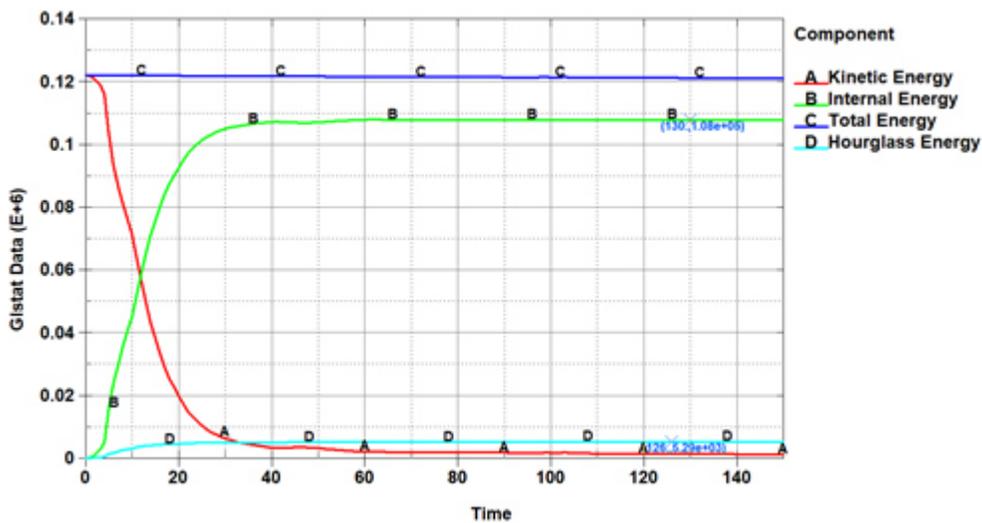


**Figura 3.9** Gráfica de Deformación vs Tiempo del habitáculo

En el transcurso del ensayo de impacto frontal, la carrocería sufre una deformación irregular, en la Figura 3.9 se puede observar la gráfica de Deformación vs Tiempo en la cual se puede apreciar como el habitáculo se va deformando durante el ensayo, llegando hasta una deformación de 158.87 mm en los 150 ms, este valor se obtiene haciendo uso de la ecuación [2.1].

$$\Delta L = 2101.45 - 1942.58$$

$$\Delta L = 158.87 \text{ mm}$$



**Figura 3.10** Energy Balance

En Figura 3.10 se puede observar el balance de energías del segundo ensayo de simulación de impacto, obteniendo valores de  $1.08e+5$  kN-mm de energía interna y  $5.29e+3$  kN-mm de energía de *Hourglass* a un tiempo de 130 ms respectivamente.

De la misma forma que en el primer ensayo se procede a calcular el porcentaje de la energía de *Hourglass* frente a la energía interna utilizando la Ecuación [2.2].

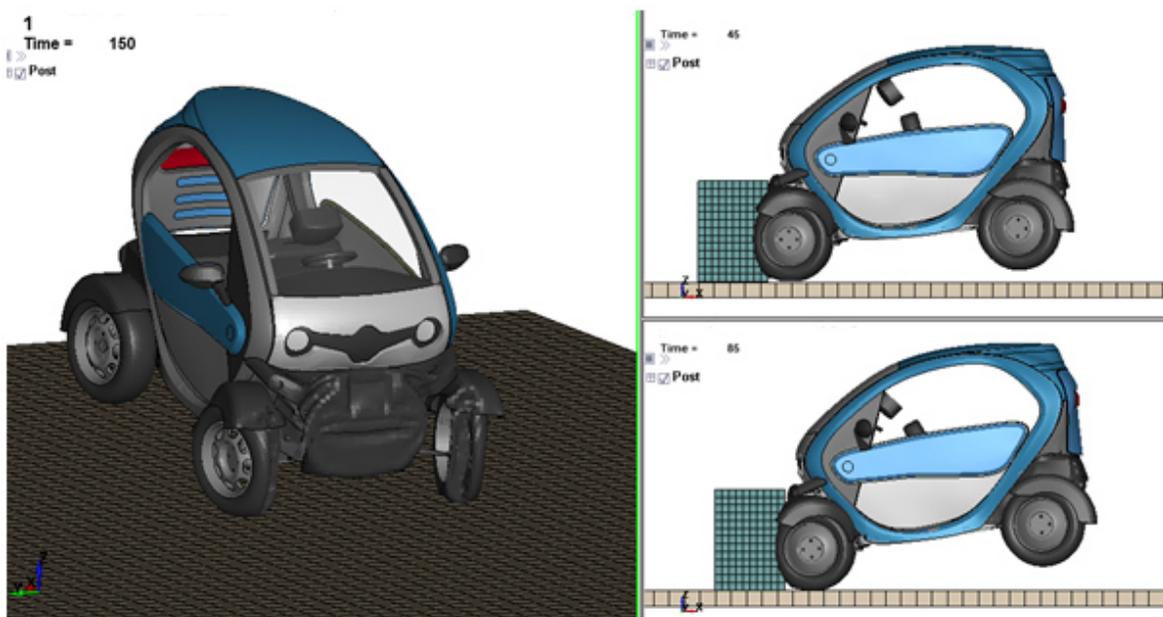
$$H = \frac{5.29e + 3 \text{ kNmm}}{1.08e + 5 \text{ kNmm}} \times 100\%$$

$$H = 4.89\%$$

$$H < 10\%$$

La energía de *Hourglass* es menor al 10% de la energía interna por lo que las condiciones establecidas para este ensayo de simulación son válidas.

### 3.1.3 ACERO NHTSA #1



**Figura 3.11** Impacto frontal de monoplaza eléctrico

Para el tercer ensayo de simulación de impacto frontal, se emplea como material de prueba un acero NHTSA #1, en la Figura 3.11 se puede observar el resultado del vehículo tras el impacto. Además, se puede apreciar como el material no presenta gran deformación en la zona de seguridad del ocupante.

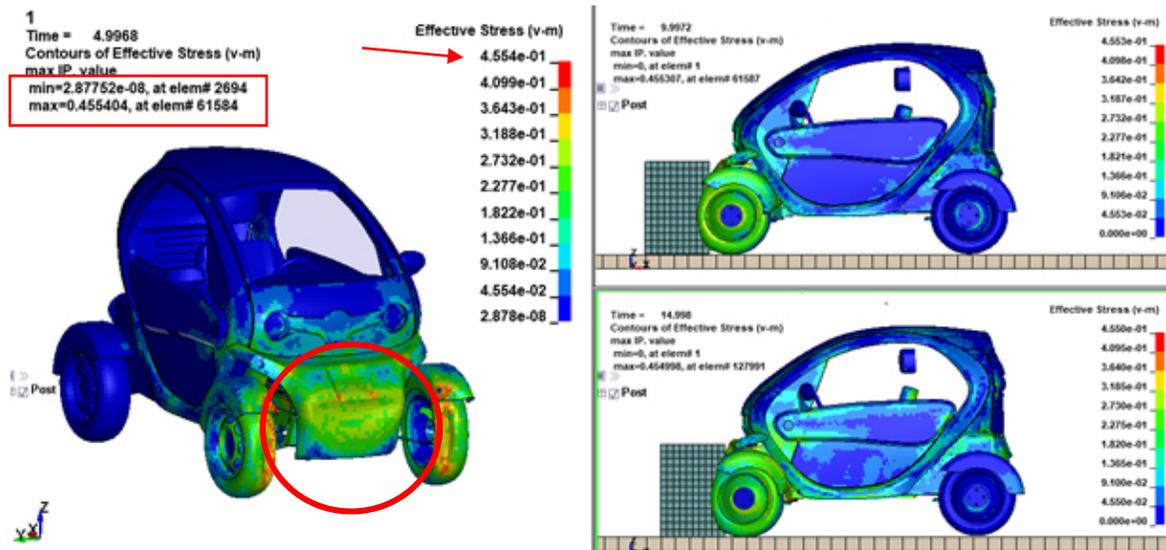


Figura 3.12 Esfuerzo de *Von Mises* del Acero NHTSA #1

La Figura 3.12 indica el esfuerzo principal de *Von Mises* en la carrocería del vehículo, en donde se puede observar como fluctúa el esfuerzo hasta los 0.4557 GPa en el transcurso del impacto, considerando las características mecánicas del material anteriormente expuestas, su esfuerzo máximo es de 0.46 GPa, lo que sugiere que el material durante la colisión presenta un comportamiento plástico. Además, la Figura 3.12 muestra el comportamiento ante la tensión de *Von Mises* de los elementos finitos más críticos de la parte frontal del vehículo, indicando que el elemento E61584 recibe el máximo esfuerzo al instante exacto de producirse el impacto.

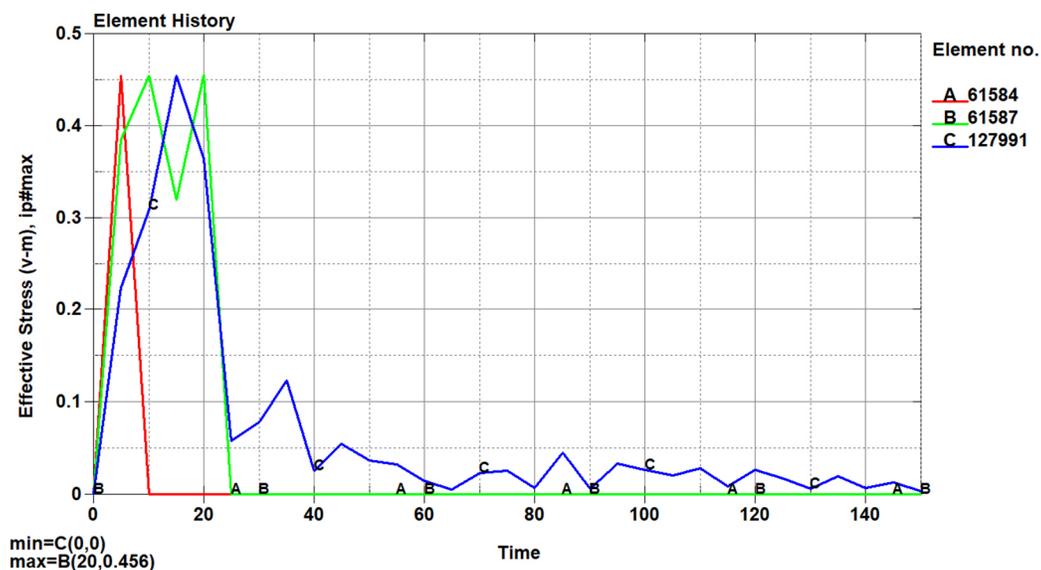
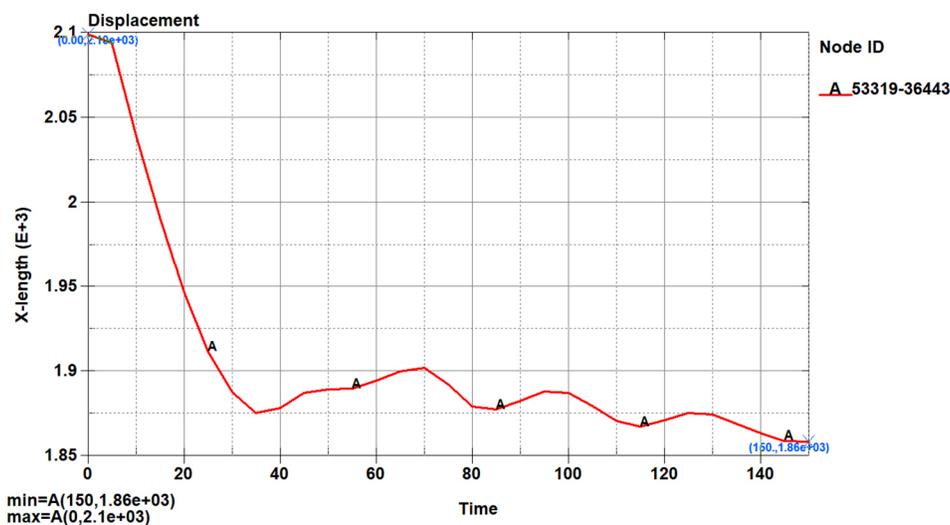


Figura 3.13 Gráfica del esfuerzo de *Von Mises* vs tiempo

En la Figura 3.13 se puede observar la gráfica del esfuerzo de *Von Mises* en función del tiempo, en los elementos más críticos de la parte frontal de la carrocería del vehículo, estos elementos son: E61584, E61587 y E127991 en la cual se puede apreciar como fluctúa el esfuerzo en dichos elementos a lo largo del ensayo computacional, obteniendo valores de 0.4557GPa en los primeros 5 ms en el elemento E61584, mientras que el elemento E61587 alcanza los 0.4553 GPa a los 10 ms y sube su esfuerzo hasta los 0.4557 GPa para posteriormente decaer repentinamente, por otro lado el elemento E127991 alcanza los 0,455 GPa a los 15 ms y posteriormente pasa a experimentar fluctuaciones de esfuerzo hasta finalizar el ensayo computacional.

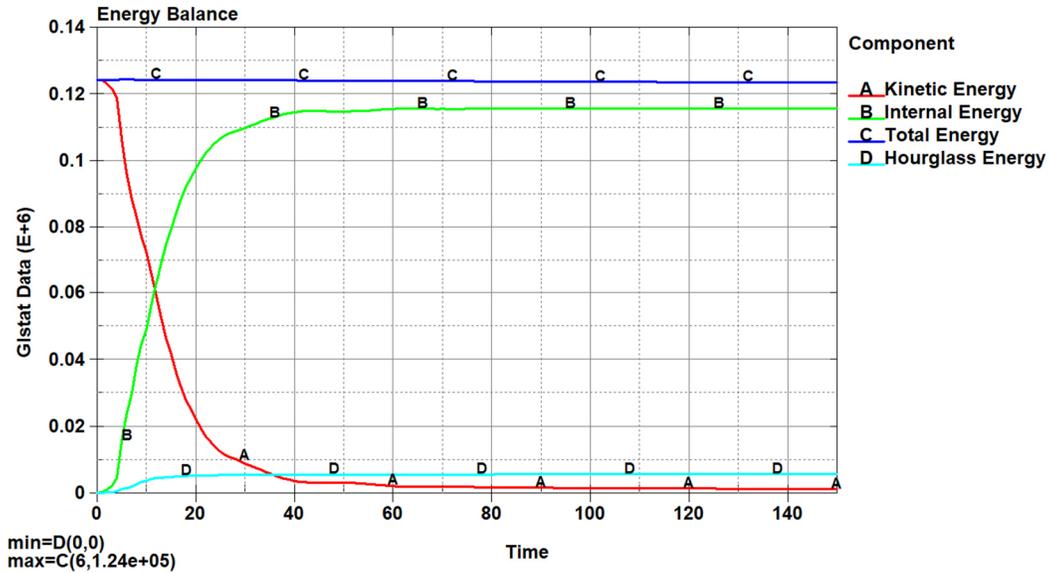


**Figura 3.14** Gráfica de Deformación vs Tiempo del habitáculo

En el transcurso del ensayo de impacto frontal, la carrocería sufre una deformación irregular, en la Figura 3.14 se puede observar la gráfica de Deformación vs Tiempo en la cual se puede apreciar como el habitáculo se va deformando durante el ensayo, llegando hasta una deformación de 198.15 mm al finalizar los 150 ms de ensayo computacional, este valor se obtiene haciendo uso de la ecuación [2.1].

$$\Delta L = 2101.45 - 1903.3$$

$$\Delta L = 198.15 \text{ mm}$$



**Figura 3.15** Energy Balance

La Figura 3.15 indica el balance de energías del tercer ensayo de simulación de impacto, obteniendo valores de  $1.16e+5$  kN-mm de energía interna y  $1.06e+4$  kN-mm de energía de *Hourglass* a un tiempo de 130 ms respectivamente.

De igual manera que en el primer ensayo se procede a calcular el porcentaje de la energía de *Hourglass* frente a la energía interna utilizando la Ecuación [2.2].

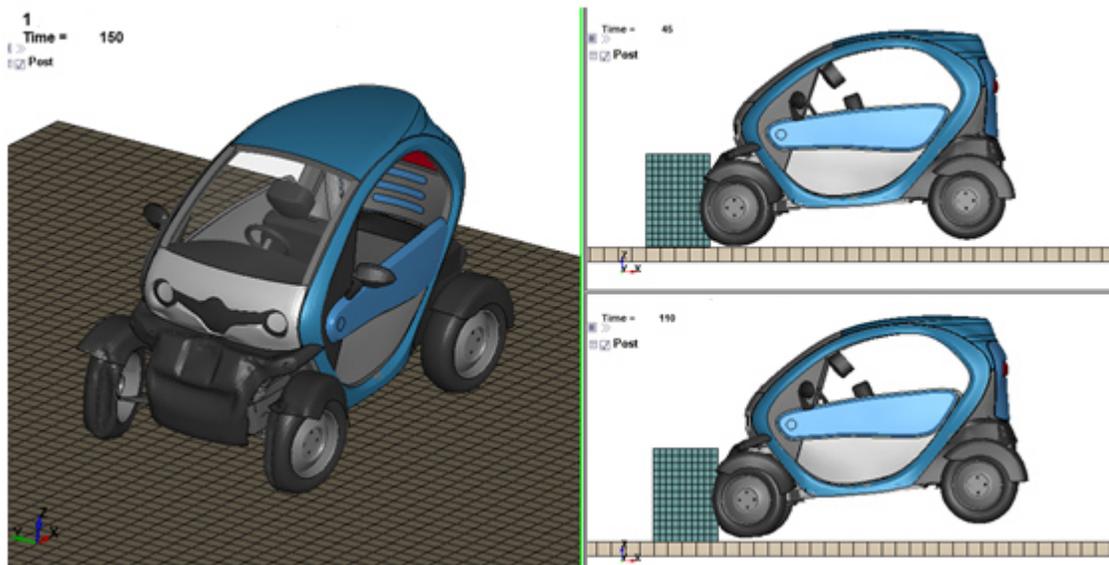
$$H = \frac{5.64e + 3 \text{ kNmm}}{1.16e + 5 \text{ kNmm}} \times 100\%$$

$$H = 4.86\%$$

$$H < 10\%$$

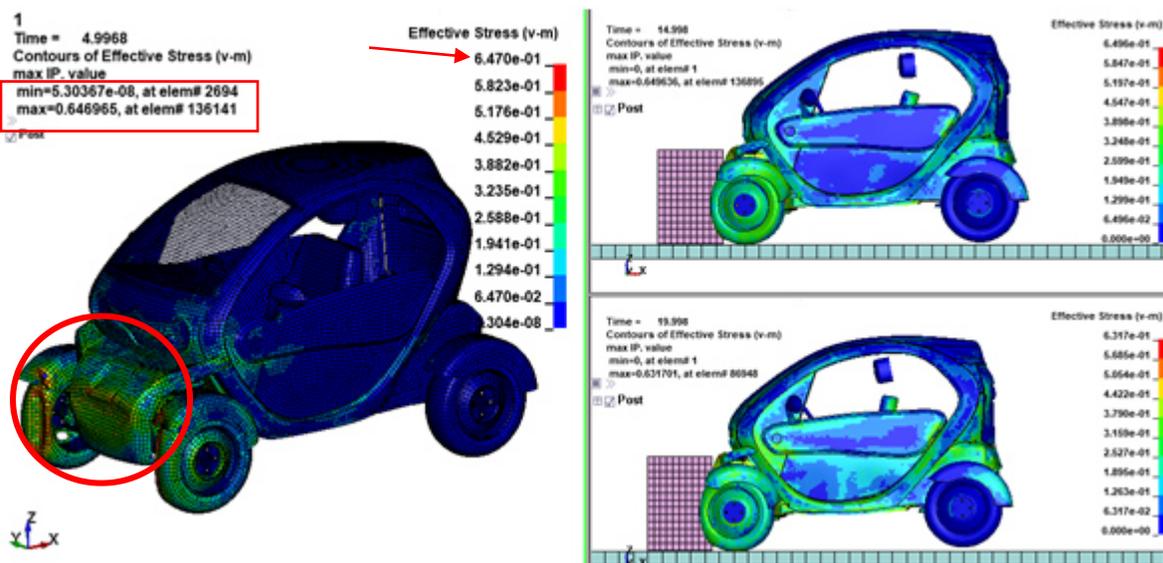
La energía de *Hourglass* es menor al 10% de la energía interna por lo que las condiciones establecidas para este ensayo de simulación son válidas.

### 3.1.4 ACERO NHTSA #2



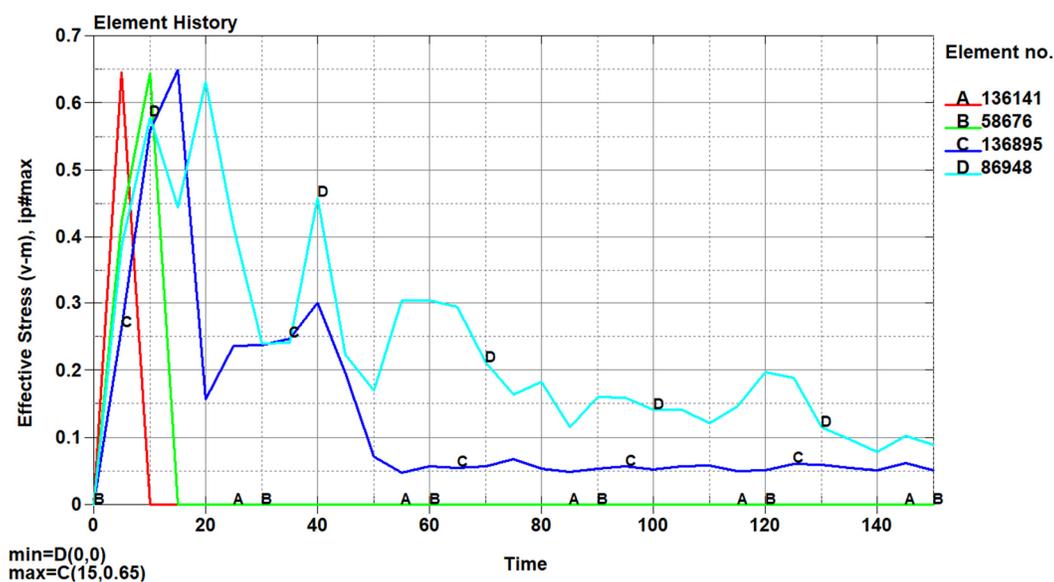
**Figura 3.16** Impacto frontal de monoplaza eléctrico

Para el cuarto ensayo se emplea como material de prueba un acero NHTSA #2, en la Figura 3.16 se puede observar el resultado del vehículo tras el ensayo de impacto frontal, también se puede apreciar como el habitáculo no presenta gran deformación en la zona de seguridad del ocupante.



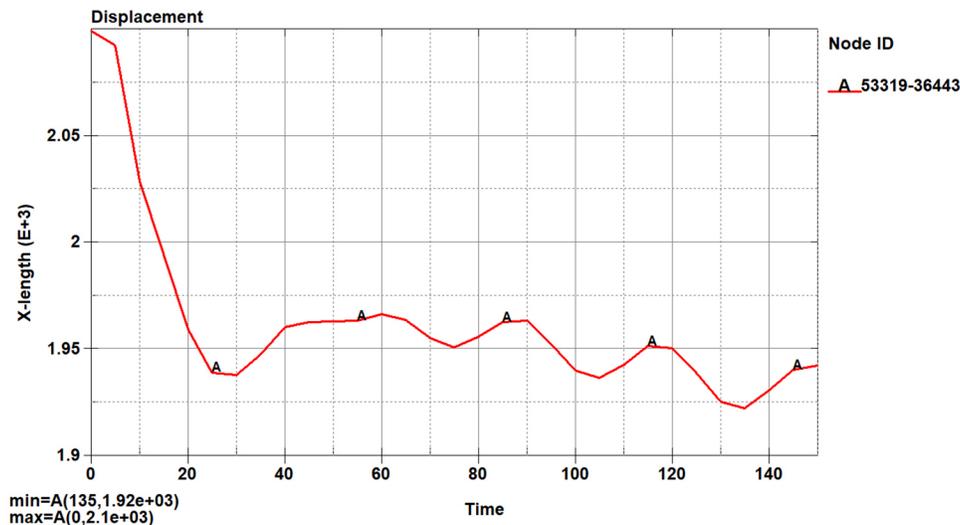
**Figura 3.17** Esfuerzo de *Von Mises* del Acero NHTSA #2

La Figura 3.17 indica el esfuerzo principal de *Von Mises* en la carrocería del vehículo, en donde se puede observar como fluctúa el esfuerzo hasta los 0.645 GPa en el transcurso del impacto, considerando las características mecánicas del material anteriormente expuestas, su esfuerzo máximo es de 0.65 GPa, lo que sugiere que el material durante la colisión presenta un comportamiento plástico. Además, la Figura 3.12 muestra el comportamiento ante la tensión de *Von Mises* de los elementos finitos más críticos de la parte frontal del vehículo, indicando que el elemento E136141 recibe el máximo esfuerzo al instante exacto de producirse el impacto.



**Figura 3.18** Gráfica del esfuerzo de *Von Mises* vs tiempo

En la Figura 3.18 se puede observar la gráfica del esfuerzo de *Von Mises* en función del tiempo, en los elementos más críticos de la parte frontal de la carrocería del vehículo, estos elementos son: E136141, E58676, E136895 y E86948 en la cual se puede apreciar como fluctúa el esfuerzo en dichos elementos a lo largo del ensayo computacional, obteniendo valores de 0.647 GPa en los primeros 5 ms en el elemento E136141, de igual manera el elemento E58676 alcanza los 0.6457 GPa a los 10 ms, para posteriormente decaer hasta 0 GPa de manera repentina, por otro lado los elemento E136895 y E86948 después de alcanzar los 0,64 GPa experimentan fluctuaciones de esfuerzo hasta finalizar el ensayo computacional.

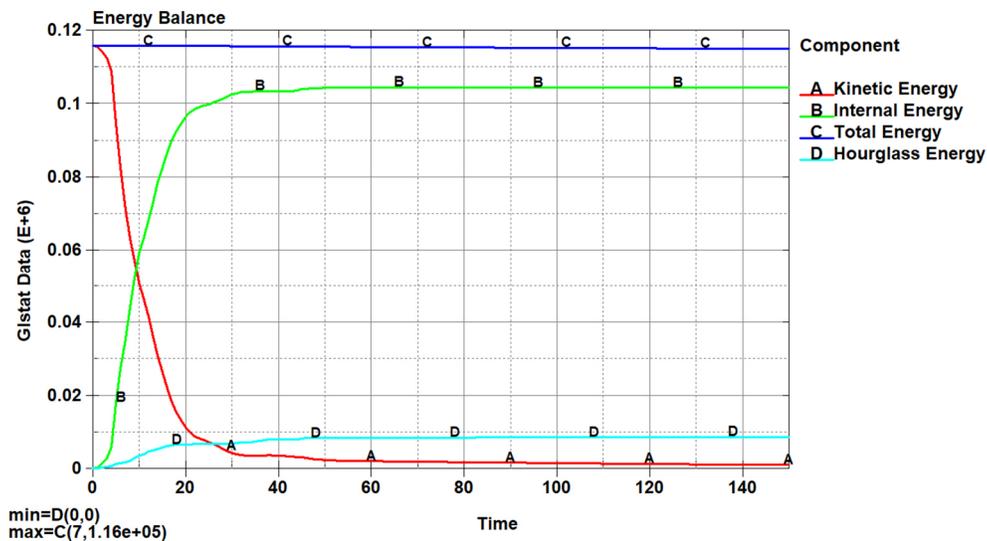


**Figura 3.19** Gráfica de Deformación vs Tiempo del habitáculo

En el transcurso del ensayo de impacto frontal, la carrocería sufre una deformación irregular, en la Figura 3.19 se puede observar la gráfica de Deformación vs Tiempo en la cual se puede apreciar como el habitáculo se va deformando durante el ensayo, llegando hasta una deformación de 113.73 mm en los 150 ms, este valor se obtiene haciendo uso de la ecuación [2.1].

$$\Delta L = 2101.45 - 1987.72$$

$$\Delta L = 113.73 \text{ mm}$$



**Figura 3.20** Energy Balance

En Figura 3.20 se puede observar el balance de energías del segundo ensayo de simulación de impacto, obteniendo valores de  $1.05e+5$  kN-mm de energía interna y  $8.56e+3$  kN-mm de energía de *Hourglass* a un tiempo de 130 ms respectivamente.

De la misma forma se procede a calcular el porcentaje de la energía de *Hourglass* frente a la energía interna utilizando la Ecuación [2.2].

$$H = \frac{8.56e + 3 \text{ kNmm}}{1.05e + 5 \text{ kNmm}} \times 100\%$$

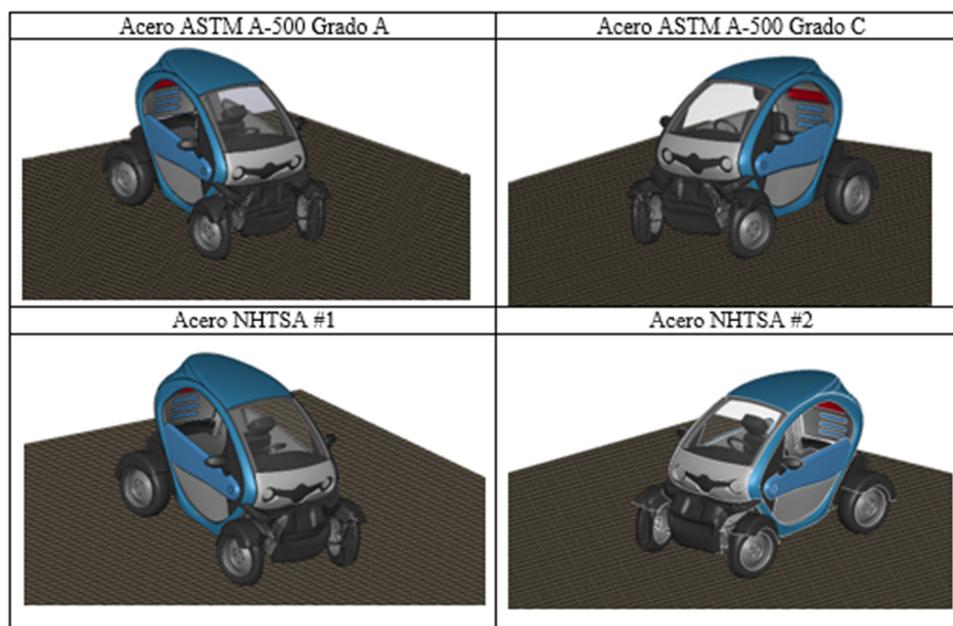
$$H = 8.15\%$$

$$H < 10\%$$

La energía de *Hourglass* es menor al 10% de la energía interna por lo que las condiciones establecidas para este ensayo de simulación son válidas.

### 3.2 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Una vez obtenido los resultados de cada uno de los ensayos de simulación de impacto frontal, se procede a interpretar los valores obtenidos de los elementos finitos que presentan mayor esfuerzo y deformación durante el ensayo, realizando una comparación con cada uno de ellos, para poder determinar el material con mejores prestaciones mecánicas ante un impacto frontal.



**Figura 3.21** Impacto frontal – 4 simulaciones

En la Figura 3.21 se puede observar cada uno de los resultados obtenidos con los diferentes materiales puestos a prueba en este estudio.

### 3.2.1 ESFUERZO DE VON MISES

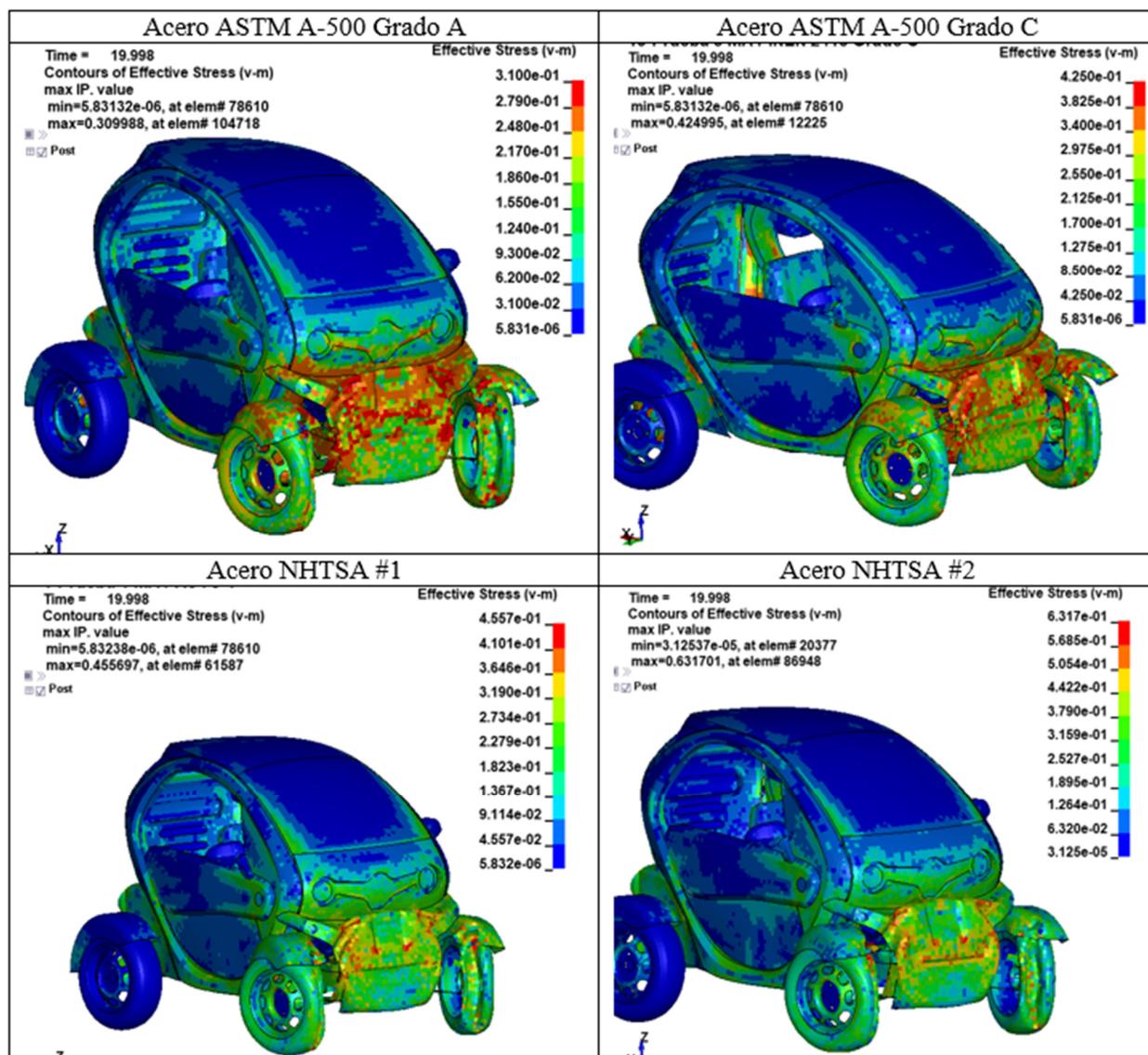


Figura 3.22 Esfuerzo de *Von Mises* 6 simulaciones

Tras cada ensayo de simulación de impacto de los diferentes materiales puestos a prueba, se obtiene valores críticos del esfuerzo de *Von Mises* en distintos elementos del habitáculo de seguridad en los primeros 20 ms. En la Figura 3.22 se puede observar los resultados obtenidos en las cuatro simulaciones con los distintos materiales, además, se puede visualizar como el parante delantero es la zona que resulta más afectada después de sufrir un impacto frontal.

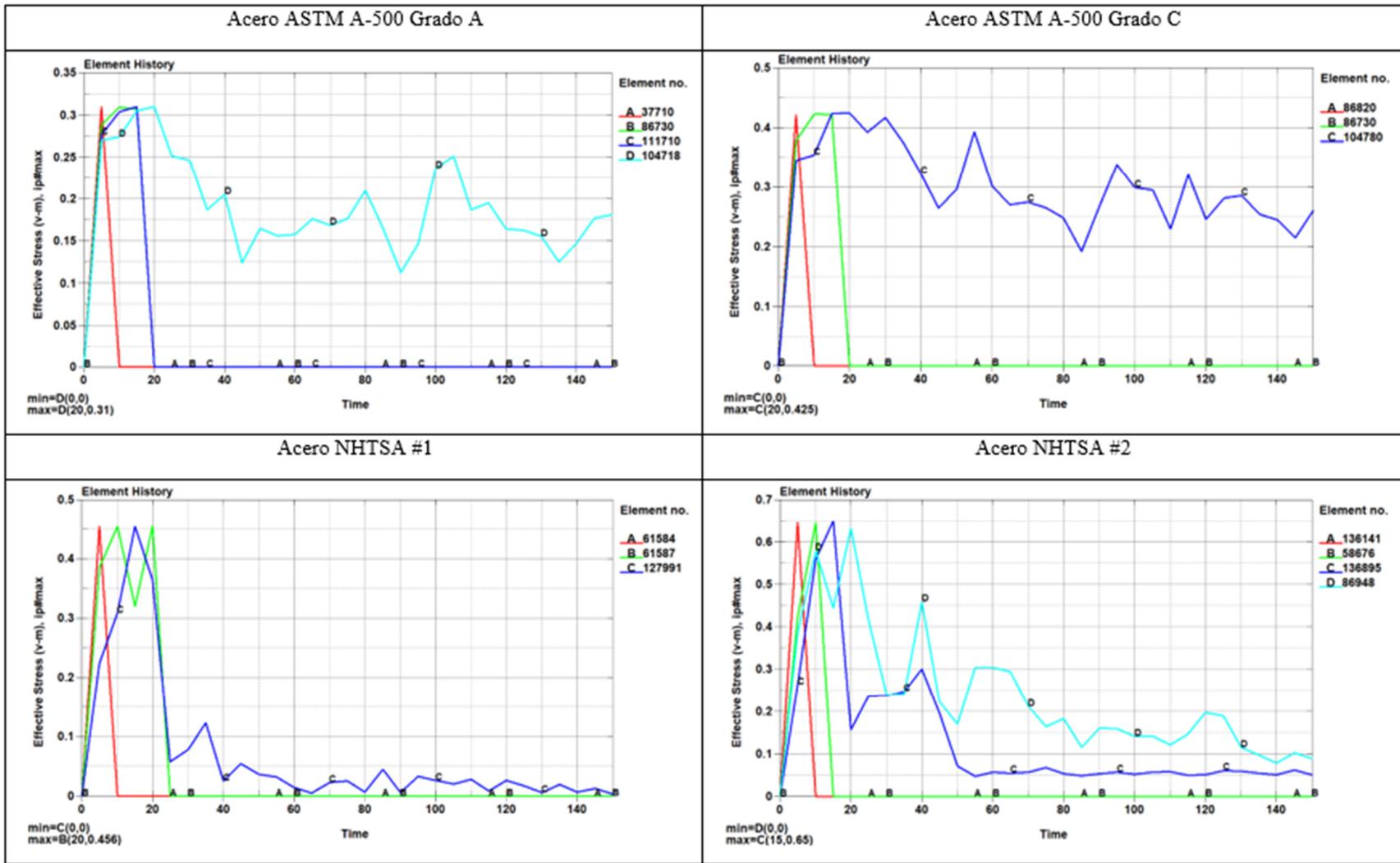


Figura 3.23 Esfuerzo de Von Mises Vs Tiempo - 4 simulaciones

Considerando que los primeros 20 ms son los más cruciales durante un ensayo de impacto frontal, se extrae los elementos finitos más críticos con respecto al esfuerzo de *Von Mises* durante los 5, 10, 15 y 20 ms respectivamente, estos elementos son correspondientes a la parte frontal de la estructura del vehículo, en la sección de anexos se puede observar las gráficas de la simulación computacional con respecto al esfuerzo de *Von Mises*, en donde se aprecia los elementos que reciben el mayor índice de esfuerzos en los distintos materiales puestos a prueba, durante los primeros 20 ms, Anexo II, III, IV y V. En la Figura 3.23 se puede observar el comportamiento de dichos elementos en función del tiempo, donde X representa el esfuerzo de *Von Mises* en GPa y el eje Y representa el tiempo de simulación en ms, obteniendo los siguientes resultados:

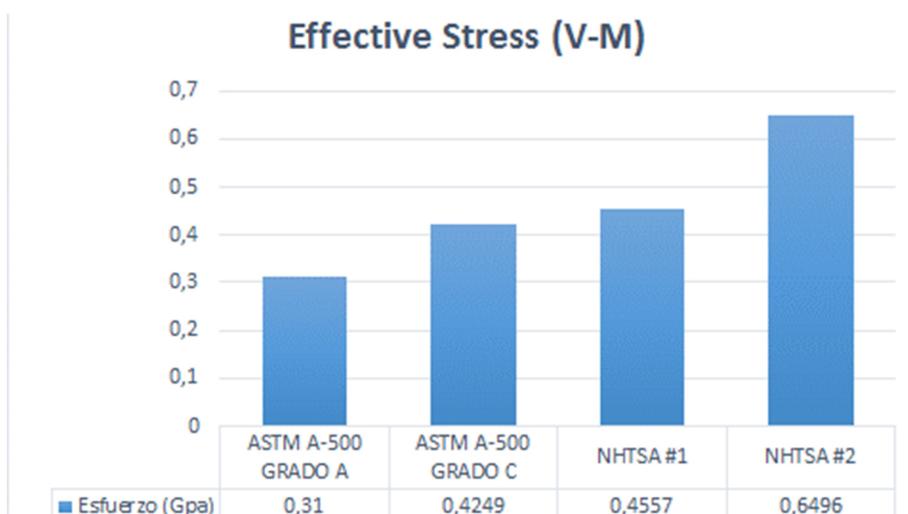
Con respecto al análisis del Acero ASTM A-500 Grado A, al comenzar el impacto del habitáculo en los primeros 4 ms el comportamiento de los cuatro elementos son parecidos, llegando a alcanzar valores aproximados a 0.28 GPa, posterior a esto el elemento E37710 tiene un incremento de su esfuerzo hasta 0.31 GPa durante los 5 ms, luego sufre caída brusca de su esfuerzo llegando hasta 0 GPa en 10 ms, considerando que la resistencia última a la tracción del material es de 0.31 GPa, esto indica que el elemento ha superado la zona plástica del material, provocando la rotura permanente del elemento y es por eso que en la gráfica se puede apreciar como decae repentinamente el esfuerzo del elemento al alcanzar los 0.31 GPa. Por otro lado, el elemento 37710 tiene un incremento de su esfuerzo durante los 10 ms alcanzando un valor de 0.3095 GPa, luego sube hasta 0.31 GPa en los 15ms alcanzando el punto de resistencia límite del material, es por eso que a partir de ese instante decae totalmente, debido a que el elemento sufre la rotura permanente. De igual manera el elemento E111710 experimenta un aumento de su esfuerzo durante los 15 ms llegando a un valor máximo de 0.31 GPa, posterior a esto el elemento colapsa y decae totalmente su esfuerzo. En cuanto al elemento E104718, después de los 4 ms tiene un incremento de su esfuerzo alcanzando los 0.31 GPa a lo largo de los 20 ms, seguidamente sufre una caída hasta los 0.25 GPa, a partir de ese instante se presenta fluctuaciones de esfuerzo entre los 0.25 GPa hasta los 0.12 GPa aproximadamente, lo que indica que el elemento no ha superado la zona plástica del material.

En cuanto al análisis del Acero ASTM A-500 Grado C, al comenzar el impacto del habitáculo en los primeros 4 ms el comportamiento de los elementos E86820, E86730 y E104780 son similares, llegando a alcanzar valores aproximados a 0.35 GPa, posterior a esto el elemento

E86820 tiene un incremento de su esfuerzo hasta 0.4221 GPa durante los 5 ms, luego sufre caída brusca de su esfuerzo llegando hasta 0 GPa en 10 ms, considerando que la resistencia última a la tracción del material es de 0.425 GPa, esto indica que el elemento ha superado la zona plástica del material, provocando la rotura permanente del elemento y es por eso que en la gráfica se puede apreciar como decae repentinamente el esfuerzo del elemento al alcanzar los 0.425 GPa. De igual manera, el elemento E86730 tiene un incremento de su esfuerzo durante los 10 ms alcanzando un valor de 0.4234 GPa, luego sube hasta 0.4244 GPa en los 15ms alcanzando el punto de resistencia límite del material, es por eso que a partir de ese instante decae totalmente su esfuerzo colapsando el elemento. Por otro lado, el elemento E104780 tiene un incremento de su esfuerzo hasta los 20 ms alcanzando un valor de 0.4244 GPa, después de este punto el elemento presenta oscilaciones de esfuerzo bruscas en un rango entre 0.41 GPa y 0.26 GPa hasta los 150 ms de duración del ensayo de impacto, lo que indica que el elemento no ha superado la zona plástica del material.

Continuando con el análisis de la tercera simulación, con respecto al Acero NHTSA #1, al comenzar el impacto del habitáculo en los primeros 4 ms el comportamiento de los elementos E61584 y E61587 son similares, llegando a alcanzar valores aproximados a 0.35 GPa, posterior a esto el elemento E61584 tiene un incremento de su esfuerzo hasta 0.4554 GPa durante los 5 ms, luego sufre caída brusca de su esfuerzo llegando hasta 0 GPa en 10 ms, considerando que la resistencia última a la tracción del material es de 0.46 GPa, esto indica que el elemento ha superado la zona plástica del material, provocando la rotura permanente del elemento y es por eso que en la gráfica se puede apreciar como decae repentinamente el esfuerzo del elemento al alcanzar valores próximos a 0.46 GPa. De igual manera, el elemento E61587 tiene un incremento de su esfuerzo durante los 10 ms alcanzando un valor de 0.4553 GPa, luego sufre una breve caída hasta 0.32 GPa en los 15ms, posterior a esto sube nuevamente su esfuerzo llegando a 0.4557 GPa a los 10 ms alcanzando el punto de resistencia límite del material, es por eso que a partir de ese instante decae totalmente su esfuerzo colapsando el elemento. Por otro lado, el elemento E127991 tiene un incremento de su esfuerzo hasta los 15 ms alcanzando un valor de 0.4244 GPa, después de este punto el esfuerzo del elemento cae hasta los 0.06 GPa, para posteriormente pasar a experimentar oscilaciones de esfuerzo, en un rango aproximado entre los 0.05 GPa y 0.01 GPa durante los 150 ms de ensayo computacional, lo que indica que el elemento no ha superado la zona plástica del material.

Para finalizar con el análisis de la cuarta simulación, con respecto al Acero NHTSA #2, al comenzar el impacto del habitáculo en los primeros 5 ms el elemento E136141 alcanza los 0.6470 GPa y posteriormente sufre caída brusca de su esfuerzo llegando hasta 0 GPa en 10 ms, considerando que la resistencia última a la tracción del material es de 0.65 GPa, esto indica que el elemento ha superado la zona plástica del material, provocando la rotura permanente del elemento y es por eso que en la gráfica se puede apreciar como decae repentinamente el esfuerzo del elemento al alcanzar valores próximos a 0.65 GPa. De igual manera, el elemento E58676 tiene un incremento de su esfuerzo durante los 10 ms alcanzando un valor de 0.6457 GPa llegando a alcanzar el punto de resistencia límite del material, es por eso que a partir de ese instante decae totalmente su esfuerzo colapsando el elemento. Por otro lado, el elemento E136895 tiene un incremento de su esfuerzo hasta los 15 ms alcanzando un valor de 0.6496 GPa, después de este punto el esfuerzo del elemento cae hasta los 0.15 GPa a lo largo de los 20 ms y seguidamente sufre un nuevo incremento alcanzando los 0.3 GPa en los 40 ms, para posteriormente decaer y pasar a experimentar oscilaciones de esfuerzo aproximadas a 0.05 GPa durante los 150 ms de ensayo computacional, lo que indica que el elemento no ha superado la zona plástica del material.



**Figura 3.24** Esfuerzo máximo de *Von Mises* – 4 simulaciones

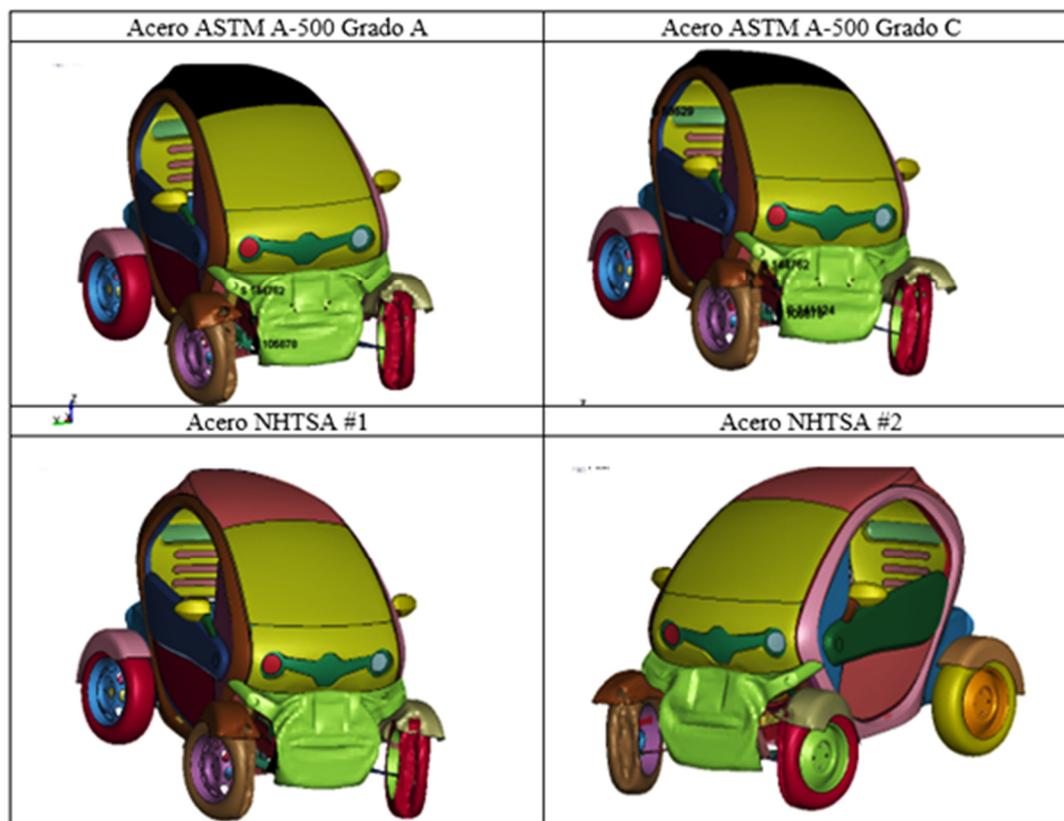
La Figura 3.24 resume los esfuerzos máximos presentados durante cada ensayo de impacto frontal, en la cual se puede apreciar como los cuatro materiales de prueba alcanzan el valor de resistencia límite a la tracción en los primeros 20 ms de a ver comenzado el ensayo computacional. Adicionalmente, en la Tabla 3.1 se indican las características mecánicas de los materiales puestos a prueba en este estudio. Por lo tanto, de los resultados obtenidos se puede concluir que la mejor

opción como material para la estructura del habitáculo es el Acero NHTSA #2, por el motivo que tiene mayor capacidad de resistir esfuerzos ante un impacto, para tener una aceptación más clara se procede a analizar el comportamiento de los materiales ante la deformación en el siguiente punto.

**Tabla 3.1** Características mecánicas de los materiales de prueba

	ASTM A-500 Grado A	ASTM A-500 Grado C	Acero NHTSA #1	Acero NHTSA #2
Densidad (kg/mm3)	7.83e-06	7.83e-06	7.89e-06	7.89e-06
Módulo de elasticidad (GPa)	207	207	210	200
Radio Poisson	0.3	0.3	0.3	0.3
Límite de fluencia (GPa)	0.27	0.345	0.27	0.35
Resistencia última a la tracción (GPa)	0.31	0.425	0.46	0.65
Deformación unitaria máxima en tracción	0.25	0.21	0.35	0.3

### 3.2.2 DEFORMACIÓN DEL HABITÁCULO



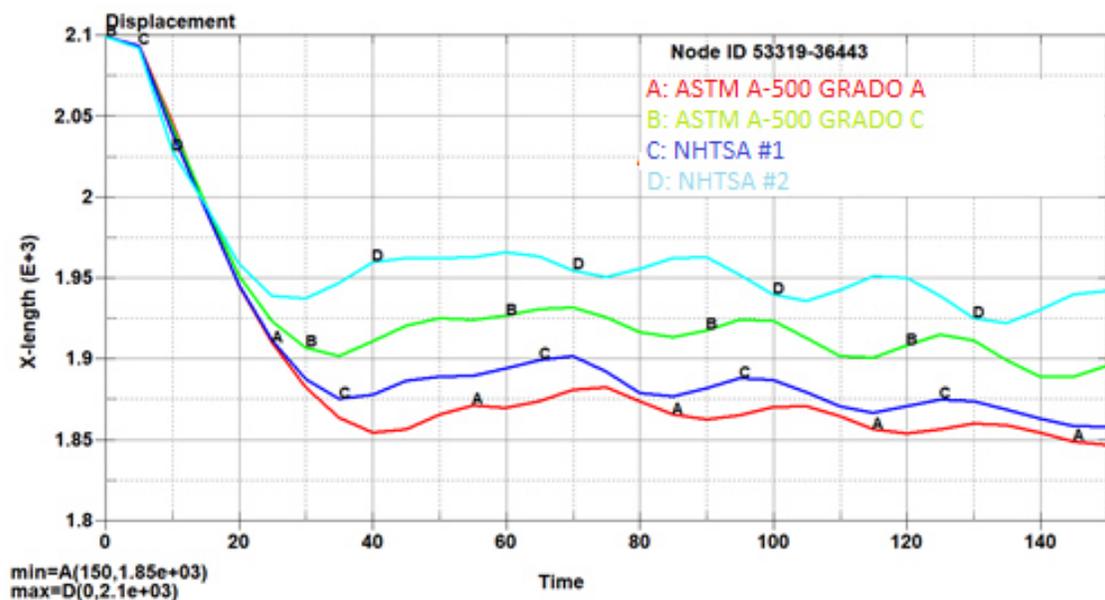
**Figura 3.25** Deformación del habitáculo – 4 simulaciones

Después de cada ensayo computacional con cada uno de los cuatro materiales puestos a prueba, se puede evidenciar una deformación diferente en cada uno de los ensayos realizados como se muestra en la Figura 3.25.



**Figura 3.26** Elementos finitos para análisis de desplazamiento

Para realizar un enfoque a la deformación total de la estructura, se considera analizar el comportamiento de dos elementos finitos, uno ubicado en la parte frontal del vehículo y el otro en la parte posterior, estos elementos son E53319 y E36443 como se indica en la Figura 3.26.



**Figura 3.27** Deformación del habitáculo – 4 simulaciones

La Figura 3.27 indica los diferentes desplazamientos obtenidos durante cada ensayo computacional. El eje X representa el desplazamiento de la estructura del vehículo y en el eje Y se representa el tiempo del ensayo computacional, en donde se extrae los siguientes resultados:

Con respecto al análisis del acero ASTM A-500 Grado A, al momento de impactar el vehículo ante la barrera rígida los elementos finitos de cada extremo del habitáculo experimentan una variación entre su distancia, en tiempo 0 ms es decir antes de que el vehículo impacte se tiene una distancia inicial de 2101.45 mm, la cual fluctúa durante todo el ensayo de impacto llegando a alcanzar una distancia final de 1883.15 mm, lo que indica que una vez terminada la simulación se tiene una diferencia de 218.3 mm, que es la deformación que sufre la estructura después del impacto, de manera general se podría decir que se tiene un 10.38% de deformación en toda la carrocería.

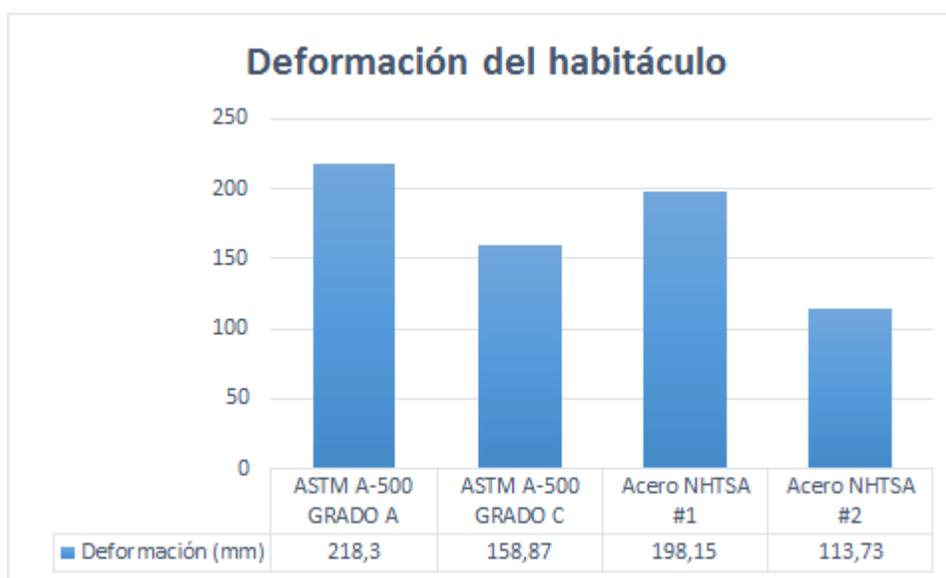
En cuanto al análisis del acero ASTM A-500 Grado C, al instante de impactar el vehículo ante la barrera rígida los elementos finitos de cada extremo del habitáculo experimentan una variación entre su distancia, en tiempo 0 ms es decir antes de que el vehículo impacte se tiene una distancia inicial de 2101.45 mm, la cual fluctúa durante todo el ensayo de impacto llegando a alcanzar una distancia final de 1942.58 mm, lo que indica que una vez terminada la simulación se tiene una diferencia de 158.87 mm, que es la deformación que sufre la estructura después del impacto, de manera general se podría decir que se tiene un 7.56% de deformación en toda la carrocería.

Continuando con el análisis de deformación estructural, el comportamiento del acero NHTSA #1, al instante de impactar el vehículo ante la barrera rígida los elementos finitos de cada extremo del habitáculo experimentan una variación entre su distancia, en tiempo 0 ms es decir antes de que el vehículo impacte se tiene una distancia inicial de 2101.45 mm, la cual fluctúa durante todo el ensayo de impacto llegando a alcanzar una distancia final de 1903.3 mm, lo que indica que una vez terminada la simulación se tiene una diferencia de 198.15 mm, que es la deformación que sufre la estructura después del impacto, de manera general se podría decir que se tiene un 9.42% de deformación en toda la carrocería.

Para finalizar con el análisis de deformación estructural de la cuarta simulación, el comportamiento del acero NHTSA #2, al instante de impactar el vehículo ante la barrera rígida los elementos finitos de cada extremo del habitáculo experimentan una variación entre su distancia,

en tiempo 0 ms es decir antes de que el vehículo impacte se tiene una distancia inicial de 2101.45 mm, la cual fluctúa durante todo el ensayo de impacto llegando a alcanzar una distancia final de 1987.72 mm, lo que indica que una vez terminada la simulación se tiene una diferencia de 113.73 mm, que es la deformación que sufre la estructura después del impacto, de manera general se podría decir que se tiene un 5.41% de deformación en toda la carrocería.

Adicionalmente, en la Figura 3.27 se puede observar como el material NHTSA #2 tiene un mejor comportamiento ante una colisión de impacto de frontal, claramente se puede apreciar como el material no sufre gran caída en su deformación como a diferencia de los otros materiales de prueba.



**Figura 3.28** Comparativa de resultados de Deformación – 4 simulaciones

La Figura 3.28 resume resultados obtenidos de las cuatro simulaciones con respecto a la deformación total del habitáculo, en la cual se puede concluir que el Acero NHTSA #2 es la mejor opción como material de reemplazo para la estructura del habitáculo, por su alta resistencia ante la deformación, los resultados indican que su deformación final alcanza los 113.73 mm, seguido del Acero Estructural ASTM A-500 Grado C que llega hasta los 198.15 mm, lo que indica que también es una gran opción como material de reemplazo.

### 3.2.3 ANÁLISIS DE ESFUERZO VS DEFORMACIÓN

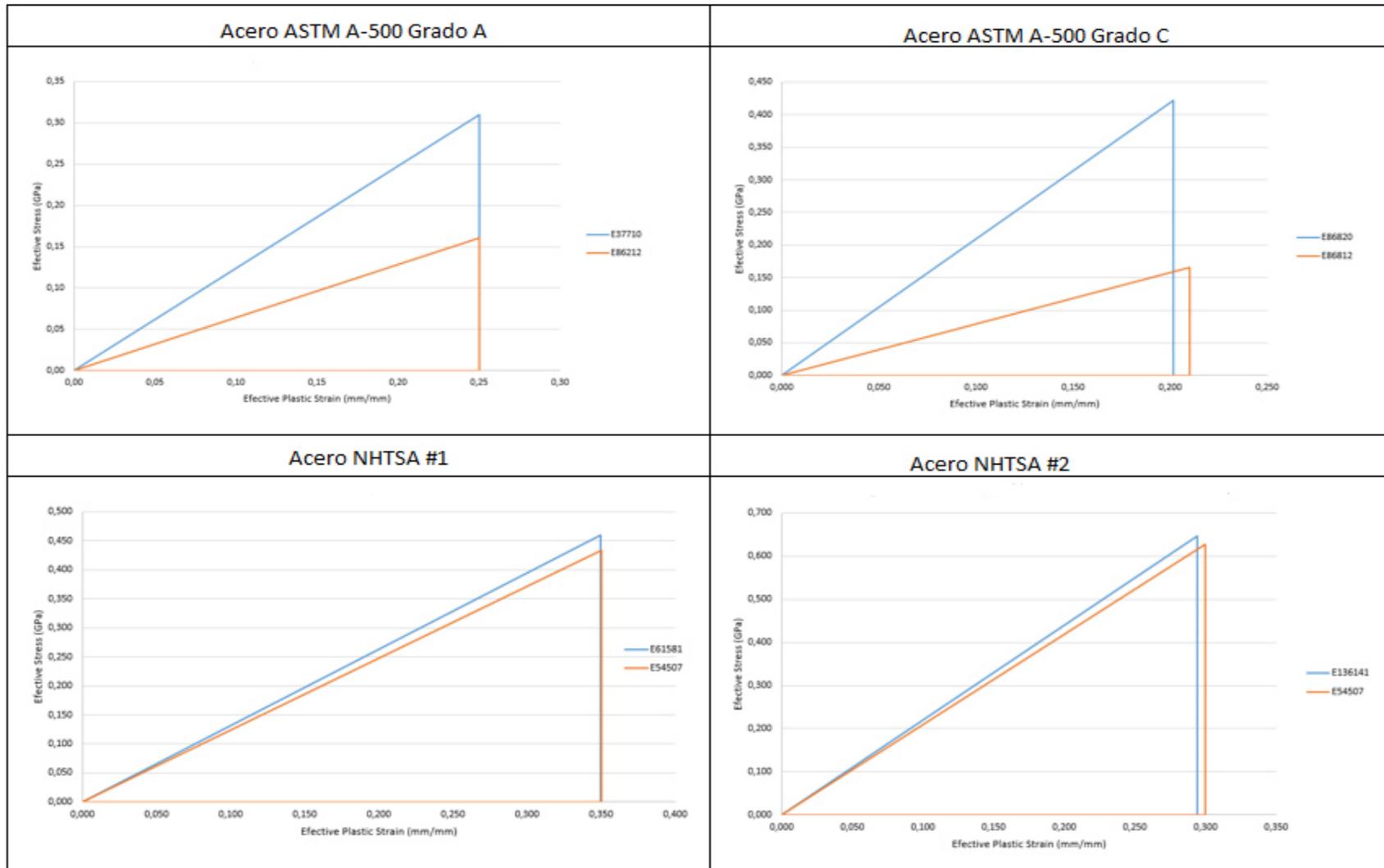


Figura 3.29 Esfuerzo vs Deformación – 4 simulaciones

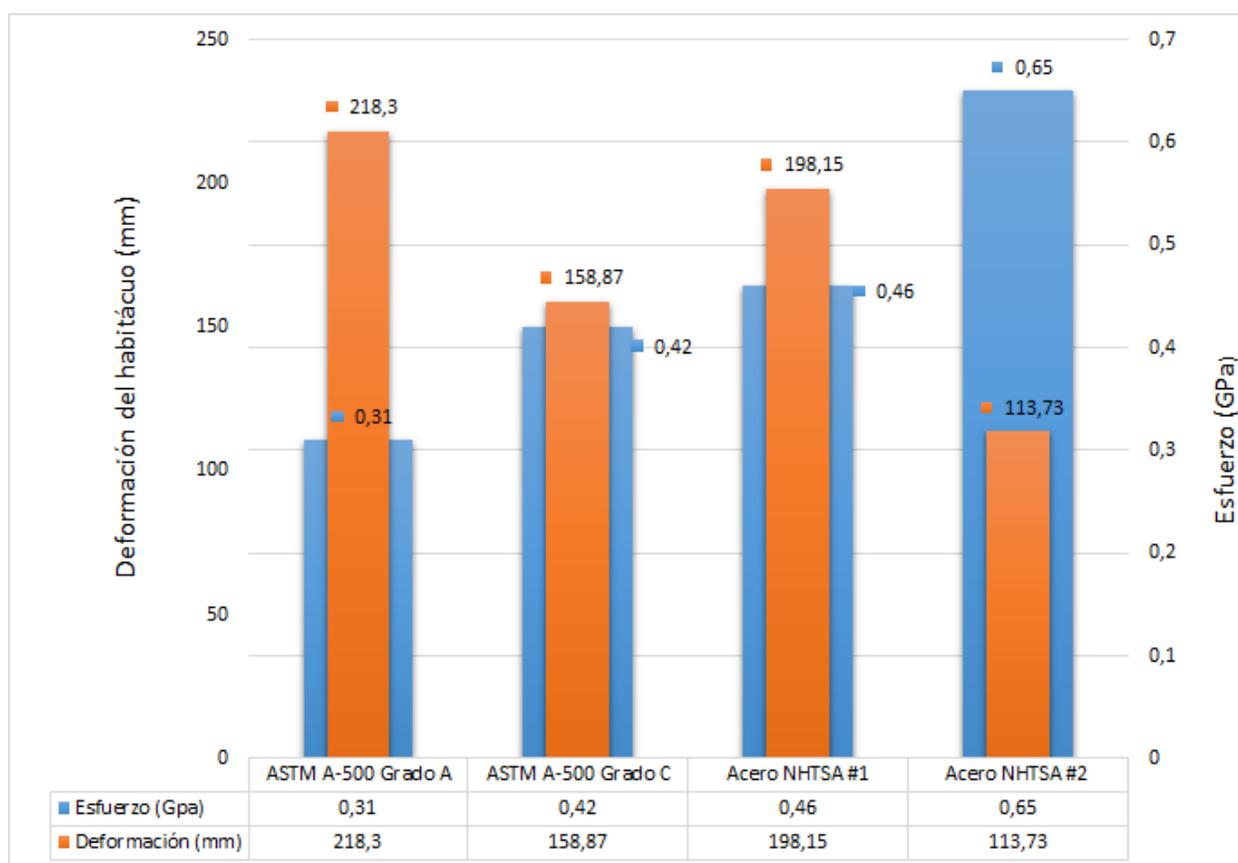
Durante el ensayo computacional, los elementos finitos de cada uno de los materiales puestos a prueba presentan un comportamiento plástico diferente, en la Figura 3.29 se hace una comparación entre *Effective Stress vs Effective Strain* de cada uno de ellos, haciendo un enfoque a los elementos finitos que presentan los más altos valores de esfuerzo y deformación en el instante exacto de iniciar la colisión del vehículo, obteniendo los siguientes resultados:

Con respecto al primer ensayo de simulación de impacto utilizando un Acero ASTM A-500 de Grado A, en los primeros 5 ms de haber comenzado el ensayo de impacto el elemento E37710 alcanza el límite de resistencia a la tracción del material, es por eso que al alcanzar los 0.31 GPa la gráfica del elemento colapsa, indicando que se ha producido la rotura permanente del elemento. Por otro lado, el elemento E86212 durante los primeros 5 ms alcanza la deformación unitaria máxima del material, es por eso que al llegar a los 0.25 mm/mm la gráfica del elemento colapsa aun sin haber alcanzado los 0.31 GPa de esfuerzo máximo, lo que indica que de igual manera el elemento sufre la rotura permanente durante la simulación computacional.

En cuanto al segundo ensayo de simulación de impacto utilizando un Acero ASTM A-500 de Grado C, en los primeros 5 ms de haber comenzado el ensayo de impacto el elemento E86820 alcanza el límite de resistencia a la tracción del material, es por eso que al alcanzar los 0.42 GPa la gráfica del elemento colapsa, indicando que se ha producido la rotura permanente del elemento. Por otro lado, el elemento E86812 durante los primeros 5 ms alcanza la deformación unitaria máxima del material, es por eso que al llegar a los 0.21 mm/mm la gráfica del elemento colapsa aun sin haber alcanzado los 0.42 GPa de esfuerzo máximo, lo que indica que de igual manera el elemento sufre la rotura permanente durante la simulación computacional.

Continuando con el análisis del tercer ensayo de simulación de impacto, con respecto al Acero NHTSA #1, en los primeros 5 ms de haber comenzado el ensayo de impacto el elemento E61581 alcanza el límite de resistencia a la tracción del material, es por eso que al alcanzar los 0.46 GPa la gráfica del elemento colapsa, indicando que se ha producido la rotura permanente del elemento. Por otro lado, el elemento E54507 durante los primeros 5 ms alcanza la deformación unitaria máxima del material, es por eso que al llegar a los 0.35 mm/mm la gráfica del elemento colapsa aun sin haber alcanzado los 0.46 GPa de esfuerzo máximo, lo que indica que de igual manera el elemento sufre la rotura permanente durante la simulación computacional.

Para finalizar con el análisis del cuarto ensayo de simulación de impacto, con respecto al Acero NHTSA #2, en los primeros 5 ms de haber comenzado el ensayo de impacto el elemento E136141 alcanza el límite de resistencia a la tracción del material, es por eso que al alcanzar los 0.65 GPa la gráfica del elemento colapsa, indicando que se ha producido la rotura permanente del elemento. Por otro lado, el elemento E54507 durante los primeros 5 ms alcanza la deformación unitaria máxima del material, es por eso que al llegar a los 0.30 mm/mm la gráfica del elemento colapsa aun sin haber alcanzado los 0.65 GPa de esfuerzo máximo, lo que indica que de igual manera el elemento sufre la rotura permanente durante la simulación computacional.



**Figura 3.30** Resumen de resultados – 4 simulaciones

La Figura 3.30 resume los resultados obtenidos a lo largo de este capítulo, indicando los valores máximos alcanzados durante el ensayo computacional, resultados provenientes de los elementos finitos que presentan mayor relevancia en la simulación de impacto del vehículo.

## CAPÍTULO IV

### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 CONCLUSIONES

- Se generó un modelo computacional que representa un escenario real de un impacto frontal de un vehículo monoplaza eléctrico, asignando todas las propiedades físicas y mecánicas del sistema mediante software de ingeniería asistida por computador CAD-CAE.
- Se diseñó y preparó el modelo de elementos finitos de la estructura del habitáculo ante un impactador de barrera rígida, considerando estándares de *Mesh Quality*, selección de material, control de energías y condiciones de frontera, con el fin de obtener una validación de resultados lo más cercanos a un ensayo real.
- Se realizó cuatro ensayos de impacto, a una velocidad de 50 km/h como lo describe la normativa EURO NCAP en su protocolo de evaluación para cuadríciclos pesados, logrando evaluar la seguridad del vehículo, en términos de esfuerzo de *Von Mises*, deformación total y deformación de *Effective Plastic Strain*.
- Se evaluó el desempeño de la estructura del vehículo en ensayo computacional mediante la metodología de análisis simplificada de elementos finitos, utilizando como materiales de prueba dos aceros estructurales que se encuentran disponibles en el Ecuador bajo la normativa NTE INEN 2415, como son el Acero ASTM A-500 Grado A y ASTM A-500 Grado C, además, se puso a prueba dos aceros estructurales de la biblioteca de materiales de la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras de los Estados Unidos (NHTSA), denominados en este estudio con las siglas acero NHTSA #1 y acero NHTSA #2.
- En este caso de estudio se comprobó que los primeros 20 ms son los más cruciales durante un impacto frontal, en el transcurso de este tiempo se logró evidenciar mediante tablas de análisis de esfuerzo de *Von Mises* como los elementos finitos de la estructura de la parte frontal del automóvil, alcanzan los valores de resistencia límite a la tracción del material provocando en algunos casos el colapso o rotura de dichos elementos.

- Después de los 150 ms de simulación asistida por computador, se logró evidenciar una gran variación en cuanto a la deformación total de la estructura del vehículo en cada una de las simulaciones de ensayo aplicando los distintos materiales de prueba, alcanzando una deformación máxima de 218.3 mm utilizando un acero ASTM A-500 de Grado A, seguido del acero NHTSA #1 que alcanza un valor de 198.15 mm, al aplicar un acero ASTM A-500 de Grado C se logró obtener una deformación de 158.87 mm y al utilizar un acero NHTSA #2 se obtuvo una deformación general de 113,73 mm, por esta razón este acero es considerado en este estudio como el material con mejores características de resistencia ante las deformaciones presentadas en un impacto frontal.
- Mediante un análisis de *Effective Plastic Strain vs Effective Stress*, se logró reflejar el comportamiento de los materiales puestos a prueba en este estudio, logrando evaluar los efectos del impacto frontal en los elementos finitos más críticos del vehículo, en donde se logró evidenciar como los materiales de prueba alcanzan los valores de resistencia límite, provocando la rotura permanente en dichos elementos, ya sea por sobrepasar el límite de esfuerzo a la tracción o por alcanzar el límite de deformación unitaria máxima, todo esto en los primeros 20 ms de haber iniciado el ensayo de impacto.
- Mediante la evaluación y análisis de las zonas más afectadas del vehículo durante cada simulación asistida por computador, se determinó que el acero NHTSA #1 seguido del acero ASTM A-500 de Grado C, son los materiales presentan un comportamiento ante los fenómenos de energía presentados durante una colisión de impacto frontal, alcanzando un valor de  $1.16 \times 10^5$  kN-mm y  $1.08 \times 10^5$  kN-mm respectivamente, brindando así una mejor seguridad y protección al conductor del vehículo, siempre y cuando con el uso obligatorio del cinturón de seguridad.
- Se validó los resultados obtenidos en este estudio mediante el método de *Energy Balance*, en el cual la energía de *Hourglass* debe mantenerse en un valor menor al 10% de la energía interna, obteniendo un margen de error en cada simulación del 4.75%, 4.89%, 4.86% y 8.15% respectivamente, valores que se encuentran por debajo del límite del control de *Hourglass*, aceptable en un análisis estructural.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- En el presente trabajo se han simplificado componentes internos del vehículo, como el sistema de suspensión, sistema de eléctrico, sistema de propulsión, lo que se recomienda dar continuidad a este estudio, simulando todos los componentes del vehículo para determinar la influencia en la resistencia ante un impacto frontal.
- Sería importante realizar un acercamiento a *Renault Company*, solicitando acceso a planos 2D o modelados 3D del vehículo del cual fue basado este estudio, reduciendo así el tiempo de modelado y alcanzando una mayor similitud del modelo. Además, sería interesante poder conseguir información sobre las propiedades mecánicas de los materiales empleados en el habitáculo, para realizar nuevos estudios y poder comparar los resultados obtenidos en esta investigación.
- Sería conveniente dar continuidad a este estudio realizando ensayos de simulación asistida por computador, simulando eventos de impacto por alcance y lateral, poniendo a prueba la seguridad de un *dummy*.
- Se recomienda usar elementos finitos de tipo superficie o *shell*, con el fin de reducir el gasto computacional y optimizar el tiempo de cálculo de cada simulación asistida por computador.

## BIBLIOGRAFÍA

- AEADE. (2020). En tres provincias se concentra la mayor compra de carros eléctricos. *El Universo*, 10–13. <https://www.eluniverso.com/noticias/2020/08/12/nota/7939423/mercado-vehiculos-electricos-ecuador-2020>
- Alonso, D. (2015). *Simulación de ensayo de protección de peatón con modelos de ensayo simplificados mediante ls-dyna*. Universidad Carlos III de Madrid.
- ANSYS, I. (2017). *Theory Reference Release 7.0* (Vol. 7).  
<http://research.me.udel.edu/~lwang/teaching/MEx81/ansys56manual.pdf>
- Arriaga, I. (2015). *Diseño optimizado de elementos estructurales para absorción de energía en choques viga en ménsula sometida a compresión*. Universidad Carlos III de Madrid.
- AUTOFÁCIL. (2013, March 17). *Qué tipos de prueba realiza euroNCAP - Autofácil*.  
<https://www.autofacil.es/seguridad/2013/03/17/tipos-prueba-realiza-euroncap/13302.html>
- Berzi, L., Baldanzini, N., Barbani, D., Delogu, M., Sala, R., & Pierini, M. (2018). Simulation of crash events for an electric four wheel vehicle. *Procedia Structural Integrity*, 12, 249–264.  
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.090>
- Bisschop, R., Willstrand, O., & Rosengren, M. (2020). Handling Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Preventing and Recovering from Hazardous Events. *Fire Technology*, 56(6), 2671–2694. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01038-1>
- Centeno, O. F., Eliseo, M., & Acevedo, C. (2020). *AUTOS NUEVOS PARA LOGRAR*. 595.
- CESVIMAP. (2014, June 29). *La jaula que nos protege*.  
[https://issuu.com/revistacesvimap/docs/revista\\_88](https://issuu.com/revistacesvimap/docs/revista_88)
- CEVIMAP. (2014, June 29). *Revista CESVIMAP 88 by CESVIMAP - issuu*.  
[https://issuu.com/revistacesvimap/docs/revista\\_88](https://issuu.com/revistacesvimap/docs/revista_88)
- Chamba, E. (2018). *Determinación de la metodología para el análisis de desempeño del habitáculo de seguridad de un vehículo liviano a impacto frontal sobre una pared rígida por el método de los elementos finitos* [Universidad Internacional SEK].  
<http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/2787>

- Cheko EG. (2017, November 15). *SISTEMAS DE MANUFACTURA*.  
<http://segnuevo.blogspot.com/>
- Cuasapud, D. (2018). Análisis Estructural A Cargas De Impacto Posterior Por Alcance De Un Bus Interprovincial Mediante El Método De Elementos Finitos. *Universidad Internacional SEK*, 1–142. <http://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/2768>
- Diermann, V., & Middendorf, P. (2019). Automatic Evaluation of Structural Integrity in Crashworthiness Simulations Using Image Analysis. *International Journal of Automotive Technology*, 20(1), 65–72. <https://doi.org/10.1007/s12239-019-0006-y>
- Euro NCAP. (2021). *European New Car Assessment Programme*.  
<https://www.euroncap.com/en/press-media/press-releases/>
- EURO NCAP. (2014). *Seguridad de los cuatriciclos*. <https://www.euroncap.com/es/seguridad-en-los-vehiculos/campanas-de-seguridad/2014-seguridad-de-los-cuatriciclos/>
- Fierro, R. J., & Ordóñez, A. S. (2018). *La Ingeniería Automotriz Clave para el desarrollo sostenible del Ecuador* (1ra edición). Editorial Universitaria Abya - Yala.
- Galán Miguel. (2019). *Euro NCAP: las claves de este crash test que vela por la seguridad*.  
<https://www.actualidadmotor.com/euro-ncap-crash-test/>
- GM Chamorro. (2021, August 15). *En qué consisten los crash test o pruebas de choque*.  
<https://www.gmchamorro.com/blog/en-qué-consisten-los-crash-test-o-pruebas-de-choque-4297>
- Gómez, T., Martín, J., Águeda, E., & García, J. L. (2016). *Elementos estructurales del vehículo* (S. Paraninfo (ed.); Vol. 3). España.  
<https://www.paraninfo.es/catalogo/9788428338417/elementos-estructurales-del-vehiculo>
- grupoays. (2016, August 22). *LSDYNA, la mejor solución para la simulación de colisiones*.  
<https://www.grupoays.es/lodyna-la-mejor-solucion-para-la-simulacion-de-colisiones/>
- Huapaya, J. (2019). *METODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA ESTRUCTURAS* (1ra Edición, Vol. 1). Universidad Nacional de Barranca .  
<https://es.scribd.com/document/416124391/Metodo-de-Elementos-Finitos-Huapaya-Chavez-Jefferson-Vladimir>

- INEN. (2016a). NTE INEN 2656 CLASIFICACIÓN VEHICULAR. *Servicio Ecuatoriano de Normalización*. [https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte\\_inen\\_2656-1.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_2656-1.pdf)
- INEN. (2016b). *TUBOS DE ACERO AL CARBONO SOLDADOS PARA APLICACIONES ESTRUCTURALES Y USOS GENERALES. REQUISITOS*.  
[https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte\\_inen\\_2415-2.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_2415-2.pdf)
- infotaller.tv. (2017, January 10). *Renault desarrolla un eléctrico sin piezas de carrocería*.  
[https://www.infotaller.tv/chapa\\_y\\_pintura/Renault-desarrolla-electrico-piezas-carroceria\\_0\\_1071492870.html](https://www.infotaller.tv/chapa_y_pintura/Renault-desarrolla-electrico-piezas-carroceria_0_1071492870.html)
- Jara, R. (2014, April 14). *El habitáculo del coche: de la seguridad a la superconectividad - Asegurando - Blog de Seguros.es*. <https://www.seguros.es/blog/el-habitaculo-del-coche.html>
- LS-DYNA Support. (2021a). *Consistent units*.  
<https://www.dynasupport.com/howtos/general/consistent-units>
- LS-DYNA Support. (2021b). *Hourglass*.  
<https://www.dynasupport.com/howtos/element/hourglass>
- NHTSA. (2021). *Acerca de NHTSA*. <https://www.nhtsa.gov/about-nhtsa>
- Núñez, G. (2018). *Simulación de un ensayo de vuelco de un autobús mediante Ls-Dyna*.  
Universidad Carlos III de Madrid.
- Olona, A. (2018). *EuroNCAP de la Seguridad Pasiva a los ADAS*.
- Paolo, T., & Daniel, P. Y. (2015). Universidad carlos iii de madrid escuela politécnica superior.  
*Online, I*, 1–91.
- Patrascu, D. (2010, March 29). *Aussie Cars to Get Rollover Crash Rating*.  
<https://www.autoevolution.com/news/aussie-cars-to-get-rollover-crash-rating-18626.html>
- Pequerul, G. (2011). *Reconstrucción de*. 48–51.
- Pérez, A. (2016). *Optimización estructural de un sistema de absorción de energía para material ferroviario*.
- Renault. (2017). *FICHA TÉCNICA Renault TWIZY*.  
<https://www.renault.com.co/electricos/twizy/especificaciones.html>

- Rodríguez, D., & López, J. (2009). *Los crash test*. <https://slideplayer.es/slide/10527402/>
- Salvador de Cruz, D. (2020). Diseño y análisis de un rig para estudio de cargo crash. *Universidad Carlos III de Madrid*, 1–79.
- Sánchez, V., & Aranda, J. (2017). *Análisis numérico de larguero de automóvil frente a impacto*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Seismous. (2019, November 14). *Análisis por elemento finito: qué es y cómo funciona* | Seismous. <https://seismous.com/analisis-por-elemento-finito-que-es-y-como-funciona/>
- Shienmar, K., & Melvin, J. (2020). Safety in Electric and Autonomous Cars - Simulation of Complex Crash Scenarios. *ATZ Worldwide*, 122(7–8), 48–51. <https://doi.org/10.1007/s38311-020-0252-7>
- SNP. (2021). *Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025*. <https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/2021/09/Plan-de-Creación-de-Oportunidades-2021-2025-Aprobado.pdf>
- Soria, S. L. De. (2000). *El habitáculo de seguridad ... .. y todo lo que le rodea*.
- Stave, C., & Carlson, A. (2017). A case study exploring firefighters' and municipal officials' preparedness for electrical vehicles. *European Transport Research Review*, 9(2), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s12544-017-0240-1>
- Sun, P., Bisschop, R., Niu, H., & Huang, X. (2020). A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. In *Fire Technology* (Vol. 56, Issue 4). Springer US. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>
- Susilo, D. D., Lukamana, N. I., Budiana, E. P., & Tjahjana, D. D. D. P. (2016). Crash simulation of UNS electric vehicle under frontal front impact. *AIP Conference Proceedings*, 1717. <https://doi.org/10.1063/1.4943477>
- Tecnología del Automóvil. (2019, July 17). *Seguridad (III) - TECNOLOGIA DEL AUTOMOVIL*. <https://www.tecnologia-automovil.com/cursos/1-4-3-seguridad/>
- Thuong, L. N. P. (2018). Vehicle Frontal Impact to Pole Barrier Simulation Using Computer Finite Element Model. *Proceedings 2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development, GTSD 2018*, 273–277.

<https://doi.org/10.1109/GTSD.2018.8595702>

Torres, V., & Carrillo, K. (2021). VALORACIÓN DE LAS DEFORMACIONES EN CARROCERÍAS DE VEHÍCULOS L7E. *Universidad Internacional Del Ecuador*.  
<https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/4802/1/T-UIDE-0250.pdf>

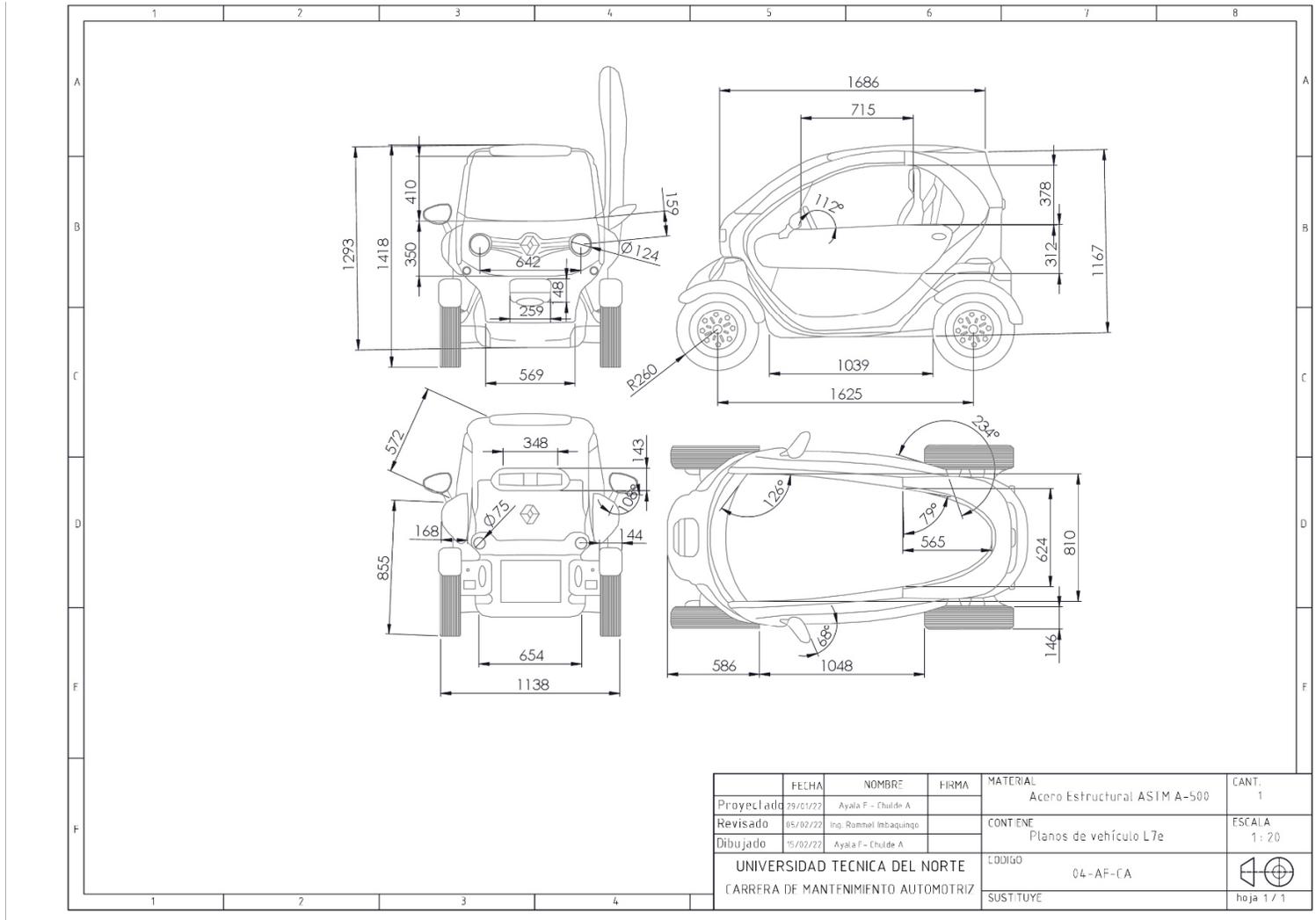
Vetturazzi, R. (2020, May 6). *Ventajas de la integración de LS-DYNA con las herramientas de Ansys*. <https://www.esss.co/es/blog/ventajas-de-la-integracion-de-ls-dyna-con-las-herramientas-de-ansys/>

Wu, H., Kuang, S., & Hou, H. (2019). Research on Application of Electric Vehicle Collision Based on Reliability Optimization Design Method. *International Journal of Computational Methods*, 16(7). <https://doi.org/10.1142/S0219876219500348>

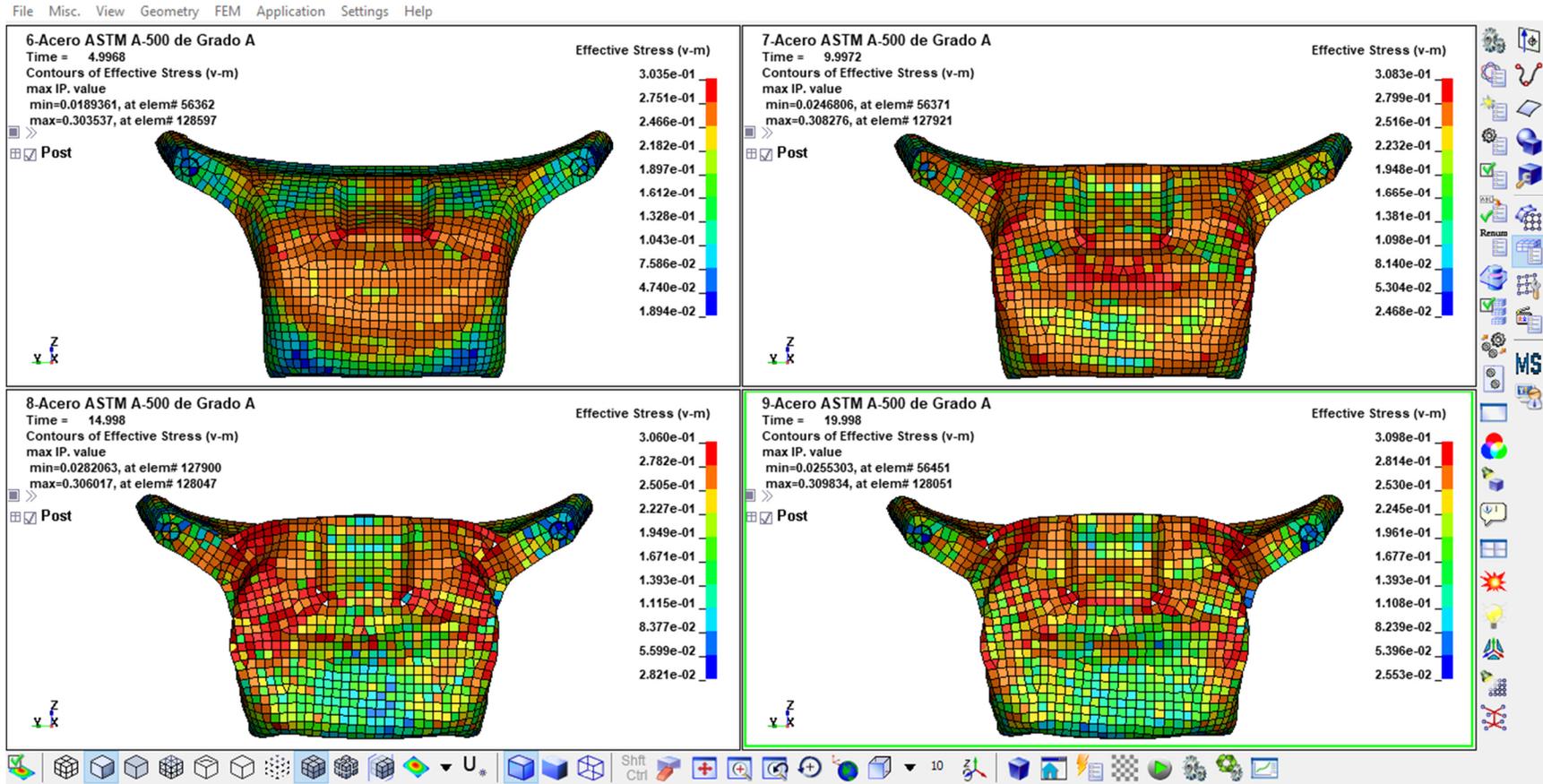
Zamora, N. S., & Lira Hernández, A. (2020). La manufactura aditiva como potenciador de los sistemas productivos. *Nº*, 28(28), 104–112.  
<https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.15.28.2020.104-112>

# ANEXOS

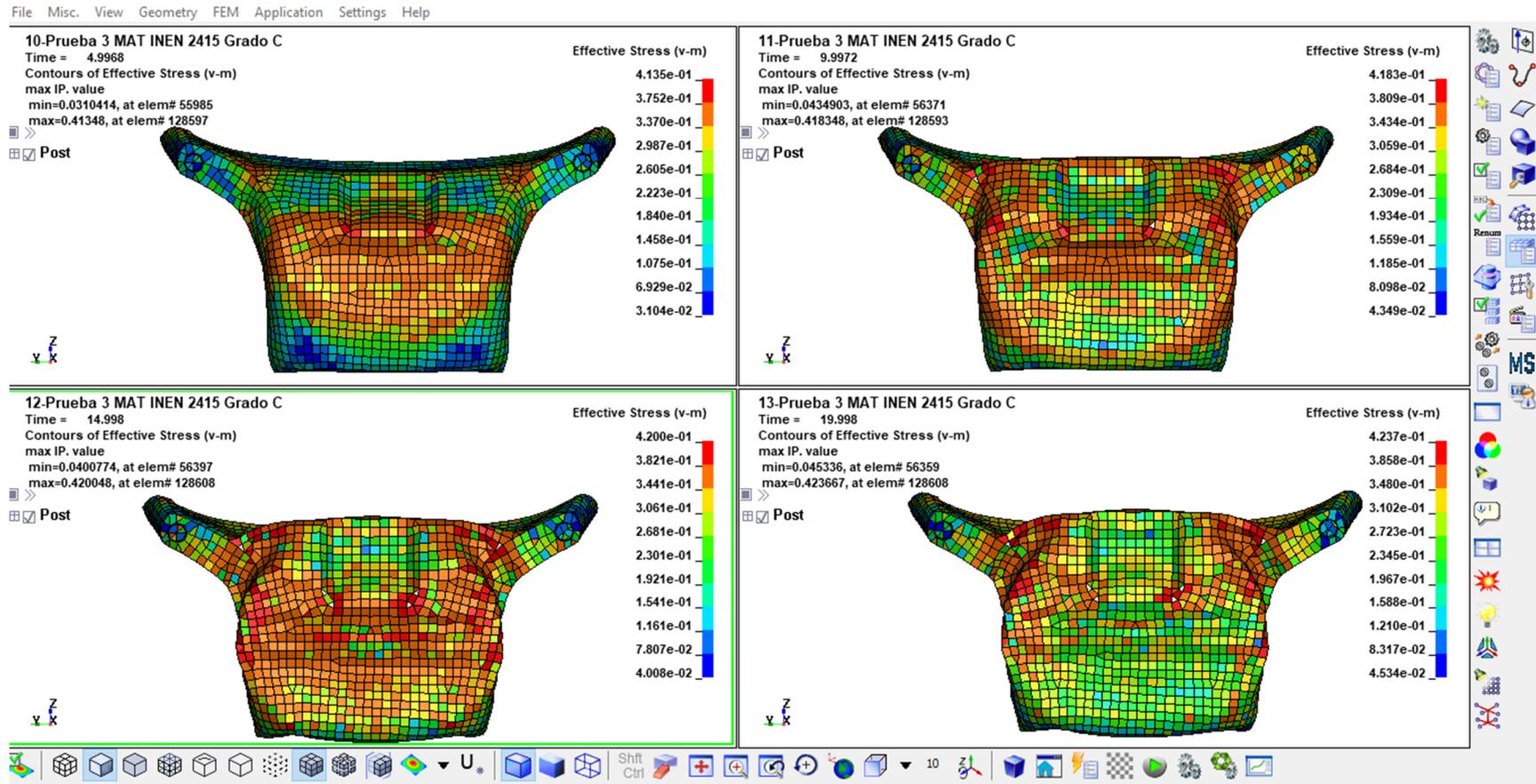
## ANEXO I. Planos de Vehículo Monoplaza Eléctrico



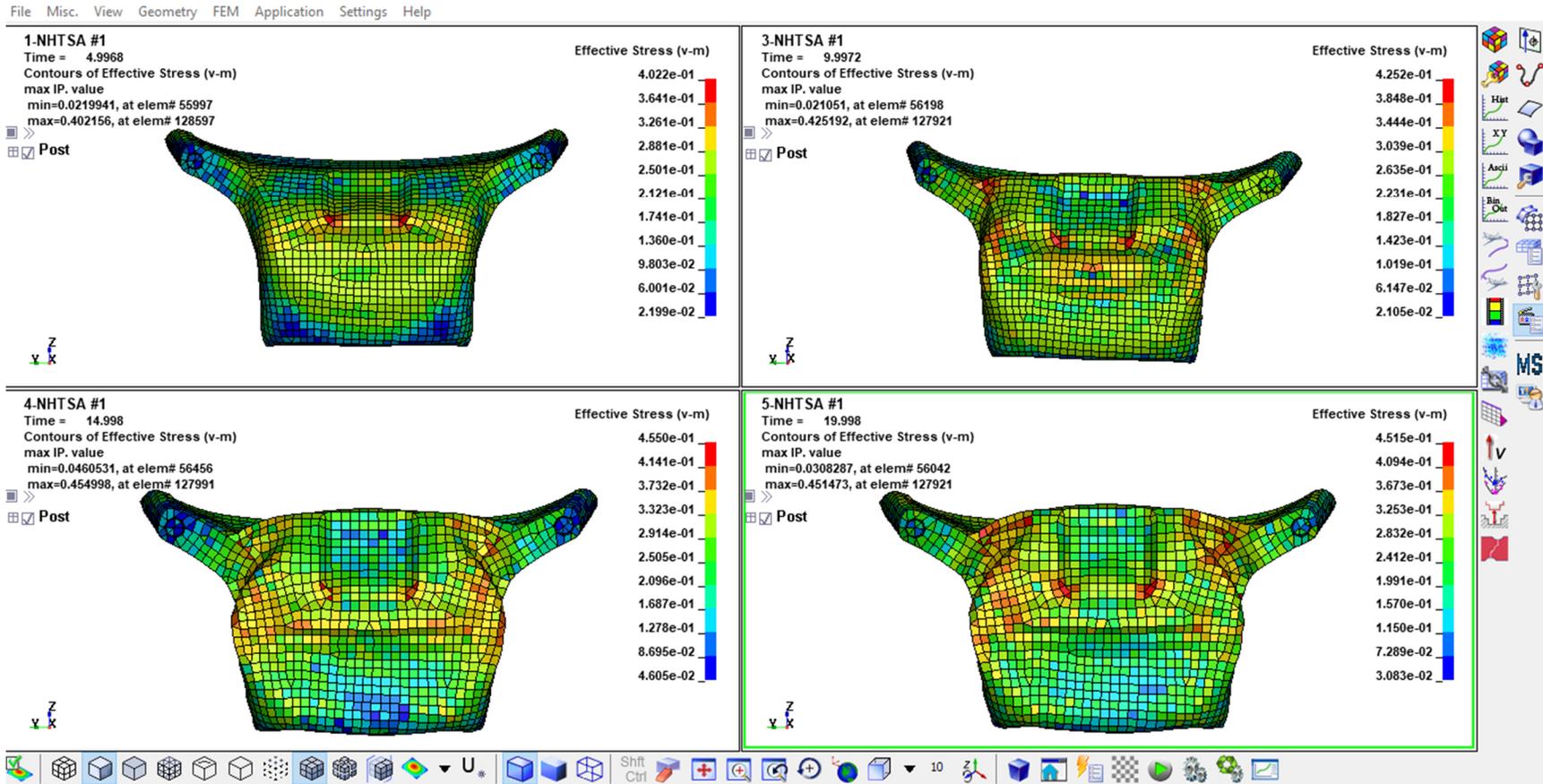
## ANEXO II. Esfuerzo de Von Mises en Acero ASTM A-500 Grado A



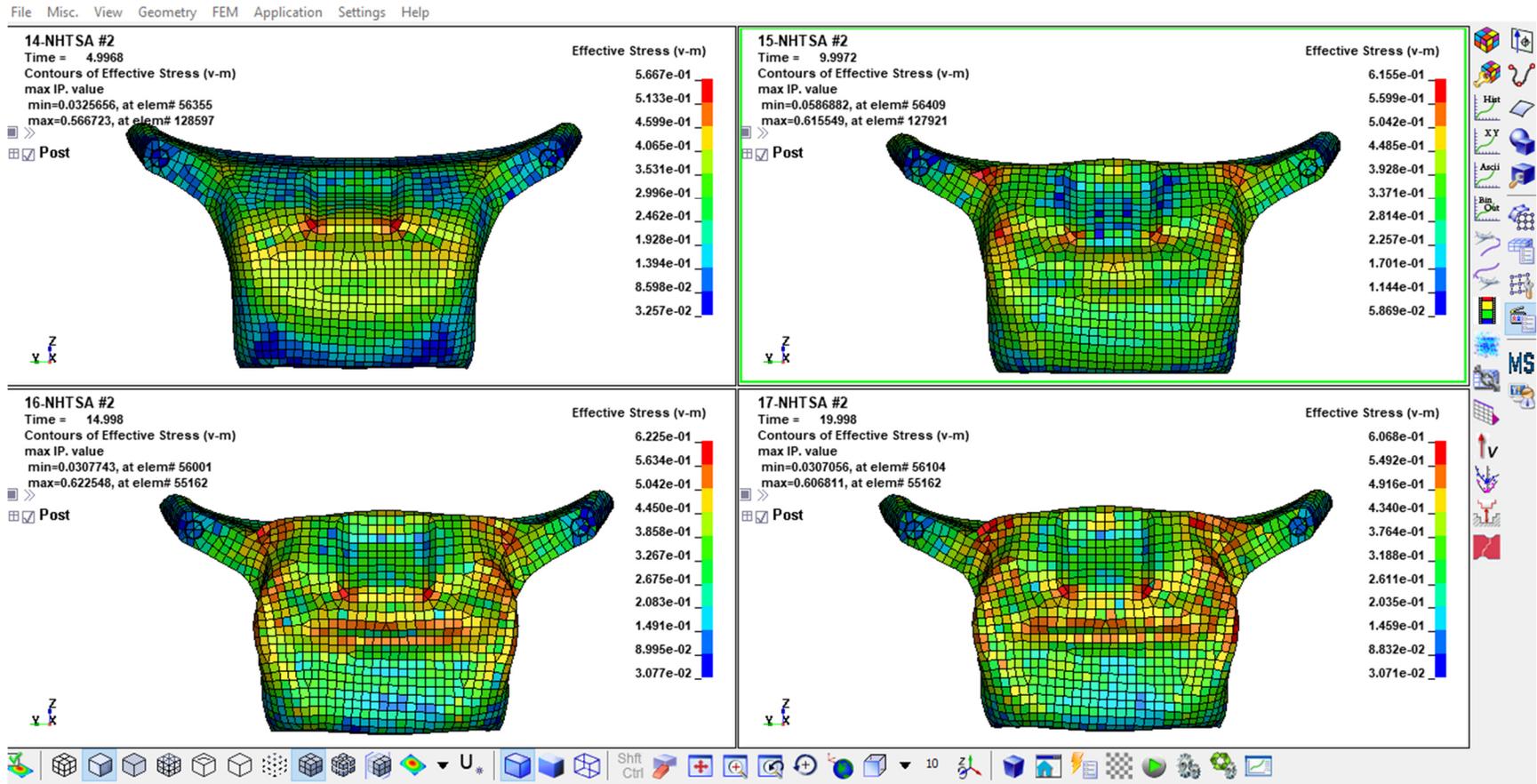
### ANEXO III. Esfuerzo de Von Mises en Acero ASTM A-500 Grado C



### ANEXO IV. Esfuerzo de Von Mises en Acero NHTSA #1



### ANEXO V. Esfuerzo de Von Mises en Acero NHTSA #2



# DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN VEHÍCULO MONOPLAZA ELÉCTRICO BAJO CONDICIONES DE IMPACTO MEDIANTE SOFTWARE DE INGENIERÍA CAD/CAE.

Franklin David Ayala<sup>1</sup>, Anderson Stalin Chulde<sup>2</sup>  
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica del Norte,  
Av. 17 de Julio 5-21, Ibarra-Ecuador  
<sup>1</sup>fdayalam@utn.edu.ec, <sup>2</sup>aschuldem@utn.edu.ec

**Resumen.** El presente proyecto de investigación titulado “Diseño y simulación de un vehículo monoplace eléctrico bajo condiciones de impacto mediante software de ingeniería CAD/CAE” comprende una metodología de estudio teórica, tecnológica, experimental, descriptiva y cuali-cuantitativa, haciendo referencia a los materiales estructurales de un vehículo, el cual, ha permitido proponer una alternativa en el uso de materiales para la carrocería del habitáculo de seguridad. Se realizó el modelado CAD tanto del vehículo como del impactador utilizando el software de diseño SolidWorks considerando todas las características físicas de los mismos, después se preparó y validó el modelo aplicando condiciones de borde, asignando materiales, fuerzas, tiempo, velocidad, calidad del mallado por el método de Jacobian Ratio, etc. todo esto en el software de pre-procesamiento Ls-PrePost. El estudio comprende cuatro simulaciones explícitas con distintos materiales, a una velocidad de 50 km/h ante una barrera rígida como lo determina el Programa Europeo de Evaluación de Automóviles Nuevos Euro NCAP, empleando el software de análisis dinámico Ls-Dyna en su versión estudiantil, siguiendo con un post-procesamiento que es la visualización e interpretación de los resultados del ensayo computacional con la ayuda de gráficas, tablas y muchas otras herramientas que este software ofrece. Al finalizar el análisis de los resultados por el método de elementos finitos, se determinó que el acero denominado en este estudio NHTSA #2 (designación propia de los autores), el cual es un material usado para análisis de impactos por la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras de los Estados Unidos, seguido del acero ASTM A-500 de Grado C son los materiales que presentan un mejor comportamiento ante las deformaciones presentadas después de un impacto frontal, alcanzando una deformación total de 113.73 mm y 158.87 mm respectivamente, además, se determinó que los primeros 20 ms son los más cruciales durante un choque frontal, debido a que en este lapso de tiempo los elementos más críticos de la parte frontal del vehículo alcanzan los límites de resistencia y deformación del material provocando en algunos casos la rotura permanente de dichos elementos.

**Palabras Clave:** Impacto, Simulación, CAD, CAE, Ls-Dyna, Euro NCAP

## 1 Introducción

A mediados del año de 1960 en Europa y Estados Unidos se iniciaron los primeros estudios de seguridad en vehículos motorizados después de sufrir impacto, pero estas pruebas de colisión además de tomar tiempo y necesitar mucho más mano de obra, desperdiciaban el material y los recursos. En la actualidad con el método de elementos finitos y el rápido desarrollo de las computadoras, el análisis estructural de los automóviles ante una colisión se lo puede hacer mediante un ordenador, haciendo uso de un software en simulación de simulación dinámica [1]. A lo largo de la última década, los ingenieros han venido realizando varios estos estudios en la seguridad del automóvil, con el fin de mejorar la resistencia estructural del vehículo y ofrecer mejor seguridad a los ocupantes, basándose en simulación numérica de LS-DYNA. Las simulaciones de impacto digital logran evaluar el grado de deformidad del vehículo y la validez del diseño, de acuerdo a la normativa de seguridad que se encuentre vigente. El análisis estructural en cuadríciclos pesados, se centra en las solicitudes de seguridad que necesita la zona de supervivencia del vehículo, de acuerdo a esta necesidad se selecciona escenarios reales para simular pruebas de colisión, se construye un modelo CAD detallado del vehículo de acuerdo a la información del material y otras características disponibles del fabricante. Con estos resultados de simulación se evalúa el comportamiento general de la estructura del vehículo, centrándose en la seguridad del ocupante, en términos de tensión del material y la deformación general; con todo esto se puede mejorar el diseño de la estructura del vehículo evitando el riesgo lesiones por penetración de través de la superficie [2].

Los vehículos eléctricos (EV) han cambiado significativamente la industria del automóvil en todo el mundo, el rápido desarrollo de nuevas tecnologías en baterías ha impulsado el crecimiento de EV. En el Ecuador el parque automotor de vehículos eléctricos cada año ha ido creciendo y tomado mayor acogida por parte de las compañías de transporte urbano, en el 2020 se vio reflejado que el 94.17% del mercado de vehículos eléctricos en el país lo tienen las provincias de Guayas, Pichincha y Galápagos [3]. Como solución al tráfico vehicular y una reducción a la contaminación ambiental, el parque automotor ha desarrollado nuevas fuentes de movilidad alternativas, como por ejemplo los vehículos tipo L7e de propulsión eléctrica o más conocidos como cuadríciclos, este tipo de transporte son buena opción para movilizarse entre distancias cortas, gracias a sus prestaciones como: fáciles de manejar, compactos, versátiles y económicos [4].

Gracias a las cualidades que presentan los softwares de simulación por elementos finitos y el aumento de movilización de cuadríciclos eléctricos en el Ecuador, se ha visto importante encontrar la metodología más adecuada para realizar un análisis estructural a este tipo de vehículos L7e, aplicando como materiales de prueba aceros estructurales que se encuentran disponibles en el Ecuador bajo la normativa NTE INEN 2415, como son el Acero ASTM A-500 Grado A y ASTM A-500 Grado C, además, se pone a prueba dos materiales de la biblioteca de aceros estructurales, que principalmente son usados para análisis de impactos por la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras de los Estados Unidos (NHTSA), proponiendo así una alternativa de diseño para la estructura del habitáculo con materiales sustitutos y con excelentes prestaciones mecánicas ante la deformación estructural después de un impacto frontal.

## 2 Materiales y Métodos

### 2.1 Metodología

La metodología implementada en el desarrollo del presente estudio es de orden cuali-cuantitativo, debido a que los resultados en esta investigación se obtuvieron datos numéricos en los diferentes ensayos de simulación asistida por computador. Estos resultados posteriormente son analizados, verificados y tabulados de acuerdo a las necesidades de detalles en los resultados. Así como también corresponde a un enfoque transversal, por el hecho en que los resultados fueron obtenidos en un determinado tiempo y con resultados inmediatos que permitieron conocer el comportamiento estructural de los materiales del vehículo ante un impacto frontal.

### 2.2 Materiales

**2.2.1 Vehículo** Para los ensayos de impacto, se experimentó con un monoplaza eléctrico de procedencia francesa, que gracias a sus prestaciones de autonomía y precio ha llegado a ser uno de los cuadríciclos más vendidos a nivel mundial.

**Tabla 1.** Características de vehículo categoría L7e

<b>CARACTERÍSTICAS :</b>	Motor eléctrico: 4/8 kW Peso en vacío (kg): 375
<b>RENDIMIENTOS :</b>	Potencia máxima (HP): 13 kW (17 HP) @ 7250 rpm Autonomía ZE (Km): 70 a 80 Torque máximo (Nm) : 57 @ 2100 rpm



**Fig. 1.** Vehículo Europeo  
**Fuente:** [5]

Este vehículo es un monoplaza eléctrico, que en el mercado automotor se encuentra disponible en dos versiones, con un motor de 4 kW y 8 kW, alcanzando una potencia máxima de 17 HP @ 7250 rpm y un torque máximo de 57 Nm @ 2100 rpm, además, llega a hasta una velocidad máxima de 80 km/h con una autonomía de 70 a 80 km [6].

**2.2.2 Ls Dyna** El software de LS-DYNA permite el análisis de deformaciones no lineales que ocurren en milisegundos, como ejemplo de aplicación en la industria automotriz es el análisis estructural de vehículos ante diferentes eventos de choque, con el programa se puede predecir con precisión las tensiones, deformaciones y tendencias de fallas en los materiales de la estructura del vehículo. Además, Ls-Dyna cuenta con una biblioteca de herramientas que facilitan la rápida evaluación numérica como: cinturones de seguridad, diferentes tipos de sensores, acelerómetros, airbags, dummy, entre otros [7].

**2.2.3. Normativa de fabricación y homologación de vehículos L7e** El Parlamento Europeo y El Consejo de la Unión Europea en su reglamento (UE) N°168/2013, estable que cada vehículo que sea introducido al mercado automotor debe estar obligado en aprobar los procesos de homologación y fabricación, con el fin de asegurar la integridad de los ocupantes, como también de reducir el índice de accidentes de tránsito en las carreteras [8].

**2.2.4 Materiales empleados para la validación del estudio** Para este estudio de caso, se realizarán cuatro simulaciones asistidas por computador asignando materiales diferentes a la estructura del vehículo, como son: acero ASTM A-500 grado A, acero ASTM A-500 grado C, este material es un acero estructural al carbono que gracias a sus propiedades y características mecánicas contempla varias aplicaciones en la industria, como la construcción de estructuras metálicas, puentes, torres de energía, carrocería de vehículos y muchas otras industrias. En el Ecuador el acero ASTM A-500 es comercializado bajo la normativa NTE INEN 2415 que regula los requisitos que deben cumplir los tubos de acero al carbono tanto negros como galvanizados para aplicaciones estructurales y usos generales [9]. A continuación, en la Tabla 2. se detallan las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de acero A-500 empleados en la simulación.

**Tabla 2.** Características mecánicas del Acero ASTM A-500

<b>Propiedades del material</b>	<b>ASTM A-500 Grado A</b>	<b>ASTM A-500 Grado C</b>
Densidad (kg/mm <sup>3</sup> )	7.83e-06	7.83e-06
Módulo de elasticidad (GPa)	207	207
Radio poisson	0.3	0.3
Límite de fluencia (GPa)	0.27	0.345
Resistencia última a la tracción (GPa)	0.31	0.435
Deformación unitaria máxima en tracción	0.25	0.21

**Fuente:** [9]

Además, se pone a prueba dos materiales que son utilizados para análisis de elementos finitos por La Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras en conjunto con el Departamento de Transporte de los Estados Unidos, que son encarados de hacer cumplir los estándares de rendimiento de los vehículos y las asociaciones con los gobiernos estatales y locales. Gracias a una simulación computacional previa la NHTSA ha logrado reducir considerablemente la tasa de muertes, lesiones y pérdidas económicas por choques de vehículos motorizados [10].

Esta simulación computacional se la realiza bajo una biblioteca de materiales que se asemejan aproximadamente en un 90% al comportamiento mecánico de los materiales reales de cada automóvil. A continuación, en la Tabla 3. se indica las propiedades mecánicas de estos aceros denominados NHTSA #1 y NHTSA #2.

**Tabla 3.** Características mecánicas del Acero NHTSA

<b>Propiedades del material</b>	<b>NHTSA #1</b>	<b>NHTSA #2</b>
Densidad (GPa)	7.89e-06	7.89e-06
Módulo de elasticidad (GPa)	210	200
Radio poisson	0.3	0.3
Límite de fluencia (GPa)	0.27	0.35
Resistencia última a la tracción	0.46 GPa	0.65 GPa
Deformación unitaria máxima en tracción	0.35	0.3

**Fuente:** [10]

### 3 Resultados y Discusión

Tras una simulación asistida por computador, se obtiene diferentes resultados que permiten analizar el comportamiento de la estructura del vehículo, frente un posible impacto frontal. En la Tabla 4. se indica un resumen de las variables aplicadas en pre procesamiento del estudio.

**Tabla 4.** Resumen del estudio

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VARIABLE</b>
Vehículo	Categoría L7e
Material	MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_024
Número de elementos	79184
Número de nodos	80207
Velocidad	50 km/h
Impactador	Barrera rígida
Tiempo de ensayo	150 ms
Time Step	4 ms
Calidad de mallado (Criterio Jacobian Ratio)	Min. Val 0.385 – Max. Val 1.0

Una vez obtenido los resultados de cada uno de los ensayos de simulación, se procede a interpretar los valores obtenidos de los elementos finitos que presentan mayor esfuerzo y deformación durante los primeros milisegundos de impactar el vehículo, realizando una comparación con cada uno de ellos, para poder determinar el material con mejores prestaciones mecánicas ante un impacto frontal.

### 3.1 Esfuerzo de Von Mises

Durante los primeros 20 ms de comenzar el ensayo de impacto se producen los más altos esfuerzos de Von Mises en los elementos finitos correspondientes a la parte frontal de la estructura del vehículo como se indica en la Figura 2.



Fig. 2. Elementos finitos de la parte frontal del vehículo

Para realizar un enfoque al comportamiento ante la tensión de Von Mises de cada material de prueba puesto en este estudio, se extrae los elementos finitos más críticos durante los 5, 10, 15 y 20 ms, en la Figura 3 se observa el comportamiento de diferentes elementos con material ASTM A-500, obteniendo siguientes resultados:

Con respecto al análisis del Acero ASTM A-500 Grado A, al comenzar el impacto del habitáculo en los primeros 4 ms el comportamiento de los cuatro elementos son parecidos, llegando a alcanzar valores aproximados a 0.28 GPa, posterior a esto el elemento E37710 tiene un incremento de su esfuerzo hasta 0.31 GPa durante los 5 ms, luego sufre caída brusca de su esfuerzo llegando hasta 0 GPa en 10 ms, considerando que la resistencia última a la tracción del material es de 0.31 GPa, esto indica que el elemento ha superado la zona plástica del material, provocando la rotura permanente del elemento y es por eso que en la gráfica se puede apreciar como decae repentinamente el esfuerzo del elemento al alcanzar los 0.31 GPa. Por otro lado, el elemento 37710 tiene un incremento de su esfuerzo durante los 10 ms alcanzando un valor de 0.3095 GPa, luego sube hasta 0.31 GPa en los 15ms alcanzando el punto de resistencia límite del material, es por eso que a partir de ese instante decae totalmente, debido a que el elemento sufre la rotura permanente. De igual manera el elemento E111710 experimenta un aumento de su esfuerzo durante los 15 ms llegando a un valor máximo de 0.31 GPa, posterior a esto el elemento colapsa y decae totalmente su esfuerzo. En cuanto al elemento E104718, después de los 4 ms tiene un incremento de su esfuerzo alcanzando los 0.31 GPa a lo largo de los 20 ms, seguidamente sufre una caída hasta los 0.25 GPa, a partir de ese instante se presenta fluctuaciones de esfuerzo entre los 0.25 GPa hasta los 0.12 GPa aproximadamente, lo que indica que el elemento no ha superado la zona plástica del material.

En cuanto al análisis del Acero ASTM A-500 Grado C, al comenzar el impacto del habitáculo en los primeros 4 ms el comportamiento de los elementos E86820, E86730

y E104780 son similares, llegando a alcanzar valores aproximados a 0.35 GPa, posterior a esto el elemento E86820 tiene un incremento de su esfuerzo hasta .4221 GPa durante los 5 ms, luego sufre caída brusca de su esfuerzo llegando hasta 0 GPa en 10 ms, considerando que la resistencia ultima a la tracción del material es de 0.425 GPa, esto indica que el elemento ha superado la zona plástica del material, provocando la rotura permanente del elemento y es por eso que en la gráfica se puede apreciar como decae repentinamente el esfuerzo del elemento al alcanzar los 0.425 GPa .De igual manera, el elemento E86730 tiene un incremento de su esfuerzo durante los 10 ms alcanzando un valor de 0.4234 GPa, luego sube hasta 0.4244 GPa en los 15ms alcanzando el punto de resistencia límite del material, es por eso que a partir de ese instante decae totalmente su esfuerzo colapsando el elemento. Por otro lado, el elemento E104780 tiene un incremento de su esfuerzo hasta los 20 ms alcanzando un valor de 0.4244 GPa, después de este punto el elemento presenta oscilaciones de esfuerzo bruscas en un rango entre 0.41 GPa y 0.26 GPa hasta los 150 ms de duración del ensayo de impacto, lo que indica que el elemento no ha superado la zona plástica del material.

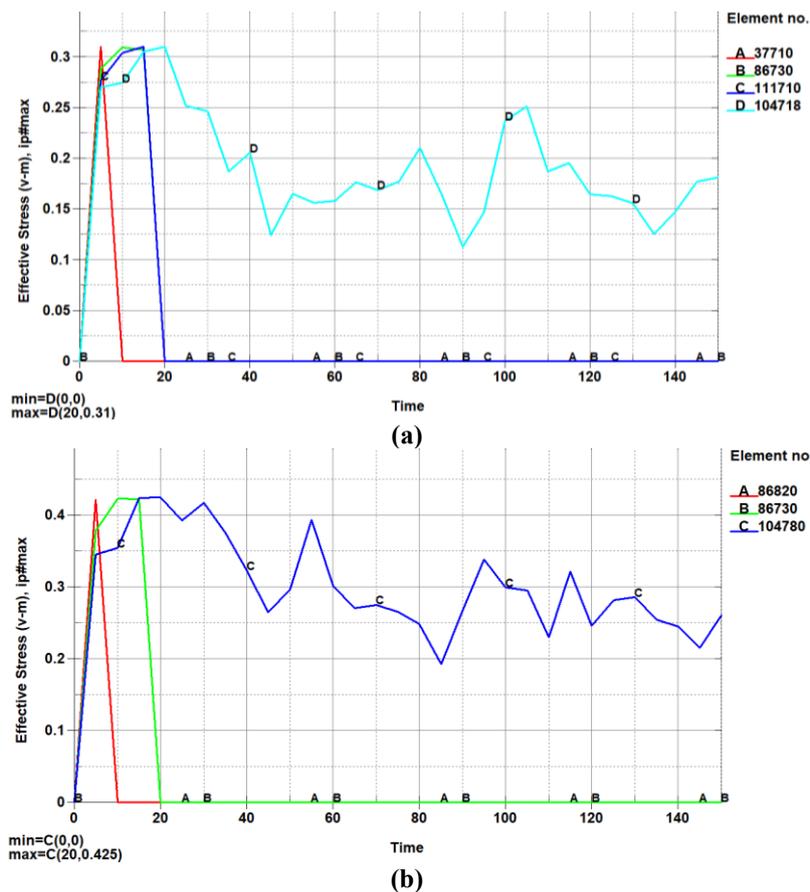
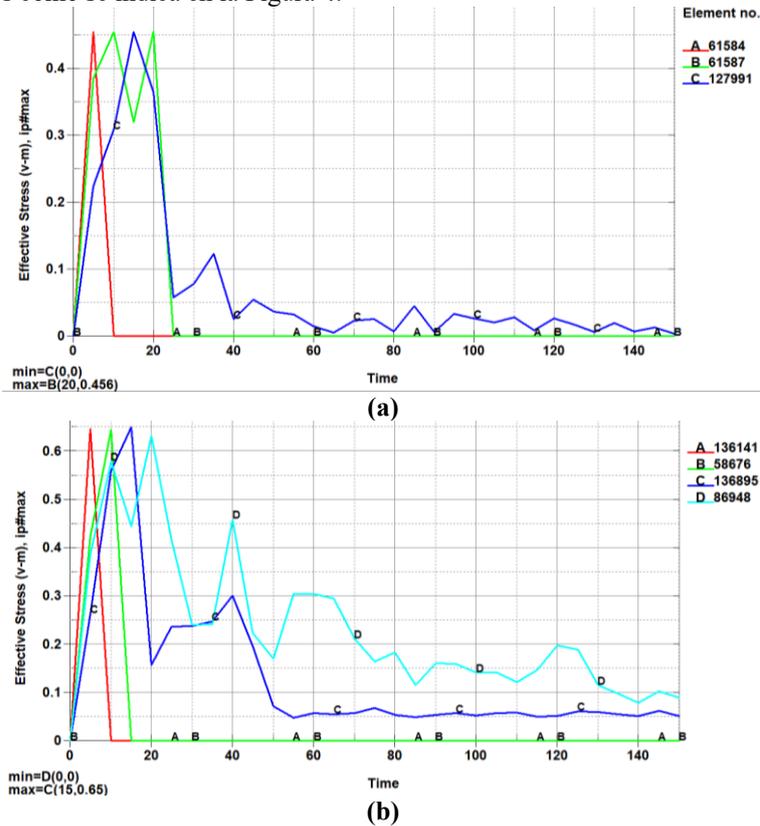


Fig. 3. Esfuerzo de Von Mises en los diferentes materiales de prueba: (a) Acero ASTM A-500 Grado A, (b) Acero ASTM A-500 Grado C

De la misma manera se extrae los elementos finitos más críticos ante el esfuerzo de Von Mises aplicando como material acero NHTSA, obteniendo los siguientes resultados como se indica en la Figura 4.



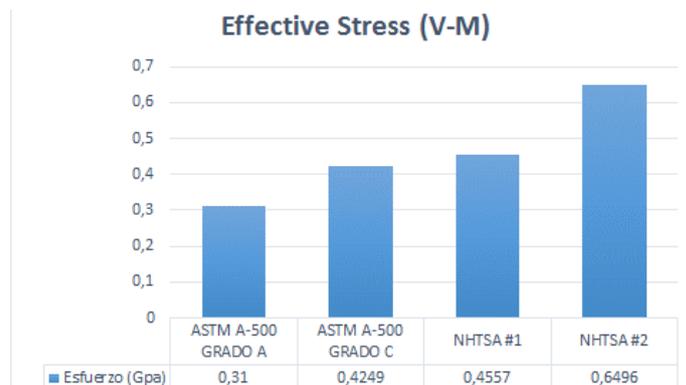
**Fig. 4.** Esfuerzo de Von Mises en los diferentes materiales de prueba: (a) Acero NHTSA #1, (b) Acero NHTSA #2

Continuando con el análisis de la tercera simulación, con respecto al Acero NHTSA #1, al comenzar el impacto del habitáculo en los primeros 4 ms el comportamiento de los elementos E61584 y E61587 son similares, llegando a alcanzar valores aproximados a 0.35 GPa, posterior a esto el elemento E61584 tiene un incremento de su esfuerzo hasta 0.4554 GPa durante los 5 ms, luego sufre caída brusca de su esfuerzo llegando hasta 0 GPa en 10 ms, considerando que la resistencia última a la tracción del material es de 0.46 GPa, esto indica que el elemento ha superado la zona plástica del material, provocando la rotura permanente del elemento y es por eso que en la gráfica se puede apreciar como decae repentinamente el esfuerzo del elemento al alcanzar valores próximos a 4.6 GPa. De igual manera, el elemento E61587 tiene un incremento de su esfuerzo durante los 10 ms alcanzando un valor de 0.4553 GPa, luego sufre una breve caída hasta 0.32 GPa en los 15ms, posterior a esto sube nuevamente su esfuerzo llegando a 0.4557 GPa a los 20 ms alcanzando el punto de resistencia límite del material, es por eso que a partir de ese

instante decae totalmente su esfuerzo colapsando el elemento. Por otro lado, el elemento E127991 tiene un incremento de su esfuerzo hasta los 15 ms alcanzando un valor de 0.4244 GPa, después de este punto el esfuerzo del elemento cae hasta los 0.06 GPa, para posteriormente pasar a experimentar oscilaciones de esfuerzo, en un rango aproximado entre los 0.05 GPa y 0.01 GPa durante los 150 ms de ensayo computacional, lo que indica que el elemento no ha superado la zona plástica del material.

Para finalizar con el análisis de la cuarta simulación, con respecto al Acero NHTSA #2, al comenzar el impacto del habitáculo en los primeros 5 ms el elemento E136141 alcanza los 0.6470 GPa y posteriormente sufre caída brusca de su esfuerzo llegando hasta 0 GPa en 10 ms, considerando que la resistencia última a la tracción del material es de 0.65 GPa, esto indica que el elemento ha superado la zona plástica del material, provocando la rotura permanente del elemento y es por eso que en la gráfica se puede apreciar como decae repentinamente el esfuerzo del elemento al alcanzar valores próximos a 0.65 GPa. De igual manera, el elemento E58676 tiene un incremento de su esfuerzo durante los 10 ms alcanzando un valor de 0.6457 GPa llegando a alcanzar el punto de resistencia límite del material, es por eso que a partir de ese instante decae totalmente su esfuerzo colapsando el elemento. Por otro lado, el elemento E136895 tiene un incremento de su esfuerzo hasta los 15 ms alcanzando un valor de 0.6496 GPa, después de este punto el esfuerzo del elemento cae hasta los 0.15 GPa a lo largo de los 20 ms y seguidamente sufre un nuevo incremento alcanzando los 0.3 GPa en los 40 ms, para posteriormente decaer y pasar a experimentar oscilaciones de esfuerzo aproximadas a 0.05 GPa durante los 150 ms de ensayo computacional, lo que indica que el elemento no ha superado la zona plástica del material.

La Figura 5 se resume los esfuerzos máximos presentados durante cada ensayo de impacto frontal, en la cual se puede apreciar como los cuatro materiales de prueba alcanzan el valor de resistencia límite a la tracción en los primeros 20 ms de haber comenzado el ensayo computacional.



**Fig. 5.** Esfuerzo máximo de Von Mises – 4 simulaciones

Por lo tanto, de los resultados obtenidos se puede concluir que la mejor opción como material para la estructura del habitáculo es el Acero NHTSA #2, por el motivo

que tiene mayor capacidad de resistir esfuerzos ante un impacto, para tener una aceptación más clara se procede a analizar el comportamiento de los materiales ante la deformación en el siguiente punto.

### 3.2 Deformación del Habitáculo

Para realizar un enfoque a la deformación total de la estructura, se considera analizar el comportamiento de dos elementos finitos, uno ubicado en la parte frontal del vehículo y el otro en la parte posterior, estos elementos son E53319 y E36443 como se indica en la Figura 6.



Fig. 6. Elementos finitos para análisis de desplazamiento

Después de los 150 ms de duración del ensayo de impacto, la estructura del vehículo alcanza una deformación diferente en cada simulación, mediante la diferencia entre la longitud inicial del vehículo y la longitud final después del impacto se obtiene una deformación general de cada simulación, obteniendo los siguientes resultados como se indica en la Figura 7:

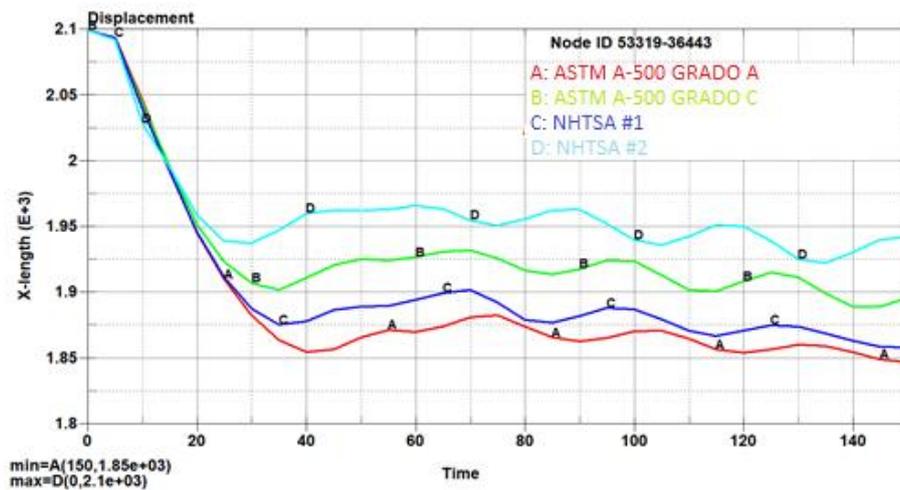


Fig. 7. Deformación del habitáculo – 4 simulaciones

Con respecto al análisis del acero ASTM A-500 Grado A, al momento de impactar el vehículo ante la barrera rígida los elementos finitos de cada extremo del habitáculo experimentan una variación entre su distancia, en tiempo 0 ms es decir antes de que el vehículo impacte se tiene una distancia inicial de 2101.45 mm, la cual fluctúa durante todo el ensayo de impacto llegando a alcanzar una distancia final de 1883.15 mm, lo que indica que una vez terminada la simulación se tiene una diferencia de 218.3 mm, que es la deformación que sufre la estructura después del impacto, de manera general se podría decir que se tiene un 10.38% de deformación en toda la carrocería.

En cuanto al análisis del acero ASTM A-500 Grado C, al instante de impactar el vehículo ante la barrera rígida los elementos finitos de cada extremo del habitáculo experimentan una variación entre su distancia, en tiempo 0 ms es decir antes de que el vehículo impacte se tiene una distancia inicial de 2101.45 mm, la cual fluctúa durante todo el ensayo de impacto llegando a alcanzar una distancia final de 1942.58 mm, lo que indica que una vez terminada la simulación se tiene una diferencia de 158.87 mm, que es la deformación que sufre la estructura después del impacto, de manera general se podría decir que se tiene un 7.56% de deformación en toda la carrocería.

Continuando con el análisis de deformación estructural, el comportamiento del acero NHTSA #1, al instante de impactar el vehículo ante la barrera rígida los elementos finitos de cada extremo del habitáculo experimentan una variación entre su distancia, en tiempo 0 ms es decir antes de que el vehículo impacte se tiene una distancia inicial de 2101.45 mm, la cual fluctúa durante todo el ensayo de impacto llegando a alcanzar una distancia final de 1903.3 mm, lo que indica que una vez terminada la simulación se tiene una diferencia de 198.15 mm, que es la deformación que sufre la estructura después del impacto, de manera general se podría decir que se tiene un 9.42% de deformación en toda la carrocería.

Para finalizar con el análisis de deformación estructural de la cuarta simulación, el comportamiento del acero NHTSA #2, al instante de impactar el vehículo ante la barrera rígida los elementos finitos de cada extremo del habitáculo experimentan una variación entre su distancia, en tiempo 0 ms es decir antes de que el vehículo impacte se tiene una distancia inicial de 2101.45 mm, la cual fluctúa durante todo el ensayo de impacto llegando a alcanzar una distancia final de 1987.72 mm, lo que indica que una vez terminada la simulación se tiene una diferencia de 113.73 mm, que es la deformación que sufre la estructura después del impacto, de manera general se podría decir que se tiene un 5.41% de deformación en toda la carrocería.

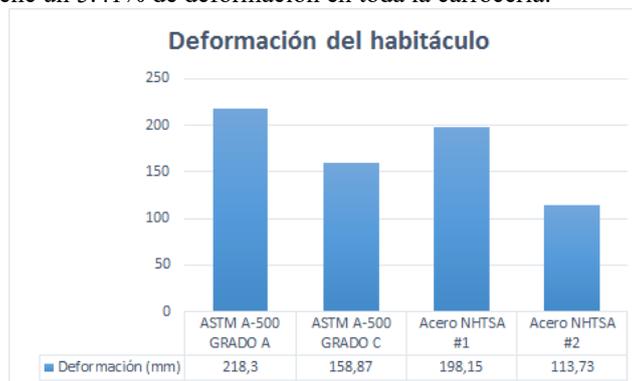
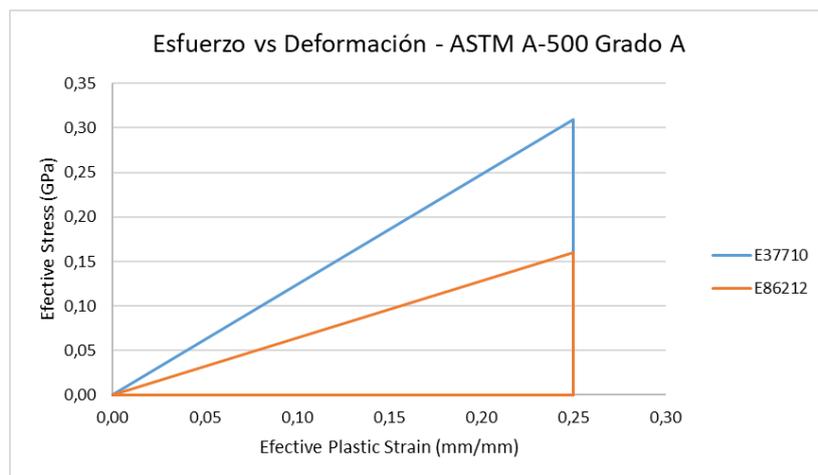


Fig. 8. Comparativa de resultados de Deformación – 4 simulaciones

La Figura 8 resume resultados obtenidos de las cuatro simulaciones con respecto a la deformación total del habitáculo, en la cual se puede concluir que el Acero NHTSA #2 es el material con mejor resistencia ante las deformaciones de un impacto, los resultados indican que su deformación final alcanza los 113.73 mm, seguido del Acero Estructural ASTM A-500 Grado C que llega hasta los 198.15 mm, lo que indica que también es un material con una alta resistencia ante las deformaciones.

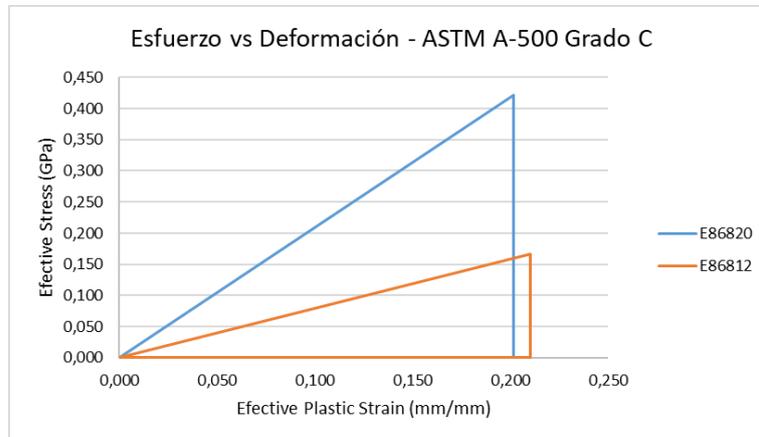
### 3.3 Análisis de Esfuerzo vs Deformación

Durante el ensayo computacional, los elementos finitos de cada uno de los materiales puestos a prueba presentan un comportamiento plástico diferente, en la Figura 9, 10, 11 y 12 se hace una comparación entre Effective Stress vs Effective Strain de cada uno de ellos, haciendo un enfoque a los elementos finitos que presentan los más altos valores de esfuerzo y deformación en el instante exacto de iniciar la colisión del vehículo, obteniendo los siguientes resultados:



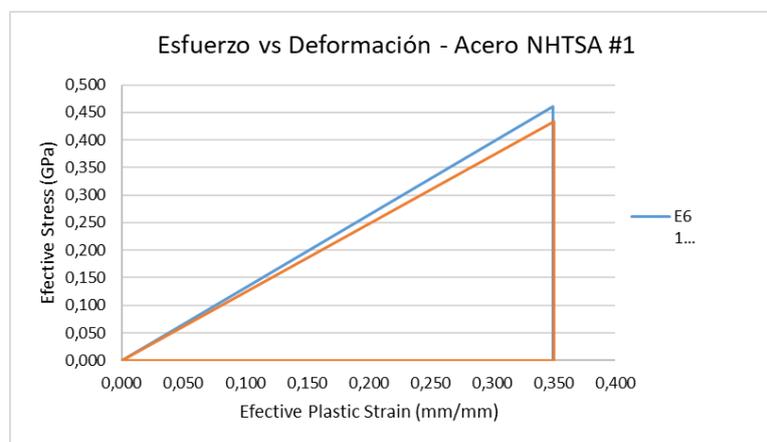
**Fig. 9.** Esfuerzo vs Deformación – Material Acero ASTM A-500 Grado A

Con respecto al primer ensayo de simulación de impacto utilizando un Acero ASTM A-500 de Grado A, en los primeros 5 ms de haber comenzado el ensayo de impacto el elemento E37710 alcanza el límite de resistencia a la tracción del material, es por eso que al alcanzar los 0.31 GPa la gráfica del elemento colapsa, indicando que se ha producido la rotura permanente del elemento. Por otro lado, el elemento E86212 durante los primeros 5 ms alcanza la deformación unitaria máxima del material, es por eso que al llegar a los 0.25 mm/mm la gráfica del elemento colapsa aun sin haber alcanzado los 0.31 GPa de esfuerzo máximo, lo que indica que de igual manera el elemento sufre la rotura permanente durante la simulación computacional.



**Fig. 10.** Esfuerzo vs Deformación – Material Acero ASTM A-500 Grado C

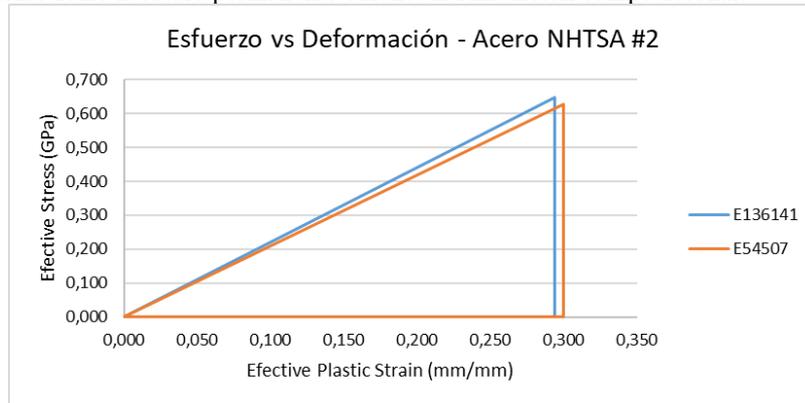
En cuanto al segundo ensayo de simulación de impacto utilizando un Acero ASTM A-500 de Grado C, en los primeros 5 ms de haber comenzado el ensayo de impacto el elemento E86820 alcanza el límite de resistencia a la tracción del material, es por eso que al alcanzar los 0.42 GPa la gráfica del elemento colapsa, indicando que se ha producido la rotura permanente del elemento. Por otro lado, el elemento E86812 durante los primeros 5 ms alcanza la deformación unitaria máxima del material, es por eso que al llegar a los 0.21 mm/mm la gráfica del elemento colapsa aun sin haber alcanzado los 0.42 GPa de esfuerzo máximo, lo que indica que de igual manera el elemento sufre la rotura permanente durante la simulación computacional.



**Fig. 11.** Esfuerzo vs Deformación – Material Acero NHTSA #1

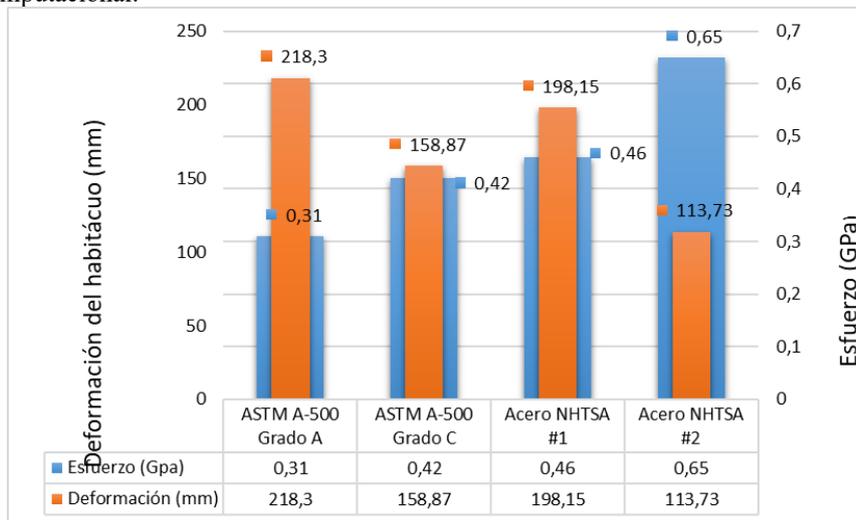
Continuando con el análisis del tercer ensayo de simulación de impacto, con respecto al Acero NHTSA #1, en los primeros 5 ms de haber comenzado el ensayo de impacto el elemento E61581 alcanza el límite de resistencia a la tracción del material, es por eso que al alcanzar los 0.46 GPa la gráfica del elemento colapsa, indicando que se ha producido la rotura permanente del elemento. Por otro lado, el elemento E54507

durante los primeros 5 ms alcanza la deformación unitaria máxima del material, es por eso que al llegar a los 0.35 mm/mm la gráfica del elemento colapsa aun sin haber alcanzado los 0.46 GPa de esfuerzo máximo, lo que indica que de igual manera el elemento sufre la rotura permanente durante la simulación computacional.



**Fig. 12.** Esfuerzo vs Deformación – Material Acero NHTSA #1

Para finalizar con el análisis del cuarto ensayo de simulación de impacto, con respecto al Acero NHTSA #2, en los primeros 5 ms de haber comenzado el ensayo de impacto el elemento E136141 alcanza el límite de resistencia a la tracción del material, es por eso que al alcanzar los 0.65 GPa la gráfica del elemento colapsa, indicando que se ha producido la rotura permanente del elemento. Por otro lado, el elemento E54507 durante los primeros 5 ms alcanza la deformación unitaria máxima del material, es por eso que al llegar a los 0.30 mm/mm la gráfica del elemento colapsa aun sin haber alcanzado los 0.65 GPa de esfuerzo máximo, lo que indica que de igual manera el elemento sufre la rotura permanente durante la simulación computacional.



**Fig. 13.** Esfuerzo vs Deformación – Material Acero NHTSA #1

La Figura 13 resume los resultados obtenidos a lo largo de este capítulo, indicando los valores máximos alcanzados durante el ensayo computacional, resultados provenientes de los elementos finitos que presentan mayor relevancia en la simulación de impacto del vehículo.

## 4 Resultados y Discusión

- Se generó un modelo computacional que representa un escenario real de un impacto frontal de un vehículo monoplaza eléctrico, asignando todas las propiedades físicas y mecánicas del sistema mediante software de ingeniería asistida por computador CAD-CAE.
- Se diseñó y preparó el modelo de elementos finitos de la estructura del habitáculo ante un impactador de barrera rígida, considerando estándares de Mesh Quality, selección de material, control de energías y condiciones de frontera, con el fin de obtener una validación de resultados lo más cercanos a un ensayo real.
- Se realizó cuatro ensayos de impacto, a una velocidad de 50 km/h como lo describe la normativa EURO NCAP en su protocolo de evaluación para cuadríciclos pesados, logrando evaluar la seguridad del vehículo, en términos de esfuerzo de Von Mises, deformación total y deformación de Effective Plastic Strain.
- Se evaluó el desempeño de la estructura del vehículo en ensayo computacional mediante la metodología de análisis simplificada de elementos finitos, utilizando como materiales de prueba dos aceros estructurales que se encuentran disponibles en el Ecuador bajo la normativa NTE INEN 2415, como son el Acero ASTM A-500 Grado A y ASTM A-500 Grado C, además, se puso a prueba dos aceros estructurales de la biblioteca de materiales de la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras de los Estados Unidos (NHTSA), denominados en este estudio con las siglas acero NHTSA #1 y acero NHTSA #2.
- En este caso de estudio se comprobó que los primeros 20 ms son los más cruciales durante un impacto frontal, en el transcurso de este tiempo se logró evidenciar mediante tablas de análisis de esfuerzo de Von Mises como los elementos finitos de la estructura de la parte frontal del automóvil, alcanzan los valores de resistencia límite a la tracción del material provocando en algunos casos el colapso o rotura de dichos elementos.
- Después de los 150 ms de simulación asistida por computador, se logró evidenciar una gran variación en cuanto a la deformación total de la estructura del vehículo en cada una de las simulaciones de ensayo aplicando

los distintos materiales de prueba, alcanzando una deformación máxima de 218.3 mm utilizando un acero ASTM A-500 de Grado A, seguido del acero NHTSA #1 que alcanza un valor de 198.15 mm, al aplicar un acero ASTM A-500 de Grado C se logró obtener una deformación de 158.87 mm y al utilizar un acero NHTSA #2 se obtuvo una deformación general de 113,73 mm, por esta razón este acero es considerado en este estudio como el material con mejores características de resistencia ante las deformaciones presentadas en un impacto frontal.

- Mediante un análisis de Effective Plastic Strain vs Effective Stress, se logró reflejar el comportamiento de los materiales puestos a prueba en este estudio, logrando evaluar los efectos del impacto frontal en los elementos finitos más críticos del vehículo, en donde se logró evidenciar como los materiales de prueba alcanzan los valores de resistencia límite, provocando la rotura permanente en dichos elementos, ya sea por sobrepasar el límite de esfuerzo a la tracción o por alcanzar el límite de deformación unitaria máxima, todo esto en los primeros 20 ms de haber iniciado el ensayo de impacto.
- Mediante la evaluación y análisis de las zonas más afectadas del vehículo durante cada simulación asistida por computador, se determinó que el acero NHTSA #1 seguido del acero ASTM A-500 de Grado C, son los materiales presentan un comportamiento ante los fenómenos de energía presentados durante una colisión de impacto frontal, alcanzando un valor de  $1.16 \times 10^5$  kN-mm y  $1.08 \times 10^5$  kN-mm respectivamente, brindando así una mejor seguridad y protección al conductor del vehículo, siempre y cuando con el uso obligatorio del cinturón de seguridad.
- Se validó los resultados obtenidos en este estudio mediante el método de Energy Balance, en el cual la energía de Hourglass debe mantenerse en un valor menor al 10% de la energía interna, obteniendo un margen de error en cada simulación del 4.75%, 4.89%, 4.86% y 8.15% respectivamente, valores que se encuentran por debajo del límite del control de Hourglass, aceptable en un análisis estructural.

## Referencias

- [1] V. Diermann and P. Middendorf, “Automatic Evaluation of Structural Integrity in Crashworthiness Simulations Using Image Analysis,” *Int. J. Automot. Technol.*, vol. 20, no. 1, pp. 65–72, 2019, doi: 10.1007/s12239-019-0006-y.
- [2] L. Berzi, N. Baldanzini, D. Barbani, M. Delogu, R. Sala, and M. Pierini, “Simulation of crash events for an electric four wheel vehicle,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 12, pp. 249–264, 2018, doi: 10.1016/j.prostr.2018.11.090.
- [3] AEADE, “En tres provincias se concentra la mayor compra de carros eléctricos,” *El Universo*, pp. 10–13, 2020, [Online]. Available: <https://www.eluniverso.com/noticias/2020/08/12/nota/7939423/mercado-vehiculos-electricos-ecuador-2020>.
- [4] V. Torres and K. Carrillo, “VALORACIÓN DE LAS DEFORMACIONES EN CARROCERÍAS DE VEHÍCULOS L7E.,” *Univ. Int. del Ecuador*, 2021, Accessed: Jan. 28, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/4802/1/T-UIDE-0250.pdf>.
- [5] infotaller.tv, “Renault desarrolla un eléctrico sin piezas de carrocería,” Jan. 10, 2017. [https://www.infotaller.tv/chapa\\_y\\_pintura/Renault-desarrolla-electrico-piezas-carroceria\\_0\\_1071492870.html](https://www.infotaller.tv/chapa_y_pintura/Renault-desarrolla-electrico-piezas-carroceria_0_1071492870.html) (accessed Mar. 18, 2021).
- [6] Renault, “FICHA TÉCNICA Renault TWIZY,” 2017. <https://www.renault.com.co/electricos/twizy/especificaciones.html> (accessed Jul. 20, 2021).
- [7] R. Vetturazzi, “Ventajas de la integración de LS-DYNA con las herramientas de Ansys,” May 06, 2020. <https://www.esss.co/es/blog/ventajas-de-la-integracion-de-ls-dyna-con-las-herramientas-de-ansys/> (accessed Mar. 21, 2021).
- [8] REGLAMENTO (UE) No 168/2013 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, *Requisitos de homologación de tipo y vigilancia del mercado aplicables a motocicletas, ciclomotores y cuatriciclos en la Unión Europea*. Diario Oficial de la Unión Europea, 2013.
- [9] INEN, “TUBOS DE ACERO AL CARBONO SOLDADOS PARA APLICACIONES ESTRUCTURALES Y USOS GENERALES. REQUISITOS,” Quito, 2016. Accessed: Oct. 12, 2021. [Online]. Available: [https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nre\\_inen\\_2415-2.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nre_inen_2415-2.pdf).
- [10] NHTSA, “Crash Simulation Vehicle Models,” 2021. <https://www.nhtsa.gov/about-nhtsa> (accessed Oct. 13, 2021).