“Modelado de la carrocería del vehículo escolar Volkswagen 9-150 IBIMCO para simular un impacto lateral izquierdo y lateral derecho”

Cangui Toapanta, Junior Steven y Padilla Castro, Fernando José

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

15 de agosto del 2022

Latacunga.

Reporte de Verificación de Contenido

COPYLEAKS

Tesis Cangui J. y Padilla F. .pdf

Scanned on: 20:7 August 11, 2022 UTC

6.3%	15	18218
Overall Similarity Score	Results Found	Total Words in Text

Identical Words	333
Words with Minor Changes	138
Paraphrased Words	677
Omitted Words	0

JORGE STALIN
MENA PALACIOS

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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 lateral izquierdo y lateral derecho"** fue realizado por los señores **Cangui Toapanta, Junior Steven y Padilla Castro, Fernando José,** 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 analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 10 de agosto del 2022

Firma:

JORGE STALIN
MENA PALACIOS

.....

Ing. Mena Palacios, Jorge Stalin

C.C.: 1803725900

ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Ciencias de la Energía Y Mecánica

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Cangui Toapanta, Junior Steven** con cédula de ciudadanía n° **1724047392** y **Padilla Castro, Fernando José,** con cédula de ciudadanía n° **0550348379,** 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 lateral izquierdo y lateral derecho*** 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

Cangui Toapanta, Junior Steven	**Padilla Castro, Fernando José**
C.C.: 1724047392	**C.C.: 0550348379**

ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Ciencias de la Energía Y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Autorización de Publicación

Nosotros, **Cangui Toapanta, Junior Steven** con cédula de ciudadanía n° **1724047392** y **Padilla Castro, Fernando José,** con cédula de ciudadanía n° **0550348379,** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: ***Modelado de la carroceria del vehiculo escolar Volkswagen 9-150 de las Fuerzas Armadas ESPE para simular un impacto lateral izquierdo y lateral derecho*** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Latacunga, 10 de agosto del 2022

Firma

.....	.....
Cangui Toapanta, Junior Steven	**Padilla Castro, Fernando José**
C.C.: 1724047392	**C.C.: 0550348379**

Dedicatoria

El presente proyecto se lo dedico principalmente a Dios y a mis queridos padres Roque Efraín Cangui Cadena y Norma Patricia Toapanta Chiguano por haberme dado la vida, por ser mi ejemplo de lucha, por siempre haber confiado en mí y haber sido mi apoyo incondicional en toda mi vida estudiantil, por haber sido siempre la luz de mi camino y guiarme, gracias a sus maravillosos consejos hacerme un hombre de bien y realizarme como profesional. A ellos quiénes los amo con todo mi corazón.

Con mucho amor a mi adorada y amada hija Florcita Valentina quién es mi más grande motivación e inspiración por la cual cada día me despierto para superarme, por ser la razón de mi vida y haberme motivado para culminar mis estudios superiores.

A mi maravillosa novia Lorena Sánchez que la amo con todo mi corazón por haberme apoyado siempre a pesar de todos mis tropiezos, ayudar a levantarme en los momentos más difíciles de mi vida, comprenderme y haberme dado una hermosa hija.

A mis hermanos Kevin y Keyla con quiénes he compartido bellos momentos, por haberme dado su apoyo de una u otra manera y haber confiado en mí.

A Gladys Caiza por haber sido como mi segunda madre en todo este trayecto, brindarme sus buenos consejos y comprensión.

Junior Steven

Dedicatoria

El presente proyecto de investigación, se lo dedico en primer lugar a Dios, por ser guía, darme la sabiduría, las fuerzas necesarias y la perseverancia para cumplir este logro tan grande.

A mis padres Víctor Hugo Padilla Taipe y Mónica del Pilar Castro Gutiérrez quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer a las adversidades, porque Dios está conmigo siempre. Me han dado todo lo que soy como persona, así como mis valores, principios, perseverancia y empeño. Gracias a sus consejos que nunca faltaron, por hacerme un hombre de bien y realizarme como profesional.

A mi enamorada Nayeli por su compresión, por siempre motivarme, por ayudarme en los momentos difíciles, creer en mí y sin duda apoyarme y guiarme cuando más lo necesito.

Para culminar este trabajo va dedicado para todas aquellas personas que siempre han confiado en mí.

Fernando José

Agradecimiento

A Dios mi creador por permitir haberme realizado como profesional y con su santa bendición haberme cuidado siempre.

A mi querida familia quienes han sido mi pilar fundamental en todo este proceso, quienes siempre me han apoyado de varias maneras, siempre estaré muy agradecido.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Energía y Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz y todo el personal docente por haber sido parte de mi formación profesional.

A mi director de tesis Ing. Stalin Mena quién supo darme su apoyo incondicional, compartir sus conocimientos en el ámbito ingenieril y guiarme durante el desarrollo del presente proyecto de titulación.

A mis compañeros y amigos por haber formado parte de mi vida universitaria, quienes de una u otra manera supieron darme apoyo recíproco y brindado grandes anécdotas.

Junior Steven

Agradecimiento

A Dios por brindarme salud, vida, sabiduría y guiarme en mis estudios para culminar con éxito esta etapa estudiantil.

A mis padres que han sido pilar fundamental en mi vida, por su esfuerzo, sacrificio y apoyo brindado para que no me falte nada por verme triunfar en cada etapa de formación.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Carrera de Ingeniería Automotriz, a los docentes que impartieron catedra para mi formación profesional.

A mi director de tesis Ing. Stalin Mena por haber compartido su conocimiento y por su apoyo incondicional durante el desarrollo del presente proyecto.

Agradezco a mis amigos y compañeros que compartieron esta gran experiencia de estudiante conmigo.

Fernando José

ÍNDICE DE CONTENIDO

Carátula 1

Reporte de Verificación de Contenido 2

Certificación 3

Responsabilidad de Autoría 4

Autorización de Publicación 5

Dedicatoria 6

Dedicatoria 7

Agradecimiento 8

Agradecimiento 9

Índice de contenido 10

Índice de figuras 15

Índice de tablas 19

Índice de ecuaciones 20

Resumen 21

Abstract 22

Capítulo I: Marco metodológico de la investigación 23

- **Antecedentes investigativos** 23
- **Planteamiento del problema** 25
- **Descripción resumida de proyecto** 26
- **Justificación e importancia** 27
- **Objetivos** 28
  - ***Objetivo General*** *28*

Objetivos Específicos 28

Metas del proyecto 29

Hipótesis 29

Variables de la investigación 30

Variables independientes 30

Variables Dependientes 30

Metodología de desarrollo del proyecto 31

Método documental-bibliográfico 31

Método experimental 31

Metodología de investigación 31

Método analítico 32

Método Deductivo 32

Capítulo II: Marco Teórico 34

Carrocería de buses 34

Elementos principales que componen una carrocería..... 34

Clasificación de las carrocerías 35

Carrocería con chasis independiente 35

Carrocería auto portante 36

Clasificación vehicular 37

Mini Bus Volkswagen 9-150 42

Habitáculo de seguridad 44

Espacio de supervivencia 45

Tipos de impactos 46

Impactos Frontales 46

Impactos posteriores 47

Impactos laterales 47

Normativa Nacional e Internacional 48

Normativa Nacional 48

Normativa Internacional 48

Homologación vehicular 51

Materiales que se usan para la fabricación de estructuras de carrocerías 53

Acero ASTM A 500 54

Software de Diseño y Simulación 55

Herramientas de diseño asistido 55

Diseño asistido por computador (CAD)..... 55

Ingeniería asistida por computadora (CAE) 56

Elementos Tipo Shell..... 56

Software ANSA..... 58

Software LS DYNA 58

Software LS PREPOST 59

Método de Elementos Finitos (MEF) 60

Tipos de Malla 61

Relación Jacobiana 62

Energía de Hourglass 63

Capítulo III: Ingeniería Asistida por Computador para el Análisis de una Carroceríade Bus 65

Introducción 65

Descripción y especificaciones de la carrocería 65

Chasis Volkswagen 9-150 ..... *66*

Metodología de los procesos del análisis 68

Modelado de los objetos de estudio 69

Carrocería del bus *70*

Barra deformable móvil (BMD) ECE R95 ..... *71*

Preproceso del análisis estático 72

Configuración de la carrocería *72*

Generación de Malla *73*

Asignación de materiales y perfiles estructurales 76

Preproceso del análisis dinámico 84

Barra deformable móvil de acuerdo la ECE R95 .....*84*

Distribución de peso en la BDM *85*

Importación de la BDM *87*

Velocidad de la BDM *90*

Capítulo IV: Análisis de Resultados 94

Resultados obtenidos del ensayo virtual 94

Absorción de Energía de los Armazones Laterales del Minibús 95

Energías impacto lateral derecho *98*

Energías impacto lateral izquierdo *98*

Impacto Lateral Derecho 99

Deformación Estructural e invasión de la zona de supervivencia *99*

Validación del estudio virtual *101*

Deformación direccional de la carrocería *104*

Esfuerzo Efectivo de Von Mises *108*

Impacto Lateral Izquierdo 112

Deformación estructural e invasión de la zona de supervivencia *112*

Validación del estudio virtual *114*

Deformación direccional de la carrocería *117*

Esfuerzo Efectivo de Von Mises *121*

Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones **126**

Conclusiones 126

Recomendaciones 128

Bibliografía 129

Anexos 132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Árbol de planteamiento del problema* 25

Figura 2 *Estructura de la carrocería de minibús* 34

Figura 3 *Paneles que componen una carrocería* 35

Figura 4 *Motocicleta* 38

Figura 5 *Minibús* 38

Figura 6 *Camioneta doble cabina* 40

Figura 7 *Unidad de carga mediana* 41

Figura 8 *Ambulancia* 41

Figura 9 *Minibús Volkswagen 9-150* 42

Figura 10 *Especificación del espacio de supervivencia* 46

Figura 11 *Impacto Lateral del minibús* 47

Figura 12 *Impacto lateral según la ECE R95* 49

Figura 13 *Barrera deformable móvil* 51

Figura 14 *Impactador ECE R95* 51

Figura 15 *Proceso de Homologación vehicular* 52

Figura 16 *Elementos típicos de Shell* 57

Figura 17 *Ejemplo de elemento tipo Shell 3D* 57

Figura 18 *Creación de malla en Software ANSA* 58

Figura 19 *Ejecución de código de análisis de elementos finitos* 59

Figura 20 *Ejemplo de choque simulado con Ls-prepost* 60

Figura 21 *Elementos finitos más comunes* 62

Figura 22 *Relación jacobiana de la carrocería* 63

Figura 23 *Deformaciones de Hourglass* 64

Figura 24 *Minibús escolar Volkswagen 9-150* 66

Figura 25 *Esquema de chasis Volkswagen 9-150* 67

Figura 26 *Diagrama de procesos de modelado y simulación* 69

Figura 27 *Modelado de la carrocería Volkswagen 9-150* 71

Figura 28 *Barrera deformable móvil ECE R95* 72

Figura 29 *Mallado de la carrocería* 73

Figura 30 *Tamaño de malla de la carrocería* 74

Figura 31 *Mallado de la carrocería* 75

Figura 32 *Relación jacobiana de la carrocería* 76

Figura 33 *Coordenadas de la curva esfuerzo – deformación unitaria* 80

Figura 34 *Curva de deformación unitaria vs esfuerzo* 81

Figura 35 *Asignación del acero estructural ASTM A500 GRADO A* 81

Figura 36 *Masa del chasis Volkswagen 9-150* 83

Figura 37 *Masa total del bus* 84

Figura 38 *Asignación del material ASTM A500 en la BDM* 85

Figura 39 *Espesor de los elementos tipo Shell* 86

Figura 40 *Masa total de la BDM según ECE R95* 86

Figura 41 *Posicionamiento de la BDM* 87

Figura 42 *Optimización de simulación mediante distancia* 88

Figura 43 *Contacto entre el bus y el suelo* 88

Figura 44 *Contacto entre BDM y el suelo* 89

Figura 45 *Contacto entre el bus y la BDM* 89

Figura 46 *Asignación de la velocidad* 90

Figura 47 *Compilación del código de simulación* 91

Figura 48 *Posicionamiento de la BDM hacia el lado derecho* 92

Figura 49 *Deformación de la carrocería durante impacto lateral izquierdo* 93

Figura 50 *Deformación de la carrocería durante impacto lateral derecho* 93

Figura 51 *Carrocería antes y después del impacto lateral derecho* 94

Figura 52 *Carrocería antes y después del impacto lateral izquierdo* 95

Figura 53 *Variación de energía durante impacto lateral derecho* 98

Figura 54 *Variación de energía durante impacto lateral izquierdo* 99

Figura 55 *Deformación vs Tiempo* 100

Figura 56 *Deformación de la estructura del lateral derecho* 101

Figura 57 *Diagrama de energía de Hourglass del impacto en el lado derecho* 102

Figura 58 *Diagrama de energía de Interna del impacto en el lado derecho* 102

Figura 59 *El balance de energía generado durante el impacto lateral derecho* 104

Figura 60 *Impacto para obtener deformación direccional de la estructura en el eje X* 105

Figura 61 *Deformación direccional de la estructura en el eje X* 105

Figura 62 *Elementos seleccionados para obtención de resultados* 106

Figura 63 *Diagrama del esfuerzo efectivo de Von Mises* 107

Figura 64 *Diagrama del desplazamiento resultante en el impacto lateral derecho* 108

Figura 65 *Distribución del esfuerzo de Von Mises en la estructura* 109

Figura 66 *Elementos seleccionados para la obtención de resultados por esfuerzo de Von Mises* 110

Figura 67 *Diagrama del esfuerzo efectivo de Von Mises de los elementos seleccionados* 111

Figura 68 *Diagrama del desplazamiento resultante en los elementos seleccionados* 112

Figura 69 *Deformación vs Tiempo* 113

Figura 70 *Deformación de la estructura del lateral izquierdo* 114

Figura 71 *Diagrama de energía de Hourglass del impacto en el lado izquierdo* 115

Figura 72 *Diagrama de energía Interna del impacto en el lado izquierdo* 115

Figura 73 *El balance de energía generado durante el impacto lateral izquierdo* 117

Figura 74 *Impacto para obtener deformación direccional de la estructura en el eje X* 118

Figura 75 *Deformación direccional de la estructura en el eje X, impacto lateral izquierdo* 118

Figura 76 *Elementos seleccionados para obtención de resultados* 119

Figura 77 *Diagrama del esfuerzo efectivo de Von Mises en los elementos seleccionados* 120

Figura 78 *Diagrama del desplazamiento resultante en los elementos seleccionados en el impacto lateral derecho* 121

Figura 79 *Distribución del esfuerzo de Von Mises en la estructura* 122

Figura 80 *Elementos seleccionados para la adquisición de resultados por esfuerzo de Von Mises impacto lateral derecho* 123

Figura 81 *Diagrama del esfuerzo efectivo de Von Mises de los elementos seleccionados en el impacto lateral derecho* 124

Figura 82 *Diagrama del esfuerzo efectivo de Von Mises de los elementos seleccionados* 125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Variable independiente* 30

Tabla 2 *Variable dependiente* 30

Tabla 3 *Metodología, instrumentación y laboratorios donde se llevará a cabo el proyecto* 32

Tabla 4 *Vehículos de categoría M3* 39

Tabla 5 *Datos del minibús Volkswagen 9-150* 42

Tabla 6 *Especificaciones técnicas del minibús Volkswagen 9-150* 43

Tabla 7 *Especificaciones de la homologación vehicular del chasis Volkswagen 9-150 OD* 53

Tabla 8 *Clasificación y propiedades mecánicas de los tubos* 54

Tabla 9 *Propiedades mecánicas Acero ASTM A500* 55

Tabla 10 *Especificaciones del chasis Volkswagen 9-150* 67

Tabla 11 *Sistema de unidades para el acero en LS-DYNA* 78

Tabla 12 *Propiedades mecánicas del ACERO ASTM A500 GRADO A* 79

Tabla 13 *Espesor asignado a cada parte del minibús* 82

Tabla 14 *Elementos seleccionados y resultado de esfuerzo efectivo de Von Mises* 107

Tabla 15 *Elementos seleccionados y resultado de esfuerzo efectivo de Von Mises* 111

Tabla 16 *Elementos seleccionados y resultado de esfuerzo efectivo de Von Mises* 120

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 *Energía Cinética* 96

Ecuación 2 *Velocidad final de impacto* 97

Ecuación 3 *Cálculo de la deformación del minibús* 100

Ecuación 4 *Relación de energías* 103

Ecuación 5 *Cálculo de la deformación del minibús* 113

Ecuación 6 *Relación de energías* 116

Resumen

El presente proyecto expone información sobre simulaciones computacionales de impacto lateral izquierdo y lateral derecho del minibús Volkswagen 9-150 perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en base a normativas nacionales e internacionales vigentes tanto de diseño (NTE INEN 1323:2009) y análisis dinámico (Regulación ECE R95) la cual se enfoca en salvaguardar la vida de los usuarios en caso de impactos laterales. El objetivo es realizar impactos laterales para verificar la incidencia de los perfiles estructurales por deformación y así verificar si la zona de supervivencia de los ocupantes es segura. El estudio inicia con el modelado de la carrocería tomando dimensiones referenciales directamente del minibús y fichas técnicas del chasis. Los ensayos dinámicos se realizan mediante análisis computacional CAE y método de elementos finitos (MEF), los cuáles se ejecutan en fases de pre-proceso (condiciones de frontera) lo cual se especifica en la Regulación ECE R95 en dónde el minibús debe permanecer estático y una barra deformable móvil a 50 km/h con una masa de 950 kg ± 20 kg impactará el mismo y post-proceso (obtención e interpretación de resultados). Los ensayos virtuales se realizan en el panel derecho e izquierdo y con resultados obtenidos de energías, deformaciones y esfuerzos nos permiten generan conclusiones ingenieriles que permitan demostrar seguridad de los pasajeros en cuánto a la zona de supervivencia de la estructura del minibús.

Palabras clave: normas nacionales e internacionales, minibús, impactos laterales, análisis estructural, Volkswagen 9-150

Abstract

This project presents information on computational simulations of left and right-side impact of the Volkswagen 9-150 minibus belonging to the University of the Armed Forces ESPE based on national and international regulations in force both for design (NTE INEN 1323:2009) and dynamic analysis (Regulation ECE R95) which focuses on safeguarding the lives of users in case of side impacts. The objective is to perform side impacts to verify the incidence of structural profiles by deformation and thus verify if the occupants' survival zone is safe. The study starts with the modeling of the bodywork by taking reference dimensions directly from the minibus and technical data sheets of the chassis. The dynamic tests are performed by CAE computational analysis and finite element method (FEM), which are executed in pre-processing phases (boundary conditions) which is specified in the ECE R95 Regulation where the minibus must remain static and a deformable bar moving at 50 km/h with a mass of 950 kg ± 20 kg will impact it and post-processing (obtaining and interpretation of results). The virtual tests are carried out on the right and left panel and with the obtained results of energies, deformations and stresses allow us to generate engineering conclusions that allow us to demonstrate passenger safety in terms of the survival zone of the minibus structure.

Key word: national and international standards, minibus, side impacts, structural analysis, Volkswagen 9-150

Capítulo I

Marco metodológico de la investigación

Antecedentes investigativos

Según Caraguay y Yanza (2018) “La siniestralidad vial, según diversas organizaciones que investigan y estudian este fenómeno en el mundo, la describen como una pandemia del futuro debido al aumento de la tasa de mortalidad.” (p.1). Además, los siniestros de tránsito dan como resultado pérdidas económicas a las personas, familias y el país en su conjunto. Dichas pérdidas son por costos médicos y la pérdida de productividad de quienes fallecen o quedan discapacitados como efecto de sus lesiones corporales.

Cada año la Agencia Nacional de Transito realiza estadísticas que exponen el aumento del índice de mortalidad por motivo de siniestros producidos por impactos laterales. No se han desarrollado estudios e investigaciones sobre los medios de protección y resguardo de los ocupantes de vehículos como en el caso de colisiones frontales y por alcance.

Los ensayos computacionales de impacto son una manera simular una prueba de deformación que se realiza generalmente para garantizar los estándares de diseño de seguridad para la resistencia al impacto y la compatibilidad con colisiones de varios vehículos o sistemas y partes relacionadas que pueden presentarse durante un siniestro.

La estructura de un autobús se compone de paneles laterales, frontal, posterior, techo y piso. Estos paneles están compuestos de una chapa exterior, interior, una placa de cubierta y una chapa galvanizada. Los acabados incluyen tablero, película para pasajeros, vidrio, película de vinilo y madera contrachapada. Las propiedades temáticas y la rigidez de estos elementos estructurales deben evaluarse para garantizar su durabilidad.

La ingeniería automotriz aplica el conocimiento científico y tecnológico utilizando recursos físicos e intangibles para alcanzar un objetivo en este caso la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE cuenta con una flota de buses en los cuáles no se han realizado

estudios con análisis estructurales de sus carrocerías para verificar el comportamiento de sus materiales de construcción ante siniestros de tránsito específicamente ante impactos laterales. Estos estudios permiten verificar que la estructura de la carrocería en cuanto a diseño y materiales de construcción son capaces de proveer la máxima seguridad en cuanto a la zona de supervivencia se refiere y corroborar la seguridad de la comunidad universitaria.

Existen estándares internacionalmente aceptados que requieren requisitos mínimos de composición estructural y métodos de prueba para simular eventos específicos en vehículos livianos. Para ensayos de colisión para buses no se encuentran normas vigentes por este motivo se han venido realizando este tipo de simulaciones mediante la Regulación ECE R95 de las Naciones Unidas y en cuánto a su diseño de construcción las normas vigentes desarrolladas por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN).

De acuerdo a Cuasapud (2018) “las pruebas de colisión lateral se realizan con el fin de disminuir o prevenir el porcentaje de fatalidad que se presentan en el caso de choque lateral” (p. 17). Cuando se produce una deformación controlada, esta zona de impacto debe estar diseñada para absorber la energía del impacto. La protección de los ocupantes del automóvil se complica en este tipo de colisiones, porque son las que causan lesiones graves a los ocupantes, siendo uno de los factores la insuficiente capacidad de absorción de piezas estructurales y de revestimiento, así como las grandes deformaciones que se producen en el vehículo.

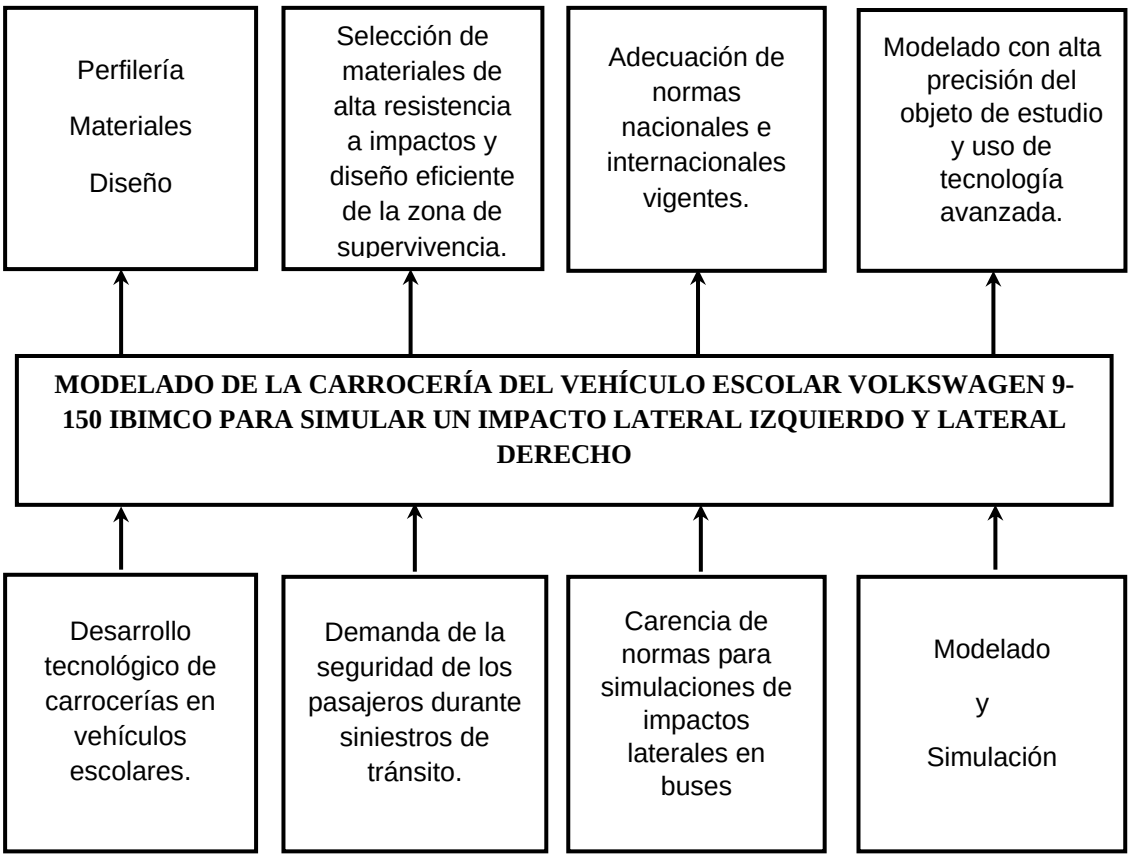
Para Santiago (2017) las pruebas de impacto que se realizan en la actualidad “proporcionó todos los datos necesarios para que la tecnología computacional logre resultados que permitan la producción de una estructura de carrocería que se ajuste plenamente a las normas nacionales e internacionales” (p.2). Por lo cual la estructura de la carrocería debe proporcionar espacio para sobrevivir, brindar la resistencia necesaria y cumplir con los requisitos de seguridad en caso de colisión, por lo que el análisis estructural

realizado es reproducible en simulación virtual de una colisión lateral por elementos finitos para verificar los materiales de construcción y las formas de la carrocería.

Planteamiento del problema

Figura 1

Árbol de planteamiento del problema



Nota. La figura 1 muestra las problemáticas y soluciones que se desarrollará mediante este proyecto de investigación.

Gracias a los nuevos avances tecnológicos en la industria automotriz, en el diseño y construcción de carrocerías existe la necesidad de investigar nuevos materiales innovadores aplicados en perfiles de varias geometrías, cuyas propiedades mecánicas otorgan la resistencia necesaria para proteger a sus ocupantes en caso de colisiones.

Existe la necesidad de mayor seguridad en los pasajeros en caso de colisiones por la cual se busca que las empresas carroceras mejoren las características de deformación

de las estructuras en caso de impactos laterales tanto derecho como izquierdo para garantizar que la zona de supervivencia no se vea afectada, para reducir la tasa de mortalidad en los siniestros de tránsito.

El conjunto estructural del minibús escolar este sujeto a normativas nacionales de fabricación como NTE INEN 1323 – RTE INEN 041: 2013 e internacionales como la ECE R95 en el caso de impactos laterales, las cuales aseguran la protección de los pasajeros, manteniendo el espacio de supervivencia aislada, brindando seguridad a sus ocupantes.

Para garantizar la estructura expuesta a colisiones se realiza modelado CAD y simulación de impacto lateral izquierdo y lateral derecho mediante el uso de un software CAE, para analizar los resultados de energías, deformaciones y desplazamientos de los materiales que constituyen la carrocería y de esta manera garantizar la seguridad de sus ocupantes con un fundamento ingenieril.

Con lo planteado, el problema a investigar es el MODELADO DE LA CARROCERÍA DEL VEHÍCULO ESCOLAR VOLKSWAGEN 9-150 IBIMCO PARA SIMULAR UN IMPACTO LATERAL IZQUIERDO Y LATERAL DERECHO.

Descripción resumida de proyecto

El presente proyecto está orientado al estudio del comportamiento de la carrocería del minibús escolar Volkswagen 9-150 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en cuánto a impactos laterales; se realizará la fundamentación teórica científica del diseño y construcción de la carrocería del minibús escolar, mediante de la investigación bibliográfica de las carrocerías de transporte escolar en cuanto a normas vigentes nacionales e internacionales para desarrollar el modelado y la simulación de impactos.

A partir de datos y dimensiones referenciales obtenidas directamente del minibús y de acuerdo a las especificaciones de las normas de diseño y construcción NTE INEN 1323:2009 , RTE INEN 041:2011 y NTE INEN 2415, se modeló la estructura de la carrocería de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE del vehículo Volkswagen 9-150

de transporte escolar, mediante de softwares de ingeniería asistida por computador CAD para consecutivamente realizar su simulación de impacto lateral izquierdo y lateral derecho en software de ingeniería asistida por ordenador CAE, con el objetivo de realizar la experimentación de procesos en colisiones laterales aplicados a la carrocería del mismo.

Se realizo los ensayos virtuales de impacto lateral izquierdo y derecho a la estructura de la carrocería de transporte de pasajeros, para obtener resultados computacionalmente fiables de energías, esfuerzos y deformaciones que nos permitan concluir el comportamiento en cuanto a la incidencia en la zona de supervivencia.

Justificación e importancia

Según la información que genera la Agencia Nacional de Transito los impactos laterales se encuentran en segundo lugar a lo que refiere a severidad, generando intranquilidad a las entidades encargadas de avalar y afianzar la seguridad de los usuarios.

Cada año la Agencia Nacional de Transito realiza estadísticas que exponen el aumento del índice de mortalidad por motivo de siniestros producidos por impactos laterales. No se han desarrollado estudios e investigaciones sobre los medios de protección y resguardo de los ocupantes de vehículos como en el caso de colisiones frontales y por alcance.

La estructura de la carrocería del minibús escolar Volkswagen 9-150 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE está sujeta a impactos laterales por diversos factores, que tienen como efecto pérdidas de vidas humanas y daño de materiales, por lo que es importante el estudio computacional antes de la fabricación por parte de las empresas carroceras del país y del extranjero para reducir los daños en la zona de supervivencia y principalmente evitar pérdidas humanas

Este proyecto se realiza por la necesidad de verificar la incidencia de impactos laterales en cuanto a la zona de supervivencia para garantizar que el minibús escolar Volkswagen 9-150 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE cumpla con estándares

de calidad basados en estudios computacionales, con el objetivo principal de salvaguardar la vida de la comunidad universitaria que hace uso del mismo; además de aportar con datos cuantitativos computacionalmente fiables de gran relevancia al parque carrocero del país mediante las simulaciones virtuales para así optimizar sus procesos de diseño y construcción.

Objetivos

Objetivo General

- Modelar la carrocería del vehículo escolar Volkswagen 9-150 IBIMCO para simular un impacto lateral izquierdo y lateral derecho, mediante ingeniería asistida por computador.

Objetivos Específicos

- Realizar la investigación teórica científica del diseño, construcción y simulación de impactos laterales de la carrocería del vehículo escolar Volkswagen 9-150 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE mediante fuentes bibliográficas en cuanto a normas vigentes nacionales e internacionales.
- Modelar la estructura de la carrocería del vehículo de transporte escolar Volkswagen 9-150 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, a través de sistemas de diseño asistido por computador CAD y método de elementos tipo Shell.
- Ejecutar las simulaciones virtuales impacto o lateral izquierdo y derecho a la carrocería del vehículo escolar, mediante los parámetros establecidos en la Regulación ECE R95 de las Naciones Unidas para obtener resultados computacionalmente fiables que nos permitan concluir el comportamiento en cuanto a la incidencia de los impactos laterales en la zona de supervivencia.

Metas del proyecto

- Compendiar información técnica y científica para el diseño, construcción y simulación de impactos de carrocerías mediante fuentes bibliográficas en cuanto a normas vigentes nacionales e internacionales.
- Ejecutar el modelado de la estructura vehículo escolar mediante dimensiones del bus real y teniendo en consideración lo especificado en las normas técnicas del país NTE INEN 1323: 2009, RTE INEN 041: 2011 y NTE INEN 2415.
- Obtener resultados de la simulación de impacto lateral izquierdo y lateral derecho de la que permita evaluar y analizar las consideraciones de la geometría y materiales de construcción de la carrocería del minibús escolar.
- Elaborar un análisis de resultados de las pruebas realizadas en la simulación que permita generar datos útiles para emitir conclusiones ingenieriles sobre la configuración y materiales del minibús Volkswagen 9-150 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Hipótesis

¿El minibús escolar Volkswagen 9-150 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE es seguro a impactos laterales en cuanto a la incidencia en la zona de supervivencia, una vez producida la simulación computacional de acuerdo a los resultados obtenidos de energías, deformaciones y esfuerzos?

Variables de la investigación

Variables independientes

Tabla 1

Variable independiente

Concepto	Categorías	Indicadores	Ítems	Técnica	Instrumentos
Los resultados de la simulación virtual mediante software CAE	Tecnológico computacional	Masa de los objetos de estudio	Kg	Experimental	Software CAE y normativas
		Distancia de impacto	mm		
		Velocidad	m/s		
		Límite de fluencia mínima	GPa		
		Resistencia a la tracción	GPa		
		Deformación unitaria	%		

Nota. En la Tabla 1 se expresa las variables independientes que se aspira investigar mediante la impetración de software CAE.

Variables Dependientes

Tabla 2

Variable dependiente

Concepto	Categorías	Indicadores	Ítems	Técnica	Instrumentos
Conducta de la estructura carrocera del bus después del impacto lateral izquierdo y	Resultados	Tensiones	kN	Experimental - Medición	Software CAE
		Desplazamientos	mm		
		Deformación unitaria	Adimensional		
		Energías	Julios		

Concepto	Categorías	Indicadores	Ítems	Técnica	Instrumentos
lateral derecho					

Nota. En la Tabla 2 se expresa las variables dependientes.

Metodología de desarrollo del proyecto

Método documental-bibliográfico

A través de la investigación técnica científica se obtendrán especificaciones de normas nacionales e internacionales vigentes de acuerdo al diseño, construcción y simulación de impactos laterales.

Método experimental

Proporciona datos cuantitativos de la relación causa efecto de obtenidos a través de las simulaciones virtuales de impacto lateral izquierdo y lateral derecho con el software de ingeniería asistida por computador CAD/CAE.

Metodología de investigación

- Indagación: Información bibliográfica para el análisis de diseño geométrico y construcción de acuerdo a materiales estructurales especificados.
- Organización: Creación de un diagrama de procesos o algoritmo que especifique el preproceso y postproceso del estudio.
- Ejecución: Se realizan los ensayos virtuales dónde se somete a impactos laterales la estructura de la carrocería modelada.
- Balance: Variación de resultados durante la simulación de impactos.
- Determinación de resultados: Fundamento crítico ingenieril de acuerdo a los resultados obtenidos.

Método analítico

En el presente proyecto se interpretan los resultados de acuerdo a los parámetros establecidos en las normas vigentes y de acuerdo a sus variaciones analizar aspectos relacionados con la deformación en la zona de supervivencia.

Método Deductivo

En el proyecto de investigación se propone una hipótesis, que acorde el cumplimiento del cronograma se podrá comprobar su veracidad mediante pruebas y ensayos de impacto.

Tabla 3

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

Metodología	Descripción	Equipo	Laboratorio
Documental Bibliográfico	A través de la investigación técnica científica se obtendrán especificaciones de normas nacionales e internacionales de acuerdo a diseño, construcción y simulación de impactos laterales.	• Libros • Normas • Tesis • Artículos	Laboratorios ESPE
Método deductivo	En el proyecto de investigación se propone una hipótesis, que acorde el cumplimiento del cronograma se podrá comprobar su veracidad mediante pruebas y ensayos de impactos laterales.	• Computador personal.	
Metodología Investigación	Indagación: Información bibliográfica para el análisis de diseño geométrico y construcción de acuerdo a materiales estructurales especificados. Organización: Creación de un diagrama de procesos o algoritmo que especifique el	• Fuentes de información • Ordenador • Software CAD/CAE	Laboratorios ESPE

Metodología	Descripción	Equipo	Laboratorio
	preproceso y postproceso del estudio. Ejecución: Se realizan los ensayos virtuales dónde se somete a impactos laterales la estructura de la carrocería modelada. Balance: Variación de resultados durante la simulación de impactos. Determinación de resultados: Fundamento crítico ingenieril de acuerdo a los resultados obtenidos.		
Método Analítico	En el presente proyecto se interpretan los resultados de acuerdo a los parámetros establecidos en las normas vigentes y de acuerdo a sus variaciones analizar aspectos relacionados con la deformación en la zona de supervivencia.		Laboratorios ESPE
Método experimental	Proporciona datos cuantitativos de la relación causa efecto de obtenidos a través de las simulaciones virtuales de impacto lateral izquierdo y lateral derecho con el software de ingeniería asistida por computador CAD/CAE.	• Ordenador • Software CAD/CAE	

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

Capitulo II

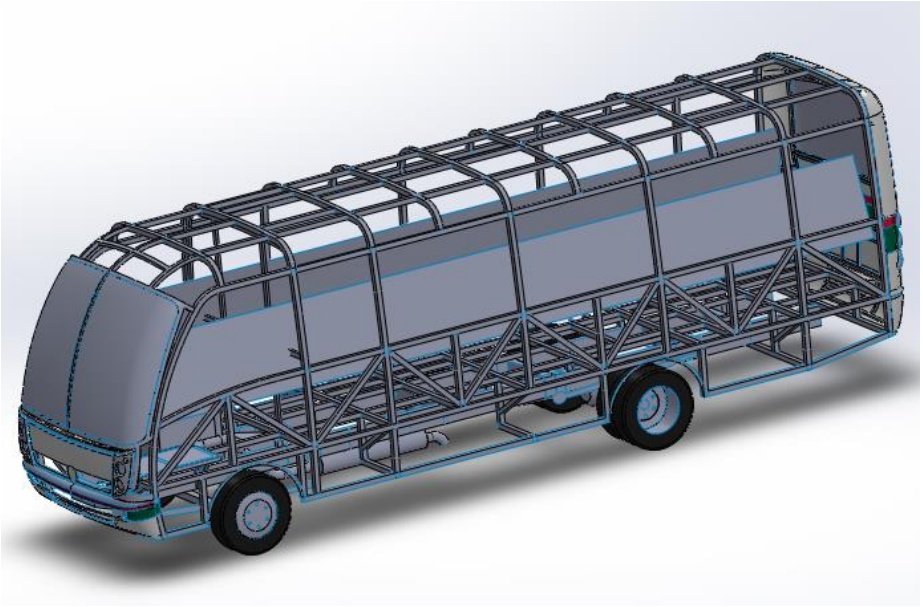
Marco Teórico

Carrocería de buses

Los autobuses son principalmente vehículos automotores diseñados específicamente para el transporte de los usuarios de este medio; por ello, dependiendo del tipo de autobús, la estructura de su carrocera adopta cualidades concretas basadas en las Normas Técnicas Ecuatorianas. En otras palabras, la carrocera de un bus es la estructura metálica que se monta sobre un chasis, base o plataforma y crea el espacio donde se ubican todos los componentes de acomodación del transporte de pasajeros. También se encarga de soportar las cargas estáticas y dinámicas mientras el minibús está en movimiento.

Figura 2

Esqueleto de la carrocería de minibús



Nota. En el gráfico se muestra el esqueleto interno del minibús Volkswagen 9-150.

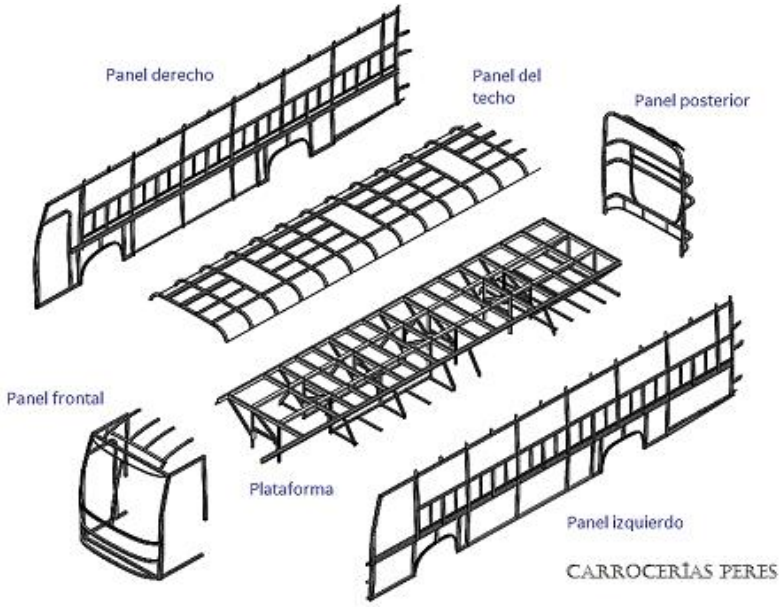
Elementos principales que componen una carrocería

Un autobús se compone fundamentalmente de un chasis y una carrocería, que se compone de los paneles estructurales que se indican a continuación:

- Panel frontal
- Panel lateral derecho (lado de la puerta de acceso)
- Panel lateral izquierdo (lado del conductor)
- Panel posterior
- Estructura del piso

Figura 3

Paneles que conforman una carrocería



Nota. El gráfico representa los paneles estructurales que protegen a los pasajeros del bus ante algún siniestro de tránsito. Tomado de (Esmeraldas, 2016).

Clasificación de las carrocerías

Todo bus de transporte moderno se divide en dos partes: la mecánica y la carrocera. La mecánica se compone de varias partes, como el motor, la transmisión y la dirección, entre otras y la carrocera es el blindaje del autobús. En donde se puede clasificar a la carrocería de la siguiente manera:

Carrocería con chasis independiente

Esta carrocería es aquella que “está formado por un chasis o plataforma independiente al resto de la carrocería y se fija al chasis por medio de soldadura o tornillos”

(Andrade y Méndez, 2012, p. 18). Además, es el sistema más antiguo y simple utilizado en automóviles, este tipo de carrocería se utilizó antes de la llegada de los chasis autoportantes o de automóviles compactos. Básicamente, consta de dos vigas de acero a lo largo del vehículo, conectadas por barras transversales soldadas para una buena rigidez. Todo este conjunto se denomina bastidor y es aquel que soporta todos los sistemas del vehículo, como el motor, la transmisión y la suspensión.

Para Plaza (s.f.), esta carrocería “tiene como principal ventaja una mayor resistencia a los impactos, ya que las dos vigas de acero que componen la estructura principal son muy resistentes y protegen la parte inferior del vehículo de cualquier impacto”. Asimismo, es menos difícil fabricarlo, por lo que es más económico de hacerlo y repararlo. Su geometría no suele presentar grandes dificultades, y un hipotético problema a resolver no requiere de un equipamiento complejo y preciso.

Debido a la rigidez y la presencia de vigas gruesas y fuertes, el peso de este chasis es una de sus desventajas, en otras palabras, este tipo de chasis tiende a tener mayor torsión, lo que generalmente afecta la dinámica del auto y la efectividad de la suspensión. Esto obliga a añadir un peso extra al conjunto, incluyendo soportes de las mismas o de la dirección, pero más rígidos.

Carrocería auto portante

Según la (Servicio Ecuatoriano de Normalización [NTE INEN], 2015) define a este tipo de carrocería “cuando su estructura forma parte esencial del bastidor como: marcos, techo, suelo, etc” (p. 3).

De lo anterior mencionado se puede acotar que un autobús autoportante es una estructura integrada que sirve como soporte o apoyo a otros componentes, formando una unidad. Generalmente se construye de perfilería de acero de alta resistencia, misma que se encuentra ensamblada por cordones de soldadura, generando una gran jaula de acero 3D.

Además “una carrocería autoportante o monocasco integra en un único conjunto las funciones estructurales de resistencia y de la carrocería” (Luque, Álvarez y Vera, 2008, p. 3). Es por ello que este diseño comenzó a ganar popularidad cuando Citroën lo utilizó en sus automóviles en la década de 1930, aunque su incorporación fue paulatina, aplicándose inicialmente a los turismos ligeros y ahora se está adoptando en casi todos los turismos, en muchos vehículos industriales ligeros y en algunos coches todo terreno.

Este término se basa en el concepto de que todas las partes de un automóvil soportan las tensiones a las que está expuesto. El objetivo es reducir problemas como el ruido o la vibración aislando los elementos de conexión. Esto se denomina configuración semiintegrada y fue introducida alrededor de 1950 en Alemania por Daimler-Benz.

En definitiva, este tipo de carrocería permite construir vehículos más seguros, ligeros y dinámicos en carretera en comparación con los vehículos con chasis independiente o escalera. Esto también afecta el rendimiento de los sistemas de suspensión ya que su forma está menos sujeta a modificaciones.

Clasificación vehicular

La clasificación de los vehículos se basa en las peculiaridades únicas de cada uno de ellos, como su diseño de construcción y su uso previsto.

Según el (Servicio Ecuatoriano de Normalización [NTE INEN], 2016) la clasificación de los vehículos se aplica generalmente a todos los vehículos de motor diseñados para el desplazamiento por carretera. También se adjunta la maquinaria agrícola, pero no la maquinaria industrial ni el equipo de transporte.

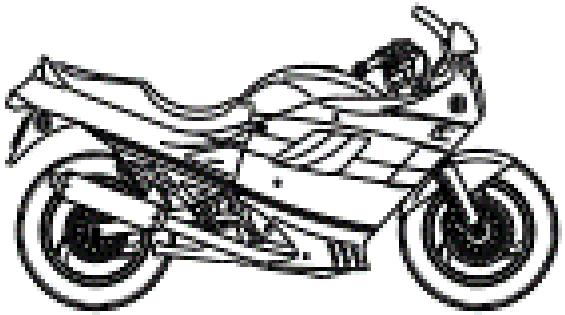
Dicha clasificación se muestra a continuación:

Categoría L

Son vehículos motorizados que se desplazan sobre dos, tres o cuatro ruedas. Las subcategorías de esta categoría van de la L1 a la L7.

Figura 4

Motocicleta



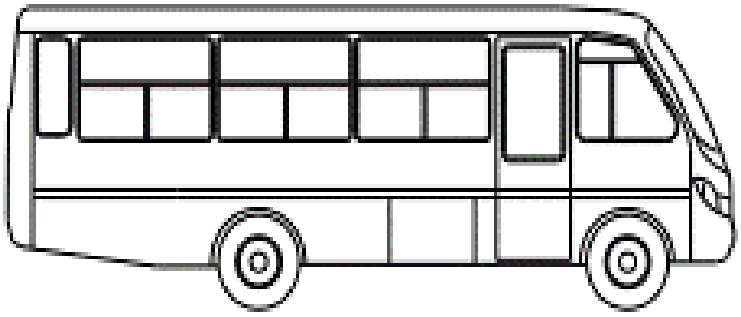
Nota. Este gráfico representa un vehículo motorizado de 2 ruedas perteneciente a la subcategoría L3. Tomado de (NTE INEN, 2016).

Categoría M

Son aquellos vehículos automotores que poseen cuatro ruedas o más para su circulación. Además, su diseño y construcción están orientados al transporte de pasajeros. Esta categoría presenta subcategorías que van desde la M1 hasta la M3.

Figura 5

Minibús



Nota. Este gráfico representa un minibús de cuatro o más ruedas. Tomado de (NTE INEN, 2016)

Subcategoría M3

En este apartado hacemos énfasis en la subcategoría M3 ya que el bus Volkswagen 9-150 se identifica en la Tabla 4.

Se incluyen los vehículos con más de ocho plazas, así como el asiento del conductor con un peso superior a 5000 kg. La Lista de Homologación de Vehículos, que muestra las características del Volkswagen 9-150 con un PVB de 8150 kg, confirma esta información del PBV.

Tabla 4

Vehículos de categoría M3

CÓDIGO	TIPO	ESQUEMA	DESCRIPCIÓN
MCB	MICROBÚS		Ver NTE INEN-ISO 3833, 3.1.2.
MNB	MINIBÚS		Ver NTE INEN-ISO 3833, 3.1.2, 3.1.2.2, 3.1.2.3 y 3.1.2.4.
BUS	BUS		Ver NTE INEN-ISO 3833, 3.1.2, 3.1.2.2, 3.1.2.3 y 3.1.2.4.
BDP	BUS DE DOS PISOS, PISO Y MEDIO		Vehículo destinado al transporte de pasajeros de dos plantas con espacios internos para la circulación (corredor central), de Clase III. Ver NTE INEN-ISO 3833, 3.1.2 y 3.1.2.4.
ART	ARTICULADO		Ver NTE INEN-ISO 3833, 3.1.2.5.
BART	BIARTICULADO		Ver NTE INEN-ISO 3833, 3.1.2.5. En este caso el vehículo cuenta con tres

CÓDIGO	TIPO	ESQUEMA	DESCRIPCIÓN
			secciones que están unidas por dos juntas.
TRO	TROLEBÚS		Ver NTE INEN-ISO 3833, 3.1.2.6.
BCO	BUS TIPO COSTA		Vehículo destinado al transporte de pasajeros y mercancías a partir de un chasis cabina adaptado en forma artesanal, de Clase III (Tabla 6). Ver NTE INEN-ISO 3833, 3.1.2.7

Nota. Esta tabla muestra los vehículos destinados al transporte de pasajeros. Tomado de (NTE INEN, 2016)

Categoría N

Se refiere a los vehículos que tienen cuatro o más ruedas para el transporte. Su diseño y construcción también están orientados al transporte de carga. Esta categoría tiene subcategorías numeradas de N1 a N3.

Figura 6

Camioneta doble cabina

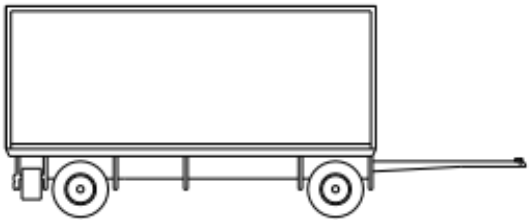
Nota. Este gráfico representa una camioneta de cinco plazas destinada al trasporte de mercancías. Tomado de (NTE INEN, 2016)

Categoría O

Son aquellos vehículos no motorizados, su diseño es de remolque que se adapta a un vehículo automotor. Esta categoría presenta subcategorías que van desde la O1 hasta la O3.

Figura 7

Unidad de carga mediana



Nota. Este gráfico representa una unidad de carga correspondiente a la subcategoría O3. Tomado de (NTE INEN, 2016)

Categoría para vehículos con usos especiales

Vehículos de las categorías M, N u O que desempeñan una función adicional, es decir, que tienen características de carrocería únicas, así como equipamiento adicional. A excepción de SF y SI, que no se reflejan en la denominación técnica ecuatorial NTE INEN 2656:2016, esta categoría contiene subcategorías que van de SA a SK.

Figura 8

Ambulancia

Nota. Este gráfico representa un vehículo de transporte de enfermos o heridos correspondiente a la subcategoría SC. Tomado de (NET INEN, 2016)

Mini Bus Volkswagen 9-150

Se trata de un vehículo diseñado y construido para el transporte de pasajeros, concretamente en el área escolares. Consta de un chasis Volksbus 9-150 OD especificado en el capítulo III y de una carrocería capaz de soportar cargas dinámicas y estáticas, así como de salvaguardar la vida de los ocupantes en caso de accidente.

Figura 9

Minibús Volkswagen 9-150

Nota. Esta fotografía representa el minibús perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga.

En la Tabla 5 se muestra los datos principales del minibús Volkswagen 9-150, correspondientes a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga.

Tabla 5

Datos del minibús Volkswagen 9-150

DATOS DEL VEHÍCULO	
DATOS:	
Sección	Transportes
Responsable	Sgop. Caiza Wilmer
Placas	FTF-975
Registro	EE-24-0454
Dependencia	ADM

DATOS:	
Marca	Volkswagen
Modelo	9-150 OD
Año de fabricación	2009
No. de motor	E1T146377
No. De chasis	9BWDD52R58R832395
Color	Blanco - verde

Nota. Esta tabla especifica datos generales del minibús. Tomado de (Cofre y Quiroga, 2011)

Tabla 6

Especificaciones técnicas del minibús Volkswagen 9-150

FICHA TÉCNICA	
MOTOR	
Modelo	MWM 4.12 TCE Turbo postenfriado
Norma de emisiones	Euro III
Nº de Cilindros / Cilindrada (cm³)	4 en línea / 4.300
Diámetro de pistón / Carrera (mm)	105 / 137
Relación de compresión	16,9
Potencia máxima DIN (CV / kw / rpm)	150 / 110 / 2.200
Par motor máximo DIN (Kgm / Nm / rpm)	56 / 550 / 1.600 a 2.000
Secuencia de Inyección	1-3-4-2
Sistema de Inyección	Common Rail
Compresor de Aire	Knorr LK 38
EMBRAGUE	
Tipo	Monodisco seco, revestimiento orgánico
Marca	Valeo
Accionamiento	Hidráulico, “push type”, regulación automática
Diámetro del disco (mm)	330

CAJA DE VELOCIDADES	
Modelo	ZF S5-420 HD
Tipo	5 marchas sincronizadas
Relaciones de transmisión: 1°	5,72:1
2°	2,73:1
3°	1,61:1
4°	1,00:1
5°	0,76:1
Reversa	5,24:1
SUSPENSIÓN	
Suspensión delantera	Eje rígido
Suspensión posterior	Eje rígido, ballestas de acción progresiva
CHASIS	
Tipo	Escalera, per fil constante, superficie plana, remachado en frío y atornillado

Nota. Esta tabla muestra los datos técnicos de fábrica del bus. Tomado de (Volkswagen Camiones Y Buses, 2022).

Habitáculo de seguridad

Para Esmeraldas (2016) “Las zonas de absorción de impactos son importantes en la seguridad pasiva de los pasajeros porque dirigen los esfuerzos a zonas que no comprometen la rigidez del vehículo” (p. 19). Como la creación de un interior más seguro para los pasajeros lleva al desarrollo y la producción de órganos autoportantes, estas carrocerías absorben mejor los efectos de una colisión a través de la deformación gradual y controlan la parte delantera, trasera y lateral del vehículo sin comprometer la comodidad de los pasajeros.

Para Cuasapud (2018) los rangos y capacidades que deben cumplir son:

- **Zona central:** esta zona como alberga a los pasajeros, es la zona más importante. Para garantizar la seguridad de los pasajeros, debe ser impenetrable y, a diferencia de otras zonas, más rígidas.
- **Zona Frontal y Posterior:** en caso de colisión o choque, estas zonas deben incluir elementos de diseño deformables para evitar la entrada en la zona o habitáculo de supervivencia, así como para proteger a los usuarios, convirtiendo la energía cinética del impacto en energía deformable (p. 14).

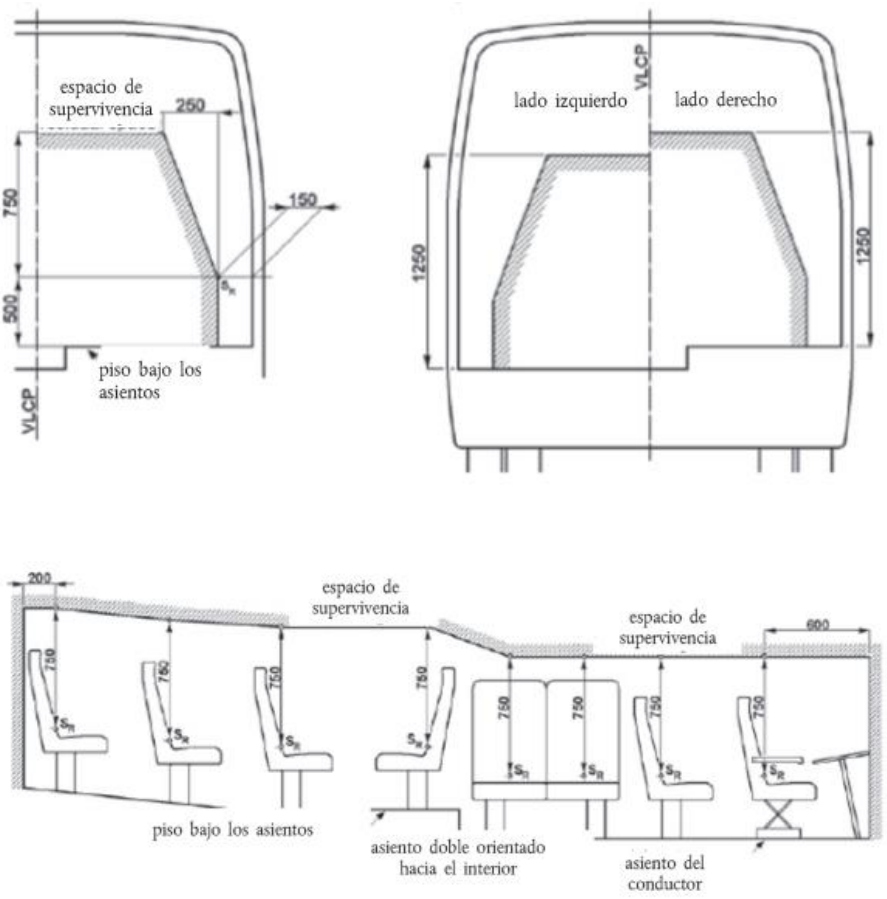
Espacio de supervivencia

Según Orellana y Orellana (2018) es el “área que debe permanecer en los compartimentos del conductor, de los pasajeros para que el conductor, los pasajeros tengan más posibilidades de sobrevivir en caso de impacto lateral” (p. 21). Puesto que esto es más difícil de mantener en los autobuses que en los vehículos de turismo debido al espacio del autobús, los avances en la seguridad de los pasajeros para los vehículos privados se están acelerando.

El objetivo en este ámbito es dar a los pasajeros y al habitáculo la capacidad de soportar los golpes y la conducción absorbiendo la energía mediante una deformación limitada del espacio restante que permita la supervivencia. El principal requisito es que la superestructura del vehículo sea lo suficientemente fuerte como para mantener el espacio seguro durante la prueba de impactos laterales.

Figura 10

Especificación del espacio de supervivencia



Nota. El gráfico representa las especificaciones del espacio de supervivencia. Tomado de (Reglamento 66, 2011)

Tipos de impactos

Los accidentes de vehículos pueden ocurrir por una variedad de razones, incluidos errores del conductor, fallas mecánicas, condiciones de la carretera y clima, todo lo cual puede causar daños en la carretera. Los tipos de colisiones de vehículos se definirán a continuación:

Impactos Frontales

Medina et al. (2014) menciona que: “la detención brusca de un vehículo cuando colisiona con un objeto que le precede mientras avanza en un terraplén o en un

estrangulamiento frontal (perpendicular o excéntrico). La energía cinética de dos vehículos en movimiento es la suma de sus velocidades.”

Impactos posteriores

La diferencia de velocidades entre los dos vehículos provoca el daño resultante; como resultado, la energía se transfiere del vehículo que colisiona por detrás al que circula por delante. Tras la colisión, la energía se transmite al vehículo dañado en forma de aceleración del movimiento, lo que hace que sea empujado hacia delante. (Medina et al., 2014)

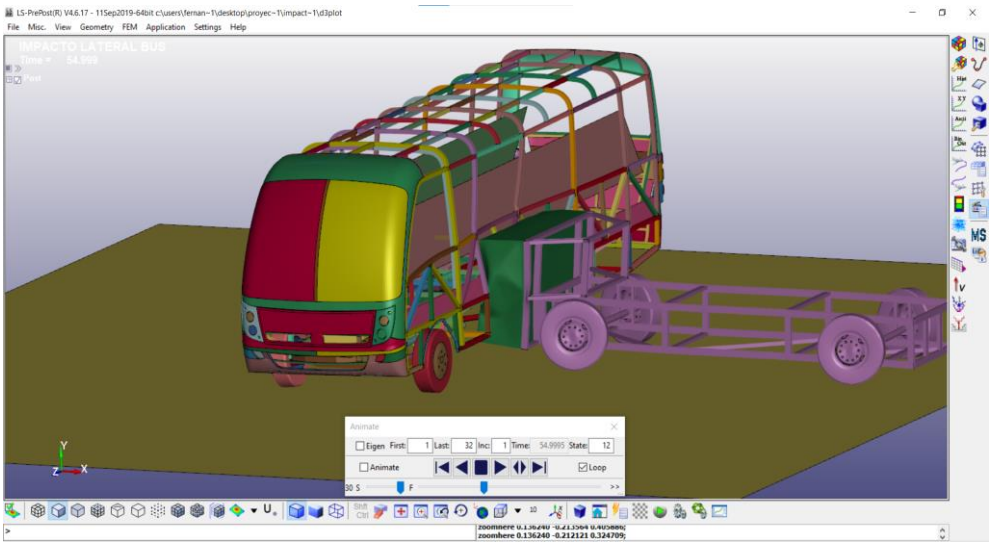
Impactos laterales

Cuando un vehículo recibe un impacto lateral, se desplaza en dirección contraria. Dado que los vehículos disponen ahora de barras estabilizadoras laterales que pueden evitar en gran medida la invasión del habitáculo, las lesiones pueden ser menos graves si la carrocería absorbe la energía del impacto, impidiendo la deformación hacia el ocupante. (Medina et añ., 2014)

En la figura 11 se muestra la simulación de un impacto lateral en el minibús.

Figura 11

Impacto Lateral del minibús



Nota. El gráfico simulación virtual de impacto lateral izquierdo.

Normativa Nacional e Internacional

Para realizar el estudio en buses de transporte escolar, tanto de diseño como de impactos se rigen a normas específicas que garantizan cumplir los estándares de seguridad para cada tipo de vehículo y para su respectiva certificación. Cada país está regido a sus propias normas de estandarización para que sus vehículos circulen, sin embargo, se busca la estandarización a nivel mundial por lo que en algunos aspectos estas normas serán similares.

Normativa Nacional

A nivel nacional, el diseño y construcción de carrocerías de transporte escolar está normado y regulado por los estándares de la Agencia Nacional de Tránsito, la cual basa su operación en los reglamentos del Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización (INEN) para su respectiva certificación. La normativa que establece los requisitos generales para buses es la norma INEN 1323 Revisión del 2009, las normativas que comprenden el diseño de buses en Ecuador son:

- RTE INEN 041:2010. Vehículos de transporte escolar.
- RTE INEN 043:2010. Bus interprovincial e Intraprovincial.
- NTE INEN 2205:2010. Vehículos automotores. Bus urbano.
- NTE INEN 1323:2009. Vehículos automotores. Carrocerías de buses.
- NTE INEN 2664:2013. Vehículos automotores.

Normativa Internacional

A nivel internacional existen varias entidades encargadas de la homologación y pruebas de impacto de acuerdo a varios factores durante un siniestro de tránsito. Estas entidades desarrollan programas de simulación y también son las encargadas de establecer requisitos y parámetros que proporcionen resultados reales durante las pruebas de impacto para verificar el nivel de seguridad de los vehículos.

Algunas entidades de pruebas de impacto son:

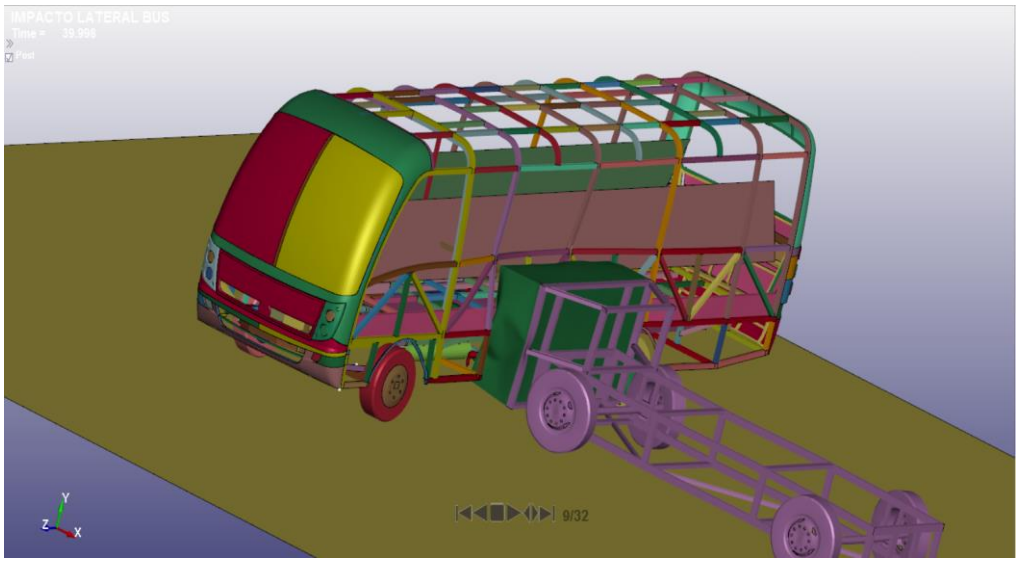
- EuroNCAP
- Regulación ECE R95 (Impacto lateral)
- LatinNCAP
- JapNCAP
- Norm UN 94 (Impacto frontal).
- Norma UN 95 (Impacto lateral).
- FMVSS/221 (Requisitos para la resistencia mecánica en las uniones soldadas en buses escolares).

A. Regulación ECE R95

El Reglamento 95 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas indica que las normativas universales para la homologación vehicular, en cuanto a la protección de los pasajeros en caso de colisiones laterales.

Figura 12

Impacto lateral según la ECE R95



Nota. El gráfico representa la simulación virtual del impacto lateral según la ECE R95

Proceso de simulación virtual para impacto lateral de acuerdo a la ECE R95

- **Área de pruebas**

  El área donde se ejecuta el ensayo virtual debe ser suficiente para adaptar las condiciones de movimiento de la barrera deformable móvil y permitir el desplazamiento del vehículo impactado (minibús). El área del piso debe ser totalmente plana y sin obstáculos donde se pueda evidenciar el desplazamiento del vehículo que recibe el impacto.

- **Condiciones de ensayo**
  - El vehículo a probar está estacionado.
  - La barrera móvil deformable tendrá las características especificadas en el Reglamento ECE R95, punto 2.2.
  - El diseño de la barrera de deformación móvil afecta directamente el centro de los paneles laterales del objeto de investigación.

- **Velocidad de pruebas**

  Se encuentra establecida una velocidad de 50 ± 1 km/h que debe permanecer constante hasta una distancia mínima de 500 mm antes de que se produzca la colisión lateral.

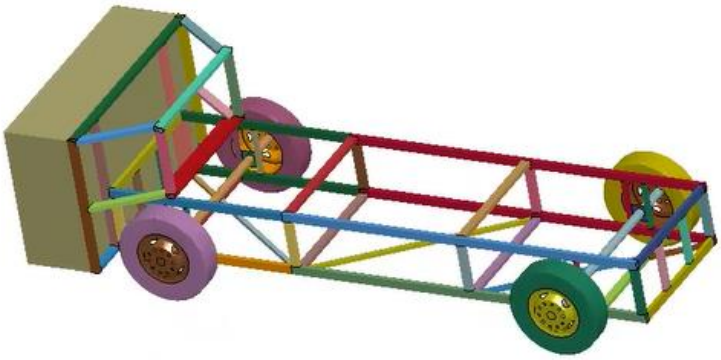
  Las características de la barrera deformable móvil son las siguientes:

Las características de la barrera deformable móvil

- La barrera deformable móvil consta un impactador y una estructura con ruedas.
- La masa total tomando en cuenta el impactador y la estructura es de 950 ± 20 kg.
- La altura de la distancia entre el bloque de impacto y el suelo debe ser de 300 ± 5 mm.
- El ancho de vía delantero y trasero de la barrera móvil es de 1500 ± 10 mm y la distancia entre ejes es de 3000 ± 10 mm.

Figura 13

Barrera deformable móvil



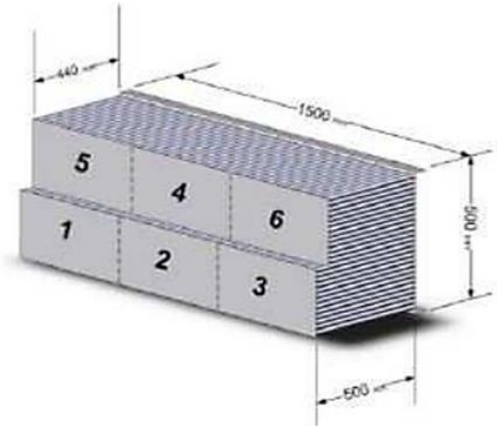
Nota. El gráfico representa la estructura de la barrera deformable móvil.

Dimensiones del impactador

- La zona del impactador deformable tiene 1500 ± 10 mm de ancho y 500 ± 5 mm de altura como se muestra en la Figura 15.

Figura 14

Impactador ECE R95



Nota. El gráfico representa a un impactador deformable. Tomado de (Honeycomb, s.f.)

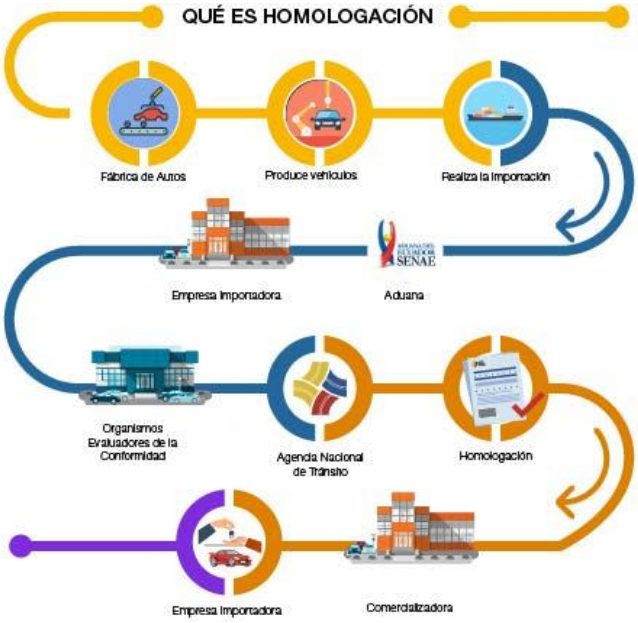
Homologación vehicular

Según la Homologación Vehicular – Agencia Nacional de Tránsito Del Ecuador – ANT (2019) la homologación de un tipo de vehículo es un procedimiento mediante el cual

los importadores, fabricantes, fabricantes de fitness o comercializadores certifican que un tipo, sistema, pieza o unidad de ingeniería independiente de vehículo cumple los requisitos para un tipo de vehículo. Los requisitos ambientales y de seguridad se especifican en las normas y/o reglamentos técnicos aplicables.

Figura 15

Proceso de Homologación vehicular



Nota. En la figura se muestra el flujo de procesos para homologar un vehículo. Tomado de (Homologación Vehicular – Agencia Nacional de Tránsito Del Ecuador – ANT, 2019)

En el Listado de Homologación vehicular publicado el 01 de julio del 2022, se encuentra especificado el chasis para pasajeros de marca Volkswagen modelo 9-150 OD y datos particulares los cuáles servirán para el desarrollo del siguiente proyecto.

En la Tabla 7 se muestran los datos publicados en el Listado de Homologación Vehicular – ANT.

Tabla 7

Especificaciones de la homologación vehicular del chasis Volkswagen 9-150 OD

CHASIS VOLKSWAGEN 9-150 OD	
Representante de la marca	Intrans
Marca	Volkswagen
Modelo	9.150 OD
Versión	N/A
Descripción de la versión	4300 cm3 diesel TM 4X2
Clase	Chasis motorizado (Minibús)
Subclase	M3
Capacidades [kg]	PBV: 8150 kg Cap. Carga: 5600 kg
Aplicación	Público: Interprovincial o Intraregional o Intraprovincial o Intracantonal (Urbano) o Comercial: Escolar e Institucional o Turismo

Nota. En la tabla de muestran los datos tomados del Listado de homologación vehicular más reciente, Julio 2022. Tomado de (Homologación Vehicular – Agencia Nacional de Tránsito Del Ecuador – ANT, 2019)

Materiales que se usan para la fabricación de estructuras de carrocerías

Antes de 1985, los vehículos se construían con materiales que contenían un alto porcentaje de madera para hacerlos más resistentes a los impactos. Sin embargo, estos vehículos eran más pesados, consumían más combustible y la fuerza del impacto se transmitía a los ocupantes en lugar de ser absorbida por la estructura. A partir de 1985, los fabricantes empezaron a incorporar nuevos materiales y aleaciones metálicas que proporcionan una mayor resistencia al impacto, son más ligeros y absorben una cantidad significativamente mayor de fuerza de impacto. Como resultado, los fabricantes han

intentado desarrollar un tipo de protector de escudo para garantizar la seguridad de los pasajeros del vehículo, de modo que el impacto no les afecte.

Debido a que el chasis está sujeto a grandes cargas estáticas y dinámicas, los rieles estructurales de la carrocería del autobús requieren una gran rigidez; Deben tener propiedades mecánicas óptimas para realizar su trabajo.

Según la normativa NTE INEN 2415 se usa tubos estructurales sección cuadrada, rectangular o especial, grado A.

Tabla 8

Clasificación y propiedades mecánicas de los tubos

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

Nota. En la tabla se indican las propiedades mecánicas de los tubos como son el límite de fluencia mínima, resistencia a la tracción mínima y elongación mínima. Tomado de (INEN, 2013)

Acero ASTM A 500

Para Cháfuel (2017) “los aceros ASTM A500 están disponibles en tres grados de tubos redondos huecos HSS, así como en tubos HSS cuadrados y rectangulares.” (p. 30). Además, la norma ASTM A500 también se aplica a los tubos estructurales de carbono aluminizado soldados en frío, sin costura, redondos, cuadrados, rectangulares o de sección transversal para soldar, remachar o anclar puentes, estructuras mamposteras y para fines

estructurales generales. Este tubo se fabricará en dimensiones soldadas y no acabadas y deberá cumplir con los requisitos químicos de carbono, manganeso, fósforo, azufre y cobre.

Tabla 9

Acero ASTM A500 propiedades mecánicas del material

Propiedades mecánicas del Acero ASTM A500	
Límite de fluencia mínima	270 [Mpa]
Resistencia a la tracción mínima	310 [Mpa]
Elongación mínima en 50 mm **%**	25^{a}

Nota. En la tabla se indica las propiedades mecánicas del material, estas propiedades van a ser las ingresadas en el software. Tomado de (Cháfuel, 2017)

Software de Diseño y Simulación

El software Computer Aided Design, mejor conocido por su acrónimo CAD, es un software para crear y editar modelos 2D y 3D de objetos físicos. Aunque también se puede encontrar en CADD, el diseño y redacción es asistido por computadora.

Herramientas de diseño asistido

Menciona Bonilla (2003) que “es una herramienta de software que, a través de una computadora, permite crear, modificar, analizar y optimizar planos y modelos en dos y tres dimensiones, así como manipular elementos geométricos de forma sencilla”. En igual forma la abreviatura CAD, que significa Diseño Asistido por Ordenador, se utiliza comúnmente para referirse a un conjunto de herramientas de software para el diseño (CAD), la fabricación (CAM) y el análisis (CAE) en los campos científico e industrial que son asistidos por ordenadores.

Diseño asistido por computador (CAD)

Rojas y Rojas (2006) mencionan que el CAD “es un tipo de análisis que permite crear un modelo de cómo se comportará un producto antes de construirlo. Durante la fase de diseño, es posible que no se necesiten bocetos en papel” (p. 3). Las herramientas de

dibujo 2D son basadas en objetos vectoriales geométricos como puntos, líneas, arcos y polígonos se pueden manipular mediante una interfaz gráfica. El modelador 3D agrega superficies y sólidos.

La salida CAD generalmente tiene la forma de un archivo electrónico para impresión, mecanizado u otros procesos de fabricación. CAD también puede considerarse una tecnología de dibujo. El software se utiliza para mejorar la productividad de los diseñadores, mejorar la calidad del diseño, mejorar la comunicación a través de la documentación y crear bases de datos para la fabricación.

Ingeniería asistida por computadora (CAE)

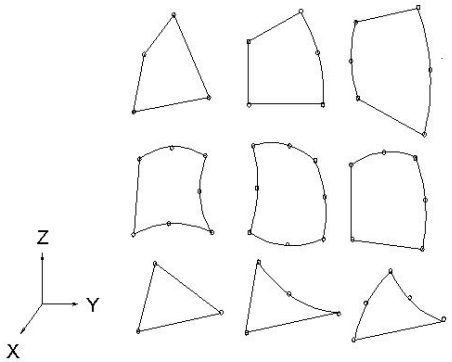
Las herramientas CAE se pueden utilizar para diferentes propósitos: incluida la asistencia en la preparación de proyectos, análisis de evaluación de productos, pruebas de posibles mejoras, análisis de fallas, adaptación y optimización de productos y equipos. Los métodos de análisis por computadora se pueden desarrollar utilizando una variedad de métodos, los más populares son el análisis de elementos finitos (FEA) y la dinámica de fluidos computacional (CFD).

Elementos Tipo Shell

Según Acosta (2022), “al tratar con un elemento Shell, es intimar con un elemento finito, por lo general se encuentra conformado por 3 o 4 lados y en si debe estar claramente definidas sus condiciones de frontera” (p. 13). Además, los elementos de cáscara son cuadriláteros isoparamétricos de 4 a 8 nodos o elementos triangulares de 3 a 6 nodos en cualquier orientación 3D. Los elementos de 4 nodos requieren una malla mucho más fina que los elementos de 8 nodos para obtener desplazamientos y tensiones convergentes en modelos que implican flexión fuera del plano. La figura 1 muestra algunos elementos de cáscara típicos.

Figura 16

Elementos típicos de Shell



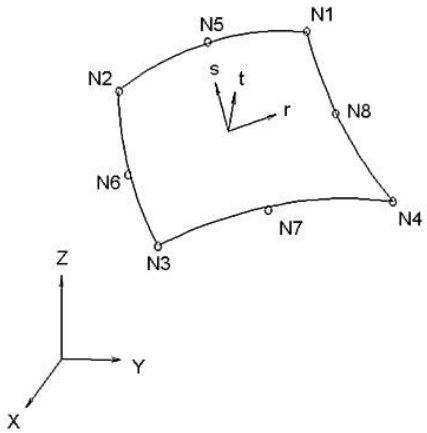
Nota. En el gráfico se observa los elementos típicos que se encuentran al trabajo con elementos tipo Shell. Tomado de (Autodesk, 2014).

Para Acosta (2022) hay 2 tipos de elementos tipo Shell:

- **Shell Thin:** La subelemento thin proveniente de la familia shell por lo general se tiende a trabajar con placas de espesor pequeño, en donde su deformación es controlada por flexión, esto a su vez le permite un ahorro en el tiempo de cálculo, este elemento además no contempla las deformadas por corte.

Figura 17

Ejemplo de elemento tipo Shell 3D



Nota. En el gráfico se muestra el elemento Thin Shell se basa en la teoría de las placas delgadas. Tomado de (Autodesk, 2014)

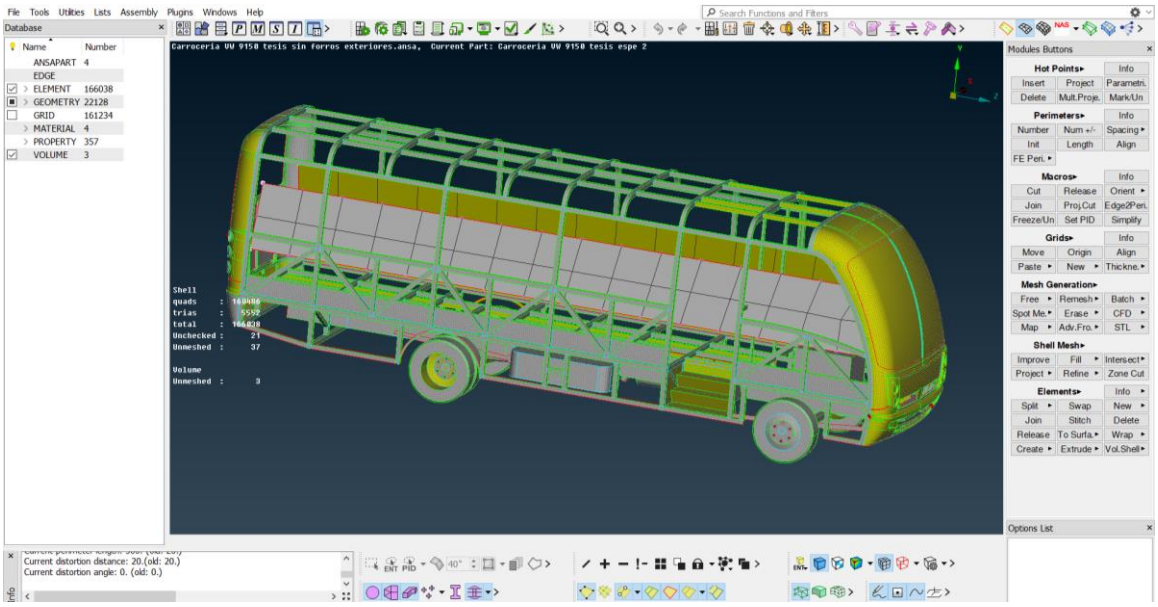
- **Shell Thick:** La subelemento thick, se lo trabaja en función a placas de espesores considerables en el cual su deformación se da por flexión y por corte, dándonos a conocer que la deformación no se puede llegar a despreciar (p. 14).

Software ANSA

Menciona ANSA PRE PROCESSOR (s.f) “es una herramienta avanzada de preprocesamiento CAE multidisciplinar que proporciona toda la funcionalidad necesaria para la creación de modelos completos”. Además, es la preferencia de los usuarios debido a su amplia gama de funciones y herramientas que satisfacen sus necesidades. La lista de funciones productivas y versátiles es larga y las tareas y procesos alternativos que se pueden realizar con ellas son innumerables.

Figura 18

Creación de malla en Software ANSA



Nota. El gráfico representa la funcionalidad para la creación del mallado en un mini bus.

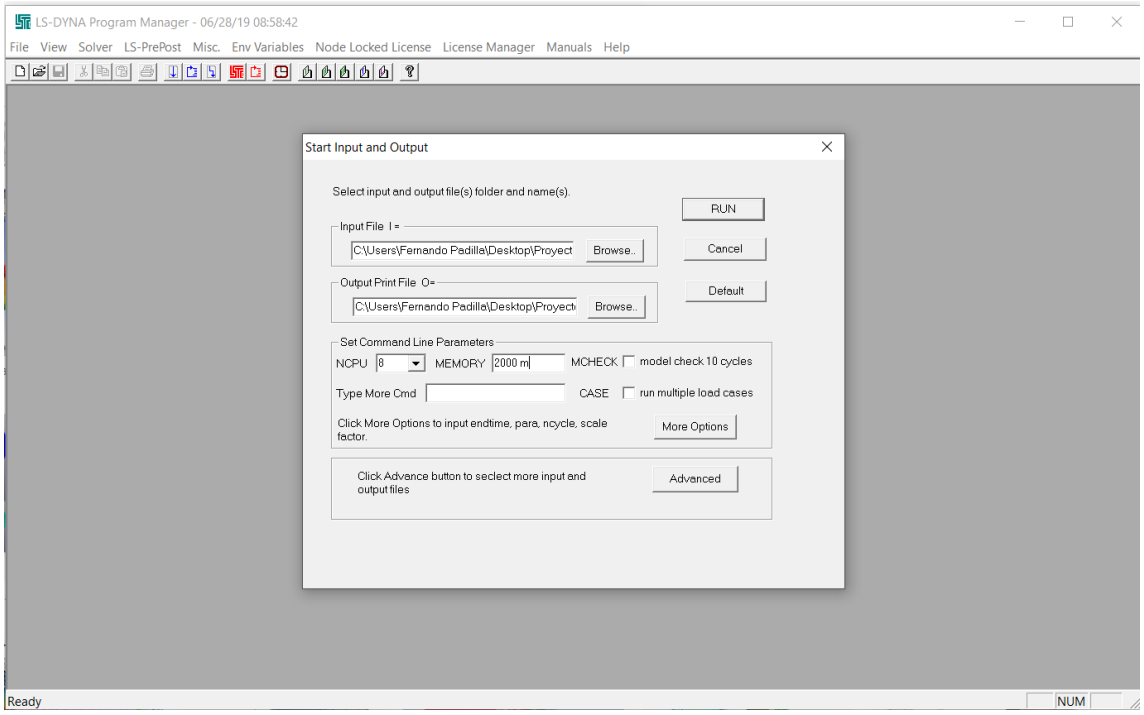
Software LS DYNA

Según ANSYS, Inc. (2011), “es un programa de elementos finitos de uso general capaz de simular problemas complejos del mundo real”. Asimismo, se utiliza en las industrias del automóvil, aeroespacial, de la construcción, militar, manufacturera y de

bioingeniería. LS-DYNA está optimizado para plataformas basadas en Unix, Linux y Windows de memoria compartida y está totalmente controlado por el LSTC. Los orígenes del código se encuentran en el análisis de elementos finitos dinámicos transitorios altamente no lineales que utilizan la integración temporal explícita.

Figura 19

Ejecución de código de análisis de elementos finitos



Nota. El gráfico representa como se ejecuta el código para que se genere la simulación de los elementos finitos bajo condiciones ya establecidas.

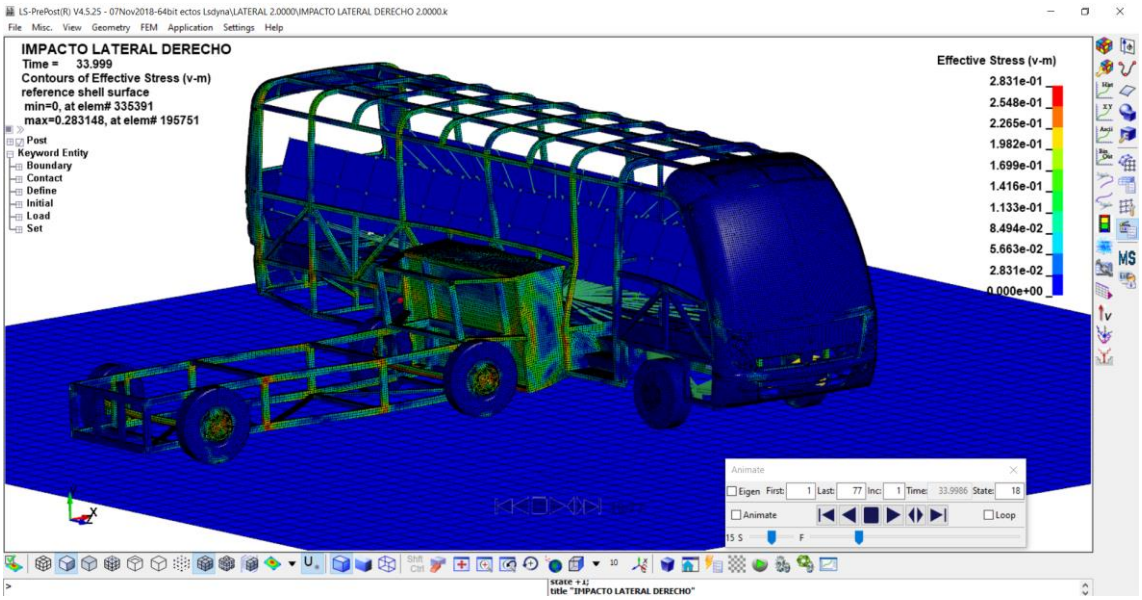
Software LS PREPOST

Según Illescas (2009), “Ls-Prepost consiste en una herramienta interactiva avanzada que prepara los datos de entrada a Ls-Dyna y procesa los datos resultantes de los análisis del programa”. Adicionalmente, la interfaz de usuario está diseñada para ser eficiente e intuitiva. Cuando los usamos como preprocesador tiene aplicaciones específicas para el sector de la automoción como la implementación de cinturones de seguridad, airbags, acelerómetros, modelos ficticios, sensores y más. Y como post-procesador nos permite tener una cómoda visualización de los resultados obtenidos, podemos obtener graficas de

desplazamiento de nodos, aceleraciones, velocidades, esfuerzos, tensiones de Von Mises, etc.

Figura 20

Ejemplo de choque simulado con Ls-prepost



Nota. El gráfico representa la obtención de tensiones de Von Mises en Ls-prepost.

Método de Elementos Finitos (MEF)

Este método es definido como:

> Una técnica computacional, que se utiliza para solucionar los problemas de ingeniería, en el que el sistema a ser resuelto se divide en secciones o elementos de aprendizaje simples, para así reconstruirlo ensamblando la contribución de cada elemento y de esta manera predecir su comportamiento general. (Gamboa y Vistin, 2006, p. 22)

En base a lo anterior, se puede acotar que, se utiliza en cálculos de diseño estructural, esto le permite obtener resultados más rápidos y con alta precisión. Proporciona resultados mediante colores para así visualizar y comprender mejor el comportamiento de los diseños, también permite cambiar la configuración con fines de prueba y optimización.

Morillo, (2017), indica que este método “permite solucionar problemas o inconvenientes generados en la ingeniería, mediante un un software especializado y que, junto con la ayuda de un jefe de proyecto, permite cambiar las operaciones 3D en base al croquis original” (p. 815).

El proceso por el cual resuelve los problemas es mediante la discretización, este proceso consiste en dividir un área por puntos en el caso lineal, líneas en el caso bidimensional o superficies en el caso tridimensional. Los elementos se subdividen en nodos, que son puntos discretos que se conectan para formar elementos. Tras esta discretización y aplicando condiciones de contorno al sistema, se resuelve linealmente hasta llegar al estado final. Si en algún momento del proceso de resolución de problemas aparece una ecuación no lineal, habrá que resolverla linealmente. El método de elementos finitos es un poderoso método de cálculo numérico en la actualidad, que resuelve sistemas de ecuaciones que modelan cualquier problema de física como mecánica de fluidos, transferencia de calor, magnetismo, etc.

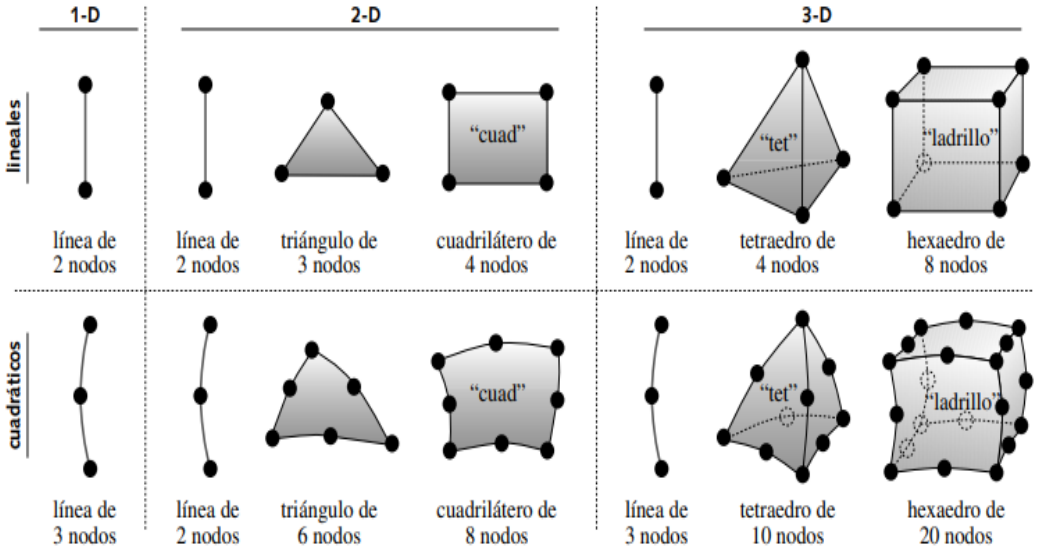
Este método tiene sus limitaciones, que son las condiciones de contorno, el proceso de fabricación, etc. Los ingenieros deben ser capaces de aproximar el problema lo más cerca posible para obtener resultados lo más cercanos a la realidad posible. El analista necesita saber cómo interpretar los resultados calculados por el programa. Por este motivo, es muy importante comparar los resultados obtenidos por cálculos informáticos con los obtenidos experimentalmente.

Tipos de Malla

Según Norton (2011), “los elementos son uni, bi o tridimensionales, llamados también elementos de línea, superficie y volumen, respectivamente” (p. 923). Además, los diferentes tipos de mallas son generados por un software que lleva a cabo una simulación basada en elementos finitos y esto es lo que sucede durante el proceso de generación de la malla de un modelo, el programa crea una mezcla de elementos sólidos, envolventes, elásticos y de contacto en función de la geometría generada.

Figura 21

Elementos finitos más comunes



Nota. En el gráfico se muestra los elementos finitos más comunes a usar para la generación de una malla. Tomado de (Norton, 2011).

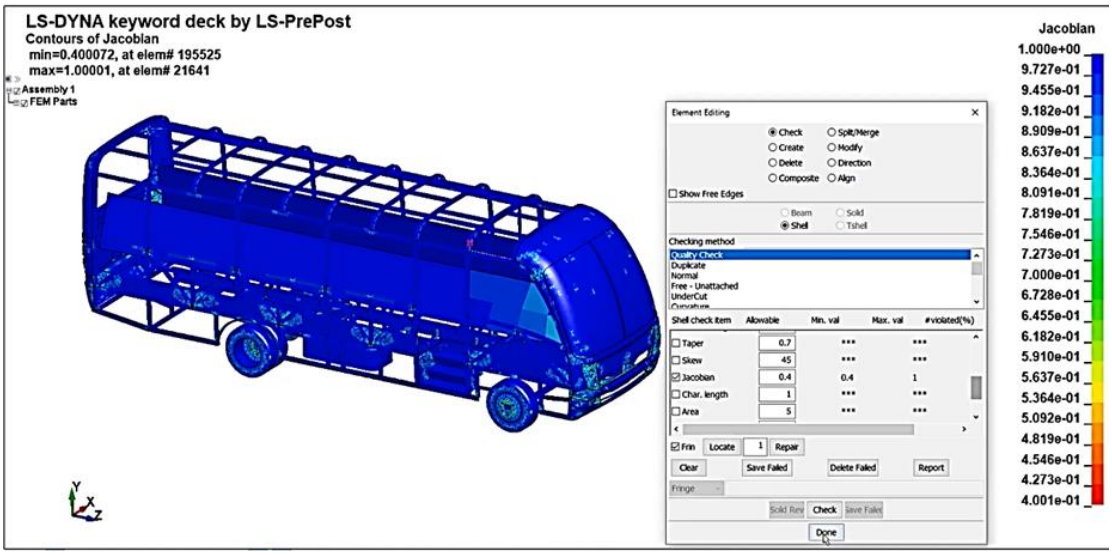
Cuando se desea modelar estructuras como miembros de armaduras y vigas de sección transversal constante los elementos de línea sin adecuados. Si la geometría y carga de la estructura dan como resultado un esfuerzo plano o una deformación plana, los cuales tengan magnitudes igual a cero en la tercera dimensión se emplea los elementos bidimensionales para que se pueda modelar una estructura tridimensional.

Relación Jacobiana

El criterio jacobiano ayuda a determinar la calidad de la malla, este criterio aprueba y calcula todos los elementos excepto los triángulos y tetraedros. Una relación alta indica que la correspondencia entre el área y el área total del elemento se vuelve computacionalmente poco confiable. Un cuadrilátero tiene una razón jacobiana de ,1 si sus caras opuestas son todas paralelas. Dado que el nudo tiende a moverse desde una esquina hacia el centro del elemento de línea, la proporción jacobiana aumenta, lo que con el tiempo puede provocar que cualquier movimiento adicional del elemento se rompa. (© 2015 ANSYS, Inc., 2014)

Figura 22

Relación jacobiana de la carrocería



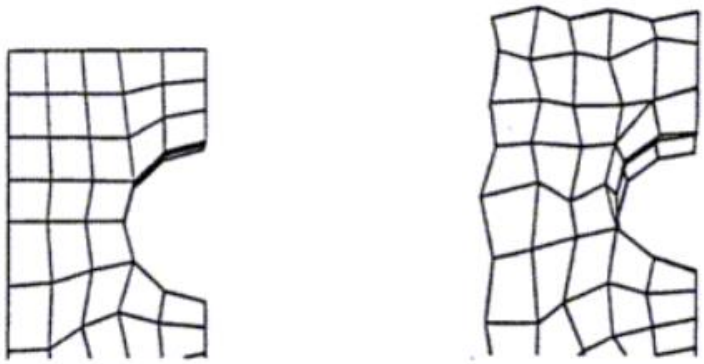
Nota. El gráfico representa la interfaz de índice de jacobiano.

Energía de Hourglass

Los modos de reloj de arena (HG) son modos de deformación no físicos y de energía nula que producen una deformación nula y ninguna tensión. Los modos de reloj de arena sólo se producen en elementos sólidos, de cáscara y de cáscara gruesa sub integrados (con un solo punto de integración). LS-DYNA tiene varios algoritmos para inhibir los modos de reloj de arena. El algoritmo por defecto (tipo 1), aunque es el más barato, no suele ser el más eficaz. (ANSYS, Inc., 2013)

Figura 23

Deformaciones de Hourglass



Nota. En la figura se muestra una malla no deformada y malla deformada con efecto de reloj de arena. Tomado de *(ANSYS, Inc., 2013)*

Una forma de eliminar por completo los problemas del reloj de arena es cambiar a formulaciones de elementos con integración completa o reducida selectivamente (S/R). Este enfoque puede tener sus inconvenientes. Por ejemplo, los sólidos de tipo 2 son mucho más caros que el sólido por defecto de un solo punto. En segundo lugar, son mucho más inestables en aplicaciones de gran deformación (los volúmenes negativos son mucho más probables). En tercer lugar, los sólidos de tipo 2 tienen cierta tendencia al "bloqueo por cizallamiento" y, por tanto, se comportan de forma demasiado rígida en aplicaciones en las que la forma del elemento es pobre.

Capítulo III

Ingeniería Asistida por Computador para el Análisis de una Carrocería de Bus

Introducción

Dentro del campo de la ingeniería con respecto a colisiones e impactos de acuerdo a todo tipo de vehículos no se encuentran definidas normativas o reglamentos que estandaricen este tipo de pruebas de simulación específicamente en buses. Por otro lado, si se encuentran vigentes normativas que especifican el diseño y construcción de buses, como es la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1323:2009 y específicamente el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 041 correspondiente a vehículos de transporte escolar.

Por este motivo en el presente proyecto se realiza la simulación de impacto lateral derecho e izquierdo de acuerdo al Reglamento 95 de la Comisión Económica para Europa (CEPE) de las Naciones Unidas la cuál cita prescripciones uniformes sobre la homologación de los vehículos en lo relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión lateral, para ello se consideran aspectos importantes como el diseño y peso de una barrera deformable móvil, así como la velocidad a la que debe impactar la misma.

El objetivo principal de modelado y análisis estructural del bus es demostrar la incidencia de un impacto lateral en cuanto a la zona de supervivencia mediante el análisis de software CAE. El modelo estructural se desarrolló con medidas referenciales tomadas directamente del bus Volkswagen 9-150 perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga, teniendo en cuenta detalles muy próximos para garantizar resultados que se asemejen a la realidad.

Descripción y especificaciones de la carrocería

El bus que se analiza en el presente proyecto de aspecto referencial corresponde a la categoría de vehículos de transporte escolar establecida en el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 041. De acuerdo a la clasificación vehicular planteada en el Capítulo II el vehículo automotor estudiado en el siguiente proyecto corresponde a la categoría M y

subcategoría M3 el cual indica que es un minibús y de igual manera se confirma dicha mención en el Listado de Homologación vehicular con respecto al peso bruto vehicular, capacidad de carga y por ende el peso de su chasis.

En la Figura 24 se observa detalles reales del panel lateral derecho del minibús.

Figura 24

Minibús escolar Volkswagen 9-150

Nota. El gráfico representa el vehículo escolar de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

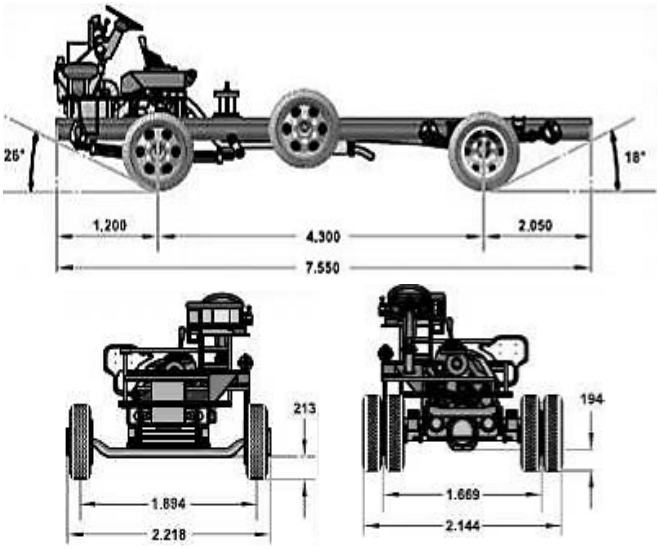
Chasis Volkswagen 9-150

Este tipo de chasis son destinados al uso escolar, ejecutivo, turismo, para transporte de corta y media distancia. Mismo que deberá poseer las características necesarias para soportar la estructura de la carrocería correspondiente al bus.

En la Figura 25 se especifica el dimensionamiento principal del chasis tomado como referencia para el inicio del modelado del bus en el software CAD.

Figura 25

Esquema de chasis Volkswagen 9-150



Nota. Tomado de (Volkswagen Camiones Y Buses, 2022)

Tabla 10

Especificaciones del chasis Volkswagen 9-150

DIMENSIONES DEL CHASIS (mm)	
Distancia entre ejes (DEE)	4300
Voladizo delantero	1200
Voladizo posterior	2050
Largo Total	7550
Ancho máximo delantero	2218
Ancho máximo posterior	2144
Trocha delantera	1894
Trocha posterior	1669
Despeje del suelo delantero	213
Despeje del suelo posterior	194

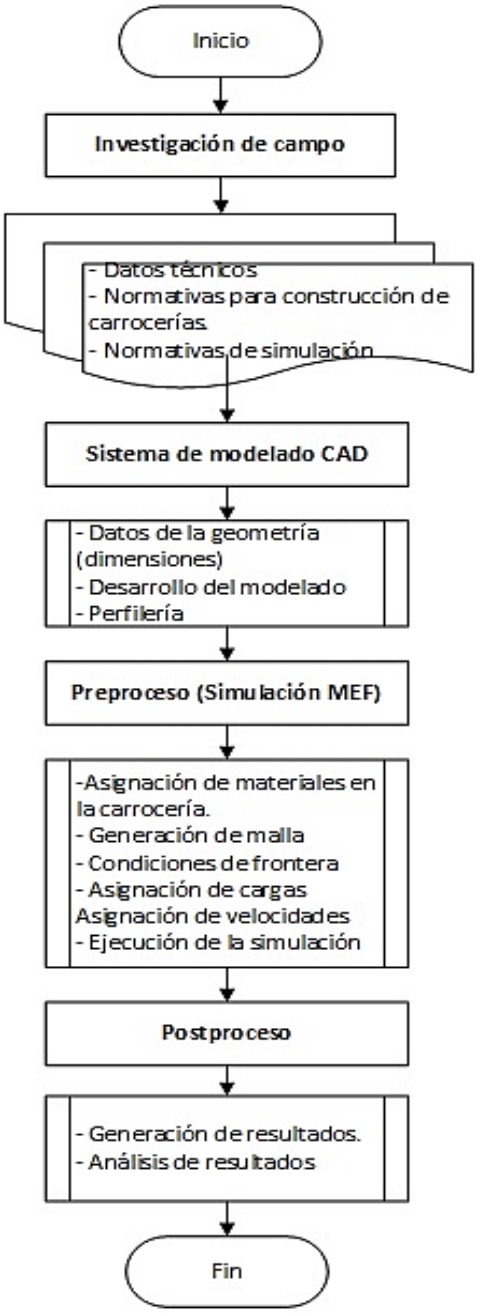
Nota. Tomado de (Volkswagen Camiones Y Buses, 2022)

Metodología de los procesos del análisis

El presente proyecto se orienta de acuerdo al diagrama de procesos mostrado en la Figura 26 ya que el análisis mediante simulación CAE requiere datos cualitativos de acuerdo al modelado y cuantitativos respecto a las propiedades mecánicas del material de fabricación de la carrocería para realizar el análisis mediante sistemas numéricos computacionales propios de cada software.

Figura 26

Diagrama de procesos de modelado y simulación



Nota. Diagrama de procesos de análisis de simulación CAE.

Modelado de los objetos de estudio

Los objetos de estudio para impactos laterales son principalmente la carrocería del bus Volkswagen 9-150 y una barrera deformable móvil de acuerdo a las especificaciones de la ECE R95 de las Naciones Unidas.

Carrocería del bus

El modelado de la carrocería Volkswagen 9-150 fue desarrollado en base a medidas referenciales tomadas directamente del minibús perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga, tomando en cuenta aspectos cualitativos de acuerdo a la geometría del mismo y cuantitativos en base a las propiedades mecánicas de sus materiales de construcción para obtener un análisis con resultados que nos permitan determinar la seguridad dentro de la zona de supervivencia. Dichas medidas y aspecto de diseño fueron considerados en base a la normativa NTE INEN 1323:2009 puesto que el año de fabricación del bus es el 2009 así como se especifica en la Tabla 5 del capítulo II de fundamentación teórica, así también se considera la ficha técnica de medidas del chasis especificadas en la Tabla 10, por lo que dicha norma y ficha técnica son aplicables en el modelado estructural de la carrocería.

Los elementos estructurales se encuentran modelados mediante operaciones de superficie, es decir elementos de tipo cáscara (Shell) ya que, de acuerdo a su tipo de operación permite que la estructura sea continua y no presente interferencias entre sus perfiles estructurales con el fin de obtener resultados computacionalmente fiables de esfuerzos y deformaciones. En la Figura 27 se observa el modelado de la carrocería con detalles cualitativos asemejándose a la apariencia real del bus, así como también la estructura interna de la misma la cual se considera para los ensayos virtuales.

Figura 27

Modelado de la carrocería Volkswagen 9-150

Nota. El gráfico representa el modelado de la carrocería Volkswagen 9-150.

Barra deformable móvil (BMD) ECE R95

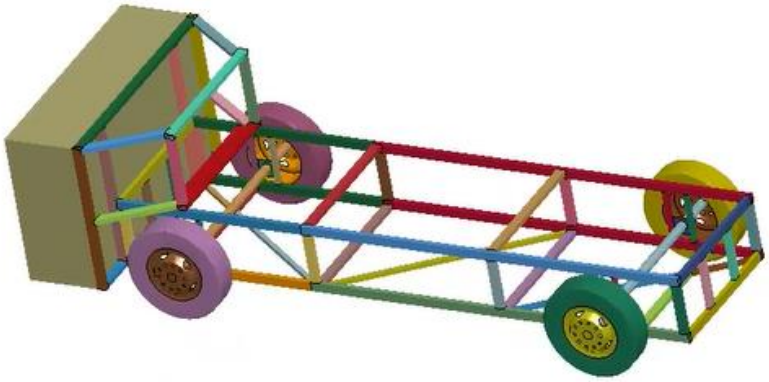
El modelado se ejecutó de acuerdo a las características especificadas en la Regulación ECE R95 correspondiente a impacto lateral, a continuación, se mencionan las principales.

- Está compuesta de un impactador y un carro sumando una masa total de 950 ± 20 kg.
- La altura del impactador con respecto al suelo debe ser de 3000 ± 5 mm
- Esta BDM es tomada de referencia para simular impactos referenciales a vehículos medianos.

En la Figura 28 se muestra la barra deformable, misma que se posteriormente se le asigna la velocidad de 50 km/h establecida en la ECE R95.

Figura 28

Barrera deformable móvil ECE R95



Nota. El gráfico representa la estructura de la barrera deformable móvil según la ECE R95.

La BDM fue modelada con mismo principio de elementos de tipo cáscara (Shell), y de esa manera distribuir el peso de 950 kg ± 20 kg de acuerdo al espesor en toda la barrera deformable móvil.

Preproceso del análisis estático

En el siguiente apartado se describe el preproceso de análisis mediante la asignación de datos a la estructura del bus como propiedades mecánicas del material y masas especificadas en la norma NTE INEN 2415 y el listado de homologación vehicular de la ANT respectivamente, así como las características correspondientes a la barrera deformable móvil especificadas en la ECE R95.

Configuración de la carrocería

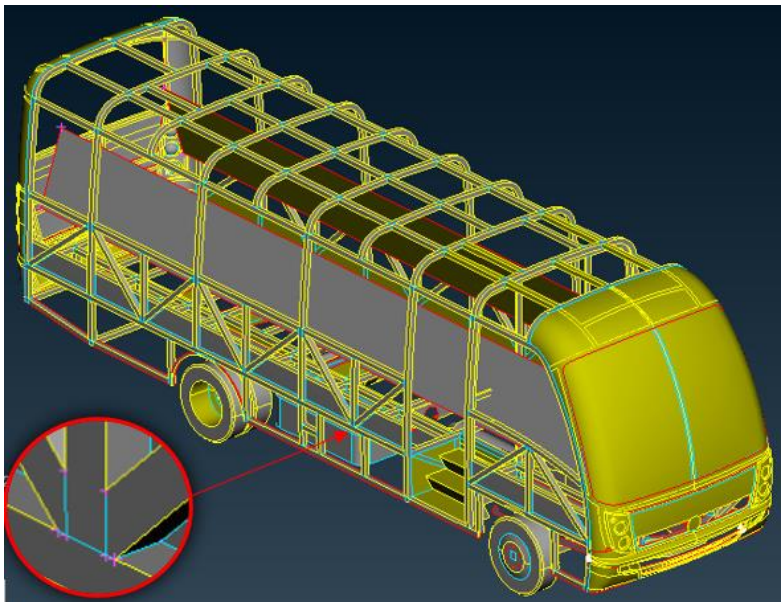
Al finalizar el modelado de manera correcta y sin interferencias, el bus es importado en formato SLDPRT para realizar su configuración de análisis estructural, principalmente generando la malla mediante la utilización del software ANSA v19.1.7 de preprocesamiento CAE y posteriormente este será exportado al software LS-PrePost-4.5 con la extensión. k para asignar las características de los materiales y cargas correspondientes.

Generación de Malla

Para este proceso de mallado se analiza solo los elementos estructurales de la carrocería como tal, por este motivo se procede a quitar los paneles (forros) laterales y del techo. Antes de iniciar el proceso se verifica las uniones de tubos (soldaduras), representadas con líneas azules y zonas abiertas es decir no soldadas en líneas de color rojo. En la figura 29 se observa las uniones (líneas celestes) las cuales representan las uniones mediante soldadura entre los tubos, garantizando que no existen interferencias.

Figura 29

Mallado de la carrocería



Nota. El gráfico representa el mallado se observa las uniones soldadas por el color celeste.

El software genera un número calculado de elementos finitos de diferente geometría, los elementos que predominan en la carrocería son de tipo cuadrilátero y en secciones de curvatura o uniones son de tipo triangular, cabe mencionar que entre mayor número de elementos finitos se generen la estimación de resultados en esfuerzos y deformaciones serán más exactos, por ende, el gasto computacional también será mayor. En este caso se realizó dos secciones de mallado, una para toda la estructura del bus y otra para la zona de supervivencia con un tamaño de 25mm y 500mm respectivamente.

En la Figura 30 se muestra la asignación del tamaño de malla para las dos secciones anteriormente nombradas.

Figura 30

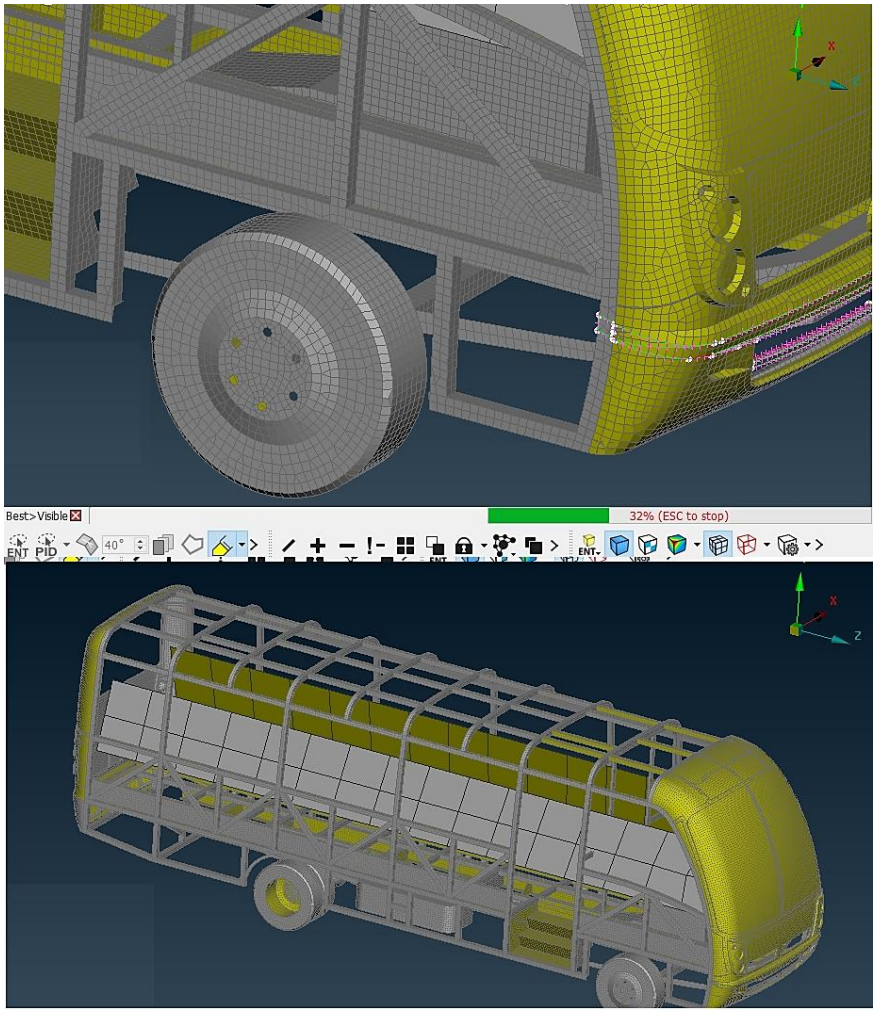
Tamaño de malla de la carrocería

Nota. El gráfico especifica el tamaño de malla de la zona de superveniencia y de la estructura del minibús.

El tamaño de malla de 25 [mm] es asignado por las dimensiones de los perfiles cuadrados utilizados en la carrocería ya que son de 50x50x2, de este modo los elementos finitos formados tomarán una distribución uniforme y su geometría en su mayoría serán de tipo cuadrilátero. Por otro lado, el tamaño de malla para la zona de supervivencia se asigna de 500 [mm] ya que al no intervenir directamente con el impacto no es necesario realizar un análisis exhaustivo y por ende se ahorra gasto computacional y tiempo de simulación.

Figura 31

Mallado de la carrocería



Nota. En el gráfico se evidencia la ejecución de malla y la variedad de elementos finitos formados durante este proceso.

Al finalizar el proceso de mallado en la carrocería se obtuvieron los siguientes resultados:

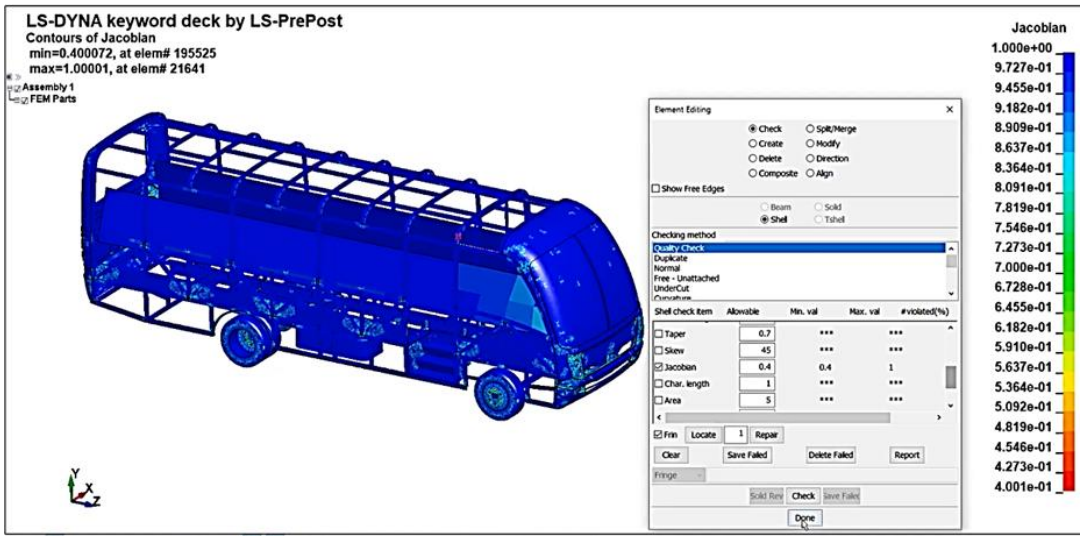
- Elementos cuadriláteros: 160489
- Elementos triangulares: 5552
- Elementos totales: 166038

A. Relación Jacobiana

Esta relación o criterio permite conocer la calidad de malla que presenta la estructura de la carrocería, al contar con una proporción próxima a 1, esto indica que los resultados a obtener son computacionalmente fiables. Para obtener la relación Jacobiana de 1, las caras opuestas de los perfiles estructurales deberían ser todos paralelos entre sí, el resultado de la relación jacobina mostrado en la Figura 32 es de 0.4 – 1, siendo en mayor proporción el índice 1 por el color azul y en un bajo porcentaje de secciones de curvatura y uniones se observa un índice de 0.8 (Cháfuel Ortega, 2017).

Figura 32

Relación jacobiana de la carrocería



Nota. El gráfico se muestra la obtención del índice de jacobiano, se evidencia que el 90% del minibús es cercano a 1.

Asignación de materiales y perfiles estructurales

La asignación de materiales para la estructura de la carrocería se considera en base a la normativa NTE INEN 1323:2009 la cuál menciona que se debe utilizar perfiles estructurales protegidos contra la corrosión que cumplan con las normas INEN correspondientes vigentes y en el caso de no existir Normas Técnicas Ecuatorianas se

deben utilizar las normas o reglamentos equivalentes de reconocido prestigio, tales como: ASTM, DIN, JIS, ANSI. (NTE INEN 1323, 2009)

En este caso se consideró la normativa NTE INEN 2415 la cuál menciona las características de los tubos de acero al carbono soldados para aplicaciones estructurales y usos generales, motivo por el cual se aplicó el acero ASTM A500 GRADO A en tubos cuadrados de 50x50x2 en toda su estructura excepto en el bastidor.

En la Tabla 11 se muestra sistemas de unidades consistentes para el acero, en este caso se debe trabajar en un solo sistema de unidades para que el software LS-PrePost calcule los resultados y poder interpretarlos de acuerdo a las unidades mostradas a continuación.

Tabla 11

Sistema de unidades para el acero en LS-DYNA

Masa	Longitud	Tiempo	Fuerza	Esfuerzo	Energía	Densidad	Módulo de Young
kg	m	s	N	Pa	J	7.83e+03	2.07e+11
kg	cm	s	1.0e-02	-	-	7.83e-03	2.07e+09
kg	cm	ms	1.0e+04	-	-	7.83e-03	2.07e+03
kg	cm	us	1.0e+10 N	-	-	7.83e-03	2.07e-03
kg	mm	ms	kN	GPa	kN-mm	7.83e-06	2.07e+02
g	cm	s	dyne	dyne/cm²	erg	7.83e+00	2.07e+12
g	cm	us	1.0e+07 N	Mbar	1.0e+07 Ncm	7.83e+00	2.07e+00
g	mm	s	1.0e-06	Pa	-	7.83e-03	2.07e+11
g	mm	ms	N	MPa	N-mm	7.83e-03	2.07e+05
Ton	mm	s	N	MPa	N-mm	7.83e-09	2.07e+05
lbf-s²/in	in	s	lbf	psi	lbf-in	7.33e-04	3.00e+07
slug	ft	s	lbf	psf	lbf-ft	1.52e+01	4.32e+09
kgf-s²/mm	mm	s	kgf	kgf/mm²	Kgf-mm	7.98e-10	2.11e+04

Nota. En la tabla se especifica las unidades del software. Tomado de (Consistent Units, 2022).

En la Tabla 12 se muestra la designación de cada parámetro a ingresar en la interfaz del software LS-PrePost de las propiedades mecánicas del Acero ASTM A500 Grado A, a

todos los elementos estructurales de la carrocería, dicho software no trabaja con bibliotecas de materiales ya definidos, trabaja con modelos matemáticos llamados cartas de control que nos permiten crear el material en base a las propiedades mecánicas del mismo y creando su curva de esfuerzo deformación en base al esfuerzo y la deformación unitaria antes de causar la ruptura del material. Además, se especifica la respectiva equivalencia de unidades comprensibles para el software LS-PrePost.

Tabla 12

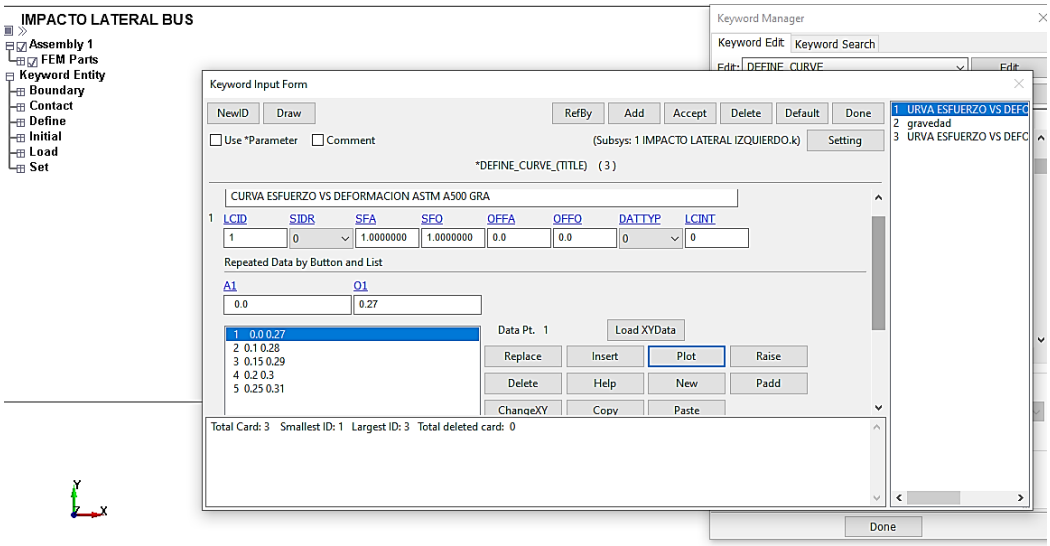
Propiedades mecánicas del ACERO ASTM A500 GRADO A

Designación en LS-PrePost	**Propiedades mecánicas**	**Valor NTE INEN 2415 y generales**	**Valor equivalente (LS-PrePost)**
RO	Densidad del acero	7800 kg/m³	7,8E-6 Kg/mm³
E	Módulo de Young	2e-9 MPa	2E+2 GPa
PR	Radio de Poisson	0.3	0.3
SIGY	Deformación unitaria	21% - 25%	25%
FAIL	A que valor máx de elongación falla el material	0.25	0.25
LCSS	Curva esfuerzo deformación	Sy: 270 MPa Su: 310 MPa	0.270 GPa 0.310 GPa

Nota. La tabla representa la designación de cada parámetro a ingresar en la interfaz del software LS-PrePost.

Figura 33

Coordenadas de la curva esfuerzo – deformación unitaria

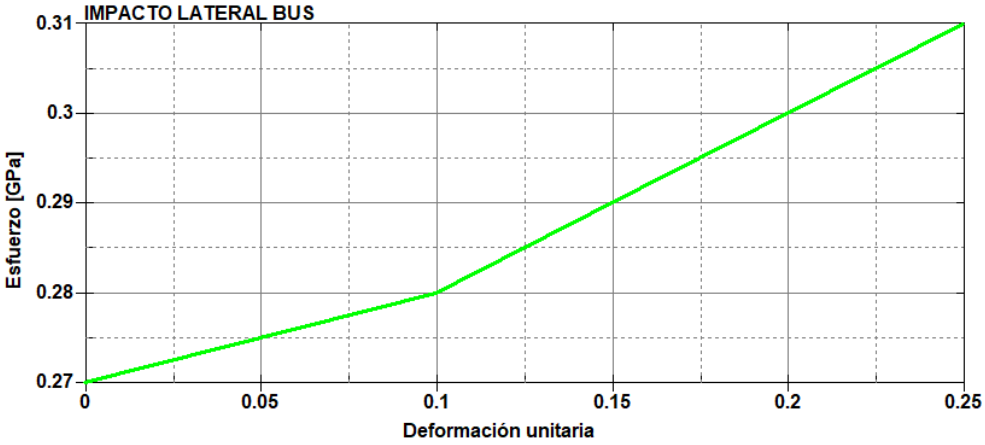


Nota. En el gráfico se muestra la configuración de los puntos para la curva esfuerzo – deformación unitaria.

En la Figura 34 se muestra la definición de la curva de deformación unitaria (abscisas) en porcentaje iniciando desde 0 hasta 0.25 vs esfuerzo (ordenadas) en unidades de GPa, desde 0.270 GPa (Sy) hasta 0.310 GPa (Su). Esto quiere decir que el material se va romper cuando llegue a un esfuerzo de 310 MPa con una deformación unitaria máxima de 0.25.

Figura 34

Curva de deformación unitaria vs esfuerzo

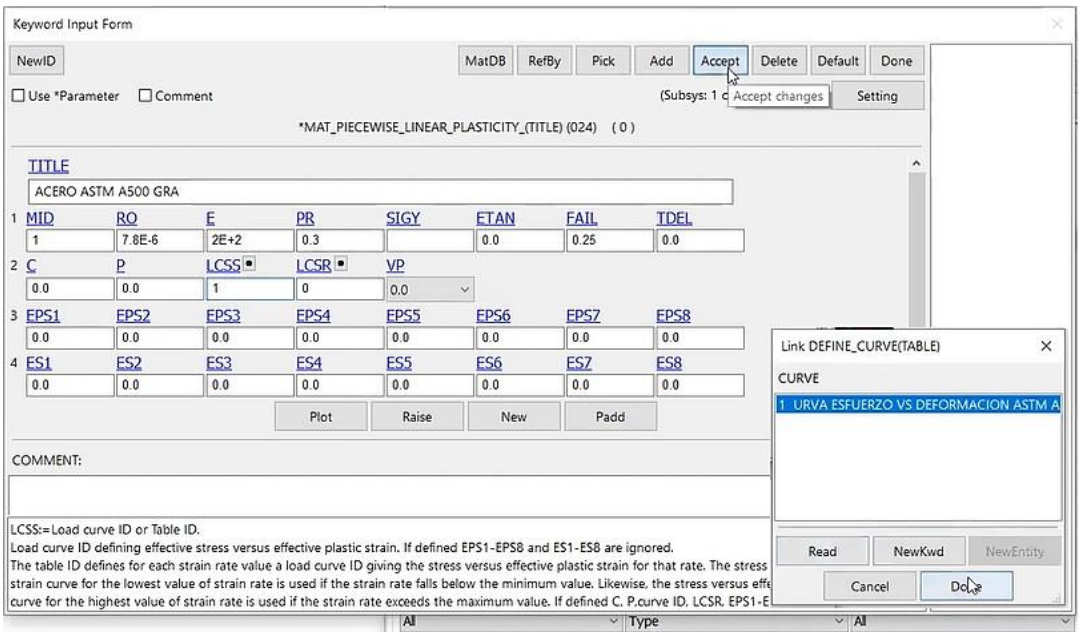


Nota. El gráfico representa la curva formada con los valores de deformación y esfuerzo indicadas en las propiedades del material ASTM A500.

En la Figura 35 se muestra la asignación del material a la carrocería tomando en cuenta las propiedades mecánicas del acero ASTM A500 Grado A, e insertando la curva deformación unitaria vs esfuerzo previamente definida.

Figura 35

Asignación del acero estructural ASTM A500 GRADO A



Nota. El gráfico muestra la interfaz para asignación de material.

Aplicación de Cargas

Para la aplicación de masas en la carrocería se toma en cuenta el peso bruto vehicular (PBV) y Capacidad de carga de la carrocería establecidos en el listado de vehículos homologados - ANT. En la Tabla 13 se especifican los espesores asignados a las partes de la carrocería y chasis para obtener un peso referencial aproximado de acuerdo a las especificaciones que se muestran a continuación.

- Peso bruto vehicular (PBV): 8150 kg
- Cap. Carga: 5600 kg
- Peso chasis: PBV – Cap. Carga = 2550 kg

Tabla 13

Espesor asignado a cada parte del minibús

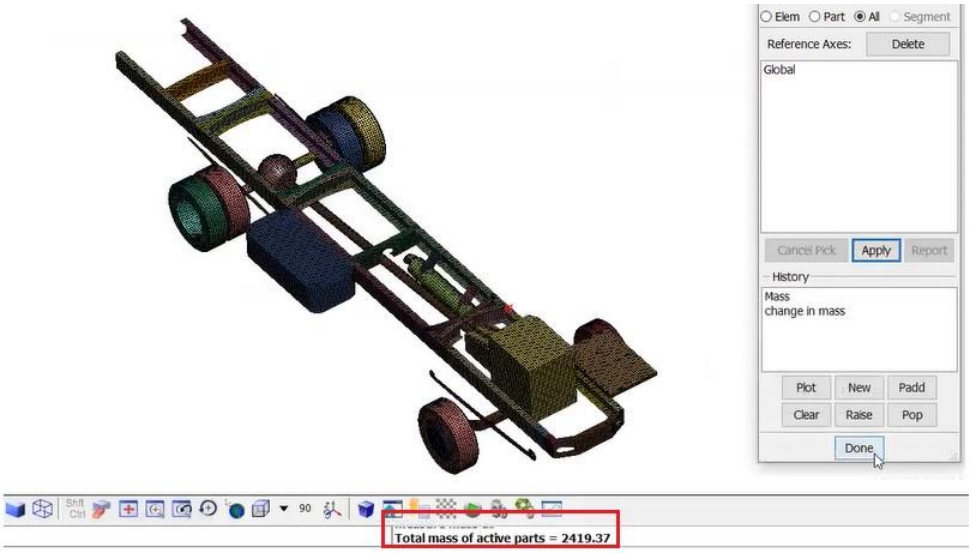
Parte	Espesor (mm)
Carrocería (estructura)	2
Chasis	7
Ballestas	80
Motor	40

Nota. En la tabla se especifica los espesores de cada parte del minibús.

En la Figura 36 se muestra la masa obtenida del conjunto chasis (2419.37 kg) mediante el software de simulación LS-DYNA. Esta se obtuvo de manera referencial mediante los datos especificados en el listado de homologación vehicular ANT.

Figura 36

Masa del chasis Volkswagen 9-150

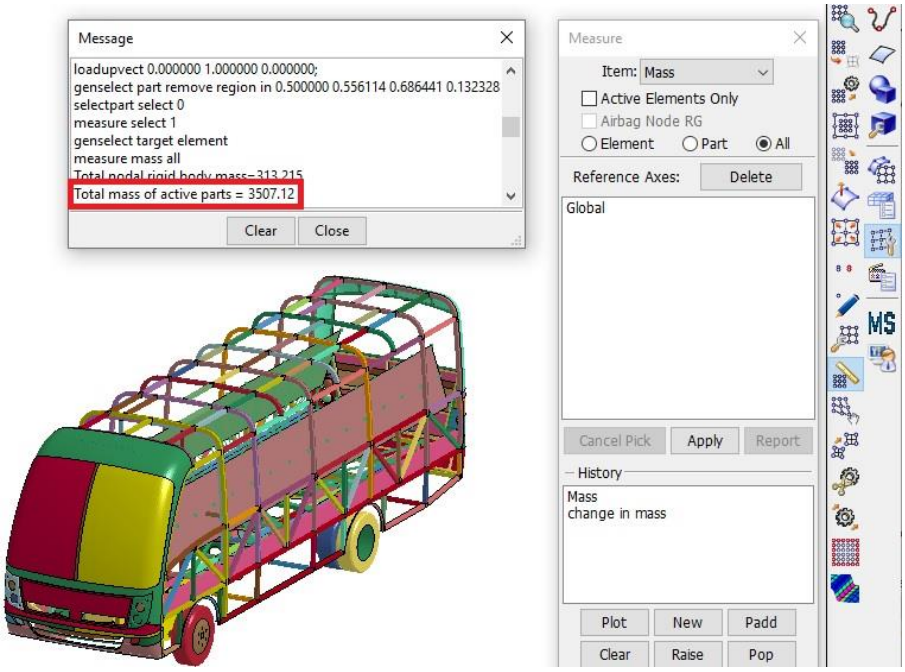


Nota. En la figura se muestra el resultado de la masa de todos los elementos que conforman el chasis.

En la Figura 37 se muestra la masa total del bus considerando el análisis de masa en el chasis, más la masa de la estructura de la carrocería, obteniendo así una masa total de 3507.12 kg.

Figura 37

Masa total del bus



Nota. En la figura se muestra el resultado de la masa de todos los elementos que conforman el minibús.

Preproceso del análisis dinámico

En el siguiente apartado se detallan los pasos del preproceso para el análisis dinámico, es decir se configuran los datos de masa total y velocidad de impacto de la barrera deformable móvil, así como su posicionamiento, con el fin de obtener resultados objetivos.

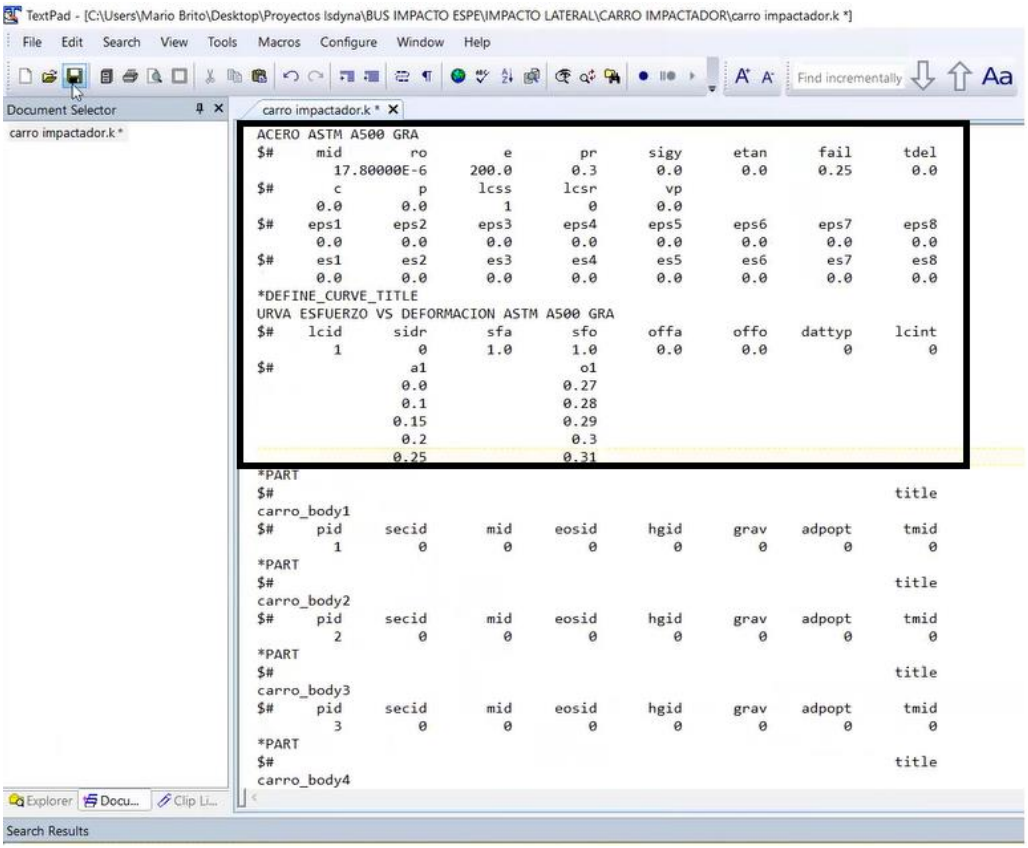
Barra deformable móvil de acuerdo la ECE R95

Mediante la el software LS-PrePost se asigna el material a toda la barrera deformable móvil. Para fines de estudio se consideró aplicar el mismo material ASTM A500 en la barrera deformable móvil, con el fin de observar resultados explícitos.

Por simplicidad tomamos el material ya definido previamente en el bus mediante el lector de texto WordPad y lo asignamos en el código de la BDM.

Figura 38

Asignación del material ASTM A500 en la BDM



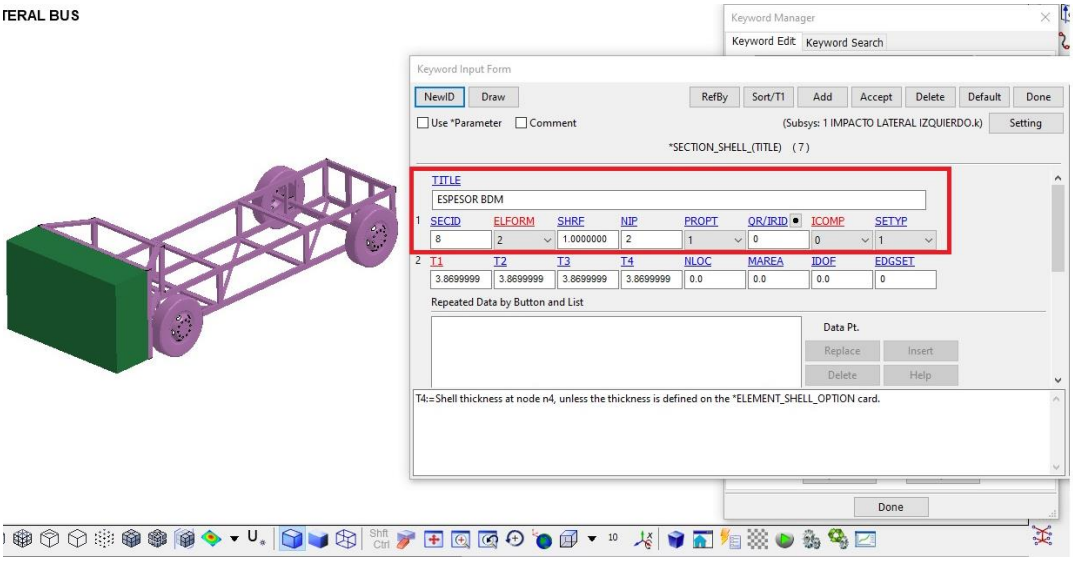
Nota. En la figura se muestra la interfaz para asignación de material para la BDM.

Distribución de peso en la BDM

El Reglamento 95 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas, estable que la masa total de la BDM debe ser de 950 ± 20 kg.

Figura 39

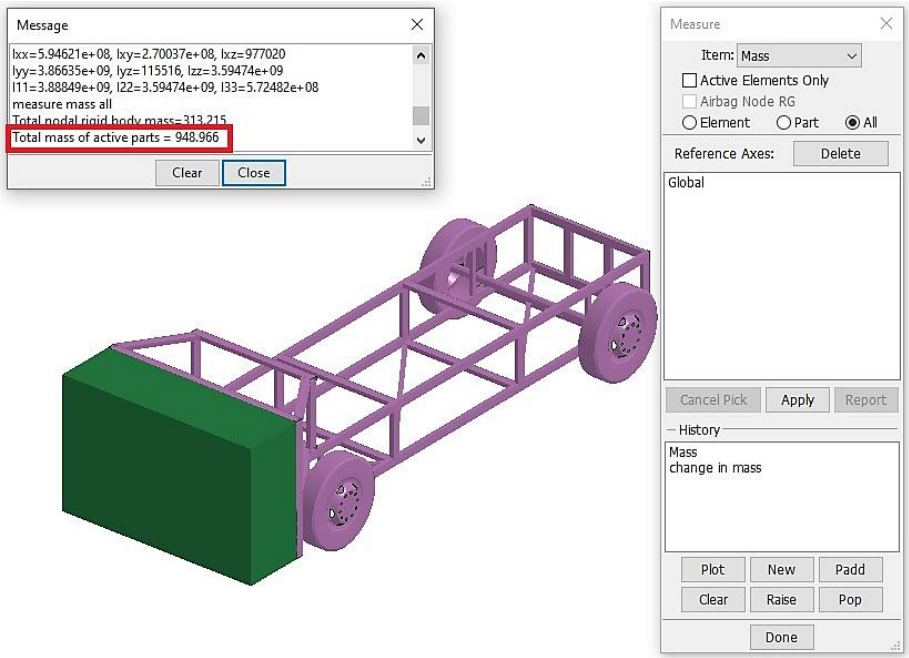
Espesor de los elementos tipo Shell



Nota. El gráfico representa la asignación de espesor para la BDM.

Figura 40

Masa total de la BDM según ECE R95



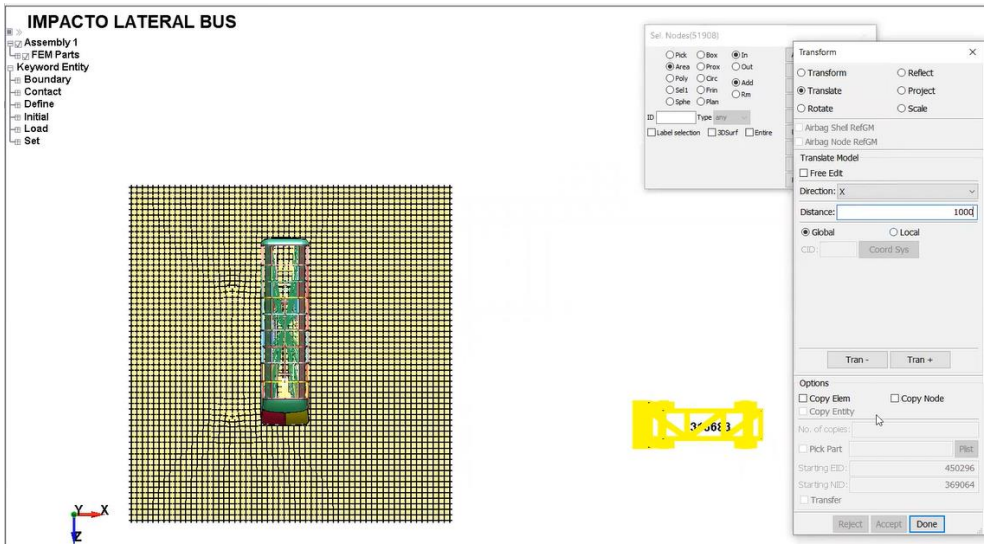
Nota. En la figura se muestra el resultado de la masa de todos los elementos que conforman la BDM.

Importación de la BDM

Se realiza la importación de la barrera deformable móvil hacia archivo de donde se encuentra configurado en el minibús escolar y se posiciona transversalmente hacia el centro del bus mediante la definición de coordenadas x,y,z.

Figura 41

Posicionamiento de la BDM

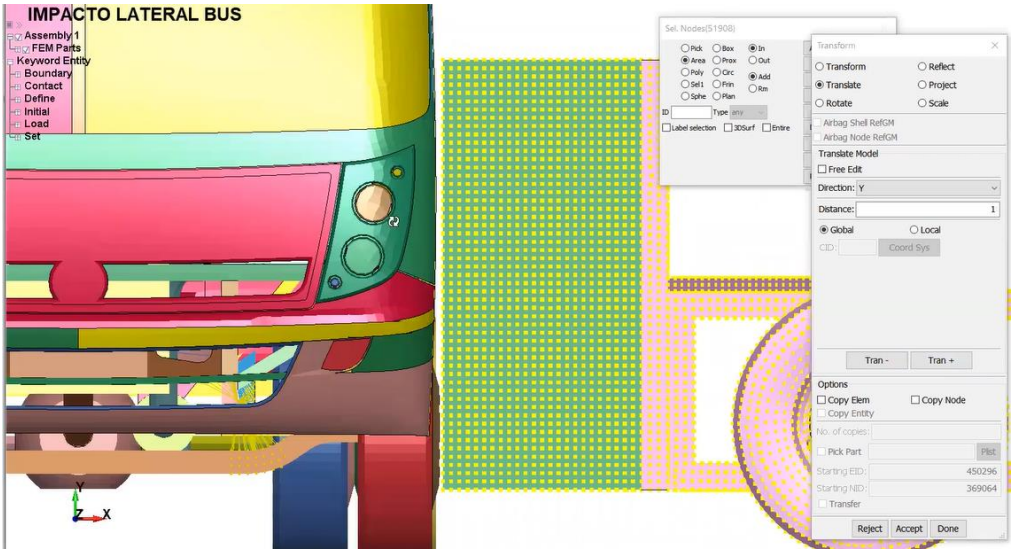


Nota. En la figura se muestra la posición inicial al importar la BDM.

Además, en la Figura 42 se muestra la posición de la BDM a una distancia muy cercana al bus para optimizar el proceso y evitar gasto computacional además de tiempo de simulación ya que al estar configurada la velocidad y masa total de la BDM no causará fallos durante la simulación.

Figura 42

Optimización de simulación mediante distancia

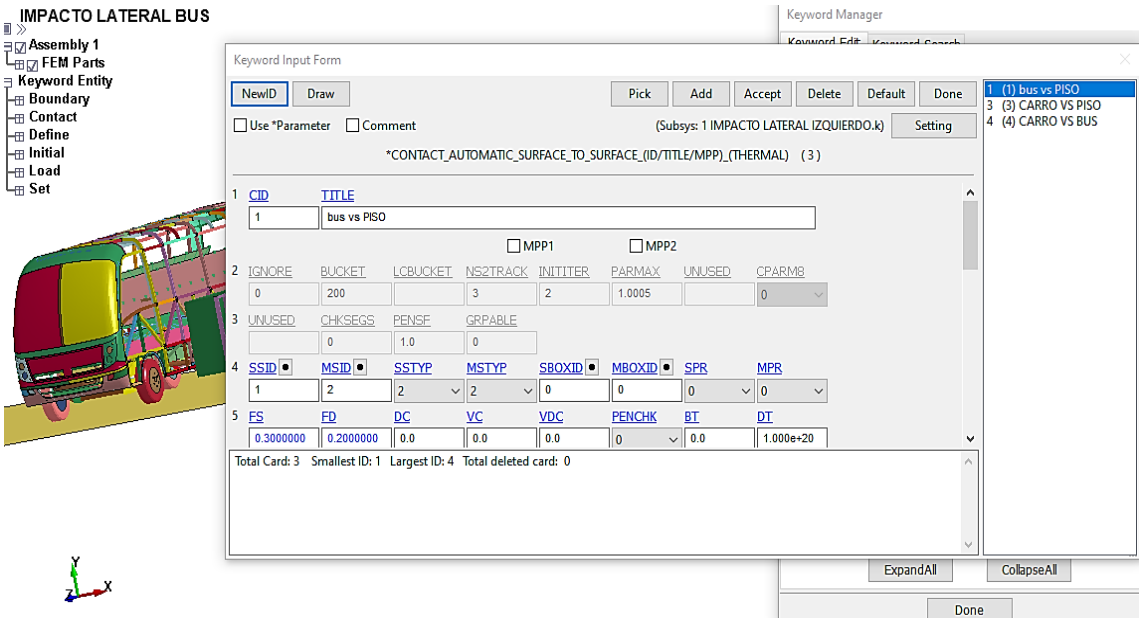


Nota. En la figura se muestra la ubicación inicial de impacto.

En la Figura 43 se establecen los contactos entre el Bus y la carretera (piso), para simular adherencia.

Figura 43

Contacto entre el bus y el suelo

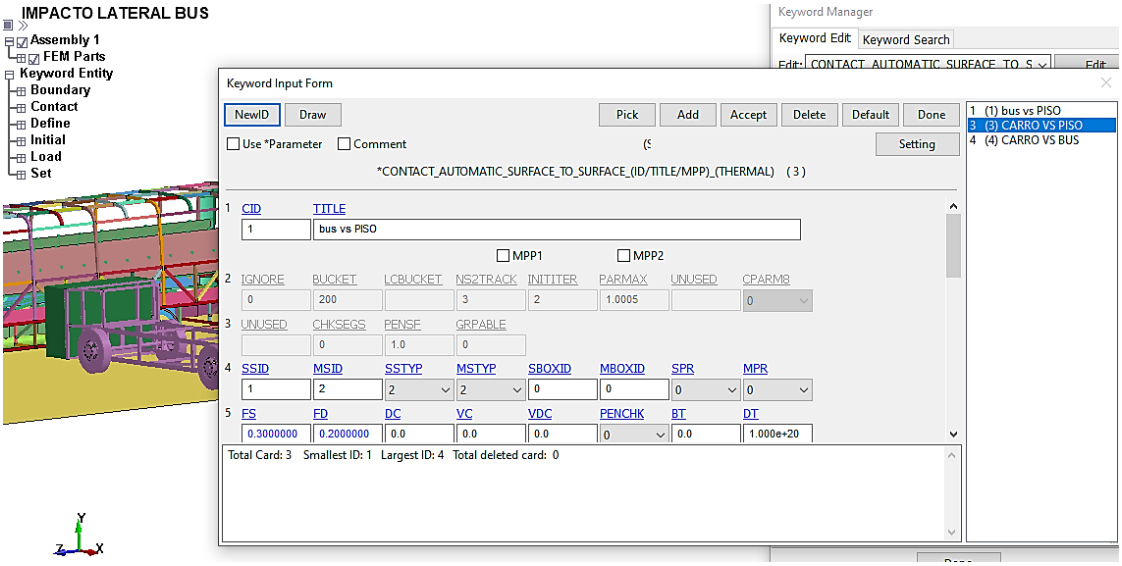


Nota. El gráfico representa la adherencia entre el bus y el suelo.

En la Figura 44 se observa el contacto entre la barrera deformable móvil y el piso.

Figura 44

Contacto entre BDM y el suelo

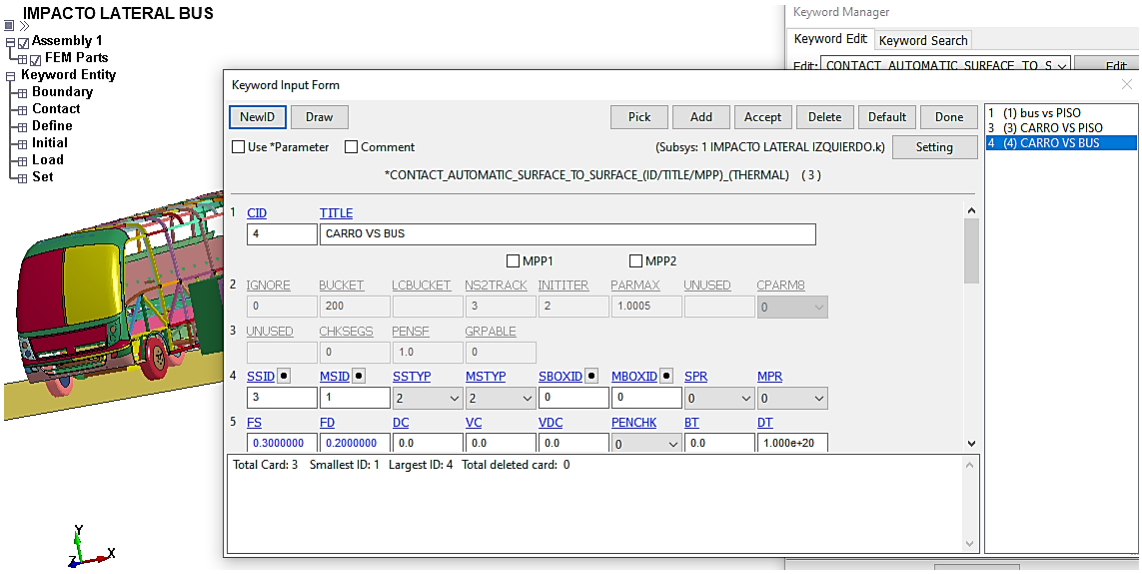


Nota. El gráfico representa la adherencia entre la BDM y el suelo.

En la Figura 45 se observa el contacto entre los objetos que van a ser impactados, es decir el bus y la barrera deformable móvil.

Figura 45

Contacto entre el bus y la BDM



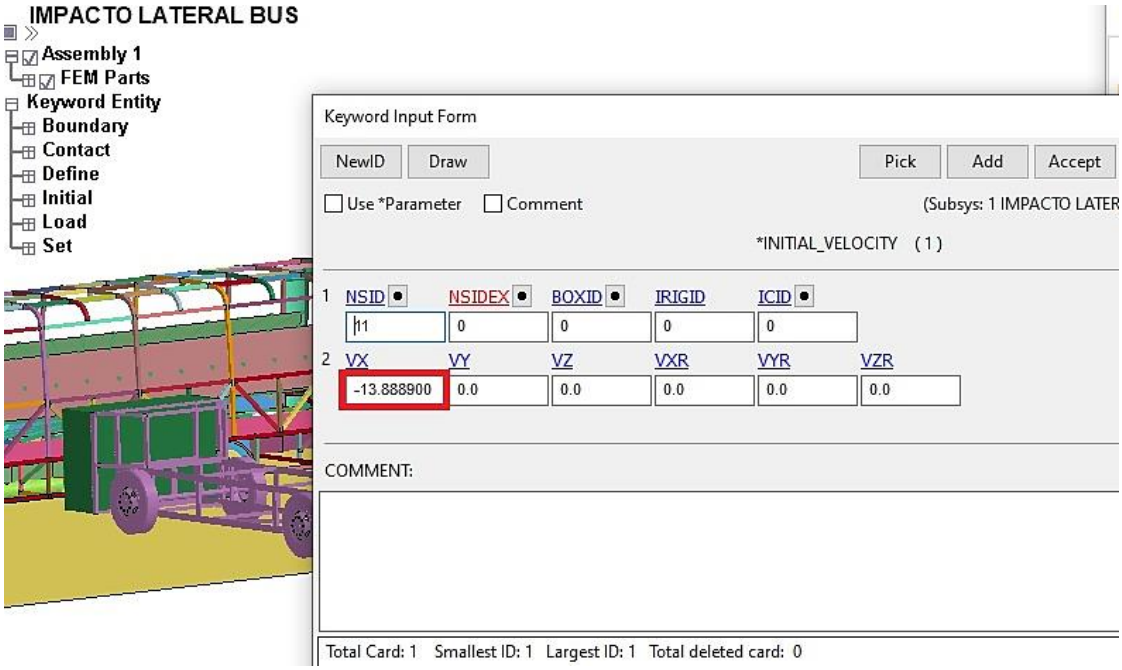
Nota. El gráfico representa la adherencia entre el bus y la BDM.

Velocidad de la BDM

El Reglamento 95 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas, establece que la velocidad para impacto lateral es 50 km/h lo que es equivalente a 13,8889 m/s, interpretable para el software. En la Figura 46 se muestra el menú de configuración de la velocidad.

Figura 46

Asignación de la velocidad



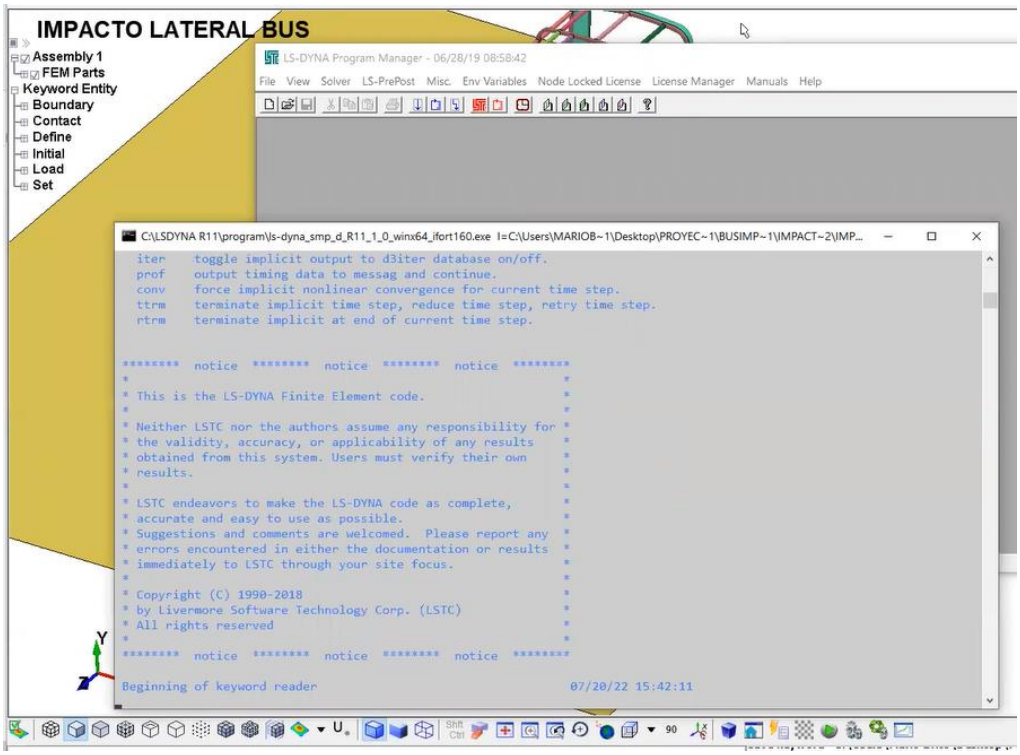
Nota. El gráfico representa la interfaz para la asignación de la velocidad del a BMD en m/s.

Finalmente, se guarda el archivo k de la carrocería configurado en LS-PrePost y posteriormente se abre el mismo desde el software LS-Dyna, una vez cargado el archivo se da inicio a la generación del código de simulación el cuál tardará en compilar todos los resultados de acuerdo a la capacidad de la PC y sus características.

En la figura 47 se muestra el código de generación de resultados, los cuáles se irán mostrando en la carpeta donde se encuentra guardado el archivo k de la carrocería.

Figura 47

Compilación del código de simulación



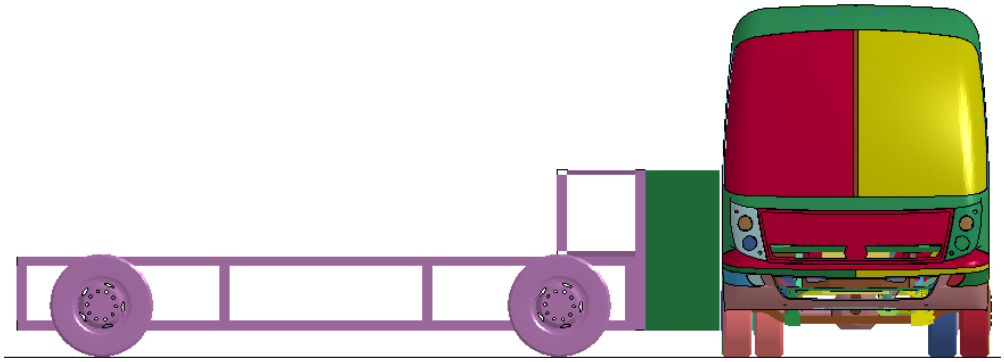
Nota. El gráfico representa la ejecución del código K.

De acuerdo a lo establecido en los objetivos del presente proyecto, se realiza el mismo procedimiento de ingeniería computacional para simular el impacto lateral derecho, se mantiene la configuración de cartas de control tanto de materiales y velocidad, el único cambio que se realiza es el posicionamiento de la barrera deformable móvil hacia el lado derecho mediante la variación de coordenadas en los ejes x,y,z.

En la Figura 48 se evidencia el posicionamiento de la BDM hacia el lado derecho para el impacto lateral.

Figura 48

Posicionamiento de la BDM hacia el lado derecho



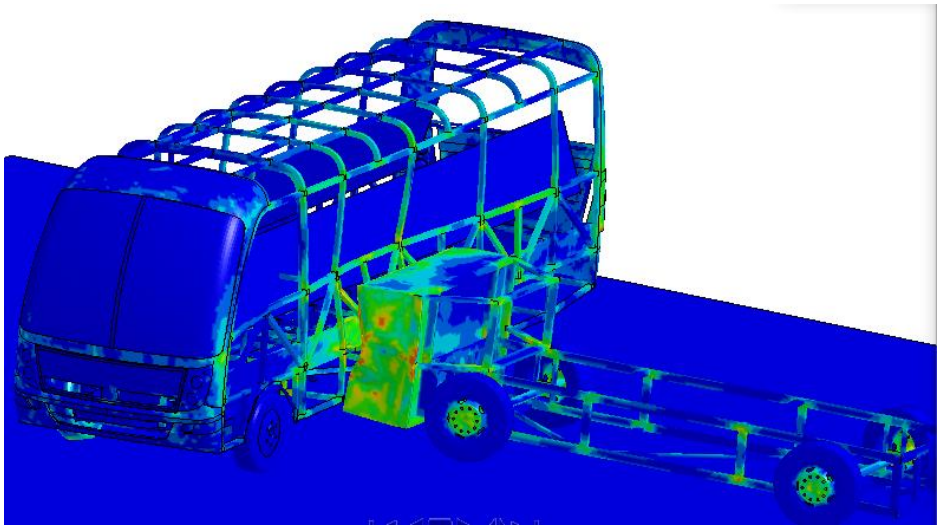
Nota. El gráfico representa el posicionamiento inicial para la simulación del impacto derecho.

Una vez obtenidos los resultados mediante el software LS-Dyna se ejecuta el archivo d3plot, mismo que contine los resultados del ensayo virtual y se puede evidenciar la animación de fotogramas de impacto.

La Figura 49 proporciona una visión general de la deformación de la carrocería durante impacto lateral izquierdo en un intervalo de tiempo de 150 ms.

Figura 49

Deformación de la carrocería durante impacto lateral izquierdo

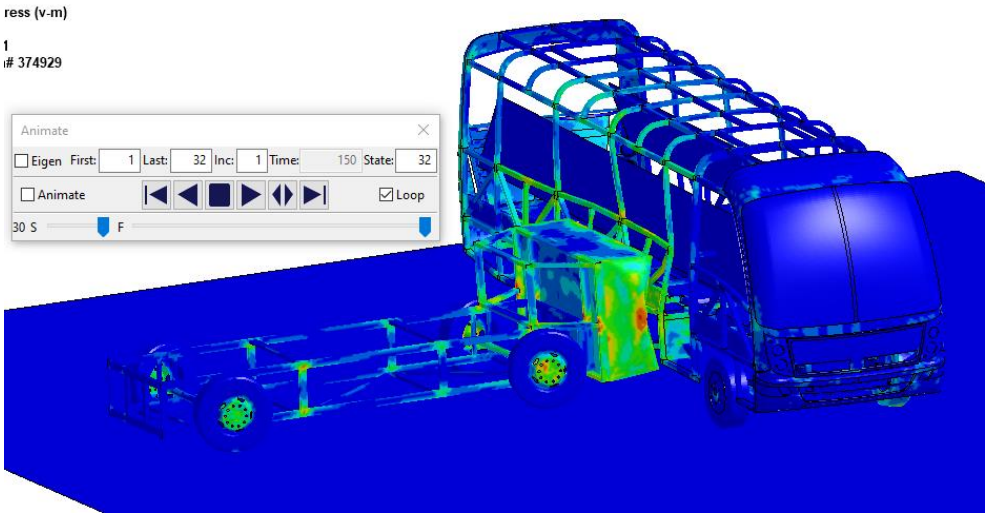


Nota. El gráfico muestra el resultado del impacto lateral izquierdo y su deformación.

En la Figura 51 observa el resultado final de simulación de impacto lateral derecho con una duración de 150 ms.

Figura 50

Deformación de la carrocería durante impacto lateral derecho



Nota. El gráfico muestra el resultado del impacto lateral derecho y su deformación.

Capítulo IV

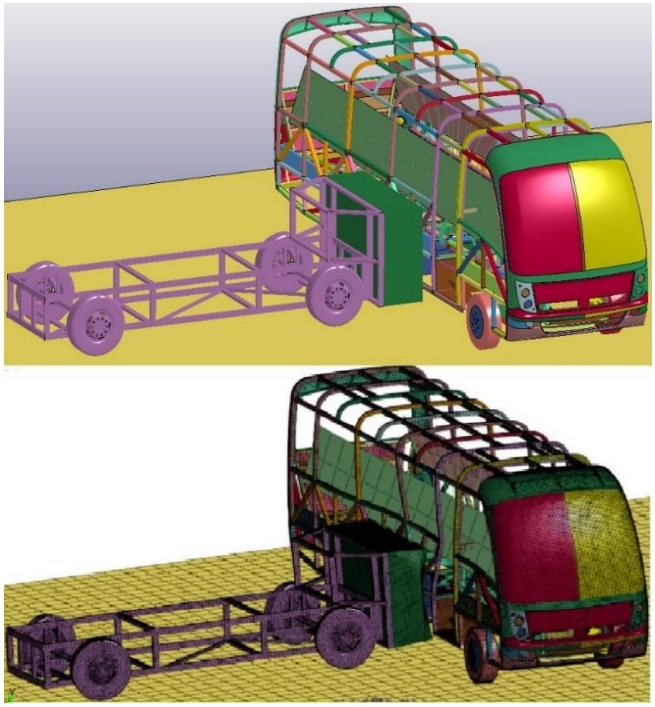
Análisis de Resultados

Resultados obtenidos del ensayo virtual

En el presente capítulo se realiza el post-procesamiento de simulación de la carrocería, el cual consiste en analizar los resultados obtenidos durante el proceso de simulación MEF, considerando los valores de esfuerzos, deformaciones a partir del desplazamiento direccional en los ejes correspondientes y energías producidas durante los ensayos virtuales de acuerdo al Acero ASTM A500 y la geometría referencial de la carrocería del minibús Volkswagen 9-150. Estos resultados son interpretados con el objetivo de determinar la seguridad de los ocupantes durante impactos laterales derecho e izquierdo respectivamente, de acuerdo a la incidencia que se presenta en la zona de supervivencia.

Figura 51

Carrocería antes y después del impacto lateral derecho



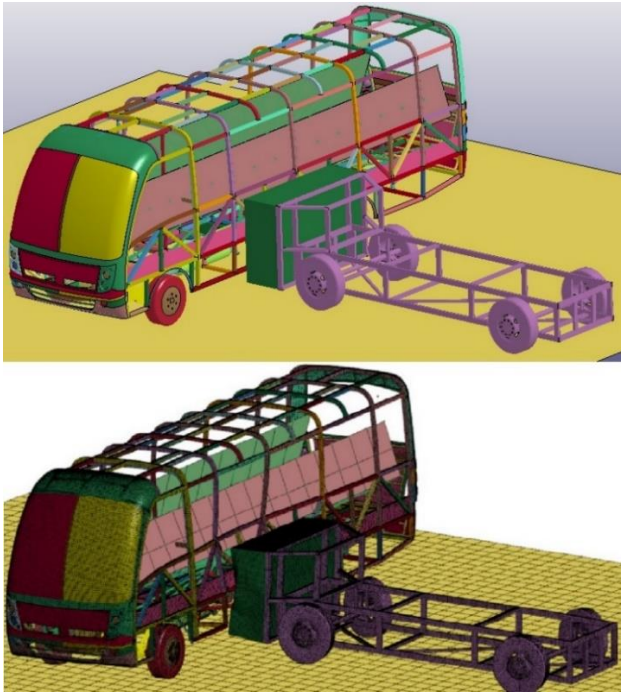
Nota. El gráfico se muestra la condición inicial y final del ensayo visual en el panel derecho.

En base a la Ley de conservación de la energía, se analiza la energía producida durante el impacto y la transformación de la misma en energía de deformación (energía

interna). De este modo también en la Figura 51 y 52 se pueden observar los resultados en cuanto a la Ley de conservación de la materia (Carrocería deformada) y la disposición correspondiente a impacto lateral derecho e izquierdo respectivamente.

Figura 52

Carrocería antes y después del impacto lateral izquierdo



Nota. El gráfico se muestra la condición inicial y final del ensayo visual en el panel derecho.

De acuerdo al sistema de unidades que trabaja el software LS-PrePost (masa [kg], longitud [mm] y tiempo [ms]), se aclara la equivalencia de unidades de acuerdo a la energía cinética ya que la misma se mide en Julios [J], masa en [kg] y la velocidad en [m/s]. En los apartados anteriores se especifican los resultados de energía en unidades de kN-mm, así que cabe mencionar que 1 kN-mm es equivalente a 1 Joule.

Absorción de Energía de los Armazones Laterales del Minibús

En este apartado se desarrolla el cálculo de la energía cinética que se pierde en los impactos laterales del minibús a partir de la ley de conservación de la energía, esta energía aborda conceptos físicos como trabajo, fuerza y energía ya que se produce cuando un objeto está en movimiento y al impactar con otro se muevan produciendo así un trabajo,

además la fuerza puede ser considerada como la posibilidad que tiene un cuerpo de producir deformación a otro.

La energía cinética perdida durante el impacto es la misma para los dos paneles laterales ya que para su cálculo no varían datos como la masa total del minibús y la velocidad de la barra deformable móvil de acuerdo a la ECE R95.

Se calcula la energía cinética antes del impacto lateral mediante la fórmula general de energía cinética antes del impacto:

Ecuación 1

Energía Cinética

$$E_{c_1} = \frac{1}{2} m_1 v_1^2$$

Donde:

E_{c_1}: Energía cinética antes del impacto [J]

m_1: Masa de la BDM [kg]

v_1: Velocidad de inicial de la BDM [m/s]

- Masa de la barra deformable móvil

$$m_1 = 948.966\ kg$$

Velocidad de inicial de la barra deformable móvil

$$v_1 = 13.8889\ m/s$$

Energía cinética antes del impacto

$$E_{c_1} = \frac{1}{2}\ (948.966\ kg)(13.8889\ m/s)^2$$

$$E_{c_1} = 91528.503\ J$$

A continuación, se calcula la energía cinética después del impacto:

$$E_{c_2} = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)v_2^2$$

Donde:

E_{c_2}: Energía cinética después del impacto [J]

m_2: Masa del minibús [kg]

v_2: Velocidad de final de la BDM [m/s]

Ecuación 2

Velocidad final de impacto

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

- Velocidad final de impacto:

$$v_2 = \frac{948.966\ kg}{948.966\ kg + 3507.12\ kg} * 13.8889\ m/s$$

$$v_2 = 2.958\ m/s$$

- Energía cinética después del impacto:

$$E_{c_2} = \frac{1}{2}\ (948.966\ kg +\ 3507.12\ kg)(2.958\ m/s)^2$$

$$E_{c_2} = 19494.850\ J$$

A continuación, mediante la diferencia de la E_{c_1} y E_{c_2} se realiza el cálculo de la energía cinética perdida en el impacto lateral:

$$E_{c_1} - E_{c_2} =\ 91528.503\ J -\ 19494.850\ J$$

$$E_{c_1} - E_{c_2} = 72033.653\ J$$

$$E_{c_1} - E_{c_2} = 7.203x10^4\ J$$

Finalmente se obtiene la fracción de energía cinética perdida en el impacto lateral:

$$\frac{E_{c_1} - E_{c_2}}{E_{c_1}} = \frac{91528.503\,J - 19494.850\,J}{91528.503\,J} * 100$$

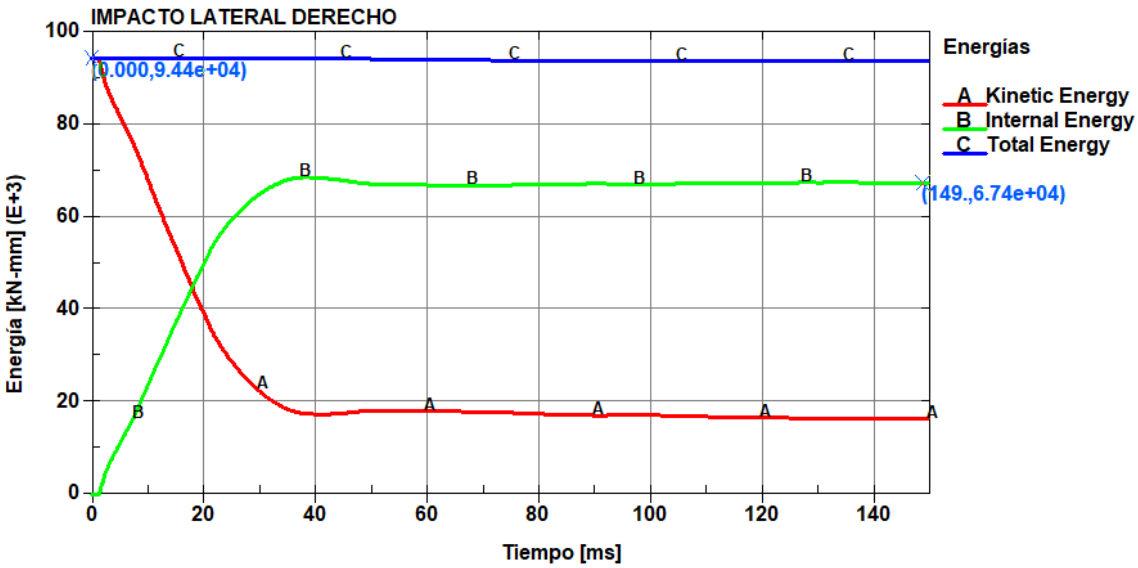
$$\frac{E_{c_1} - E_{c_2}}{E_{c_1}} = \ 79\ \%$$

Energías impacto lateral derecho

En el estudio virtual de impacto lateral derecho de la carrocería la energía total permanece constante durante todo el ensayo, mientras que la energía cinética generada antes del impacto tiene un valor de 9.44x10^4 [J] está energía se disipa en un 71 % con un valor de 6.74x10^4 [J] por la deformación de la carrocería después de haberse producido el impacto. En la figura 53 se observa la variación de la energía generada durante la simulación de impacto lateral derecho en la carrocería.

Figura 53

Variación de energía durante impacto lateral derecho



Nota. El gráfico representa el balance de energías del impacto lateral derecho.

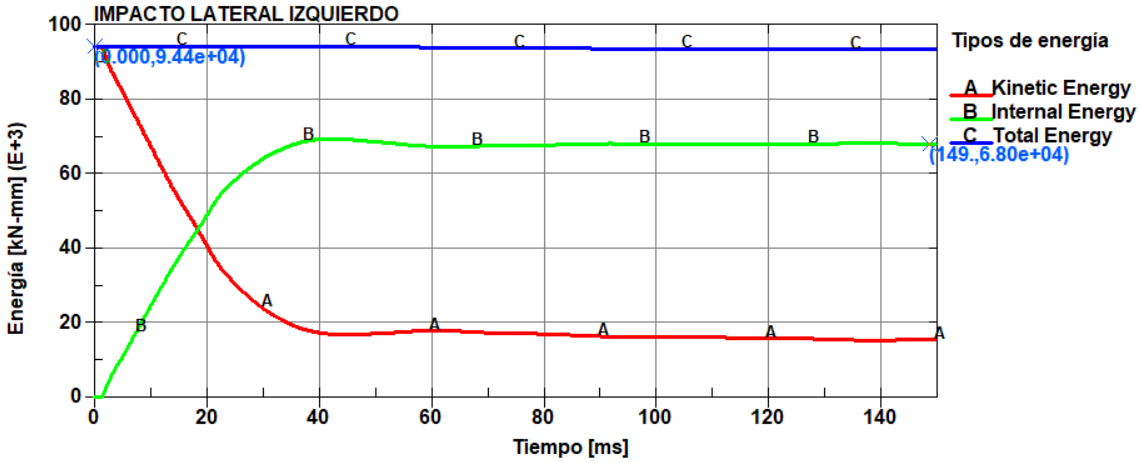
Energías impacto lateral izquierdo

En el estudio virtual de impacto lateral izquierdo de la carrocería la energía total permanece constante durante todo el ensayo, mientras que la energía cinética generada

antes del impacto tiene un valor de 9.44x10^4 [J] está energía se disipa en un 72 % con un valor de 6.80x10^4 [J] por la deformación de la carrocería después de haberse producido el impacto. En la figura 54 se observa la variación de la energía generada durante la simulación de impacto lateral izquierdo en la carrocería.

Figura 54

Variación de energía durante impacto lateral izquierdo



Nota. El gráfico representa el balance de energías del impacto lateral derecho.

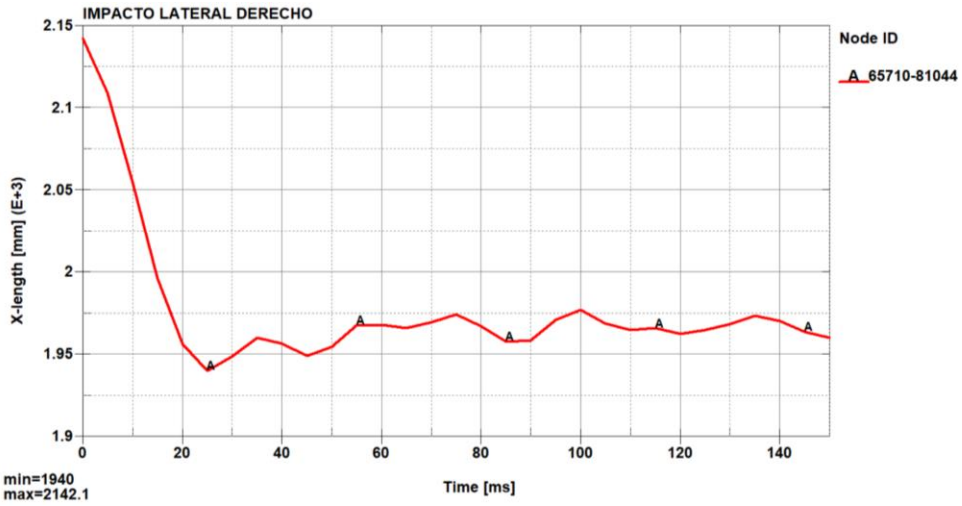
Impacto Lateral Derecho

Deformación Estructural e invasión de la zona de supervivencia

Terminada la simulación virtual de impacto lateral derecho de la carrocería del minibús, este experimenta una deformación estructura, se puede observar en la Figura 55 la gráfica de Deformación vs Tiempo en la cual se aprecia como el habitáculo se va deformando durante el ensayo, este valor se obtiene haciendo uso de la ecuación 3.

Figura 55

Deformación vs Tiempo



Nota. El gráfico representa el diagrama de deformación vs tiempo del impacto lateral derecho en un intervalo de tiempo de 0 a 150 ms.

Ecuación 3

Cálculo de la deformación del minibús

$$\Delta L = l_0 - l_f$$

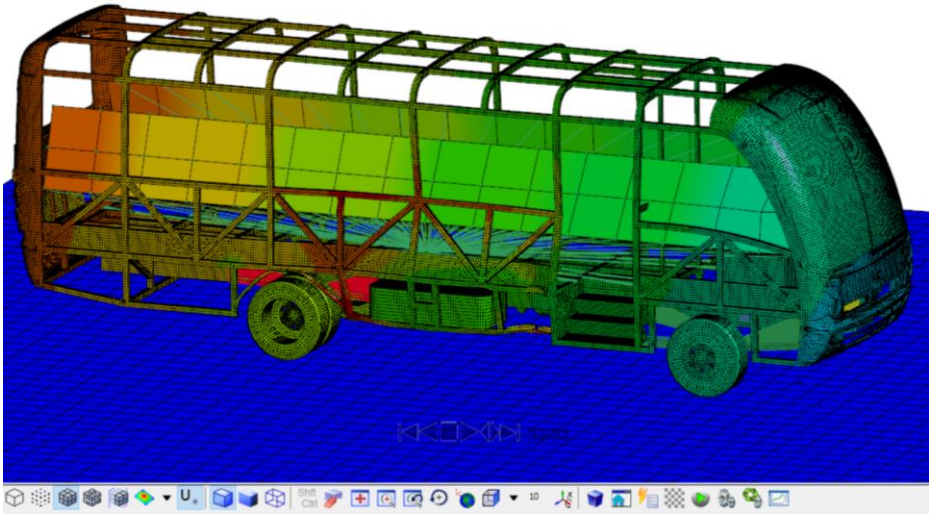
$$\Delta L = 2142.1\ [mm] - 1940\ [mm]$$

$$\Delta L = 202.1\ [mm]$$

La deformación que tiene la estructura cuando el BDM impacto al minibús es de 202.1 [mm], según el Reglamento 66 la zona de seguridad debe tener un espacio de 400 [mm] antes de ser invadida por los perfiles, con lo calculado en la ecuación 3, los perfiles no invaden la zona de seguridad, llegan a deformarse hasta 202.1 [mm].

Figura 56

Deformación de la estructura del lateral derecho



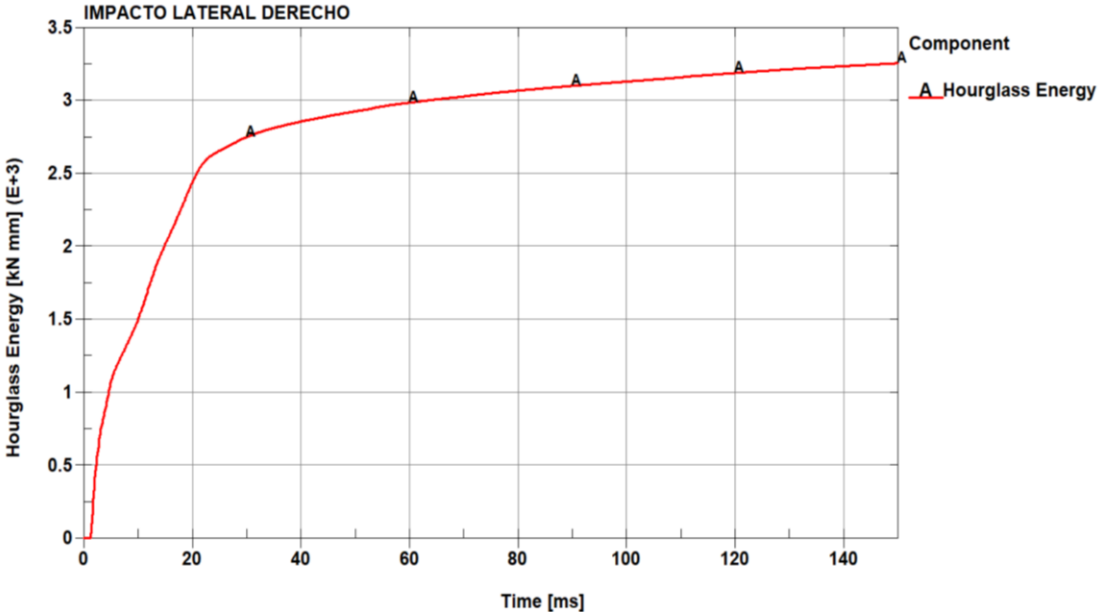
Nota. El gráfico representa la deformación de los perfiles de minibús, las zonas de color rojo son las que llegan a tener una deformación de 202.1 [mm].

Validación del estudio virtual

En el impacto lateral derecho del vehículo escolar Volkswagen 9-150 de las fuerzas armadas ESPE, es importante determinar si los efectos de Hourglass han degradado significativamente los resultados al realizar el análisis. La energía de Hourglass no debería superar el 10% de la energía interna total. En las figuras 57 y 58 se muestran los diagramas de la energía de Hourglass y de la energía de Interna por deformación producidos durante el impacto.

Figura 57

Diagrama de energía de Hourglass del impacto en el lado derecho

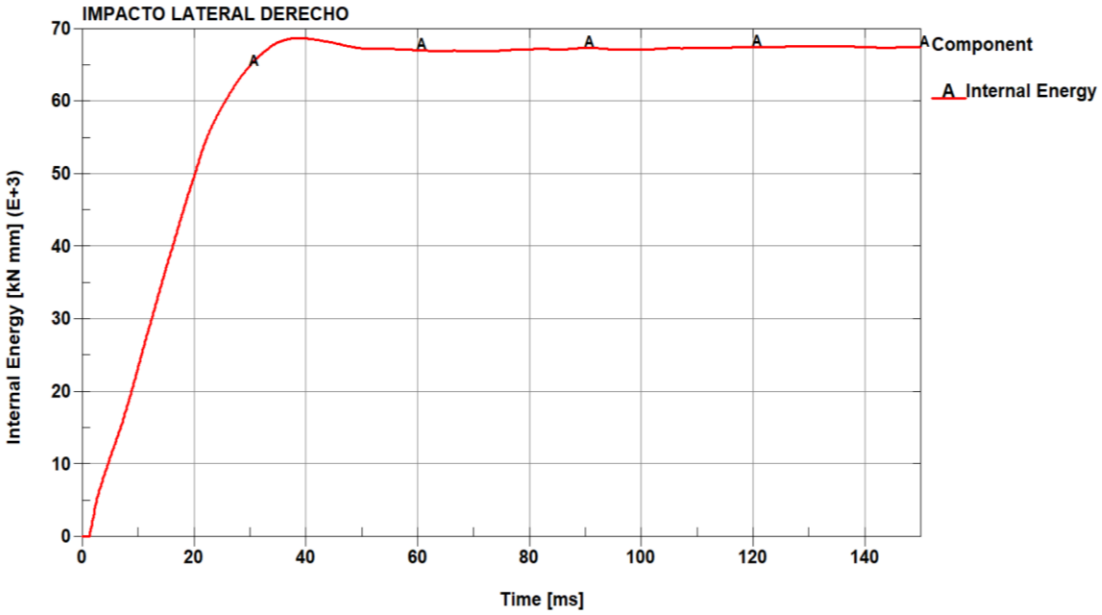


Nota. El gráfico representa la variación de energía de Hourglass existente en el impacto.

Acorde al diagrama de la figura 57, el valor de la Energía de Hourglass que se produce durante el impacto es de $3.25x10^3$*kN-mm.*

Figura 58

Diagrama de energía de Interna del impacto en el lado derecho



Nota. El gráfico representa la variación de energía de Interna existente en el impacto.

Del diagrama de la figura 58, el valor de la energía interna producida durante el impacto en el lado izquierdo del bus es de $6.74x10^4$*kN-mm.*

Con los resultados de la energía interna y energía de Hourglass, realizamos el cálculo de la relación entre las mismas, de la siguiente manera:

Ecuación 4

Relación de energías

$$H = \frac{E.Hourglass}{E.Interna} * 100\%$$

$$H = \frac{3.25x10^3}{6.74x10^4} * 100\%$$

$$H = 4.8\ \%$$

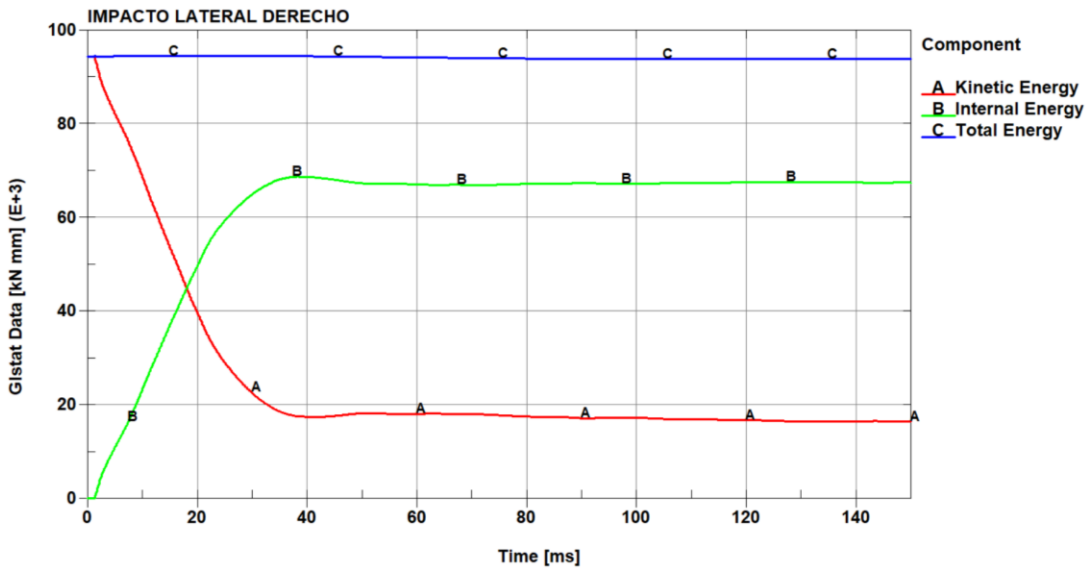
$$H < 10\%$$

Aplicando la relación tenemos como resultado 0.48% de energía de Hourglass, está en menos del 10%, consideramos valido al estudio estructural, los resultados obtenidos bajo condiciones y las características establecidas en los ensayos son aceptables.

La energía total producida en el estudio estructural permanece constante, lo que indica que la energía total producida en el impacto antes y después del impacto se disipa a través del fenómeno de la energía de deformación (energía interna). Se muestra en la figura 59 como es el comportamiento de la Energía total producida en la carrocería durante la simulación del impacto lateral derecho en la estructura del minibús.

Figura 59

El balance de energía generado durante el impacto lateral derecho



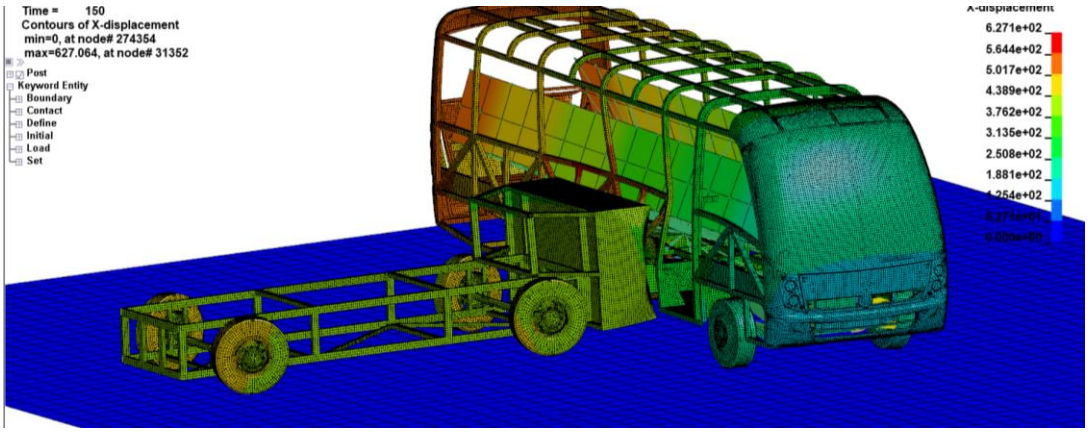
Nota. El gráfico representa la variación de energías interna, cinética y total que se generan en el impacto lateral derecho.

Deformación direccional de la carrocería

La estructura de la carrocería del vehículo escolar Volkswagen 9-150 de las fuerzas armadas ESPE, después de la haber recibido un impacto lateral izquierdo tiene una tiene una deformación la cual se muestra en la figura 60, se puede ver que la desviación del eje X (la dirección del impacto) tiene un valor máximo de 627 mm.

Figura 60

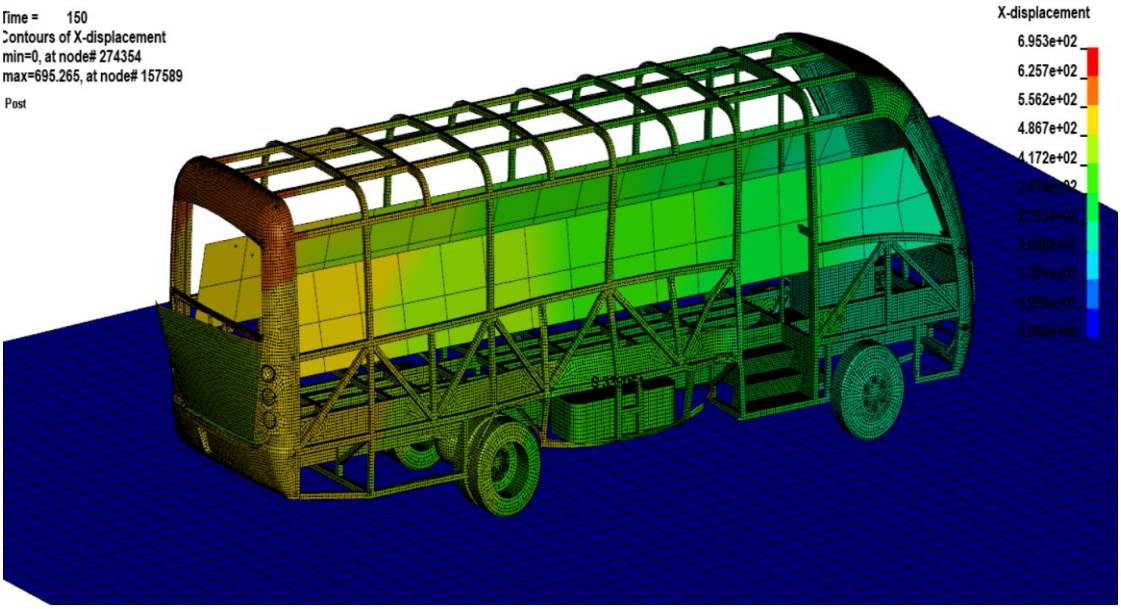
Impacto para obtener deformación direccional de la estructura en el eje X



Nota. El gráfico muestra la simulación virtual de la deformación direccional en el eje X.

Figura 61

Deformación direccional de la estructura en el eje X



Nota. El gráfico muestra los resultados de deformación en el eje X sin la BDM.

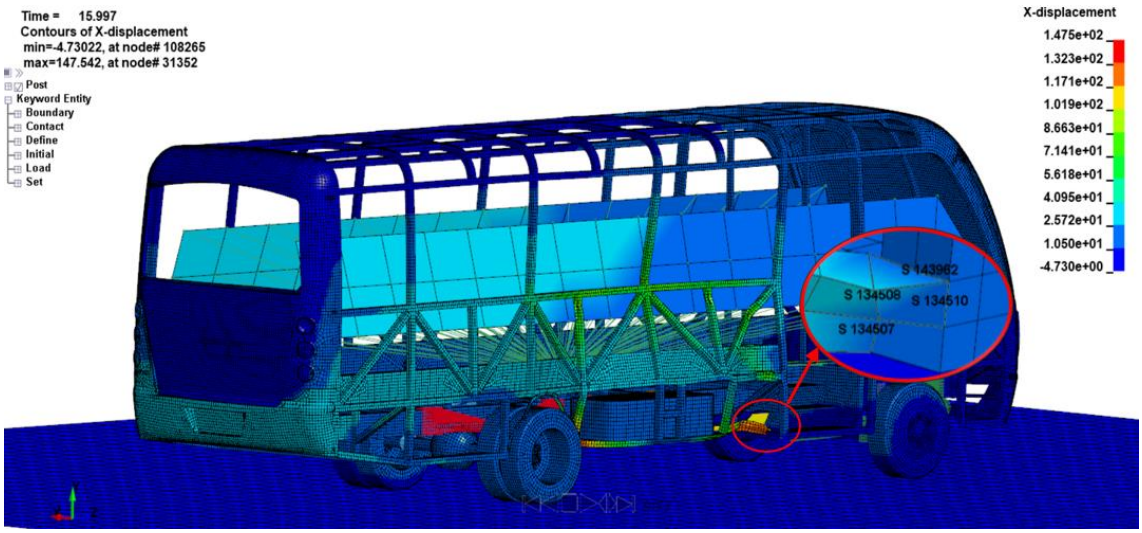
Análisis de los elementos críticos

Para estudiar el comportamiento de la estructura de la carrocería ante la deformación direccional en el eje x, se selecciona cuatro elementos finitos de la región crítica para observar su comportamiento bajo esfuerzo de Von Mises y desplazamiento.

Los elementos discretos seleccionados en esta zona critica por deformación son: 134507, 134508, 134510, 143962. Se observa en la Figura 62 los elementos a ser seleccionados para realizar el análisis:

Figura 62

Elementos seleccionados para obtención de resultados



Nota. El gráfico muestra la selección de elementos críticos para el análisis de resultados.

Se observa en la figura 63 que en el intervalo de tiempo de 0 a 20 ms después de iniciado el impacto, los cuatros elementos seleccionados se comportan de manera parecida, en los elementos 134507, 134508, 134510 y 143962 los valores de los esfuerzos son 0.277 GPa, 0.272 GPa, 0.272 GPa y 0.268 GPa respectivamente, en estos puntos existe ruptura de material, se puede observar que estan próximos a llegar a su resistencia ultima a la tracción de 0.31 GPa, debido a la resolución de los resultados que estan dados cada 5 ms se presenta la ruptura antes de llegar 0.31 GPa, también el impacto afecta a la compuerta posterior debido a la deformación de la estructura provocada por el impacto, además se puede observar que los elementos no experimentan oscilaciones después de la zona proporcional, debido a que el material se rompe y las fuerzas internas se equilibran sin alterar a ningún elemento.

Tabla 14

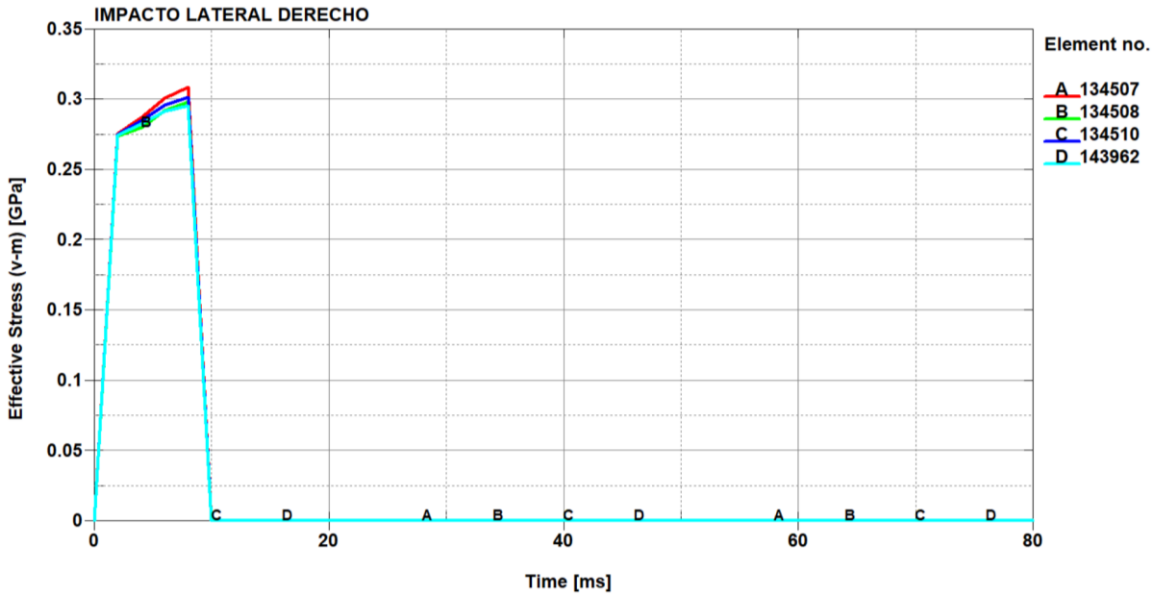
Elementos seleccionados y resultado de esfuerzo efectivo de Von Mises

Elemento	Esfuerzo efectivo de Von Mises
134507	0.308 GPa
134508	0.298 GPa
134510	0.301 GPa
143962	0.296 GPa

Nota. En la tabla se muestra los esfuerzos de Von Mises de los elementos críticos.

Figura 63

Diagrama del esfuerzo efectivo de Von Mises

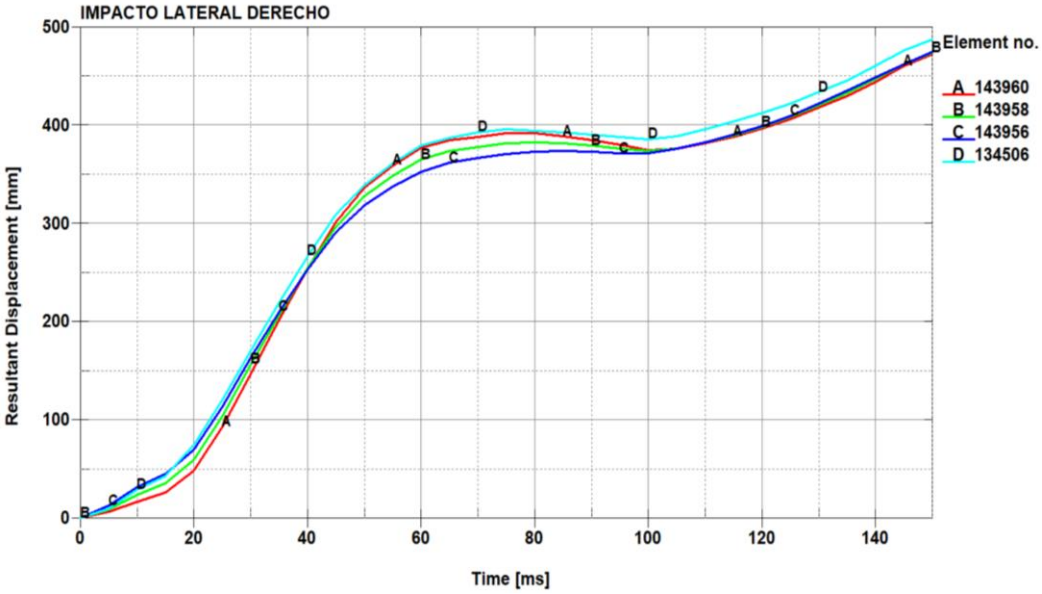


Nota. El gráfico muestra que existe una ruptura de material en el intervalo de tiempo de 0 a 20 ms.

La Figura 64 como es el comportamiento de los elementos seleccionados con respecto al desplazamiento resultante en el eje x en el tiempo

Figura 64

Diagrama del desplazamiento resultante en el impacto lateral derecho



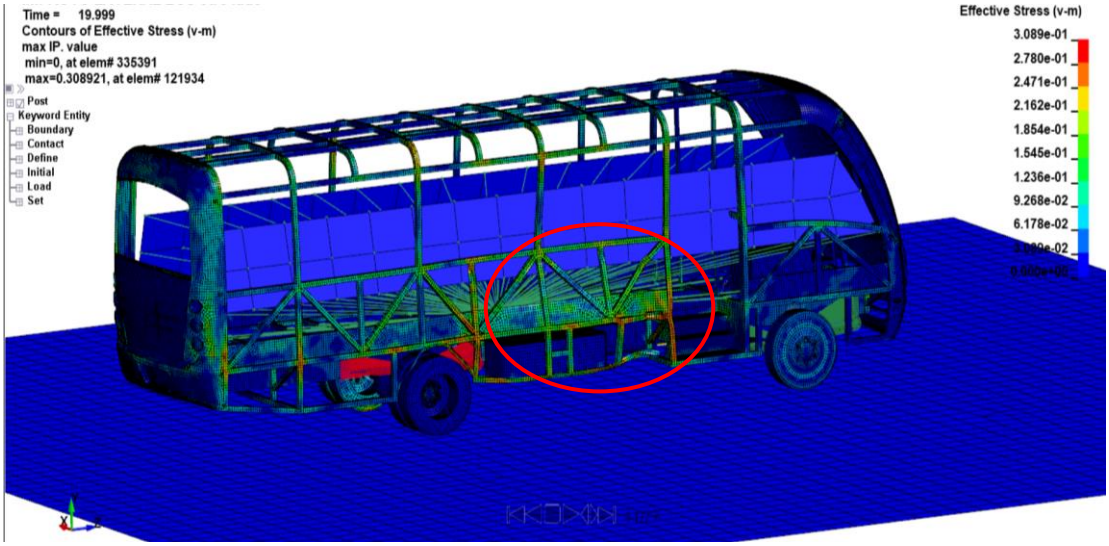
Nota. El gráfico representa los desplazamientos de los elementos críticos en el impacto lateral derecho.

Esfuerzo Efectivo de Von Mises

En la simulación del impacto lateral derecho en la estructura se suscita un esfuerzo máximo de Von Mises en el elemento 121934. En la Figura 65 se observa la concentración del esfuerzo en la parte lateral derecha del vehículo escolar Volkswagen 9-150 de las fuerzas armadas ESPE como consecuencia del impacto.

Figura 65

Distribución del esfuerzo de Von Mises en la estructura



Nota. El gráfico muestra la zona donde existe el mayor esfuerzo de Von Mises en la estructura.

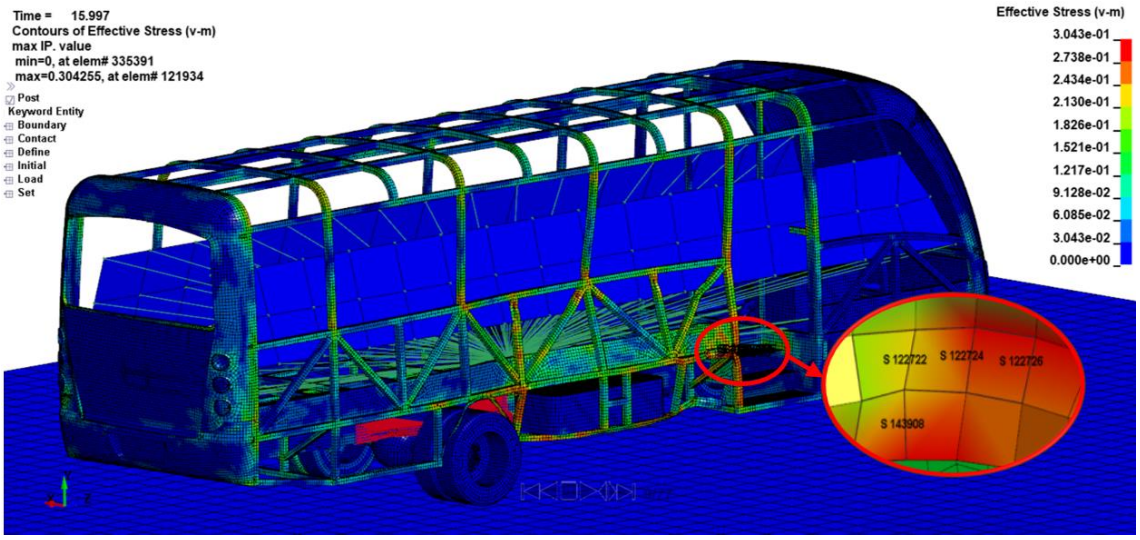
Análisis de elementos críticos

Para analizar el comportamiento de la estructura del vehículo escolar Volkswagen 9-150 de las fuerzas armadas ESPE con respecto al esfuerzo Von Mises, se escoge cuatros elementos finitos con la finalidad de determinar su comportamiento en la zona critica.

En la Figura 66 se observa los elementos que va a hacer analizados. Los elementos discretos seleccionados son de la zona critica por deformación y son: 122724,122722,122726 y 143908.

Figura 66

Elementos seleccionados para la obtención de resultados por esfuerzo de Von Mises



Nota. El gráfico muestra la selección de elementos críticos para el análisis de resultados.

En la Figura 67 se observa que en el intervalo de 20 ms después de haber iniciado el impacto, el comportamiento de los cuatro elementos seleccionados es similar; en el intervalo de 20 a 150 ms los valores de los esfuerzos, el valor del elemento 122724 alcanza un esfuerzo de 0.308 GPa, el esfuerzo es cercano a la resistencia ultima del material (0.31 GPa), en este elemento existe una ruptura de material, por lo que en el intervalo de 20 a 150 ms no presenta ningún tipo de oscilaciones después de la zona proporcional.

Además, los elementos 122726 y 143908 presenta oscilaciones en el intervalo de 20 a 150 ms, debido a variación de las fuerzas internas que se producen en cada elemento en el transcurso del tiempo que se produce del impacto, los valores de esfuerzo que alcanzan estos elementos es de 0.292 y 0.290 GPa respectivamente, este esfuerzo no es mayor al de la resistencia ultima del material Acero estructural ASTM A500 y no existe fallo en el material, por último el elemento 122722 en el mismo intervalo de tiempo presenta oscilaciones y varia su esfuerzo, siendo 0.301 GPa el esfuerzo más alto que alcanzo y 0.05 GPa con el que termino después de haberse producido el impacto lateral en el lado derecho.

Tabla 15

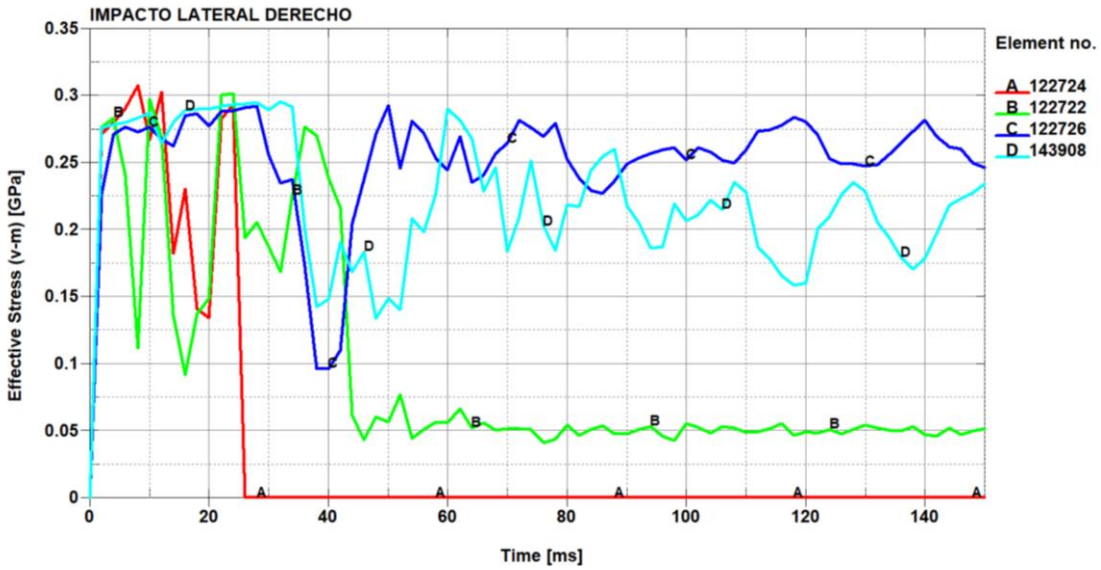
Elementos seleccionados y resultado de esfuerzo efectivo de Von Mises

Elemento	Esfuerzo efectivo de Von Mises
122724	0.308 GPa
122722	0.301 GPa
122726	0.292 GPa
143908	0.290 GPa

Nota. En la tabla se muestra los esfuerzos de Von Mises de los elementos críticos

Figura 67

Diagrama del esfuerzo efectivo de Von Mises de los elementos seleccionados



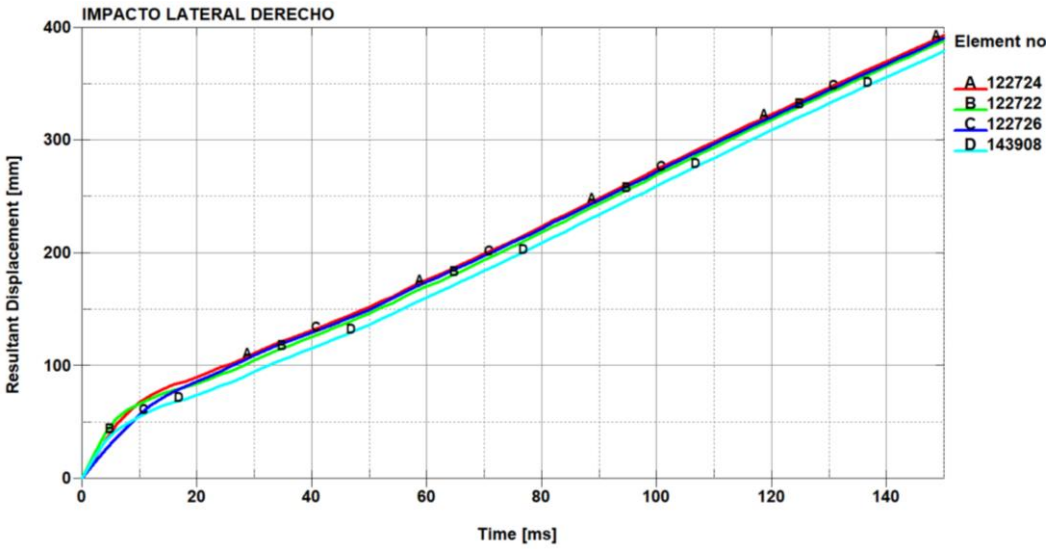
Nota. El gráfico muestra el comportamiento del esfuerzo de Von Mises en los elementos seleccionados para el análisis durante el impacto.

En la figura 68 se muestra el comportamiento del desplazamiento resultante en el tiempo de los elementos seleccionados, se desplazan proporcionalmente de acuerdo al

tiempo, el desplazamiento máximo alcanzado es de 390 mm en el intervalo de tiempo de 0 a 150 ms.

Figura 68

Diagrama del desplazamiento resultante en los elementos seleccionados



Nota. El gráfico representa los desplazamientos de los elementos críticos en el impacto lateral derecho.

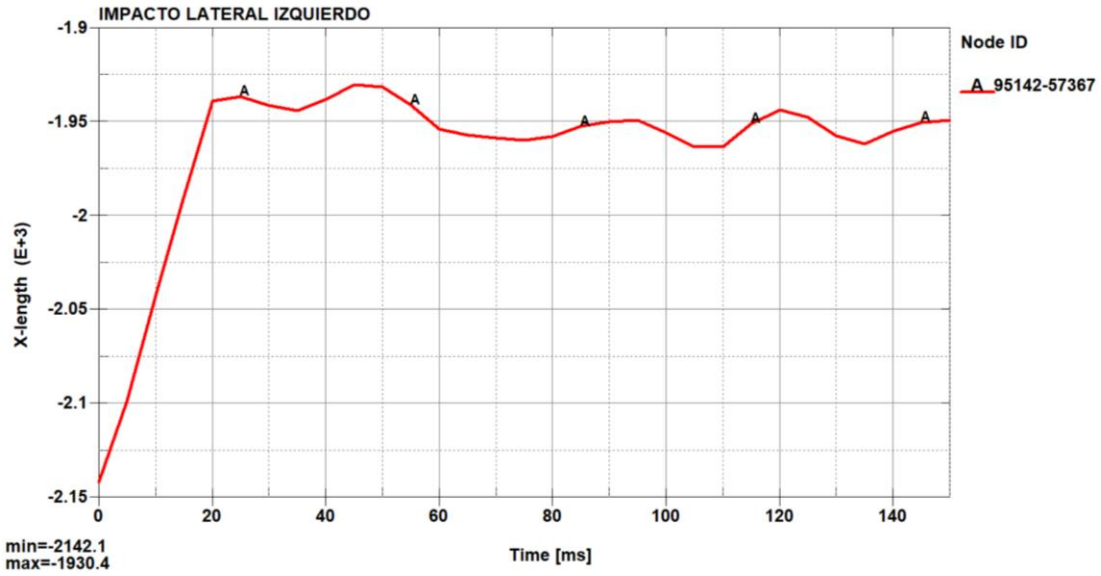
Impacto Lateral Izquierdo

Deformación estructural e invasión de la zona de supervivencia

Concluida la simulación virtual de impacto lateral izquierdo de la carrocería del minibús, este experimenta una deformación estructura, se puede observar en la Figura 69 la gráfica de Deformación vs Tiempo en la cual se aprecia como el habitáculo se va deformando durante el ensayo, este valor se obtiene haciendo uso de la ecuación 5.

Figura 69

Deformación vs Tiempo



Nota. El gráfico representa el diagrama de deformación vs tiempo del impacto lateral derecho en un intervalo de tiempo de 0 a 150 ms.

Ecuación 5

Cálculo de la deformación del minibús

$$\Delta L = l_0 - l_f$$

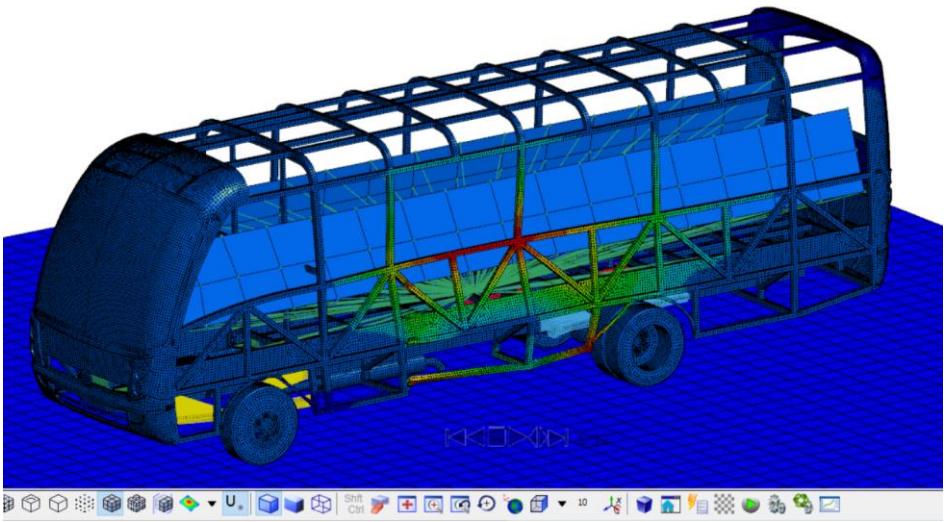
$$\Delta L = 2142.1\ [mm] - 1930.4\ [mm]$$

$$\Delta L = 211.7\ [mm]$$

La deformación que tiene la estructura cuando el BDM impacto al minibús es de 211.7.1 [mm], según el Reglamento 66 la zona de seguridad debe tener un espacio de 400 [mm] antes de ser invadida por los perfiles, con lo calculado en la ecuación 5 los perfiles no invaden la zona de seguridad, llegan a deformarse hasta 211.7 [mm].

Figura 70

Deformación de la estructura del lateral izquierdo



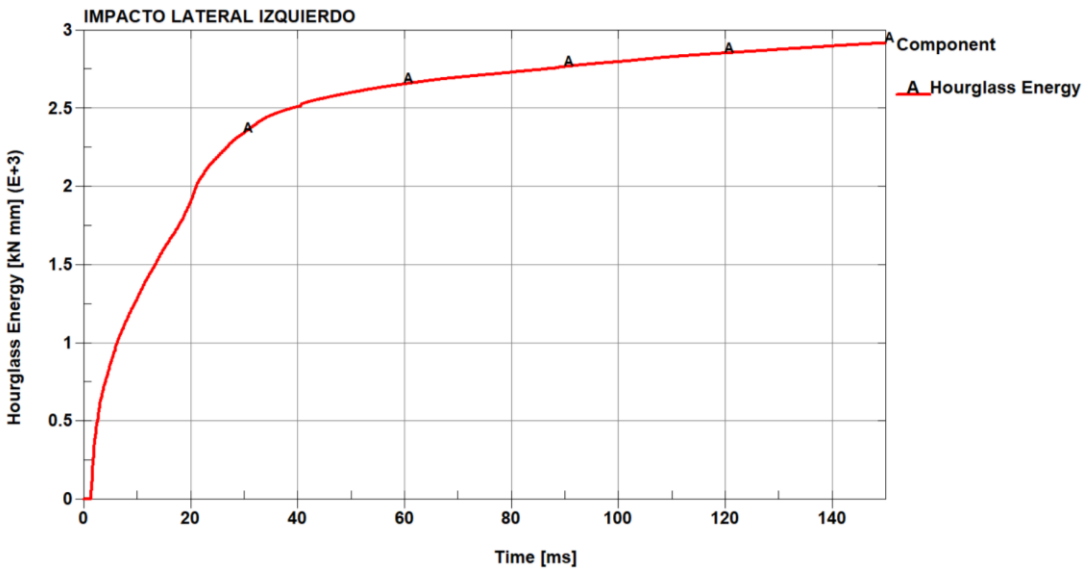
Nota. El gráfico representa la deformación de los perfiles de minibús, las zonas de color rojo son las que llegan a tener una deformación de 211.7 [mm].

Validación del estudio virtual

Siempre es importante determinar si los efectos de Hourglass han degradado significativamente los resultados al realizar el análisis. En general, la energía de Hourglass no debería superar el 10% de la energía interna total. En las Figuras 71 y 72 se muestran los diagramas de la energía interna y de la energía de Hourglass por deformación producidos durante el impacto.

Figura 71

Diagrama de energía de Hourglass del impacto en el lado izquierdo

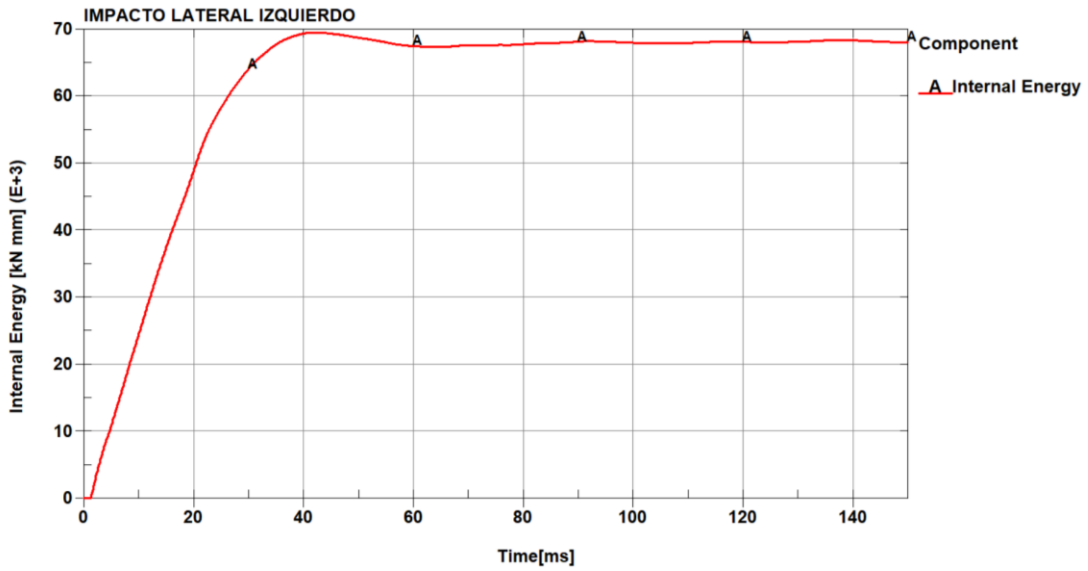


Nota. El gráfico representa la variación de energía de Hourglass existente en el impacto.

Acorde al diagrama de la figura 71, el valor de la Energía de Hourglass que se produce durante el impacto es de $2.92x10^3$*kN-mm.*

Figura 72

Diagrama de energía Interna del impacto en el lado izquierdo



Nota. El gráfico representa la variación de energía de Interna existente en el impacto.

Del diagrama de la Figura 72, el valor de la energía interna producida durante el impacto en el lado izquierdo del bus es de $6.80x10^4$*kN-mm.*

Con los resultados de la energía interna y energía de Hourglass, realizamos el cálculo de la relación entre las mismas, de la siguiente manera:

Ecuación 6

Relación de energías

$$H = \frac{E.Hourglass}{E.Interna} * 100\%$$

$$H = \frac{2.92x10^3}{6.80x10^4} * 100\%$$

$$H = 4.2\ \%$$

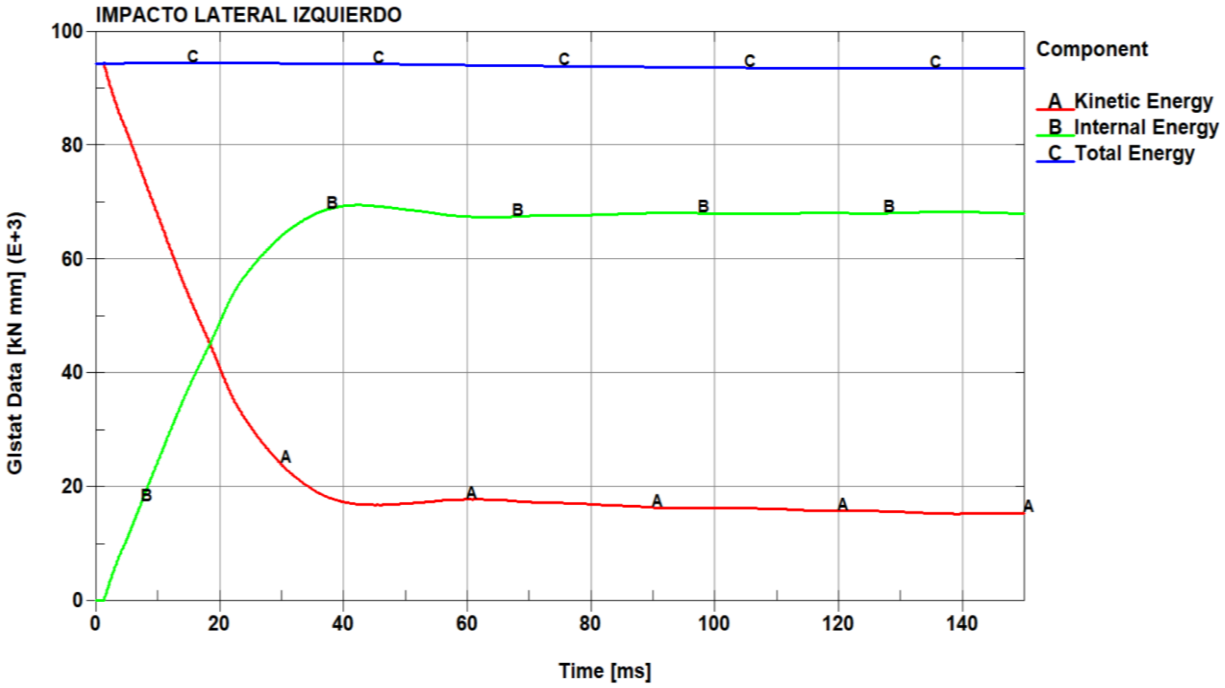
$$H < 10\%$$

Aplicando la relación tenemos como resultado 0.42% de energía de Hourglass, está en menor del 10%, consideramos valido al estudio estructural, los resultados obtenidos bajo condiciones y las características establecidas en los ensayos son aceptables.

La energía total producida en el estudio estructural permanece constante, lo que indica que la energía total producida en el impacto antes y después del impacto se disipa a través del fenómeno de la energía de deformación (energía interna). Se muestra en la figura 73 como es el comportamiento de la Energía total producida en la carrocería durante la simulación del impacto lateral izquierdo en la estructura del vehículo escolar Volkswagen 9-150 de las fuerzas armadas ESPE.

Figura 73

El balance de energía generado durante el impacto lateral izquierdo



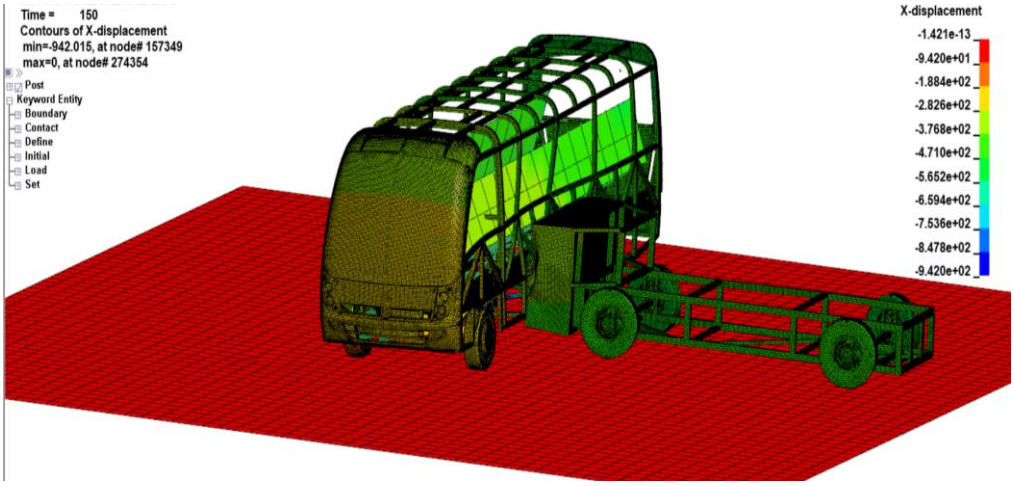
Nota. El gráfico representa la variación de energías interna, cinética y total que se generan en el impacto lateral derecho.

Deformación direccional de la carrocería

La deformación de la estructura de la carrocería del vehículo escolar Volkswagen 9-150 de las fuerzas armadas ESPE, después de la haber recibido un impacto lateral izquierdo se muestra en la figura 74, se puede ver que la desviación del eje X (la dirección del impacto) tiene un valor máximo de 942 mm.

Figura 74

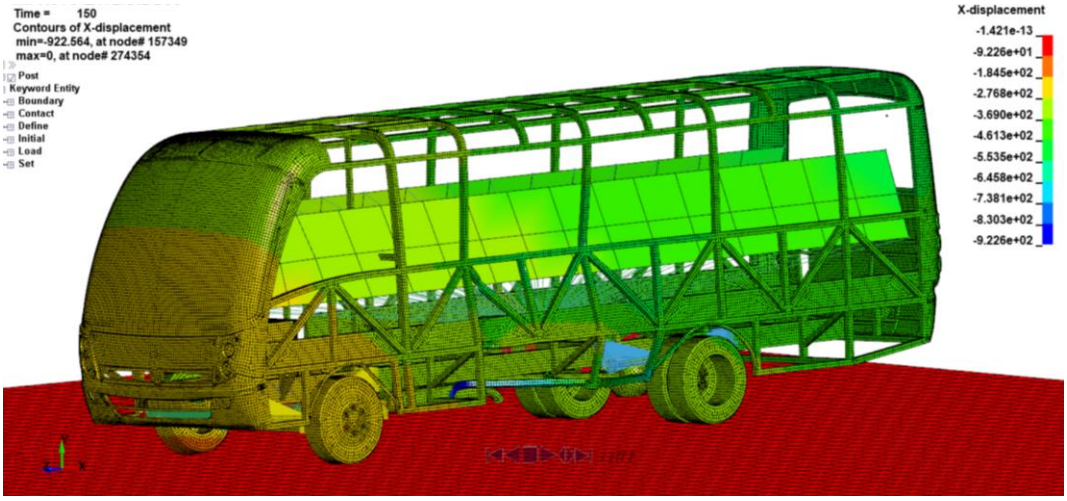
Impacto para obtener deformación direccional de la estructura en el eje X



Nota. El gráfico muestra la simulación virtual de la deformación direccional en el eje X.

Figura 75

Deformación direccional de la estructura en el eje X, impacto lateral izquierdo



Nota. El gráfico muestra los resultados de deformación en el eje X sin la BDM.

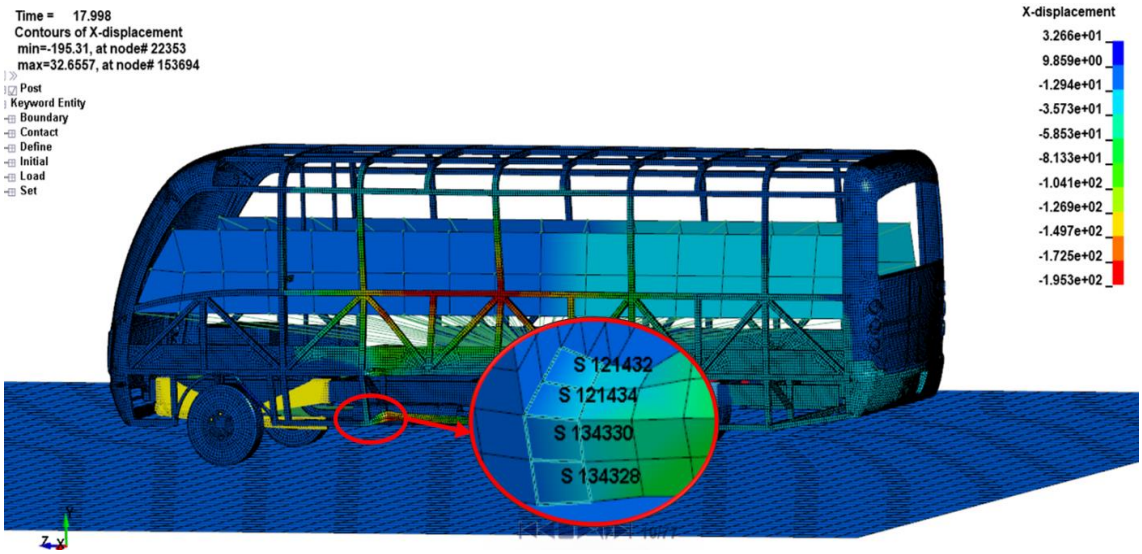
Análisis de elementos críticos

Para analizar el comportamiento de la estructura de la carrocería ante la deformación direccional en el eje x, se selecciona cuatro elementos finitos de la región crítica para observar su comportamiento bajo esfuerzo de Von Mises y desplazamiento. Los elementos discretos seleccionados en esta zona critica por deformación son: 121432,

121434, 134330, 134328. Se observa en la figura 76 los elementos a ser seleccionados para realizar el análisis.

Figura 76

Elementos seleccionados para obtención de resultados



Nota. El gráfico muestra la selección de elementos críticos para el análisis de resultados.

Se observa en la figura 77 que en el intervalo de tiempo de 0 a 20 ms después de iniciado el impacto, los cuatros elementos seleccionados se comportan de manera parecida, en los elementos 121432, 121434, 134330 y 134328 los valores de los esfuerzos son 0.281 GPa, 0.301 GPa, 0.294 GPa y 0.294 GPa respectivamente, en estos puntos existe ruptura de material, se puede observar que estan próximos a llegar a su resistencia ultima a la tracción de 0.31 GPa, debido a la resolución de los resultados que estan dados cada 5 ms se presenta la ruptura antes de llegar 0.31 GPa, también el impacto afecta a la compuerta posterior debido a la deformación de la estructura provocada por el impacto, además se puede observar que los elementos no experimentan oscilaciones después de la zona proporcional, debido a que el material se rompe y las fuerzas internas se equilibran sin alterar a ningún elemento.

Tabla 16

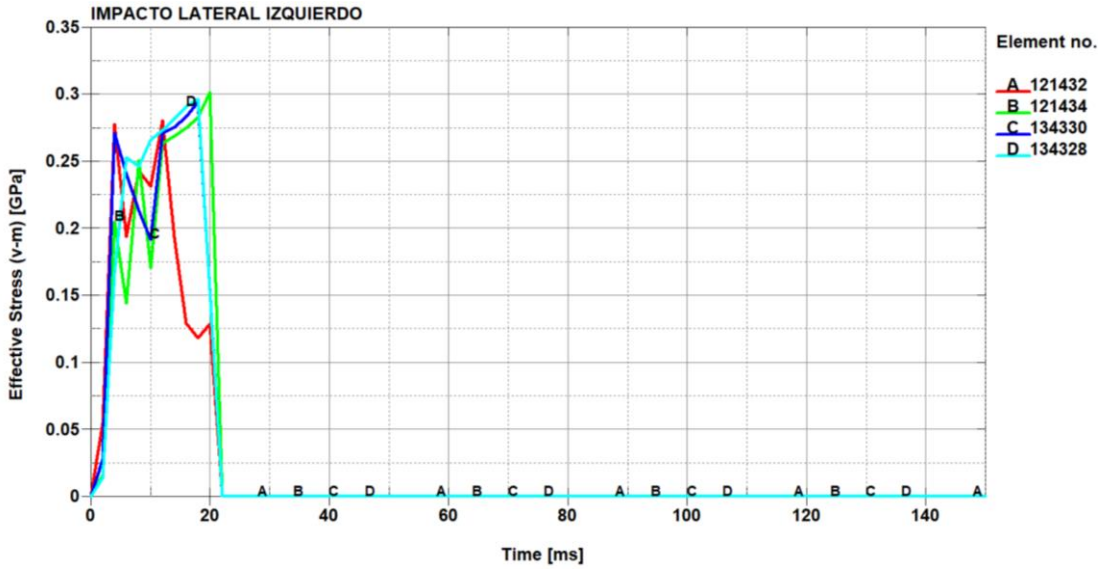
Elementos seleccionados y resultado de esfuerzo efectivo de Von Mises

Elemento	Esfuerzo efectivo de Von Mises
121432	0.281 GPa
121434	0.301 GPa
134330	0.294 GPa
134328	0.294 GPa

Nota. En la tabla se muestra los esfuerzos de Von Mises de los elementos críticos.

Figura 77

Diagrama del esfuerzo efectivo de Von Mises en los elementos seleccionados

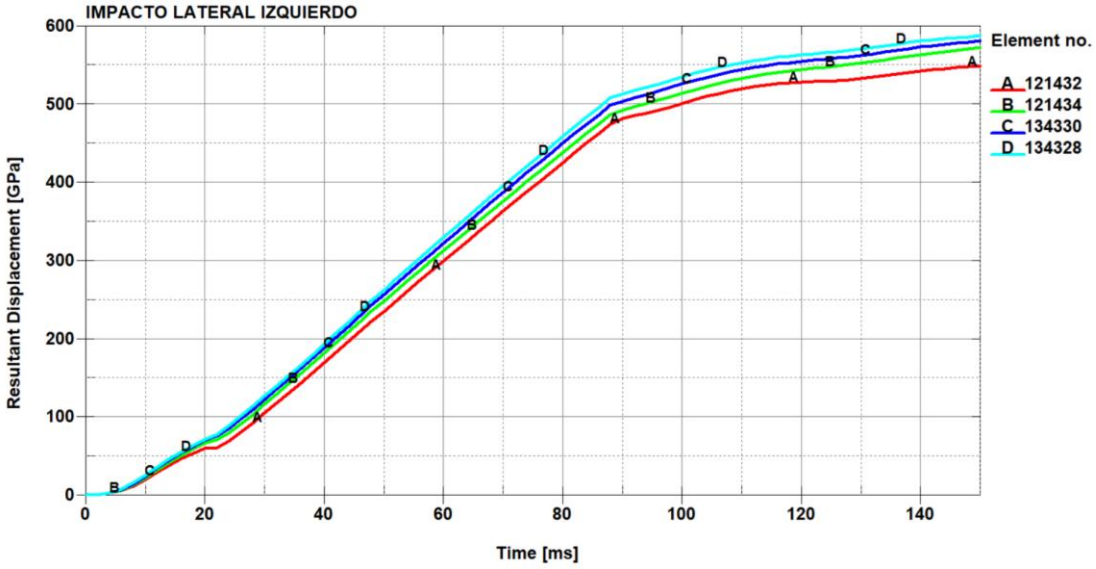


Nota. El gráfico muestra que existe una ruptura de material en el intervalo de tiempo de 0 a 40 ms.

La Figura 78 como es el comportamiento de los elementos seleccionados con respecto al desplazamiento resultante en el eje x en el tiempo

Figura 78

Diagrama del desplazamiento resultante en los elementos seleccionados en el impacto lateral derecho



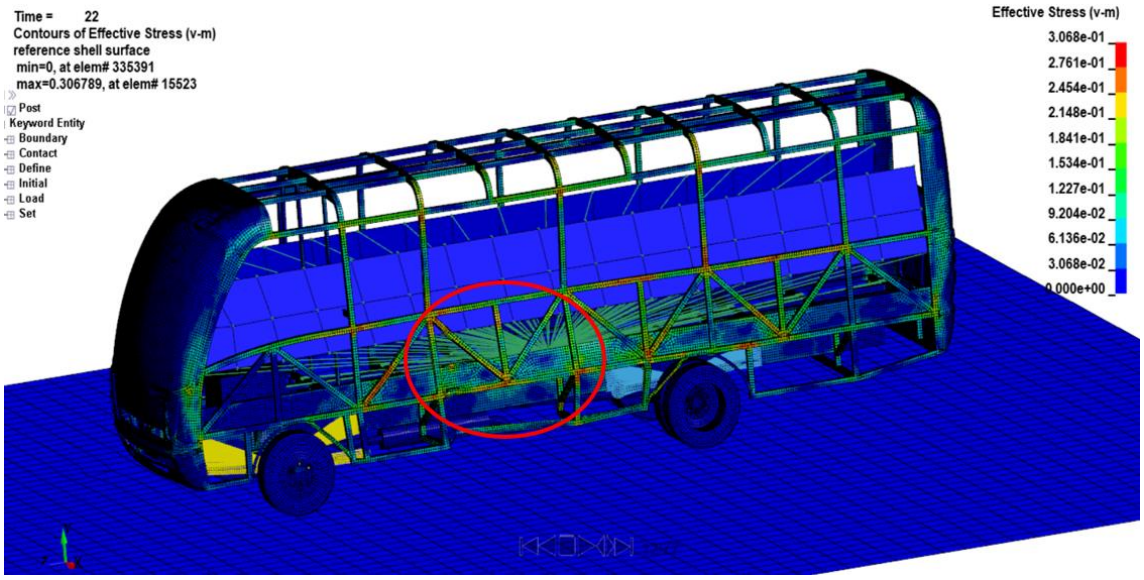
Nota. El gráfico representa los desplazamientos de los elementos críticos en el impacto lateral derecho.

Esfuerzo Efectivo de Von Mises

En la simulación del impacto lateral derecho en la estructura se suscita un esfuerzo máximo de Von Mises en el elemento 15523. En la figura 79 se observa la concentración del esfuerzo en la parte lateral derecha del vehículo escolar Volkswagen 9-150 de las fuerzas armadas ESPE como consecuencia del impacto.

Figura 79

Distribución del esfuerzo de Von Mises en la estructura



Nota. El gráfico muestra la zona donde existe el mayor esfuerzo de Von Mises en la estructura.

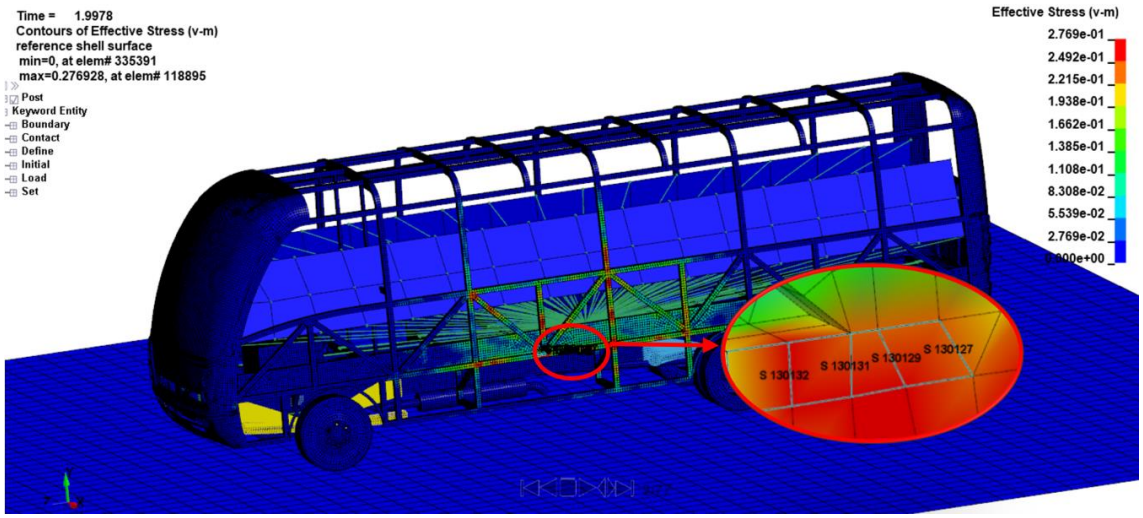
Análisis de elementos críticos

Para analizar el comportamiento de la estructura del vehículo escolar Volkswagen 9-150 de las fuerzas armadas ESPE con respecto al esfuerzo Von Mises, se escoge cuatros elementos finitos con la finalidad de determinar el comportamiento en la zona critica.

En la Figura 80 se observa los elementos que va a hacer analizados. Los elementos discretos seleccionados son de la zona critica por deformación y son: 130132,130131,130129 y 130127.

Figura 80

Elementos seleccionados para la adquisición de resultados por esfuerzo de Von Mises impacto lateral derecho

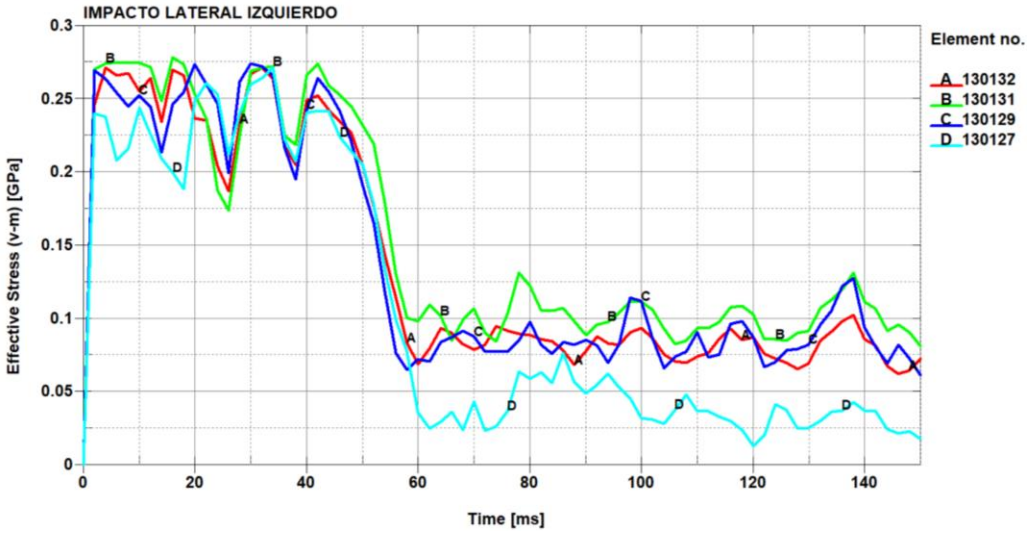


Nota. El gráfico muestra la selección de elementos críticos para el análisis de resultados.

En la figura 81 se observa que en el intervalo de tiempo de 40 ms después de que se ha iniciado el impacto, los cuatro elementos tienen un comportamiento similar; en este tiempo transcurrido ningún elemento supera la resistencia última de material (0.31 GPa), el elemento que más se aproxima a la resistencia ultima es el 130131 con un esfuerzo de 0.28 GPa, los elementos 130132, 130129 y 130127 llegan a ser sometidos a un esfuerzo de 0.271 GPa, 0.274 GPa y 0.202 GPa respectivamente para elemento seleccionado, además en el intervalo de tiempo de 40 a 150 ms se puede observar que los elementos experimentan fluctuaciones después de la zona proporcional, debido a que todos los elementos tienen una variación de las fuerzas internas que se van produciendo en cada elemento en el transcurso que se produce el impacto lateral izquierdo.

Figura 81

Diagrama del esfuerzo efectivo de Von Mises de los elementos seleccionados en el impacto lateral derecho

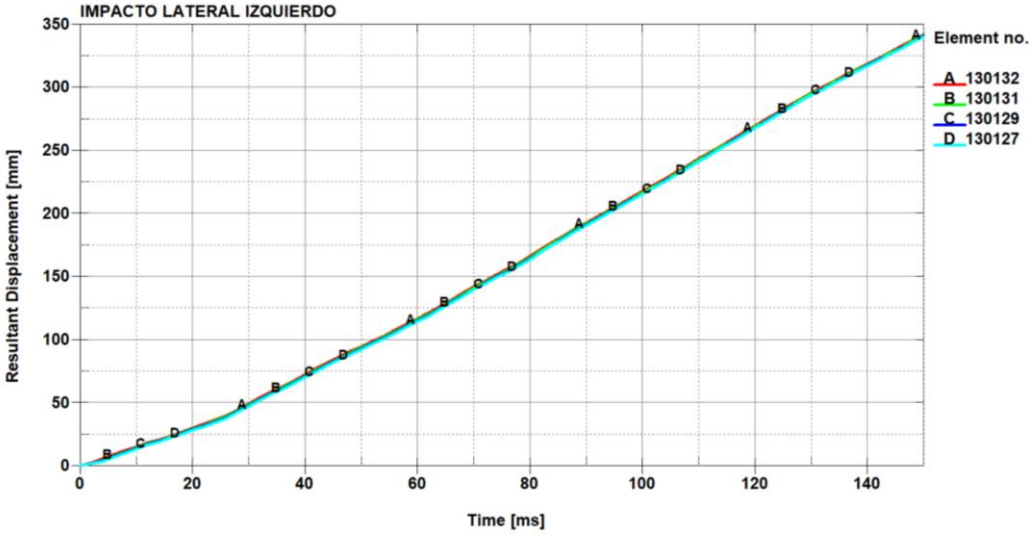


Nota. El gráfico muestra el comportamiento del esfuerzo de Von Mises en los elementos seleccionados para el análisis durante el impacto.

En la Figura 82 se muestra que el intervalo de tiempo de 0 a 150 ms el comportamiento del desplazamiento resultante del os elemento seleccionados, los mismo que se desplazan de manera similar, el desplazamiento máximo alcanzado es de 342 mm.

Figura 82

Diagrama del esfuerzo efectivo de Von Mises de los elementos seleccionados



Nota. El gráfico representa los desplazamientos de los elementos críticos en el impacto lateral derecho.

Capitulo V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

En el cálculo de la pérdida de energía del impacto lateral derecho la carrocería disipa un 79 % (7.203E4 J) de la energía cinética y en el ensayo virtual se disipa el 71% (6.74E4 J); En el cálculo de la pérdida de energía del impacto lateral izquierdo la carrocería disipa un 79 % (7.203E4 J) de la energía cinética y en el ensayo virtual se disipa el 72% (6.80E4 J) de acuerdo al fenómeno de deformación, esta diferencia de porcentajes se debe a factores como la geometría de los objetos de impacto, velocidad de impacto de la BDM, masas involucradas y tiempo de impacto; además el cálculo de pérdida de energía al 79% es la misma para los dos impactos laterales ya que no cambia la masa del bus y la velocidad de la barra deformable móvil de acuerdo a la ECE R95.

Durante el análisis de impacto latera derecho mediante el método de elementos finitos, ningún miembro estructural invade el habitáculo de la carrocera; sin embargo, la máxima deformación producida en la perfilería del panel izquierdo es de 202.1 mm, lo que representa una deformación significativa según las dimensiones de la la carrocería del minibús escolar Volkswagen 9-150 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Cuando se produce el análisis de impacto latera izquierdo mediante MEF, ningún miembro estructural invade el habitáculo de la carrocera; sin embargo, la máxima deformación producida en la perfilería del panel izquierdo es de 211.7 mm, lo que representa una deformación significativa según las dimensiones de la la carrocería del minibús escolar Volkswagen 9-150 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

En el impacto lateral derecho, la relación entre la energía interna y la energía de Hourglass es de 4.8%, menos del 10%, lo que demuestra que el estudio estructural es válido; los resultados son aceptables en las condiciones y características establecidas por la regulación R95.

En el impacto lateral izquierdo, la relación entre la energía interna y la energía de Hourglass es de 4.2%, menos del 10%, lo que demuestra que el estudio estructural es válido; los resultados son aceptables en las condiciones y características establecidas por la regulación R95.

Los elementos estructurales colapsan con mayor rapidez por concentración de esfuerzos que por deformación como se mostró en la figura 63 del impacto lateral derecho, debido a que:

Los elementos críticos basado en el esfuerzo de Von Mises la carrocería presenta ruptura en la zona plástica pro deformación cuando alcanza un valor en el esfuerzo de 0.308 GPa, en el intervalo de tiempo de 0 a 20 ms, debido a la resolución de los resultados que estan dados cada 5 ms se presenta la ruptura antes de llegar 0.31 GPa, también el impacto afecta a la compuerta posterior debido a la deformación de la estructura provocada por el impacto, además se puede observar que los elementos no experimentan oscilaciones después de la zona proporcional, debido a que el material se rompe y las fuerzas internas se equilibran sin alterar a ningún elemento.

La implementación de elementos de tipo cáscara (Shell) para el modelado de la carrocería permite que la estructura sea continua y no presente interferencias entre sus uniones lo cual nos permite obtener resultados computacionalmente fiables y aproximados a ensayos reales.

Recomendaciones

Realizar el diseño estructural de la carrocería tomando en cuenta el mayor porcentaje posible sus características tanto cualitativas como cuantitativas con el objetivo de que la simulación computacional no arroje resultados erróneos.

Se recomienda realizar las simulaciones de impactos en equipos con tecnología de alta gama para obtener resultados a mínimas fracciones de tiempo desde que inicia el impacto hasta su finalización, lo cual nos mostrará datos mucho más aproximados a los reales, ya que al utilizar equipos informáticos básicos dichos resultados pueden tardar en procesarse varios días, semanas e incluso meses de acuerdo al tipo de estudio que se pretenda realizar.

Realizar simulaciones virtuales de todo tipo de impactos con la variación de parámetros como diseño, tipo de material, velocidad, y dimensionamiento de la barra deformable móvil asemejándose a vehículos livianos y pesados para obtener diferentes resultados que permitan interpretar lo que sucede en una situación real, ya que día a día se presentan varios siniestros de tránsito de distinta índole.

En Ecuador se debe implementar una normativa que regule la realización de pruebas virtuales de impactos para buses en todas sus modalidades, que permita la validación de la estructura de la carrocería y establezca las condiciones y criterios para la homologación.

Bibliografía

Acosta, J. (2022). *Análisis de la influencia del modelado de losas por elementos tipo Shell y membrana en el diseño estructural de un edificio de 4 pisos, utilizando un software de diseño especializado* [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica Ambato]. Repositorio Institucional – Universidad Técnica Ambato.

Andrade, L. y 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* [Tesis de pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. Repositorio Institucional – Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

ANSA PRE PROCESSOR. (s.f). The advanced CAE pre-processing software for complete model build up. https://www.beta-cae.com/ansa.htm

ANSYS, Inc. (2011). LS-DYNA. https://www.lstc.com/products/ls-dyna

Caraguay, J. y Flores, B. (2018). *Caracterización de la accidentabilidad en autobuses de transporte de pasajeros en el Ecuad*or [Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional – Universidad Politécnica Salesiana.

Cháfuel, S. (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* [Tesis de pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. Repositorio Institucional – Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Cofre, W. y Quiroga, M. (2011). *Elaboración del plan de mantenimiento programado para el parque automotor de la sección de transportes de la ESPE. Extensión Latacunga [*Tesis de Pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. Repositorio Institucional – Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Cuasapud, D. (2018). *Análisis estructural a cargas de impacto posterior por alcance de un bus interprovincial mediante el método de elementos finitos [Tesis de maestría, Universidad Internacional* SEK]. Repositorio Institucional – Universidad Internacional SEK.

Esmeraldas, C. (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* [Tesis de Pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. Repositorio Institucional – Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Luque, P., Álvarez, D. y Vera, C. (2008). *Ingeniería del Automóvil. Sistemas y Comportamiento Dinámico*. Thomson. https://books.google.com.pe/books?id=JDuzY9j6HwMC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false

Morillo, V. (2017*). Determinación da carga mecánica máxima que suporta as manivelas do motor de un camión MAZDA BT-50 Diesel por medio de testes estáticos de esfuerzos experimentales por elementos finitos Ibarra*: Universidad de Técnica do Norte. (pp. 5, 6 e 7)

Orellano, L. y Orellana, M. (2020). *Análisis de las fuerzas generadas en la estructura de un bus de servicio de transporte de pasajeros durante una ruta de servicio* [Tesis pregrado, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca]. Repositorio Institucional – Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Plaza, D. (s.f.). *Chasis independiente o de escalera: qué es y cuáles son sus ventajas*. Motor.es. https://www.motor.es/que-es/chasis-independiente-escalera

Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2015). *Norma Técnica Ecuatoriana* (INEN 1668). https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2415-1.pdf

Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2013). Norma Técnica Ecuatoriana (INEN 2415). https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_2656-1.pdf

Volkswagen Camiones y Buses. (2022). Vwcamionesybuses.com.ar. https://www.vwcamionesybuses.com.ar/modelos

Gamboa, H. y Vistin, D. (2006). *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* [Tesis pregrado, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca]. Repositorio Institucional – Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Anexos