



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
ENERGÍA Y MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**TEMA: 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**

AUTOR: VÍCTOR SANTIAGO CHÁFUEL ORTEGA

DIRECTOR: ING. STALIN MENA PALACIOS

LATACUNGA

2017



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
ENERGÍA Y MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“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”*** realizado por el señor ***VÍCTOR SANTIAGO CHÁFUEL ORTEGA***, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor ***VÍCTOR SANTIAGO CHÁFUEL ORTEGA*** para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 25 de agosto de 2017

ING. STALIN MENA P.

DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
ENERGÍA Y MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **VÍCTOR SANTIAGO CHÁFUEL ORTEGA**, con cédula de ciudadanía N° 0401503792 declaro que este trabajo de titulación "**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**" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 25 de agosto de 2017

VÍCTOR SANTIAGO CHÁFUEL ORTEGA

C.C.: 0401503792



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
ENERGÍA Y MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

AUTORIZACIÓN

Yo, **VÍCTOR SANTIAGO CHÁFUEL ORTEGA**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación ***“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”*** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Latacunga, 25 de agosto de 2017

VÍCTOR SANTIAGO CHÁFUEL ORTEGA

C.C.: 0401503792

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a principalmente a Dios por haberme dado la vida y que en todos estos años fue mi fuerza para no dejarme caer y seguir adelante a pesar de los miles obstáculos presentados día a día. A mi madre Ximena Ortega por haber sido la única persona que confió ciegamente en mí, y que gracias a su apoyo y consejos supo darme fuerzas para culminar mi carrera. A mi padre Miguel Cháfuel que a pesar de nuestras diferencias de opiniones siempre estuvo dispuesto ayudarme y darme la mano. A mis hermanas que de una u otra manera fueron un eje principal para culminar mis estudios. A mi segunda madre Crucita Benavides por ser el pañuelo de lágrimas de mi madre y por ser un apoyo incondicional de toda mi familia. A mi futura esposa Karina Lorenz que la amo con todo mi corazón por haberme acompañado todo el transcurso de mi carrera y esperarme siempre con los brazos abiertos a pesar de la distancia .A mis dos hermosos hijos Santiago y Kathrina Cháfuel que son mi pequeño motor por el cual todos los días sigo vivo. A mis profesores que me inculcaron el valor de ser una persona estudiada y por darme la sabiduría para poder defenderme en la vida laboral.

Víctor.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi Dios por permitirme disfrutar de verme realizado como profesional y por darme todo lo que necesito para ser un buen profesional.

A mi madre Ximena Ortega por ser mi madre y a la vez mi mejor amiga y además por ser mi apoyo económico y mi apoyo incondicional en todo.

A mi padre Miguel Cháfuel que me dio la mano para culminar mi carrera de muchas maneras posibles.

A mi tutor y amigo el Ing. Stalin Mena que con su apoyo incondicional y su extensa sabiduría en el ámbito de educación superior supo guiarme para que este trabajo sea culminado de manera exitosa.

A un buen amigo el Ing. Mauricio Cruz que supo darme los consejos necesarios para plantear el tema de tesis y una manera correcta de cómo realizarla.

Al señor Luis Peres Gerente Propietario de Carrocerías Peres por haberme abierto la puerta de su noble y grande empresa para poder realizar de manera óptima la realización de mi tesis.

A todos mis amigos que de muchas maneras supieron ayudarme y estar en las buenas y malas a lo largo de mi carrera.

Gracias a todos los que me brindaron su apoyo para culminar esta carrera.

Víctor.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA.....	i
CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
RESUMEN	xviii
ABSTRACT.....	xix

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Descripción resumida del proyecto	3
1.4. Justificación e importancia	3
1.5. Objetivos del proyecto	4
1.5.1. Objetivo general	4
1.5.2. Objetivos específicos.....	4
1.6. Metas	5
1.7. Hipótesis	6
1.8. Variables de la investigación	6

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO	7
2.1. Carrocerías.....	7
2.1.1. Definición.....	7
2.1.2. Tipos de carrocerías.....	7
A. Chasis con carrocería separada.....	7
B. Plataforma con carrocería separada	8
C. Carrocería de chasis tubular	9
D. Carrocería autoportante	10
2.1.3. Carrocerías de buses	11
A. Seguridad pasiva.....	12
a. Seguridad pasiva en la construcción de los vehículos	13
B. El habitáculo de seguridad	13
C. Zona de supervivencia	14
D. Resistencia de la estructura	15
2.2. Estructura de la carrocería de un bus	16
2.2.1. Cargas de Diseño.....	16
2.2.2. Combinaciones de cargas básicas.....	18
2.3. Fuerzas y cargas que actúan sobre una carrocería.....	19
2.3.1. Cargas de flexión.....	19
2.3.2. Cargas de torsión	20
2.3.3. Fuerzas verticales	21
2.3.4. Fuerzas longitudinales.....	22
2.3.5. Fuerzas transversales	22
2.4. Pruebas de impacto.....	23
2.4.1. Impacto frontal.....	23

	ix
2.4.2. Impacto posterior.....	26
2.5. Normativa Internacional para impacto frontal y posterior	27
2.5.1. Regulación ECE R94.....	27
2.5.2. Regulación ECE R32.....	28
2.6. Materiales utilizados en la construcción de la carrocería	30
2.6.1. Acero ASTM A500	30
2.6.2. Acero Galvanizado	31
2.7. Especificaciones de perfiles utilizados en la carrocería	32
2.8. Sistema CAD	33
2.8.1. Definición de un sistema CAD	34
2.9. Sistema CAE	35
2.9.1. Descripción de un Sistema CAE	35
2.10. Método de elementos finitos (MEF).....	36
2.10.1. Tipos de elementos	41
2.10.2. Mallado	42

CAPÍTULO III

INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR APLICADA A LA CARROCERÍA DEL BUS.....	44
3.1. Construcción del modelo	44
3.1.1. Especificación de las propiedades de los materiales	44
3.2. Aplicación de condiciones de frontera	46
3.2.1. Masa distribuida	46
3.2.2. Velocidad inicial	47
3.3. Configuración para la simulación por el Método elementos finitos	47
3.3.1. Generación de malla.....	47
A. Tipos de malla.....	48

	x
a. Malla sólida.....	48
b. Malla de vaciado.....	49
c. Malla de viga	50
d. Malla mixta	50
A. Relación Jacobiana	51

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
4.1. Resultados obtenidos del ensayo virtual	54
4.2. Carrocería estándar: Acero ASTM A500	57
4.2.1. Impacto frontal.....	58
A. Deformación estructural del bus.....	58
B. Esfuerzo Máximo del elemento crítico.....	59
C. Absorción de energía del armazón frontal del bus	61
D. Aceleración y fuerza de impacto	63
4.2.2. Impacto posterior.....	64
A. Deformación estructural del bus.....	64
B. Esfuerzo máximo del elemento crítico.....	66
C. Absorción de energía del armazón posterior del bus	67
D. Aceleración y fuerza de impacto	69
4.3. Carrocería estándar: Acero Galvanizado	70
4.3.1. Impacto frontal.....	70
A. Deformación estructural del bus.....	70
B. Esfuerzo máximo del elemento crítico.....	72
C. Absorción de energía del armazón frontal del bus	73
D. Aceleración y fuerza de impacto	73
4.3.2. Impacto posterior.....	74

	xi
A. Deformación estructural del bus.....	74
B. Esfuerzo máximo del elemento crítico.....	76
C. Absorción de energía del armazón posterior del bus	77
D. Aceleración y fuerza de impacto	77
4.4. Carrocería modificada: Acero ASTM A500	78
4.4.1. Impacto frontal.....	78
A. Deformación estructural del bus.....	79
B. Esfuerzo máximo del elemento crítico.....	80
C. Absorción de energía del armazón frontal del bus	81
D. Aceleración y fuerza de impacto	82
4.4.2. Impacto posterior.....	82
A. Deformación estructural del bus.....	82
B. Esfuerzo máximo del elemento crítico.....	84
C. Absorción de energía del armazón posterior del bus	85
D. Aceleración y fuerza de impacto	86
4.5. Carrocería modificada: Acero Galvanizado	86
4.5.1. Impacto frontal.....	87
A. Deformación estructural del bus.....	87
B. Esfuerzo máximo del elemento crítico.....	88
C. Absorción de energía del armazón frontal del bus	89
D. Aceleración y fuerza de impacto	90
4.5.2. Impacto posterior.....	90
A. Deformación estructural del bus.....	90
B. Esfuerzo máximo del elemento crítico.....	92
C. Absorción de energía del armazón posterior del bus	93
D. Aceleración y fuerza de impacto	94

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
6.1. Conclusiones	96
6.2. Recomendaciones	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cargas vivas de diseño	16
Tabla 2 Velocidades, radios mínimos y peraltes en carretera	17
Tabla 3 Pruebas de impacto europeas-estadounidenses, eventos frontales ..	25
Tabla 4 Propiedades mecánicas del Acero ASTM A500	31
Tabla 5 Propiedades mecánicas Acero Galvanizado	32
Tabla 6 Especificación de perfiles en la carrocería	33
Tabla 7 Configuración del acero ASTM A500	45
Tabla 8 Configuración del acero galvanizado	45
Tabla 9 Relación jacobiana del sistema	51
Tabla 10 Resultados de ensayos virtuales	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Carrocería y chasis independientes	8
Figura 2 Bastidor de plataforma.....	9
Figura 3 Mercedes Benz300SL Gullwing.....	10
Figura 4 Carrocería autoportante.....	11
Figura 5 Armazón estructural de la carrocería de bus.....	12
Figura 6 Vista transversal de la zona de supervivencia.....	15
Figura 7 Vista longitudinal de la zona de supervivencia	15
Figura 8 Cargas de flexión que actúan sobre el chasis	20
Figura 9 Cargas de torsión que actúan sobre el chasis.....	21
Figura 10 Fuerzas verticales actuando en la carrocería.....	21
Figura 11 Fuerzas longitudinales actuando sobre la carrocería	22
Figura 12 Cargas transversales actuando en la carrocería	23
Figura 13 Prueba de impacto frontal EuroNCAP	26
Figura 14 Impacto posterior a un vehículo según EuroNCAP	26
Figura 15 Configuración de perfiles estructurales	33
Figura 16 Interfaz del Software CAD	34
Figura 17 Interfaz del sistema CAE	36
Figura 18 Análisis de simulación por el MEF	36
Figura 19 Diagrama de cuerpo libre del elemento	38
Figura 20 Malla de 2 elementos y 3 nodos	39
Figura 21 Elementos finitos comunes.....	42
Figura 22 Mallado de la carrocería de un bus	43
Figura 23 Modelado de la carrocería	44
Figura 24 Masa distribuida sobre la carrocería.....	46
Figura 25 Dirección de la velocidad (Impacto frontal).....	47
Figura 26 Malla sólida de un objeto	49
Figura 27 Superficie media de chapa metálica	49
Figura 28 Elemento de vaciado creado en la superficie media	50
Figura 29 Elementos finitos formados en la estructura del bus.....	51
Figura 30 Gráfico estadístico del número y tipos de elementos	52
Figura 31 Impacto frontal-Acero ASTM A500	53
Figura 32 Impacto posterior-Acero ASTM A500	53

	xv
Figura 33 Carrocería estándar, frontal	54
Figura 34 Carrocería modificada, frontal	55
Figura 35 Carrocería estándar, posterior	55
Figura 36 Carrocería modificada, posterior	55
Figura 37 Variación de energía durante test de impacto frontal	56
Figura 38 Variación de energía durante test de impacto posterior	57
Figura 39 Deformación impacto frontal G1M1	58
Figura 40 Elemento crítico, impacto frontal G1M1	59
Figura 41 Diagrama deformación-tiempo del elemento crítico G1M1	59
Figura 42 Diagrama esfuerzo-tiempo del elemento crítico G1M1	60
Figura 43 Diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico G1M1	60
Figura 44 Diagrama energía de deformación-tiempo G1M1	63
Figura 45 Diagrama de aceleración-tiempo G1M1	64
Figura 46 Deformación impacto posterior G1M1	65
Figura 47 Elemento crítico, impacto posterior G1M1	65
Figura 48 Diagrama deformación-tiempo del elemento crítico G1M1	66
Figura 49 Diagrama esfuerzo-tiempo del elemento crítico G1M1	66
Figura 50 Diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico G1M1	67
Figura 51 Diagrama energía de deformación-tiempo G1M1	69
Figura 52 Diagrama aceleración-tiempo G1M1	70
Figura 53 Deformación impacto frontal G1M2	71
Figura 54 Elemento crítico, impacto frontal G1M2.....	71
Figura 55 Diagrama deformación-tiempo del elemento crítico G1M2	72
Figura 56 Diagrama esfuerzo-tiempo del elemento crítico G1M2	72
Figura 57 Diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico G1M2	73
Figura 58 Diagrama energía de deformación-tiempo G1M2	73
Figura 59 Diagrama aceleración-tiempo G1M2	74
Figura 60 Deformación, impacto posterior G1M2	75
Figura 61 Elemento crítico, impacto posterior G1M2.....	75
Figura 62 Diagrama deformación-tiempo del elemento crítico G1M2	76
Figura 63 Diagrama esfuerzo-tiempo del elemento crítico G1M2	76
Figura 64 Diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico G1M2	77
Figura 65 Diagrama energía de deformación-tiempo G1M2	77

	xvi
Figura 66 Diagrama aceleración-tiempo G1M2	78
Figura 67 Deformación, impacto frontal G2M1	79
Figura 68 Elemento crítico, impacto frontal G2M1	79
Figura 69 Diagrama deformación-tiempo del elemento crítico G2M1	80
Figura 70 Diagrama esfuerzo-tiempo del elemento crítico G2M1	80
Figura 71 Diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico G2M1	81
Figura 72 Diagrama energía de deformación-tiempo G2M1	81
Figura 73 Diagrama aceleración-tiempo G2M1	82
Figura 74 Deformación, impacto posterior G2M1	83
Figura 75 Elemento crítico, impacto posterior G2M1	83
Figura 76 Diagrama deformación-tiempo del elemento crítico G2M1	84
Figura 77 Diagrama esfuerzo-tiempo del elemento crítico G2M1	84
Figura 78 Diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico G2M1	85
Figura 79 Diagrama energía de deformación-tiempo G2M1	85
Figura 80 Diagrama aceleración-tiempo G2M1	86
Figura 81 Deformación, impacto frontal G2M2	87
Figura 82 Elemento crítico, impacto frontal G2M2	87
Figura 83 Diagrama deformación-tiempo del elemento crítico G2M2	88
Figura 84 Diagrama esfuerzo-tiempo del elemento crítico G2M2	88
Figura 85 Diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico G2M2	89
Figura 86 Diagrama energía de deformación-tiempo G2M2	89
Figura 87 Diagrama aceleración-tiempo G2M2	90
Figura 88 Deformación, impacto posterior G2M2	91
Figura 89 Elemento crítico, impacto posterior G2M2	91
Figura 90 Diagrama deformación-tiempo del elemento crítico G2M2	92
Figura 91 Diagrama esfuerzo-tiempo del elemento crítico G2M2	92
Figura 92 Diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico G2M2	93
Figura 93 Diagrama energía de deformación-tiempo G2M2	93
Figura 94 Diagrama aceleración-tiempo G2M2	94

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.	Fuerza nodal en el nodo i.....	37
Ecuación 2.	Fuerza nodal en el nodo j.....	37
Ecuación 3.	Fuerzas nodales en forma de matriz.....	37
Ecuación 4.	Vector de fuerzas internas del elemento.....	37
Ecuación 5.	Fuerzas internas que actúan sobre los nodos.....	38
Ecuación 6.	Fuerzas externas que actúan en cada nodo.....	38
Ecuación 7.	Fuerzas externas en función de las fuerzas internas.....	39
Ecuación 8.	Fuerzas nodales externas en forma matricial.....	39
Ecuación 9.	Matriz de rigidez reducida.....	40
Ecuación 10.	Energía cinética antes del impacto.....	59
Ecuación 11.	Energía cinética después del impacto.....	59
Ecuación 12.	Velocidad final de impacto.....	59
Ecuación 13.	Energía cinética perdida en la colisión.....	60
Ecuación 14.	Fracción de energía cinética perdida en la colisión.....	60
Ecuación 15.	Fuerza de impacto.....	62

RESUMEN

El uso de programas informáticos basados en simulación de impacto de vehículos se ha convertido en una herramienta indispensable para acortar el tiempo de desarrollo de empresas carroceras y reducir los costos. El presente proyecto informa sobre ensayos virtuales de impacto de un bus interprovincial, mediante el uso de parámetros de normativas internacionales vigentes. El objetivo de este trabajo es simular un impacto frontal y posterior de una carrocería de bus, validar los resultados y así desarrollar una metodología para mejorar la seguridad de buses basada en análisis computacional. El objetivo es también alterar geometrías y materiales del armazón con el fin de reducir las fuerzas experimentadas durante el impacto. Para analizar el diseño de vehículos, en la industria automotriz se utiliza un software CAE donde se ejecutan simulaciones por el Método de Elementos Finitos. A través de este software se predice el comportamiento de un impacto en una colisión. El procedimiento propuesto para analizar el estudio es por medio del Método de Elementos Finitos (MEF) y los resultados de la simulación se analizan para determinar la convergencia de los mismos, mediante la resistencia y la deformación que presenta la estructura de la carrocería.

PALABRAS CLAVE:

- **TRANSPORTE DE PASAJEROS - CARROCERÍAS**
- **CARROCERÍAS - RESISTENCIA ESTRUCTURAL**
- **CARROCERÍAS - PRUEBAS DE IMPACTO**
- **CARROCERÍAS - ANALISIS ESTRUCTURAL**

ABSTRACT

The use of computer software based on vehicle impact simulation has become an indispensable tool to shorten the time of development of corporate bodies and reduce costs. The present project reports on virtual tests of impact of an interprovincial bus, through the use Of parameters of international regulations in force. The objective of this work is to simulate a frontal and posterior impact of a bus body, validate the results and thus develop a methodology to improve bus safety based on computational analysis. The goal is also to alter geometries and frame materials in order to reduce the forces experienced during impact. In order to analyze vehicle design, a CAE software is used in the automotive industry where simulations are executed by the Finite Element Method. Through this software the behavior of an impact in a collision is predicted. The proposed method for analyzing the study is by means of the Finite Element Method (MEF) and the results of the simulation are analyzed to determine the convergence of the same, through the resistance and deformation presented by the structure of the body.

KEYWORDS:

- **PASSENGER TRANSPORT- BODYWORK**
- **BODYWORK- STRUCTURAL RESISTANCE**
- **BODYWORK- IMPACT TESTS**
- **BODYWORK- STRUCTURAL ANALYSIS**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

El proceso de diseño de ingeniería consta de una serie de pasos que los ingenieros siguen para llegar a la solución de un problema. Muchas veces la solución implica diseñar un producto que cumpla ciertos criterios y realice una determinada función. La ingeniería automotriz cuenta con procesos que involucran diseñar, construir y probar algo, diseño que permite analizar el comportamiento de un sistema estructural.

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en su repositorio cuenta con análisis estructurales de carrocerías, pero se debe realizar investigaciones sobre el comportamiento de los materiales y geometrías de construcción de carrocerías mediante ensayos de impacto, con la finalidad de determinar las propiedades requeridas de las estructuras para minimizar la lesión de los ocupantes en caso de un accidente de tránsito. La estructura de una carrocería debe proporcionar en todo momento la máxima seguridad a los pasajeros que se encuentran en el habitáculo del vehículo.

Las pruebas de impacto frontal y posterior que se realizan en la actualidad han proporcionado todos los datos necesarios a la ingeniería computacional con el objetivo de generar resultados que permitan producir una estructura de carrocería que cumpla plenamente con normas nacionales e internacionales que establecen requisitos de diseño de carrocerías y métodos de ensayo como procesos de homologación de vehículos y calificación de empresas carroceras.

La estructura de la carrocería debe asegurar un espacio de supervivencia, presentar la resistencia necesaria y cumplir con exigencias de seguridad al encontrarse ante un fenómeno de colisión, por tal motivo el análisis estructural que se desea realizar se lo reproduce en una simulación virtual de impacto frontal y posterior por el método de elementos finitos para verificar los materiales y geometrías de construcción de una carrocería de bus interprovincial de la empresa Carrocerías Peres.

1.2. Planteamiento del problema

Las normativas actuales vigentes cada vez exigen que los vehículos brinden la máxima protección a los pasajeros, por lo que se ven en la necesidad de establecer requisitos de diseño y construcción para alcanzar este objetivo. Estas normas establecen parámetros que deben cumplir los vehículos para su homologación y la respectiva calificación de una empresa carrocera.

La empresa Carrocerías Peres requiere el análisis estructural de sus armazones mediante ensayos virtuales de impacto frontal y posterior para fomentar al mejoramiento de las técnicas de producción de la empresa, ya que se encuentra en proceso de calificación de su planta carrocera. La Empresa se encuentra ubicada en el cantón Latacunga-Parroquia Eloy Alfaro Sector El Chan, provincia de Cotopaxi.

Realizar pruebas de impacto para comprobar la seguridad pasiva de los vehículos y después informar a los consumidores el objetivo de normas europeas. A través de estos estudios se puede proponer un diseño estructural y materiales de construcción que respondan a un fenómeno de impacto, es por esta razón que la presente investigación pretende verificar el conjunto estructural a través de ensayos virtuales de impacto que permitan obtener resultados sobre el comportamiento de la carrocería basados en los requisitos de las reglamentaciones nacionales y extranjeras

vigentes.

1.3. Descripción resumida del proyecto

El proyecto de investigación tiene como finalidad la verificación de los materiales y geometrías de construcción de una carrocería de bus interprovincial de la empresa Carrocerías Peres, basado en simulación virtual de impacto frontal y posterior.

Primeramente la carrocería será modelada tridimensionalmente en un sistema CAD, para luego realizar la exportación correspondiente del modelado a un programa CAE donde se realizará la configuración de los parámetros establecidos por reglamentaciones europeas, para luego llevarse a cabo la ejecución de un ensayo virtual de impacto frontal y posterior por el método de elementos finitos (MEF) y así obtener resultados que permitan verificar los materiales y geometrías de construcción de la carrocería.

Con los resultados obtenidos se establecerán las respectivas conclusiones sobre los parámetros de prueba y la configuración estructural que presenta el armazón del bus.

1.4. Justificación e importancia

El presente proyecto de investigación contribuirá a la universidad en áreas investigativas, esperando obtener resultados que permitan generar fuentes de empleo basadas en construcción de carrocerías que brinden seguridad a los pasajeros del vehículo, además se considera que estos procesos de investigación contribuyen al mejoramiento de la matriz productiva del país.

El análisis del comportamiento de una carrocería mediante simulación de impacto frontal y posterior, tomando en consideración los parámetros de pruebas establecidos por normas Internacionales (Europeas), servirá como objetivo de mejora en los procesos de fabricación de carrocerías de la empresa privada, optimizando recursos y brindando seguridad a los ocupantes del vehículo.

1.5. Objetivos del proyecto

1.5.1. Objetivo general

Analizar la estructura 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.

1.5.2. Objetivos específicos

- Recopilar información en bases digitales y escritas que permitan sustentar la investigación.
- Analizar Normas Técnicas de Estándares Internacionales para la simulación virtual de impacto frontal y posterior de una carrocería de bus interprovincial.
- Analizar diferentes materiales utilizados en la construcción de una carrocería de bus, para determinar el material que cumple con las características y propiedades de resistencia necesaria al someterse a un fenómeno de colisión.

- Modelar la geometría en 3D de la carrocería del bus Interprovincial en un sistema CAD.
- Realizar la comparación entre geometrías de construcción de estructuras de carrocerías de bus, a fin de determinar la geometría idónea y así contribuir al desarrollo de la competencia creativa y analítica de la empresa Carrocerías Peres en lo que respecta a seguridad de pasajeros.
- Configurar y ejecutar la simulación virtual de impacto frontal y posterior por el método de elementos finitos con los parámetros definidos en la reglamentación para el ensayo de impacto.
- Obtener resultados de la prueba virtual de impacto frontal y posterior que permitan verificar y analizar las consideraciones de la geometría y materiales de construcción de la carrocería.

1.6. Metas

- Verificar los materiales y geometrías de construcción de la carrocería previa al estudio virtual de impacto frontal y posterior del bus interprovincial.
- Generar un informe basado en los resultados obtenidos para emitirlo a la empresa Carrocería Peres, proporcionando la información que fortalezca al mejoramiento de los procesos de producción de la empresa.

1.7. Hipótesis

¿Es el armazón frontal la sección que presenta mayor deformación respecto al armazón posterior una vez producida la simulación virtual de impacto?

1.8. Variables de la investigación

- Variable independiente: Análisis estructural de la carrocería por el método de elementos finitos.
- Variable dependiente: Validación estructural mediante verificación de geometrías y materiales de construcción de la carrocería.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. Carrocerías

2.1.1. Definición

La carrocería es el conjunto estructural de un vehículo donde varios elementos de seguridad y confortabilidad son adicionados al bastidor de manera fija, está destinada al transporte de personas. (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)

La función principal de la carrocería es alojar y proteger a los pasajeros del vehículo. A través de los años ha sufrido importantes transformaciones; a finales del siglo pasado y principios del actual, los automóviles se construyeron sobre carrozas de caballos de la época; después se ideó un chasis rígido sobre el que se montaban los elementos mecánicos y una carrocería diseñada para este fin. Todo ello formaba un conjunto más o menos armonioso y seguro. (Equipo de Profesores del Centro de Documentación, 2015)

2.1.2. Tipos de carrocerías

A. Chasis con carrocería separada

Como toda la estructura del vehículo, al comienzo de su historia, el diseñador del bastidor se copió de los que se empleaban en los carruajes

de la época, basado en dos largueros longitudinales, enlazados entre sí mediante travesaños. El bastidor es por tanto una estructura constituida por un armazón de vigas o largueros usualmente de acero a lo largo del vehículo, unidas mediante travesaños soldados, atornillados o remachados, dispuestos transversal o diagonalmente. (Pérez Vaca, 2011)

El elemento así formado posee una elevada resistencia y rigidez, constituyendo la base o bastidor sobre el que se montan los órganos mecánicos y la carrocería, por lo que recibe y absorbe todos los esfuerzos de flexión y torsión derivados del normal funcionamiento del motor y la marcha del vehículo. (Pérez Vaca, 2011)



Figura 1 Carrocería y chasis independientes

Fuente: (Pérez Vaca, 2011)

B. Plataforma con carrocería separada

La plataforma portante está constituida por un chasis aligerado formado por la unión, mediante soldadura por puntos, de varias chapas que forman una base fuerte y sirve a la vez de soporte de las partes mecánicas y posteriormente de la carrocería. (Pérez Vaca, 2011)

La rigidez que posee la estructura de la carrocería es proporcionada por la plataforma, la misma que integra piezas desmontables y su peso es ligero. Este tipo de carrocería puede unirse a la plataforma por medio de remaches, tornillos o mediante soldadura por puntos.

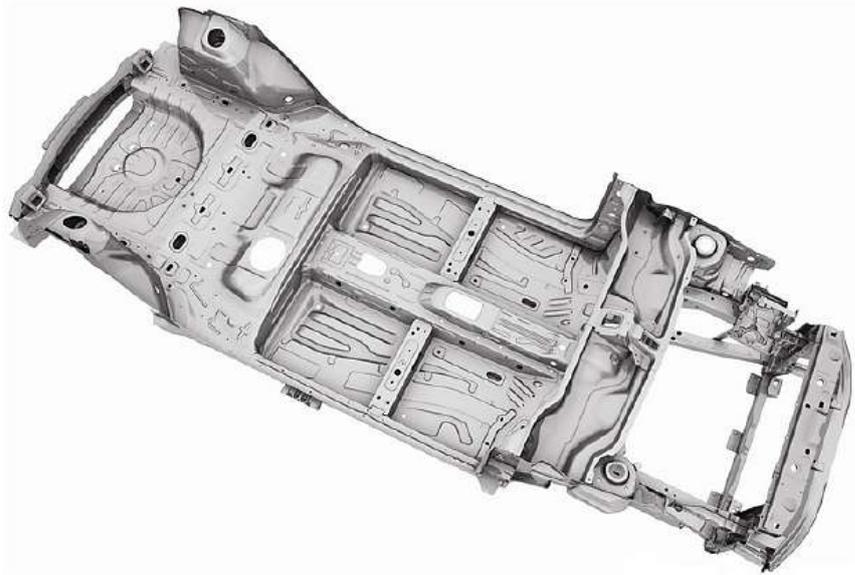


Figura 2 Bastidor de plataforma
Fuente: (Pérez Vaca, 2011)

C. Carrocería de chasis tubular

Consiste en decenas de tubos de sección circular que proporcionan la máxima resistencia, rigidez y bajo peso a la estructura; también se utiliza tubos de sección cuadrada, para facilitar la conexión a los paneles de la carrocería (Mithun, 2014)

- Los automóviles de alto rendimiento requieren mayor resistencia.
- Los chasis tubulares suelen incorporar una estructura fuerte bajo ambas puertas.
- Difícil acceso a la cabina.
- Primer vehículo del marco espacial tubular, 300LS Gullwing.

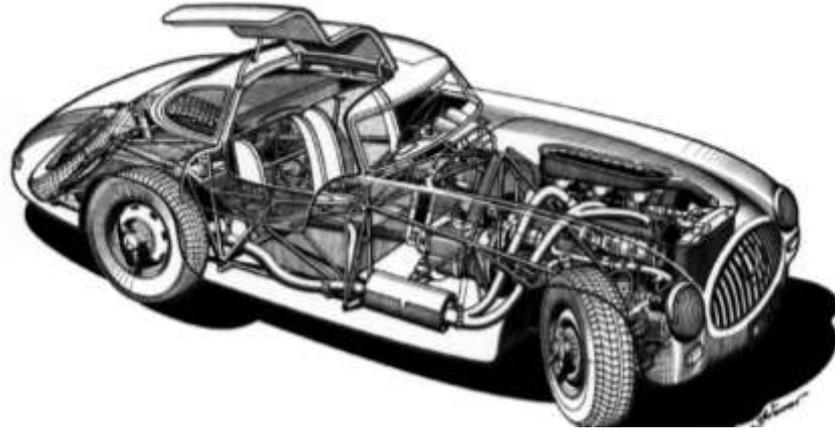


Figura 3 Mercedes Benz300SL Gullwing

Fuente: (Mithun, 2014)

Ventajas

- Muy fuerte en cualquier dirección. (Comparado con bastidores tipo escalera y bastidor monocasco del mismo peso)

Desventajas

- Muy complejo y costoso.
- Imposible para la producción en masa.
- Difícil acceso a la cabina.

D. Carrocería autoportante

En la actualidad la carrocería autoportante es la más utilizada por los fabricantes de vehículos, debido a su ligero peso y flexibilidad. La estructura del vehículo forma parte esencial del bastidor a partir de la cual se integran los sistemas mecánicos. Este tipo de carrocería se encuentra constituida por elementos de chapa de diferentes formas y espesores, las piezas que forman parte de la carrocería autoportante son de aceros de alta resistencia que se unen por soldadura, lo que hace a este tipo de vehículo más

compacto.



Figura 4 Carrocería autoportante

Fuente: (Pérez Vaca, 2011)

2.1.3. Carrocerías de buses

Un bus es un vehículo automotor diseñado para el transporte de pasajeros compuesto por un chasis y una carrocería acondicionada para el transporte de pasajeros con una capacidad especificada de asientos. (Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 043, 2014)



Figura 5 Armazón estructural de la carrocería de bus

A. Seguridad pasiva

La seguridad pasiva actúa automáticamente y tiene como finalidad reducir el número y la importancia de las lesiones causadas por accidente a los ocupantes del vehículo y demás usuarios de la vía protegiendo, dentro de lo posible, en todo momento, su integridad física. (Martín, 2007)

Los dispositivos de seguridad pasiva que se encuentran en el interior del vehículo son:

- Cinturón de seguridad.
- Tablero de instrumentos.
- Volante deformable.
- Parabrisas laminado.
- Asientos seguros y anatómicos.
- Reposacabezas adecuados.
- Cinturón de seguridad con dispositivo de tensado.
- Airbag.

a. Seguridad pasiva en la construcción de los vehículos

Para mejorar la seguridad pasiva es necesario que, en el momento del accidente, la carrocería pueda absorber la energía cinética acumulada en el vehículo. Esta energía viene determinada por la masa del vehículo multiplicada por el cuadrado de su velocidad. La violencia de un impacto es comparable con la caída libre desde un edificio (ejemplo: una colisión circulando a 100 km/h equivale a caer desde un piso 12). (Martín, 2007)

Entre los dispositivos de seguridad pasiva o secundaria en la construcción de un vehículo se pueden mencionar los siguientes:

- Carrocerías de deformación progresiva.
- Anclaje de motores.
- Parachoques.
- Barras de dirección articulares.
- Barras de protección laterales.

B. El habitáculo de seguridad

El habitáculo de seguridad de un automóvil se diseña de forma que haya dos zonas de deformación progresiva: la frontal y la posterior. La frontal alberga en casi todos los vehículos modernos el grupo propulsor (motor) y la posterior, el espacio para transportar el equipaje. Son estas dos áreas las que deben diseñarse de forma que puedan absorber la mayor parte de la energía cinética que lleva el vehículo en caso de impacto violento. (Pulido Sánchez, 2004)

El colapso del habitáculo, o la intrusión de los elementos rígidos en el mismo son las causas principales de lesiones y muertes entre los ocupantes que utilizan los sistemas de retención. (L. de Soria, 2000)

La función de la carrocería, en cuanto a seguridad pasiva, es permitir la deceleración del habitáculo de los pasajeros, en caso de colisión, lo más suavemente posible y conservando un espacio de supervivencia para los ocupantes, es decir, manteniendo la integridad del habitáculo. La absorción de energía de un choque se consigue principalmente mediante la deformación programada de algunas partes de la carrocería, y en el interior del vehículo mediante el empleo de materiales acolchados y absorbentes de energía. (L. de Soria, 2000)

Todo lo que en la carrocería del vehículo es exterior a ese espacio de supervivencia que constituye el habitáculo de seguridad, debe sacrificarse y deformarse para nuestro provecho, pues con ello se amortiguará la fuerza de la colisión. (L. de Soria, 2000)

C. Zona de supervivencia

Es el volumen que se obtiene en el compartimento de ocupantes, desplazando en línea recta el plano vertical y transversal indicado en la figura 1, de manera que se pase el punto SR de la figura 2 desde el punto SR del último asiento exterior a través del punto SR de cada asiento exterior intermedio hasta el punto SR del primer asiento exterior del ocupante. (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)

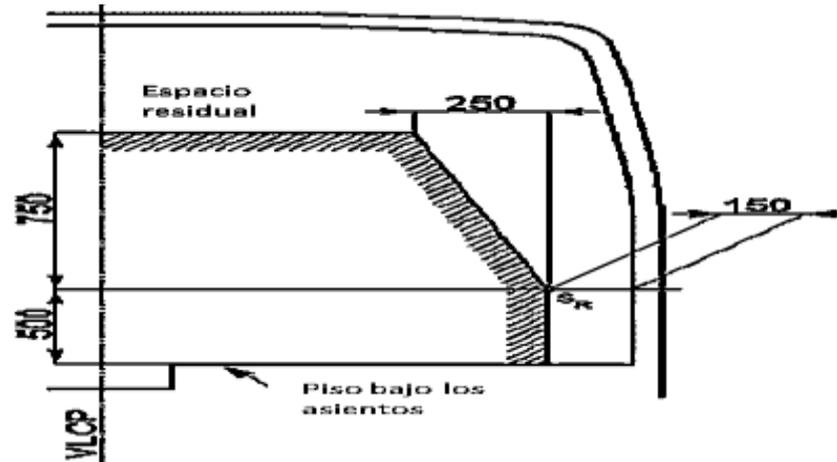


Figura 6 Vista transversal de la zona de supervivencia
Fuente: (Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas, 2006)

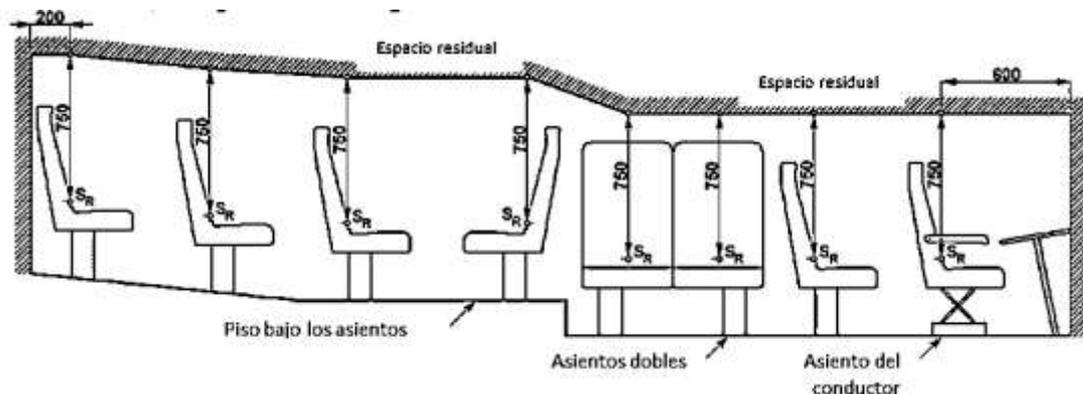


Figura 7 Vista longitudinal de la zona de supervivencia
Fuente: (Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas, 2006)

D. Resistencia de la estructura

La carrocería del bus interprovincial debe cumplir con lo siguiente:

- Debe resistir una carga estática sobre el techo, equivalente al cincuenta por ciento (50%) del peso máximo admisible para el chasis, distribuido uniformemente a lo largo del mismo, sin experimentar deformaciones en ningún punto, que superen los setenta milímetros (70 mm). (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)

- Durante el ensayo de resistencia de la estructura o ni una vez finalizado el mismo, la estructura de la carrocería debe resistir para que el espacio de supervivencia no resulte invadido. (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)

2.2. Estructura de la carrocería de un bus

2.2.1. Cargas de Diseño

- **Cargas vivas**

Se determinan de acuerdo con la Tabla 1.

Tabla 1
Cargas vivas de diseño

Tipo de servicio	Masa de un ocupante (kg)	Masa mínima de equipaje de mano por pasajero (kg)	Masa mínima de equipaje a transportarse en bodegas portaequipajes (kg)	Espacio necesario por pasajero de pie (m ²)
Urbano	70	-	-	0,16
Urbano (escolar e institucional)	70	-	-	Sin pasajeros de pie
Interurbano (Intraprovincial)	70	5	100 x Vol	0,16
Larga Distancia (Interprovincial y turismo)	70	5	100 x Vol	Sin pasajeros de pie

Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)

- **Carga de Giro (G)**

Se calcula en función de la fuerza centrífuga que se genera al ingresar el vehículo en una curva de determinado radio de giro y a cierta velocidad. La velocidad crítica debe ser considerada de al menos 90 km/h y el radio de giro se establece en función de la Tabla 2. (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)

Tabla 2
Velocidades, radios mínimos y peraltes en carretera

Velocidad (del vehículo) (km/h)	Radio de curvatura de la carretera (m)	Peralte (%)
80	250	
85	300	
90	350	
95	400	
100	450	
105	500	8
110	550	
115	600	
120	700	
125	800	7,51
130	900	6,97
135	1050	6,25
140	1250	5,49
145	1475	4,84
150	1725	4,29

Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)

- **Carga de frenado (F)**

Asume una desaceleración mayor o igual a $4 m/s^2$. (Instituto

Ecuatoriano de Normalización, 2009)

- **Carga de aceleración brusca (A_b)**

Se calcula con el mismo criterio de la carga de frenado pero en sentido contrario. (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)

- **Carga por resistencia del aire frontal (R_{af})**

Se la aplica como la fuerza del aire actuante sobre un área correspondiente a la proyección del bus en un plano perpendicular a su eje longitudinal. (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)

2.2.2. Combinaciones de cargas básicas

Las estructuras de carrocerías deben diseñarse de tal manera que resistan esfuerzos determinados en base a combinaciones de cargas básicas las cuales se describen a continuación:

- **Método ASD (Diseño por esfuerzo permisible)**

El método del Diseño por Esfuerzo Permisible (ASD), se diseña de tal manera que las tensiones calculadas por efectos de las cargas de servicio no superen los valores máximos en las especificaciones, es decir que se trabaja en función de las tensiones admisibles, donde éstas son una

fracción de las tensiones cedentes del material, ya que por basarse en el análisis elástico de las estructuras, los elementos deben ser diseñados para comportarse elásticamente. (Esmeraldas Meneses, 2016)

- **Método LRFD (Diseño por el factor de resistencia de carga)**

El método de Diseño por el Factor de Resistencia de Carga (LRFD) emplea como criterios de análisis y diseño los de la teoría plástica o una combinación de análisis y diseño plástico. En este caso, basado en estados límites de confiabilidad. Como parte del método LRFD se define la resistencia de diseño como el resultado de multiplicar la resistencia nominal por un factor de carga. (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)

2.3. Fuerzas y cargas que actúan sobre una carrocería

La carrocería de un vehículo debe contar con la capacidad de resistir cargas estáticas y cargas dinámicas con la finalidad de soportar esfuerzos y deformaciones excesivas ante la presencia de cualquier evento adverso, ningún punto de la estructura debe provocar que el espacio de supervivencia resulte invadido.

2.3.1. Cargas de flexión

Las cargas de flexión son fuerzas que provocan que las vigas que forman parte del chasis se flexionen, actúan sobre el chasis en dirección vertical hacia el centro de la tierra. La deflexión se produce por la acción del peso de la carga útil sobre la estructura y las fuerzas de reacción

provenientes de la superficie de rodamiento. La deformación es especialmente grande alrededor de la zona de pasajeros y de los compartimientos para los neumáticos y va progresivamente aumentando, dando como resultado una concentración del esfuerzo en las juntas (uniones) sobre cualquier extremo de los pilares tensionados de las ventanas laterales. (Andrade García & Méndez Canchig, 2012)

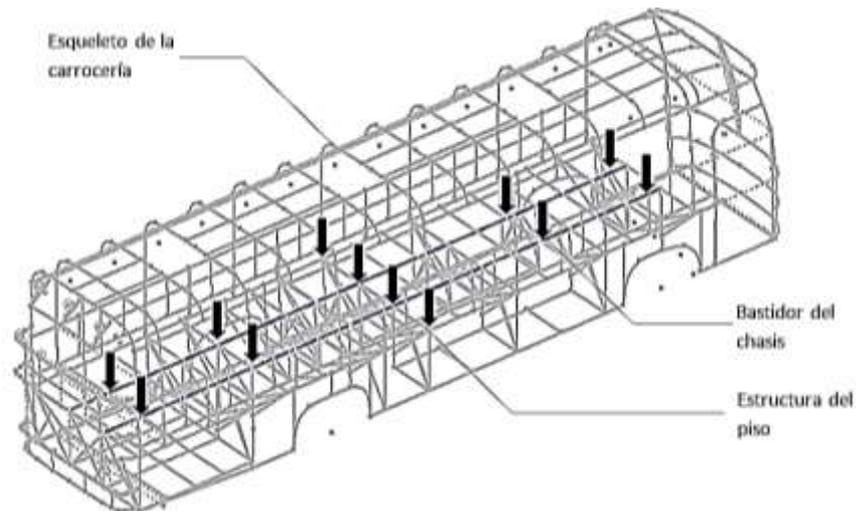


Figura 8 Cargas de flexión que actúan sobre el chasis

Fuente: (Esmeraldas Meneses, 2016)

2.3.2. Cargas de torsión

Son fuerzas que tratan de torcer la estructura de la carrocería, se presentan cuando los elementos se cargan con un momento respecto a su eje longitudinal, originando un momento torsor. Además resultan de las interacciones alternativas de la carrocería, causadas por reacciones desde la superficie de rodamiento (baches e irregularidades) y el desbalance del peso de la carga útil en las direcciones izquierda y derecha. (Andrade García & Méndez Canchig, 2012)

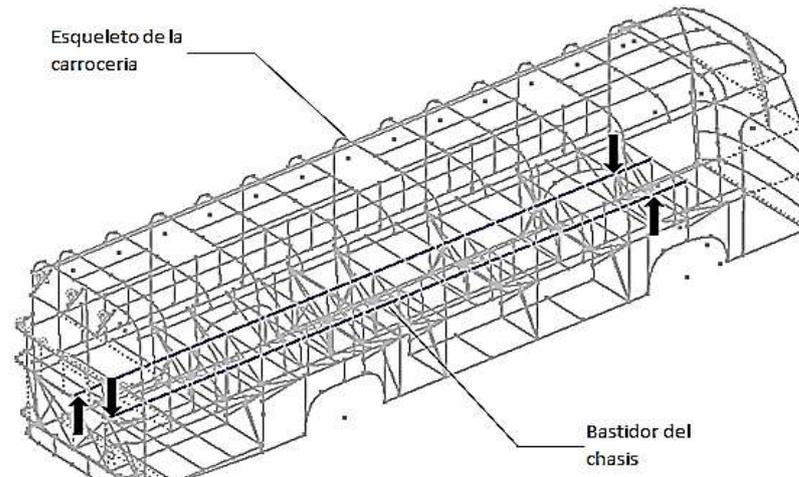


Figura 9 Cargas de torsión que actúan sobre el chasis
 Fuente: (Esmeraldas Meneses, 2016)

2.3.3. Fuerzas verticales

Las fuerzas verticales se forman a causa de las aceleraciones debidas a los movimientos de la suspensión, también al tomar curvas aparecerán fuerzas verticales que actúan sobre los costados de la carrocería y vigas sobresalientes. Las fuerzas verticales en la parte posterior de la carrocería son absorbidas por el eje posterior a través de los fuelles neumáticos. Estas fuerzas llegan a los fuelles principales a través del cuerpo de la carrocería. (Andrade García & Méndez Canchig, 2012)

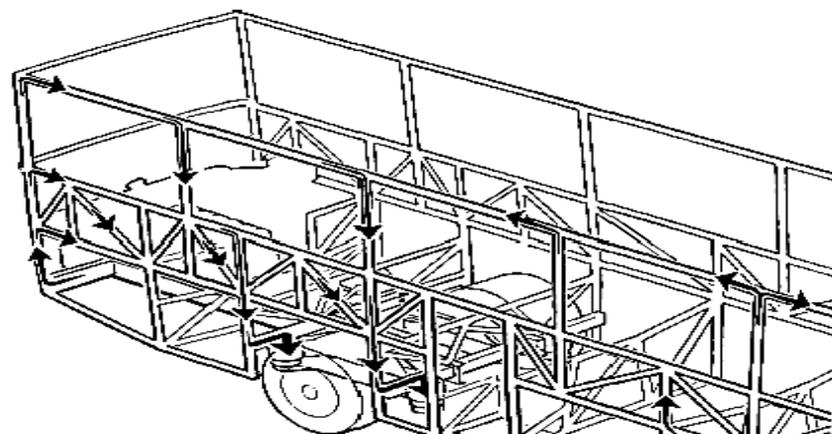


Figura 10 Fuerzas verticales actuando en la carrocería
 Fuente: (Andrade García & Méndez Canchig, 2012)

2.3.4. Fuerzas longitudinales

Las fuerzas que generan los pasajeros y el peso del equipaje al frenar el vehículo han de transmitirse a través del suelo y de los soportes de este a los largueros para descender seguidamente a las barras de reacción. Las fijaciones del suelo han de hacerse de manera que sean capaces también de resistir las fuerzas longitudinales y transversales. Las fuerzas longitudinales aparecen normalmente al frenar el vehículo, pero pueden formarse también al pasar sobre los baches del pavimento. (Andrade García & Méndez Canchig, 2012)

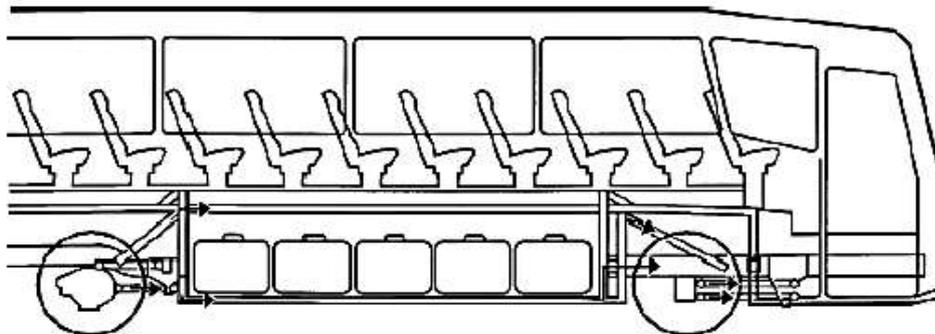


Figura 11 Fuerzas longitudinales actuando sobre la carrocería

Fuente: (Andrade García & Méndez Canchig, 2012)

2.3.5. Fuerzas transversales

Las fuerzas transversales aparecen al tomar curvas y al cambiar de carril. La sección del techo es empujada hacia fuera, siendo frenado este movimiento por la parte inferior de la carrocería y por las ruedas. Las tensiones se originan en las vigas transversales del techo y las uniones del piso. (Andrade García & Méndez Canchig, 2012)

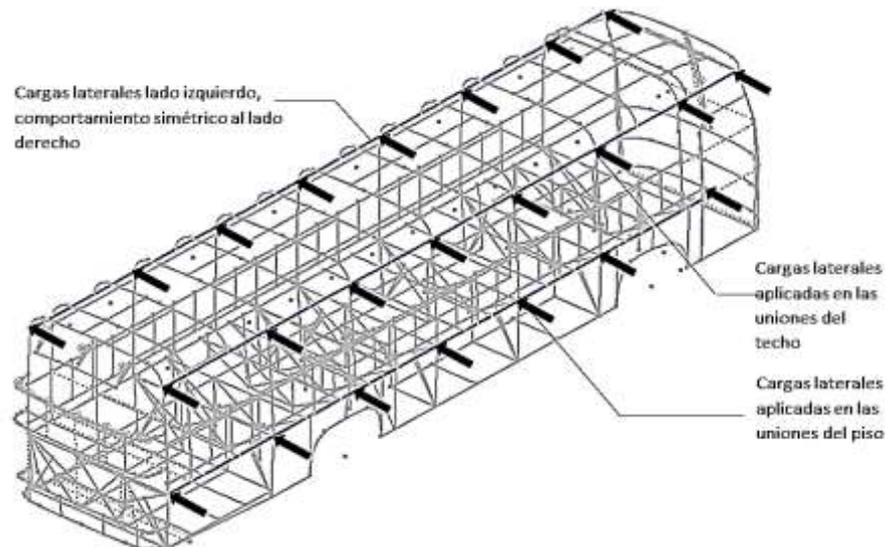


Figura 12 Cargas transversales actuando en la carrocería
 Fuente: (Esmeraldas Meneses, 2016)

2.4. Pruebas de impacto

Una prueba de impacto es una forma de prueba destructiva que usualmente se realiza para asegurar estándares de diseño en la resistencia al impacto y la compatibilidad de colisiones para automóviles o componentes relacionados. Para probar el rendimiento de la seguridad de los vehículos en diversas condiciones y durante diversos tipos de accidentes, los fabricantes de vehículos realizan pruebas de impacto de sus productos desde diferentes ángulos, diferentes lados y con diferentes objetos, incluidos otros vehículos. (Ambati, Srikanth, & Veeraraju, 2012)

2.4.1. Impacto frontal

Una colisión frontal es el tipo más común de accidente que ha ocasionado un sinnúmero de muertes. Se han realizado importantes avances en la protección frontal de un vehículo, como por ejemplo el aporte de programas de pruebas de impacto que la Administración Nacional de

Seguridad de Tráfico en Carreteras (NHTSA) comenzó a finales de los años 70 y las evaluaciones de resistencia al impacto que el Instituto de Seguros para Seguridad en las Carreteras (IIHS) comenzó en 1995. (Insurance Institute for Highway Safety, 2017)

En los impactos frontales se comprueba el comportamiento de la carrocería del vehículo y las deformaciones producidas, comprobando la energía que es capaz de absorber el vehículo sin influir al habitáculo. El test de impacto frontal se realiza a 64 km/h. El vehículo impacta contra una barrera. (Martín Valencia, 2008)

En las dos últimas décadas los requisitos de seguridad pasiva han aumentado continuamente y hoy los vehículos necesitan pasar un cierto conjunto de pruebas legalmente definidas. Además, se han implementado programas de evaluación de automóviles nuevos (NCAP, por ejemplo, el Instituto de Seguros para Seguridad en las Carreteras, IIHS) que tienen como objetivo definir pruebas que emulan casos de colisión en el mundo real, permitiendo una comparación entre diferentes vehículos. Evidentemente, existen diferencias territoriales debido a las diferencias en el uso típico de vehículos, por ejemplo, las pruebas de Estados Unidos se centran en vehículos utilitarios deportivos, furgonetas y limusinas, mientras que las pruebas de la Unión Europea se centran en los turismos normales con requisitos adicionales para la seguridad de peatones y niños. (Elmarakbi, 2014)

El nivel mínimo de protección está definido por los procedimientos de prueba gubernamentales, mientras que las NCAP han implementado pruebas adicionales de protección del consumidor para definir un nivel mejorado de protección y diferenciar aún más la seguridad del vehículo. La Tabla 3 proporciona una visión general de los actuales procedimientos de prueba legislativos, NCAP e IIHS europeos y americanos para los impactos frontales. (Elmarakbi, 2014)

Tabla 3
Pruebas de impacto europeas-estadounidenses, eventos frontales

Nombre de la prueba	ECE R94	EuroNCAP	FMVSS 208	FMVSS 208	FMVSS 301; 305	USNCAP	IIHS
Caso de carga	Frente desplazado	Frente desplazado	Frontal ancho total	Frente desplazado	30° frontal	Frontal de ancho total	Frente desplazado
Velocidad de prueba	56 km/h	64 km/h	32 – 56 km/h	40 km/h	48 km/h	56 km/h	64,4 km/h
Barrera	Progresivo	Progresivo	Rígido	Progresivo	Barrera rígida	Barrera rígida	Progresivo
Angulo de impacto	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
Superposición	40 – 50%	40 – 50%	100%	40%	100%	100%	40%
Cinturón	B	B	B & U	B	B	B	B
Símbolo							

Fuente: (Elmarakbi, 2014)

Las NCAP europeas y de los Estados Unidos, así como el IIHS, servirán de referencia para ilustrar los requisitos para la seguridad de los ocupantes. La gravedad del impacto durante una prueba se mide utilizando uno o varios dispositivos de prueba similares a los cuerpos humanos, que comúnmente se conocen como "maniqués". (Elmarakbi, 2014)

El procedimiento de prueba ECE R94 es un ensayo de certificación legal en el que el vehículo se acelera a 56 km/h y en una barrera deformable que cubre el 40% de la sección frontal. El correspondiente EuroNCAP emplea velocidades de prueba incrementadas. Las pruebas de certificación legal para los Estados Unidos se definen en el protocolo de prueba FMVSS208. Un aspecto particularmente notable de estas pruebas es el hecho de que el vehículo tiene que pasar una prueba donde el maniquí no está atado. Los FMVSS301, 305 son procedimientos de prueba diseñados específicamente para probar vehículos híbridos y eléctricos para su seguridad eléctrica, y existen procedimientos de prueba similares en Europa. El USNCAP correspondiente emplea una configuración similar al protocolo de prueba legal, pero sólo prueba a alta velocidad, mientras que el IIHS (un segundo protocolo de protección del consumidor) emplea una configuración de barrera similar al EuroNCAP pero con diferentes requisitos y condiciones de prueba. (Elmarakbi, 2014)



Figura 13 Prueba de impacto frontal EuroNCAP

Fuente: (EuroNCAP, 2015)

2.4.2. Impacto posterior

En los impactos posteriores se estudia el comportamiento del reposacabezas y del depósito de combustible y sus canalizaciones. El vehículo recibe un impacto mediante una carretilla móvil deformable a 35 km/h. En este tipo de pruebas no deben producirse deformaciones importantes en el habitáculo. Las puertas deben poder abrirse, y el maletero no debe introducirse en el habitáculo. También hay otra prueba basada en el impacto contra un poste fijo. (Martín Valencia, 2008)



Figura 14 Impacto posterior a un vehículo según EuroNCAP

Fuente: (Martín Valencia, 2008)

2.5. Normativa Internacional para impacto frontal y posterior

Existen una serie de programas de pruebas de impacto que establecen requisitos o parámetros que proporcionan una fuente de información en relación al rendimiento de seguridad que deben presentar los vehículos nuevos y usados basados en datos de accidentes del mundo real. Ejemplos de estas entidades son las siguientes:

- Regulación ECE R94 (Impacto frontal).
- Regulación ECE R32 (Impacto posterior).
- EuroNCAP.
- El Instituto de Seguros para Seguridad en las Carreteras (IIHS).
- El Programa de Evaluación de Automóviles Nuevos Australianos.
- JapNCAP.
- NHTSA.
- Etc.

Para el desarrollo del presente proyecto se utilizará los parámetros establecidos por la Comisión Económica para Europa ECE R94 y ECE R32.

2.5.1. Regulación ECE R94

- **Velocidad de prueba**

La velocidad del vehículo en el momento del impacto será de 56 km/h. No obstante, si el ensayo se realizara a una velocidad de impacto mayor y el vehículo cumpliera los requisitos, el ensayo se considerará satisfactorio.

- **Estado de la estructura**

La estructura ensayada deberá ser representativa de la producción en serie de los vehículos de que se trate. Algunos componentes pueden ser reemplazados o retirados cuando tal reemplazo o remoción claramente no tiene ningún efecto en los resultados de la prueba.

- **Tiempo base**

Se registrará una base de tiempo y deberá dar por lo menos 1/100 s con una precisión del 1%.

2.5.2. Regulación ECE R32

El propósito de la prueba es simular las condiciones de impacto posterior por otro vehículo en movimiento. El ensayo debería permitir comprobar si los vehículos cumplen los requisitos definidos en el apartado reglamento relativos al comportamiento de la estructura del habitáculo en una colisión posterior.

- **Propulsión del impactador**

El impactador puede ser asegurado a un carro (barrera móvil) o formar parte de un péndulo.

- **Disposiciones especiales cuando se utilice una barrera móvil**

Si el impactador está asegurado a un carreta (barrera móvil) por un elemento de sujeción, éste debe ser rígido e incapaz de ser deformado por

el impacto; el carro deberá ser capaz de moverse libremente en el momento del impacto y no estar sujeto a la acción del propulsor.

La velocidad del impacto será entre 35 y 38 km/h.

El peso total (masa) del carro y del impactador será de 1.100 ± 20 kg.

- **Disposiciones especiales cuando se utilice un péndulo**

La distancia entre el centro de la superficie de impacto y el eje de rotación del péndulo no debe ser inferior a 5 m. El impactador debe ser de acero con dimensiones: 2500 mm de ancho y 800 mm de alto.

El impactador estará libremente suspendido por los brazos rígidos firmemente sujetos a él. El péndulo así constituido será sustancialmente incapaz de ser deformado por el impacto.

En el péndulo se incorporarán engranajes de detención para evitar cualquier impacto secundario del impactador en el vehículo de ensayo.

En el momento del impacto la velocidad del centro de percusión del péndulo estará entre 35 y 38 km/h.

- **Estado del vehículo sometido a prueba**

El vehículo podrá ponderarse en una medida que no exceda del 10% de su peso en vacío sin carga con pesos adicionales fijados rígidamente a la estructura de tal manera que no afecten al comportamiento de la estructura del habitáculo durante el ensayo.

2.6. Materiales utilizados en la construcción de la carrocería

Los vehículos anteriores a 1985 eran construidos con materiales que contenían una gran cantidad de hierro para tratar de hacerlos más resistentes a los impactos, pero a su vez eran vehículos muy pesados, gastaban más combustible y además la fuerza del impacto no era absorbida por la estructura sino transmitida a los ocupantes. A partir de 1985 los fabricantes empiezan a incorporar tanto al chasis como a la carrocería unos nuevos materiales y aleaciones basadas en aceros que permiten una mejor resistencia al impacto, son más livianos y absorben mucho mejor la fuerza del impacto. Por lo tanto para garantizar la seguridad de los pasajeros del vehículo, los fabricantes han tratado de crear un especie de jaula de protección para que el impacto no afecte a los pasajeros, lo cual de alguna forma es bastante ventajoso. (Aranda Pazmiño & Dután Amay, 2009)

Los materiales utilizados en la empresa Carrocerías Peres para la construcción de armazones estructurales de buses son los siguientes:

- Acero ASTM A500
- Acero Galvanizado

2.6.1. Acero ASTM A500

El acero ASTM A500 se encuentra disponible en tubos de sección circular hueca HSS formados en frío en tres grados, y también en tubos HSS formados en frío, de sección cuadrada y rectangular. Además posee una capa de recubrimiento de óxido negro para evitar la corrosión. Se emplean en construcción de estructuras carroceras, puentes, etc. (AHMSA, 2014)

Aspectos generales

1. Resistencia.
2. Ductilidad.
3. Soldabilidad.
4. Tenacidad.

La Tabla 4 muestra las propiedades mecánicas del material empleado:

Tabla 4
Propiedades mecánicas del Acero ASTM A500

Módulo de elasticidad	E= 200 GPa
Módulo de elasticidad por cortante	G=76,923 GPa
Resistencia a la fluencia	Fy=320 MPa
Resistencia última	Fu=405 MPa
Porcentaje de elongación	21%-25%

Fuente: (AHMSA, 2014)

2.6.2. Acero Galvanizado

El acero galvanizado se obtiene mediante el proceso de galvanización. Este consiste en un procedimiento que protege al acero de la corrosión,

mediante el cual el mismo se recubre con zinc para evitar su oxidación. El proceso incluye sumergir las piezas de hierro y acero en zinc fundido, mediante una reacción metalúrgica entre el hierro y el zinc se forman una serie de aleaciones de zinc-hierro que crean una fuerte unión entre el acero y el recubrimiento. (Páginas Amarillas Cantv, 2014)

Características:

- Protección integral de las piezas (interior y exteriormente).
- El recubrimiento posee mayor dureza y resistencia que cualquier otro tipo de recubrimiento.
- Con el paso del tiempo se forma una fina capa de óxido de zinc que actúa como aislante del galvanizado.
- No necesita mantenimiento.
- Fácil de pintar.

Tabla 5
Propiedades mecánicas Acero Galvanizado

Propiedades mecánicas			
Calidad	Fluencia (MPa)	Resistencia (MPa)	% Elongación
CS Comercial	-	-	25
SS G33 (230)	230	310	20
SS G40 (275)	275	380	16
SS G50 (350)	350	450	12

Fuente: (Páginas Amarillas Cantv, 2014)

2.7. Especificaciones de perfiles utilizados en la carrocería

Las carrocerías de buses requieren de perfiles con propiedades de alta resistencia o tenacidad con la finalidad de que la estructura pueda soportar

las cargas estáticas y dinámicas presentes al estar en movimiento.



Figura 15 Configuración de perfiles estructurales

Fuente: (ACEROTEX, 2012)

En la tabla que se muestra a continuación se incluyen perfiles utilizados en la carrocería del bus y su respectivo material.

Tabla 6
Especificación de perfiles en la carrocería

Unidad Estructural	Designación (mm)	Material Acero
Piso (Plataforma)	Tubo cuadrado 50*50*3	ASTM
	Tubo rectangular 100*50*3	A500/Acero
	Tubo rectangular 60*40*3	Galvanizado
	Perfil C 100*50*50*3	
Laterales	Tubo cuadrado 50*50*2	ASTM
	Perfil C 50*25*25*2	A500/Acero
	Perfil L 50*50*3	Galvanizado
	Perfil Zócalo 216*39*28*23*2	
Techo	Tubo cuadrado 50*50*2	ASTM
	Tubo rectangular 50*25*2	A500/Acero
	Perfil Z	Galvanizado
Frontal	Tubo cuadrado 50*50*2	ASTM
	Tubo cuadrado 40*40*2	A500/Acero Galvanizado
Posterior	Tubo cuadrado 50*50*2	ASTM
	Tubo cuadrado 40*40*2	A500/Acero Galvanizado

2.8. Sistema CAD

Para el modelado de la carrocería del bus interprovincial se utiliza un software CAD.

2.8.1. Definición de un sistema CAD

El software CAD es una tecnología que permite realizar un trabajo de modelado más fácil, permite crear, editar o reparar geometrías sin preocuparse por la tecnología subyacente. Trabajar con el software de modelado 3D se hace rápido, fácil, flexible y gratificante, sin importar en qué parte del flujo de trabajo lo necesite. Un sistema CAD permite la manipulación de la geometría de forma más rápida, sencilla y más intuitiva, lo que resulta en menos tiempo dedicado a la geometría y más tiempo dedicado a las funciones primarias del trabajo como la fabricación, el análisis y el modelado de conceptos.

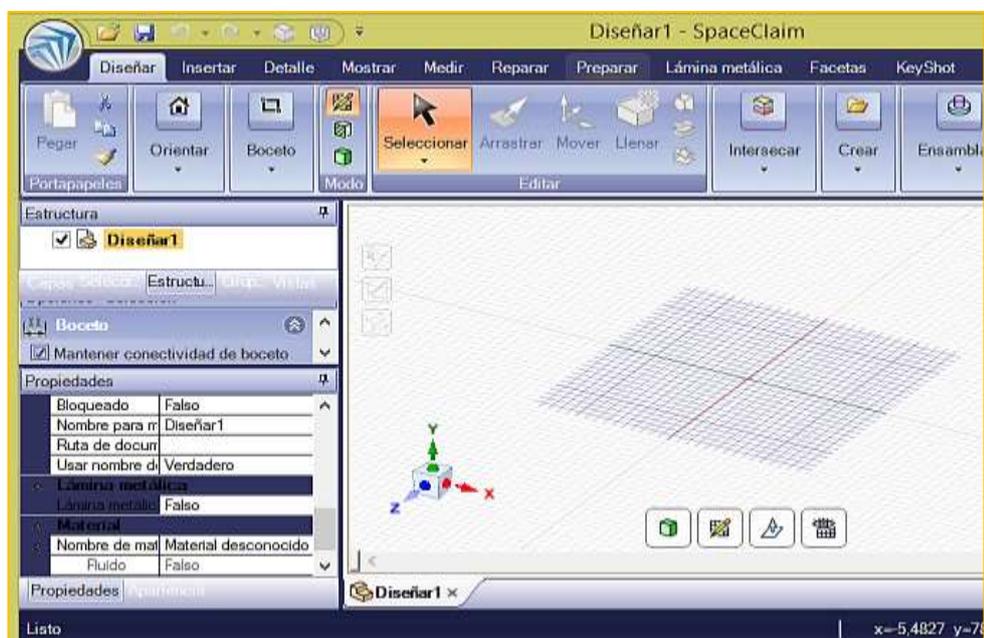


Figura 16 Interfaz del Software CAD

2.9. Sistema CAE

En las últimas décadas, los resultados de simulación de impactos de vehículos han alcanzado altos niveles de confianza. Sin embargo, la simulación de impacto por medio de Sistemas CAE sigue siendo costosa desde el punto de vista computacional, aunque es de uso común. El modelo de sustitución o la superficie de respuesta basada en la optimización de diseño se han adoptado ampliamente como un proceso común en la industria automotriz y a gran escala, los modelos de alta fidelidad a menudo son necesarios. (Zhu, Shi, & Yang, 2012)

2.9.1. Descripción de un Sistema CAE

Un software CAE es un programa de simulación explícito utilizado por el usuario experimentado y altamente técnico. Contiene formulaciones de contacto, modelos de material y otros controles pueden ser usados para simular modelos complejos con control sobre todos los detalles del problema.

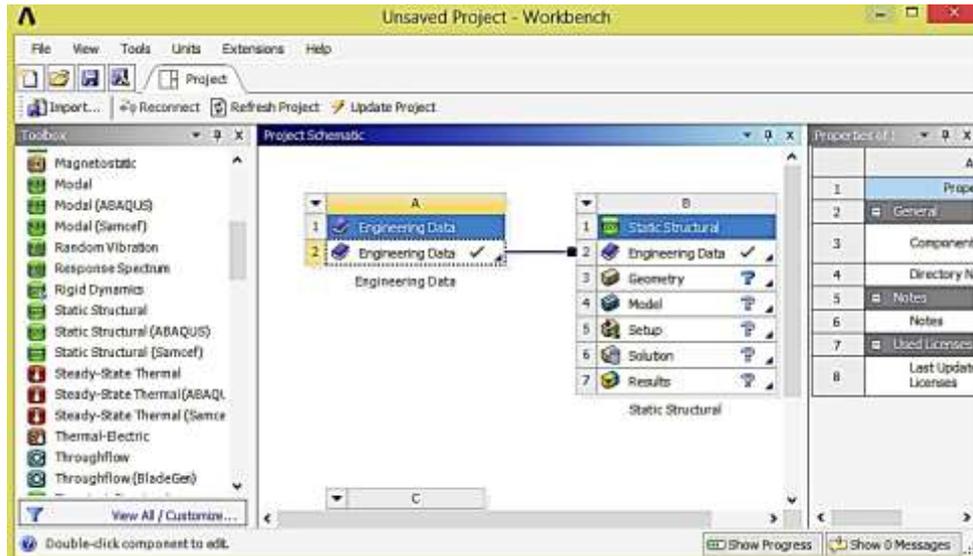


Figura 17 Interfaz del sistema CAE

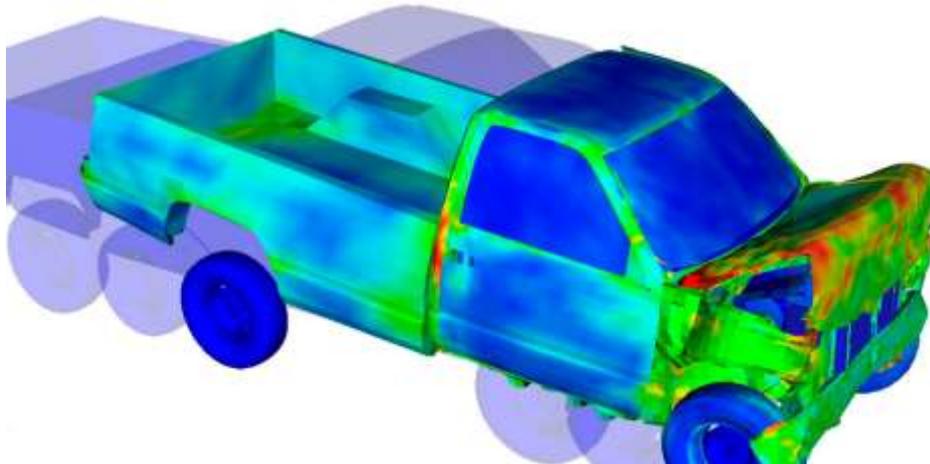


Figura 18 Análisis de simulación por el MEF

Fuente: (DirectIndustry, 2017)

2.10. Método de elementos finitos (MEF)

El método de elementos finitos, consiste en sustituir la estructura o el medio en análisis con infinitos grados de libertad, por un modelo matemático compuesto por un conjunto finito de elementos independientes denominados elementos finitos unidos entre sí a través de un número finito de puntos o nodos. La solución del equilibrio del modelo es reducida a la

solución de un sistema finito de ecuaciones de equilibrio nodal, en el que intervenga un número finito de variables. (Cepeda Miranda, 2006)

El esfuerzo varía a lo largo del continuo de cualquier pieza. Al dividirla en un número finito de elementos discretos, conectados en sus nodos (una malla), se obtiene una aproximación al esfuerzo y a la deformación dentro de la pieza para cualquier conjunto dado de restricciones y cargas aplicadas en varios nodos de la estructura. La aproximación se mejoraría mediante más elementos de menor tamaño, a expensas del incremento en el tiempo de procesamiento. Con las velocidades de las computadoras actuales éste es un problema menor comparado con los que se enfrentaban los primeros días del MEF. Una pieza del problema del analista es elegir el tipo adecuado, el número y la distribución de elementos para optimizar el equilibrio entre exactitud y tiempo de procesamiento. Es posible utilizar elementos más grandes en regiones de la pieza donde el gradiente de esfuerzo (pendiente) varía con lentitud. En regiones donde el gradiente de esfuerzo cambia rápidamente, como las cercanas a concentraciones de esfuerzos, o a cargas aplicadas o restricciones, se requiere una malla más fina. (Norton L, 2011)

El procedimiento usado para el análisis estructural, en muchos paquetes comerciales de software de MEF, es el método directo de rigidez (DSM) que utiliza elementos rígidos para calcular los desplazamientos nodales y las fuerzas internas que resultan de un conjunto de cargas externas aplicadas y condiciones de frontera. Las deformaciones se determinan a partir de los desplazamientos; y los esfuerzos, a partir de las deformaciones mediante la ley de Hooke. La Figura 19 muestra un diagrama de cuerpo libre del elemento finito estructural más simple posible: un resorte lineal en una dimensión. Éste posee una rigidez característica (constante de resorte) $k_h = f/\Delta u$, de modo que el desplazamiento crea una fuerza nodal. Suponga desplazamientos positivos u_i y u_j y sume las fuerzas en cada nodo. (Norton L, 2011)

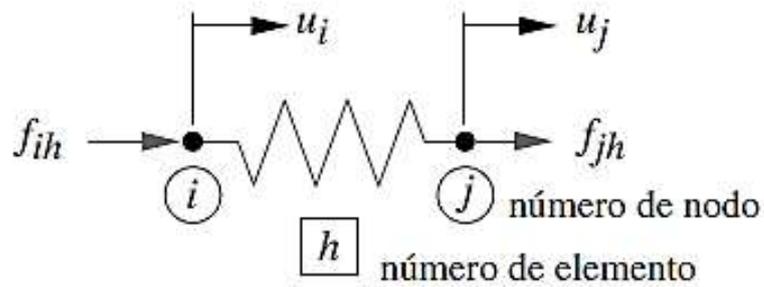


Figura 19 Diagrama de cuerpo libre del elemento

Fuente: (Norton L, 2011)

$$f_{ih} = k_h u_i - k_h u_j \quad \text{Ecuación 1.}$$

$$f_{jh} = -k_h u_i + k_h u_j \quad \text{Ecuación 2.}$$

Si se pone esto en forma de matriz:

$$\begin{bmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h & k_h \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{ih} \\ f_{jh} \end{Bmatrix} \quad \text{Ecuación 3.}$$

Lo cual se escribe en notación matricial como:

$$[k]\{d\} = \{f\} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde k es la matriz de rigidez, d es el vector de desplazamiento nodal del elemento y f es el vector de las fuerzas internas del elemento.

La Figura 20 muestra dos de estos elementos simples conectados entre sí para crear una malla de elemento finito. El elemento 1 está fijo a la estructura, lo cual crea una restricción de condición de frontera, mientras el elemento 2 tiene una fuerza externa aplicada en el nodo 3. Al aplicar la ecuación 1 a tales elementos se tiene:

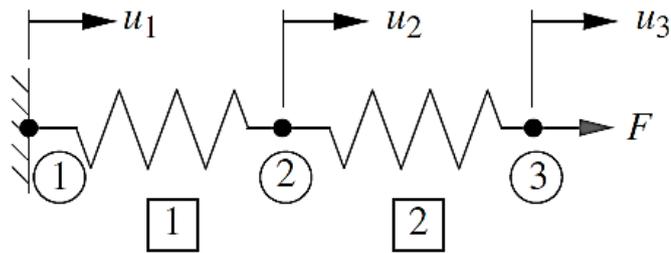


Figura 20 Malla de 2 elementos y 3 nodos
Fuente: (Norton L, 2011)

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \end{Bmatrix}$$

Ecuación 5.

$$\begin{bmatrix} k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{22} \\ f_{32} \end{Bmatrix}$$

Las fuerzas en la ecuación 5 son las fuerzas internas del elemento que actúan sobre los nodos. Para lograr el equilibrio, la suma de las fuerzas nodales debe ser igual a las fuerzas externas aplicadas en el nodo. Sea F_i la fuerza externa en cada nodo, donde i es el número de nodo. Entonces, al sumar las fuerzas en cada nodo se tiene:

$$\text{En el nodo 1} \quad f_{11} = F_1$$

$$\text{En el nodo 2} \quad f_{21} + f_{22} = F_2$$

$$\text{En el nodo 3} \quad f_{32} = F_3$$

Ecuación 6.

Sustituyendo las expresiones de las fuerzas nodales internas de la ecuación 5 en la ecuación 6.

$$k_1 u_1 - k_1 u_2 = F_1$$

$$-k_1 u_1 + (k_1 + k_2) u_2 - k_2 u_3 = F_2$$

$$-k_2 u_2 - k_2 u_3 = F_3$$

Ecuación 7.

Y poniendo el resultado en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ & -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \quad \text{Ecuación 8.}$$

O bien:

$$[K]\{D\} = \{F\}$$

Se conocen las fuerzas aplicadas y la rigidez. Se calcularán los desplazamientos nodales, lo cual requiere la multiplicación de ambos lados por la inversa de $[K]$. Sin embargo, esta $[K]$ tiene un recíproco singular, de modo que no hay una solución única. Se debe a que el sistema de ecuaciones (Ecuación 7) tiene un grado de libertad (DOF) cinemático (cuerpo rígido) y puede estar en equilibrio en cualquier ubicación de su universo unidimensional. Todavía no se ha considerado la atadura rígida a la estructura del nodo 1. Para resolver un problema estático con MEF, se deben eliminar todos los grados de libertad cinemáticos, lo cual se logra aplicando las condiciones de frontera adecuadas. Es posible fijar el sistema haciendo el desplazamiento del nodo 1 (u_1) igual a cero, como una condición de frontera. Los ceros de la primera columna de la matriz de rigidez dejan con 3 ecuaciones y 2 incógnitas. Si no se conoce la fuerza de reacción F_1 , se puede eliminar la primera ecuación y utilizar las dos restantes para despejar los desplazamientos desconocidos. Además, la Figura 20 muestra que no se aplica fuerza externa en el nodo 2, en tanto que F_2 es igual a cero. (Norton L, 2011)

La sustitución da como resultado:

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F \end{Bmatrix} \quad \text{Ecuación 9.}$$

La matriz $-k$, que se conoce como matriz de rigidez reducida, tiene una

inversa no singular, de modo que la ecuación se resuelve para los desplazamientos desconocidos. Después de que se obtienen los desplazamientos, se calculan las fuerzas internas sobre cada elemento con las ecuaciones 5 y 6. Las ecuaciones que incluyen las fuerzas de reacción desconocidas y se eliminaron para reducir la matriz, se resuelven ahora para determinar las fuerzas de reacción. Las deformaciones se determinan al diferenciar los desplazamientos, mientras el esfuerzo se obtiene a partir de las deformaciones y las propiedades del material. La mayoría de resolvedores calculan y despliegan tanto los esfuerzos principales como los de von Mises, así como la deformación y el desplazamiento. (Norton L, 2011)

2.10.1. Tipos de elementos

Los elementos son uni, bi o tridimensionales, llamados también elementos de línea, superficie y volumen, respectivamente. En un elemento lineal triangular o tetraedro, la función de desplazamiento a través del elemento es una línea recta y la deformación es constante. Los esfuerzos se determinan a partir de la deformación y el módulo de elasticidad del material. Los triángulos lineales y tetraedros también tienen esfuerzo constante a través de su dimensión. Los triángulos cuadráticos, tetraedros y ladrillos tienen funciones parabólicas de desplazamiento y una distribución de deformación lineal (y esfuerzo) dentro del elemento, los mismos que ofrecen mejores estimaciones de esfuerzo. (Norton, 2011)

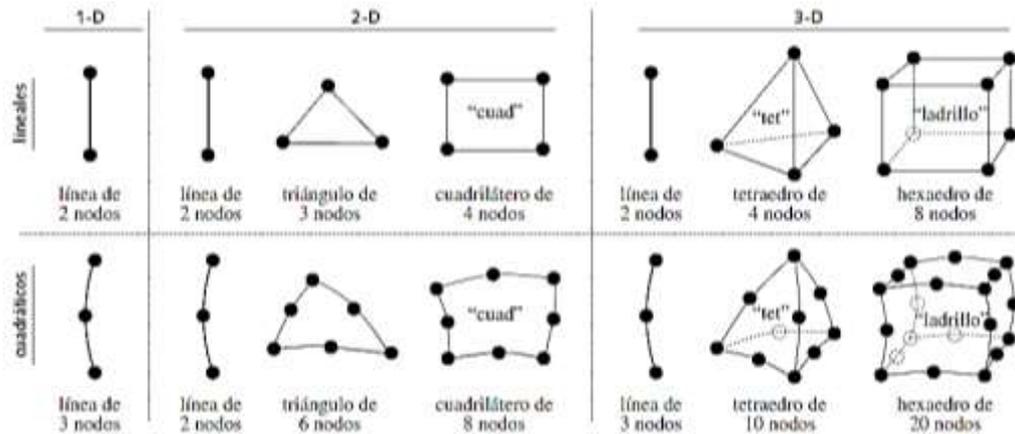


Figura 21 Elementos finitos comunes

Fuente: (Norton, 2011)

2.10.2. Mallado

En los comienzos del MEF, mallar una pieza requería un trabajo enorme. Ahora, los automalladores y preprocesadores de los paquetes de MEF la hacen una tarea muy fácil. Muchos paquetes importan la geometría de la pieza de un programa de CAD de modelado espacial y automallan la pieza. La mayoría de los automalladores sustituyen la malla 2D con cuadriláteros lineales o una malla con cuadriláteros dominantes y triángulos adicionales en las regiones donde lo requiere la forma de la pieza. Muchos automalladores sólo pueden mallar modelos 3D con elementos tetraédricos. Los tetraedros lineales han demostrado ser menos adecuados para la estimación de esfuerzos; sin embargo, los tetraedros de orden superior son aceptables. Un paquete de MEF también tiene un preprocesador que permite el mallado manual de la pieza con los elementos elegidos. Se logra un mejor resultado en el mallado 3D con una combinación de ladrillos de 8 nodos y cuñas de 6 nodos, o aumentando el orden de los elementos tetraédricos, aun cuando ello incremente el tiempo de procesamiento. Esto se está volviendo menos problemático en la medida en que las computadoras son más rápidas. (Norton L, 2011)

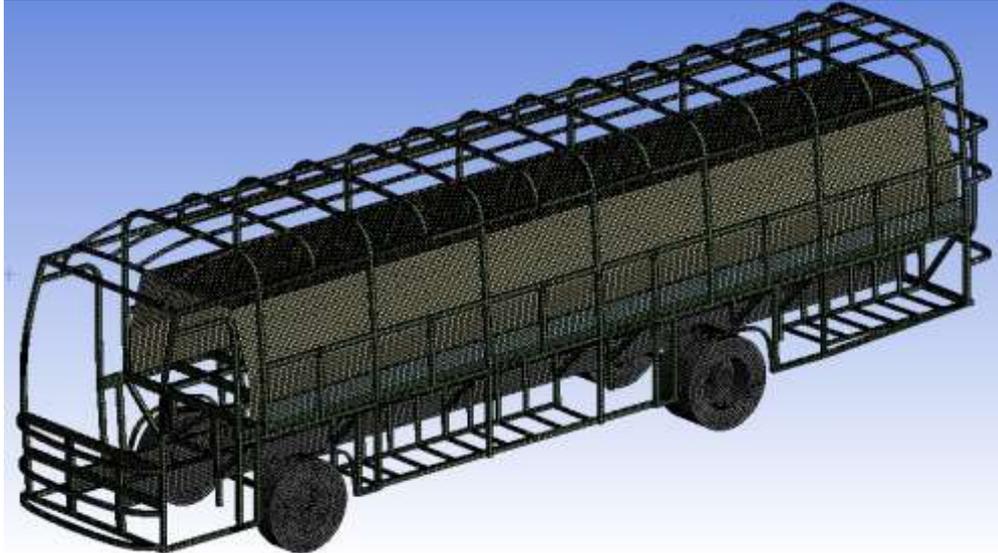


Figura 22 Mallado de la carrocería de un bus

CAPÍTULO III

INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR APLICADA A LA CARROCERÍA DEL BUS

3.1. Construcción del modelo

La elaboración del modelado de la carrocería y su excelente estructuración permitirá el éxito del ensayo virtual y la confiabilidad de los resultados dados por el software. Los elementos estructurales de la carrocería son modelados como elementos tipo cáscaras (shell) debido a que presentan una mejor estimación de esfuerzos y deformaciones.



Figura 23 Modelado de la carrocería

3.1.1. Especificación de las propiedades de los materiales

Una vez realizado la exportación del modelado del bus al software LS-DYNA para los ensayos virtuales de impacto frontal y posterior, se procede a realizar la asignación de materiales con las propiedades mecánicas correspondientes a la carrocería, en las dos figuras siguientes se muestran los materiales aplicados al armazón del bus para las pruebas pertinentes.

Tabla 7
Configuración del acero ASTM A500

3	ACERO ASTM A500	General Materials Non-linear.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, D 2, Table 5-110.1
Properties of Outline Row 3: ACERO ASTM A500			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	<input checked="" type="checkbox"/> Density	7850	kg m ⁻³
3	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's Modulus and Poiss...	
5	Young's Modulus	2E+11	Pa
6	Poisson's Ratio	0,3	
7	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
8	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
9	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> Field Variables		
10	Temperature	Yes	
11	Shear Angle	No	
12	Degradation Factor	No	
13	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> Bilinear Isotropic Hardening		
14	Yield Strength	320	MPa
15	Tangent Modulus	1,45E+09	Pa
16	<input checked="" type="checkbox"/> Tensile Ultimate Strength	405	MPa
17	<input checked="" type="checkbox"/> Specific Heat	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹

Tabla 8
Configuración del acero galvanizado

4	ACERO GALVANIZADO	General Materials Non-linear.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, D 2, Table 5-110.1
Properties of Outline Row 4: ACERO GALVANIZADO			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	<input checked="" type="checkbox"/> Density	7850	kg m ⁻³
3	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's Modulus and Poiss...	
5	Young's Modulus	2E+11	Pa
6	Poisson's Ratio	0,3	
7	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
8	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
9	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> Field Variables		
10	Temperature	Yes	
11	Shear Angle	No	
12	Degradation Factor	No	
13	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> Bilinear Isotropic Hardening		
14	Yield Strength	350	MPa
15	Tangent Modulus	1,45E+09	Pa
16	<input checked="" type="checkbox"/> Tensile Ultimate Strength	450	MPa
17	<input checked="" type="checkbox"/> Specific Heat	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹

3.2. Aplicación de condiciones de frontera

La aplicación de cargas a un modelo es similar al problema de aplicación correcta de las condiciones de frontera. Con frecuencia, se describen las cargas en modelos de forma cerrada como si estuvieran aplicadas en un punto. Esto también se logra con el FEA, ya que una carga es posible aplicarla en un nodo individual. Sin embargo las cargas reales están distribuidas sobre una porción finita de la pieza. Si en realidad se aplicara la carga en un punto, el esfuerzo local ahí sería infinito. (Norton, 2011)

3.2.1. Masa distribuida

La masa distribuida aplicada sobre la carrocería del bus es de 9495.2 kg, este dato representa la masa de compensación del resto de componentes que forman el bus. En la Figura 24 se muestra la masa de resarcimiento aplicada a la carrocería.

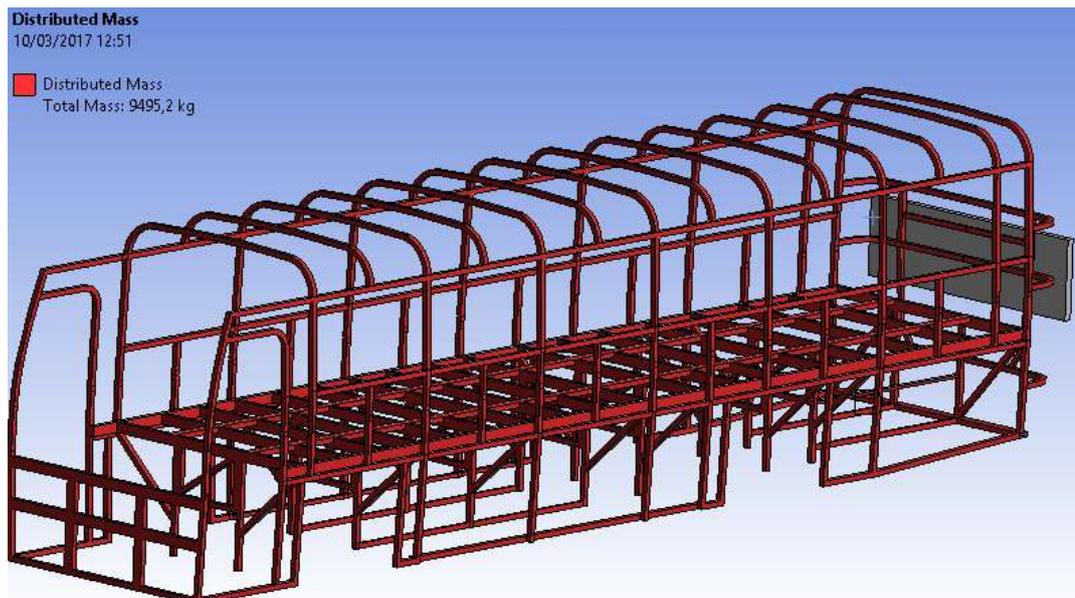


Figura 24 Masa distribuida sobre la carrocería

3.2.2. Velocidad inicial

La velocidad de impacto se aplica de acuerdo a lo establecido en la norma ECE R94 y ECE R32 para impacto frontal y posterior respectivamente, descrito en los apartados 2.5.1 y 2.5.2.



Figura 25 Dirección de la velocidad (Impacto frontal)

3.3. Configuración para la simulación por el Método elementos finitos

Para llegar a la convergencia de resultados del estudio basado en la simulación virtual de impacto frontal y posterior, la generación de malla para la formación de elementos finitos es muy importante, pues con este método se realiza el análisis del conjunto estructural para la validación de los resultados obtenidos.

3.3.1. Generación de malla

Los elementos finitos formados mediante la generación de malla de la

carrocería son de tipo cuadriláteros, pues como se menciona anteriormente este tipo de elementos presentan una estimación más exacta de esfuerzos y deformaciones; esto se puede observar en los resultados que se obtengan de la simulación virtual de impacto del armazón del bus. El número de elementos obtenidos en el proceso de malla es de 91480. En la Figura 29 se observa los elementos finitos formados en la carrocería.

A. Tipos de malla

Los diferentes tipos de malla son creados por el software donde se ejecuta la simulación basada en elementos finitos, esto ocurre al generarse la malla de un modelo, el programa genera una mezcla de elementos sólidos, de vaciado, de muelle y de contacto sobre la base de la geometría creada.

a. Malla sólida

Este tipo de malla es creado en elementos sólidos, donde los elementos predominantes son sólidos tetraédricos 3D. Los elementos tetraédricos son apropiados para objetos de gran tamaño. (DASSAULT SYSTEMES, 2017)

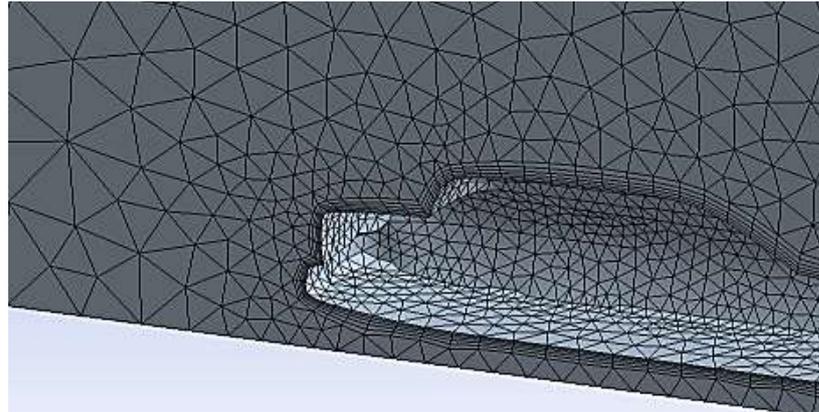


Figura 26 Malla sólida de un objeto

Fuente: (© 2015 ANSYS, Inc., 2014)

b. Malla de vaciado

El programa crea automáticamente una malla de vaciado para chapas metálicas con espesor uniforme y geometrías de la superficie. Para las chapas metálicas, la malla se crea automáticamente en la superficie media. El programa extrae el espesor de vaciado a partir del espesor de chapa metálica. (DASSAULT SYSTEMES, 2017)

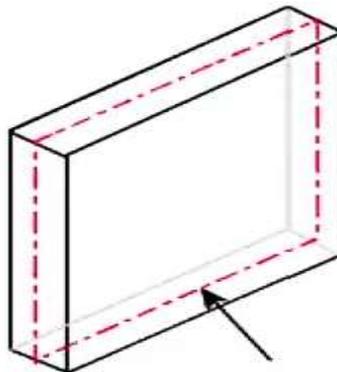


Figura 27 Superficie media de chapa metálica

Fuente: (DASSAULT SYSTEMES, 2017)

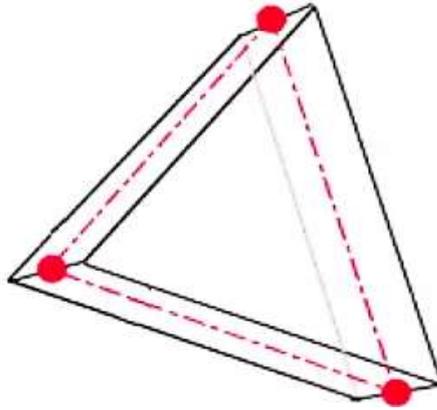


Figura 28 Elemento de vaciado creado en la superficie media
Fuente: (DASSAULT SYSTEMES, 2017)

En el caso de las superficies, el programa coloca la malla en la superficie (plano medio del vaciado).

c. Malla de viga

El programa utiliza automáticamente una malla de viga e identifica juntas para miembros estructurales que se tocan o interfieren y miembros estructurales que no se tocan dentro de una cierta distancia (tolerancia). Un elemento de viga es un elemento de línea definido por dos puntos finales y una sección transversal. Los elementos de viga pueden resistir cargas axiales, de flexión, cortantes y de torsión. Las cabezas de armadura sólo resisten cargas axiales. Si se une con piezas soldadas, el software define las propiedades transversales y detecta las juntas. (DASSAULT SYSTEMES, 2017)

d. Malla mixta

El programa utiliza automáticamente una malla mixta cuando hay diferentes geometrías en el modelo. (DASSAULT SYSTEMES, 2017)

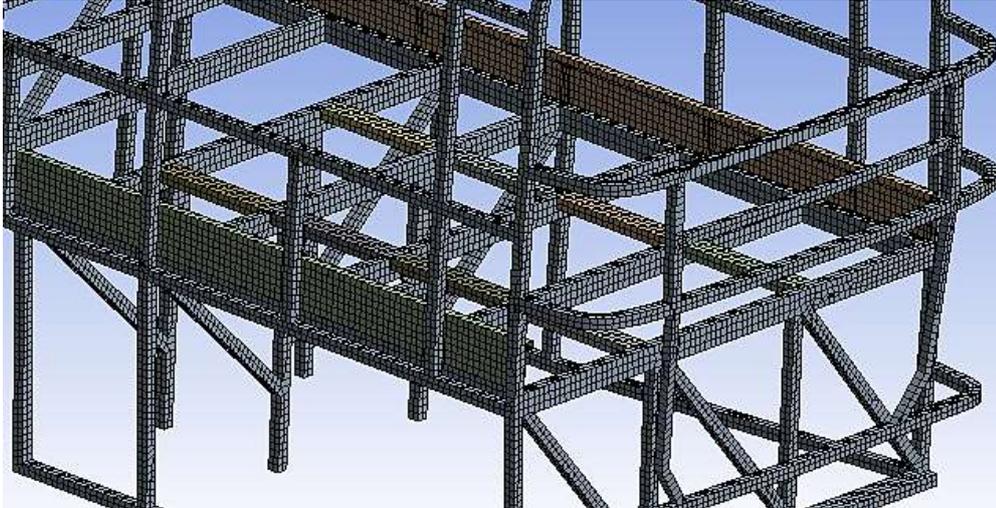


Figura 29 Elementos finitos formados en la estructura del bus por medio del proceso de malla

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.

Tabla 9
Relación jacobiana del sistema

<input type="checkbox"/> Nodes	104305
<input type="checkbox"/> Elements	91480
Mesh Metric	Jacobian Ratio
<input type="checkbox"/> Min	1,
<input type="checkbox"/> Max	29,144
<input type="checkbox"/> Average	1,048

En la Figura 30 un gráfico estadístico del número y tipos de elementos; los elementos cuadriláteros son predominantes en el sistema estructural (barra color amarillo) con 86 449, otro de los elementos que forman parte de la estructura son los hexaédricos (barra color violeta) con 5000 elementos

aproximadamente, los elementos triangulares son los menos sobresalientes.

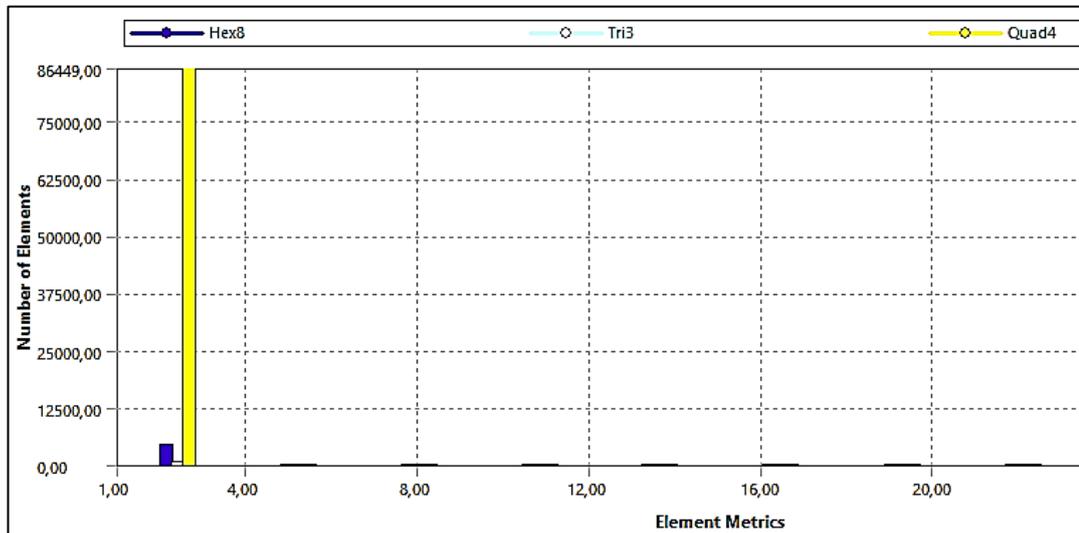


Figura 30 Gráfico estadístico del número y tipos de elementos

Luego de realizado la solución matemática del modelado objeto de estudio, se obtienen los resultados para la realización del análisis por elementos finitos. A continuación se muestran imágenes obtenidas de las simulaciones virtuales de impacto frontal y posterior por MEF.

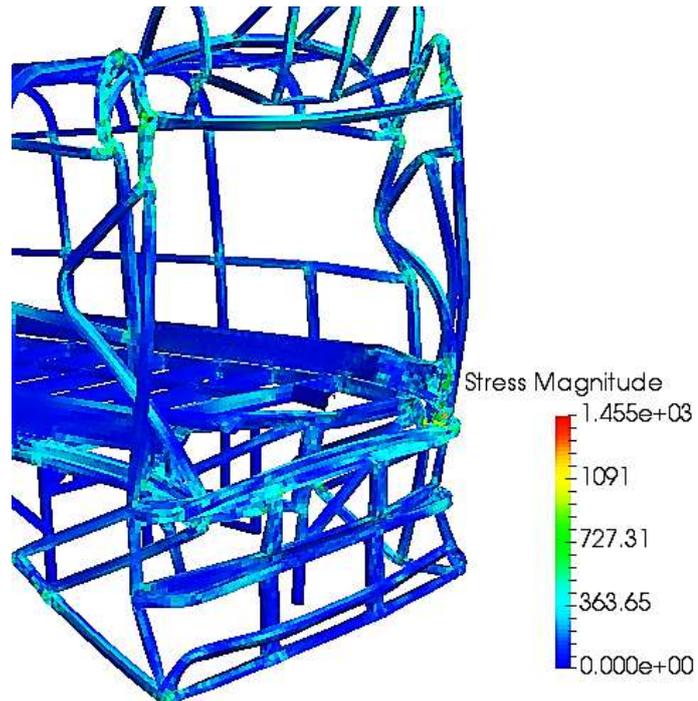


Figura 31 Impacto frontal-Acero ASTM A500

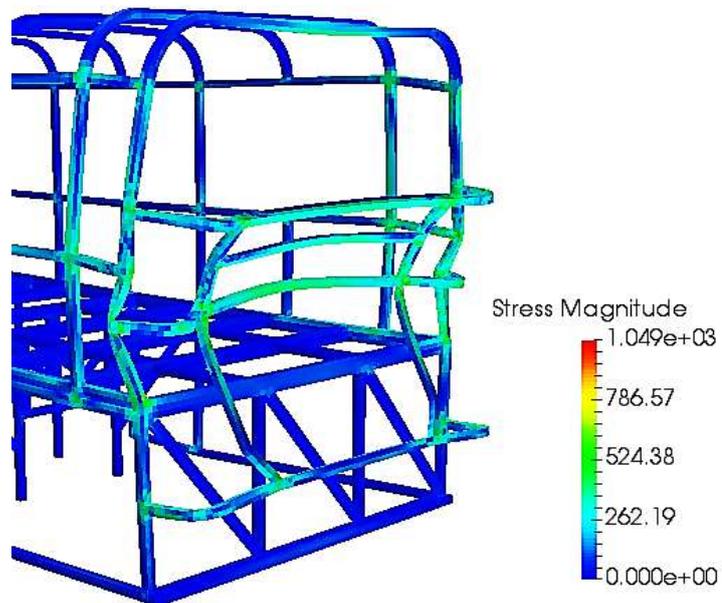


Figura 32 Impacto posterior-Acero ASTM A500

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados obtenidos del ensayo virtual

En el presente capítulo se realizan los análisis de esfuerzos y deformaciones experimentadas en la estructura de la carrocería, obtenidas de los estudios virtuales de impacto frontal y posterior basados en simulación por MEF. Los resultados se analizan con la finalidad de determinar el material y geometría idónea para la fabricación de la carrocería, tomando en cuenta la seguridad que brinda a los pasajeros del bus.

Las simulaciones son realizadas con materiales y geometrías de construcción diferentes. Para realizar el análisis de las diferentes simulaciones se utiliza la siguiente nominación:

Material 1 (M1): Acero ASTM A500

Material 2 (M2): Acero Galvanizado

Geometría 1 (G1): Carrocería estándar

Geometría 2 (G2): Carrocería modificada

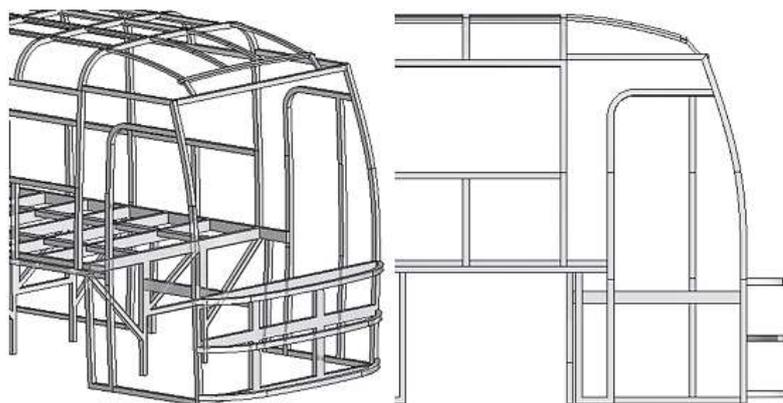


Figura 33 Carrocería estándar, frontal

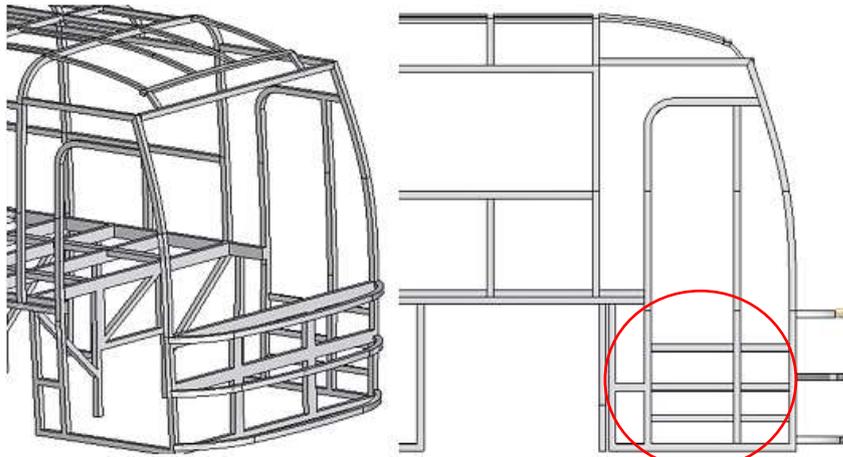


Figura 34 Carrocería modificada, frontal

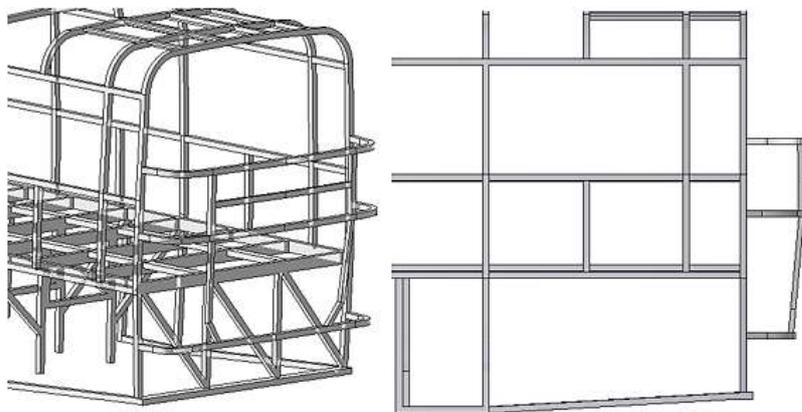


Figura 35 Carrocería estándar, posterior

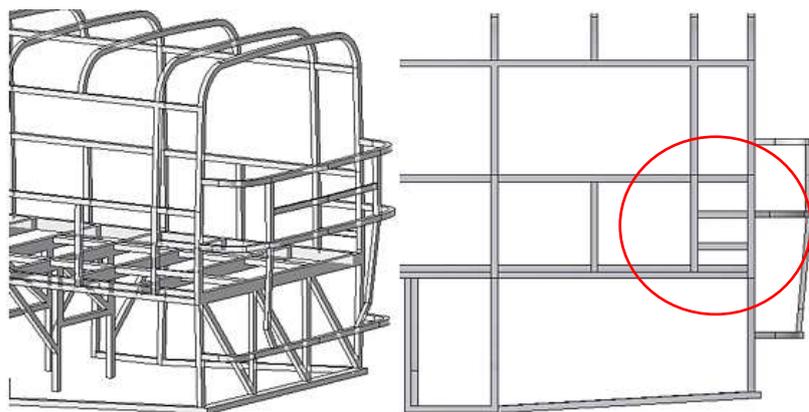


Figura 36 Carrocería modificada, posterior

El análisis y la representación de los resultados (mediante gráficos) obtenidos de los ensayos virtuales del estudio dinámico de la carrocería se realiza analizando el comportamiento de la misma mediante sus elementos discretos.

La energía no se crea ni se destruye sólo se transforma. En base a esta teoría en las siguientes figuras se demuestra el cumplimiento de la misma, mediante el análisis de la energía producida durante el impacto y su transformación en energía de deformación (energía interna).

Durante la prueba virtual de impacto frontal de la estructura de la carrocería la energía total permanece constante antes, durante y después del ensayo, la energía cinética producida antes del impacto es de 1.3×10^6 [J], ésta energía se disipa en un 85 % (1.10×10^6 [J]) por la deformación de la carrocería luego de haberse generado la colisión. En la Figura 37 se observa la variación de la energía producida durante el impacto frontal de la carrocería.

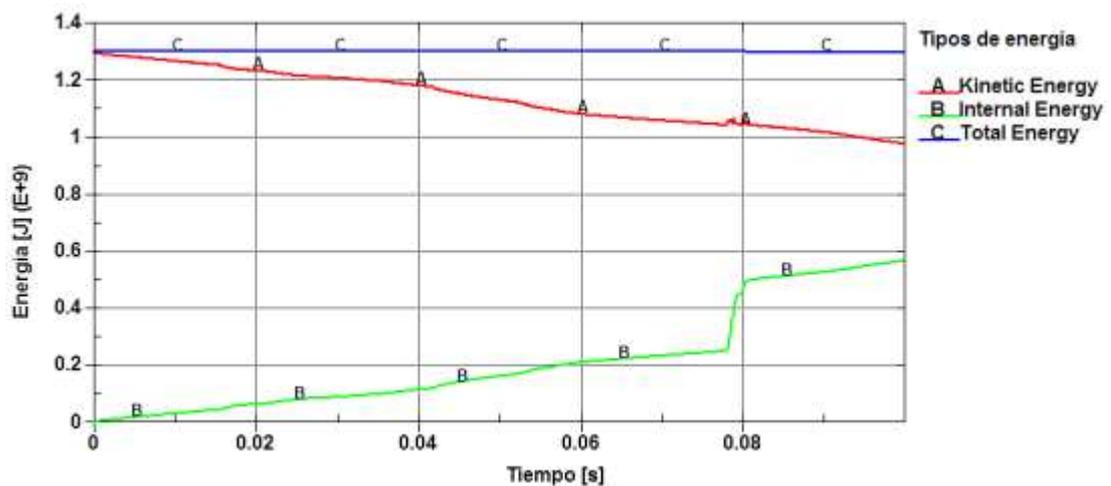


Figura 37 Variación de energía durante test de impacto frontal

En la prueba de impacto posterior de la carrocería la energía total se comporta de la misma forma a lo sucedido en el ensayo del impacto frontal,

la energía cinética producida antes del impacto es de 51×10^6 [J] la misma que se disipa en un 86 % (44×10^6 [J]) por la deformación de la carrocería luego del impacto. En la Figura 38 se observa la variación de energías producida durante el impacto posterior de la carrocería.

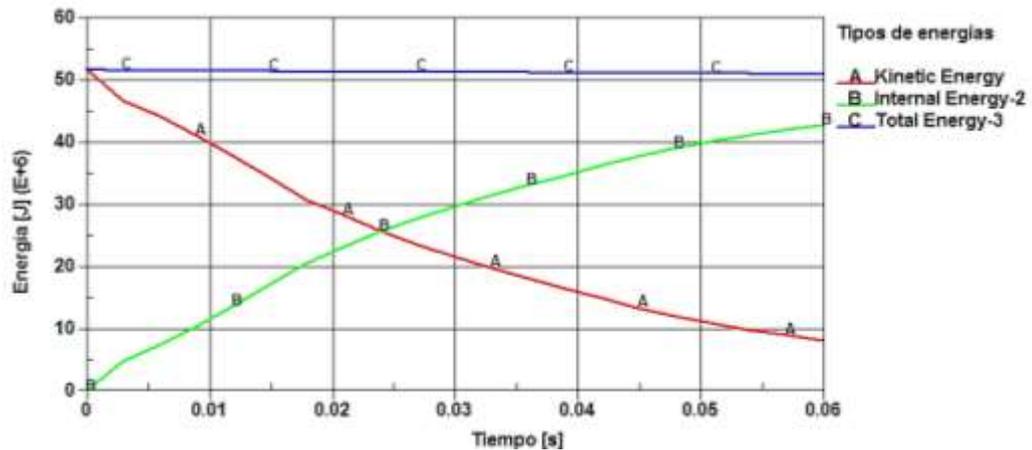


Figura 38 Variación de energía durante test de impacto posterior

4.2. Carrocería estándar: Acero ASTM A500

Mediante la siguiente nominación:

- Geometría 1 (G1): Carrocería estándar
- Material 1 (M1): Acero ASTM A500

Se realiza el análisis relativo a la deformación y esfuerzos producidos en la carrocería, una vez generado el ensayo virtual de impacto.

4.2.1. Impacto frontal

A. Deformación estructural del bus

Una vez concluida la simulación virtual de impacto frontal de la carrocería, el bus experimenta una deformación estructural de 1592 mm, en la Figura 39 se puede notar que la parte correspondiente a la cabina del conductor se deforma en un 100 %.

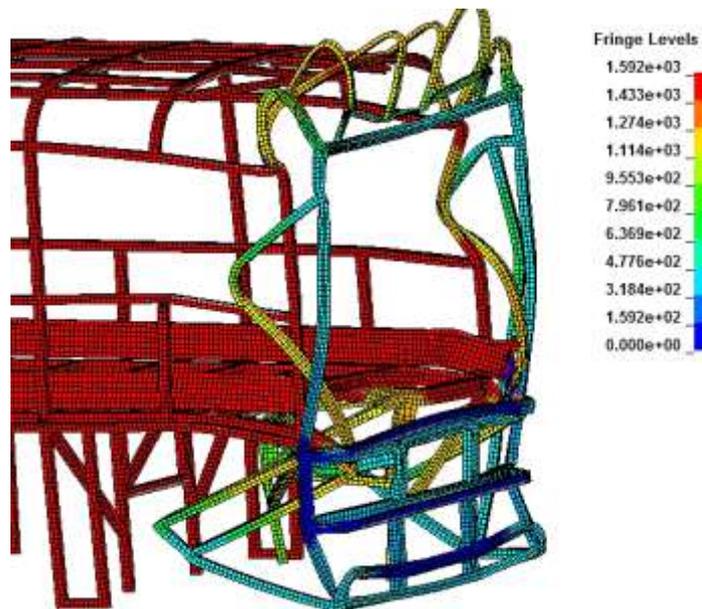


Figura 39 Deformación impacto frontal G1M1

Para realizar el análisis de la deformación y de los esfuerzos producidos en el armazón frontal de la carrocería, se realiza la selección del elemento crítico para estudiar su comportamiento ante un fenómeno de colisión y determinar la seguridad que la estructura brinda a los ocupantes del vehículo.

En la Figura 40 se muestra el elemento finito 43785, seleccionado por

ser el elemento crítico para su análisis por MEF.

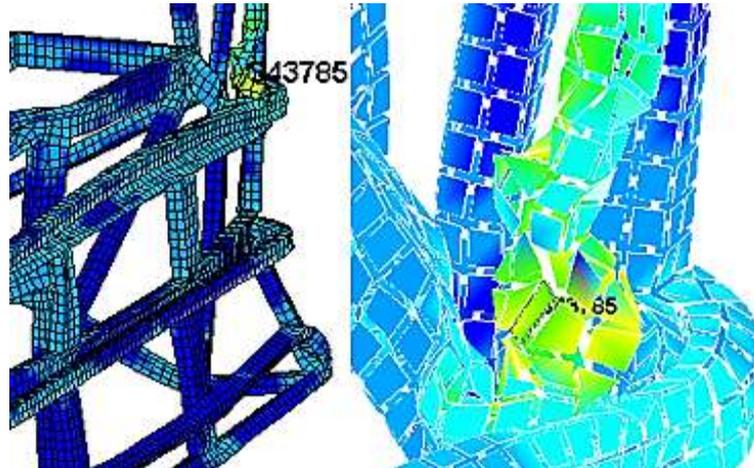


Figura 40 Elemento crítico, impacto frontal G1M1

En la Figura 41 se muestra el comportamiento del elemento crítico seleccionado relativo a la deformación que presenta en el tiempo. La deformación presente en el elemento discreto es de 2.32 mm/mm alcanzado a los 100 ms.

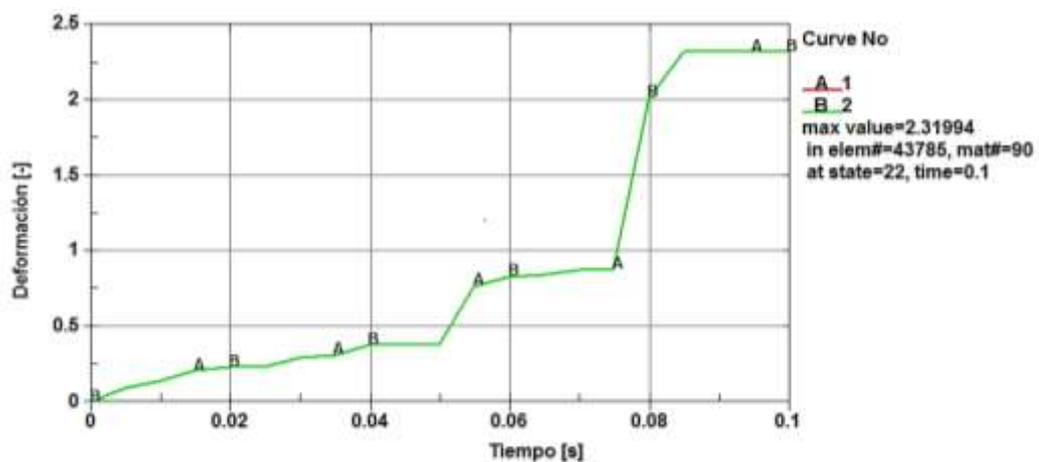


Figura 41 Diagrama deformación-tiempo del elemento crítico G1M1

B. Esfuerzo Máximo del elemento crítico

El esfuerzo máximo que experimenta el bus en el impacto frontal de la carrocería se alcanza a los 80 ms, en la Figura 42 se muestra el diagrama

correspondiente al esfuerzo producido.

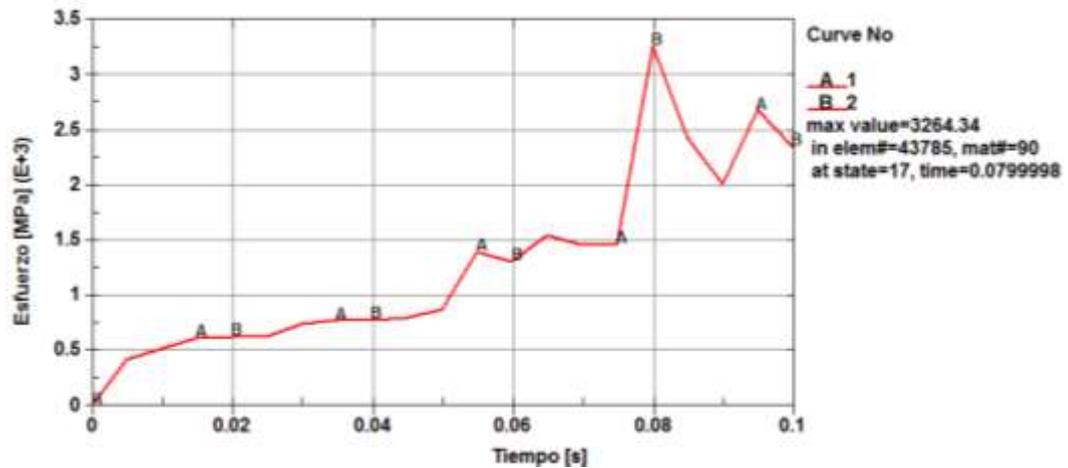


Figura 42 Diagrama esfuerzo-tiempo del elemento crítico G1M1

En la Figura 43 se muestra el diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico, éste alcanza el punto de cedencia (S_y) a los 3 ms aproximadamente, en este tiempo el elemento alcanza una deformación de 0.1 mm/mm; una vez que se ha superado la resistencia última el elemento comienza a experimentar esfuerzos bruscos por concentración de esfuerzos debido al cambio súbito de la geometría; por este cambio de geometría la distribución de esfuerzos es completamente no lineal y de magnitudes más grandes, el elemento colapsa a los 4 ms.

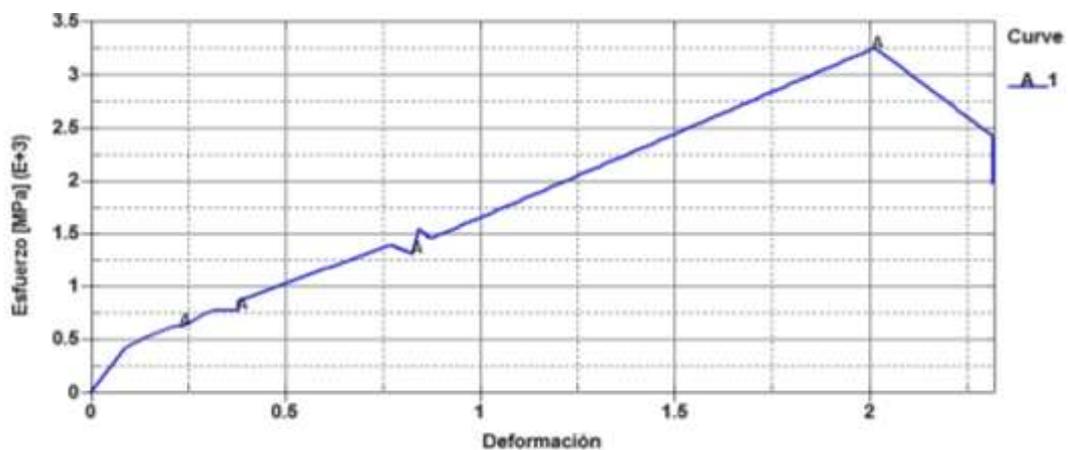


Figura 43 Diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico G1M1

C. Absorción de energía del armazón frontal del bus

Para calcular la cantidad de energía cinética que se pierde en el impacto frontal del bus se procede de la siguiente manera:

-Se obtiene la energía cinética antes del impacto mediante la fórmula de la Energía Cinética antes del impacto:

$$Ec_1 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 \quad \text{Ecuación 10.}$$

Donde:

Ec_1 : Energía cinética antes del impacto [J]

m_1 : masa del bus [kg]

v_1 : velocidad inicial del bus [m/s]

$$Ec_1 = \frac{1}{2} (10782.292 \text{ kg})(15.56 \text{ m/s})^2$$

$$Ec_1 = 1.31 \times 10^6 \text{ J}$$

Ahora se procede a calcular la Energía cinética después del impacto:

$$Ec_2 = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v_2^2 \quad \text{Ecuación 11.}$$

Donde:

Ec_2 : Energía cinética después del impacto [J]

m_2 : masa de la barrera o pared rígida [kg]

v_2 : velocidad final del bus [m/s]

Para ello se necesita saber la velocidad final de impacto:

Ecuación 12.

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

$$v_2 = \frac{10782.292 \text{ kg}}{10782.292 \text{ kg} + 70000 \text{ kg}} * 15.56 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 2.08 \text{ m/s}$$

Entonces la Energía cinética después del impacto es:

$$Ec_2 = \frac{1}{2} (10782.292 \text{ kg} + 70000 \text{ kg}) (2.08 \text{ m/s})^2$$

$$Ec_2 = 0.17 \times 10^6 \text{ J}$$

Ahora se calcula la energía cinética perdida en la colisión mediante la diferencia de la Ec_1 y la Ec_2 , como se detalla a continuación:

$$Ec_1 - Ec_2 = 1.31 \times 10^6 \text{ J} - 0.17 \times 10^6 \text{ J}$$

$$Ec_1 - Ec_2 = 1.14 \times 10^6 \text{ J}$$

Ecuación 13.

Y finalmente se determina la fracción de energía cinética perdida en la colisión:

$$\frac{Ec_1 - Ec_2}{Ec_1} = \frac{1.14 \times 10^6 \text{ J}}{1.31 \times 10^6 \text{ J}} * 100$$

$$\frac{Ec_1 - Ec_2}{Ec_1} = 87 \%$$

Ecuación 14.

En la Figura 44 se muestra en una imagen la energía de deformación en función del tiempo. Al tratarse de una colisión totalmente frontal la estructura puede soportar mejor la colisión, consiguiendo menores deformaciones con lo que el habitáculo de seguridad tiene un menor riesgo de verse afectado.



Figura 44 Diagrama energía de deformación-tiempo G1M1

D. Aceleración y fuerza de impacto

La Figura 45 indica que el bus experimenta una desaceleración brusca de $420 \frac{m}{s^2}$, pues la carrocería comienza a disminuir su velocidad y se desacelera, esta desaceleración brusca se traduce en un mayor daño al armazón del bus.

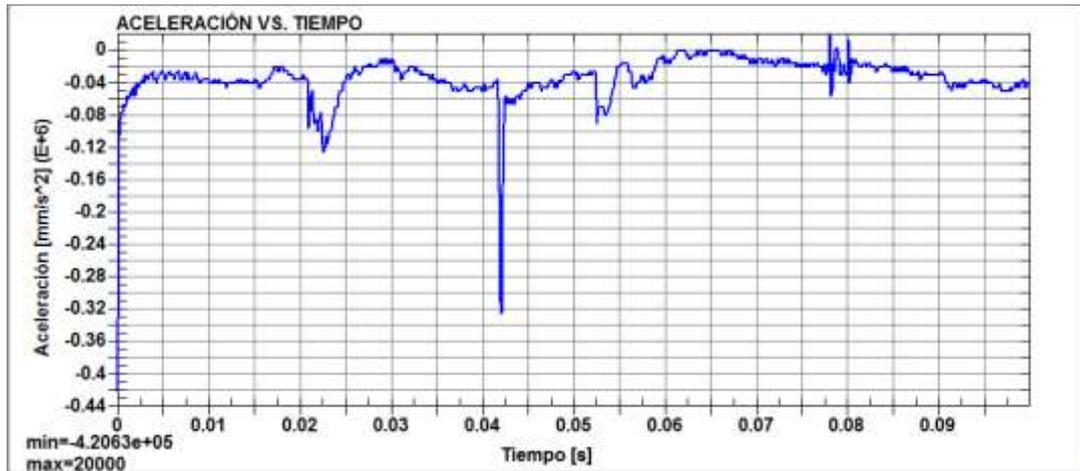


Figura 45 Diagrama de aceleración-tiempo G1M1

Para el cálculo de la fuerza de impacto se hace referencia al trabajo requerido para detener el bus, mediante la siguiente fórmula:

$$F_i * d = -\frac{1}{2} m * v^2 \quad \text{Ecuación 15.}$$

Donde:

F_i es la fuerza de impacto [N]

d es la deformación del bus en [m]

m es la masa del bus [kg]

v es la velocidad del bus [m/s]

La fuerza de impacto que experimenta el bus es de 0.8199×10^6 N.

4.2.2. Impacto posterior

A. Deformación estructural del bus

La deformación estructural de la carrocería por impacto posterior es de 718 mm, en la Figura 46 se muestra la parte correspondiente al armazón posterior, se puede notar que no existe la intrusión de ningún elemento estructural al habitáculo de seguridad.

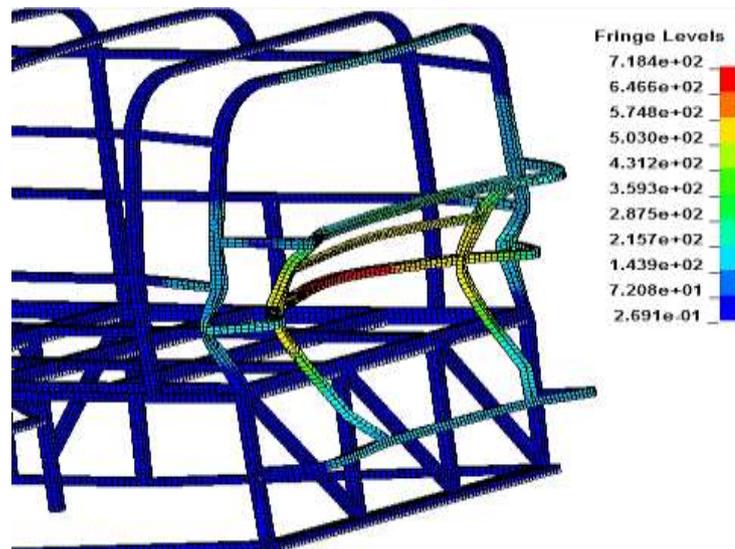


Figura 46 Deformación impacto posterior G1M1

Se realiza la selección del elemento crítico para estudiar su comportamiento ante un fenómeno de colisión posterior y determinar la seguridad que la estructura brinda a los ocupantes del vehículo.

En la Figura 47 se muestra el elemento finito 39344, seleccionado por ser el elemento crítico para su análisis por MEF.

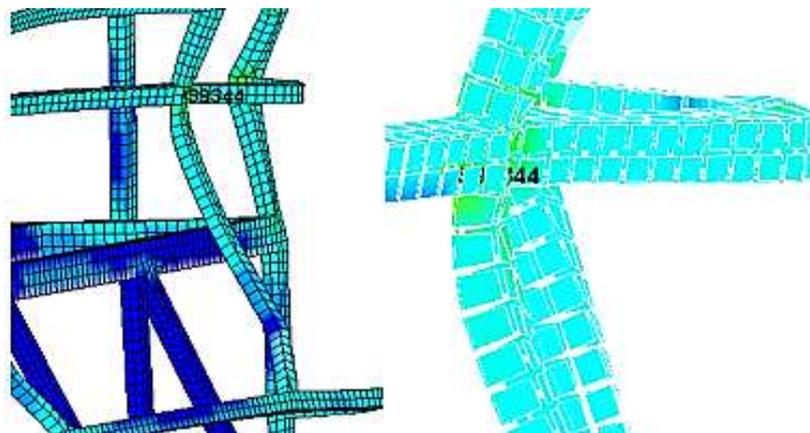


Figura 47 Elemento crítico, impacto posterior G1M1

En la Figura 48 se muestra el comportamiento del elemento crítico

seleccionado relativo a la deformación estructural. La deformación presente en el elemento discreto es de 0.51 mm/mm alcanzado a los 60 ms.

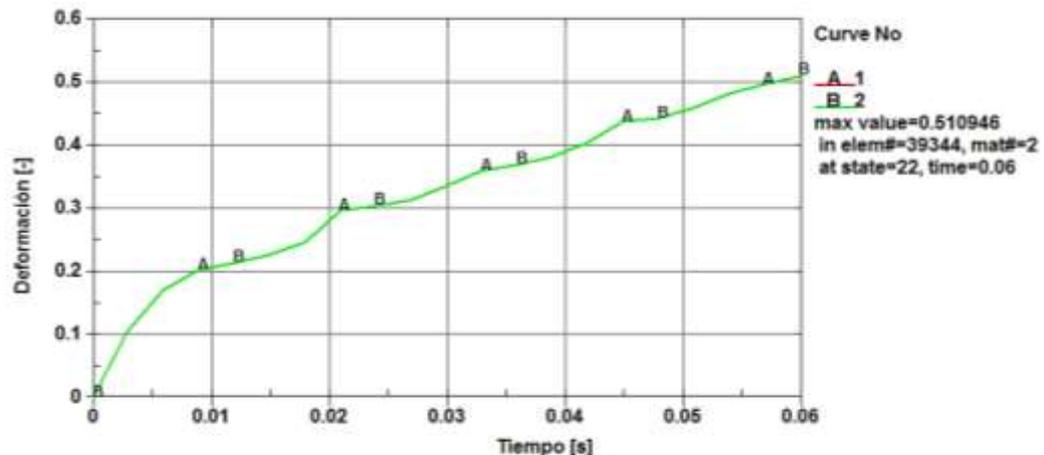


Figura 48 Diagrama deformación-tiempo del elemento crítico G1M1

B. Esfuerzo máximo del elemento crítico

El esfuerzo máximo que experimenta la estructura en el impacto posterior se produce a los 60 ms, en la Figura 49 se muestra el diagrama correspondiente al esfuerzo producido.

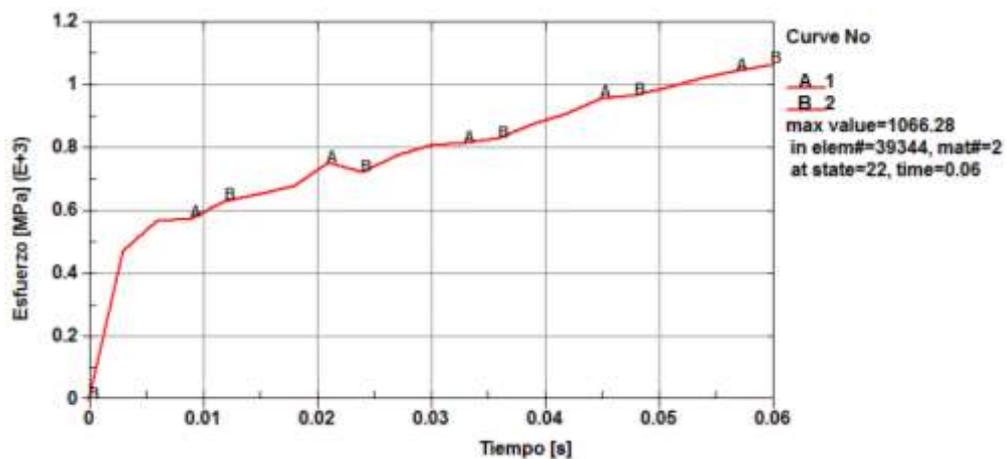


Figura 49 Diagrama esfuerzo-tiempo del elemento crítico G1M1

La Figura 50 muestra el diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico, el punto de cedencia (S_y) y una deformación de 0.1 mm/mm se alcanza a los 2.5ms; una vez superado la resistencia última a la tensión el elemento comienza a experimentar esfuerzos burdos por concentración de esfuerzos por el cambio desapacible de la geometría y colapsa a los 3 ms.

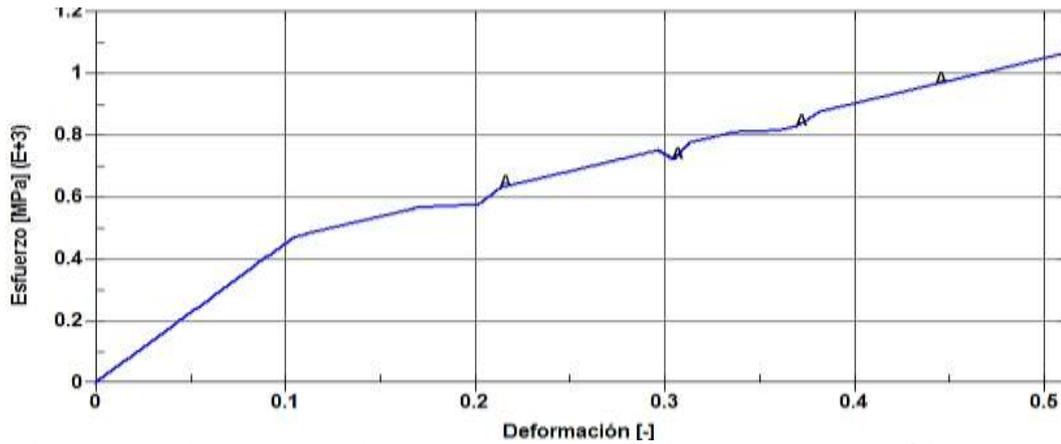


Figura 50 Diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico G1M1

C. Absorción de energía del armazón posterior del bus

Para calcular la cantidad de energía cinética que se pierde en el impacto posterior del bus se procede de la siguiente manera:

-Se obtiene la energía cinética antes del impacto mediante la fórmula de la Energía Cinética antes del impacto:

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

Donde:

Ec_1 : Energía cinética antes del impacto [J]

m_1 : masa del impactador del bus [kg]

v_1 : velocidad inicial del impactador [m/s]

$$Ec_1 = \frac{1}{2}(1100 \text{ kg})(9.72 \text{ m/s})^2$$

$$Ec_1 = 51.96 \times 10^3 \text{ J}$$

Ahora se procede a calcular la Energía cinética después del impacto:

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

Donde:

Ec_2 : Energía cinética después del impacto [J]

m_2 : masa del bus [kg]

v_2 : velocidad final del impactador [m/s]

Para ello se necesita saber la velocidad final de impacto:

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

$$v_2 = \frac{1100 \text{ kg}}{1100 \text{ kg} + 10782.292 \text{ kg}} * 9.72 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 0.9 \text{ m/s}$$

Entonces la Energía cinética después del impacto es:

$$Ec_2 = \frac{1}{2}(10782.292 \text{ kg} + 1100 \text{ kg})(0.9 \text{ m/s})^2$$

$$Ec_2 = 5.35 \times 10^3 \text{ J}$$

Ahora se calcula la energía cinética perdida en la colisión mediante la diferencia de la Ec_1 y la Ec_2 , como se detalla a continuación:

$$Ec_1 - Ec_2 = 51.96 \times 10^3 \text{ J} - 5.35 \times 10^3 \text{ J}$$

$$Ec_1 - Ec_2 = 46.61 \times 10^3 J$$

Y finalmente se determina la fracción de energía cinética perdida en la colisión:

$$\frac{Ec_1 - Ec_2}{Ec_1} = \frac{46.61 \times 10^3 J}{51.96 \times 10^3 J} * 100$$

$$\frac{Ec_1 - Ec_2}{Ec_1} = 90 \%$$

En la Figura 51 se muestra en una imagen la energía de deformación en función del tiempo.



Figura 51 Diagrama energía de deformación-tiempo G1M1

D. Aceleración y fuerza de impacto

La Figura 52 indica que el impactador experimenta una desaceleración de $1881 \frac{m}{s^2}$, el impactador comienza a disminuir su velocidad y se desacelera una vez generado el contacto entre ambos cuerpos.

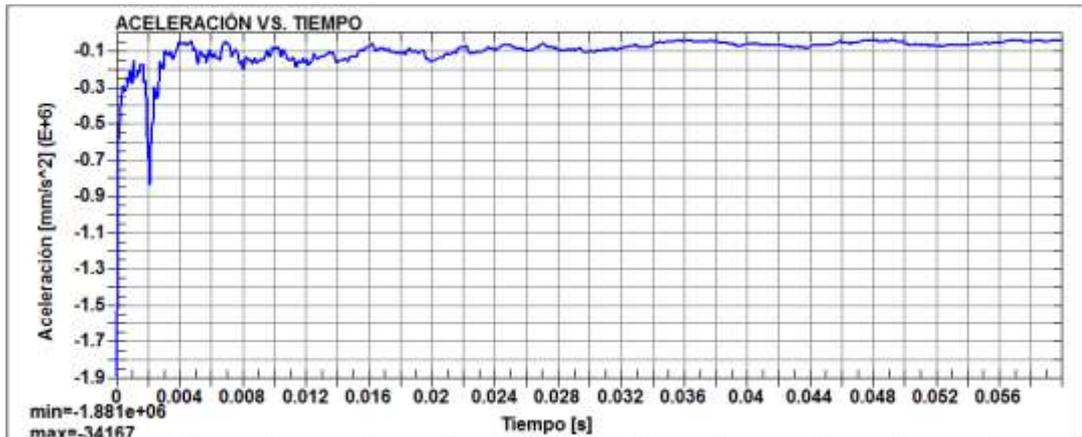


Figura 52 Diagrama aceleración-tiempo G1M1

En base a la ecuación 10 la fuerza de impacto es $0.0724 \times 10^6 N$.

4.3. Carrocería estándar: Acero Galvanizado

Mediante la siguiente nominación:

- Geometría 1 (G1): Carrocería estándar
- Material 2 (M2): Acero galvanizado

Se realiza el análisis relativo a la deformación y esfuerzos producidos en la carrocería.

4.3.1. Impacto frontal

A. Deformación estructural del bus

La carrocería experimenta una deformación estructural de 1604 mm, en la Figura 53 se muestra la deformación de la parte frontal del bus, y se observa que la cabina colapsa en su totalidad.

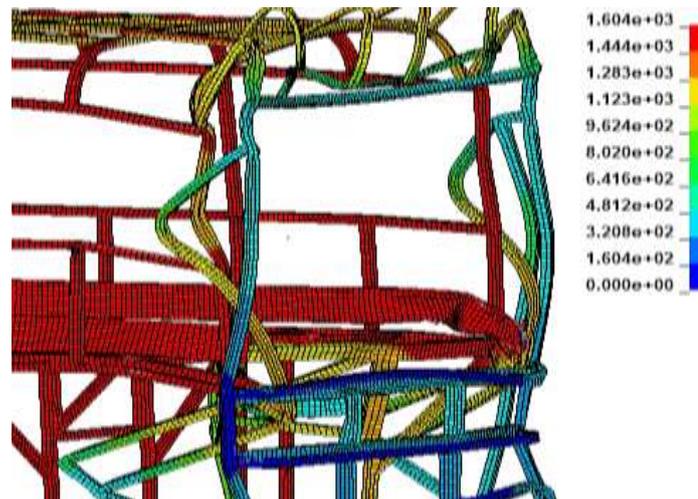


Figura 53 Deformación impacto frontal G1M2

En la Figura 54 se muestra el elemento finito 84377, seleccionado por ser el elemento crítico para realizar su análisis por MEF.

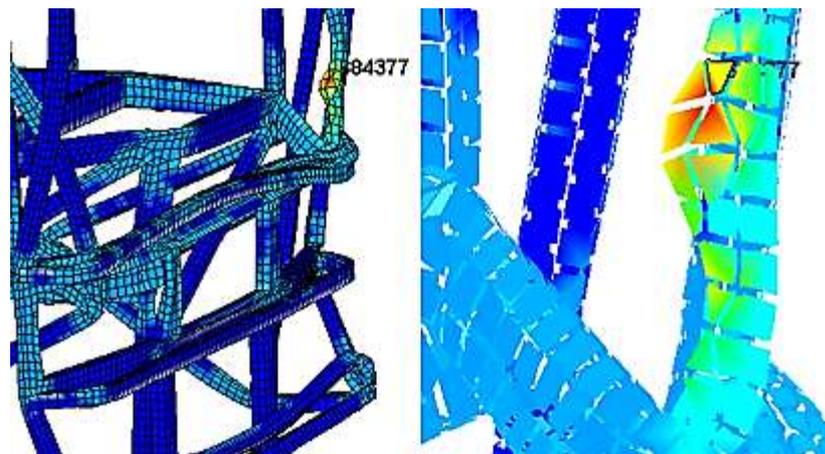


Figura 54 Elemento crítico, impacto frontal G1M2

En la Figura 55 se muestra el comportamiento del elemento crítico relativo a la deformación que presenta en el tiempo. La deformación presente en el elemento discreto es de 1.7 mm/mm alcanzado a los 100 ms.

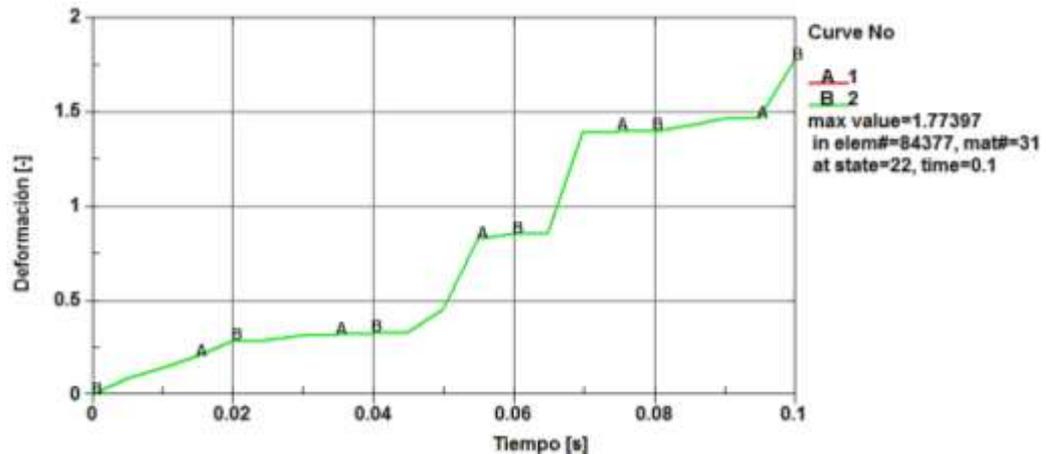


Figura 55 Diagrama deformación-tiempo del elemento crítico G1M2

B. Esfuerzo máximo del elemento crítico

El esfuerzo máximo que experimenta el bus en el impacto frontal de la carrocería se alcanza a los 100 ms, en la Figura 56 se muestra el diagrama correspondiente al esfuerzo producido.

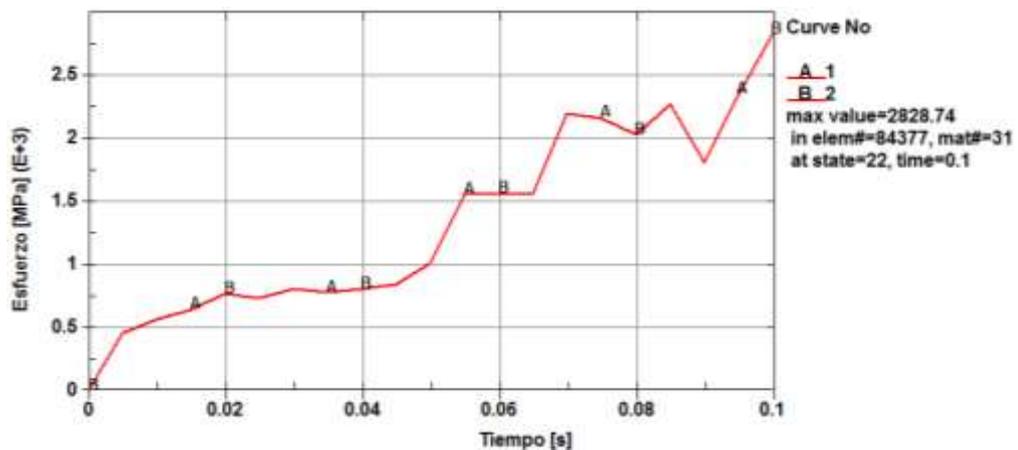


Figura 56 Diagrama esfuerzo-tiempo del elemento crítico G1M2

En la Figura 57 se muestra el diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico, éste alcanza el punto S_y y una deformación de 0.15 mm/mm a los 5 ms; a partir de ese tiempo el elemento comienza a experimentar esfuerzos bruscos por concentración de esfuerzos y colapsa a

los 5 ms.

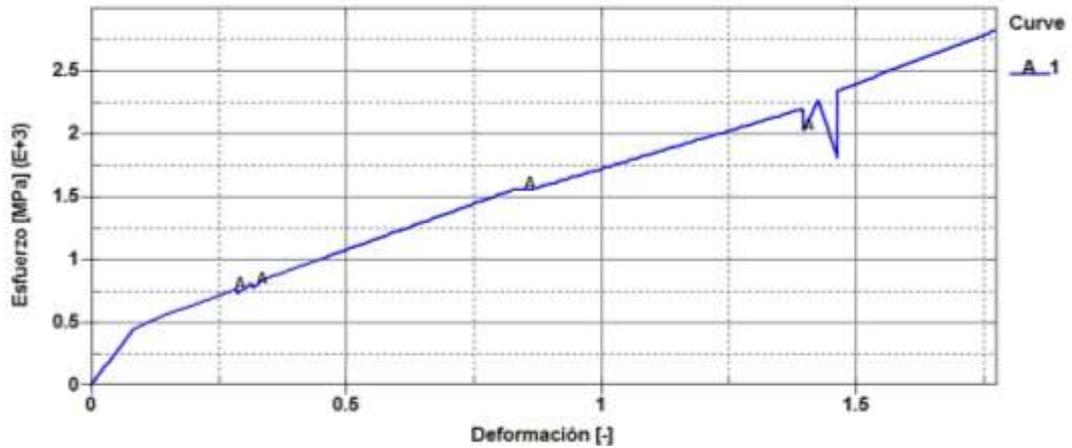


Figura 57 Diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico G1M2

C. Absorción de energía del armazón frontal del bus

La energía disipada durante el impacto hasta que el bus se detiene es de 385×10^6 [J], como se muestra en la Figura 58.



Figura 58 Diagrama energía de deformación-tiempo G1M2

D. Aceleración y fuerza de impacto

La Figura 59 indica que el bus experimenta una desaceleración brusca de $420 \frac{m}{s^2}$, el bus comienza a disminuir su velocidad y se desacelera.

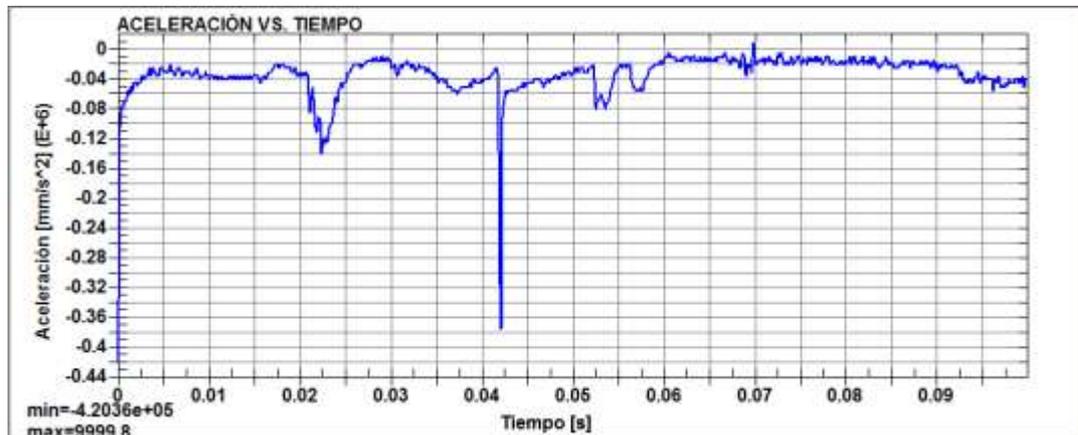


Figura 59 Diagrama aceleración-tiempo G1M2

En base a la ecuación 10 la fuerza de impacto que experimenta el bus es de $0.8138 \times 10^6 N$.

4.3.2. Impacto posterior

A. Deformación estructural del bus

La deformación de la carrocería es de 712 mm, en la Figura 60 se muestra la parte correspondiente al armazón posterior; no existe la intrusión de ningún elemento estructural al habitáculo.

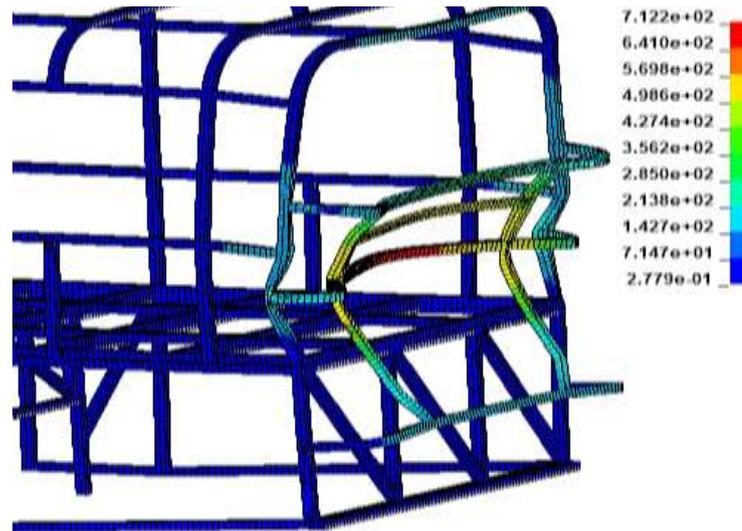


Figura 60 Deformación, impacto posterior G1M2

En la Figura 61 se muestra el elemento finito 39338, seleccionado por ser el elemento crítico para su análisis.

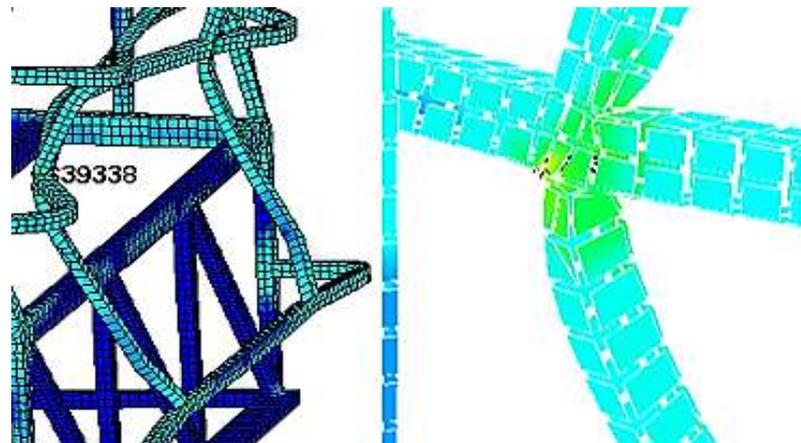


Figura 61 Elemento crítico, impacto posterior G1M2

En la Figura 62 se muestra el comportamiento del elemento crítico seleccionado relativo a la deformación estructural. La deformación presente en el elemento discreto es de 0.52 mm/mm alcanzado a los 60 ms.

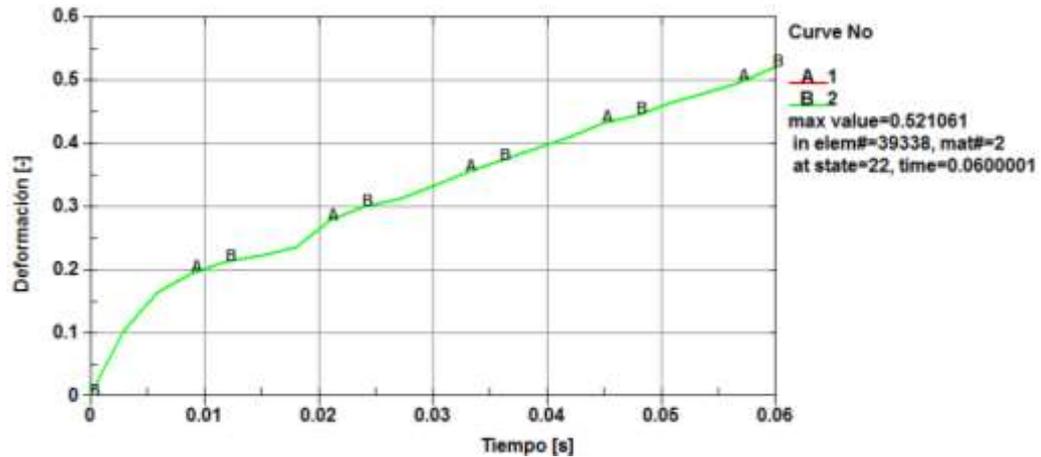


Figura 62 Diagrama deformación-tiempo del elemento crítico G1M2

B. Esfuerzo máximo del elemento crítico

El esfuerzo máximo que experimenta la estructura en el impacto posterior se produce a los 60 ms, en la Figura 63 se muestra el diagrama correspondiente al esfuerzo producido.

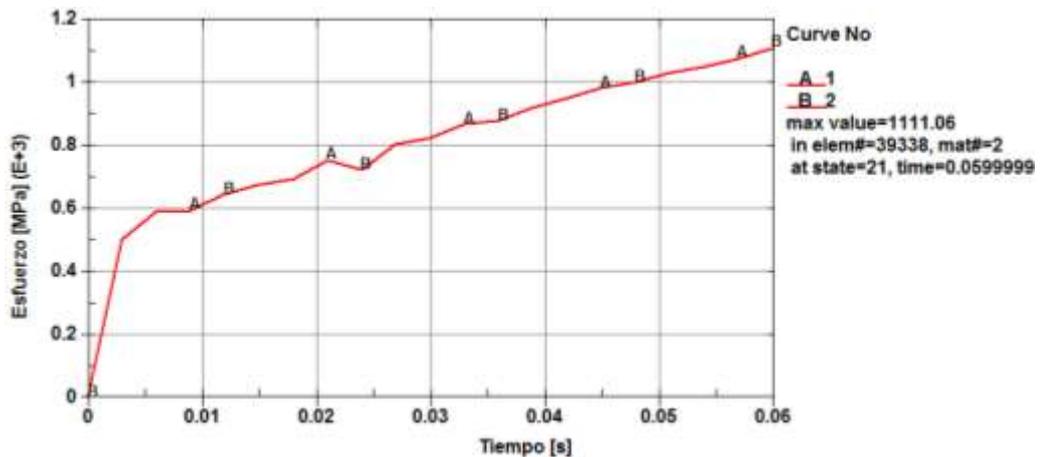


Figura 63 Diagrama esfuerzo-tiempo del elemento crítico G1M2

En la Figura 64 se muestra el diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico, éste alcanza el punto de cedencia (S_y) a los 2.5 ms, en este tiempo el elemento alcanza una deformación de 0.08 mm/mm, y colapsa a los 3 ms.

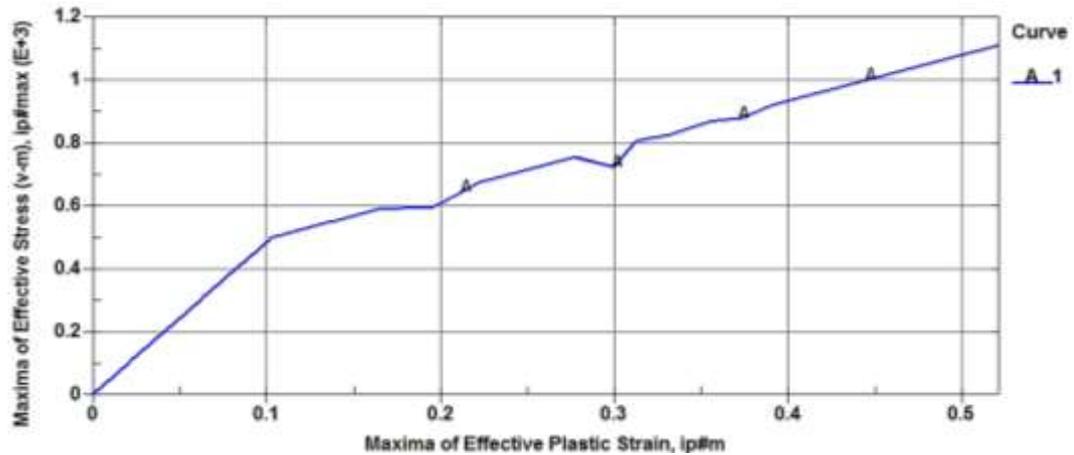


Figura 64 Diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico G1M2

C. Absorción de energía del armazón posterior del bus

La energía disipada durante el impacto hasta que el impactador se detiene es de $36 \times 10^6 [J]$, como se muestra en la Figura 65.

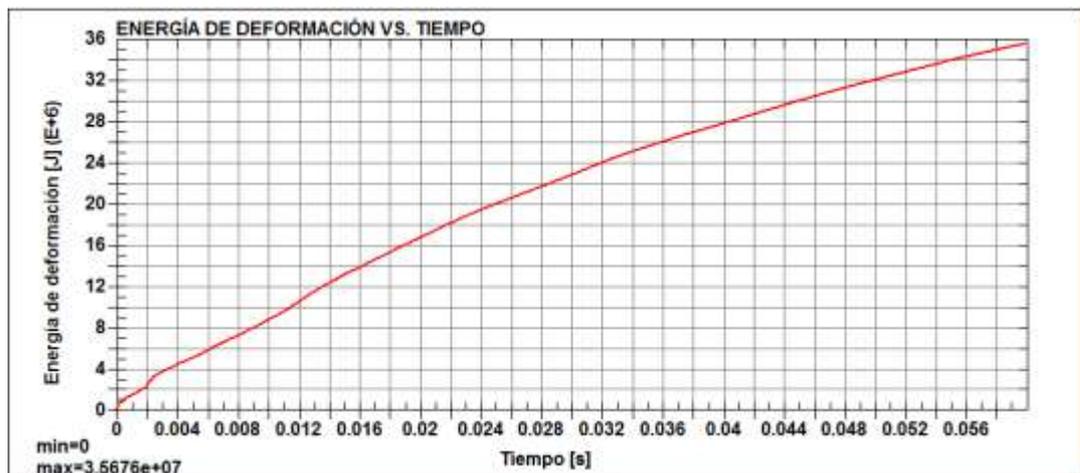


Figura 65 Diagrama energía de deformación-tiempo G1M2

D. Aceleración y fuerza de impacto

La Figura 66 indica que el impactador experimenta una desaceleración brusca de $1951 \frac{m}{s^2}$, el impactador comienza a disminuir su velocidad y se desacelera una vez producido el impacto entre los dos cuerpos.

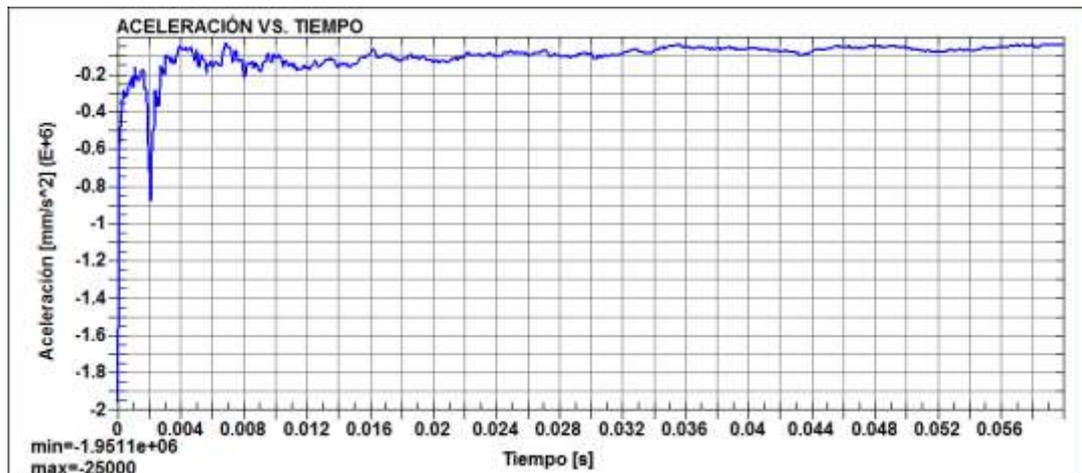


Figura 66 Diagrama aceleración-tiempo G1M2

En base a la ecuación 10 la fuerza de impacto que experimenta el impactador contra el bus es de $0.073 \times 10^6 \text{ N}$.

4.4. Carrocería modificada: Acero ASTM A500

Mediante la siguiente nominación:

- Geometría 2 (G2): Carrocería modificada
- Material 1 (M1): Acero ASTM A500

Se realiza el análisis relativo a la deformación y esfuerzos producidos en la carrocería.

4.4.1. Impacto frontal

A. Deformación estructural del bus

La carrocería experimenta una deformación estructural de 1578 mm, en la Figura 67 se muestra la deformación de la parte frontal del bus.

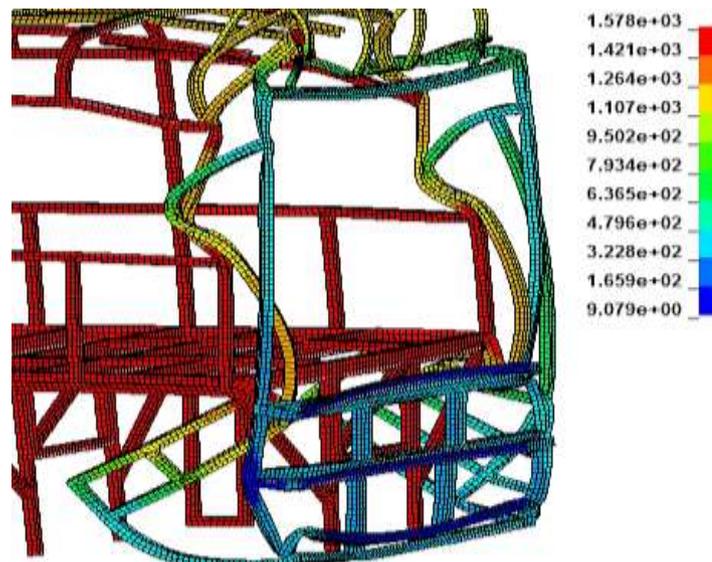


Figura 67 Deformación, impacto frontal G2M1

En la Figura 68 se muestra el elemento finito 70891, seleccionado por ser el elemento crítico para revisar su análisis por MEF.

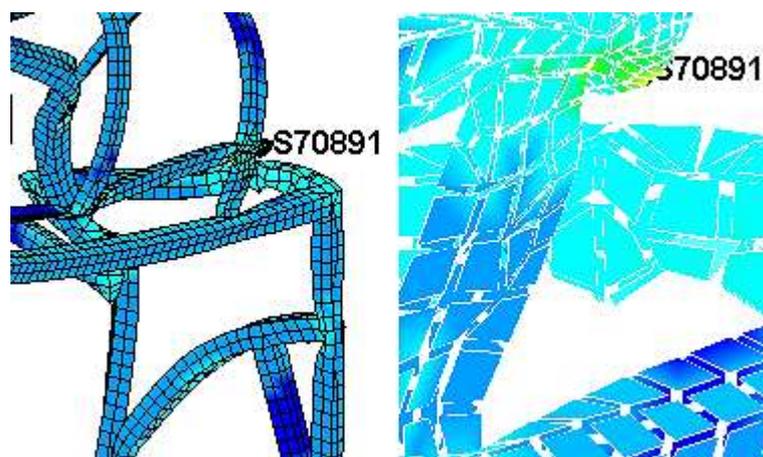


Figura 68 Elemento crítico, impacto frontal G2M1

En la Figura 69 se muestra el comportamiento del elemento crítico

relativo a la deformación que presenta en el tiempo. La deformación presente en el elemento discreto es de 1.213 mm/mm los 100 ms.

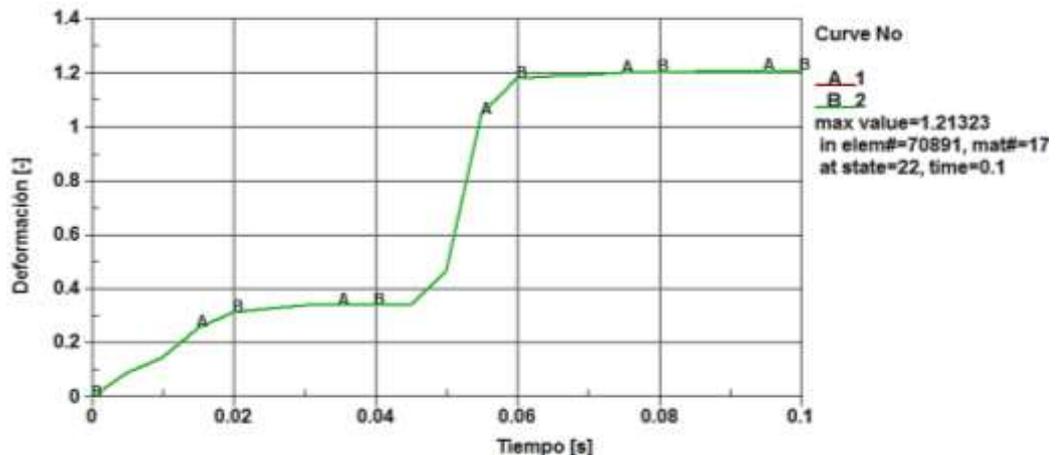


Figura 69 Diagrama deformación-tiempo del elemento crítico G2M1

B. Esfuerzo máximo del elemento crítico

El esfuerzo máximo que experimenta el bus en el impacto frontal de la carrocería se alcanza a los 95 ms, en la Figura 70 se muestra el diagrama correspondiente al esfuerzo producido.

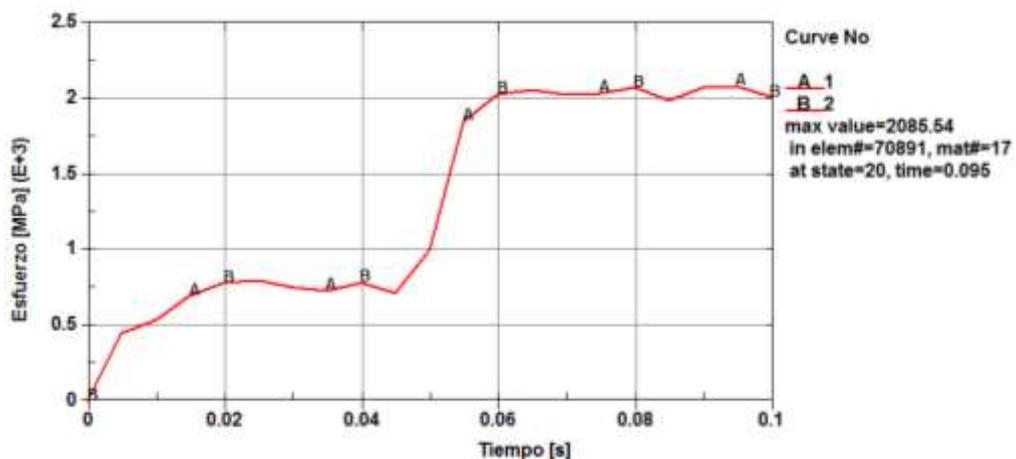


Figura 70 Diagrama esfuerzo-tiempo del elemento crítico G2M1

En la Figura 71 se muestra el diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico, éste alcanza el punto de cedencia (S_y) a los 3 ms y una deformación de 0.07 mm/mm; el elemento comienza a experimentar esfuerzos bruscos por concentración de esfuerzos debido al cambio brusco de la geometría colapsando a los 5 ms aproximadamente.

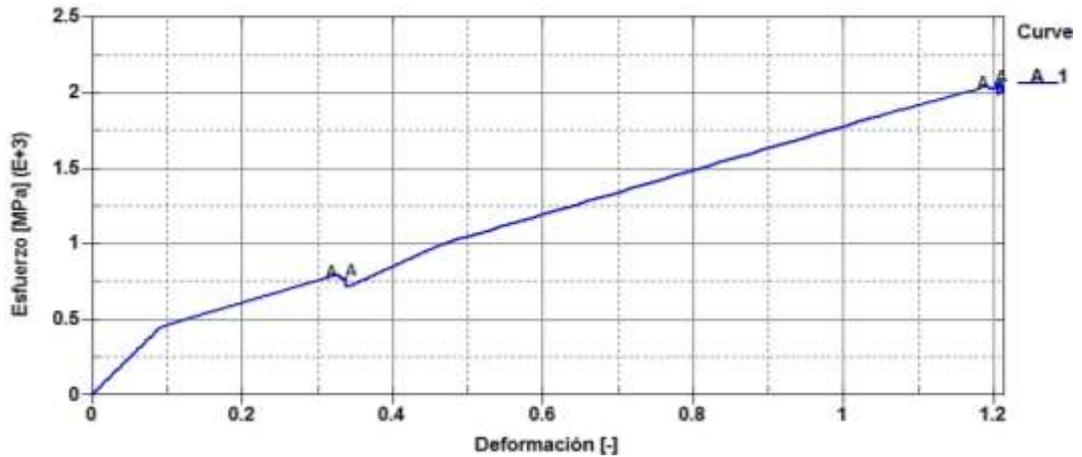


Figura 71 Diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico G2M1

C. Absorción de energía del armazón frontal del bus

La energía disipada durante el impacto hasta que el bus se detiene es de 344×10^6 [J], como se muestra en la Figura 72.

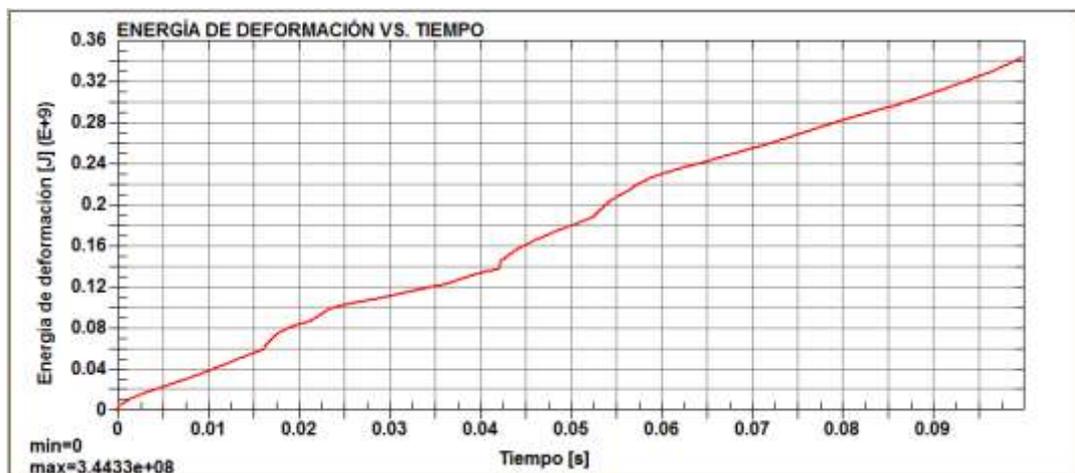


Figura 72 Diagrama energía de deformación-tiempo G2M1

D. Aceleración y fuerza de impacto

La Figura 73 indica que el bus experimenta una desaceleración brusca de $395 \frac{m}{s^2}$, el bus comienza a disminuir su velocidad y se desacelera.

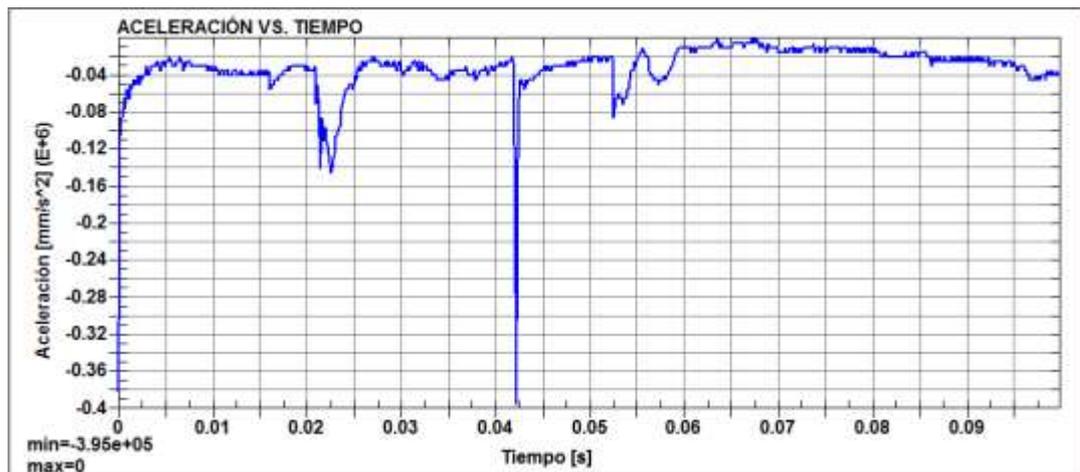


Figura 73 Diagrama aceleración-tiempo G2M1

En base a la ecuación 10 la fuerza de impacto que experimenta el bus es de $0.8272 \times 10^6 N$.

4.4.2. Impacto posterior

A. Deformación estructural del bus

La deformación de la carrocería es de 716 mm, en la Figura 74 se muestra la parte correspondiente al armazón posterior; no existe la intrusión de ningún elemento estructural al habitáculo.

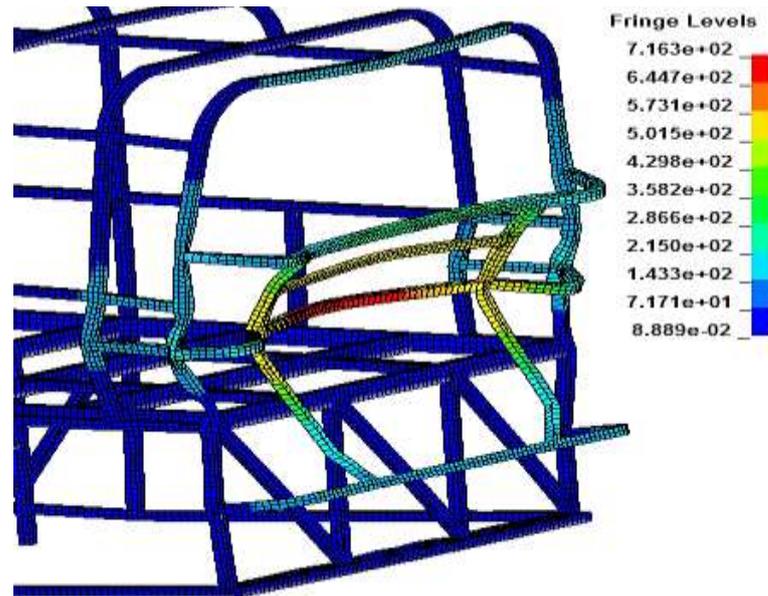


Figura 74 Deformación, impacto posterior G2M1

En la Figura 75 se muestra el elemento finito 77315, seleccionado por ser el elemento crítico para su análisis.

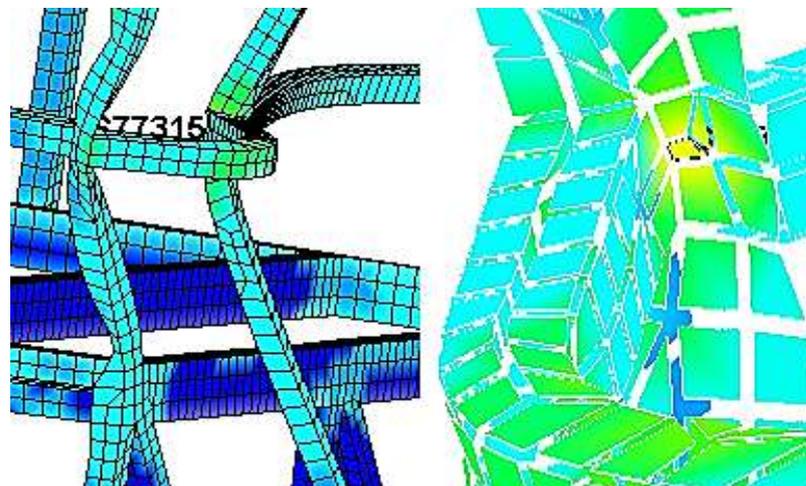


Figura 75 Elemento crítico, impacto posterior G2M1

En la Figura 76 se muestra el comportamiento del elemento crítico seleccionado relativo a la deformación estructural. La deformación presente en el elemento discreto es de 0.4 mm/mm alcanzado a los 60 ms.

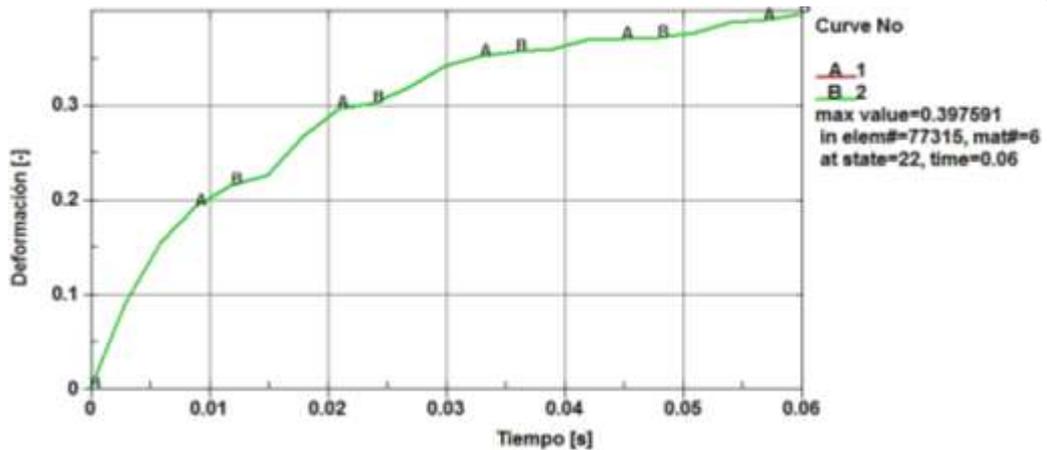


Figura 76 Diagrama deformación-tiempo del elemento crítico G2M1

B. Esfuerzo máximo del elemento crítico

El esfuerzo máximo que experimenta la estructura en el impacto posterior se produce a los 60 ms, en la Figura 77 se muestra el diagrama correspondiente al esfuerzo producido.

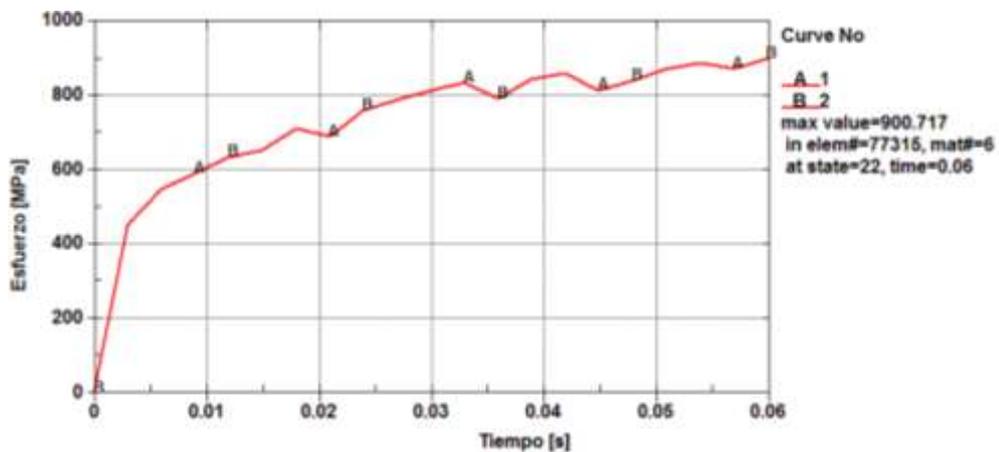


Figura 77 Diagrama esfuerzo-tiempo del elemento crítico G2M1

En la Figura 78 se muestra el diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico, éste alcanza el punto de cedencia (S_y) a los 2 ms, en este tiempo el elemento alcanza una deformación de 0.05 mm/mm; el elemento colapsa a los 3 ms, una vez que se ha superado la resistencia última a la

tensión, desde ese momento el elemento comienza a experimentar esfuerzos bruscos por concentración de esfuerzos.

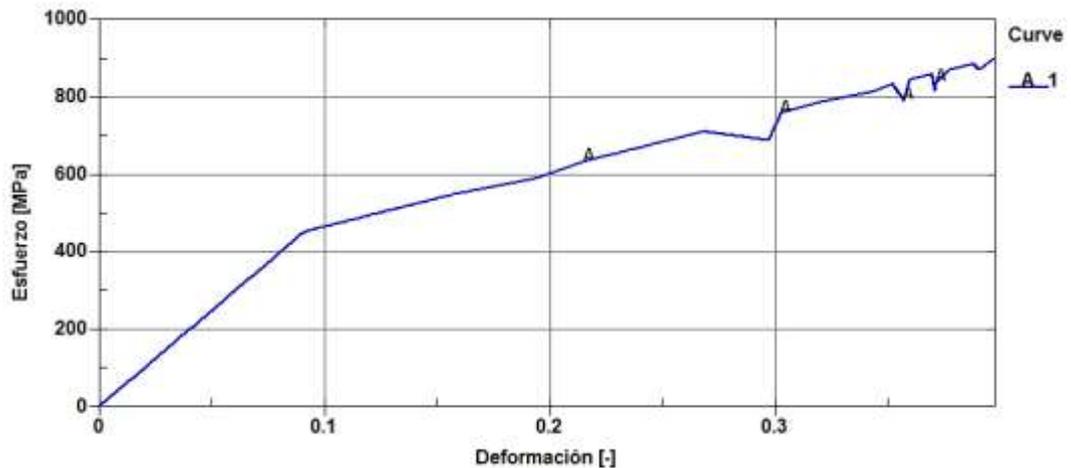


Figura 78 Diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico G2M1

C. Absorción de energía del armazón posterior del bus

La energía disipada durante el impacto hasta que el impactador se detiene es de $34 \times 10^6 [J]$, como se muestra en la Figura 79 .



Figura 79 Diagrama energía de deformación-tiempo G2M1

D. Aceleración y fuerza de impacto

La Figura 80 indica que el impactador experimenta una desaceleración brusca de $1790 \frac{m}{s^2}$, el impactador comienza a disminuir su velocidad y se desacelera una vez producido el contacto entre ambos cuerpos.

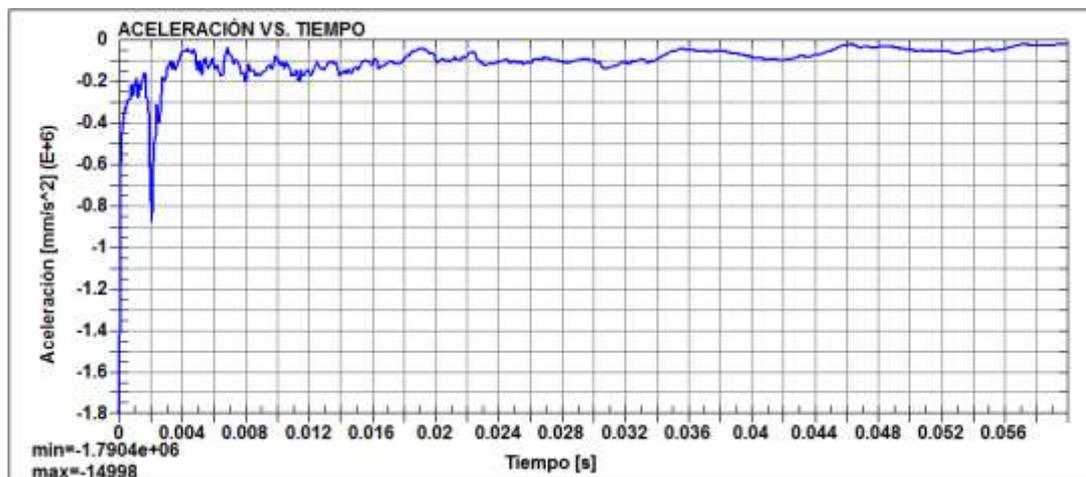


Figura 80 Diagrama aceleración-tiempo G2M1

En base a la ecuación 10 la fuerza de impacto es $0.0726 \times 10^6 \text{ N}$.

4.5. Carrocería modificada: Acero Galvanizado

Mediante la siguiente nominación:

- Geometría 2 (G2): Carrocería modificada
- Material 2 (M2): Acero Galvanizado

Se realiza el análisis relativo a la deformación y esfuerzos producidos en la carrocería, una vez generado el ensayo virtual de impacto.

4.5.1. Impacto frontal

A. Deformación estructural del bus

La carrocería experimenta una deformación estructural de 1579 mm, en la Figura 81 se muestra la deformación de la parte frontal del bus.

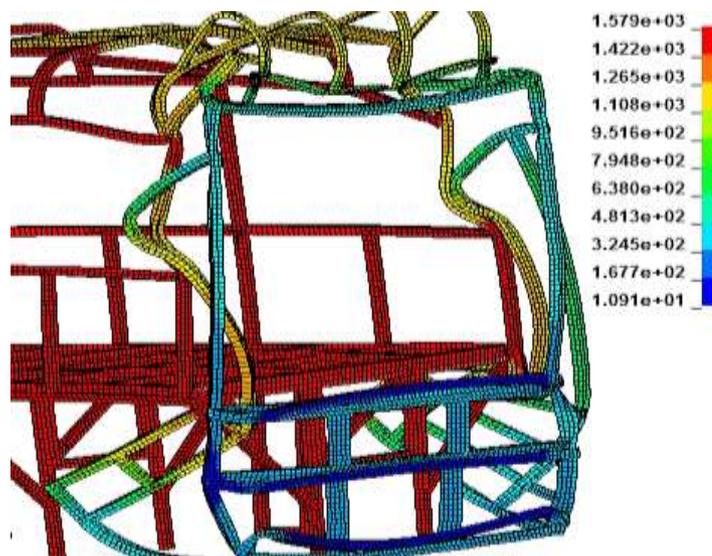


Figura 81 Deformación, impacto frontal G2M2

En la Figura 82 se muestra el elemento finito 70891, seleccionado por ser el elemento crítico para revisar su análisis por MEF.

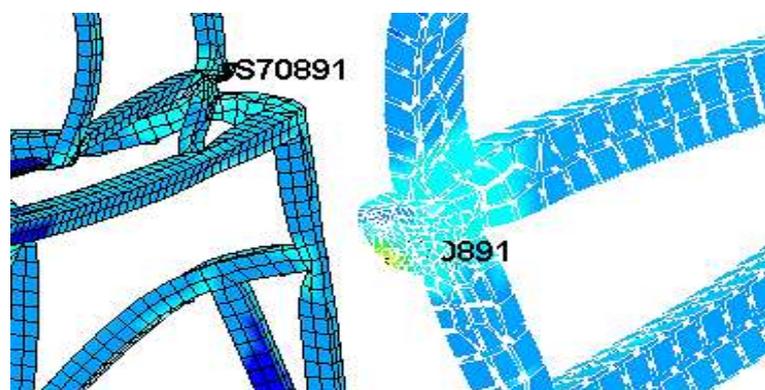


Figura 82 Elemento crítico, impacto frontal G2M2

En la Figura 83 se muestra el comportamiento del elemento crítico relativo a la deformación que presenta en el tiempo. La deformación presente en el elemento discreto es de 1.210 mm/mm a los 100 ms.

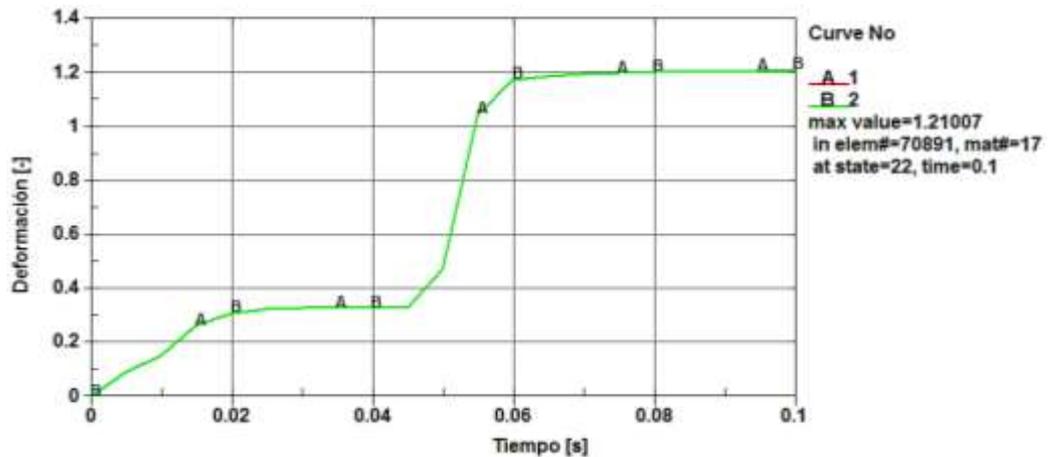


Figura 83 Diagrama deformación-tiempo del elemento crítico G2M2

B. Esfuerzo máximo del elemento crítico

El esfuerzo máximo que experimenta el bus en el impacto frontal de la carrocería se alcanza a los 85 ms, en la Figura 84 se muestra el diagrama correspondiente al esfuerzo producido.

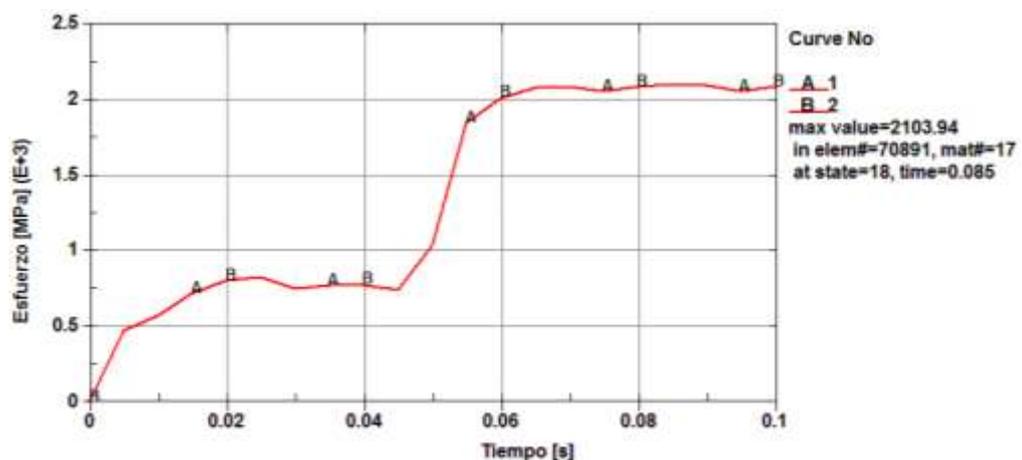


Figura 84 Diagrama esfuerzo-tiempo del elemento crítico G2M2

En la Figura 85 se muestra el diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico, éste alcanza el punto de cedencia (S_y) a los 4 ms y una deformación de 0.1 mm/mm; el elemento comienza a experimentar esfuerzos bruscos por concentración de esfuerzos debido al cambio brusco de la geometría colapsando a los 5 ms aproximadamente.

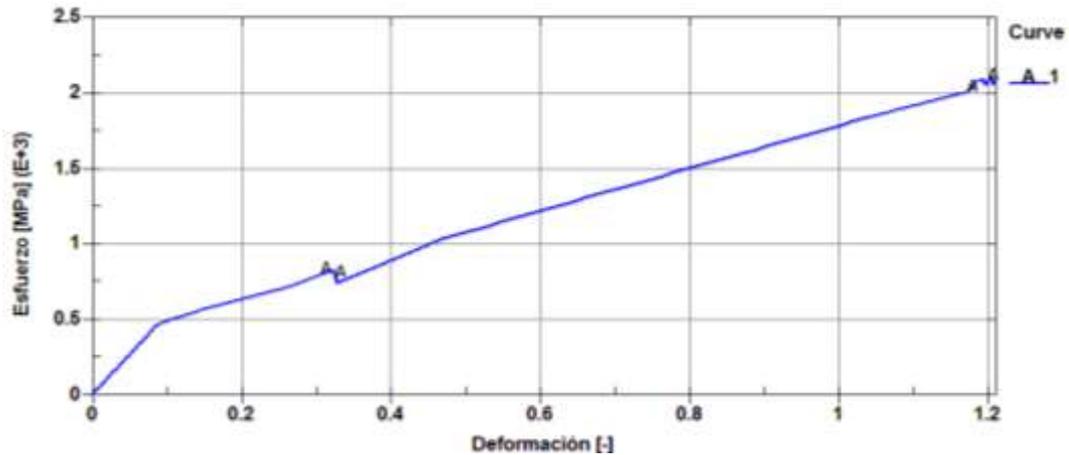


Figura 85 Diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico G2M2

C. Absorción de energía del armazón frontal del bus

La energía disipada durante el impacto hasta que el bus se detiene es de 351×10^6 [J], como se muestra en la Figura 86.

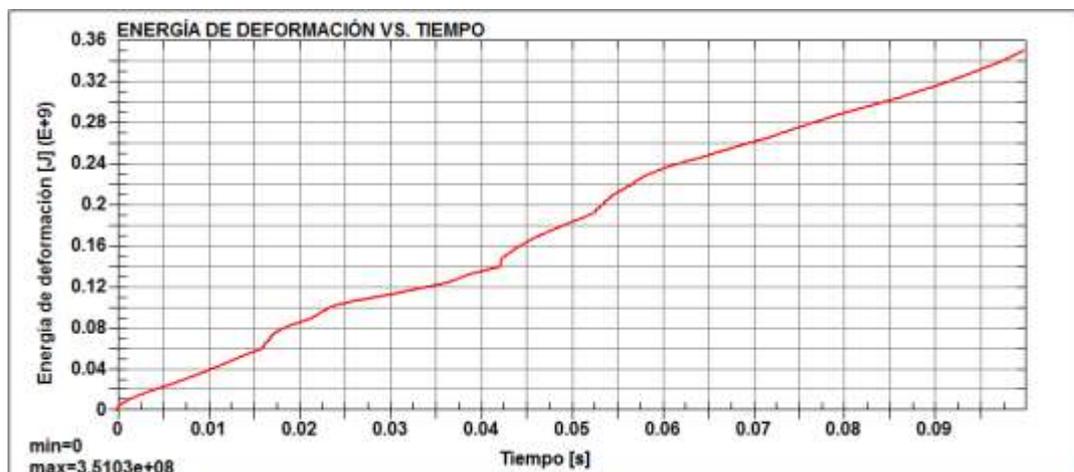


Figura 86 Diagrama energía de deformación-tiempo G2M2

D. Aceleración y fuerza de impacto

La Figura 87 indica que el bus experimenta una desaceleración brusca de $395 \frac{m}{s^2}$, el bus comienza a disminuir su velocidad y se desacelera.

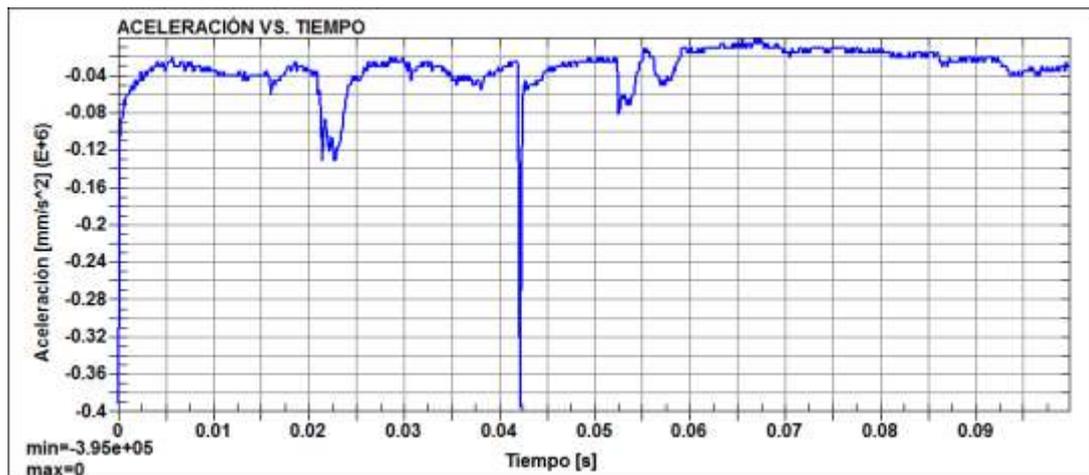


Figura 87 Diagrama aceleración-tiempo G2M2

En base a la ecuación 10 la fuerza de impacto que experimenta el bus es de $0.8266 \times 10^6 N$.

4.5.2. Impacto posterior

A. Deformación estructural del bus

La deformación de la carrocería es de 624 mm, en la Figura 88 se muestra la parte correspondiente al armazón posterior; no existe la intrusión de ningún elemento estructural al habitáculo.

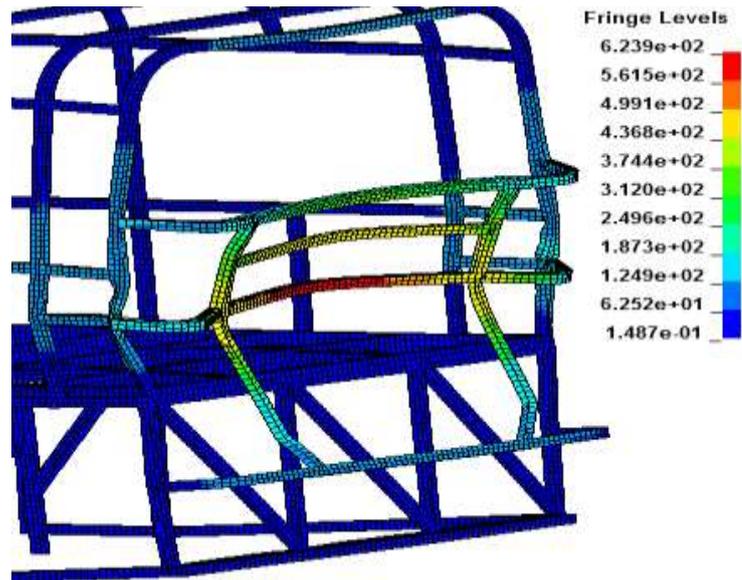


Figura 88 Deformación, impacto posterior G2M2

En la Figura 89 se muestra el elemento finito 71878, seleccionado por ser el elemento crítico para su análisis.

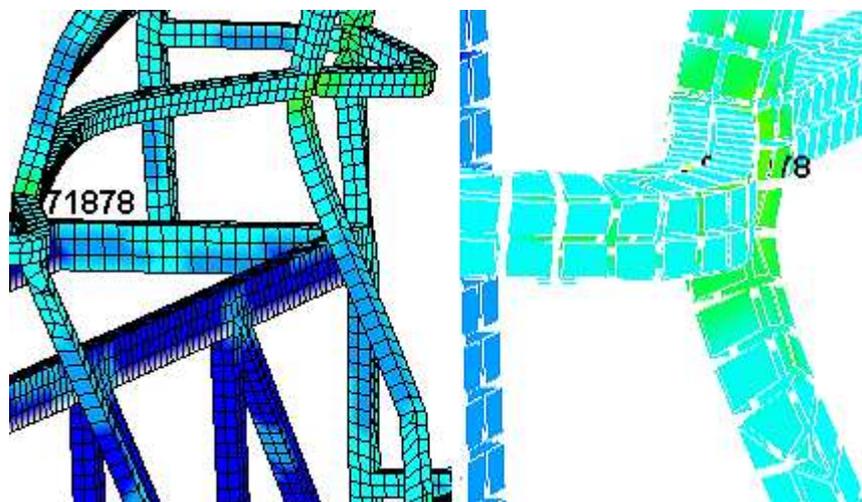


Figura 89 Elemento crítico, impacto posterior G2M2

En la Figura 90 se muestra el comportamiento del elemento crítico seleccionado relativo a la deformación estructural. La deformación presente en el elemento discreto es de 0.44 mm/mm alcanzado a los 60 ms.

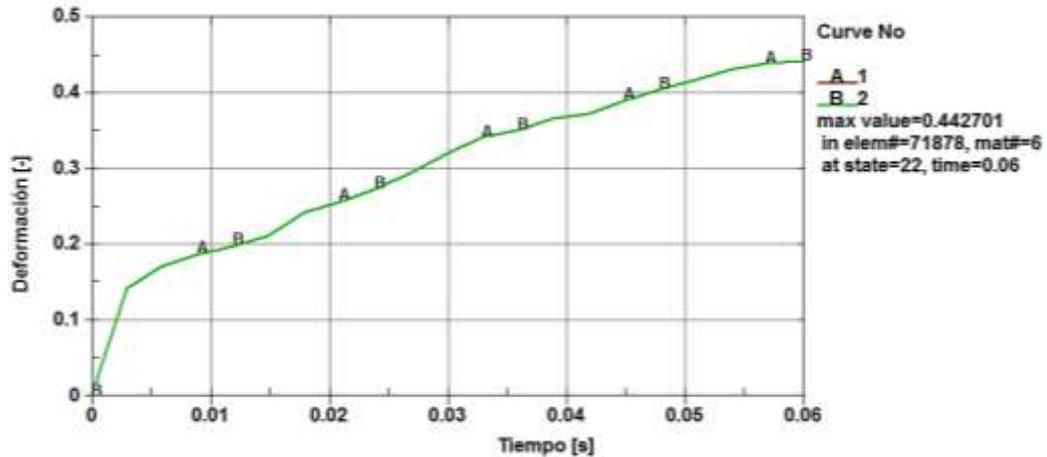


Figura 90 Diagrama deformación-tiempo del elemento crítico G2M2

B. Esfuerzo máximo del elemento crítico

El esfuerzo máximo que experimenta la estructura en el impacto posterior se produce a los 60 ms, en la Figura 91 se muestra el diagrama correspondiente al esfuerzo producido.

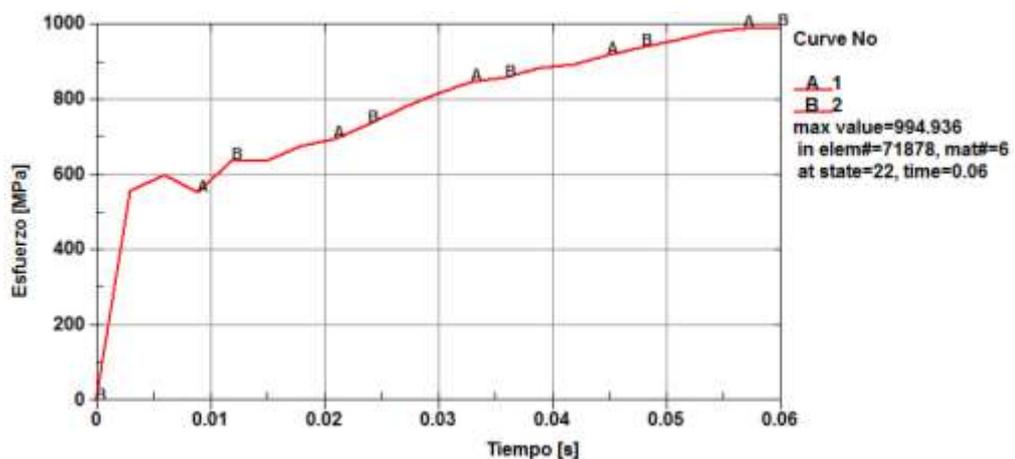


Figura 91 Diagrama esfuerzo-tiempo del elemento crítico G2M2

En la Figura 92 se muestra el diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico, éste alcanza el punto de cedencia (S_y) a los 3 ms, en este tiempo el elemento alcanza una deformación de 0.08 mm/mm; el elemento

colapsa a los 3 ms, una vez que se ha superado la resistencia última a la tensión, desde ese momento el elemento comienza a experimentar esfuerzos bruscos por concentración de esfuerzos debido al cambio desapacible de la geometría.

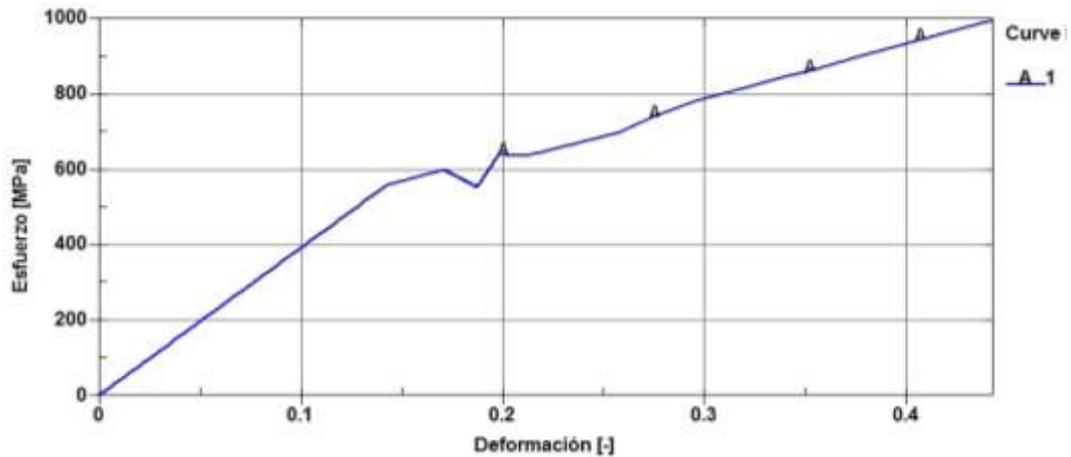


Figura 92 Diagrama esfuerzo-deformación del elemento crítico G2M2

C. Absorción de energía del armazón posterior del bus

La energía disipada durante el impacto hasta que el impactador se detiene es de 42.4×10^6 [J], como se muestra en la Figura 93.

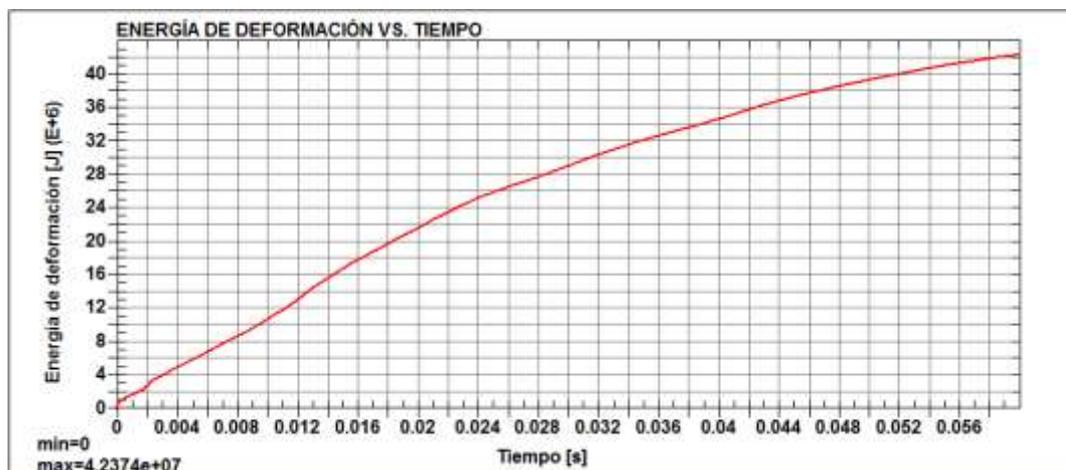


Figura 93 Diagrama energía de deformación-tiempo G2M2

D. Aceleración y fuerza de impacto

La Figura 94 indica que el impactador experimenta una desaceleración brusca de $2615 \frac{m}{s^2}$, el impactador comienza a disminuir su velocidad y se desacelera.

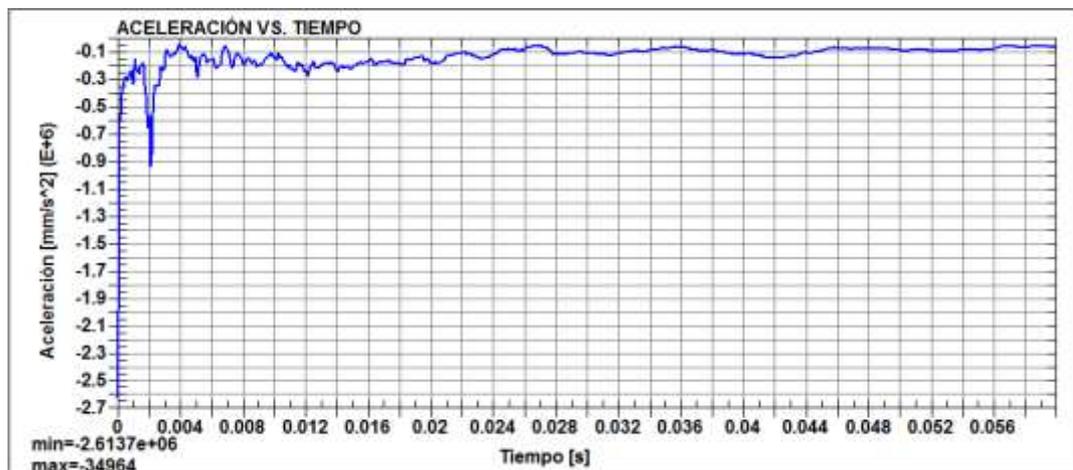


Figura 94 Diagrama aceleración-tiempo G2M2

En base a la ecuación 10 la fuerza de impacto es 0.0833×10^6 N.

En la Tabla 10 se muestra los resultados tabulados de acuerdo al tipo de ensayo, a la geometría y al material empleado en la carrocería, esto servirá para establecer conclusiones ingenieriles que ayuden a determinar la geometría y material idóneo a aplicar en la carrocería, con la finalidad de otorgar confianza en la construcción y de esta manera precautelar la seguridad de los pasajeros.

Tabla 10
Resultados de ensayos virtuales

Impacto	Geometría	Material	Deformación n (mm)	Tiempo alcanza esfuerzo máximo (ms)	Absorción de energía (Joules)	Desaceleración (m/s ²)	Fuerza impacto (N)
Frontal	G1	M1	1592	80	431E6	420	0.8199E6
	G1	M2	1604	100	385E6	420	0.8138E6
	G2	M1	1578	95	344E6	395	0.8272E6
	G2	M2	1579	85	351E6	395	0.8266E6
Posterior	G1	M1	718	60	35E6	1881	0.0724E6
	G1	M2	712	60	36E6	1951	0.073E6
	G2	M1	716	60	34E6	1790	0.0726E6
	G2	M2	624	60	42.4E6	2615	0.073E6

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- En el cálculo de la pérdida de energía del impacto frontal, la carrocería disipa un 87% ($1.14E6$ J) de la energía cinética producida antes del impacto y en el ensayo virtual se disipa el 85% ($0.58E9$ J) por medio del fenómeno de deformación; en el cálculo de la pérdida de energía del impacto posterior la carrocería disipa un 90% ($46.61E6$ J) de la energía cinética y en el ensayo virtual se disipa el 86% ($44E6$ J); esta diferencia de porcentajes se debe a factores como la geometría, velocidad de impacto, masas involucradas y tiempo de impacto.

- En el impacto frontal la carrocería estándar (G1) con material Acero ASTM A500 (M1) posee mayor capacidad para absorber la energía de la colisión con $431E6$ J respecto al impacto frontal de la carrocería (G2) con material Acero Galvanizado con $351E6$, esto demuestra que la carrocería G1M1 disipa 19% más energía que con la carrocería G2M2, al tratarse de una colisión totalmente frontal la estructura puede soportar mejor el impacto, consiguiendo menores deformaciones con la que el habitáculo de seguridad tiene un menor riesgo de verse afectado y de esta manera se puede garantizar la protección de los pasajeros.

- En el impacto posterior la carrocería estándar (G2) con material Acero Galvanizado (M2) posee mayor capacidad para absorber la energía de la colisión con $42.4E6$ J respecto al impacto posterior de la carrocería (G1) con material Acero ASTM A500 con $35E6$, además no existe la posibilidad de que la zona de supervivencia pueda verse afectada por la intrusión de algún elemento estructural, pues el armazón posterior puede soportar el impacto, consiguiendo una deformación de 624 mm, menor a las deformaciones experimentadas en las otros casos de estudio (Tabla 10).

- En el impacto frontal de la carrocería estándar (G1) con material Acero ASTM A500 (M1) el vehículo tiende a detenerse experimentando una desaceleración de 420 m/s^2 , pues al percibir este cambio brusco de aceleración, la energía del impacto se traduce en una disipación de energía por deformación del bus, pues por el hecho de ir dentro del bus, los ocupantes del mismo tienen energía cinética, y evidentemente la energía a disipar será mayor, lo que queda demostrado y se observa en la Tabla 10 que la energía disipada es mayor que en el resto de los casos. En el caso del impacto posterior la carrocería modificada (G2) con Acero Galvanizado (M2) experimenta la máxima desaceleración con un valor de 2615 m/s^2 que en resto de casos y por ende mayor capacidad de absorción de la energía del choque.
- De acuerdo a los resultados obtenidos en todos los casos los esfuerzos máximos experimentados son inevitables, pues los elementos críticos fallan por concentración de esfuerzos y por deformación excesiva, debido a la magnitud del impacto, a las propiedades del material, al tiempo de impacto, a la geometría de la estructura, a las velocidades y desaceleraciones burdas presentes en el proceso de impacto.
- En el impacto frontal del bus, la carrocería G1M2 experimenta la máxima deformación de 1604 mm con una fuerza de impacto de $0.8138\text{E}6$; y en el caso del impacto posterior la carrocería G1M1 experimenta una máxima deformación de 718 mm con una fuerza de impacto de $0.0724\text{E}6$. Esto demuestra que a menor deformación que experimenta el bus tanto en el impacto frontal como posterior, mayor es la fuerza de impacto que se transmite a la estructura y por ende a los ocupantes del bus.

6.2. Recomendaciones

- Se debe tener en cuenta que los resultados dependen del perfeccionamiento del modelado de la carrocería, ya que al no estar bien estructurada la carrocería del bus se presentarán errores al momento de realizar el estudio virtual, lo cual conllevará a más tiempo en la obtención de resultados y a la invalidación de los mismos.
- Para reducir el gasto computacional o tiempo de cálculo del análisis de una estructura por medio del Método de Elementos Finitos se debe usar elementos tipo cáscara o Shell que el mismo programa posee, este tipo de elementos son muy utilizados en la actualidad en estructuras sometidas a flexión y deformación, además presentan fiabilidad en los resultados arrojados.
- Se debería implementar en las reglamentaciones ecuatorianas requisitos para la validación de carrocerías de buses en todas sus modalidades, basados en ensayos o simulaciones virtuales de impacto, dentro de estos requisitos implementar condiciones o parámetros de velocidad relacionadas a las máximas permitidas en carretera, pues esto servirá para la homologación y calificación de empresas carroceras.
- Se recomienda investigar sobre nuevos materiales que permitan otorgar la máxima seguridad a los ocupantes del vehículo en el caso de impactos frontales y posteriores. Estos materiales debe poseer una excelente capacidad de absorción de energía de impacto, con la finalidad de precautelar la seguridad de los pasajeros del bus.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- © 2015 ANSYS, Inc. (2014). *LS-DYNA® Keyword user's manual* (Vol. I). Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation (LSTC).
- ACEROTEX. (15 de Enero de 2012). Recuperado el 16 de Marzo de 2016, de <http://acerotek.com.mx/web/?portfolio=perfiles-tubulares>
- AHMSA. (2014). *Altos hornos de México*. Recuperado el 6 de Mayo de 2016, de http://www.ahmsa.com/Acero/Complem/Manual_Construccion_2013/Capitulo_1.pdf
- Ambati, T., Srikanth, K., & Veeraraju, P. (13 de Octubre de 2012). Simulation of vehicular frontal crash test. *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering*, II, 37-42. Recuperado el 5 de Febrero de 2017
- Andrade García , L. E., & Méndez Canchig, P. X. (2012). *Estudio del diseño de una carrocería con análisis de esfuerzos estáticos y dinámicos de un autobús de la marca Patricio Cepeda calificada con Norma ISO 9001-2008 mediante la aplicación de un software para el cálculo de las fuerzas*. Latacunga: Escuela Politécnica del Ejército.
- Aranda Pazmiño, D. O., & Dután Amay, V. P. (2009). *Estudio de aceros estructurales para la construcción de carrocerías para buses*. Quito, Pichincha, Ecuador. Recuperado el 25 de Febrero de 2017
- Cepeda Miranda, J. (2006). *Análisis del comportamiento mecánico del sistema estructural del autobús Feline para la empresa carrocera Miral Buses*. Sangolquí, Pichincha, Ecuador. Recuperado el 6 de Febrero de 2017
- Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas. (22 de Febrero de 2006). *Uniform technical prescriptions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure*. Recuperado el 20 de Junio de 2016, de <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2009/wp29grsg/GRS>

G-96-04e.doc

DASSAULT SYSTEMES. (2017). *Ayuda de SolidWorks*. Recuperado el 17 de Julio de 2017, de http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Design_Studies/Mesh_Types.htm

DirectIndustry. (2017). Recuperado el 1 de Marzo de 2017, de <http://www.directindustry.es/prod/msc-software/product-6042-493371.html>

Elmarakbi, A. (2014). *Advanced composite materials for automotive applications* (Primera ed.). United Kingdom: Jhon Wiley & Sons, Ltd. Recuperado el 5 de Marzo de 2017

Equipo de Profesores del Centro de Documentación. (2015). *Mantenimiento de vehículos*. Cartagena, Colombia. Recuperado el 16 de Enero de 2017

Esmeraldas Meneses, C. A. (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*. Latacunga, Ecuador. Recuperado el 25 de Enero de 2017

EuroNCAP. (2015). Recuperado el 21 de Febrero de 2017, de <http://www.euroncap.com/es/seguridad-en-los-veh%C3%ADculos/descripci%C3%B3n-de-las-valoraciones/protecci%C3%B3n-de-ocupantes-adultos/impacto-frontal-completo/>

EuroNCAP. (2 de Febrero de 2017). Recuperado el 1 de Marzo de 2017, de <http://www.euroncap.com/es>

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2009). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1323:2009. *Vehículos automotores. Carrocerías de buses. Requisitos*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.

Insurance Institute for Highway Safety. (2017). Recuperado el 18 de Febrero de 2017, de <http://www.iihs.org/iihs/ratings/ratings-info/frontal-crash-tests>

- L. de Soria, S. (5 de Septiembre de 2000). *Seguridad vial*. Recuperado el 5 de Enero de 2017, de El habitáculo de seguridad: www.centro-zaragoza.com
- Martín. (14 de Diciembre de 2007). *Seguridad en el vehículo*. Recuperado el 7 de Febrero de 2017, de http://www.drctsanmartin.gob.pe/documentos/manual_conductor/cap_15_seguridad_enel_vehiculo.pdf
- Martín Valencia, J. A. (5 de Septiembre de 2008). *Historia de los crash test*. Recuperado el 21 de Febrero de 2017, de www.euroncap.com
- Mithun, R. (2014). *Automotive Chassis*. MS Ramaiah School of Advanced Studies. Recuperado el 10 de Enero de 2017
- Norton L, R. (2011). *Diseño de máquinas*. (L. Cruz Castillo, Ed., & A. Enríquez Brito, Trad.) Naucalpan de Juárez, México, DF: Prentice Hall. Recuperado el 5 de Enero de 2017
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de Máquinas* (Cuarta ed.). (A. Enríquez Brito, Trad.) México: Prentice Hall.
- Páginas Amarillas Cantv*. (19 de Junio de 2014). Recuperado el 1 de Marzo de 2017, de <http://www.pac.com.ve/contenido/industria/acero-galvanizado-caracteristicas-y-usos/11146/87>
- Pérez Vaca, J. (2011). *Diseño y cálculo del bastidor de un vehículo cosechador de fresas* (Primera ed.). Recuperado el 11 de Enero de 2017
- Pulido Sánchez, C. (17 de Abril de 2004). *El vehículo como elemento de seguridad vial*. Recuperado el 2 de Enero de 2017
- Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 043. (2014). *Vehículos de transporte público de pasajeros intraregional, interprovincial e intraprovincial*. Quito, Ecuador. Recuperado el 10 de Enero de 2017
- Zhu, P., Shi, L., & Yang, R. (2012). *ModeFRONTIER*. Recuperado el 21 de Febrero de 2017, de <http://www.esteco.com/modefrontier/method-selecting-surrogate-models-crashworthiness-optimization>



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
ENERGÍA Y MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por el señor: **VÍCTOR SANTIAGO CHÁFUEL ORTEGA**

En la ciudad de Latacunga, a los 25 días del mes de Agosto de 2017.

Ing. Stalin Mena.

DIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:

Ing. Danilo Zambrano

DIRECTOR DE CARRERA

Dr. Freddy Jaramillo

SECRETARIO ACADÉMICO