



“Modelado de la carrocería del vehículo escolar Volkswagen 9-150 IBIMCO para simular un impacto frontal y posterior”

Bolagay Marcillo, Diego Gaspar y Quishpe Urrutia, Job Nicolás

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Trabajo de Integración Curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz

Ing. Mena Palacios, Jorge Stalin

10 de agosto del 2022

Reporte de verificación de contenido



1 TESIS BOLAGAY -QUISHPE (1).pdf

Scanned on: 18:4 August 9, 2022 UTC



Identical Words	481
Words with Minor Changes	225
Paraphrased Words	463
Omitted Words	0



El modo de acceso al contenido por:
JORGE STALIN
MENA PALACIOS



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

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **"Modelado de la carrocería del vehículo escolar Volkswagen 9-150 IBIMCO para simular un impacto frontal y posterior"** fue realizado por los señores **Bolagay Marcillo, Diego Gaspar y Quishpe Urrutia, Job Nicolás**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenido; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 10 de agosto del 2022

Firma:



firmado electrónicamente por:
**JORGE STALIN
MENA PALACIOS**

.....
Ing. Mena Palacios, Jorge Stalin

C.C.: 1803725900



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Bolagay Marcillo, Diego Gaspar y Quishpe, Urrutia Job Nicolás**, con cédulas de ciudadanía n° 1723765853 y 1724421753, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Modelado de la carrocería del vehículo escolar Volkswagen 9-150 IBIMCO para simular un impacto frontal y posterior** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 10 de agosto del 2022

Firma

Bolagay Marcillo, Diego Gaspar

C.C.: 1723765853

Quishpe Urrutia, Job Nicolás

C.C.: 1724421753



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

Autorización de Publicación

Nosotros, **Bolagay Marcillo, Diego Gaspar y Quishpe Urrutia, Job Nicolás** con cédulas de ciudadanía n° 1723765853 y 1724421753, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Modelado de la carrocería del vehículo escolar Volkswagen 9-150 IBIMCO para simular un impacto frontal y posterior** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 10 de agosto del 2022

Firma

Bolagay Marcillo, Diego Gaspar

C.C.: 1723765853

Quishpe Urrutia, Job Nicolás

C.C.: 1724421753

Dedicatoria

El presente proyecto de investigación se lo dedico principalmente a Dios, que me ha guiado desde el inicio de mi formación académica y que me ha enseñado el valor de la perseverancia para alcanzar este gran triunfo, que me ha llenado de fuerza y alegría para surgir incluso en los momentos de mayor dificultad.

Desde lo más profundo de mi corazón este logro va dedicado a mis padres Isabel Marcillo y Gaspar Bolagay, sin ellos nada de esto hubiese sido posible ya que a través de su ejemplo y educación han instruido en mí el valor de la humildad, respeto, responsabilidad, honestidad y puntualidad, herramientas que han sido de gran ayuda en esta etapa de mi vida.

A mis hermanos, Patricio, Iván e Isabel, que siempre he recibido su ayuda de forma incondicional, brindándome palabras de aliento en todo momento y han sido la base de fortaleza en el transcurso de este arduo camino.

A todos mis amigos, en especial a Andy, Alicia y Shirley, porque con ellos conocí el verdadero significado de la amistad y siempre me han brindado su cariño que han llenado de felicidad mi vida.

BOLAGAY MARCILLO DIEGO GASPAR

Agradecimiento

Agradezco a Dios por brindarme la salud y protección que han permitido que logre culminar un objetivo más en mi vida académica.

Quiero expresar un inmenso agradecimiento a mis padres Isabel y Gaspar, porque son los cimientos de mi vida, además han velado por mi desde el día de mi nacimiento y que se han esforzado para que pueda cumplir esta meta de preparación académica.

Les doy las gracias a mis hermanos Patricio, Iván e Isabel, porque son un ejemplo de superación personal, esfuerzo constante y que a través de ustedes he podido proyectarme a quien yo quiero ser.

Un agradecimiento muy especial a mi colaborador investigador Nicolás que ha sido como un hermano ya que hemos compartido aulas desde el inicio de nuestras carreras y afrontado cada etapa juntos para alcanzar este objetivo.

Agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, y a los docentes de la Carrera de Ingeniería Automotriz, con quienes he formado una grandiosa amistad y me han transmitido a través de sus cátedras, conocimientos y herramientas muy importantes para ser un buen profesional, pero en especial un excelente ser humano.

Expreso mi mayor agradecimiento al Ingeniero Stalin Mena, docente de la Carrera de Ingeniería Automotriz, quien ha sido un mentor desde el inicio de esta etapa, quien me ha brindado siempre su mano y abierto las puertas para poder iniciar y culminar el presente proyecto de investigación.

BOLAGAY MARCILLO DIEGO GASPAR

Dedicatoria

El presente proyecto de investigación se lo dedico a mis padres Irma Urrutia y Germán Quishpe quienes me han formado como una persona de principios y valores, que han dado todo de sí para verme triunfar, brindándome su apoyo incondicional en cada una de mis metas planteadas, que gracias a ellos ha sido posible culminar esta etapa de mi vida.

A mi hermano que me ha brindado su apoyo y ha aportado con su granito de arena para formarme como profesional y, por último, pero no menos importante a Dios quien me ha cuidado, guiado y bendecido en todo momento.

QUISHPE URRUTIA JOB NICOLÁS

Agradecimiento

Primeramente, agradezco a mis padres por todo su sacrificio y apoyo incondicional, por los valores impartidos, consejos y enseñanzas, quienes son un pilar fundamental y que gracias a ellos he logrado cumplir esta etapa de mi formación académica, ya que han sido mi fortaleza y motivación para seguir adelante y alcanzar ese logro.

Agradezco a Dios por brindarme salud y sabiduría para lograr culminar esta etapa estudiantil.

Agradezco a mi hermano, amigos y familiares quienes han formado parte de este proceso de formación académica y aquellos que me han redireccionado en mi etapa estudiantil siendo de apoyo y motivación para seguir adelante.

Agradezco a la carrera de Ingeniería Automotriz por brindarme un gran conocimiento y gratas experiencias.

Finalmente agradezco al tutor de la presente investigación Ing. Stalin Mena por su colaboración, amistad y compartir sus conocimientos durante mi formación académica.

QUISHPE URRUTIA JOB NICOLÁS

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula	1
Reporte de verificación de contenido	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Dedicatoria.....	8
Agradecimiento	9
Índice de contenidos	10
Índice de figuras.....	16
Índice de tablas.....	20
Índice de ecuaciones	21
Resumen	22
Abstract.....	23
Capítulo I: Planteamiento del problema de investigación	24
Antecedentes Investigativos.....	24
Planteamiento del problema.....	26
Descripción detallada del proyecto.....	28
Justificación e importancia	29

	11
Objetivos del proyecto.....	30
<i>Objetivo general</i>	30
<i>Objetivos específicos</i>	30
Metas	31
Hipótesis	31
VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN.....	32
<i>Variables independientes</i>	32
<i>Variables dependientes</i>	32
Metodología de desarrollo del proyecto.....	33
<i>Método documental-bibliográfico</i>	33
<i>Método experimental</i>	33
<i>Metodología de investigación</i>	33
<i>Método analítico</i>	33
Capítulo II: Fundamento teórico	36
Tipos de buses para el transporte público en Ecuador	36
Clasificación de los buses de transporte público de acuerdo a la carrocería	38
<i>Buses urbanos</i>	38
<i>Buses de transporte escolar</i>	39
<i>Buses de transporte interprovincial e intraprovincial</i>	39
Características dimensionales del bus escolar	40
Carrocerías	41

	12
<i>Definición de carrocería</i>	41
<i>Partes de la carrocería de buses</i>	42
<i>Seguridad en carrocerías de buses</i>	45
<i>El habitáculo</i>	45
<i>Zona de supervivencia</i>	46
Zonas de absorción de impactos.....	48
Normativas para el diseño de carrocerías	48
<i>Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1323</i>	49
<i>Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 041</i>	49
Pruebas de impacto	49
<i>Impacto frontal</i>	49
<i>Impacto posterior</i>	50
Normativa Internacional para simulación de impacto	51
<i>Regulación ECE R94</i>	52
<i>Regulación ECE R95</i>	53
Materiales utilizados en la fabricación de carrocerías	54
<i>Especificaciones de los perfiles</i>	55
Características mecánicas del material.....	55
<i>Resistencia a la tracción</i>	55
<i>Esfuerzo a la fluencia</i>	56
<i>Elongación</i>	57

	13
Software de diseño y simulación	57
<i>Sistema CAD</i>	57
<i>Sistema CAE</i>	58
Mallado por el método de elementos finitos (MEF).....	58
<i>Mallado</i>	60
<i>Calidad del Mallado</i>	61
<i>Cociente Jacobiano</i>	61
Energías de deformación	62
Elementos tipo SHELL	62
CAPITULO III: Ingeniería asistida por computador aplicado a la carrocería del bus.....	63
Construcción del modelo de la carrocería del bus escolar.....	63
<i>Modelado de la carrocería</i>	63
<i>Modelado de la zona de seguridad</i>	67
Etapa de pre-procesamiento	67
<i>Generación de uniones</i>	68
<i>Generación de malla</i>	70
<i>Calidad de Malla</i>	72
<i>Fijaciones</i>	74
<i>Uniones del chasis</i>	75
<i>Unidades usadas en el software</i>	76
<i>Asignación del material</i>	77

	14
<i>Secciones</i>	80
<i>Barrera para colisión frontal</i>	83
Condiciones de frontera para impacto frontal.....	86
<i>Asignación de velocidad inicial</i>	87
<i>Barrera móvil para impacto posterior</i>	88
<i>Condiciones de frontera para impacto posterior</i>	89
<i>Velocidad de impacto posterior</i>	89
Control de energía de Hourglass.....	90
Tiempo de simulación.....	91
Solución del código K y compilación de la simulación.....	91
Validación de resultados por medio de energía de Hourglass.....	92
Deformación.....	93
Capítulo IV: Resultados y discusión.....	94
Resultados obtenidos del ensayo de impacto frontal.....	94
<i>Esfuerzo de Von Mises (Esfuerzo efectivo)</i>	95
<i>Invasión de la zona de supervivencia en el impacto frontal</i>	97
<i>Balance de energías en el impacto frontal</i>	100
<i>Control de energía de Hourglass del impacto frontal</i>	100
Resultados obtenidos del ensayo de impacto posterior.....	103
<i>Esfuerzo efectivo (Esfuerzo de Von Mises)</i>	104
<i>Invasión de la zona de supervivencia en el impacto posterior</i>	106

<i>Balance de energías en el impacto posterior</i>	108
<i>Control de energía de Hourglass para el impacto posterior</i>	110
Capítulo V: Marco Administrativo	113
Recursos humanos	113
Recursos tecnológicos	113
Presupuesto.....	115
Financiamiento.....	115
Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones	116
Conclusiones	116
Recomendaciones	118
Bibliografía.....	120
Anexos.....	125

Índice de figuras

Figura 1 <i>Árbol de problemas</i>	26
Figura 2 <i>Microbús</i>	36
Figura 3 <i>Minibús</i>	37
Figura 4 <i>Bus</i>	37
Figura 5 <i>Bus urbano</i>	38
Figura 6 <i>Bus escolar</i>	39
Figura 7 <i>Bus interprovincial</i>	40
Figura 8 <i>Estructura de un minibús escolar</i>	42
Figura 9 <i>Componentes de una carrocería</i>	43
Figura 10 <i>Panel frontal</i>	44
Figura 11 <i>Panel lateral y posterior</i>	44
Figura 12 <i>Plataforma del piso</i>	45
Figura 13 <i>Vista transversal del espacio de supervivencia</i>	47
Figura 14 <i>Vista longitudinal del espacio de supervivencia</i>	47
Figura 15 <i>Prueba de impacto frontal</i>	50
Figura 16 <i>Prueba de impacto posterior</i>	50
Figura 17 <i>Ejemplo de impacto frontal</i>	52
Figura 18 <i>Prueba de impacto posterior</i>	53
Figura 19 <i>Clasificación y propiedades de los perfiles estructurales</i>	54
Figura 20 <i>Curva Tensión - Deformación</i>	56
Figura 21 <i>Curva Esfuerzo a la fluencia - Deformación</i>	56
Figura 22 <i>Curva Tensión - Alargamiento</i>	57

Figura 23 Estructura discreta y estructura continua.....	59
Figura 24 Nodos y elementos que conforman una malla.....	60
Figura 25 Cociente Jacobiano para cuadriláteros y triángulos.....	61
Figura 26 Energía de Hourglass.....	62
Figura 27 Mallado tipo Shell.....	62
Figura 28 Proceso de simulación de elementos finitos.....	63
Figura 29 Modelado de la carrocería del bus escolar.....	64
Figura 30 Dimensiones del chasis Volkswagen 9-150.....	65
Figura 31 Modelado final del bus escolar.....	66
Figura 32 Modelado de la Zona de Supervivencia.....	67
Figura 33 Pre-procesamiento del modelado del bus.....	67
Figura 34 Elementos de la estructura sin unión.....	68
Figura 35 Generación de uniones.....	69
Figura 36 Elementos unidos.....	69
Figura 37 Generación de malla.....	70
Figura 38 Tamaños de malla en la estructura del minibús.....	71
Figura 39 Calidad de mallado.....	73
Figura 40 Unión entre las ballestas y el chasis.....	74
Figura 41 Operación de ENTITY CREATION.....	75
Figura 42 Unión de los componentes del minibús.....	75
Figura 43 Curva esfuerzo-deformación del acero estructural ASTM A-500.....	78
Figura 44 Carta de control "024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY".....	79
Figura 45 Asignación de la densidad del diesel.....	80
Figura 46 Espesor utilizados en la estructura del bus.....	80

Figura 47 <i>Asignación de material y espesor a elementos del minibús</i>	81
Figura 48 <i>Peso del chasis modelado del minibús Volkswagen 9-150</i>	83
Figura 49 <i>Barrera deformable para el ensayo de colisión frontal</i>	84
Figura 50 <i>Creación de la barrera fija</i>	85
Figura 51 <i>Elementos necesarios para el impacto frontal</i>	86
Figura 52 <i>Contacto entre el bus y la barrera fija</i>	87
Figura 53 <i>Velocidad de impacto frontal</i>	87
Figura 54 <i>Barrera móvil para impacto posterior</i>	88
Figura 55 <i>Contacto entre el bus y la barrera móvil</i>	89
Figura 56 <i>Velocidad de impacto posterior</i>	90
Figura 57 <i>Control de Hourglass</i>	90
Figura 58 <i>Tiempo de simulación de impacto frontal</i>	91
Figura 59 <i>Compilación del código K en el software CAE</i>	92
Figura 60 <i>Vista lateral del Impacto frontal del minibús escolar</i>	94
Figura 61 <i>Vista isométrica del impacto frontal</i>	95
Figura 62 <i>Esfuerzo efectivo de la estructura</i>	96
Figura 63 <i>Selección de elementos críticos</i>	96
Figura 64 <i>Gráfica de Esfuerzo de Von Mises vs Tiempo</i>	97
Figura 65 <i>Longitud inicial de la estructura antes del impacto frontal</i>	98
Figura 66 <i>Longitud final de la estructura después del impacto frontal</i>	98
Figura 67 <i>Gráfica Deformación vs Tiempo</i>	99
Figura 68 <i>Energías producidas en el impacto frontal</i>	100
Figura 69 <i>Control de Energía de Hourglass</i>	101
Figura 70 <i>Energía de Hourglass</i>	101

Figura 71 <i>Energía Interna</i>	102
Figura 72 <i>Vista lateral del Impacto frontal del bus escolar</i>	103
Figura 73 <i>Vista isométrica del impacto frontal</i>	103
Figura 74 <i>Esfuerzo efectivo de la estructura</i>	104
Figura 75 <i>Selección de elementos críticos</i>	105
Figura 76 <i>Gráfica de Esfuerzo de Von Mises vs Tiempo</i>	105
Figura 77 <i>Longitud inicial de la estructura</i>	106
Figura 78 <i>Longitud final de la estructura</i>	106
Figura 79 <i>Gráfica Deformación vs Tiempo</i>	107
Figura 80 <i>Control de Energía de Hourglass del impacto posterior</i>	111
Figura 81 <i>Energía de Hourglass en el impacto posterior</i>	111
Figura 82 <i>Energía interna</i>	112

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Variable independiente.</i>	32
Tabla 2 <i>Variable dependiente.</i>	32
Tabla 3 <i>Metodología, instrumentación y laboratorios donde se llevará a cabo el proyecto</i>	34
Tabla 4 <i>Medidas específicas del minibús escolar</i>	40
Tabla 5 <i>Especificaciones geométricas de la estructura del bus</i>	55
Tabla 6 <i>Especificaciones chasis Volkswagen 9-150</i>	64
Tabla 7 <i>Medidas tomadas físicamente del bus escolar.</i>	66
Tabla 8 <i>Cantidad de elementos mallados de la estructura.</i>	71
Tabla 9 <i>Valores del cociente jacobiano.</i>	73
Tabla 10 <i>Unidades seleccionadas para programación en LS-DYNA</i>	76
Tabla 11 <i>Propiedades mecánicas del acero estructural ASTM A-500.</i>	77
Tabla 12 <i>Parámetros de uso en la carta de control.</i>	78
Tabla 13 <i>Espesores asignados a los diferentes elementos del bus</i>	81
Tabla 14 <i>Capacidad del chasis Volkswagen 9-150.</i>	82
Tabla 15 <i>Dimensiones de la barrera fija.</i>	85
Tabla 16 <i>Dimensiones de la barrera móvil.</i>	88
Tabla 17 <i>Recursos humanos</i>	113
Tabla 18 <i>Recursos Tecnológicos.</i>	114
Tabla 19 <i>Recursos materiales</i>	114
Tabla 20 <i>Presupuesto.</i>	115

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 <i>Cálculo de la energía de Hourglass</i>	92
Ecuación 2 <i>Variación de longitud</i>	93
Ecuación 3 <i>Deformación de la carrocería en el impacto frontal</i>	99
Ecuación 4 <i>Control de energía de Hourglass</i>	102
Ecuación 5 <i>Deformación de la carrocería en el impacto posterior</i>	107
Ecuación 6 <i>Energía cinética antes del impacto posterior</i>	108
Ecuación 7 <i>Energía cinética después del impacto posterior</i>	109
Ecuación 8 <i>Cálculo de la velocidad después del impacto</i>	109
Ecuación 9 <i>Energía de deformación</i>	110
Ecuación 10 <i>Porcentaje de energía cinética perdida</i>	110
Ecuación 11 <i>Porcentaje de energía de Hourglass para impacto posterior</i>	112

Resumen

En el presente proyecto de investigación se realizó el modelado de la carrocería del bus escolar Volkswagen 9-150 IBIMCO perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE para simular un impacto frontal y posterior, empleando softwares computacionales CAD CAE. Esta simulación virtual se la realiza con el fin de evidenciar si la zona de seguridad del bus escolar es invadida por algún componente de la carrocería. Para empezar con el modelado del bus se utiliza el método shell que consiste en generar el boceto y diseño 3D en base a operaciones de superficie o cáscara. Para obtener las dimensiones del bus se realizó las mediciones de forma física, tomando fotos de cada lado del bus, espesor de los perfiles empleados y medidas referenciales de la carrocería, además se toma como referencias la normativa NTE INEN 1323 que establece los requisitos generales para el diseño, fabricación y montaje de carrocerías de buses, y el reglamento RTE INEN 041, el cual establece los requisitos que debe cumplir los vehículos para el transporte escolar de pasajeros. Una vez concluido el modelado 3D, se inicia la etapa de pre-procesamiento en donde se emplea el software CAE para asignar las condiciones de frontera de la simulación, una vez generadas las condiciones de frontera se prosigue a la etapa de procesamiento en donde se aplican cartas de control las cuales establecen las características a cada elemento y condiciones de simulación. Finalmente se realiza el ensayo de impacto frontal y posterior de forma virtual basados en el reglamento de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE) No.94 y No. 95, y se recopila datos de deformación, esfuerzos efectivos, energías y control de hourglass, los cuales pasan a una etapa de post-procesamiento en donde se analiza mediante gráficas generadas y cálculos matemáticos el comportamiento de la estructura ante estas colisiones y se comprueba que los componentes estructurales de la carrocería invaden la zona de supervivencia.

Palabras Clave: bus escolar, Volkswagen 9-150, impacto frontal, cartas de control.

Abstract

In this research project, the bodywork of the Volkswagen 9-150 IBIMCO school bus belonging to the University of the Armed Forces ESPE was modeled to simulate a front and rear impact, using CAD CAE computational software. This virtual simulation is carried out in order to show if the safety zone of the school bus is invaded by any component of the bodywork. To start with the modeling of the bus, the shell method is used, which consists of generating the sketch and 3D design based on surface or shell operations. To obtain the dimensions of the bus, physical measurements were made, taking photos of each side of the bus, thickness of the profiles used and referential measurements of the bodywork, in addition, the NTE INEN 1323 regulation that establishes the general requirements for the design, manufacture and assembly of bus bodies, and the RTE INEN 041 regulation, which establishes the requirements that vehicles for school passenger transport must meet. Once the 3D modeling is finished, the pre-processing stage begins, where the CAE software is used to assign the boundary conditions of the simulation, once the boundary conditions are generated, the processing stage continues, where they are applied. control charts which establish the characteristics of each element and simulation conditions. Finally, the front and rear impact test is carried out virtually based on the regulations of the Economic Commission for Europe of the United Nations (CEPE) No.94 and No. 95, and data on deformation, effective efforts, energies and hourglass control, which go to a post-processing stage where the behavior of the structure in these collisions is analyzed by means of generated graphs and mathematical calculations and it is verified that the structural components of the body invade the survival zone.

Keywords: school bus, Volkswagen 9-150, frontal impact, control charts.

Capítulo I

Planteamiento del problema de investigación

Antecedentes investigativos

En Ecuador, en el año 2021 se han reportado más de 3033 siniestros de tránsito, siendo superior a la del 2020 donde se reportaron 2874. Estas cifras, dio a conocer la Agencia Nacional de Tránsito (AMT) del Anuario de Siniestralidad Vial 2020, el cual indica que producto de los accidentes de tránsito 1693 personas han resultado heridas y 203 personas han fallecido, mientras que en el año 2020 los siniestros de tránsito provocaron la muerte de 176 personas, siendo esta la tercera causa principal de fallecimientos en Quito. (Mantilla, 2021)

Freire et al. (2022) menciona lo siguiente:

En Ecuador, las pequeñas y medianas empresas dedicadas al área metalmecánica son las que constituyen la producción carrocera de transporte. Un dato muy importante es que, a nivel nacional, el 67% de la industria carrocera se encuentra erradicada en la Ciudad de Ambato, esta actividad económica tiene alrededor de 1.400 plazas de trabajo directas para los ciudadanos y generando 24 millones de dólares anuales. La norma que regula y controla toda esta actividad industrial es la NTE INEN 1323 del 2009. Dichas carrocerías de buses están reglamentadas bajo normas con el que se detallan los requisitos para los vehículos automotores carrozados para servicio de transporte masivos de personas. (p.1280)

El director de la AMT, Jaime Vaca, mencionó que estas cifras ayudarán a tomar decisiones en el ámbito de seguridad vial, para disminuir el índice de fatalidad y lesiones en siniestros, además, añadió que las principales causas de los accidentes viales son el consumo de alcohol, el exceso de velocidad y el no respetar las leyes de tránsito. (Mantilla, 2021)

Se destacó que, en el año 2020, el 20,35% de las multas de tránsito en Quito son por exceso de velocidad, el 35,2% de las víctimas de dichos accidentes son jóvenes de entre 20 y 29 años de edad, siendo el 67,23% del género masculino. (Mantilla, 2021)

Dentro del país, el diseño y construcción de carrocerías para el transporte público interprovincial está normado y regulado por los estándares de la Agencia Nacional de Tránsito y se basa para su operación en las normas y reglamentos del Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización (INEN), que establecen los requisitos para la fabricación y montaje de carrocerías indicados en la NTE INEN 1223, y los requisitos mínimos que deben cumplir los fabricantes de carrocerías metálicas para vehículos de transporte indicados en la norma NTE INEN 2664. (Manjarrés y Santillán, 2016, p11)

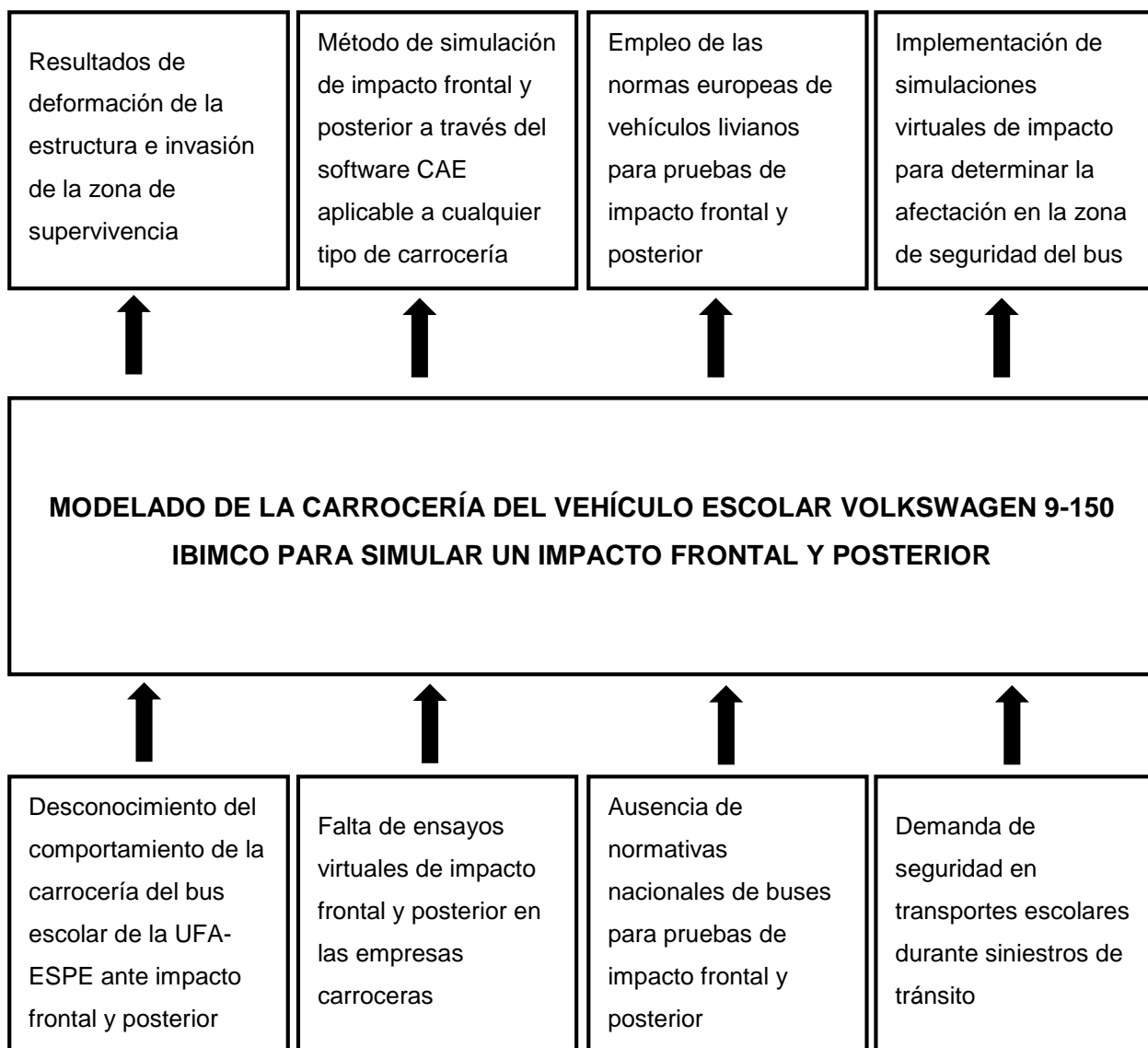
Mediante el análisis del fenómeno de deformación de la carrocería de un autobús empleado en el transporte interprovincial por simulaciones de impacto, se aporta a la industria carrocera del Ecuador una herramienta para el mejoramiento de los diseños de las estructuras de autobuses y un sustento previo al análisis estructural, también constituye un proceso para reducir costos investigativos y de producción, logrando que aumente los estándares en control de calidad con normas nacionales e internacionales, con el objetivo principal que es precautelar la seguridad del ocupante al momento de un siniestro. (Cuasapud, 2018)

En la industria automotriz, se desarrolla el transporte público, mediante estudios de comportamiento de una carrocería al someterle a carga con la ayuda de sistemas computarizados. Gran ejemplo de estos son los países como Perú, Colombia y Brasil que han implementado el diseño y el modelamiento de auto partes utilizando herramientas CAE y CAD. (Parra et al., 2007)

Planteamiento del problema

Figura 1

Árbol de Problemas



Nota. En la presente figura se detalla la problemática y solución concerniente al desarrollo del proyecto de investigación

Las normativas actuales vigentes en el país para que las carrocerías de autobuses cumplan con un nivel de seguridad es mínimo, por lo que es muy importante realizar investigaciones sobre mejoramiento de diseño y fortalecimiento del área de supervivencia de un autobús frente a una colisión, con el fin de salvaguardar la integridad y salud de los ocupantes del vehículo de transporte escolar. Esta falta de normas de seguridad se debe a la minúscula aplicación de herramientas computacionales para pruebas de ensayo de impactos y colisiones dentro del país, lo que resulta que la homologación y calificación de las carrocerías son demasiado básicas y aun peor, que en el país no existan centros donde realizar los ensayos.

El conjunto estructural del bus escolar este sujeto a normativas nacionales de fabricación como NTE INEN 1323 – RTE INEN 041 e internacionales como la ECE R29 en el caso de colisiones, las cuales aseguran la protección de los pasajeros, manteniendo el espacio de supervivencia aislada, brindando seguridad a sus ocupantes.

Para garantizar la estructura expuestas a colisiones se realiza modelado CAD y simulación de impactos frontales y posteriores mediante el uso de un software CAE, para analizar la resistencia, deformaciones y desplazamientos de los materiales que constituyen la carrocería.

En la época actual hay un gran desarrollo tecnológico y digital, lo cual se puede aprovechar de gran manera en la industria automotriz, aplicando software CAE para el diseño y construcción de carrocerías con el propósito principal de poner a salvo a los ocupantes y a través de métodos de ensayo determinar el comportamiento de la estructura para emitir criterios ingenieriles de diseño que optimicen el modelo y apliquen materiales innovadores en perfiles de varias geometrías, cuyas propiedades mecánicas otorgan un amplio nivel de absorción de impacto para proteger a sus ocupantes en caso de colisiones.

Descripción detallada del proyecto

Se investigó la fundamentación teórica – técnica del diseño y construcción de la carrocería del bus escolar Volkswagen 9-150 IBIMCO, a través de la consulta bibliográfica de los diferentes tipos de carrocerías para el transporte de pasajeros, normas vigentes en el país para el diseño y construcción de carrocerías, y las normas nacionales e internaciones sobre ensayos de impacto frontal y posterior.

Se modeló la carrocería del bus de transporte escolar Volkswagen 9-150 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, a través de herramientas computacionales de ingeniería asistida por computador CAD basados en las dimensiones establecidas en la norma RTE INEN 041:2011 aplicando materiales estructurales según la norma NTE INEN 2415 y su posterior simulación de impacto frontal y posterior en software computacional CAE, con el fin de visualizar la deformación de la carrocería a través de un método de colisiones de impacto frontal y posterior.

Se ejecutó las simulaciones virtuales de impacto frontal y posterior a la carrocería del vehículo escolar, para obtener los datos que refleja el software y con esto realizar un análisis tanto visual y estructural de la carrocería.

Se realizó un análisis de deformación, esfuerzos de Von Mises, balance de energías y control de energía de hourglass, por medio de gráficas del software computacional suscitadas en los ensayos de impacto frontal y posterior, comprobando si algún componente de la estructura invade la zona de seguridad.

Justificación e importancia

La producción de carrocerías es uno de los pilares fundamentales dentro de la economía nacional, Según Moreno y Jiménez (2020), “Las empresas carroceras del Ecuador, son una fuente principal de la economía, la mayor cantidad de empresas carroceras se encuentran en la provincia de Tungurahua, donde operan 27 de las 89 empresas de todo el país el cual representa el 13,57 % del PIB del sector manufacturero” (p.4). Por dicha razón, las fuentes provocadas por esta actividad económica son considerables y permite mejorar los estándares de calidad de vida de la población.

En el campo manufacturero, existe un gran impulso tecnológico que requiere la generación de empresas especializadas, normadas, sostenibles y competitivas para la producción de carrocerías de calidad. Ejemplo de ello, en el año 2015, 54 empresas carroceras fueron homologadas por parte de la Agencia Nacional de Transito (ANT), las cuales deben cumplir con las normas nacionales vigentes.

Con lo mencionado, el presente proyecto, exhibe un método de simulación virtual de impacto frontal y posterior y su efecto en la carrocería del vehículo escolar de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Logrando visualizar las deformaciones estructurales que se presentan en una colisión y la invasión de la zona de supervivencia de los pasajeros, consiguiendo solventar la falta de ensayos virtuales de impacto que carecen las empresas carroceras del Ecuador.

El aporte que se realiza a la industria carrocera del Ecuador es de una metodología basadas en diseño y simulaciones computacionales que logren reducir costos en cuanto a pruebas de resistencia y, garantizando que los nuevos diseños de carrocerías cumplan con estándares de calidad nacional e internacionales, haciendo que la industria carrocera crezca productivamente para que genere mayores fuentes de trabajo y dinero en base a una estructura sistematizada y respaldada por los sistemas CAD, CAE.

Objetivos del proyecto

Objetivo general

Modelar la carrocería del vehículo escolar Volkswagen 9-150 IBIMCO para la simulación de un impacto frontal y posterior, a través del software de ingeniería CAD/CAE, evidenciando su comportamiento ante los impactos.

Objetivos específicos

- Realizar la fundamentación teórica científica sobre el diseño y construcción de la carrocería del bus escolar Volkswagen 9-150 IBIMCO de la Universidad De Las Fuerzas Armadas ESPE, por medio de la consulta bibliográfica de los diferentes tipos de carrocerías para el transporte de pasajeros, normas nacionales referentes al diseño y construcción de carrocerías.
- Investigar normas técnicas de estándares nacionales e internacionales para la simulación y ensayos de impacto frontal y posterior de una carrocería de bus escolar.
- Modelar la estructura de la carrocería del bus escolar la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, mediante el uso de herramientas computacionales de ingeniería asistida por computador CAD.
- Simular el ensayo de impacto frontal y posterior por el método de elementos finitos mediante el uso de software CAE estableciendo condiciones basadas en la norma ECE R94 y ECE R95 para impacto frontal y posterior respectivamente.
- Interpretar los resultados obtenidos de la simulación de impacto frontal y posterior por medio de gráficas de deformación, desplazamiento, esfuerzos y energías.
- Validar el ensayo computacional de impacto frontal y posterior a través de un análisis en el control de la Energía de Hourglass.

Metas

- Recopilar información técnica para el diseño y construcción de carrocerías basados en normas nacionales e internacionales.
- Modelar geoméricamente la estructura del bus tipo escolar basados en las normas nacionales NTE INEN 1323: 2009 y RTE INEN 041 aplicando perfiles estructurales basados en la norma NTE INEN 2415.
- Simular un ensayo de impacto frontal y posterior basado en la norma internacional europea ECE R-94 para impacto frontal y la ECE R-95 de impacto lateral adaptado a impacto posterior.
- Recopilar datos de las deformaciones ocasionadas en las partes de la carrocería tras haber simulado los impactos, enfocándose en las zonas que sufran ruptura o deformación plástica en base a la gráfica del esfuerzo de Von Mises
- Emitir una conclusión sobre si la zona de supervivencia del bus fue invadida, mediante la simulación de impacto frontal y posterior al chasis del bus Volkswagen 9-150 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Hipótesis

La simulación en el software CAE aplicado a la carrocería del bus escolar Volkswagen 9-150 modelada emite un resultado de deformación estructural en los paneles frontales y posteriores, evidenciando la invasión a la zona de seguridad de los ocupantes.

VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN

Variables independientes

Tabla 1

Variable independiente.

Concepto	Categorías	Indicadores	Ítems	Técnica	Instrumentos
Simulación de impacto frontal y posterior a la carrocería del bus escolar Volkswagen 9-150 IBIMCO utilizando software CAE	Tecnológico	Velocidad de impacto	Km/h	Medición	Software CAE
		Energía interna	KN-mm		
		Densidad del material	Kg/mm ³		
		Módulo de elasticidad	GPa		

Nota. Esta tabla contiene las variables independientes que se aspira investigar mediante el uso de software CAE, con el motivo fundamental para la recopilación de información.

Variables dependientes

Tabla 2

Variable dependiente.

Concepto	Categorías	Indicadores	Ítems	Técnica	Instrumentos
Comportamiento de la estructura del bus ante impacto frontal y posterior	Parámetros de información	Velocidad de impacto	Km/h	Medición	Protocolo de prueba
		Energía interna	KN-mm		
		Densidad del material	Kg/mm ³		
		Módulo de elasticidad	GPa		

Nota. Esta tabla contiene aquellas variables dependientes que tendrán influencia en el resultado de impacto en la carrocería del bus escolar Volkswagen 9-150 IBIMCO.

Metodología de desarrollo del proyecto

Método documental-bibliográfico

Mediante el empleo de fuente bibliográficas se conseguirá información correspondiente al diseño, construcción y normativas vigentes en el país referentes al diseño de carrocerías.

Método experimental

Permite interpretar la información conseguida mediante la simulación en el software CAD/CAE para realizar ensayos de impacto frontal y posterior.

Metodología de investigación

- Diagnóstico: Investigación y análisis de las distintas carrocerías empleadas en el área de transporte de pasajeros y materiales existentes.
- Planificación de la acción: Determinación de pruebas y simulaciones, procesos necesarios para realizar las pruebas de impacto frontal y posterior a través de software CAE.
- Tomar la acción: Se efectúa el análisis computacional de ensayo de impacto en el modelado de la estructura del bus escolar.
- Evaluación: Realizando las pruebas de impacto se determinará las características de deformación y la seguridad en un impacto frontal.
- Especificación del aprendizaje: Se presentarán conclusiones de acuerdo a los resultados obtenidos del proyecto.

Método analítico

En esta investigación se analizará los diferentes parámetros de seguridad en buses escolares que pueden ser aplicados para realizar las pruebas para verificar su cumplimiento con las normas de seguridad vigentes.

Tabla 3

Metodología, instrumentación y laboratorios donde se llevará a cabo el proyecto

Metodología	Descripción	Equipo	Laboratorio
Documental Bibliográfico	Mediante el empleo de fuente bibliográficas se conseguirá información correspondiente al diseño, construcción y normativas vigentes en el país referentes al diseño de carrocerías.	<ul style="list-style-type: none"> • Libros • Artículos científicos • Tesis 	
Metodología Investigación Acción:	<p>Diagnóstico: Investigación y análisis de las distintas carrocerías empleadas en el área de transporte de pasajeros y materiales existentes.</p> <p>Planificación de la acción: Determinación de pruebas y simulaciones, procesos necesarios para realizar las pruebas de impacto frontal y posterior a través de software CAE.</p> <p>Tomar la acción: Se efectúa el análisis computacional de ensayo de impacto en el modelado de la estructura del bus escolar.</p> <p>Evaluación: Realizando las pruebas de impacto se determinará las características de deformación y la seguridad en un impacto frontal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Computador personal • Fuentes bibliográficas • Software CAD/CAE 	Laboratorios ESPE

Metodología	Descripción	Equipo	Laboratorio
Método Analítico	En esta investigación se analizará los diferentes parámetros de seguridad en buses escolares que pueden ser aplicados para realizar las pruebas para verificar su cumplimiento con las normas de seguridad vigentes.		Laboratorios ESPE
Método experimental	Permite interpretar la información conseguida mediante la simulación en el software CAD/CAE para realizar ensayos de impacto frontal y posterior.	<ul style="list-style-type: none"> • Computador personal • Software CAD/CAE 	

Nota. Esta tabla detalla las metodologías de investigación que se utiliza en la presente para la recopilación de información, necesaria para la develación del tema.

Capítulo II

Fundamento teórico

Tipos de buses para el transporte público en Ecuador

Dentro del país, la clasificación vehicular general la determina la Norma NTE INEN 2656, en la cual se detalla la identificación de automotores por medio de características de diseño y uso, en esta normativa se identifica a los buses con categoría M, que son vehículos automotores de cuatro ruedas o más diseñados y construidos para el transporte de pasajeros. (NTE INEN 2656, 2012)

- El código MCB de la subclase M2 identifica a un Microbús, especificando que es un vehículo orientado al transporte de pasajeros, con un espacio interno para la circulación (corredor central) y un número de plazas de hasta 26.

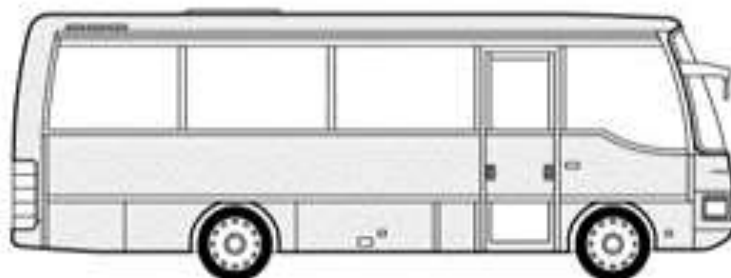
Figura 2

Microbús



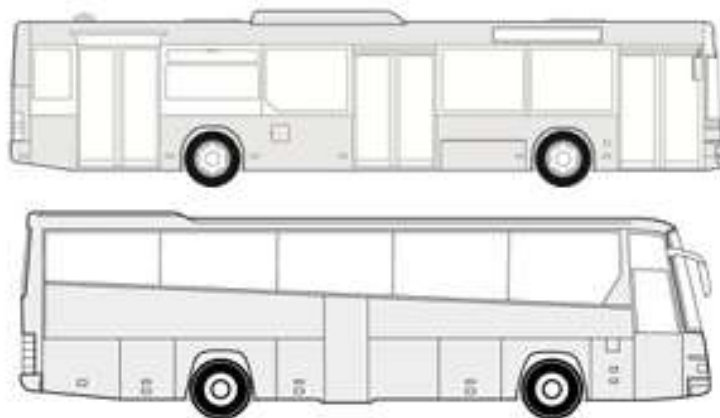
Nota. Vehículo representativo a un microbús. Tomado de (Normativa Técnica Ecuatoriana INEN 2656, 2012). Clasificación de vehículos automotores.

- El código MNB de la subclase M3 identifica a un minibús, especificando que es un vehículo orientado al transporte de pasajeros con un espacio interno para la circulación (corredor central) y un número de plazas de hasta 60.

Figura 3*Minibús*

Nota. Vehículo representativo a un minibús. Tomado de (Normativa Técnica Ecuatoriana INEN 2656, 2012). Clasificación de vehículos automotores.

- El código BUS de la subclase M3 identifica a un bus, especificando que es un vehículo destinado al transporte de pasajeros, con un espacio interno para la circulación (corredor central) y un número de plazas de hasta 90.

Figura 4*Bus*

Nota. Vehículo representativo a un bus. Tomado de (Normativa Técnica Ecuatoriana INEN 2656, 2012). Clasificación de vehículos automotores.

Conociendo los tipos de automotores de transporte público, ahora se describa una clasificación para los tipos de carrocerías y denominaciones que se dan a los buses.

Clasificación de los buses de transporte público de acuerdo a la carrocería

De acuerdo a la Normativa y reglamentos INEN aplicados al transporte, tránsito y seguridad vial conforme a la Agencia Nacional de tránsito, la clasificación de carrocerías oficialmente aprobadas y destinadas al transporte público en el Ecuador se encuentran conformadas para:

- Buses urbanos
- Buses de transporte escolar
- Buses de transporte interprovincial e intraprovincial

Buses urbanos

Un bus urbano, denominado autobús público, es un automotor diseñado y equipado para uso en zonas urbanas y recorrer distancias cortas o medianas, con una capacidad igual o superior a 60 pasajeros. Esta clase de vehículos tiene asientos y espacios considerados para pasajeros de pie y permite el movimiento de estos correspondientes a paradas frecuentes. Estos vehículos son construidos con cama baja o modificados a estructuras de tubos, se diferencian de los buses interprovinciales utilizados en largas distancias, en que pueden llevar personas paradas. (NTE INEN 2205, 2010)

Figura 5

Bus urbano



Nota. La imagen refleja un claro ejemplo de un bus urbano que transita dentro de la ciudad.

Tomado de (Ecuavisa, 2021).

Buses de transporte escolar

Son automotores orientados al servicio de transporte de estudiantes pertenecientes a las unidades educativas, de tamaño pequeño o mediano, se los distingue por ser de color amarillo o naranja. Sus asientos son pequeños y disponen de un asiento reservado para la persona que supervisa a los estudiantes. Según el número de pasajeros y ocupantes puede ser clasificado en furgoneta, microbús, minibús y Bus. (RTE INEN 041, 2011)

Figura 6

Bus escolar



Nota. Como ejemplo de un bus escolar se ha tomado de referencia el bus Volkswagen 9-150 perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Sede Latacunga

Buses de transporte interprovincial e intraprovincial

Conforme a lo establecido por la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1668. “VEHÍCULOS DE TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS INTRARREGIONAL, INTERPROVINCIAL E INTRAPROVINCIAL” Define a un bus intraprovincial como un automotor diseñado y equipado para viajes dentro de una misma provincia, mientras que para el bus interprovincial lo define como un automotor diseñado y equipado para viajes entre provincias. Es importante mencionar que la capacidad de estos buses fluctúa entre 40 y 45 pasajeros sentados. (NTE INEN 1668, 2015)

La manufactura de este tipo de bus dentro del país, comienza con la base que es un chasis importado, dada la planta de energía con la que generalmente están equipados, alcanzan altas velocidades en carretera aun estando a máxima carga. (Manjarrés & Santillán, 2016)

Figura 7

Bus interprovincial



Nota. La imagen identifica a un bus interprovincial de Ecuador. Tomado de (Carrocerías Jácome, 2018).

Características dimensionales del bus escolar

Las unidades de minibuses escolares deben ser manufacturadas con una carrocería sobre chasis montado en dos ejes, diseñado para soportar la carga de los pasajeros y el peso vehicular. (NTE INEN 1323, 2009)

Tabla 4

Medidas específicas del minibús escolar

DIMENSIÓN	MEDIDA
Largo total máximo del vehículo	10000 [mm]
Ancho total del vehículo	Debe cubrir la troca, sin sobresalir más de 75 [mm]. El ancho máximo no debe sobrepasar los 2600 [mm]

DIMENSIÓN	MEDIDA
Altura total máxima del vehículo	3000 [mm] con escotilla
Voladizo delantero	Mínimo 800 [mm]
Borde exterior delantero	No debe exceder los 300 [mm] desde el filo del chasis
Voladizo posterior	Máximo 66% de la distancia entre ejes
Ángulo de acometida	Entre 8° y 12°
Ángulo de salida	8.5° mínimo
Altura mínima de la puerta de ingreso	2000 [mm]
Ancho libre mínimo (para puerta sencilla)	650 [mm]
Altura mínima en el corredor central	1800 [mm]
Altura mínima el piso al borde inferior de la ventana	700 [mm]
Ancho mínimo del corredor	300 [mm]

Nota. Esta tabla se detallan las dimensiones estandarizadas para el diseño de un minibús.

Tomado de (RTE INEN 041, 2011).

Carrocerías

Definición de carrocería

Para tener una clara definición de lo que es una carrocería de un bus, se indaga en la NTE INEN 1323, en la cual se describe una carrocería como un conjunto estructural, de elementos de seguridad y confort que se adiciona al chasis de forma fija para el transporte de personas. (NTE INEN 1323, 2009)

Esta estructura debe ser capaz de soportar fuerzas estáticas y dinámicas cuando se encuentra en movimiento, además de contar con la rigidez y resistencia adecuada para que al instante de sufrir algún tipo de colisión brinde la máxima seguridad a los ocupantes del bus.

Figura 8

Estructura de un minibús escolar



Nota. La imagen muestra la carrocería de un minibús escolar.

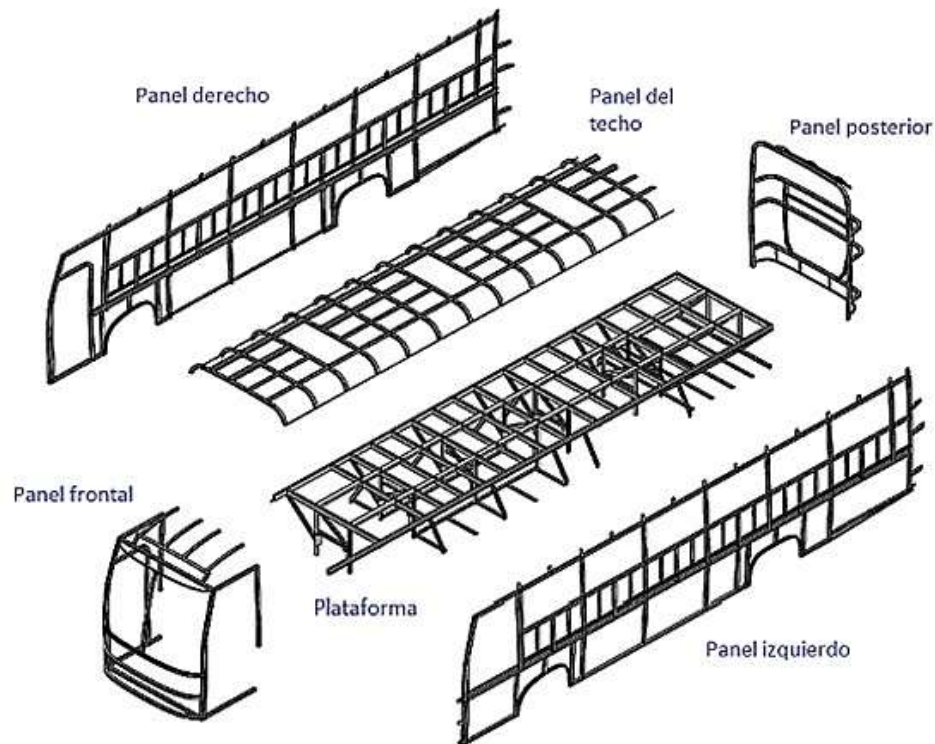
Partes de la carrocería de buses

La carrocería de un bus se encuentra conformada por dos conjuntos relevantes, los cuales son la subestructura que es el basamento, y la súper estructura que es el habitáculo. Adicionalmente, la carrocería se fracciona en cuatro conjuntos estructurales. (Esmeraldas, 2016)

- **Paneles exteriores:** Dentro de este conjunto estructural se encuentran los componentes que brindan un aspecto estético al bus, por ejemplo, encontramos las puertas, el panel frontal, techo y panel posterior. (Esmeraldas, 2016)

Figura 9

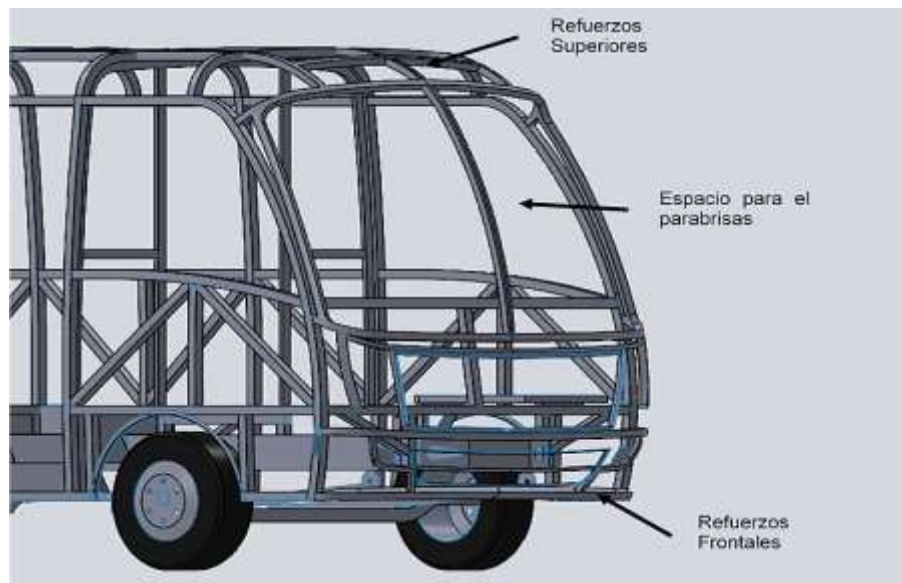
Componentes de una carrocería



Nota. La imagen muestra los paneles exteriores que conforman la carrocería de un bus.

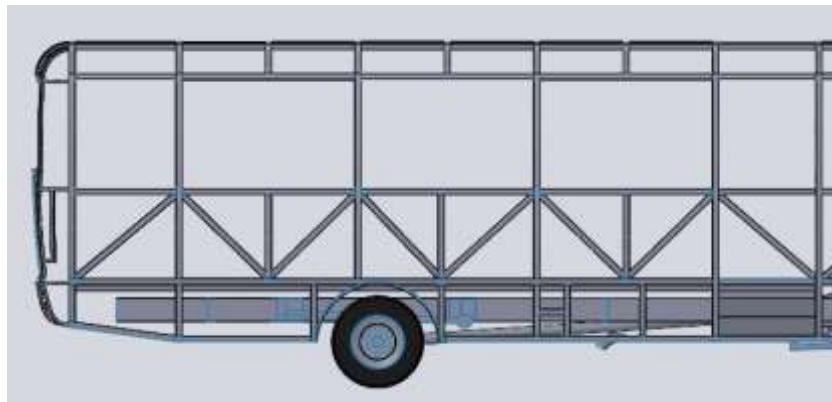
(Tomado de Esmeraldas, 2016).

- **Panel delantero:** Esta parte de la estructura es muy importante y van muy bien reforzadas porque en esta sección se sujetan una gran cantidad de componentes eléctricos y mecánicos tales como el motor, caja de cambios, batería, componentes automotrices, entre otros. (Esmeraldas, 2016)

Figura 10*Panel frontal*

Nota. En la figura se puede evidenciar el panel frontal de un minibús escolar con sus respectivas áreas.

- **Panel lateral y posterior:** Los elementos principales que componen este conjunto son, travesaños, largueros junto con refuerzos y pilares.

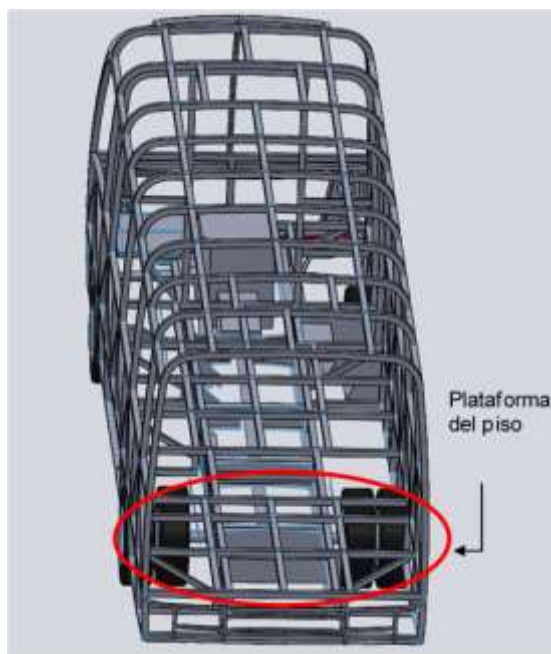
Figura 11*Panel lateral y posterior*

Nota. En la figura se puede evidenciar el panel lateral y posterior de un minibús escolar.

- **Plataforma o piso:** Este armazón corresponde a elementos que conforman el suelo del bus, este se une con el panel frontal, posterior y laterales y posee un conjunto de planchas soldadas a los travesaños y largueros. (Esmeraldas, 2016)

Figura 12

Plataforma del piso



Nota. En la figura se puede evidenciar la plataforma del piso de un minibús escolar.

Seguridad en carrocerías de buses

La carrocería actúa como un mecanismo estructural del vehículo que proporciona seguridad pasiva, esto lo hace al absorber toda la energía posible en caso de colisión, en otras palabras, la energía del impacto se transforma en energía de deformación, suprimiendo el efecto de ahogo y salvaguardando a los ocupantes. (Esmeraldas, 2016)

El habitáculo

Las zonas de absorción de impactos desempeñan un papel importante en la seguridad pasiva de los pasajeros; se encargan de redirigir los esfuerzos a zonas que no comprometan la rigidez del vehículo. (Esmeraldas, 2016)

A continuación, se nombran a los elementos más comunes utilizados para evitar el colapso de la estructura:

- Refuerzos en las puertas.
- El uso de aceros de alta resistencia en los distintos elementos de la carrocería.
- Lunas delanteras y posteriores laminadas.

Un aspecto importante a tomar en cuenta es cuando se produce el colapso del habitáculo, o la invasión de elementos rígidos en el mismo, esto son las causas principales que ocasionan lesiones y hasta la muerte a los ocupantes del bus. (Autocasion, 2007)

Zona de supervivencia

La zona de supervivencia o también conocida como habitáculo de seguridad es el módulo central del automóvil, el cual debe ser lo más rígido posible para mantener el espacio vital de supervivencia que proteja al conductor y los ocupantes. El módulo delantero y frontal están diseñados para amortiguar el golpe absorbiendo la energía del impacto en energía de deformación evitando su transmisión al interior del vehículo, estas dos zonas se encargan de proteger el habitáculo o módulo central. (Tecno Coche, 2016)

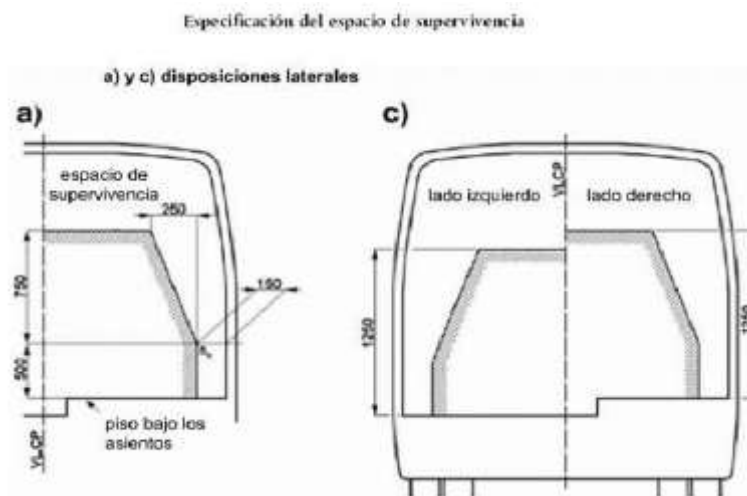
En Ecuador, las carrocerías de buses deben cumplir con ciertos requisitos que establecen las normas, en las cuales se detalla el espacio de supervivencia. Según NTE INEN 1323 (2009):

Espacio de supervivencia. Es el volumen que se obtiene en el compartimento de ocupantes, desplazando en línea recta el plano vertical y transversal indicado en la figura 13, de manera que se pase el punto SR de la figura 14 desde el punto SR del último asiento exterior a través del punto SR de cada asiento exterior intermedio hasta el punto SR del primer asiento exterior del ocupante. (pp. 1-2)

A continuación, se tienen las especificaciones de la zona de supervivencia en vista transversal y en vista longitudinal.

Figura 13

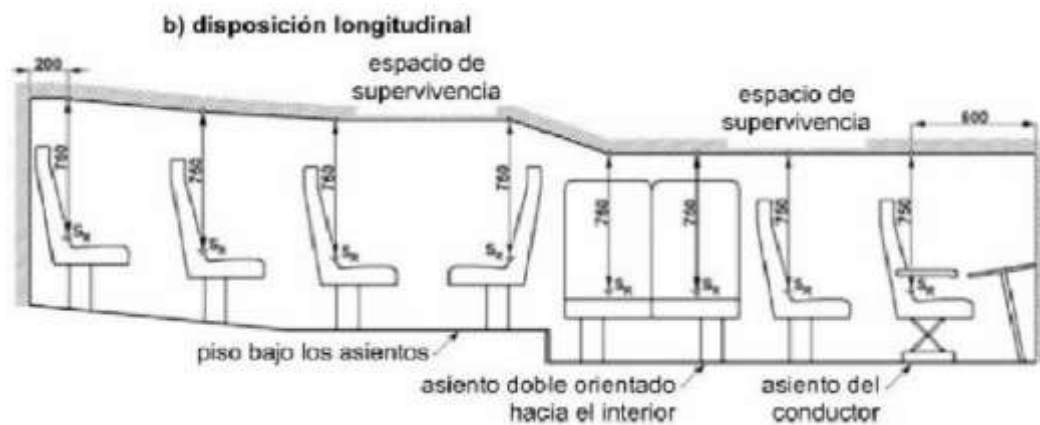
Vista transversal del espacio de supervivencia



Nota. Especificación del espacio de supervivencia, disposiciones laterales. Tomado de (NTE INEN 1323, 2009).

Figura 14

Vista longitudinal del espacio de supervivencia



Nota. Especificación del espacio de supervivencia, disposición longitudinal. Tomado de (NTE INEN 1323, 2009).

Zonas de absorción de impactos

Las zonas de absorción de impacto de un bus deben tener ciertas características como la resistencia y rigidez del material ocupado en la cabina o habitáculo con el fin de que sufra una deformación programada de acuerdo al lugar específico que se encuentre en el bus. De aquí se derivan las zonas de distribución con la característica que debe cumplir:

- Zona Central: Es la zona más importante de la carrocería, ya que es en donde están ubicados los pasajeros. La característica de comportamiento que debe presentar al momento de una colisión es de no deformarse en ningún momento y con la particularidad que es la zona más rígida del bus para conservar la seguridad de pasajeros
- Zona Frontal y Posterior: Estas zonas son diseñadas bajo el criterio de la deformación programada, es decir deben estar constituidos por elementos estructurales de fácil deformación, transformando la energía de cinética de impacto en energía de deformación con el fin de no invadir el habitáculo o zona de supervivencia. (Cuasapud, 2018)

Normativas para el diseño de carrocerías

En Ecuador, se aplican las Normas Técnicas Ecuatorianas NTE establecidas por el Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización INEN, se encargan de regular normas que especifican el diseño, construcción, rendimiento y requisitos que deben de cumplir las estructuras de los buses, garantizando la seguridad del conductor, y los ocupantes del mismo al momento de una colisión. La fundamentación de este proyecto se basa por lo tanto en las siguientes normativas y reglamentos:

- Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1323
- Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 041

Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1323

La norma NTE INEN 1323 (2009) “Establece los requisitos generales para el diseño, fabricación y montaje de carrocerías de buses para todas sus modalidades en el Ecuador sean importadas o de construcción nacional” (p. 2) En donde detallan puntos claves que debe tener la carrocería del bus, como son las cargas de frenado, cargas de giro, carga muerta, carga viva y espacio de supervivencia.

Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 041

Según el reglamento RTE INEN 041 (2011): En cuanto al reglamento de vehículos de transporte escolar en Ecuador se debe basar en la norma RTE INEN 041:2011, la cual establece los requisitos que deben cumplir los vehículos para el transporte escolar de pasajeros con la finalidad de proteger la vida y la seguridad de las personas, el ambiente y la propiedad, y prevenir prácticas engañosas que puedan inducir a error a los fabricantes o usuarios. (p. 3)

Pruebas de impacto

Una prueba de impacto es un método de ensayo destructivo que generalmente se lo realiza para garantizar estándares respecto al diseño y resistencia en choques. Para comprobar y verificar el comportamiento de la estructura se realizan varios tipos de pruebas en diferentes condiciones, diferentes lados y ángulos. (Tejasagar et al., 2012)

Impacto Frontal

Un impacto frontal es el tipo de colisión más frecuente en accidentes que han ocasionado incontables muertes. Es muy trascendental los avances estructurales que se han desarrollado en los paneles frontales de buses, también es destacable el desarrollo de pruebas de impacto que diversas organizaciones realizan para determinar el comportamiento de la carrocería del vehículo y las deformaciones producidas. (Cháfuel, 2017)

Figura 15*Prueba de impacto frontal*

Nota. La imagen describe una prueba de impacto frontal de un vehículo con parámetros establecidos. Tomado de (EuroNCAP, 2021).

Impacto Posterior

El impacto posterior ocurre cuando un objeto se encuentra detenido o con movimiento y es golpeado desde la parte de atrás. Esto suscita un evento de energía transferida como un movimiento de aceleración. La magnitud de la fuerza inicial es mayor cuando la diferencia de velocidades de desplazamiento entre los vehículos es más grande. (Cuasapud, 2018)

Figura 16*Prueba de impacto posterior*

Nota. La imagen describe una prueba de impacto posterior de un vehículo con parámetros establecidos. Tomado de (FastMag, 2014).

Normativa Internacional para simulación de impacto

Las normativas internacionales para la seguridad, diseño, operación y construcción de vehículos de transporte público, así como para uso particular se denominan EuroNCAP (European New Car Assessment Programme). Se trata de un programa de seguridad de evaluación de vehículos disponibles en el mercado europeo mediante una escala de estrellas, hasta un máximo de cinco, de forma que cada vehículo del mercado quede perfectamente medido y clasificado en una tabla de especial importancia para los compradores. (Mico, 2013)

Otras normativas internacionales son las estadounidenses y las canadienses, las estadounidenses denominadas Normas Federales de Seguridad para Vehículos (FMVSS) son normas que especifican el diseño, construcción y rendimiento de los componentes de vehículos relacionados con la fiabilidad de los sistemas, mientras que las Normas de Seguridad Canadienses para Vehículos Motorizados (CMVSS) difieren de las estadounidenses en los requisitos internacionales de la ONU. (Manjarrés y Santillán, 2016)

De acuerdo con Cháfuel (2017): Existen una serie de programas de pruebas de impacto que establecen requisitos o parámetros que proporcionan una fuente de información en relación al rendimiento de seguridad que deben presentar los vehículos nuevos y usados basados en datos de accidentes del mundo real. (p. 27). Un ejemplo de los organismos que regulan esta clase de ensayos son:

- Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (ECE R94, ECE R95, ECE R96, ECE R66).
- EuroNCAP
- El Instituto de Seguros para Seguridad en las Carreteras (IIHS).
- JapNCAP.
- NHTSA.

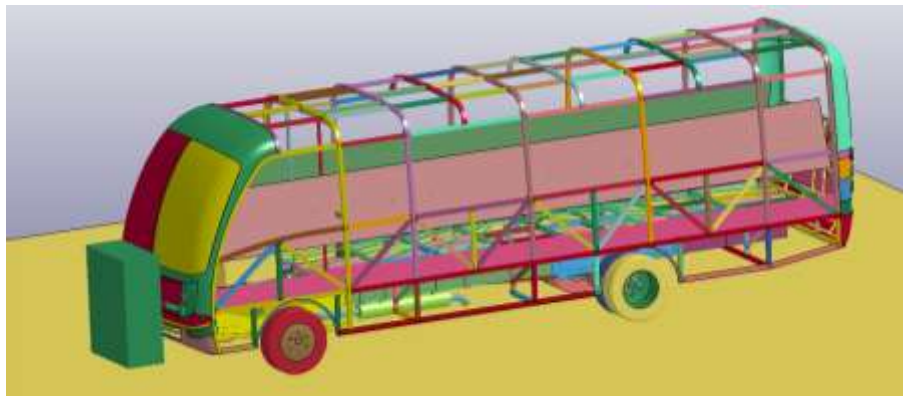
Regulación ECE R94

Este reglamento de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE) sobre la homologación de los vehículos en lo relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión frontal indica el parámetro de velocidad del vehículo en el momento del impacto, que será de 56 km/h. Sin embargo, si el ensayo se realizara a una velocidad de impacto mayor y el vehículo cumpliera los requisitos, el ensayo se considerará satisfactorio. (CEPE, 2012)

De acuerdo a la CEPE (2012): Referente a la barrera, la cara frontal consistirá en una estructura deformable, según se define en el anexo 9 del presente Reglamento. La cara frontal de la estructura deformable será perpendicular, con una desviación de $\pm 1^\circ$, a la trayectoria del vehículo de ensayo. La barrera estará asegurada a una masa no inferior a $7e+4$ kg, cuya cara frontal será vertical con una desviación de $\pm 1^\circ$. Dicha masa estará anclada al terreno o colocada sobre él, si es necesario, con dispositivos de retención adicionales para limitar su movimiento. El vehículo deberá cubrir la cara de la barrera sobrepasándola en un $40\% \pm 20$ mm. (p. 94).

Figura 17

Ejemplo de impacto frontal



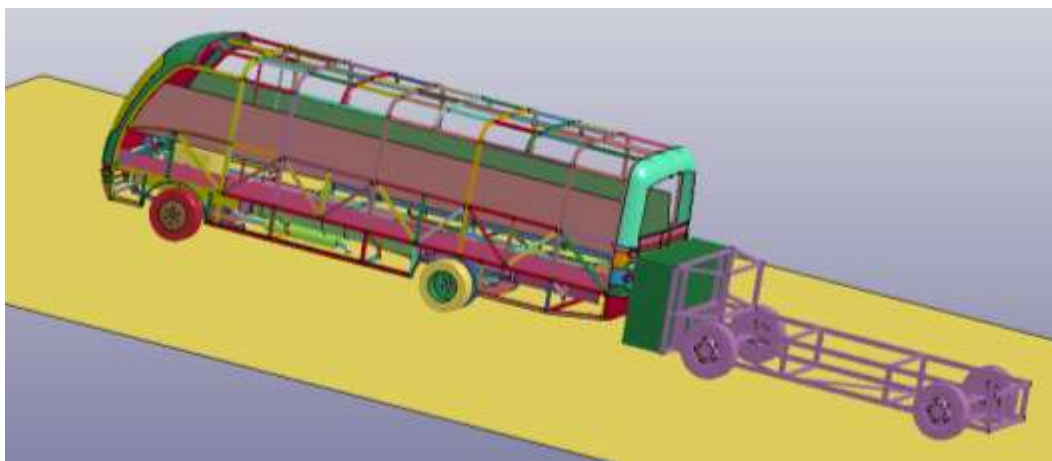
Nota. La imagen describe el ensayo de impacto frontal de una carrocería de bus bajo las condiciones de la Norma ECE 94.

Regulación ECE R95

Según ECE 95 (2014): “El presente reglamento se aplica al comportamiento en caso de colisión lateral de la estructura del habitáculo de los vehículos de las categorías M1 y N1” (p.92).

Figura 18

Prueba de impacto posterior



Nota. La imagen describe el ensayo de impacto posterior de una carrocería de bus bajo las condiciones de la Norma ECE 95.

- **Propulsión del impactador:** Según ECE 95 (2014) “El impactador puede ser asegurado a un carro (barrera móvil) o formar parte de un péndulo”.
- **Disposiciones especiales cuando se utilice una barrera móvil:** Si el impactador está asegurado a una carreta (barrera móvil) por un elemento de sujeción, éste debe ser rígido e incapaz de ser deformado por el impacto; el carro deberá ser capaz de moverse libremente en el momento del impacto y no estar sujeto a la acción del propulsor. La velocidad de la barrera móvil en el instante de la colisión deberá ser de 50 ± 1 km/h. La masa total deberá ser de 950 ± 20 kg. (ECE 95, 2014)

Materiales utilizados en la fabricación de carrocerías

Los materiales de fabricación para carrocerías deben de cumplir con la normativa NTE INEN 2415 y la NTE INEN 1623 ya que son normas en donde se detallan los requisitos que deben de cumplir los perfiles y la tubería estructural del bus. Según la norma NTE INEN 2415 (2013): Establece los requisitos que deben cumplir los tubos de acero al carbono tanto negros como galvanizados, conformados en frío, soldados (con costura) de sección circular, cuadrada, rectangular o especial para aplicaciones estructurales y usos generales. Esta norma se aplica a tubería de hasta 2235 mm de perímetro y un espesor de pared de hasta 22 mm. (p. 1).

Los perfiles estructurales bajo norma ASTM A500 son productos de acero con costura en secciones cuadradas o rectangulares. Se fabrican a partir de flejes de acero, mediante un proceso de rolado. Su aplicación incide en el área industrial, vehicular, entre otros. (YOHERSA, 2015)

Figura 19

Clasificación y propiedades de los perfiles estructurales

Grado	Descripción	Límite de fluencia mínima (MPa)	Resistencia a la tracción mínima (MPa)	Elongación mínima en 50 mm ^A %
AC	Tubo para usos generales	--	290	≥ 35
A	Tubos estructurales sección circular	230	310	25 ^B
B		290	400	23 ^C
C		315	425	21 ^D
D		250	400	23 ^C
A	Tubos estructurales sección cuadrada, rectangular o especial	270	310	25 ^B
B		315	400	23 ^C
C		345	425	21 ^D
D		250	400	23 ^C

^A ASTM A500/A500M Table 2 Tensile requirements.
^B El mínimo valor de elongación especificado aplica únicamente a los ensayos realizados antes del envío del tubo.
^C Se aplica a espesor de pared (e) igual o mayor a 3,05 mm. Para espesores menores del especificado, el valor mínimo de elongación en 50 mm debe ser calculado por la ecuación % = 2,2 e + 17,5 redondeado al espesor más cercano.
^D Se aplica a espesor de pared (e) igual o mayor a 4,57 mm. Para espesores más ligeros el mínimo valor de elongación en 50 mm debe ser calculado por la fórmula = 2,4 e + 12 redondeado al espesor más cercano.
^E Se aplica a espesor de pared (e) igual o mayor a 3,05 mm. Para espesores más ligeros el mínimo valor de elongación en 50 mm, puede ser por acuerdo con el fabricante.

Nota. Esta figura determina la clasificación y propiedades mecánicas de los tubos, detallando el límite de fluencia mínima, resistencia a la tracción mínima y elongación mínima en 50mm.

Tomado de (NTE INEN 2415, 2013).

Especificaciones de los perfiles

Tabla 5

Especificaciones geométricas de la estructura del bus

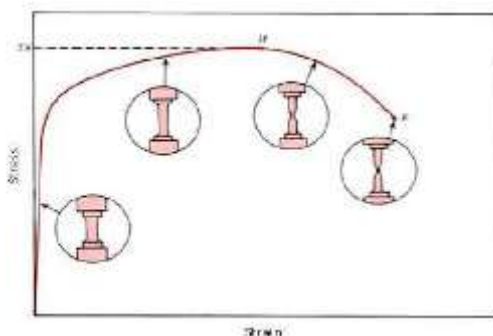
Unidad Estructural	Perfil Estructural	Espesor	Tipo de acero
PISO	50x50 (mm)	2.00 (mm)	ASTM A-500
	75x75 (mm)	2.00 (mm)	ASTM A-500
LATERALES	50X50 (mm)	2.00 (mm)	ASTM A-500
FRONTALES	50X50 (mm)	2.00 (mm)	ASTM A-500
POSTERIORES	50X50 (mm)	2.00 (mm)	ASTM A-500
TECHO	50X50 (mm)	2.00 (mm)	ASTM A-500

Nota. Esta tabla se detallan los perfiles estructurales utilizados en el diseño de la carrocería del bus escolar.

Características mecánicas del material

Resistencia a la tracción

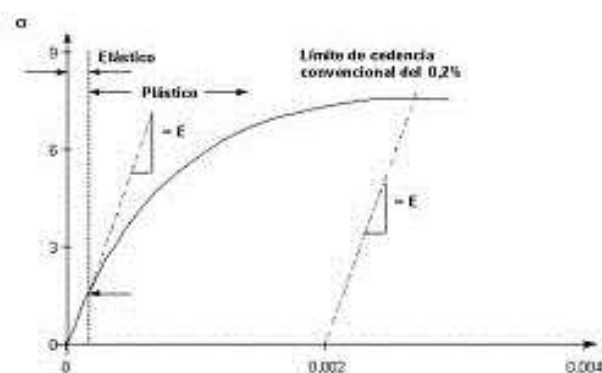
De acuerdo con Andrade y Méndez (2012): La resistencia máxima a la tensión es alcanzada en la curva de tensión – deformación. Si la probeta desarrolla un decrecimiento localizado en su sección, la tensión decrecerá al aumentar la deformación hasta que ocurra la fractura. Mientras más dúctil sea el metal, mayor será el decrecimiento en la tensión. Una estructura está sometida a un esfuerzo de tracción cuando se aplican dos fuerzas o cargas en sentido opuesto, que tienden a deformar la estructura por alargamiento. (p. 69)

Figura 20*Curva Tensión - Deformación*

Nota. En la imagen se describe el comportamiento del elemento estructural del acero bajo el diagrama de Tensión – Deformación. Tomado de (Acero en la Construcción, 2014).

Esfuerzo a la fluencia

De acuerdo a Andrade y Méndez (2012): El esfuerzo a la fluencia es el valor mínimo de esfuerzo para el cual el elemento comienza a deformarse plásticamente. Especificando, los materiales más dúctiles, cuando empiezan a cargarse sufren una deformación lineal proporcionalmente a la carga, hasta llegar a un punto en el cual esta deformación aumenta más y de manera no lineal con pocos aumentos de carga. (p. 69)

Figura 21*Curva Esfuerzo a la fluencia - Deformación*

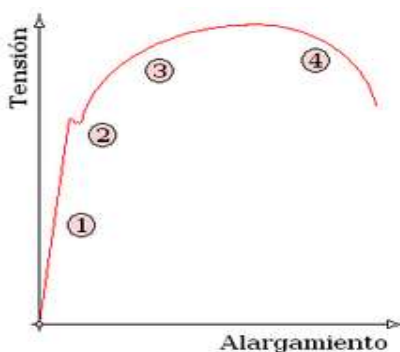
Nota. En la imagen se describe el comportamiento del elemento estructural del acero bajo el diagrama de Esfuerzo a la fluencia. Tomado de (Acero en la Construcción, 2014).

Elongación

De acuerdo a Andrade y Méndez (2012): Es la medida de la ductilidad de un material determinada en un ensayo de tracción, es el incremento de la longitud en la distancia calibrada (medida después de la ruptura) dividida por la longitud original de la distancia calibrada. Una elongación mayor indica una mayor ductilidad. La elongación no se puede utilizar para predecir el comportamiento de los materiales sometidos a cargas repentinas o repetidas. (p. 70)

Figura 22

Curva Tensión - Alargamiento



Nota. En la imagen se detalla el diagrama de Esfuerzo a la fluencia del acero. Tomado de (Acero en la Construcción, 2014).

Software de Diseño y Simulación

Sistema CAD

El Sistema CAD por sus siglas en inglés Computer Aided Design se traduce a Diseño Asistido por Computador, es un software que se utiliza para crear, editar, modificar y analizar modelos bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D) de forma más intuitiva. Es un sistema informático que automatiza y agiliza el proceso de diseño, permite trabajar con modelos 2D y 3D, ofreciendo una mayor precisión, detalle y visión más real de los objetos. Existen varios programas CAD en el mercado, lo que diferencia el uno del otro son las diversas funciones que ofrecen y la interfaz de usuario. (SIEMENS, 2022)

Sistema CAE

El Sistema CAE por sus siglas en inglés Computer Aided Engineering se traduce a Ingeniería Asistida por Computadora, es un software que se utiliza para simulación con la finalidad de obtener resultados de rendimiento, mejorando los diseños de productos y contribuyendo a la resolución de problemas de ingeniería. El software CAE permite simular, validar y optimizar los productos, procesos y herramientas de fabricación. (SIEMENS, 2022)

El Sistema CAE tiene un proceso, comenzando por un preprocesamiento, solución y el postprocesamiento. En la primera etapa, en el preprocesamiento, se modela la geometría y se asigna las propiedades físicas del diseño, las cargas y las restricciones. En la segunda etapa se obtienen los resultados, y en la tercera etapa el postprocesamiento los resultados se analizan, validan u optimizan. (SIEMENS, 2022)

El software CAE permite realizar varios análisis como son: análisis de tensión y dinámica mediante el método de elementos finitos, análisis de cinemática y dinámica de cuerpos, análisis térmicos y de fluidos. En cuanto a simulaciones, el sistema CAE permite realizar simulaciones de eventos mecánicos, simulación de procesos de manufactura y optimización del producto. (SIEMENS, 2022)

Mallado por el método de elementos finitos (MEF)

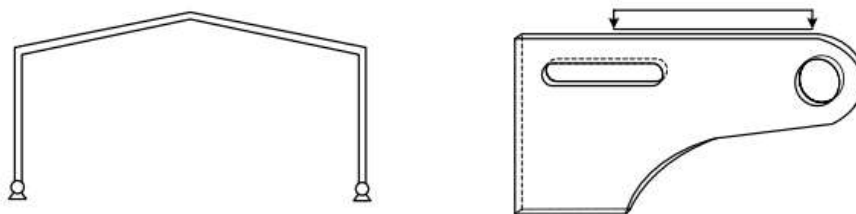
El Método de Elementos Finitos por sus siglas MEF, es un método de aproximación de problemas continuos, para lo cual hay que entender que es un sistema discreto y un sistema continuo. Las estructuras se dividen en discretas o reticulares y continuas. Una estructura discreta está formada por un ensamblaje de elementos claramente diferenciados unos de otros y unidos en puntos concretos, la característica de las estructuras discretas es que su deformación puede definirse de manera exacta mediante un número finito de parámetros. (Celigüeta Lizarza, 2011)

Una estructura continua, no es posible separar el sistema en un número finito de elementos estructurales discretos, es decir, si se toma cualquier parte del sistema continuo, el número de puntos de unión entre esa parte y el resto de la estructura es infinito. Las estructuras continuas se utilizan ampliamente en la ingeniería, como los bastidores de máquinas, carrocerías de vehículos, estructuras de edificios, elementos de máquinas para lo cual se dispone del MEF, que es un método que transforma un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado logrando obtener una solución a un sistema continuo. (Celigüeta Lizarza, 2011)

El mallado interviene de forma directa a los resultados del cálculo de la simulación por elementos finitos, lo que resulta muy importante fijarse que la malla debe poseer una calidad suficiente para que arroje resultados deseados. Para poder verificar la calidad de malla, nos podemos basar en el cociente jacobiano el cual representa la deformación de elementos en zonas con curvatura para adaptarse a geometrías complejas, se determina que cuanto mayor sea el valor del coeficiente jacobiano, el elemento se encontrará más deformado y la malla será de mala calidad. (AraWorks, 2020)

Figura 23

Estructura discreta y estructura continua

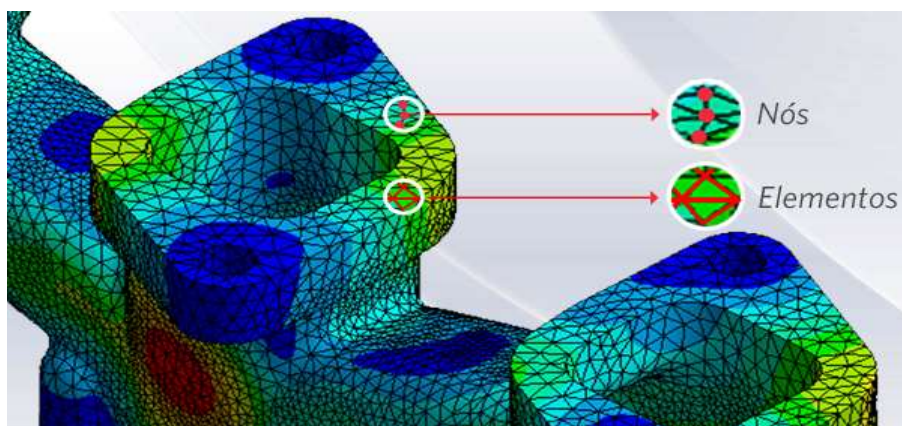


Nota. La estructura discreta es la figura de la izquierda y la estructura continua la figura de la derecha. Tomado de (Celigüeta Lizarza, 2011).

El MEF consiste en que un sistema físico con su geometría sometida a cargas y restricciones se divide en partes más pequeñas a lo que se conoce como elementos, al realizar dicha división de la geometría en pequeños elementos se resuelve un problema complejo y se puede analizar de una forma más sencilla. Estas divisiones tienen diferentes formas, como triangular, cuadrangular dependiendo del tipo y tamaño del problema. Con este método, un número infinito de variables desconocidas de un sistema físico se convierten en un número finito de elementos bien definidos, lo que permite analizar sistemas que serían prácticamente imposibles de una manera relativamente sencilla. Estos elementos finitos están conectados entre sí por puntos denominados nodos que forman una red llamada malla. (Mirlisenna, 2016)

Figura 24

Nodos y elementos que conforman una malla



Nota. Al conjunto de elementos y nodos se denomina malla. Tomado de (Mirlisenna, 2016).

Mallado

El conjunto de elementos y nodos o puntos nodales se denomina malla. La malla contiene el material y las propiedades que se asignan a la estructura, lo que define el comportamiento ante ciertas condiciones de carga. La precisión de los resultados depende de la cantidad de nodos y elementos, por tal motivo, entre más divisiones haya, los resultados serán más precisos.

Calidad del mallado

La calidad del mallado desempeña un papel fundamental en la precisión de los resultados en elementos finitos, es decir, afecta directamente en los resultados del cálculo de simulación, por lo cual hay que asegurar una calidad de mallado suficiente para obtener resultados correctos. En el software LS-DYNA se puede comprobar la calidad de malla mediante el Cociente Jacobiano. (Mirlisenna, 2016)

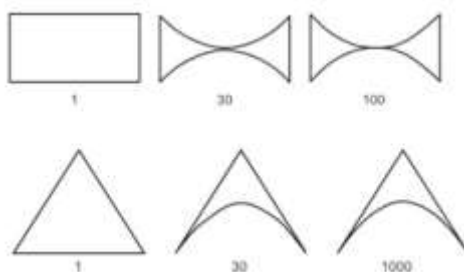
Cociente Jacobiano

El cociente Jacobiano o Jacobian Ratio representa la cantidad de deformación que presentan los elementos ubicados en zonas con curvaturas donde deben adaptarse a geometrías complejas, en otras palabras, es la desviación de un elemento de su forma original. El cociente jacobiano de un elemento no debe ser menor a cero, si pasa a ser negativo indica que el elemento está extremadamente distorsionado y los resultados obtenidos se verían afectados lo que provoca que el análisis se detenga. (SolidWorks, 2019)

El Cociente Jacobiano tiene un valor ideal igual a 1, para obtener este valor se estima que para cuadriláteros todos sus lados formen un ángulo de 90° y para elementos finitos triangulares, se estima que cada lado forme un ángulo de 60° . En la figura 25 se puede apreciar la aproximación a 1 para un cuadrilátero y un triángulo.

Figura 25

Cociente Jacobiano para cuadriláteros y triángulos



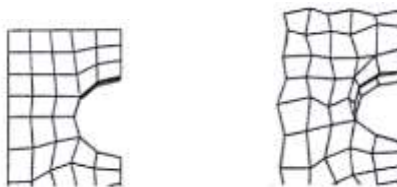
Nota. Tomado de (Uygun, 2020).

Energías de deformación

La energía de Hourglass es un efecto de deformación con energía cero. Las formas de Hourglass son estados matemáticos que no son físicamente posibles, estas formas no poseen rigidez y dan una apariencia de zigzag a la deformación de la malla. El software ANSYS LS-DYNA permite obtener esta energía de deformación la cual no debe superar el 10% de la energía interna generada, o el 5% de la energía total del sistema, si el valor excediera este porcentaje los resultados obtenidos en el análisis se pueden invalidar. (ANSYS, 2015)

Figura 26

Energía de Hourglass



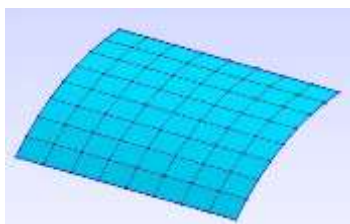
Nota. Malla no deformada y malla deformada con efecto Hourglass. Tomado de (ANSYS, 2015).

Elementos tipo SHELL

El elemento tipo Shell es un elemento en 2 dimensiones (2D), son denominados tipo cáscaras y carecen de espesor, se utilizan para modelados de carrocerías en las que el espesor es significativamente menor que las otras dimensiones, por tal motivo, los elementos estructurales de las carrocerías son modelados como elementos tipo Shell (cáscaras) debido a que presentan una mejor estimación de esfuerzos y deformaciones.

Figura 27

Mallado tipo Shell



Nota. Malla de elementos finitos Shell/Cascarón. Tomado de (Hincapié, 2020).

CAPITULO III

Ingeniería asistida por computador aplicado a la carrocería del bus

Construcción del modelo de la carrocería del bus escolar

Para realizar la construcción del modelado y la simulación de impacto del minibús se tiene el siguiente proceso:

Figura 28

Proceso de simulación de elementos finitos



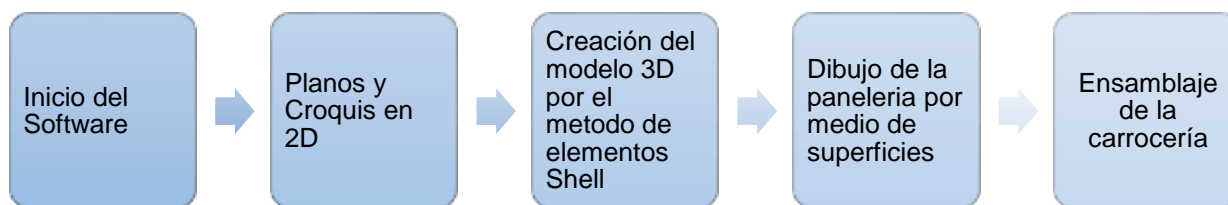
Nota. En la siguiente figura se detalla el procedimiento a seguir para el modelado y simulación del minibús, el cual nos permite obtener los resultados luego de la combinación de varios Softwares de CAD y CAE.

Modelado de la carrocería

Para la elaboración de la carrocería del bus escolar, se toma como modelo de referencia las medidas del bus escolar Volkswagen 9-150 IBIMCO perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Sede Latacunga indicado en la figura 6. Cabe recalcar que el correcto modelado de la carrocería y estructuración permitirá el éxito del ensayo virtual y la confiabilidad de los resultados obtenidos por el Software CAE.

Figura 29

Modelado de la carrocería del bus escolar



Nota. La siguiente figura detalla el proceso sistemático que se sigue para el desarrollo del modelado de la carrocería del bus escolar Volkswagen 9-150 perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-Sede Latacunga.

En el diseño de la carrocería del bus es necesario planos y medidas fundamentales. Para este caso se usó las medidas referenciales que se encuentran descritas en la norma RTE INEN 041 junto con medidas originales tomadas en el bus que se encuentra parqueado dentro de las instalaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Sede Latacunga.

Una forma práctica para el modelado correcto es primero ver la ficha técnica del chasis Volkswagen 9-150 en donde se encuentran sus dimensiones, posterior a esto realizar una tabla con todas las medidas posibles de la carrocería e ir compararlas con las que nos dicta la norma.

Tabla 6

Especificaciones Chasis Volkswagen 9-150

Dimensión	Valor
Chasis	
Largo total	7750 [mm]
Ancho del chasis	2144 [mm]
Altura del chasis	2576 [mm]
Peso bruto vehicular	9300 [kg]
Peso del chasis	3150 [kg]

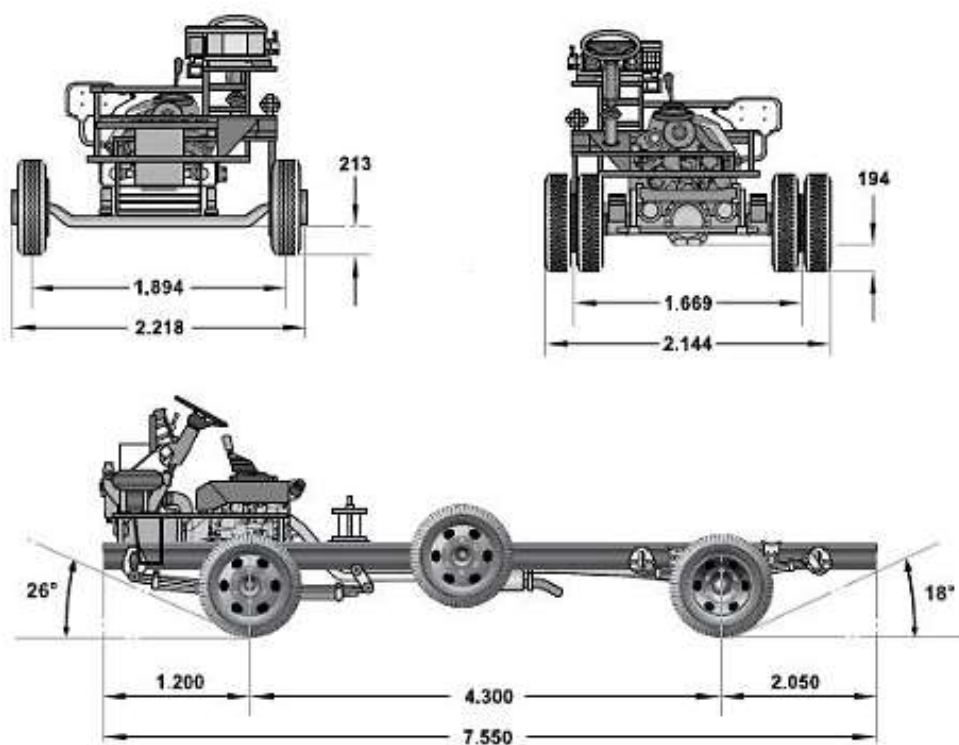
Dimensión	Valor
Motor	
Modelo	Cummins Interact 4.0 Turbo Intercooler
Potencia máxima	150 [HP]
Torque máximo	550 [Nm]
Cilindrada	4740 [cm ³]
Neumáticos	
Dimensiones	215 / 75R17,5

Nota. En la presente tabla se detallan las medidas del chasis del vehículo Volkswagen 9-150.

Tomado de (Volksbus 9-150 EOD, 2019).

Figura 30

Dimensiones del chasis Volkswagen 9-150



Nota. La figura muestra las cotas del chasis del vehículo Volkswagen 9-150. Tomado de (Volksbus 9-150 EOD, 2019).

Tabla 7*Medidas tomadas físicamente del bus escolar*

DIMENSIÓN	MEDIDA
Largo total máximo del vehículo	7910 [mm]
Ancho total del vehículo	2140 [mm]
Altura total máxima del vehículo	2470 [mm]
Voladizo delantero	1072 [mm]
Voladizo posterior	2538 [mm]
Altura mínima de la puerta de ingreso	2157 [mm]

Nota. En la presente tabla se detallan las medidas tomadas del bus escolar

Una vez culminado el diseño y todas las operaciones requeridas de superficie para dar estética y un parentesco cercano a la realidad del bus, se obtiene el diseño final del modelo del bus escolar Volkswagen 9-150 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Este modelo no incluye elementos de detalle como asientos, pasamanos, cinturones de seguridad, entre otros, ya que generan un alto gasto computacional y son innecesarios dentro de este estudio.

Figura 31*Modelado final del bus escolar*

Nota. Modelo finalizado del minibús, el cual fue construido y modelado en el Software CAD SolidWorks.

Modelado de la zona de seguridad

Tomando en cuenta las disposiciones del espacio de supervivencia en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1323, se establece el área de supervivencia para el minibús Volkswagen 9-150.

Figura 32

Modelado de la Zona de Supervivencia



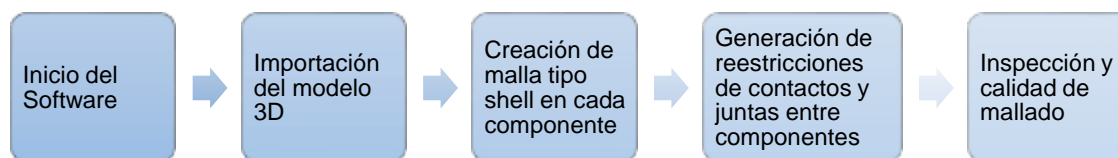
Nota. Zona de supervivencia del minibús Volkswagen 9-150, tomando como referencia las dimensiones detalladas en la NTE INEN 1323.

Etapa de pre-procesamiento

En la etapa de pre-procesamiento comienza cuando ya haya terminado el modelado de la carrocería, para esta parte usaremos el Software ANSA el cual es un preprocesador que sirve para crear mallas de tipo Shell de una forma muy eficaz.

Figura 33

Pre-procesamiento del modelado del bus



Nota. La siguiente figura detalla el proceso sistemático para el desarrollo de la creación de uniones soldadas y el mallado del modelo 3D de la carrocería del bus escolar Volkswagen 9-150 para su posterior verificación de calidad de malla.

Generación de uniones

El Software ANSA es un programa que sirve para generar malla de elementos finitos, también sirve para preparar las geometrías para la generación de la malla. Además, permite la generación de uniones entre elementos estructurales, o en otras palabras generar la suelda entre los elementos de la carrocería.

Las uniones de los perfiles que están en contacto deben estar unidos u soldados, ya que al momento de la simulación estos elementos se van a soltar y se obtendrán errores en la simulación de los impactos. En la figura 34 se puede observar líneas de color rojo, que indica que los elementos no están unidos.

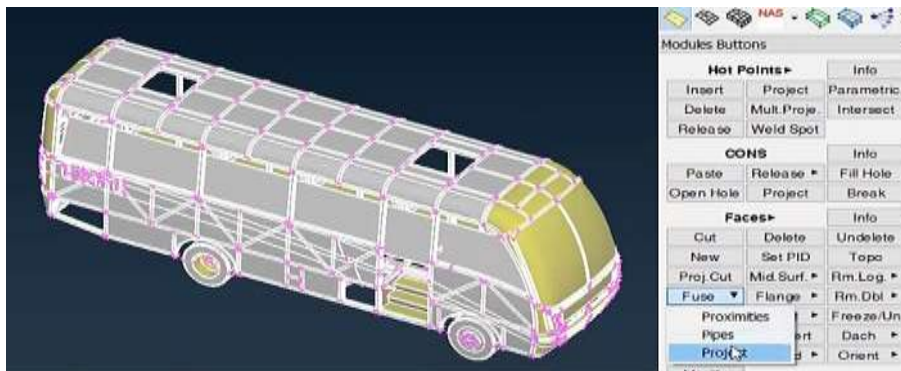
Figura 34

Elementos de la estructura sin unión



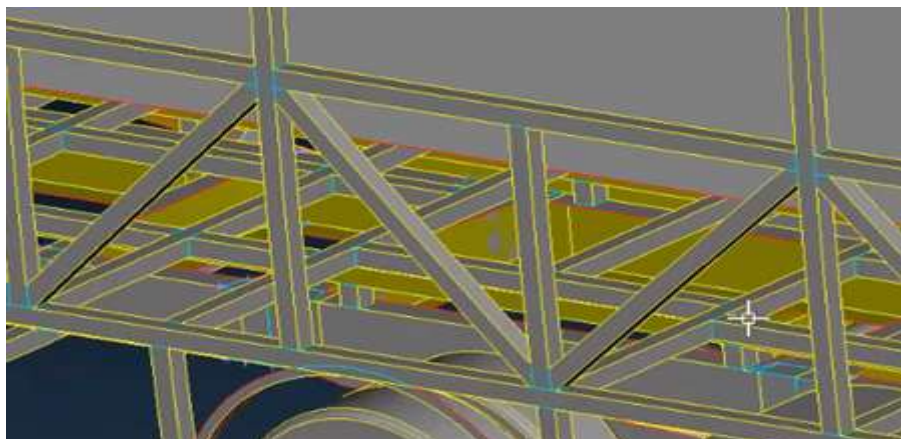
Nota. Las líneas rojas entre los elementos en contacto indican que no hay una unión o suelda entre los mismos.

La generación de uniones entre los perfiles que se encuentran en contacto se denomina técnicamente como topología compartida que viene a representar la malla de elementos finitos. Para generar la unión se utiliza la operación Fuse Project que permite compartir topología entre cada componente que este en contacto, de esta manera se logra la unión de todos los elementos, o en otras palabras se tiene una soldadura entre todos los componentes en contacto.

Figura 35*Generación de uniones*

Nota. Al aplicar esta opción se generan automáticamente las uniones entre todos los elementos del bus como se observa en la imagen.

Al finalizar la unión, se puede comprobar en la figura 35 que los elementos en contacto se han unido, ya que, el color rojo va a cambiar a celeste y amarillo, que indica que esta fusionado o compartido, y por ende se tiene una soldadura entre todos los componentes.

Figura 36*Elementos unidos*

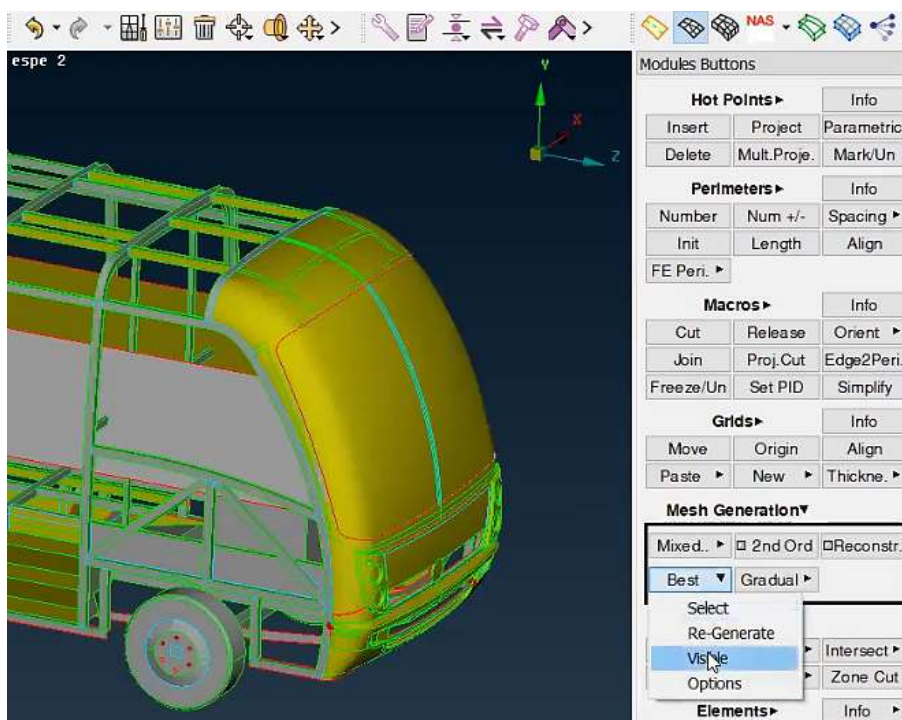
Nota. En la imagen se puede apreciar líneas de color azul y amarillo que indica que los elementos en contacto se han unido, esto representa la condición de soldadura. Existen líneas de color rojo, pero estas no se encuentran en contacto con otro elemento, por ende, no se genera la unión con otro elemento.

Generación de malla

Para generar la malla se utiliza la operación “MESH”, en “LENGTH” se aplica el tamaño de la malla, en este caso se emplea un tamaño de 25 [mm] para la estructura general del minibús, ya que el perfil mayormente utilizado es de 50x50 [mm], es óptimo y recomendable generar el mallado a la mitad de longitud del perfil para obtener resultados válidos. Finalmente, en la operación “MESH GENERATION” se escoge la opción “VISIBLE” para obtener la malla de la estructura del minibús.

Figura 37

Generación de malla

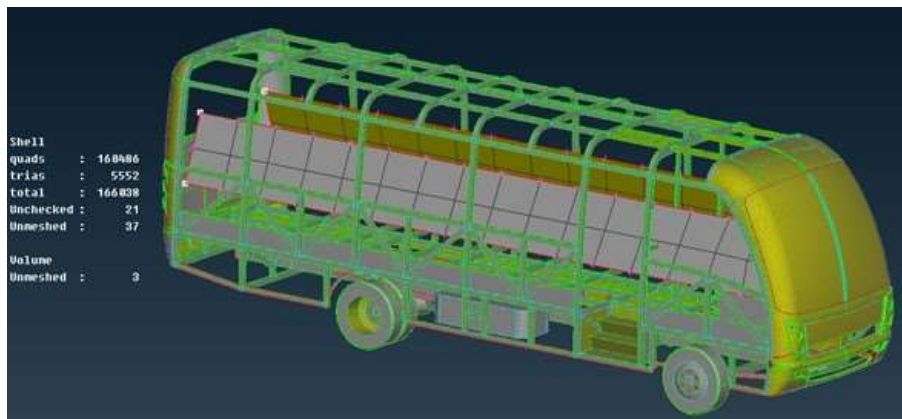


Nota. Procedimiento de generación de malla en el Software ANSA, utilizando un tamaño de malla de 25 [mm] para la mayor parte de la estructura del minibús.

El mallado de la zona de supervivencia, tiene un tamaño de malla de 500 [mm] debido a que es un elemento que va a estar rígido y no va a intervenir durante la simulación, logrando ahorro del gasto computacional al momento de la simulación.

Figura 38

Tamaños de malla en la estructura del minibús



Nota. En la imagen se observa con claridad los distintos tamaños de malla, de 25 [mm] para la estructura general del bus y de 500 [mm] para la zona de supervivencia.

Los elementos finitos de tipo Shell formados mediante la generación de malla en la carrocería son de tipo cuadriláteros y triangulares, con este tipo de configuración se tiene una estimación muy exacta de esfuerzos y deformaciones; esto se puede observar en los resultados que se obtengan de la simulación virtual de impacto de la carrocería del bus. El número de total de elementos obtenidos es de 166038, mallas cuadradas 160486 y mallas triangulares 5552.

Tabla 8

Cantidad de elementos mallados de la estructura

Malla	Cantidad de elementos
Cuadrangulares	160486
Triangular	5552
Total, elementos mallados	166038

Nota. En el cuadro se detallan los distintos tipos de mallado que posee la estructura.

Una vez generada la malla del minibús, se exporta el modelado al Software LS-PrePost, en donde se procede a verificar la calidad de malla mediante la programación de las cartas de control, el cual es un método matemático que se usa en el software para asignar características específicas a los elementos de la malla.

Calidad de malla

Para verificar la calidad de mallado el Software LS-PrePost tiene la operación “Element Editing”, en donde se escoge la opción “QUALITY CHECK” (calidad de malla), la cual permite seleccionar el Cociente Jacobiano y eliminar todos los elementos que presentan problemas.

El cociente Jacobiano representa la cantidad de deformación que se presentan en elementos expuestos a zonas curvas o geometrías complejas, este parámetro se evalúa entre valores entre 1.0 a -1.0, donde un valor 1.0 se considera como un mallado óptimo o ideal, mientras que, si se tiene valores negativos indica que el elemento esta extremadamente distorsionado y se pueden producir fallas en la solución, por ende, el software recomienda utilizar elementos con un valor superior o igual a 0,33 para obtener resultados fiables.

En la tabla 9, se muestran los resultados obtenidos en la calidad de malla según el Cociente Jacobiano, al realizar el promedio entre el valor mínimo y máximo se obtiene un valor de 0,7 el cual es próximo a 1.0, lo que indica que el mallado de la estructura es altamente fiable para realizar la simulación y obtener resultados correctos.

Tabla 9

Valores del cociente jacobiano

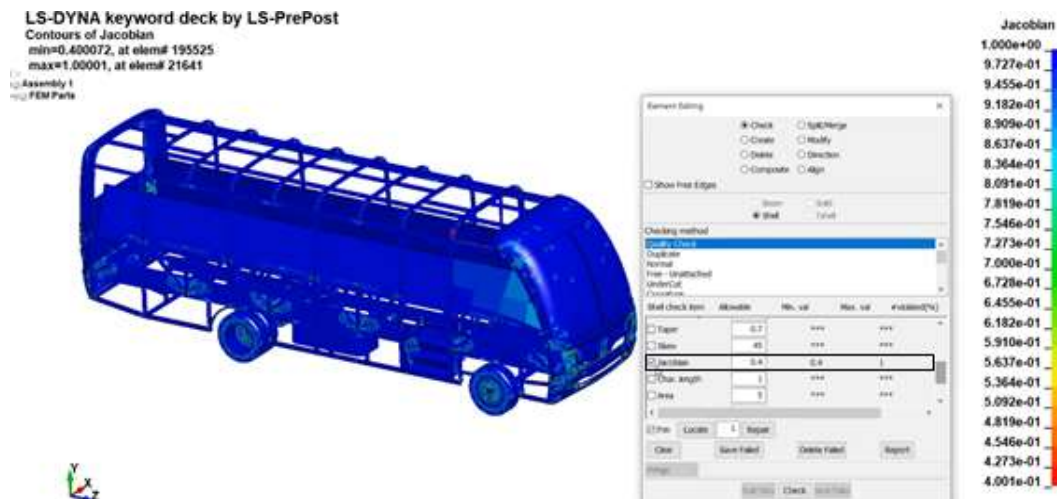
Valores de calidad de la malla	Cociente Jacobiano
Mínimo	0,4
Máximo	1,0
Promedio	0,7

Nota. En la tabla se puede evidenciar los valores mínimos y máximos del análisis por el cociente jacobiano, y se concluye que existe una buena calidad de malla

En la figura 39 se puede observar que los elementos se encuentran dentro de los parámetros ideales de calidad de mallado con una gran cantidad de elementos en color azul, siendo el valor máximo 1 y el valor mínimo de 0,4.

Figura 39

Calidad de mallado



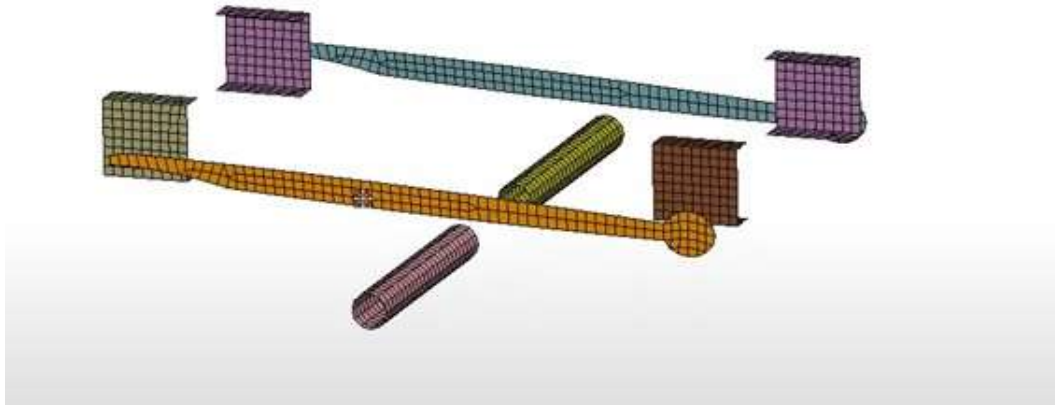
Nota. En la figura se puede observar que el valor mínimo de mallado es 0.4 mediante el método jacobiano

Fijaciones

Se evidencia que el chasis y las ruedas están libres, en tal virtud si es que en esas condiciones simulamos las ruedas se van a desplazar en cualquier dirección al momento del impacto. Para evitar esto se aplica una técnica de unión entre las ballestas de espesor de 80 [mm] con el chasis.

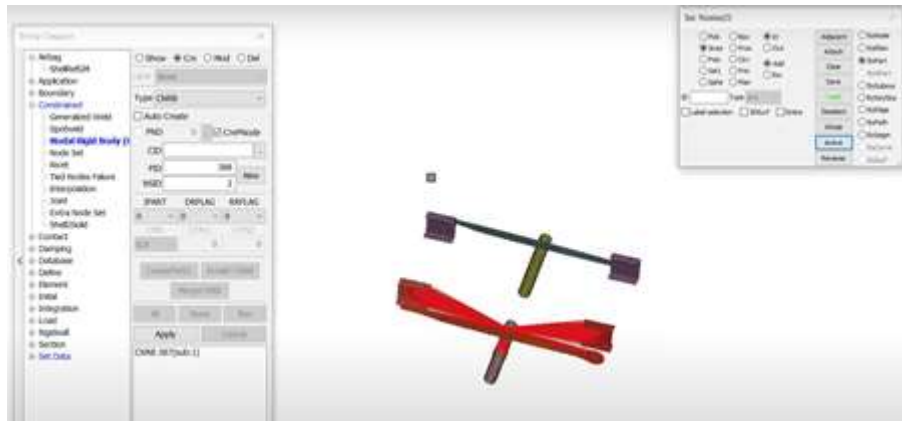
Figura 40

Unión entre las ballestas y el chasis



Nota. Para aplicar esta unión entre las ballestas y el chasis se debe ocultar las otras partes de la carrocería para una mejor visibilidad

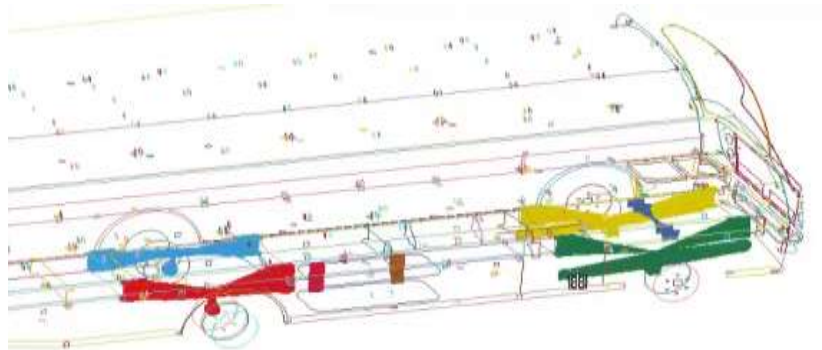
Para realizar esta operación se da clic en la opción MODEL AND PART >> ENTITY CREATION >> CONSTRAINED >> NODAL RIGID BODY >> CREATE >> Seleccionar los elementos que desea unir.

Figura 41*Operación de ENTITY CREATION*

Nota. Esta operación se realiza para las 4 ballestas de cada rueda y se consigue la unión del chasis con las ballestas y estas con el eje de la suspensión provocando un funcionamiento correcto.

Uniones del chasis

De igual manera se realiza la unión de los demás componentes de la estructura, como son el tanque de combustible y el motor, con la finalidad de que no se produzcan desuniones al momento de la simulación de impacto. Con esto se logra evitar resultados erróneos de la simulación.

Figura 42*Unión de los componentes del minibús*

Nota. Estructura del minibús con sus correspondientes uniones de componentes.

Unidades usadas en el software

El Software LS-DYNA no dispone de una interfaz gráfica que indique las unidades empleadas en los análisis, por lo tanto, hay que seleccionar las unidades esenciales, que son longitud, masa y tiempo para obtener resultados en las unidades correspondientes. Las unidades empleadas para la programación y simulación se muestran en la tabla 10.

Tabla 10

Unidades seleccionadas para programación en LS-DYNA

Magnitud	Unidad
Masa	[Kg]
Longitud	[mm]
Tiempo	[ms]
Fuerza	[kN]
Esfuerzo	[GPa]
Energía	[kN-mm]
Densidad	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \right]$
Módulo de Young	[GPa]
Velocidad	$\left[\frac{\text{mm}}{\text{ms}} \right]$
Gravedad	$\left[\frac{\text{mm}}{\text{ms}^2} \right]$

Nota. Especificación de las unidades que se aplican en las magnitudes utilizados en el software. Tomado de (LS-DYNA Support, 2022)

Asignación del material

En Ecuador el acero utilizado para estructuras de buses es el ASTM A-500 que se rige bajo la normativa NTE INEN 2415, que establece los requisitos que deben de cumplir los tubos de acero al carbono tanto negros como galvanizados (NTE INEN 2415, 2016). En la tabla 11 se detallan las propiedades mecánicas del acero ASTM A-500.

Tabla 11

Propiedades mecánicas del acero estructural ASTM A-500

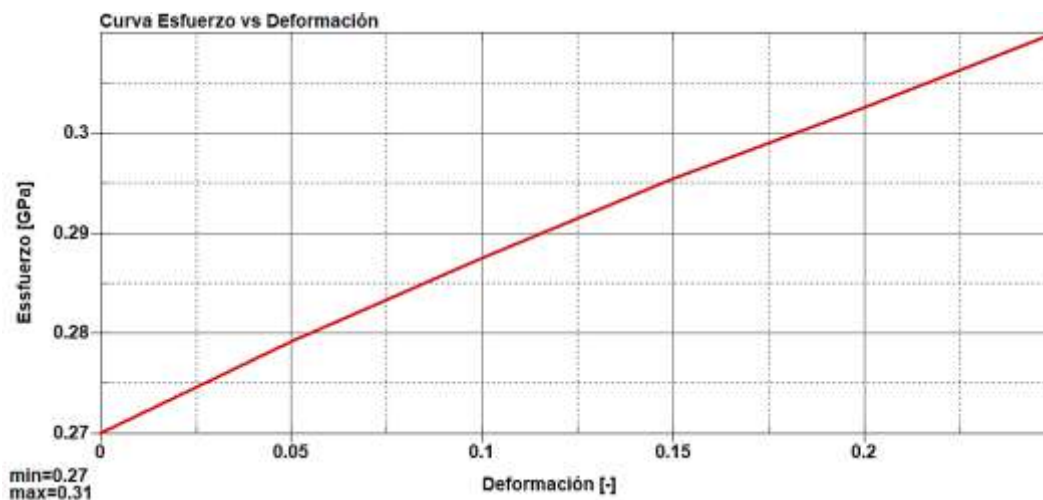
Acero estructural ASTM A-500 Grado A	
Propiedades mecánicas	Valor
Densidad del material $\left[\frac{kg}{mm^3}\right]$	7,83 e-06
Módulo de Young $[GPa]$	207
Radio de Poisson $\left[\frac{mm}{mm}\right]$	0,3
Límite de fluencia $[GPa]$	0,270
Resistencia ultima a la tracción $[GPa]$	0,310
Deformación unitaria máxima	0,25

Nota. En la tabla se indican las propiedades del material ASTM A-500, con sus correspondientes unidades para su utilización en el software LS-PrePost.

Para definir la curva de esfuerzo vs deformación que tendrá el material, se deben otorgar valores de deformación y esfuerzo según las propiedades mecánicas indicadas en la NTE INEN 2415 para obtener la gráfica como se muestra en la figura 43.

Figura 43

Curva esfuerzo-deformación del acero estructural ASTM A-500



Nota. Para generar la curva esfuerzo deformación del acero ASTM A-500 se utiliza la carta de control “DEFINE-CURVE”, en donde se ingresan los valores mínimos y máximos tanto de esfuerzo como deformación para obtener la curva.

La figura 44 muestra la carta de control “MAT-024 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY” que permite la asignación del material a los elementos. En el cual se deben añadir los valores de la tabla 12 para establecer las propiedades mecánicas del Acero ASTM A-500.

Tabla 12

Parámetros de uso en la carta de control

Carta de control “MAT-024 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY”			
Sigla	Parámetros	Valor	Unidades
MID	Identificación del material	1	[–]
RO	Densidad del material	7,80 e-06	$\left[\frac{kg}{mm^3}\right]$
E	Módulo de Young	2,00 e+02	[GPa]
PR	Radio de Poisson	0,3	[–]

Carta de control "MAT-024 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY"			
Sigla	Parámetros	Valor	Unidades
FAIL	Deformación unitaria	0,25	[-]
LCSS	Curva de esfuerzo vs deformación	1	[-]

Nota. En el parámetro LCSS, se añade la curva de esfuerzo vs deformación, la cual fue creada previamente con la carta de control "DEFINE-CURVE".

Figura 44

Carta de control "024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY"

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick Add Accept Dele

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 IMPACTO FRONT

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (2)

TITLE
ACERO ASTM A500 GRA

1	MJD	RQ	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	DEL
	1	7.800e-08	200.00000	0.3000000	0.0	0.0	0.2500000	0.0
2	C	P	LCSS	LCSR	VP			
	0.0	0.0	1	0	0.0			
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Keyword Manager

Keyword Edit Keyword Search

Edit: MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY

Model All

Name

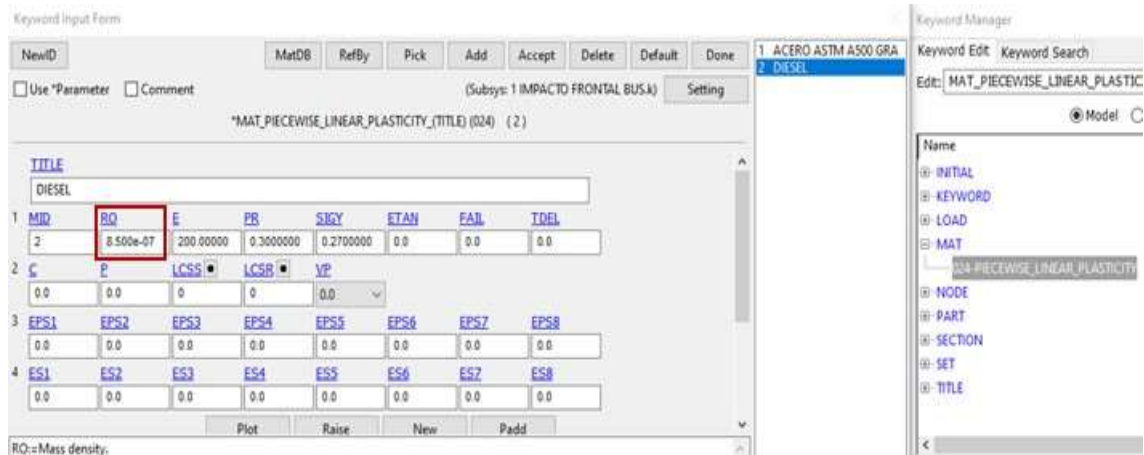
- INITIAL
- KEYWORD
- LOAD
- MAT
 - 024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
- NODE
- PART
- SECTION
- SET
- TITLE

Nota. En el apartado de 024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY se ingresan los valores correspondientes a las propiedades mecánicas del material.

Para realizar la simulación de impacto del minibús, se realiza la asignación de 2 materiales diferentes, el primero es el acero estructural ASTM A-500 y el segundo es la densidad del diésel para obtener el peso del tanque de combustible. Para lo cual, se crea elementos de tipo sólidos y en la carta de control figura 45, se asigna la densidad del diésel que es de $850 \left[\frac{kg}{mm^3} \right]$, que con las unidades correspondientes el valor es de $8,5 \text{ e-}07 \left[\frac{kg}{mm^3} \right]$.

Figura 45

Asignación de la densidad del diesel



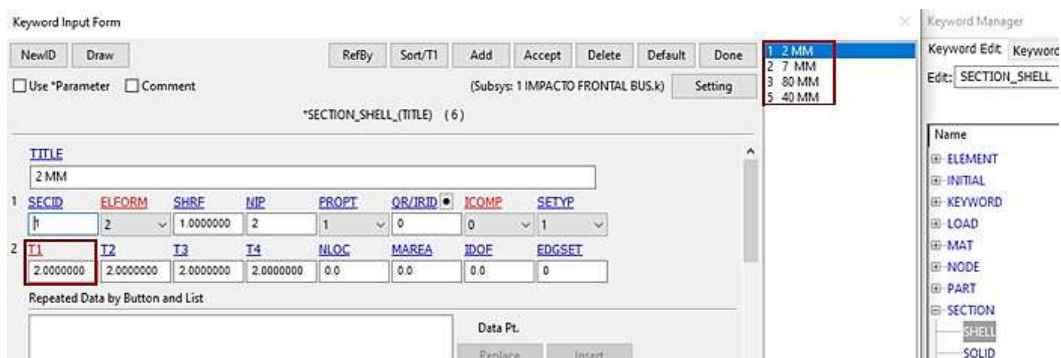
Nota. En la carta de control también se configura para agregar el peso del diésel.

Secciones

En las propiedades de sección se agrega el espesor a los elementos utilizados en la estructura del minibús, el espesor se añade en la operación "SECTION_SHELL", ya que se trabaja con elementos tipo cáscara y para los elementos sólidos se utiliza la opción "SECTION_SOLID", que se genera solo para el tanque de combustible.

Figura 46

Espesor utilizados en la estructura del bus



Nota. En la carta de control "SECTION_SHELL" se tienen 5 diferentes espesores. El parámetro T1 marcado en rojo, indica el espesor de malla en este caso es de 2 [mm], el cual cambia para los diferentes espesores.

Para agregar tanto material como espesor a los elementos, se utiliza la operación “Part Data_Assing”, en donde se selecciona el elemento para asignar el material y el espesor como se muestra en la figura 47, donde SECID, se refiere al ID de la sección y el MID se refiere al ID del material.

Figura 47

Asignación de material y espesor a elementos del minibús



Nota. En este apartado se agrega el espesor y material a los elementos de la estructura

Tabla 13

Espesores asignados a los diferentes elementos del bus

Elementos de minibús	Espesor de malla
Perfiles estructurales	2 [mm]
Chasis	7 [mm]
Ballestas	80 [mm]
Motor y transmisión	40 [mm]

Nota. En la presente tabla se detallan los espesores de malla asignados a cada componente estructural del bus escolar.

Según la Agencia Nacional de Transito (2022), el minibús Volkswagen modelo 9-150 OD tiene una capacidad de carga de 5600 [kg] y un peso bruto vehicular PBV de 8150 [kg], que son datos relevantes para obtener el peso del chasis, el cual se obtiene restando el PBV de la capacidad de carga.

Tabla 14

Capacidad del chasis Volkswagen 9-150

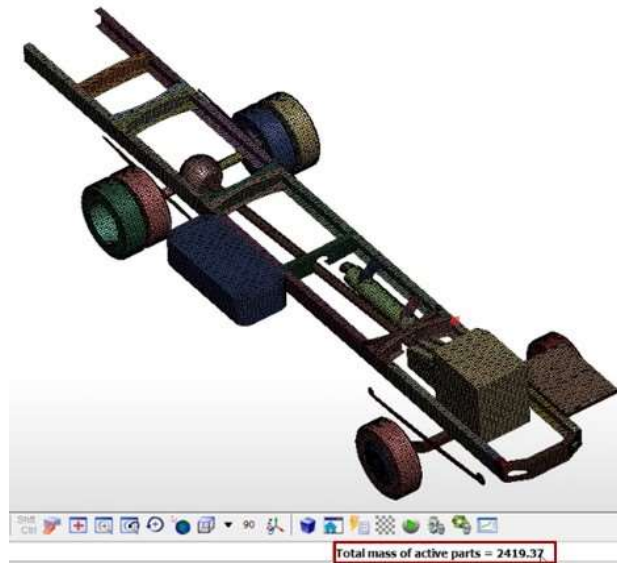
Volkswagen 9-150	
Capacidades	Valor
Peso Bruto Vehicular (PBV)	8150 [kg]
Capacidad de carga	5600 [kg]
Peso del chasis	2550 [kg]

Nota. Pesos designados por la Homologación de Transporte Vehicular de la Agencia Nacional de Transito.

Con los distintos espesores de malla asignados a los componentes del minibús, se obtiene un peso del chasis de 2419,37 [kg] como se indica en la figura 48, este valor esta aproximado al valor calculado que es de 2550 [kg], la diferencia es de 130,68 [kg], por lo que se considera que el peso de la estructura en general del minibús es ideal, tomando en cuenta que el chasis modelado tiene los componentes básicos para la simulación.

Figura 48

Peso del chasis modelado del minibús Volkswagen 9-150



Nota. Masa del chasis calculada en el software.

Barrera para colisión frontal

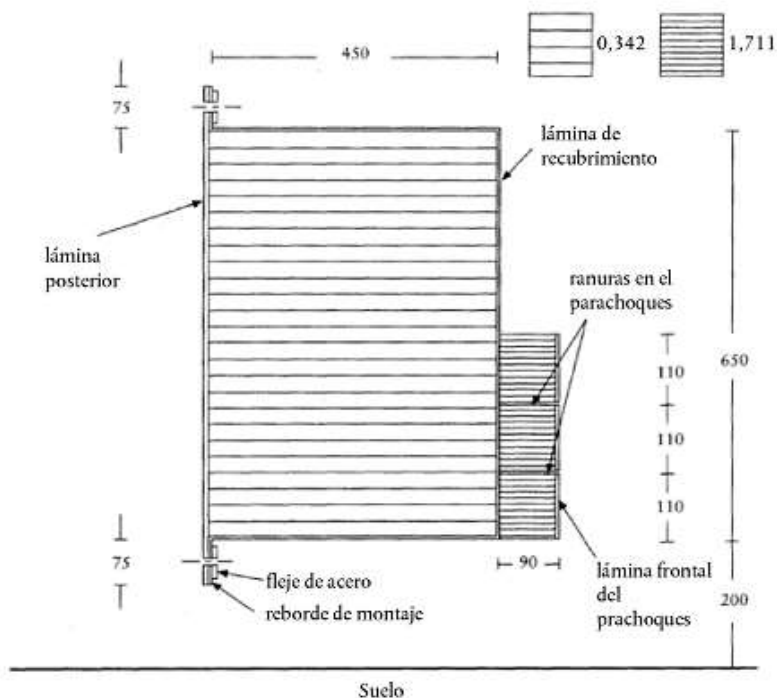
Se toma como referencia el Reglamento No. 94 de la Comisión Económica para Europa (CEPE) de la Naciones Unidas ya que no existe un reglamento para minibuses o buses escolares.

Para realizar la simulación de impacto frontal, se necesita de un elemento que lo denominamos "impactador", el cual es una barrera fija.

Contra esta barrera el minibús será impactado a una velocidad al momento de impacto de 56 -0/+ 1 km/h, según el Reglamento No. 94 de la Comisión Económica para Europa (CEPE) de la Naciones Unidas para impacto frontal. El ensayo se puede efectuar a una velocidad mayor, y si el vehículo cumple los requisitos, el ensayo se considerará satisfactorio.

Figura 49

Barrera deformable para el ensayo de colisión frontal

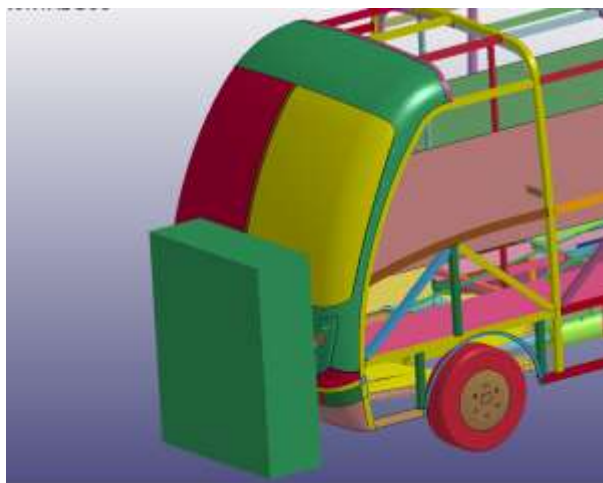


Nota. En la siguiente imagen se detallan las dimensiones que debe poseer la barrera deformable para el ensayo de colisión de vehículos, según el Reglamento No. 94 de la Comisión Económica para Europa. Tomado de (CEPE, 2012).

La implementación de la barrera fija para el impacto frontal se realizó en el programa LS-PrePost, tomando como referencia la barrera deformable del Reglamento No. 94. Pero como la simulación según la norma es dirigida a un automóvil, la barrera es muy pequeña en comparación a la estructura del bus por lo que se procede a modificar su tamaño.

Figura 50

Creación de la barrera fija



Nota. Creación de la barrera de impacto en el software CAE.

El tamaño de la barrera modificada va a tener unas dimensiones de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 15

Dimensiones de la barrera fija

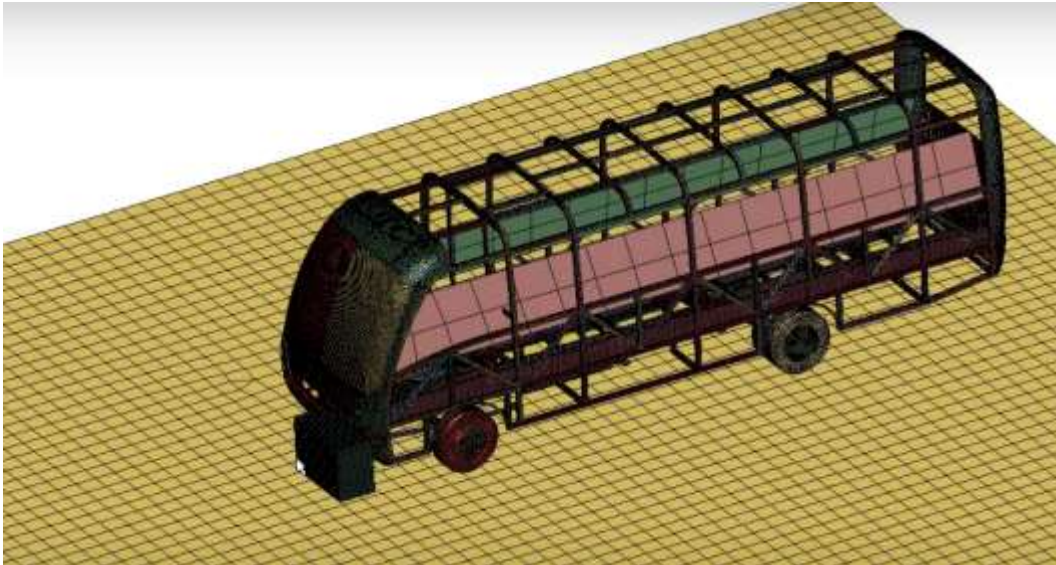
DIMENSIÓN	VALOR
Ancho	1312,2 [mm]
Alto	1557,27 [mm]
Grosor	450 [mm]

Nota. Dimensiones para la barrera de colisión en el impacto frontal de la carrocería del bus escolar Volkswagen 9-150.

Adicionalmente, se añade el piso a la simulación ya que se necesita implementar la velocidad al bus para la colisión contra la barrera fija. Se crea el mallado a la barrera fija y al piso.

Figura 51

Elementos necesarios para el impacto frontal



Nota. Los elementos necesarios para el impacto frontal están conformados por el minibús, la barrera fija (elemento impactador) y el piso.

Condiciones de frontera para impacto frontal

En las condiciones de frontera o condiciones de borde se deben tener en cuenta que elementos estarán fijos y cuáles serán los móviles durante la simulación, además se asigna la velocidad de impacto.

En este estudio se tienen dos elementos el esclavo y el master, estos conceptos se refieren a el bus y al impactador/piso, siendo el elemento esclavo el bus el cual tendrá movimiento y el elemento master que está conformado por la barrera fija y el piso como se indica en la figura 52.

Figura 52

Contacto entre el bus y la barrera fija

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_(ID/TITLE/MPP)_(THERMAL) (1)

1	CID	TITLE						
	1	bus vs impactor/piso						
		<input type="checkbox"/> MPP1		<input type="checkbox"/> MPP2				
2	IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	CPRMB
	0	200		3	2	1.0005		0
3	UNUSED	CHKSEGS	PENEF	GRPABLE				
		0	1.0	0				
4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	1	2	2	2	0	0	0	0

Nota. Elemento esclavo (bus) y elemento master (barrera/piso).

Asignación de velocidad inicial

Para la realización del impacto, la velocidad que se aplica es de acuerdo a lo establecido por la norma ECE R-94 para impacto frontal. El elemento esclavo (bus) tiene movimiento, la figura 53 indica la velocidad asignada de 15,5556 m/s según las unidades seleccionadas o lo equivalente a 56 km/h según el reglamento ECE R94, el movimiento del bus es en el eje "z" positivo.

Figura 53

Velocidad de impacto frontal

Keyword Input Form

NewID Draw Pick

Use *Parameter Comment

*INITIAL_VELOCITY (1)

1	NSID	NSIDEX	BOXID	IRIGID	ICID		
	1	0	0	0	0		
2	VX	VY	VZ	VXR	VYR	VZR	
	0.0	0.0	15.555600	0.0	0.0	0.0	

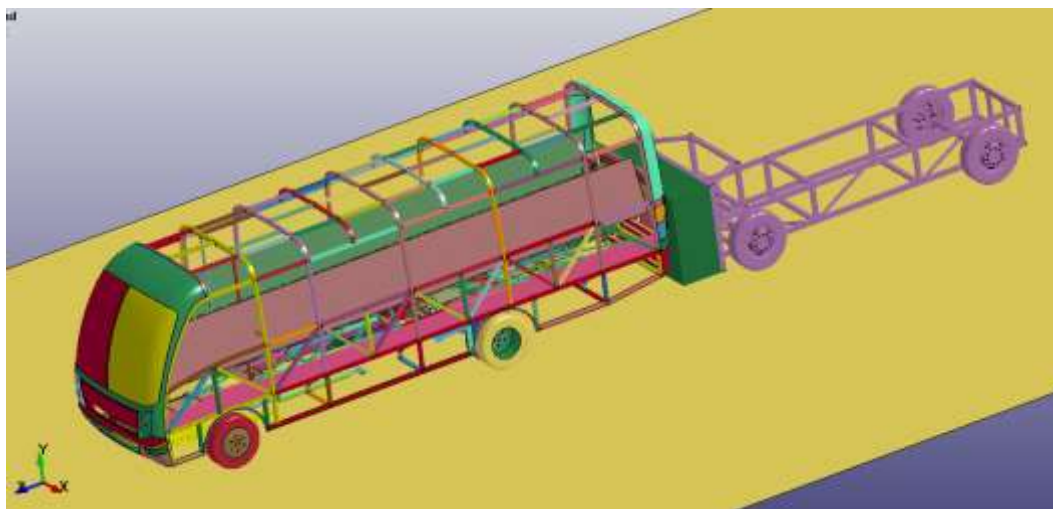
Nota. La velocidad de impacto frontal del minibús es de 15,5556 m/s o 56 km/h en el eje "z" positivo.

Barrera móvil para impacto posterior

Para la simulación de impacto posterior se utiliza una barrera móvil la cual representa a un vehículo impactador. Para realizar esta barrera se toma como referencia el Reglamento No. 95 de la Comisión Económica para Europa que se utiliza para impactos laterales ya que no existe un reglamento para vehículos, minibuses o buses que regulen un impacto posterior.

Figura 54

Barrera móvil para impacto posterior



Nota. Barrera móvil para impacto posterior tomada de referencia del Reglamento No. 95.

En la tabla 16 se indican las dimensiones de la barrera móvil (vehículo impactador).

Tabla 16

Dimensiones de la barrera móvil

Dimensiones	VALOR
Ancho	2019,42 [mm]
Alto	1300 [mm]
Grosor	600 [mm]
Peso	948.966 [kg]

Nota. Dimensiones de la barrera móvil para impacto posterior.

Condiciones de frontera para impacto posterior

Las condiciones de frontera para el impacto posterior cambian con respecto del impacto frontal, ya que ahora el minibús se mantiene como elemento fijo y el vehículo impactador (barrera móvil) es la que tiene movimiento, además se debe de crear contacto entre el bus con el piso, vehículo impactador con piso y el vehículo impactador con bus.

Para el estudio de impacto posterior el elemento esclavo es la barrera móvil que tendrá movimiento y el elemento master es el minibús, el cual será impactado y no tiene movimiento como se indica en la figura 55.

Figura 55

Contacto entre el bus y la barrera móvil

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_(ID/TITLE/MPP)_(THERMAL) (3)

1	<u>CID</u>	<u>TITLE</u>						
	4	CARRO VS BUS						
			<input type="checkbox"/> MPP1	<input type="checkbox"/> MPP2				
2	<u>IGNORE</u>	<u>BUCKET</u>	<u>LCBUCKET</u>	<u>NS2TRACK</u>	<u>INITITER</u>	<u>PARMAX</u>	<u>UNUSED</u>	<u>CPARMB</u>
	0	200		3	2	1.0005		0
3	<u>UNUSED</u>	<u>CHKSEGS</u>	<u>PENSE</u>	<u>GRPABLE</u>				
		0	1.0	0				
4	<u>SSID</u>	<u>MSID</u>	<u>SSTYP</u>	<u>MSTYP</u>	<u>SBOXID</u>	<u>MBOXID</u>	<u>SPR</u>	<u>MPR</u>
	3	1	2	2	0	0	0	0

Nota. Elemento esclavo (barrera móvil) y elemento master (minibús).

Velocidad de impacto posterior

El elemento esclavo (barrera móvil) tiene movimiento, la figura 56 indica la velocidad asignada de 13,8889 m/s según las unidades seleccionadas o lo equivalente a 50 km/h según el reglamento ECE R95, el movimiento del bus es en el eje "z" positivo.

Figura 56*Velocidad de impacto posterior*

*INITIAL_VELOCITY (1)						
1	<u>NSID</u> ●	<u>NSIDEX</u> ●	<u>BOXID</u> ●	<u>IRIGID</u>	<u>ICID</u> ●	
	11	0	0	0	0	
2	<u>VX</u>	<u>VY</u>	<u>VZ</u>	<u>VXR</u>	<u>VYR</u>	<u>VZR</u>
	0.0	0.0	13.888900	0.0	0.0	0.0

Nota. La velocidad de impacto posterior de la barrera móvil es de 13.8889 m/s o 50 km/h en el eje "z" positivo.

Control de energía de Hourglass

Esta carta de control permite controlar las energías internas y la energía de Hourglass que se generan en la simulación, en la figura 57 se asigna un control a la energía de Hourglass que sirve para controlar que este valor no exceda el 10% de la energía interna que se produce en la simulación para que el análisis sea válido.

Figura 57*Control de Hourglass*

Keyword Input Form

Use *Parameter Comment

*CONTROL_HOURLASS

1 IHQ QH

1	0.0600000
---	-----------

Nota. Se asigna un valor de 0,06 para el control de la energía de Hourglass y que el resultado de la simulación sea válido.

Tiempo de simulación

Para establecer el tiempo de simulación se utiliza la carta de control Termination la cual es de uso obligatorio porque se asigna el tiempo de simulación del impacto. En la figura 58 se indica un tiempo de 150 [ms] para la simulación, este tiempo es suficiente para el impacto ya que en unos 100 [ms] se produce el impacto y en los restantes 50 [ms] se genera el rebote de la colisión.

Figura 58

Tiempo de simulación de impacto frontal

Keyword Input Form

Use *Parameter Comment

*CONTROL_TERMINATION (1)

1	ENDTIM	ENDCYC	DTMIN	ENDENG	ENDMAS	NOSOL
	150.00000	0	0.0	0.0	1.000e+08	0

Nota. El tiempo suficiente para la simulación de impacto es de 150 [ms].

Solución del código K y compilación de la simulación

Como paso final para realizar la simulación se debe realizar la compilación de las cartas de control. Esto se lo realiza guardando el archivo K y posteriormente ejecutándolo en el software de procesamiento LS-DYNA. En esta parte el software realiza la solución matemática del modelado y designación de propiedades mecánicas del material. Cabe recalcar que, para realizar este procedimiento, se debe cumplir con los requisitos de calidad de malla, asignación de propiedades del material y programación a través de las cartas de control que se usa en el software LS-PrePost, con el propósito de obtener resultados reales. El tiempo de ejecución de este software varía de acuerdo a las características de la computadora y al gasto computacional que genere el diseño.

Figura 59

Compilación del código K en el software CAE

```

D:\SDWNAL\INSTALL\program\ls-dyna_imp_kr11_1_0_wine4_404160.exe  I-C:\Users\DELL\OneDrive\Desktop\PROVEC-1\CAE...
****
CPU time per zone cycle..... 0 nanoseconds
average cpu time per zone cycle.... 554 nanoseconds
average clock time per zone cycle.. 681 nanoseconds

estimated total cpu time     = 4556 sec ( 1 hr 15 min)
estimated cpu time to complete  = 4545 sec ( 1 hr 15 min)
estimated total clock time   = 8120 sec ( 1 hr 41 min)
estimated clock time to complete = 8108 sec ( 1 hr 41 min)

added mems = 1.18611e03
percentage increase = 1.68911e01

termination time           = 1.5886e03

enter some switch: stop

*** termination due to sense switch: stop ***
00 1 2.6307E-01 dt 1.00E-03 write triplet file 07/26/22 06:17:37

M e m o r y   r e q u i r e m e n t s 07/26/22 06:17:37

Memory required to complete solution: 8853K
Additional dynamically allocated memory: 539K
Total: 924K

```

Nota. El tiempo de solución del modelado depende de las características que posee cada computador.

Una vez concluida la ejecución se nos crea un archivo que se puede ejecutar en el software LS-PrePost donde se observa de manera gráfica las colisiones y también los resultados obtenidos de la simulación.

Validación de resultados por medio de energía de Hourglass

Para validar los resultados obtenidos en las simulaciones de impacto se utiliza el control de la Energía de Hourglass, el cual no debe superar el 10% de la energía interna generada en la simulación para que la solución sea aceptable. Si este valor fuera mayor al 10% los resultados obtenidos del análisis se pueden invalidar ya que no serían confiables. Para calcular la relación entre la energía interna y la energía de Hourglass se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 1

Cálculo de la energía de Hourglass

$$H = \frac{EH}{EI} \cdot 100\%$$

Donde:

- H= Control de energía de Hourglass [%]
- EH= Energía de Hourglass [kN-mm]
- EI= Energía interna [kN-mm]

Deformación

La deformación de la carrocería del minibús se obtiene mediante la diferencia entre la longitud inicial (antes del impacto) y la longitud (después del impacto). Esta deformación se calcula mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 2

Variación de longitud

$$\Delta L = L_f - L_o$$

Donde:

- ΔL = Variación de longitud [mm]
- L_f = Longitud final [mm]
- L_o = Longitud inicial [mm]

Capítulo IV

Resultados y discusión

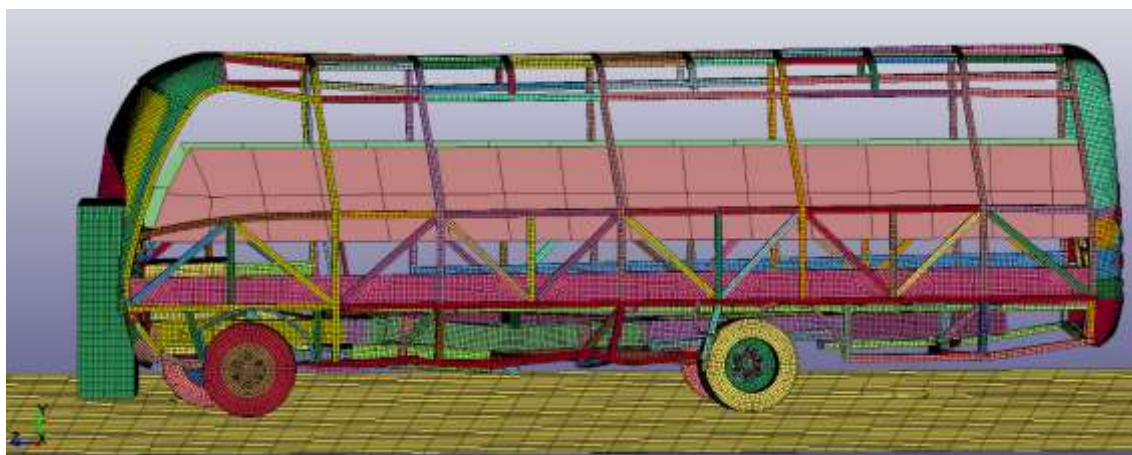
En el presente capítulo se especifican los resultados alcanzados enfocados a la deformación de la carrocería después de la simulación de impacto en el software computacional, los cuales permiten el análisis del comportamiento de la estructura frente a un posible impacto frontal y posterior.

Resultados obtenidos del ensayo de impacto frontal

En la primera simulación del ensayo de impacto frontal aplicado a la carrocería del minibús escolar, se aplicó como material de prueba el acero estructural ASTM A-500 de grado A. En la siguiente figura se evidencia la deformación de la carrocería tras impactarse con un muro rígido, en una primera instancia se observa que los elementos se deforman hasta el punto de ruptura de material e invadiendo la zona de seguridad.

Figura 60

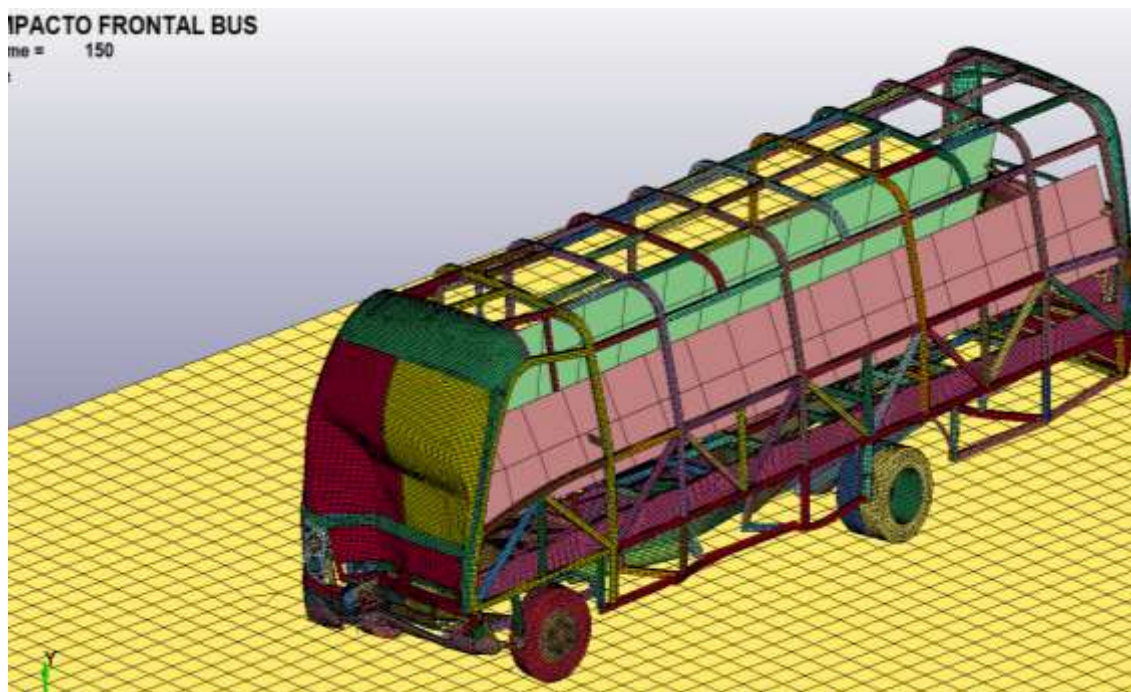
Vista lateral del Impacto frontal del minibús escolar



Nota. Se evidencia de forma visual la deformación de la carrocería del minibús escolar después de impactarse con el muro rígido en una vista lateral.

Figura 61

Vista isométrica del impacto frontal



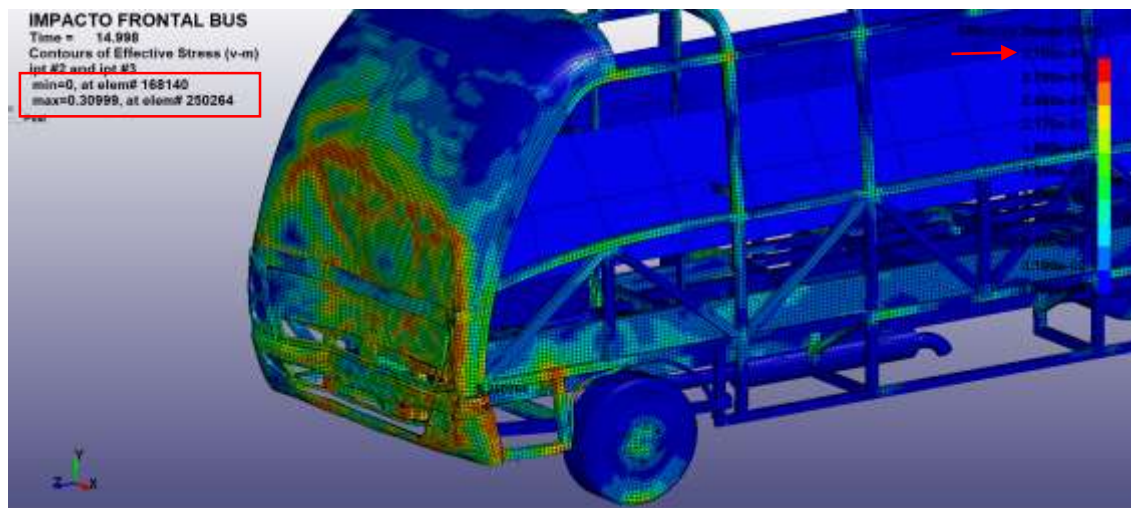
Nota. Se observa mediante la figura la deformación final del panel frontal de la estructura del minibús después de impactarse con la barrera rígida.

Esfuerzo de Von Mises (Esfuerzo efectivo)

Un parámetro muy importante al momento de realizar un análisis estructural es el esfuerzo de Von Mises, el cual nos arroja un valor máximo de 0,30999 [GPa] en el elemento E250264 y un valor mínimo de 0 en el elemento E168140 de la simulación de impacto frontal, lo que se puede interpretar con este resultado y fundamentándose en las propiedades del material anteriormente mencionadas, es que el material presenta un comportamiento plástico durante la colisión.

Figura 62

Esfuerzo efectivo de la estructura

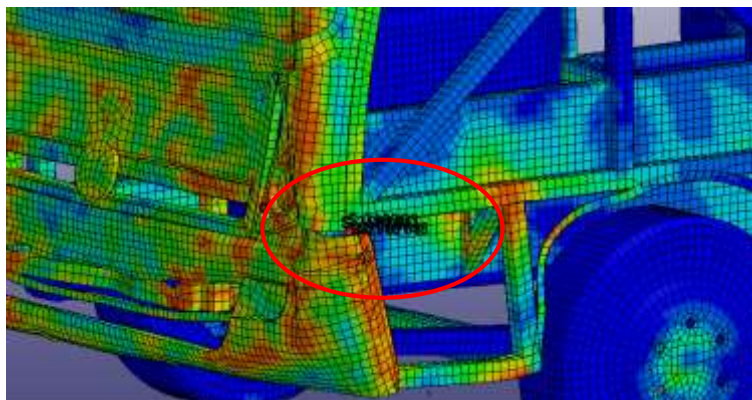


Nota. En la figura se puede observar el esfuerzo máximo efectivo de Von Mises en el elemento E250264 de la carrocería del bus durante los primeros 15 [ms] de simulación.

Para realizar la gráfica de esfuerzo de Von Mises en función del tiempo, se toma en cuenta los elementos más críticos respecto a la parte frontal de la carrocería, los elementos seleccionados son: E250264, E250263, E250261 y E118148.

Figura 63

Selección de elementos críticos

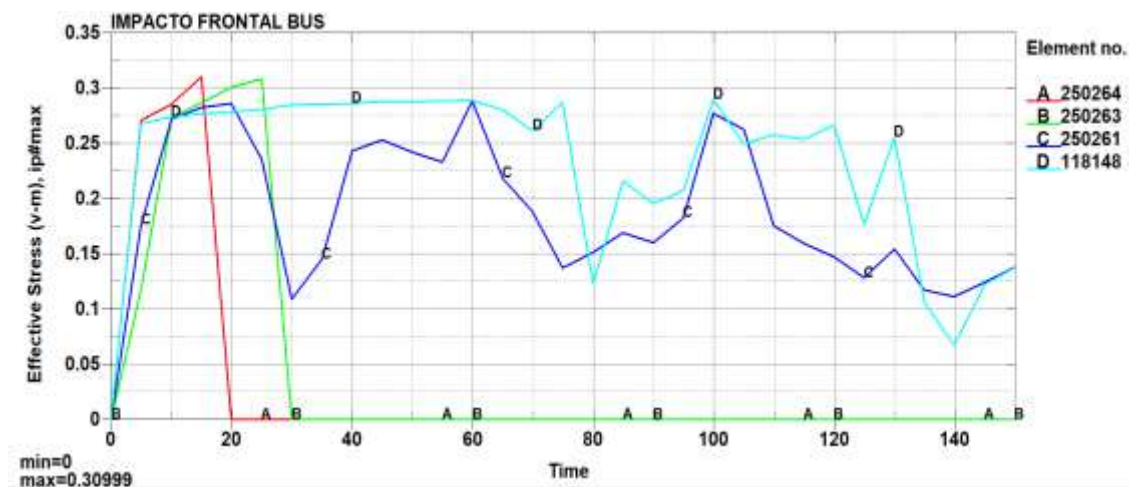


Nota. En la figura se observa la zona de selección de los elementos críticos de la parte frontal de la estructura del minibús escolar.

Mediante la gráfica se observa como varían los esfuerzos de dichos elementos durante el tiempo de simulación, alcanzando valores máximos del primer elemento a los 15 [ms] con un esfuerzo de 0,30999 [GPa], el segundo elemento alcanza un valor de 0,3083 [GPa] a los 25 [ms] y posteriormente desciende hasta 0, el elemento 250261 alcanza un valor máximo de 0,28851 [GPa] en los 60 [ms] de simulación y finalmente el elemento 118148 presenta un valor máximo de 0,28965 [GPa] en los 100 [ms] de simulación para posterior variar su valor de esfuerzo hasta finalizar la simulación.

Figura 64

Gráfica de Esfuerzo de Von Mises vs Tiempo



Nota. En la gráfica se pueden observar la curva de Von Mises en función del tiempo de los elementos más críticos de la parte frontal de la carrocería, estos son: E250264, E250263, E250261 y E118148, apreciando el esfuerzo de cada componente durante la prueba de impacto frontal.

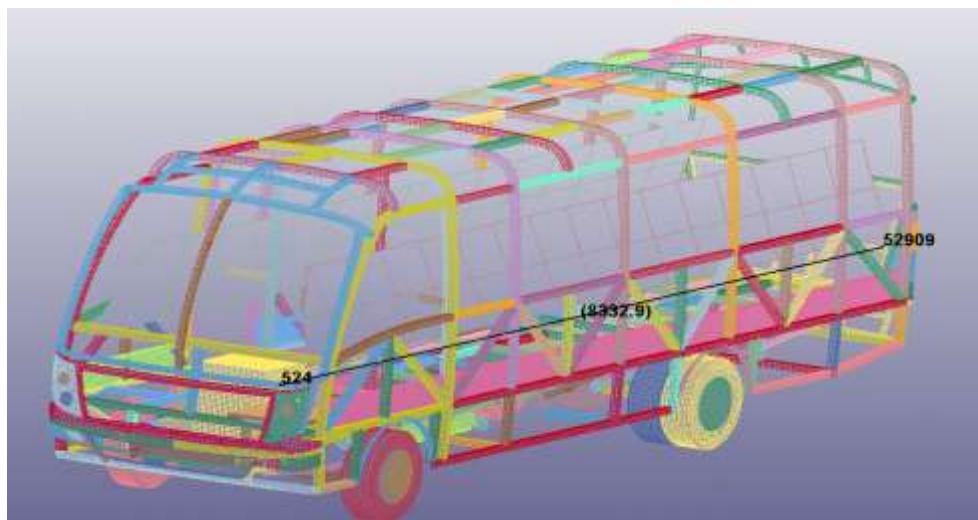
Invasión de la zona de supervivencia en el impacto frontal

Evidentemente en el lapso de simulación del impacto frontal la carrocería va sufrir una deformación irregular, para determinar esta deformación irregular se procede a medir el largo de la estructura antes y después del impacto para realizar el cálculo de deformación.

Como puntos de referencia para verificar la deformación del bus tras haber sufrido un impacto frontal, se toma el nodo N524 localizado en el panel frontal de la carrocería, y el nodo N52909 localizado en el panel posterior de la estructura.

Figura 65

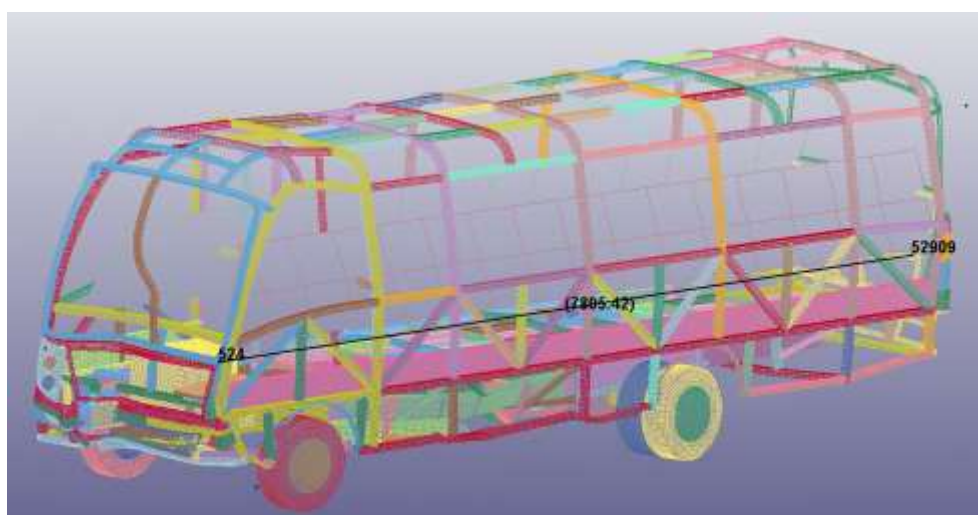
Longitud inicial de la estructura antes del impacto frontal



Nota. En la figura se detalla la longitud inicial de la estructura con un valor de 8337,78 [mm].

Figura 66

Longitud final de la estructura después del impacto frontal

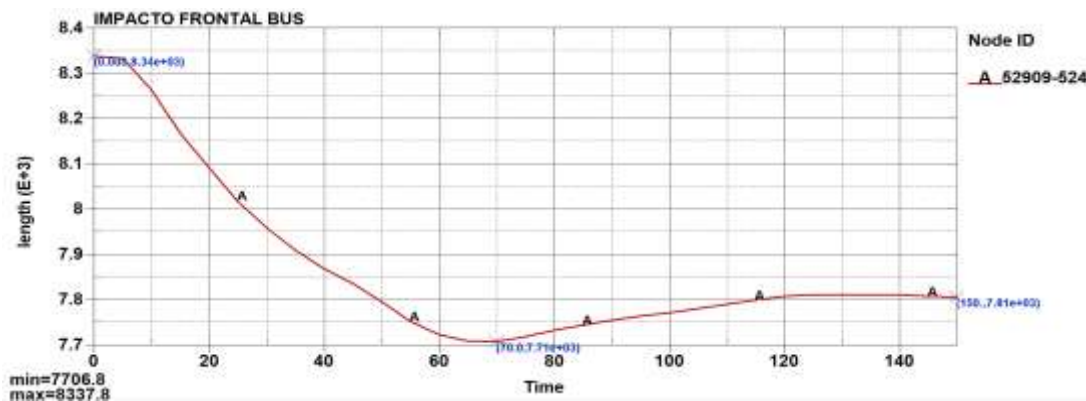


Nota. En la figura se detalla la longitud final de la estructura con un valor de 7805,42 [mm].

Con una gráfica deformación vs tiempo se puede justificar el desplazamiento irregular del habitáculo durante todo el ensayo.

Figura 67

Gráfica Deformación vs Tiempo



Nota. En la figura se identifica la longitud inicial antes del impacto con un valor de 8337,8 [mm] y la longitud máxima de deformación que sufre la carrocería en los primeros 70 [ms] con un valor de 7706,8 [mm], para finalmente alcanzar una longitud final de 7805,42 [mm].

Como se puede apreciar en la gráfica, se observa la deformación que sufre la carrocería durante la simulación, para obtener la deformación se aplica la siguiente ecuación:

Ecuación 3

Deformación de la carrocería en el impacto frontal

$$\Delta L = l_f - l_o$$

$$\Delta L = 8337,8 [mm] - 7706,8 [mm]$$

$$\Delta L = 631 [mm]$$

Con este valor de deformación y de acuerdo a la figura 14 la cual muestra la distancia entre el panel frontal y el asiento del conductor que es a una distancia de 600 [mm] se evidencia que esta distancia es sobrepasada por la deformación del elemento del panel frontal, invadiendo la zona de supervivencia del minibús escolar.

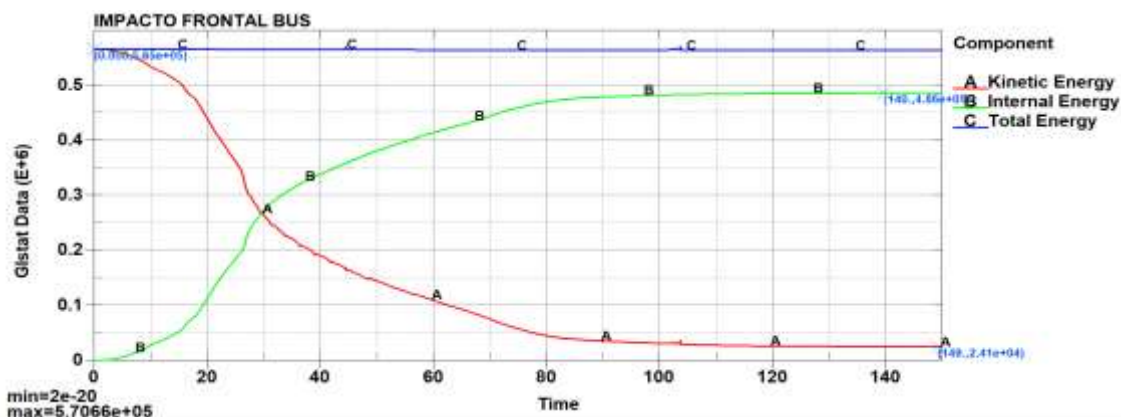
Balace de energías en el impacto frontal

A través del ensayo de impacto frontal y utilizando la teoría de energías, el cual especifica que la energía no se crea ni se destruye solo se transforma, se comprueba el cumplimiento de la misma, aplicando ecuaciones matemáticas en donde se evidencie la transformación de la energía producida en el impacto frontal (energía cinética) a una energía de deformación (energía interna).

Durante la simulación de impacto frontal, la energía cinética presenta un valor de $5,6541e+5$ [J] antes del impacto, después de haberse producido el impacto la energía interna presenta un valor de $4,8602e+5$ [J], produciendo una disipación de la energía del 85,96%.

Figura 68

Energías producidas en el impacto frontal



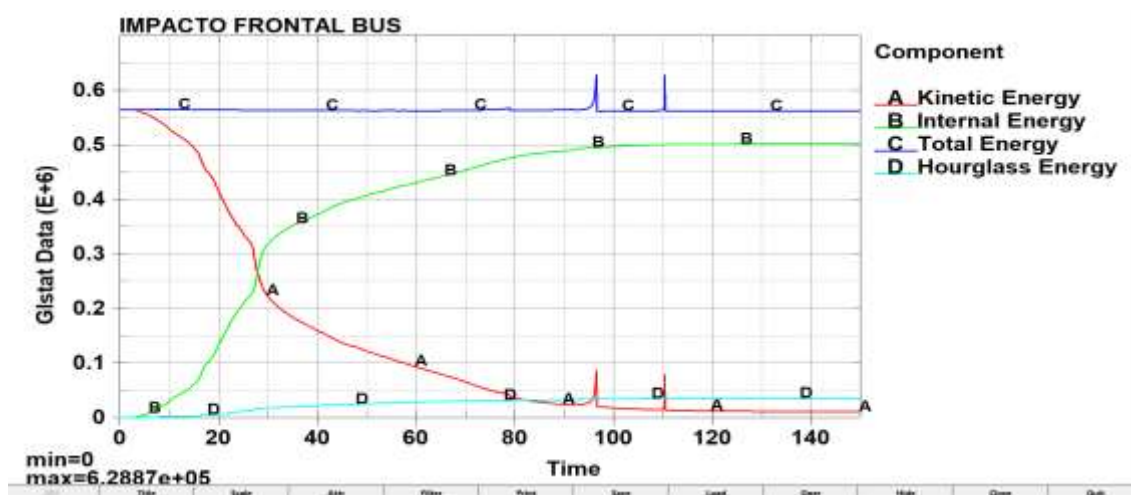
Nota. En la figura se evidencia la variación de las energías cinética e interna durante el tiempo de simulación del impacto frontal.

Control de Energía de Hourglass del impacto frontal

Como se ha mencionado anteriormente, para verificar que una simulación es efectiva y obtener buenos datos en el estudio, se acude a la relación de la energía interna y la energía de Hourglass. La premisa es que la energía de Hourglass no debe superar el 10% de la energía interna, con esto la solución se da como aceptable.

Figura 69

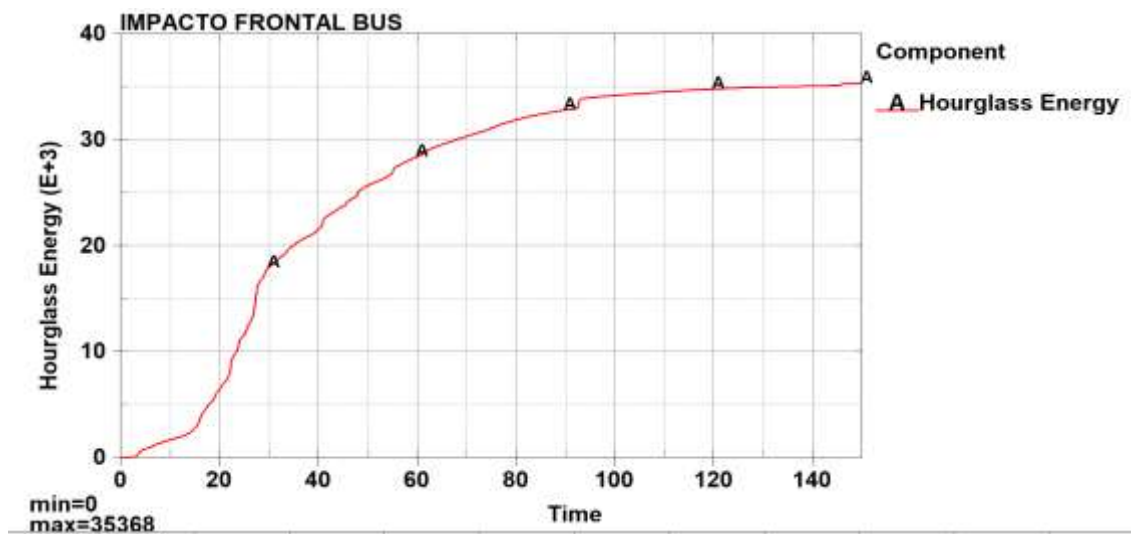
Control de energía de Hourglass



Nota. En la figura se identifican el balance de energías del ensayo de simulación de impacto, con esta gráfica se calcula el porcentaje de la energía de Hourglass.

Figura 70

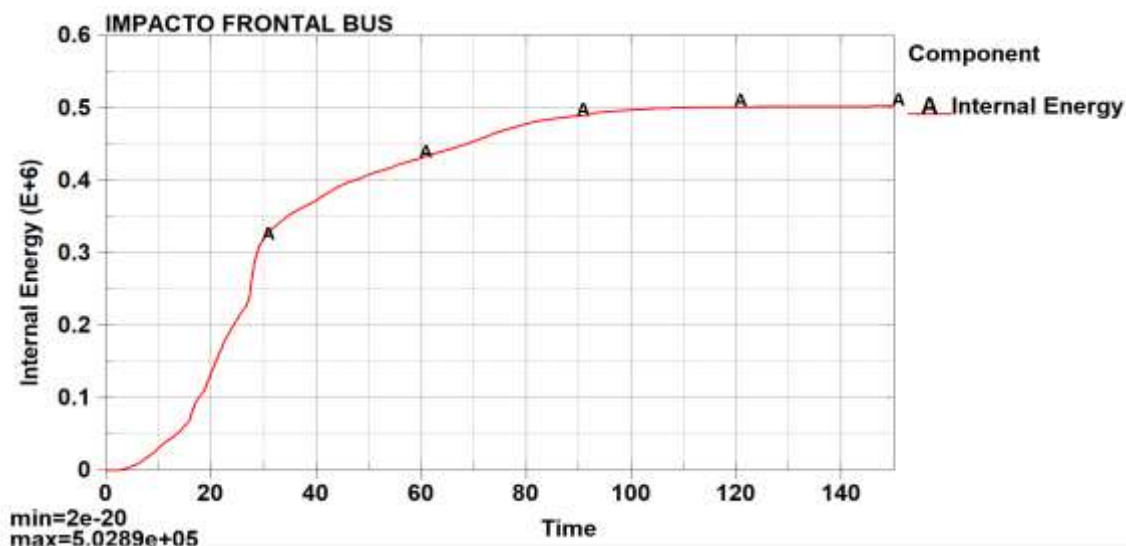
Energía de Hourglass



Nota. En la figura se muestra el valor máximo de la energía de Hourglass con un valor de $3,5368e+4$ [J].

Figura 71

Energía interna



Nota. En la figura se muestra el valor máximo de la energía interna con un valor de $5,03e+5$ [J].

Se procede a calcular el porcentaje de la energía de Hourglass con respecto a la energía interna utilizando la siguiente ecuación.

Ecuación 4

Control de energía de Hourglass

$$H = \frac{3,5368e + 4 \text{ [kN - mm]}}{5,0289e + 5 \text{ [kN - mm]}} * 100\%$$

$$H = 7,033\%$$

$$H < 10\%$$

Se evidencia que la Energía de Hourglass es menor al 10% respecto a la energía interna por lo que las condiciones establecidas para este ensayo de simulación son aceptables y válidas.

Resultados obtenidos del ensayo de impacto posterior

En la simulación del ensayo de impacto posterior aplicado a la carrocería del bus escolar, se aplicó como material de prueba el acero estructural ASTM A-500 de grado A. En la siguiente figura se evidencia la deformación de la carrocería tras ser impactada por una barrera móvil proveniente de la parte posterior con una velocidad de 50 [km/h].

Figura 72

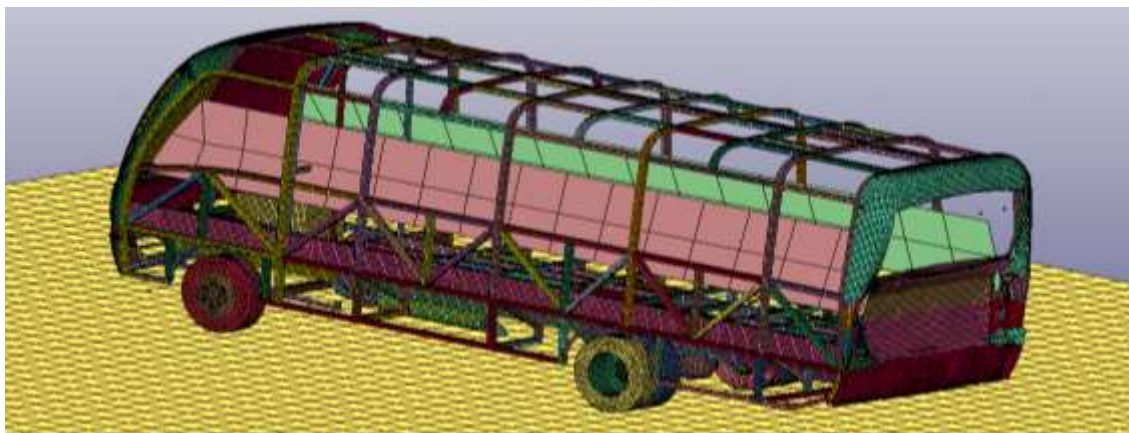
Vista lateral del Impacto frontal del bus escolar



Nota. Se evidencia de forma visual la deformación de la carrocería del bus escolar después de ser impactado por un coche móvil en una vista lateral.

Figura 73

Vista isométrica del impacto frontal



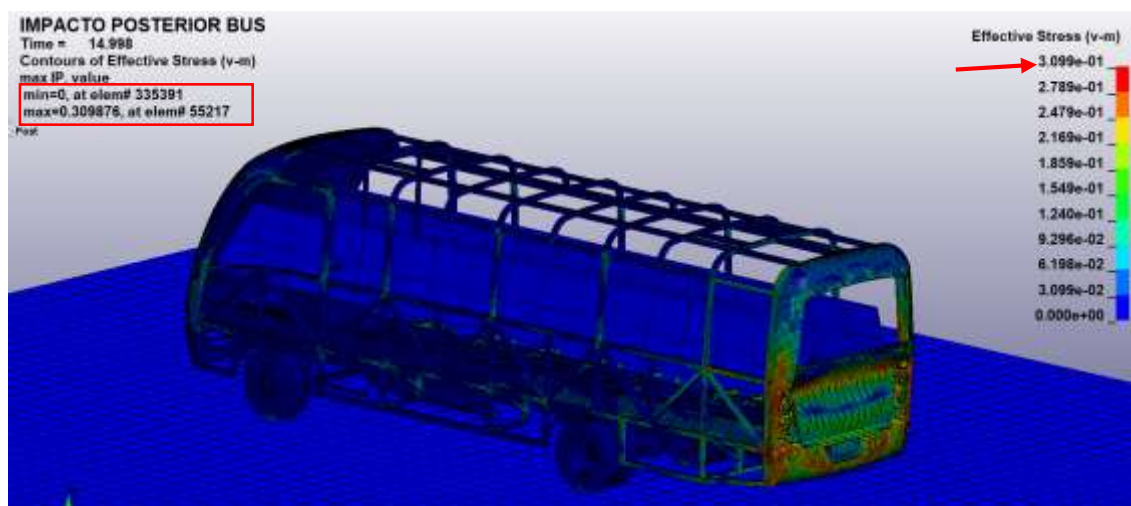
Nota. Se observa mediante la figura la deformación final del panel posterior de la estructura del bus después de ser impactado con la estructura móvil.

Esfuerzo efectivo (Esfuerzo de Von Mises)

En el presente análisis estructural el esfuerzo de Von Mises arroja un valor máximo de 0,309876 [GPa] en el elemento E55217 y un valor mínimo de 0 en el elemento E335391 de la simulación de impacto posterior, lo que se puede interpretar con este resultado y fundamentándose en las propiedades del material anteriormente mencionadas, es que la estructura presenta un comportamiento plástico durante la colisión.

Figura 74

Esfuerzo efectivo de la estructura

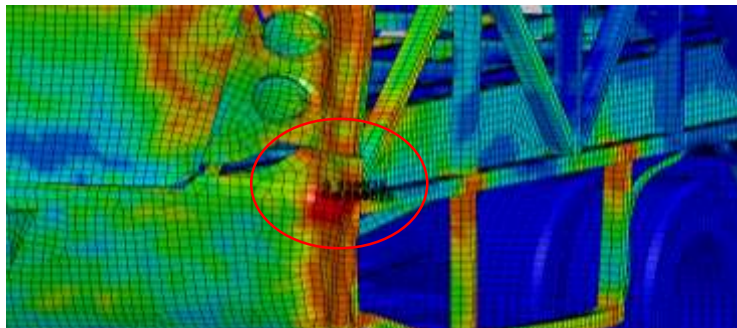


Nota. En la figura se puede observar el esfuerzo máximo efectivo de Von Mises en el elemento E55217 de la carrocería del bus durante los primeros 15 [ms] de simulación.

Para realizar la gráfica de esfuerzo de Von Mises en función del tiempo, se toma en cuenta los elementos más críticos respecto a la parte posterior de la carrocería, los elementos seleccionados son: E55217, E159027, E159026 y E159035.

Figura 75

Selección de elementos críticos

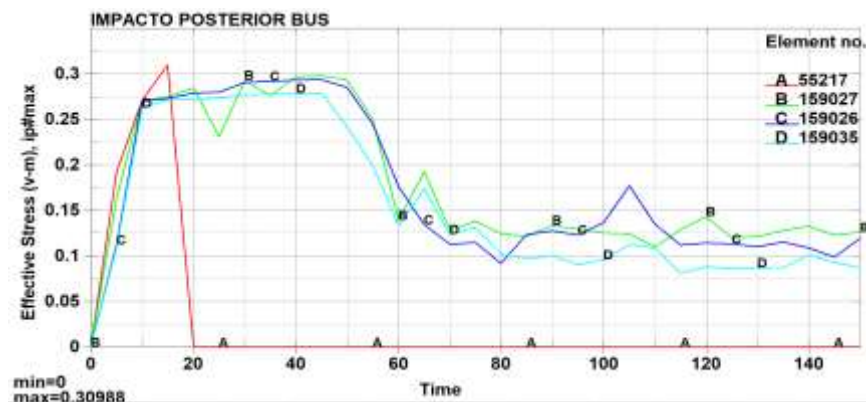


Nota. En la figura se observa la zona de selección de los elementos críticos de la parte posterior de la estructura del bus escolar.

Mediante la gráfica se observa como varían los esfuerzos de dichos elementos durante el tiempo de simulación, alcanzando valores máximos del primer elemento a los 15 [ms] con un esfuerzo de 0,30988 [GPa], el segundo elemento alcanza un valor de 0,29787 [GPa] a los 40 [ms], el elemento 159026 alcanza un valor máximo de 0,2941 [GPa] en los 45 [ms] de simulación y finalmente el elemento 119035 presenta un valor máximo de 0,227905 [GPa] en los 45 [ms] de simulación para posterior variar su valor de esfuerzo hasta finalizar la simulación.

Figura 76

Gráfica de Esfuerzo de Von Mises vs Tiempo



Nota. En la gráfica se pueden observar la curva de Von Mises en función del tiempo de los elementos más críticos de la parte posterior de la carrocería, estos son: E55217, E159027, E159026 Y E159035.

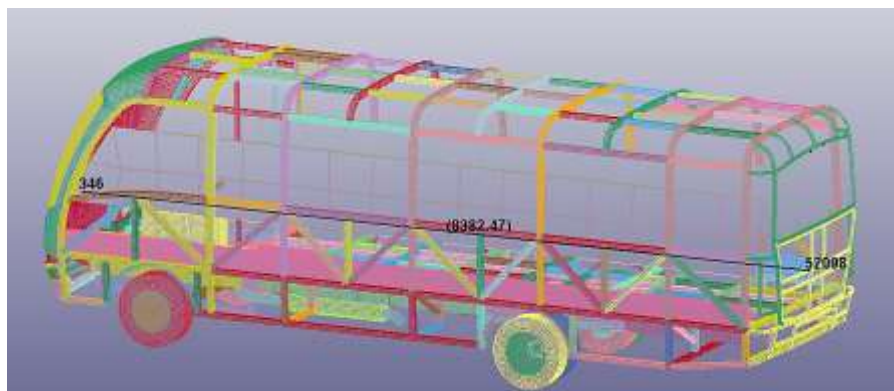
Invasión de la zona de supervivencia en el impacto posterior

Evidentemente en el lapso de simulación del impacto posterior la carrocería va sufrir una deformación irregular, para determinar dicha deformación irregular se procede a medir el largo de la estructura antes y después del impacto para realizar el respectivo cálculo.

Como puntos de referencia para verificar la deformación del bus tras haber sufrido un impacto posterior, se toma el nodo N346 localizado en el panel frontal de la carrocería, y el nodo N52098 localizado en el panel posterior de la estructura.

Figura 77

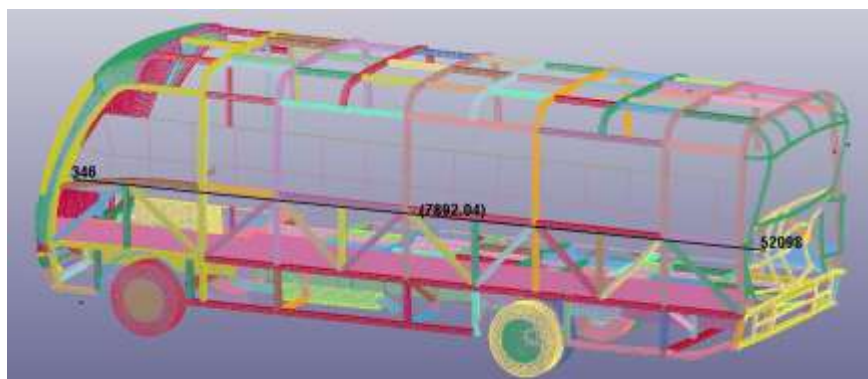
Longitud inicial de la estructura



Nota. En la figura se detalla la longitud inicial de la estructura con un valor de 8382,47 [mm].

Figura 78

Longitud final de la estructura

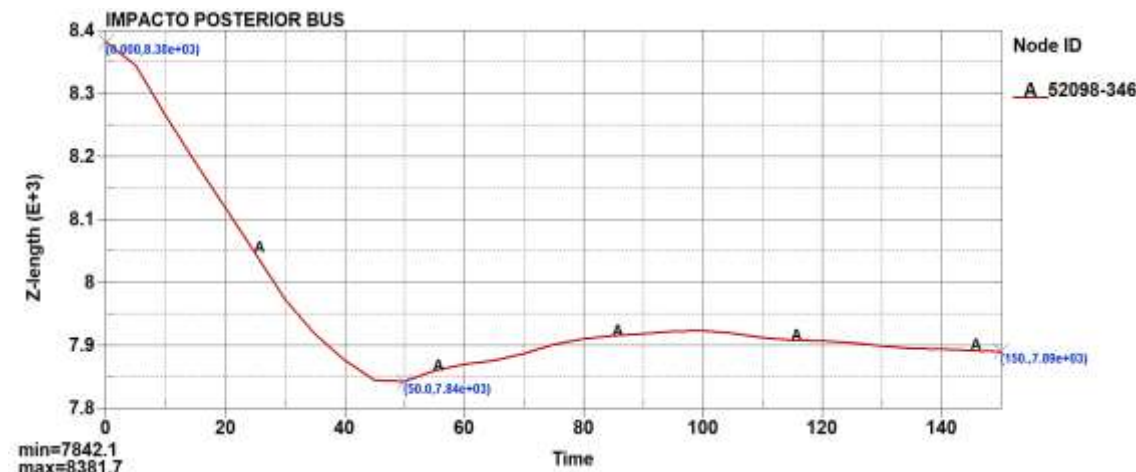


Nota. En la figura se detalla la longitud final de la estructura con un valor de 7892,04 [mm]

Con una gráfica deformación vs tiempo se puede evidenciar el desplazamiento irregular de la carrocería del bus escolar durante todo el tiempo de ensayo de impacto posterior.

Figura 79

Gráfica Deformación vs Tiempo



Nota. En la figura se identifica la longitud inicial entre los dos nodos con un valor de 8381,7 [mm], durante el impacto se evidencia una longitud de deformación máxima a los 50 [ms] de simulación con un valor de 7842,1 [mm], finalmente al culminar la simulación el valor final de la longitud de la carrocería es de 7892,04 [mm].

Como se puede apreciar en la gráfica, se observa la deformación que sufre la carrocería durante la simulación, para obtener la deformación se aplica la siguiente ecuación:

Ecuación 5

Deformación de la carrocería en el impacto posterior

$$\Delta L = l_f - l_o$$

$$\Delta L = 8382,5 [mm] - 7843,1 [mm]$$

$$\Delta L = 539,4 [mm]$$

Con este valor de deformación y de acuerdo a la figura 14 la cual muestra la distancia entre el panel posterior y el último asiento de pasajero que es a una distancia de 200 [mm] se evidencia que esta distancia es sobrepasada por la deformación del elemento del panel posterior, invadiendo la zona de supervivencia del minibús escolar.

Balance de energías en el impacto posterior

Durante la simulación de impacto posterior, la energía cinética presenta un valor de $9,4408e+4$ [J] antes del impacto, después de haberse producido el impacto la energía interna presenta un valor de $6,39e+4$ [J], produciendo una disipación de la energía del 67,68%.

Ahora se procede a calcular la cantidad de energía cinética que se transforma en energía de deformación al momento de la carrocería sufrir el impacto posterior en base al cálculo por fórmulas de energía cinética antes del impacto:

Ecuación 6

Energía cinética antes del impacto posterior

$$Ec_1 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2$$

Donde:

- Ec_1 : Energía cinética antes del impacto en [J]
- m_1 : Masa del elemento impactador en [kg]
- v_1 : Velocidad inicial del elemento impactador [m/s]

$$Ec_1 = \frac{1}{2} (948,966[kg])(13,8889[m/s])^2$$

$$Ec_1 = 9,1528 \times 10^4 [J]$$

Una vez calculada la Energía Cinética antes del impacto, se procede a calcular la Energía Cinética después del impacto:

Ecuación 7

Energía cinética después del impacto posterior

$$Ec_2 = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)v_2^2$$

Donde:

- Ec_2 : Energía cinética después del impacto en [J]
- m_2 : Masa del bus escolar en [kg]
- v_2 : Velocidad final del impactador en [m/s]

Como se puede evidenciar, hace falta el valor de la velocidad final del bus, para lo cual se aplica la siguiente fórmula:

Ecuación 8

Cálculo de la velocidad después del impacto

$$v_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1$$

$$v_2 = \frac{948,966[kg]}{(948,966 + 3820,34)[kg]} (13,8889[m/s])$$

$$v_2 = 2,7635 [m/s]$$

Así que la Energía Cinética después del impacto es:

$$Ec_2 = \frac{1}{2}(948,966kg + 3820,34kg)(2,7635m/s)^2$$

$$Ec_2 = 1,8211 \times 10^4 [J]$$

Ahora se procede a calcular la energía de deformación producida en la colisión a través de la diferencia entre Ec_1 y Ec_2 :

Ecuación 9*Energía de deformación*

$$Ec_1 - Ec_2 = 9,1528x10^4[J] - 1,8211x10^4[J]$$

$$Ec_1 - Ec_2 = 7,3317x10^4[J]$$

Finalmente se calcula el porcentaje de energía cinética perdida en la colisión:

Ecuación 10*Porcentaje de energía cinética perdida*

$$\frac{Ec_1 - Ec_2}{Ec_1} = \frac{7,3317x10^4[J]}{9,1528x10^4[J]} * 100\%$$

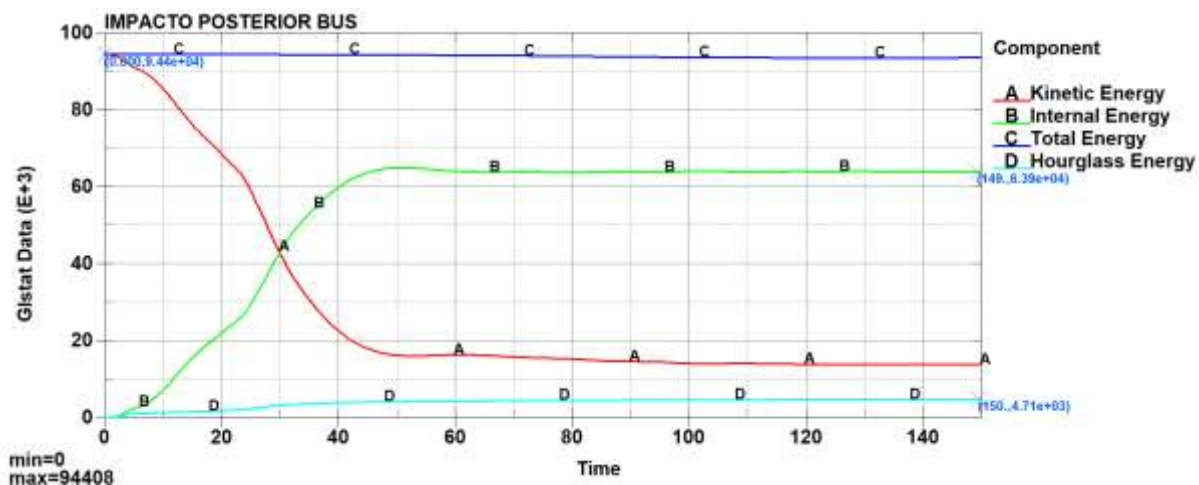
$$\frac{Ec_1 - Ec_2}{Ec_1} = 80\%$$

Control de Energía de Hourglass para el impacto posterior

Como referencia al control de energía de Hourglass se aplica el mismo principio que para el impacto frontal, es decir, la energía de Hourglass no debe superar el 10% de la energía interna, con esto la solución se da como válida.

Figura 80

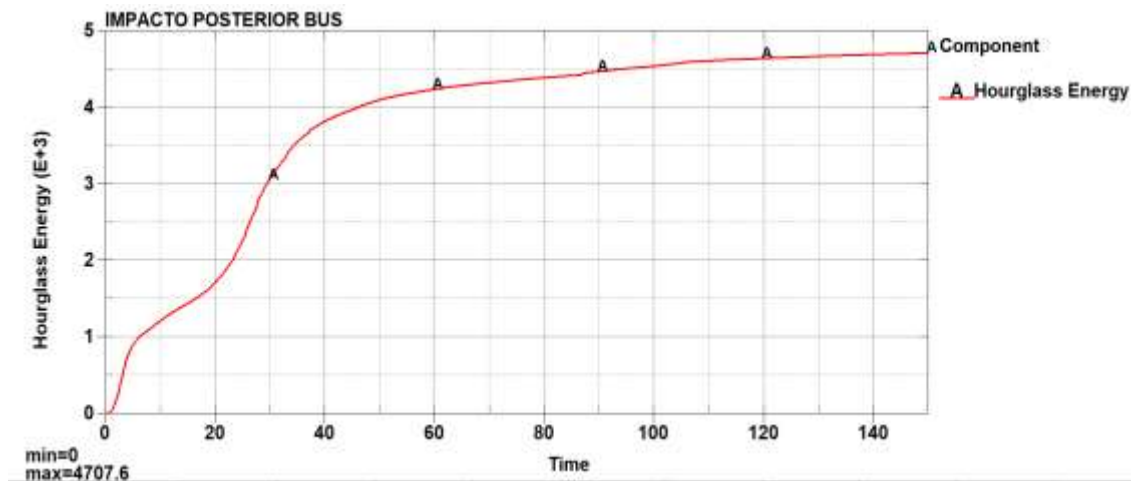
Control de Energía de Hourglass del impacto posterior



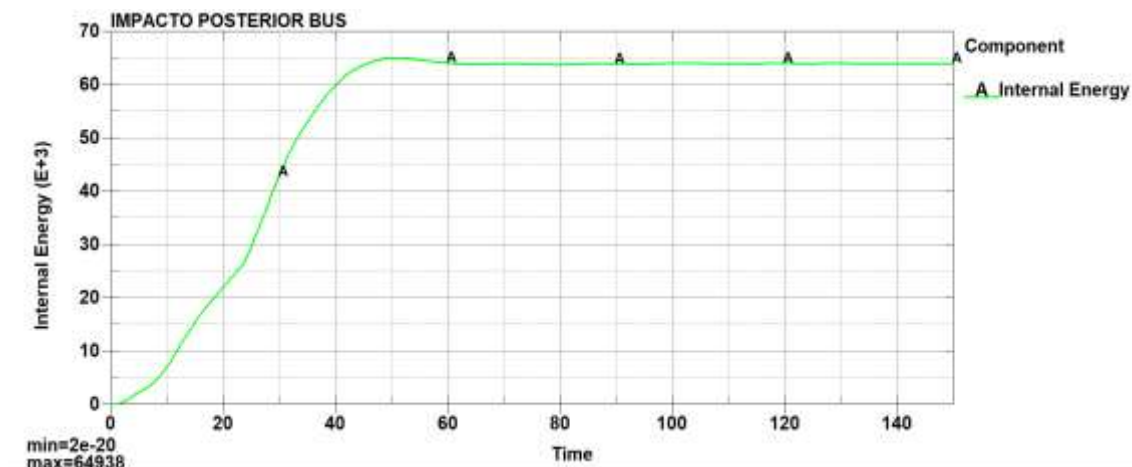
Nota. En la figura se identifican el balance de energías de la simulación de impacto posterior, con esta gráfica se calcula el porcentaje de la energía de Hourglass.

Figura 81

Energía de Hourglass en el impacto posterior



Nota. En la figura se muestra el valor máximo de la energía de Hourglass en el impacto posterior con un valor de 4707,6 [J].

Figura 82*Energía Interna*

Nota. En la figura se muestra el valor máximo de la energía interna en el impacto posterior con un valor de 64938 [J].

Se procede a calcular el porcentaje de la energía de Hourglass con respecto a la energía interna utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 11

Porcentaje de energía de Hourglass para impacto posterior

$$H = \frac{4707,6 [J]}{64938[J]} * 100\%$$

$$H = 7,2494\%$$

$$H < 10\%$$

Se evidencia que la Energía de Hourglass es menor al 10% respecto a la energía interna por lo que las condiciones establecidas para este ensayo de simulación son aceptables y válidas.

Capítulo V

Marco Administrativo

Para efectuar la presente investigación se especifican los recursos empleados necesarios para llevar a cabo de manera organizada y detallada los procesos de modelado y simulación de la estructura del minibús Volkswagen 9-150, con la finalidad de obtener resultados fiables en los análisis de simulación frontal y posterior.

Recursos humanos

Los recursos humanos que intervienen en el presente proyecto de integración curricular con el tema “Modelado De La Carrocería Del Vehículo Escolar Volkswagen 9-150 IBIMCO Para Simular Un Impacto Frontal y Posterior”, se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 17

Recursos humanos

Orden	Personal	Función
1	Bolagay Marcillo, Diego Gaspar	Investigador
2	Quishpe Urrutia, Job Nicolás	Investigador
3	Ing. Mena Palacios, Jorge Stalin	Colaborador científico

Nota. Se detallan los recursos humanos empleados en el desarrollo del presente proyecto de integración curricular.

Recursos tecnológicos

Los recursos tecnológicos ocupados en la presente investigación son utilizados para realizar el modelado y la simulación del impacto frontal y posterior.

Tabla 18*Recursos Tecnológicos*

Orden	Nombre
1	Laptop Dell y Lenovo
2	Dispositivos móviles
3	Internet
4	Software CAD
5	Software CAE

Nota. Se detallan los recursos tecnológicos empleados en el desarrollo del presente proyecto de integración curricular.

Recursos materiales

Los recursos materiales son empleados para dimensionar el minibús escolar Volkswagen 9-150 IBIMCO, medir distancias principales y grosores de perfiles.

Tabla 19*Recursos materiales*

Orden	Nombre
1	Flexómetro
2	Calibrador Vernier
3	Graduador

Nota. Se detallan los recursos materiales empleados en el desarrollo del presente proyecto de integración curricular.

Presupuesto

El presupuesto utilizado para realizar el modelado de la carrocería del bus escolar Volkswagen 9-150 IBIMCO perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE se detalla a continuación.

Tabla 20

Presupuesto

Detalle	Cantidad	Valor Unitario (USD)	Valor total (USD)
Movilización	2	32	64
Flexómetro	10	5	2
Calibrador Vernier	1	35	35
		SUMA TOTAL	\$101,00

Nota. Se detalla el presupuesto establecido en el desarrollo del presente proyecto de integración curricular.

Financiamiento

La presente investigación es financiada totalmente por los investigadores del proyecto de integración curricular con un costo total de 101,00 USD.

Capítulo VI

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Se concluyó que para el modelado de la carrocería del bus escolar se aplicó el método shell el cual se basa en realizar el diseño a través de elementos tipo cáscara o por operaciones de superficie consiguiendo un ahorro en el gasto computacional y disminuyendo el tiempo de compilación.

Se determinó que el material usado en el diseño de la carrocería es el Acero ASTM A-500 grado A, y las dimensiones aplicadas para el modelado de la estructura se rigen a las normas NTE INEN 1323 y RTE INEN 041, adicionalmente se tomaron medidas referenciales del bus ubicado en el patio de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Sede Latacunga.

Tras haber realizado el ensayo computacional de impacto frontal se logró evidenciar de forma visual que los elementos del panel frontal invaden la zona de supervivencia, esto se corroboró mediante un análisis matemático en donde se calcula la deformación que sufrió la carrocería tomando como referencia los nodos N524 y N52909 arrojando un valor de deformación de 631 [mm], distancia que invade la zona de supervivencia de la carrocería, ya que en la figura 14 se indica que la distancia entre el asiento del conductor y el panel frontal es de 600 [mm] y la deformación de los elementos del panel frontal superan esta distancia.

Después de haber realizado la simulación virtual de impacto posterior se evidenció de forma visual que los componentes del panel posterior se deforman hasta invadir la zona de supervivencia, incluso existen algunos elementos que sufren ruptura, esto se sustenta con el cálculo de deformación de la carrocería, en donde se toma como referencia los nodos N346 y N52098 para medir la cantidad de deformación, calculando un valor de 539,4 [mm]. Este

resultado nos asegura que la zona de seguridad es invadida ya que en la figura 14 se define que la distancia entre el panel posterior y el asiento del vehículo es de 200 [mm].

Por medio del ensayo de impacto frontal se estableció que el esfuerzo de Von Mises (Esfuerzo efectivo) alcanza un valor máximo de 0,30999 [GPa] en el elemento crítico E250264 en el tiempo de simulación de 15 [ms], posterior a este tiempo el elemento sufre ruptura, consecuencia del alto nivel de fuerza al ocurrir el impacto.

A través de la simulación de impacto posterior se concluyó que el valor del esfuerzo de Von Mises es de 0,309876 [GPa] en el elemento crítico E55217, presentando un comportamiento plástico hasta los 15 [ms] de simulación, posterior a este tiempo el elemento sufre fractura debido al alto valor de fuerza alcanzada por el impactador.

Mediante el software CAE, se consiguió el valor de la energía cinética con la que empieza el bus que posee una masa de 3820,34 [kg] y velocidad inicial de 15,56 [m/s], este valor es de $5,65e+5$ [J] y que esta energía cinética se transforma en energía de deformación con un valor de $4,86e+5$ [J], produciendo una disipación del 85,96%.

En el impacto posterior, la magnitud de la energía cinética que posee el coche impactador que tiene una masa de 949 [kg] y una velocidad inicial de 13,9 [m/s] es de $9,4e+4$ [J] y después de haberse producido la colisión la energía de deformación posee una magnitud de $6,39e+4$ [J], lo que produce una disipación de energía del 67,68%.

El cálculo de la energía de hourglass es importante para verificar la confiabilidad de los valores obtenidos en la simulación. Para el impacto frontal la energía interna alcanzó una magnitud de $5,03e+5$ [J] y la energía de hourglass $3,3e+4$ [J], aplicando el criterio del control de energías de hourglass el cual afirma que para que los datos obtenidos sean válidos el

porcentaje de la energía de hourglass debe ser inferior al 10% de la energía interna, lo que resulta que con los valores anteriores el porcentaje es del 7,033%, validando la simulación.

Para el control de la energía de hourglass en el impacto posterior, se aplica el mismo principio que en el impacto frontal, obteniendo un valor de energía interna y de energía de hourglass de 64938 [J] y 4707,6 [J] respectivamente. El porcentaje calculado es del 7,25%, evidenciando que este valor es menor que el 10% por lo que se ratifica que los datos obtenidos en la simulación son válidos.

Recomendaciones

Este estudio se enfocó en la parte estructural de la carrocería, pero observamos como la tecnología va desarrollando muchas más herramientas en esta área, y la finalidad es de salvaguardar las vidas de los ocupantes al momento de producirse una colisión, por tal motivo es muy importante que dentro de las siguientes investigaciones se introduzca temas de biomecánica en donde los ensayos virtuales de impacto ocupen maniquíes de prueba para validar el diseño de la estructura y el nivel de seguridad del ocupante del vehículo.

Dentro del país el acero estructural ASTM A500 grado A es el más usado en la manufactura de carrocerías. A través de más estudios de simulación de impactos se podría dar alternativas para el empleo de nuevos tipos de materiales de fabricación de carrocerías que posean mejores propiedades mecánicas y que el precio no sea muy elevado dado que en el mercado actual no existe mucha variedad.

Una problemática que evidenció es que no existen normativas nacionales específicas para realizar ensayos de impactos, por lo que se podría investigar mucho más a profundidad sobre los procesos de validaciones estructurales que se les realiza a las carrocerías de buses en distintos países para posteriormente aplicarlas en el país.

Si bien es cierto las normativas y reglamentos INEN son las que se ocupan para el control de fabricación y montaje de carrocerías en el país, estas normas han estado ya mucho tiempo sin reformarse y su gran problema es que poseen un grado mínimo de seguridad. Así que, se podría realizar un estudio de la fabricación y diseño de carrocerías para homologar y garantizar su comportamiento ante un impacto salvaguardando la vida de los ocupantes.

Es conveniente dar continuidad a la validación de carrocerías por medio de ensayos computacionales de impacto, ya que estos son una herramienta para verificar el estado de deformidad que van a tener las estructuras al momento de una posible colisión, consiguiendo que las empresas carroceras mejoren sus modelos y convirtiendo la carrocería en un elemento de seguridad pasiva del vehículo.

En este estudio se empleó un grosor de perfiles de 2mm en todos los elementos de la carrocería, por lo que los resultados obtenidos van a tener un mínimo porcentaje de variación con el comportamiento real que tendría la estructura física. Por lo que para próximas simulaciones se empleen perfiles de diferentes grosores para obtener resultados más apegados a la realidad.

Bibliografía

- Andrade, L., & Méndez, P. (2012). *“ESTUDIO DEL DISEÑO DE UNA CARROCERÍA CON ANÁLISIS DE ESFUERZOS ESTÁTICOS Y DINÁMICOS DE UN AUTOBÚS DE LA MARCA PATRICIO CEPEDA CALIFICADA CON NORMA ISO 9001-2008 MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UN SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DE LAS FUERZAS ”*. Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- ANSYS. (2015). *ANSYS LS-DYNA User's Guide* (Vol. 16.1). Canonsburg, Estados Unidos: ANSYS, Inc. Obtenido de <https://dokumen.tips/documents/ansys-ls-dyna-users-guide-55ec3506377a8.html?page=123>
- AraWorks. (2020). *Cómo comprobar la calidad del mallado en elementos finitos*. Obtenido de <https://araworks.es/como-comprobar-la-calidad-del-mallado-en-elementos-finitos/#:~:text=El%20cociente%20jacobiano%20representa%20c%C3%B3mo,tanto%20C%20peor%20ser%C3%A1%20la%20malla.>
- Autocasión. (02 de Octubre de 2006). *Compatibilidad entre vehículos en caso de accidente*. Obtenido de <https://www.autocasion.com/actualidad/noticias/compatibilidad-entre-vehiculos-en-caso-de-accidente>
- Autocasion. (28 de Marzo de 2007). *El habitáculo de seguridad y todo lo que le rodea*. Obtenido de <https://www.autocasion.com/actualidad/noticias/el-habitaculo-de-seguridad-y-todo-lo-que-le-rodea>
- Carrocerías Jácome. (2018). *Bus interprovincial*. Obtenido de <http://www.carroceriasjacome.com/index.php/carroceria/inter>

- Celigüeta Lizarza, J. (2011). *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural* (Cuarta Edición ed.). España: Tecnun. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/83570224.pdf>
- CEPE. (2012). *Reglamento n o 94 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE) — Prescripciones uniformes sobre la homologación de los vehículos en lo relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión frontal*. Diario Oficial de la Unión Europea.
- Cuasapud, D. (2018). *ANÁLISIS ESTRUCTURAL A CARGAS DE IMPACTO POSTERIOR POR ALCANCE DE UN BUS INTERPROVINCIAL MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS*. Obtenido de <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/2768>
- Cháfuel, V. (2017). *ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE UNA CARROCERÍA DE BUS INTERPROVINCIAL BASADO EN SIMULACIÓN VIRTUAL DE IMPACTO FRONTAL Y POSTERIOR PARA VERIFICAR MATERIALES Y GEOMETRÍAS DE CONSTRUCCIÓN*. Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- ECE 95. (2014). *Reglamento no 95 de la Comisión Económica para Europa (CEPE) de las Naciones Unidas — Prescripciones uniformes sobre la homologación de los vehículos en lo relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión lateral [2015/1093]*. Diario Oficial de la Unión Europea.
- Ecuavisa. (2021). *Buses urbanos suspenderán su servicio desde el 10 de mayo, en Quito*. Obtenido de <https://www.ecuavisa.com/noticias/ecuador/buses-urbanos-suspenderan-su-servicio-desde-el-10-de-mayo-en-quito-AA147266>

Esmeraldas, C. (17 de agosto de 2016). Análisis estructural basado en simulación por el método de elementos finitos de una carrocería de bus interprovincial sometida a prueba de impacto lateral para determinar la geometría y materiales aplicables que garanticen la seguridad de los pasajeros. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/11776>

EuroNCAP. (2021). *Barrera frontal fija*. Obtenido de <https://www.euroncap.com/es/seguridad-en-los-veh%C3%ADculos/descripci%C3%B3n-de-las-valoraciones/protecci%C3%B3n-de-ocupantes-adultos/impacto-frontal/barrera-frontal-fija/>

FastMag. (2014). *Tipos de pruebas*. Obtenido de <https://fast-mag.com/sabias-que-es-un-crash-test/>

Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización. (2013). *NTE INEN 2664*. Obtenido de <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2664.pdf>

LS-DYNA. (2022). *Consistent units*. Obtenido de LS-DYNA Support Site: <https://www.dynasupport.com/howtos/general/consistent-units>

Manjarrés, F., & Santillán, E. (2016). *Análisis estructural a cargas de impacto frontal de un bus tipo interprovincial mediante el método de elementos finitos*. Quito.

Mantilla, I. (16 de diciembre de 2021). *Siniestros de tránsito del 2021 ya superan los del 2020*. Obtenido de <https://www.elcomercio.com/actualidad/seguridad/siniestros-transito-fallecidos-heridos-victimas.html>

Mico, O. (2013). *¿Qué es el Euro NCAP?* Obtenido de <https://www.motor.es/que-es/euro-ncap>

Mirlisenna, G. (2022 de Enero de 2016). *¿Qué es el método de elementos finitos y cómo es utilizado en la simulación?* Obtenido de ESSS: <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>

NTE INEN 1323. (2009). *VEHÍCULOS AUTOMOTORES. CARROCERÍAS DE BUSES.*

REQUISITOS. Quito: INEN. Obtenido de

<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte-inen-1323-1.pdf>

NTE INEN 1668. (2015). *VEHÍCULOS DE TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS*

INTRARREGIONAL, INTERPROVINCIAL E INTRAPROVINCIAL. REQUISITOS. Quito:

INEN. Obtenido de chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_1668-1.pdf

NTE INEN 2205. (2010). *VEHÍCULOS AUTOMOTORES. BUS URBANO. REQUISITOS.*

QUITO: INEN. Obtenido de chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2205-2.pdf>

NTE INEN 2415. (2013). *TUBOS DE ACERO AL CARBONO SOLDADOS PARA*

APLICACIONES ESTRUCTURALES Y USOS GENERALES. REQUISITOS.

NTE INEN 2656. (2012). *Normativa Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2656:2012.* Quito: INEN.

Obtenido de chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2656.pdf>

RTE INEN 041. (2011). *VEHÍCULOS DE TRANSPORTE ESCOLAR*. QUITO: INEN. Obtenido de chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.pudeleco.com/files/RTE-041-2R.pdf

SIEMENS. (2022). *Diseño Asistido por Ordenador*. Obtenido de <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-design-cad/12507>

SIEMENS. (2022). *Ingeniería asistida por ordenador (CAE)*. Obtenido de <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-engineering-cae/13112>

SolidWorks. (2019). *Verificaciones de calidad de malla*. Obtenido de https://help.solidworks.com/2019/spanish/SolidWorks/cworks/c_Mesh_Quality_Checks.htm

Tecno Coche. (2016). *Características constructivas de la carrocería*. Obtenido de https://www.tecnocoche.com/mecanica/mecanica_basica/caracteristica_carroceria.html

Tejasagar, A., Srikanth, k., & Veeraraju, P. (2012). *SIMULATION OF VEHICULAR FRONTAL CRASH-TEST*.

YOHERSA. (2015). *Tubo Estructural ASTM A500*. Obtenido de <https://www.yohersa.com/tubo-a500>

ANEXOS