



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 DE UNA CARROCERÍA
AUTOPORTANTE PARA UN BUS INTERPROVINCIAL
MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS PARA LA PRODUCCIÓN
EN SERIE"**

AUTOR: LUIS ENRIQUE VILLAFUERTE BUÑAY

DIRECTOR: ING. GUIDO TORRES

LATACUNGA

2017



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "**ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA CARROCERÍA AUTOPORTANTE PARA UN BUS INTERPROVINCIAL MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS PARA LA PRODUCCIÓN EN SERIE**" realizado por el señor **LUIS ENRIQUE VILLAFUERTE BUÑAY**, 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 Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **LUIS ENRIQUE VILLAFUERTE BUÑAY** para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 2 de Agosto del 2017

Ing. GUIDO TORRES
DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

AUTORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **LUIS ENRIQUE VILAFUERTE BUÑAY**, con cédula de ciudadanía N° 1720205812, declaro que este trabajo de titulación "**ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA CARROCERÍA AUTOPORTANTE PARA UN BUS INTERPROVINCIAL MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS PARA LA PRODUCCIÓN EN SERIE**" 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, 2 de Agosto del 2017

LUIS ENRIQUE VILAFUERTE BUÑAY

C.C.: 1720205812



UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

AUTORIZACIÓN

Yo, **LUIS ENRIQUE VILLAFUERTE BUÑAY** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación " **ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA CARROCERÍA AUTOPORTANTE PARA UN BUS INTERPROVINCIAL MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS PARA LA PRODUCCIÓN EN SERIE**" cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Latacunga, 2 de Agosto del 2017

LUIS ENRIQUE VILLAFUERTE BUÑAY

C.C.: 1720205812

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación va dedicado primeramente a Dios que ha puesto en mi camino a las personas adecuadas para llevar a cabo su propósito, aparte de darme una gran familia y la guía para nunca rendirme.

A mis grandiosos padres Sr. Luis Villafuerte y Sra. María Buñay quienes han sido un ejemplo de sabiduría, fuerza, trabajo, amor y demás virtudes que me han guiado durante toda mi vida. Por todo el esfuerzo que hicieron por sacarme adelante y creer en mí, A Ustedes a quienes amo con todo mi ser y son dignos de total admiración.

A mis queridas hermanas Jacqueline y Brigitte Villafuerte por los consejos, motivaciones, empuje y momentos inolvidables, sobre todo por enseñarme que no importa la edad o distancia siempre puedo contar con Ustedes.

A mi mejor amiga y compañera de vida Alexandra Cánchig, ejemplo de lucha y esfuerzo, por guiarme durante este proceso con sus consejos, apoyo y amor lo cual me ha motivado para ser un profesional y salir adelante.

Luis

AGRADECIMIENTO

El agradecimiento principal a Dios por darme salud y la sabiduría necesaria para la culminación de este trabajo de titulación.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, y a las personas que forman parte de la Carrera de Ingeniería Automotriz por todas las experiencias, vivencias y demás momentos que hoy forman parte de mi vida profesional

A mis padres y hermanas quienes me brindaron su apoyo, paciencia y amor a pesar de las circunstancias de la vida.

Al Ing. Guido Torres por guiar la investigación, quien ha sabido dedicar el tiempo necesario para compartir sus valiosos conocimientos en el proyecto, y ser parte de este logro.

Al Ing. Stalin Mena por la colaboración en el proyecto de investigación, y gracias a su aporte se ha podido culminar de manera satisfactoria.

A CARROCERÍAS M&L en especial Al Sr. Milton López Gerente de la empresa y al Ing. Daniel Álvarez jefe de producción por brindarme la oportunidad de desarrollar el proyecto en sus instalaciones y por facilitar la información y conocimientos necesarios para que este proyecto se lleve a cabo.

A las personas allegadas que de una u otra manera fueron parte de este proyecto y pusieron un granito de arena para que el mismo sea elaborado exitosamente.

Luis

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA	i
CERTIFICACIÓN	ii
AUTORIA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE ECUACIONES	xxi
RESUMEN	xxii
ABSTRACT	xxiii

CAPÍTULO I

MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Descripción resumida del proyecto	4
1.4. Justificación e importancia	4
1.5. Objetivos	5
1.5.1. Objetivo general	5
1.5.2. Objetivos específicos	5
1.6. Metas	6
1.7. Hipótesis	7
1.8. Variables de la investigación.....	7
1.8.1. Variable independiente.....	7
1.8.2. Variable dependiente	7

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Vehículos para el transporte de pasajeros	8
2.1.1.	Unidad de transporte interprovincial.....	8
2.2.	Componentes estructurales de una unidad de transporte.....	9
2.3.	Bastidor del chasis	9
2.3.1.	Diseño del bastidor.....	11
2.3.2.	Materiales del bastidor	12
2.4.	La Carrocería	13
2.4.1.	Carrocería autoportante	14
2.5.	Normas para el diseño de carrocerías de buses	21
2.5.1.	Normativa Técnica Ecuatoriana INEN 1323.....	21
2.5.2.	Reglamento técnico Ecuatoriano INEN 043	29
2.5.3.	Diseño e Ingeniería Asistida por computador.....	33
2.5.4.	Método de Elementos Finitos (MEF)	35
2.5.5.	Procedimiento para el MEF	38
2.5.6.	Mallado.....	39
2.5.7.	Calidad de malla	39
2.5.8.	Problemas no lineales	41

CAPÍTULO III

INGENIERÍA ESTRUCTURAL DE UNA CARROCERÍA DE BUS AUTOPORTANTE

3.1.	Introducción.....	45
3.2.	Especificaciones del chasis utilizado en la carrocería autoportante	45
3.3.	Material empleado en el armazón de la carrocería autoportante	48
3.3.1.	Acero ASTM A36	49
3.3.2.	Acero ASTM A500	51
3.3.3.	Especificaciones de perfiles utilizados en la carrocería	53
3.4.	Geometría estructural empleado en la carrocería autoportante	54
3.4.1.	Geometría estructural de los armazones laterales.....	55

3.4.2.	Geometría estructural de la plataforma – piso	56
3.4.3.	Geometría estructural del techo.	56
3.4.4.	Geometría estructural del frente y posterior.	57
3.4.5.	Geometría estructural de plataforma y anclajes	58
3.5.	Estudio de las fuerzas que actúan sobre la carrocería	59
3.5.1.	Criterio de efectos producidos.....	59
3.5.2.	Criterio de magnitud y dirección (Fuerzas dinámicas).....	62
3.6.	Cargas aplicadas a la carrocería de un bus autoportante	65
3.6.1.	Cargas estáticas	65
3.6.2.	Cargas dinámicas.....	66
3.7.	Análisis y selección de software.....	69

CAPITULO IV

METODOLOGÍA DEL MODELADO Y VALIDACIÓN ESTRUCTURAL

4.1.	Importación de la geometría al software	73
4.2.	Verificación de la geometría.....	74
4.3.	Pre-proceso del análisis estático.....	76
4.3.1.	Asignación de materiales	77
4.3.2.	Asignación de la sección de los elementos.....	80
4.3.3.	Mallado.....	90
4.3.4.	Calidad de Mallado.....	91
4.3.5.	Condiciones de frontera	94
4.3.6.	Establecimiento y simulación de cargas actuantes	97
4.3.7.	Cargas constantes	97

CAPITULO V

METODOLOGÍA DE LA SIMULACIÓN, ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y MODELADO

5.1.	Cargas necesarias para el funcionamiento de la unidad.....	107
5.1.1.	Cargas Dinámicas	108

5.1.2.	Aplicación de Cargas	112
5.2.	Resultados obtenidos en base a las combinaciones de cargas	117
5.3.	Resumen de las combinaciones de cargas aplicadas.....	135
5.4.	Resistencia de la estructura	135
5.4.1.	Acorde a las cargas combinadas	135
5.4.2.	Factor de seguridad	136
5.4.3.	Carga estática sobre el techo.....	137
5.5.	Propuesta de diseño para el bus autoportante.....	138
5.6.	Regiones para la fijación de la carrocería al chasis	139
5.7.	Soldadura.....	142
5.8.	Diseño estético de la carrocería autoportante.....	144
5.8.1.	Configuración interna	144
5.8.2.	Configuración del habitáculo	145
5.8.3.	Configuración de recubrimientos laterales, techo y bodegas	146
5.8.4.	Configuración parte delantera y posterior	147
5.8.5.	Configuración Vidrios	147
5.9.	Características de diseño.....	148
5.10.	Análisis aerodinámico del bus autoportante.....	149
5.11.	Resistencia Aerodinámica.....	156
5.12.	Renderización	157

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1.	CONCLUSIONES	160
6.2.	RECOMENDACIONES.....	164

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	165
---	------------

ANEXOS.....	172
--------------------	------------

ANEXO A NORMATIVA INEN 1323:2009

ANEXO B PLANOS CARROCERÍA AUTOPORTANTE

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Perfiles estructurales utilizados en la fabricación del bastidor	12
Tabla 2	Cargas vivas de diseño.....	24
Tabla 3	Velocidad del vehículo, Radio mínimo y Peralte en carreteras ...	25
Tabla 4	Elementos finitos comunes	37
Tabla 5	Calidad de malla según el Criterio Jacobiano	40
Tabla 6	Calidad de malla ortogonal	41
Tabla 8	Especificaciones del chasis Mercedes Benz O500 R/1830/30 ...	46
Tabla 9	Dimensiones generales de la estructura autoportante	48
Tabla 10	Clasificación y propiedades mecánicas de los tubos	48
Tabla 11	Ventajas del acero ASTM A36	50
Tabla 12	Desventajas del acero ASTM A36	50
Tabla 13	Propiedades mecánicas de perfiles utilizados en la construcción de la carrocería autoportante.....	51
Tabla 14	Propiedades mecánicas de perfil ASTM A 500 utilizados en la construcción de la carrocería autoportante.	53
Tabla 15	Perfiles de la carrocería autoportante	53
Tabla 16	Asignación de espesores en los elementos estructurales de la carrocería autoportante	80
Tabla 17	Carga de cajuelas	97
Tabla 18	Masa de chasis Mercedes Benz O500R 1830	98
Tabla 19	Masa y carga de la estructura autoportante.....	99
Tabla 20	Obtención de la densidad de vidrios y parabrisas utilizados en carrocerías M&L.....	102
Tabla 21	Calculo de masa y carga de parabrisas y vidrio de la carrocería autoportante.....	102
Tabla 22	Obtención de la densidad de fibra de vidrio tomado en probeta de 20mm x 20 mm x en carrocerías M&L	104
Tabla 23	Masa de fibra de vidrio utilizado en la parte frontal y posterior de la estructura autoportante	105
Tabla 24	Masa y carga de los asientos del conductor tripulante y pasajeros del bus autoportante	106

Tabla 25	Cargas necesarias para el funcionamiento de la unidad.....	107
Tabla 26	Cargas vivas analizadas	108
Tabla 27	Coeficiente de resistencia aerodinámica al avance para vehículos y autobuses.....	110
Tabla 28	Valores de la densidad del aire	111
Tabla 29	Cargas que actúan en el análisis de la estructura	113
Tabla 30	Asignación de cargas estáticas y dinámicas.....	113
Tabla 31	Combinaciones de cargas recomendadas por AISC-LRFD	117
Tabla 32	Resumen de combinaciones de cargas aplicadas a la carrocería autoportante.....	135
Tabla 33	Factor de seguridad por cada carga combinada según el método LRFD aplicada a la carrocería autoportante.....	137
Tabla 34	Parámetros de soldadura SMAW.....	143
Tabla 35	Parámetros de soldadura GMAW	143
Tabla 36	Forrados utilizados en la carrocería autoportante.....	146
Tabla 37	Características de diseño bus autoportante.....	148
Tabla 38	Condiciones de funcionamiento de bus autoportante	151
Tabla 39	Análisis realizado al bus autoportante mediante el túnel de viento	153

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Árbol de problemas.....	2
Figura 2	Bus Interprovincial Trans. Esmeraldas S.A.....	9
Figura 3	Carrocería con chasis tipo escalera.....	10
Figura 4	Chasis Mercedes Benz O500 R18/30.....	10
Figura 5	Configuración del chasis para carrocería autoportante	11
Figura 6	Sección de bastidor y perfil estructural utilizado en su construcción.....	12
Figura 7	Carrocería Milenium I.....	13
Figura 8	Carrocería con estructura autoportante	14
Figura 9	Zona de maleteros de bus con carrocería autoportante	14
Figura 10	Armazón delantero.....	15
Figura 11	Carga torsional sobre el arco delantero de la carrocería	16
Figura 12	Armazón Central.....	17
Figura 13	Carga torsional sobre la estructura lateral del bus.....	17
Figura 14	Armazón Posterior	18
Figura 15	Armazón del piso	18
Figura 16	Disposición de largueros transversales en el piso del bus.....	19
Figura 17	Armazón del techo	19
Figura 18	Esqueleto del armazón del techo.....	20
Figura 19	Paneles exteriores de la carrocería	20
Figura 20	Espacio de supervivencia (Vista transversal)	22
Figura 21	Espacio de supervivencia (Vista longitudinal).....	22
Figura 22	Fuerza de inercia aplicada en el instante de frenado	26
Figura 23	Vehículo sometido a un frenado brusco.....	26
Figura 24	Proceso de análisis y diseño por elementos finitos.....	34
Figura 25	Modelo en Software CAD, Elemento Mecánico	35
Figura 26	Modelo en Software CAD, Discretizado en Software CAE	36
Figura 27	Análisis de esfuerzos en cargas estáticas de la pieza	36
Figura 28	Diagrama esfuerzo-deformación.....	42
Figura 29	Esquema del chasis Mercedes Benz O500 R/1830/30.....	46
Figura 30	Curvas de desempeño Motor Mercedes Benz OM 926 LA.....	47

Figura 31	Especificaciones de ángulo ASTM A36	49
Figura 32	Perfiles estructurales ASTM A500 de sección rectangular y sección cuadrada	52
Figura 33	Esquema tipo pórtico	55
Figura 34	Geometría estructural del armazón lateral	55
Figura 35	Geometría estructural de la plataforma – piso	56
Figura 36	Geometría estructural del techo	57
Figura 37	Geometría estructural del frente	57
Figura 38	Geometría estructural posterior	58
Figura 39	Geometría estructural de plataforma y anclajes	58
Figura 40	Perfil unión (Construido)	59
Figura 41	Comportamiento de las cargas flexionantes	60
Figura 42	Comportamiento de las cargas torsionales	61
Figura 43	Comportamiento de las cargas laterales, mostrando la parte externa de la estructura sin incluir el interior	61
Figura 44	Fuerzas verticales en la parte posterior de la estructura	62
Figura 45	Fuerzas verticales que actúan en la parte delantera de la estructura autoportante	63
Figura 46	Fuerzas longitudinales que actúan en la estructura autoportante	64
Figura 47	Cargas transversales que actúan en las curvas sobre la carrocería autoportante	64
Figura 48	Carga muerta – Bus terminado	65
Figura 49	Carga viva aplicada a un bus	66
Figura 50	Comportamiento de las cargas de frenado, mostrando la parte externa de la estructura sin incluir el interior	67
Figura 51	Cargas de giro actuantes sobre la carrocería autoportante	68
Figura 52	Carga por resistencia al aire frontal actuante sobre la carrocería autoportante	68
Figura 53	Interfaz Software CAD	69
Figura 54	Interfaz Software CAD	70
Figura 55	Interfaz Software CAE	71
Figura 56	Planos de la carrocería autoportante	73
Figura 57	Boceto de la estructura autoportante	74

Figura 58	Interferencias en los elementos de la carrocería	75
Figura 59	Configuración de elemento sólido a superficial.....	75
Figura 60	Contactos entre superficies	76
Figura 61	Importación de la estructura al Software CAE	77
Figura 62	Propiedades Acero Estructural A36 en Engineering Data	78
Figura 63	Propiedades Acero Estructural A500 en Engineering Data	78
Figura 64	Asignación del acero ASTM A36 a cada elemento de la estructura autoportante	79
Figura 65	Asignación del acero ASTM A500 a cada elemento de la estructura autoportante	79
Figura 66	Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento cuadrado y 2 mm de espesor	80
Figura 67	Sección del tubo cuadrado con 2 mm de espesor	80
Figura 68	Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento cuadrado y 2 mm de espesor	81
Figura 69	Sección del tubo cuadrado con 2 mm de espesor	81
Figura 70	Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento cuadrado y 3 mm de espesor	81
Figura 71	Sección del tubo cuadrado con 3 mm de espesor	82
Figura 72	Sección del tubo cuadrado con 3 mm de espesor	82
Figura 73	Sección del tubo cuadrado con 5 mm de espesor	83
Figura 74	Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento cuadrado y 1,5 mm de espesor	83
Figura 75	Sección del tubo cuadrado con 1,5 mm de espesor	84
Figura 76	Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento en "C" y 2 mm de espesor	84
Figura 77	Sección del perfil en "C" con 2 mm de espesor	84
Figura 78	Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento en "L" y 2 mm de espesor	85
Figura 79	Sección del perfil en "L" con 2 mm de espesor.....	85
Figura 80	Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento en "Z" y 2 mm de espesor.....	85
Figura 81	Sección del perfil en "Z" con 2 mm de espesor.....	86
Figura 82	Elementos estructurales de la carrocería autoportante	

	con sección del elemento rectangular y 3 mm de espesor	86
Figura 83	Sección del tubo rectangular con 3 mm de espesor	86
Figura 84	Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento rectangular y 3 mm de espesor	87
Figura 85	Sección del tubo rectangular con 3 mm de espesor	87
Figura 86	Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento rectangular y 5 mm de espesor	88
Figura 87	Sección del tubo rectangular con 5 mm de espesor	88
Figura 88	Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento y 4 mm de espesor	88
Figura 89	Sección del perfil de “unión” con 4 mm de espesor	89
Figura 90	Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento y 5 mm de espesor	89
Figura 91	Sección del perfil de “unión” con 5 mm de espesor	89
Figura 92	Mallado generado sobre la estructura autoportante)	90
Figura 93	Calidad de malla según el Radio Jacobiano	92
Figura 94	Gráfico estadístico del mallado de la carrocería de acuerdo al criterio del radio Jacobiano.....	92
Figura 95	Mallado de la carrocería de acuerdo al criterio de Calidad Ortogonal	93
Figura 96	Gráfico estadístico del mallado de la carrocería de acuerdo al criterio de Calidad Ortogonal.....	93
Figura 97	Mallado de la carrocería de acuerdo al criterio de Calidad Skewness.....	94
Figura 98	Gráfico estadístico del mallado de la carrocería de acuerdo al criterio de Calidad Skewness	94
Figura 99	Anclajes del chasis autoportante	95
Figura 100	Aplicación de los soportes fijos en la estructura autoportante ..	96
Figura 101	Aplicación de la fuerza de gravedad en la estructura autoportante	96
Figura 102	Cajuelas de la estructura autoportante	97
Figura 103	Módulo delantero del chasis Mercedes Benz O500R	98
Figura 104	Módulo posterior del chasis Mercedes Benz O500R	98
Figura 105	Cubrimiento del piso	99

Figura 106	Cubrimiento del techo	100
Figura 107	Cubrimiento lateral izquierdo	100
Figura 108	Cubrimiento lateral derecho	101
Figura 109	Masa de la estructura autoportante	101
Figura 110	Parabrisas delantero.....	103
Figura 111	Parabrisas posterior.....	103
Figura 112	Vidrios laterales derecho	103
Figura 113	Vidrios laterales izquierdo.....	104
Figura 114	Fibra de vidrio delantero	105
Figura 115	Fibra de vidrio posterior	105
Figura 116	Asiento conductor	106
Figura 117	Asientos Pasajeros	106
Figura 118	Asignación de cargas muertas sobre las cajuelas de la carrocería	114
Figura 119	Asignación de cargas muertas sobre los perfiles de contorno de vidrios en la carrocería	114
Figura 120	Asignación de cargas muertas sobre el piso de la carrocería	114
Figura 121	Asignación de cargas muertas sobre el chasis.....	114
Figura 122	Asignación de cargas vivas sobre el piso de la carrocería	115
Figura 123	Selección de dirección de carga sobre la carrocería	115
Figura 124	Asignación de cargas de aceleración brusca sobre los perfiles de la carrocería	115
Figura 125	Selección de dirección de aceleración brusca sobre la carrocería	115
Figura 126	Asignación de cargas de giro sobre los perfiles de la carrocería	116
Figura 127	Selección de dirección de cargas de giro sobre la carrocería	116
Figura 128	Asignación de cargas por resistencia al aire frontal sobre los perfiles de la carrocería	116
Figura 129	Selección de dirección de carga por resistencia al aire frontal sobre la carrocería	116
Figura 130	Asignación de cargas de frenado sobre los	

perfiles de la carrocería.....	117
Figura 131 Selección de dirección de carga de frenado sobre la carrocería	117
Figura 132 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 1 (Tensión equivalente – Von Mises)	118
Figura 133 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 1 (deformación total)	119
Figura 134 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 1 (factor de seguridad)	120
Figura 135 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 2 (Tensión equivalente – Von Mises)	121
Figura 136 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 2 (deformación total)	121
Figura 137 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 2 (factor de seguridad)	122
Figura 138 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 3 (Tensión equivalente – Von Mises)	123
Figura 139 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 3 (deformación total)	123
Figura 140 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 3 (factor de seguridad)	124
Figura 141 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 4 (Tensión equivalente – Von Mises)	125
Figura 142 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 4 (deformación total)	125
Figura 143 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 4 (factor de seguridad)	126
Figura 144 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 5 (Tensión equivalente – Von Mises)	127
Figura 145 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 5 (deformación total)	127
Figura 146 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 5 (factor de seguridad)	128
Figura 147 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de	

carga 6 (Tensión equivalente – Von Mises)	129
Figura 148 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 6 (deformación total)	129
Figura 149 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 6 (factor de seguridad)	130
Figura 150 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 7 (Tensión equivalente – Von Mises)	131
Figura 151 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 7 (deformación total)	131
Figura 152 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 7 (factor de seguridad)	132
Figura 153 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 8 (Tensión equivalente – Von Mises)	133
Figura 154 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 8 (deformación total)	133
Figura 155 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 8 (factor de seguridad)	134
Figura 156 Elemento estructural sometido a mayor deformación	136
Figura 157 Carga distribuida sobre el techo de la carrocería	138
Figura 158 Deformación máxima efectuada en el techo de la carrocería autoportante	138
Figura 159 Configuración travesaños y bastidor.....	139
Figura 160 Primer travesaño modificable	140
Figura 161 Fijación de la carrocería en el refuerzo interno de los largueros.....	140
Figura 162 Fijación de módulos mediante soldadura.....	141
Figura 163 Fijación del módulo 2 mediante soldadura.....	141
Figura 164 Travesaños en el módulo 5.....	141
Figura 165 Tipos de juntas a soldar	142
Figura 166 Conjunto chasis - carrocería autoportante	144
Figura 167 Disposición de los asientos.....	145
Figura 168 Configuración de la cabina de conducción.	146
Figura 169 Recubrimiento exterior de la carrocería autoportante	146
Figura 170 Recubrimiento interior de la carrocería autoportante	147

Figura 171	Parte delantera y posterior carrocería autoportante	147
Figura 172	Vidrios y parabrisas de la carrocería autoportante	148
Figura 173	Diseño estético de bus autoportante.....	148
Figura 174	Activación de Flow Simulation	150
Figura 175	Ingreso de datos a Flow Simulation	151
Figura 176	Dominio computacional del túnel de viento.....	152
Figura 177	Caras que actúan en la trayectoria del fluido.....	152
Figura 178	Análisis de la velocidad del fluido en el túnel de viento	153
Figura 179	Análisis de la presión del fluido en el túnel de viento.....	153
Figura 180	Análisis de la temperatura del fluido en el túnel de viento	154
Figura 181	Análisis de la densidad del fluido en el túnel de viento	155
Figura 182	Activación de Photoview 360	157
Figura 183	Técnicas y herramientas de renderizado en Photoview 360... ..	158
Figura 184	Bus autoportante renderizado.....	159

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	Carga por resistencia al aire frontal.....	27
Ecuación 2	Combinación 1 método LRFD	28
Ecuación 3	Combinación 2 método LRFD	28
Ecuación 4	Combinación 3 método LRFD	28
Ecuación 5	Combinación 4 método LRFD	28
Ecuación 6	Combinación 5 método LRFD	28
Ecuación 7	Combinación 6 método LRFD	28
Ecuación 8	Combinación 7 método LRFD	28
Ecuación 9	Combinación 8 método LRFD	29
Ecuación 10	Factor de seguridad	43
Ecuación 11	Esfuerzo Admisible.....	44
Ecuación 12	Esfuerzo a Tensión	44
Ecuación 13	Esfuerzo a corte	44
Ecuación 14	Volumen	102
Ecuación 15	Densidad	102
Ecuación 16	Carga de giro	109
Ecuación 17	Carga de frenado	109
Ecuación 18	Carga por resistencia al aire frontal.....	110
Ecuación 19	Deformación del elemento estructural.....	136
Ecuación 20	Potencia requerida	156

RESUMEN

La industria de fabricación de carrocerías es uno de los sectores productivos con mayores expectativas de desarrollo en el mercado ecuatoriano, por lo tanto en los últimos años ha experimentado un crecimiento cada vez más significativo, incrementando de esta manera la demanda de unidades de buses de alta calidad, consecuentemente un nivel de competencia carrocerero mucho más elevado, lo cual obliga a las empresas carroceras a mejorar los procesos productivos en el país. Comprometida con esta realidad carrocerías M&L apoya iniciativas tendientes a la investigación y desarrollo de nuevas soluciones mediante el departamento de diseño y producción. Una de esas iniciativas es la realización del presente proyecto, que busca analizar la estructura de una unidad de transporte autoportante para bus interprovincial con el fin de determinar su resistencia durante su vida útil de operación, verificando el comportamiento de los miembros estructurales para determinar deformaciones y fallas posteriores contribuyendo a una mejor utilización de materiales para el proceso de construcción de la carrocería autoportante. El estudio se basa en la simulación por elementos finitos MEF, a través de este análisis estático por deformación y combinación de cargas que se contempla según la Normativa INEN 1323:2009 con la finalidad de determinar la resistencia de una estructura autoportante y además garantizar la seguridad de los pasajeros.

PALABRAS CLAVE:

- **CARROCERÍA AUTOPORTANTE**
- **CARROCERÍAS M&L**
- **CARROCERÍAS - ANALISIS ESTRUCTURAL**
- **CARROCERÍAS - NORMAS TÉCNICAS**
- **INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

ABSTRACT

The car body manufacturing industry is one of the productive sectors with the highest expectations of development in the Ecuadorian market, therefore in recent years it has experienced an increasingly significant growth, increasing in this way the demand for high bus units Quality, consequently a much higher level of bodywork competition, which forces the bodybuilders to improve the production processes in the country. Committed to this reality, M & L supports initiatives aimed at researching and developing new solutions through the design and production department. One of these initiatives is the realization of the present project, which seeks to analyze the structure of a self-supporting transport unit for interprovincial bus in order to determine its resistance during its useful life of operation, verifying the behavior of the structural members to determine deformations and Faults later contributing to a better use of materials for the process of construction of the self-supporting body. The study is based on the finite element simulation MEF, through this static analysis by deformation and load combination that is contemplated according to the INEN 1323: 2009 Regulation in order to determine the strength of a self-supporting structure and also ensure safety of the passengers.

KEYWORDS:

- **SELF-SUPPORTING BODY**
- **CARROCERÍAS M&L**
- **CAR BODIES - STRUCTURAL ANALYSIS**
- **CAR BODIES - TECHNICAL STANDARDS**
- **AUTOMOTIVE ENGINEERING**

CAPÍTULO I

MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Antecedentes

En los últimos años uno de los principales retos a cumplir por parte de los fabricantes de autobuses ha sido mejorar las características constructivas, tanto geométricas como de diseño estructural, optimizando los materiales para la fabricación y manteniendo estándares de seguridad aceptables de acuerdo a la normativa exigida.

Para poder mejorar los parámetros característicos de construcción, se han desarrollado diferentes tipos de carrocerías para autobuses, uno de estos es el denominado autoportante, los cuales al ser implementados en los diferentes vehículos han logrado mejorar las condiciones de funcionabilidad, seguridad, confort, estética, entre otros.

Según el experto en busología (Vinuesa A. , 2014) manifiesta que: “Se denomina bus autoportante a una estructura integral, que sirve de apoyo o soporte a otros componentes, es un conjunto que forma una unidad. En este caso el chasis tipo “buggy”, que a diferencia de uno con bastidor, su distancia entre ejes es modificable bajo una normativa, siendo utilizada principalmente para dar mayor espacio a la zona de maleteros o bodegas”

“Años atrás, por los años cincuenta y sesenta, la estructura se basaba en un chasis y una carrocería, altamente difundida en Europa Central, estos carroceros acoplaban sus productos a chasis que eran suministrados por empresas fabricantes de camiones, conocimientos que en Sudamérica no se han modificado por completo”. (Interempresas, 2010)

A lo largo de los últimos años se ha producido el cambio importante en las preferencias de los carroceros, los chasis basados en bastidores de travesaños han cedido su puesto a los llamados buggys.

“En el Ecuador, Carrocerías Cepeda Cía. Ltda. Fue la primera carrocera autorizada para fabricar buses autoportantes en el país, lo cual se llevó a cabo en aproximadamente 9 meses, mediante un proceso que inició en Enero del 2014”. (Vinueza A. , 2014)

“En Julio de 2016 en la ciudad de Latacunga, Construcciones Mecánicas Albán (CMA), Secohi y la compañía china Higer Bus presentaron el primer prototipo de modelo de ‘bus autoportante’ con el objetivo de iniciar la fabricación en serie de estas unidades”. (EL TELEGRAFO, 2016)

Uno de los factores que afecta a la producción de estructuras autoportantes en el país es la falta de conocimientos por lo que los carroceros se ingenian para convertir los chasis en autobuses a la medida de las especificaciones, las circunstancias y las exigencias. Con el fin de competir con mercados internacionales se debe producir carrocerías y buses de alta calidad, los cuales cumplan con los estándares primordiales.

Ante ello se pretende analizar la estructura de un bus tipo autoportante cumpliendo con los parámetros de diseño y normativas vigentes para que, en conjunto con M&L, en un futuro sean comercializados

Planteamiento del problema

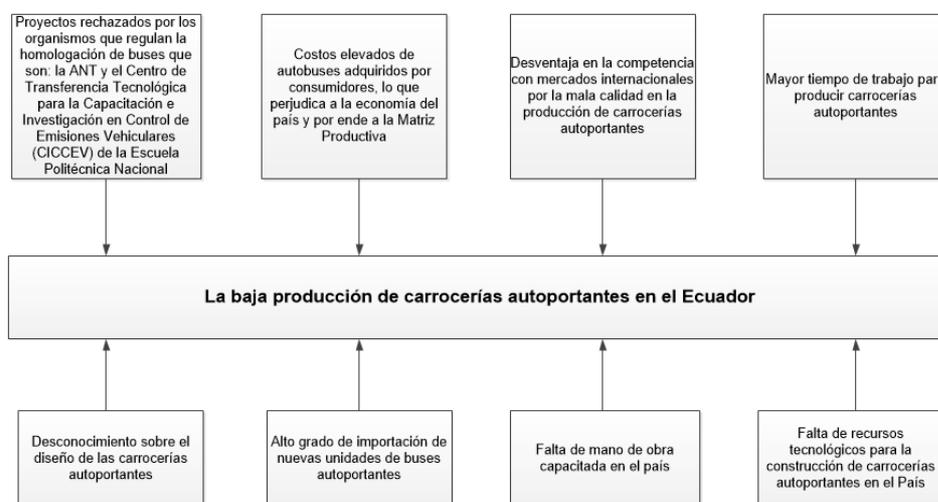


Figura 1 Árbol de problemas

La investigación sobre las carrocerías en el Ecuador presentan diversos problemas entre los cuales podemos mencionar:

Desconocimiento sobre el diseño de las carrocerías autoportantes lo que ocasiona que los proyectos sean rechazados por los organismos que regulan la homologación de buses que son: la ANT y el Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares (CICCEV) de la Escuela Politécnica Nacional

El alto grado de importación de nuevas unidades de buses autoportantes que según Luis Jácome, presidente de CANFAC en Tungurahua, asegura que:

“La importación de carrocerías y chasis estaría poniendo en peligro la industria del país. El dirigente asegura que en los reglamentos internos de varias cooperativas y compañías de transporte constan artículos en que se obligaría a socios antiguos o nuevos a renovar o comprar vehículos con carrocería importada, lo cual va en contra de las aspiraciones de la industria ecuatoriana” (LA HORA, 2016)

Todos estos costos elevados en importación tiene consecuencias en el precio final de la carrocería al ser adquirida por los consumidores, lo que perjudica a la economía del país y por ende a la Matriz Productiva

Otro factor que determina la problemática, es la falta de mano de obra capacitada, ya sea por falta de recursos o el escaso interés de las entidades gubernamentales en apoyar al crecimiento del país, lo que provoca una gran desventaja compitiendo con el mercado internacional ya que las unidades fabricadas serian de baja calidad.

Finalmente, la falta de recursos tecnológicos para la construcción de carrocerías autoportantes en el país, generan escases de equipos en

el mercado nacional; dando como resultado un incremento en el tiempo de trabajo para la producción de las estructuras.

1.2. Descripción resumida del proyecto

Para el presente análisis se ejecutó el dimensionamiento para el diseño en planos de construcción referente a la Normativa INEN 1323, 2009, también se realizará la determinación de cargas efectuadas sobre la carrocería autoportante y los materiales que serán utilizados para el Modelo efectuado, los cuales fueron revisados y aprobados después de realizar todas las pruebas de resistencia y también cumpliendo todos los parámetros de diseño con el fin de que este modelo de carrocería sea implementada en la línea de producción y puedan ser comercializados.

El proyecto fue enfocado al análisis de la carrocería autoportante que fue modelada en 3D a partir de planimetría revisada por Carrocerías M&L para la realización de un análisis estructural basado en la simulación por elementos finitos en un software CAD, cumpliendo con los requisitos establecidos para el cumplimiento de la resistencia y buen funcionamiento de las estructuras de buses para el servicio de transporte de personas

Este análisis fue vinculado con investigaciones desarrolladas acorde a simulaciones estáticas, de deformaciones de la carrocería, pruebas en el túnel de viento y simulaciones por MEF a fin de generar datos útiles sobre la geometría, materiales y elementos del bus interprovincial tipo autoportante

1.3. Justificación e importancia

Los buses de tipo autoportantes se encuentran en proyectos de implementación en las carrocerías del país, pero por el desconocimiento al momento de realizar los análisis y diseños pertinentes en las empresas carroceras metalmeccánicas de estos tipos de vehículos estos proyectos han sido rechazados por los organismos que regulan la homologación de buses

que son: la ANT y el Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares (CICCEV) de la Escuela Politécnica Nacional.

Por esta razón fue importante realizar esta investigación para generar un diseño seguro y confiable para la producción en serie de este tipo de modelo de bus para la comercialización en el mercado nacional.

Además, es provechosa para las empresas dedicadas a la construcción de estructuras metálicas carroceras, lo que ayudará de forma positiva al mejoramiento de la matriz productiva del Ecuador

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Realizar el análisis estructural de una carrocería autoportante para un bus interprovincial mediante elementos finitos para la producción en serie

1.4.2. Objetivos específicos

- Obtener información útil para el desarrollo del proyecto de investigación
- Analizar Normas y Reglamentos Técnicos Ecuatorianos INEN para el buen desempeño y dimensionamiento del diseño de una carrocería de un bus autoportante.
- Determinar cargas y materiales constructivos para el diseño de la carrocería autoportante
- Realizar el modelado en 3D de la carrocería de un bus interprovincial tipo autoportante a través de Software CAD
- Determinar simulaciones estáticas, de deformaciones de la carrocería por el método de elementos finitos, que nos permitan obtener resultados ingenieriles sobre la geometría elaborada y los materiales utilizados en la construcción de una carrocería

autoportante

- Ejecutar la simulación virtual de túnel de viento en el Software CAD
- Elaborar un análisis de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en la simulación y en el diseño elaborado a fin de constatar el cumplimiento de la resistencia y buen funcionamiento de las estructuras de buses para el servicio de transporte de personas.
- Elaborar un informe con los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en la simulación para Carrocerías M&L.

1.5. Metas

- Empleo de información útil para el desarrollo del proyecto de investigación
- Aplicación de las Normas y Reglamentos Técnicos Ecuatorianos INEN para el buen desempeño y dimensionamiento del diseño de una carrocería de un bus autoportante.
- Determinación de cargas y materiales constructivos para el diseño de la carrocería autoportante
- Modelado en 3D de la carrocería de un bus interprovincial tipo autoportante a través de Software CAD
- Experimentación de datos de las pruebas realizadas de la simulación virtual, simulaciones estáticas de deformaciones de la carrocería mediante el MEF, que nos permitan obtener resultados ingenieriles sobre la geometría elaborada y los materiales utilizados en la construcción de una carrocería autoportante
- Simulación virtual de túnel de viento en el Software CAD
- Análisis de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en la simulación y en el diseño elaborado a fin de constatar el cumplimiento de la resistencia y buen funcionamiento de las estructuras de buses para el servicio de transporte de personas.
- Informe de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en la simulación para Carrocerías M&L

1.6. Hipótesis

El diseño y análisis estructural de una carrocería autoportante para un bus interprovincial permitirá obtener un diseño seguro y confiable que cumpla con las normativas vigentes para la producción en serie de este tipo de modelo efectuada en Carrocerías M&L

1.7. Variables de la investigación

1.7.1. Variable independiente

- Análisis estructural de una carrocería autoportante.

1.7.2. Variable dependiente

- Validación de la estructura.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Vehículos para el transporte de pasajeros

Según el Reglamento 36 de la Unión Europea, un vehículo de transporte de pasajeros es una unidad concebida y equipada para el transporte público de más de 16 viajeros. En el mercado ecuatoriano se tiene las siguientes modalidades:

- Transporte Institucional
- Transporte de turismo
- Transporte Urbano
- Transporte Intraprovincial
- Transporte Interprovincial

Por lo tanto, en la presente investigación se hace énfasis en el estudio de los principales componentes estructurales de las unidades de transporte interprovincial.

2.1.1. Unidad de transporte interprovincial

Este tipo de transporte está destinado para transportar numerosas personas mediante vías de interconexión provincial. Su capacidad varía entre 40 y 45 pasajeros sentados.

En conformidad con la RTE (INEN 043, 2010) que define al vehículo “diseñado y equipado para viajes entre provincias y no lleva pasajeros de pie como bus interprovincial”. Este concepto está de acuerdo a (Verdezoto, 2015) que establece los siguiente:

“Es considerado como bus interprovincial a un vehículo automotor el cual, por razón de su bosquejo y designación, está diseñado para transportar personas y equipaje para viajes a largas distancias, este vehículo esta acondicionado para la comodidad de sus pasajeros sentados y no lleva pasajeros de pie”.

En la figura 2 se puede observar un bus de transporte interprovincial



Figura 2 Bus Interprovincial Trans. Esmeraldas S.A.
Fuente (Vinueza A. , 2014)

2.2. Componentes estructurales principales de una unidad de transporte de pasajero

Una unidad de transporte de pasajeros se compone de dos partes fundamentales:

- Bastidor
- Carrocería

2.3. Bastidor del chasis

“El bastidor del chasis es la estructura inferior del vehículo, al cual están acoplados la carrocería y los sistemas de potencia que dan movimiento a la unidad, así como demás componentes que requieren apoyo físico. La misión fundamental del bastidor del chasis es la de ser el soporte físico de la carrocería y demás componentes que se monten en la unidad, conectar rígidamente la suspensión delantera y la trasera y al mismo tiempo ofrecer puntos de amarre para los diferentes sistemas del vehículo, así como proteger al conductor frente a una colisión. Por lo tanto, es la estructura sólida de una unidad de transporte”. (Cepeda, 2006).

En la figura 3 se visualiza la carrocería con chasis tipo escalera.



Figura 3 Carrocería con chasis tipo escalera

Fuente Volkswagen

Al inicio los chasis para buses eran suministrados por empresas fabricantes de camiones con motor frontal, por lo general se utilizaba los chasis tipo escalera, en la actualidad esta estructura está siendo modificada por chasis con motor en la parte posterior, lo que ha producido el cambio importante en las preferencias de los carroceros, estos chasis basados en bastidores de travesaños han cedido su puesto a los llamados buggys. Este término designa a chasis con un bastidor corto de transporte. El cual consta de dos módulos separados entre sí con la finalidad de ser modificable su distancia entre ejes según la reglamentación y las exigencias lo ameriten, siendo utilizada principalmente para dar mayor espacio a la zona de maleteros o bodegas.

Este bastidor está diseñado para formar un conjunto estructural único junto con la carrocería autoportante.

En la figura 4 se visualiza el chasis Mercedes Benz O500R 18/30 para carrocería autoportante.

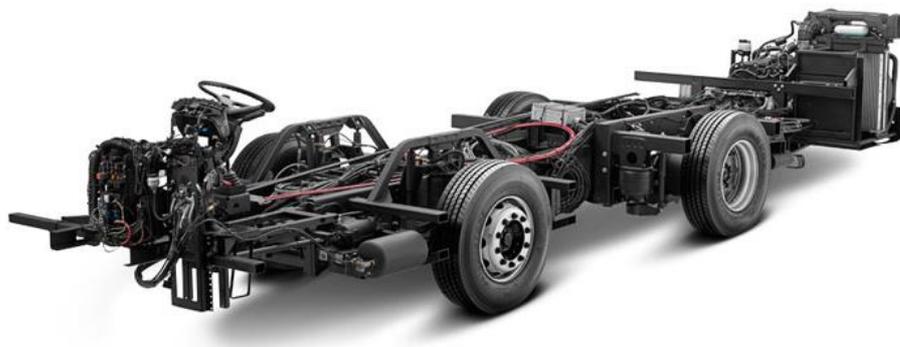


Figura 4 Chasis Mercedes Benz O500 R18/30

Fuente Mercedes Benz

2.3.1. Diseño del bastidor

“El diseño del bastidor del chasis se hace tomando en cuenta la carga que va a soportar, el tamaño final del vehículo y las condiciones de uso. En la estructura del chasis lo determinante es la no deformación, es decir la rigidez. Dicha estructura del chasis debe ser lo suficientemente fuerte y rígida para soportar las cargas de la carrocería construida sobre la misma y por lo tanto asegurar un periodo de servicio de millones de kilómetros”. (Cepeda, 2006).

El bastidor del chasis para carrocería autoportante presenta regiones modulares que se deriva de la siguiente manera:

Módulo delantero subdividido en:

- **M1:** Región del voladizo delantero
- **M2:** Región de la suspensión delantera
- **M3:** Región de entre ejes

Módulo posterior subdividido en:

- **M4** Región de la suspensión posterior
- **M5** Región del voladizo posterior.

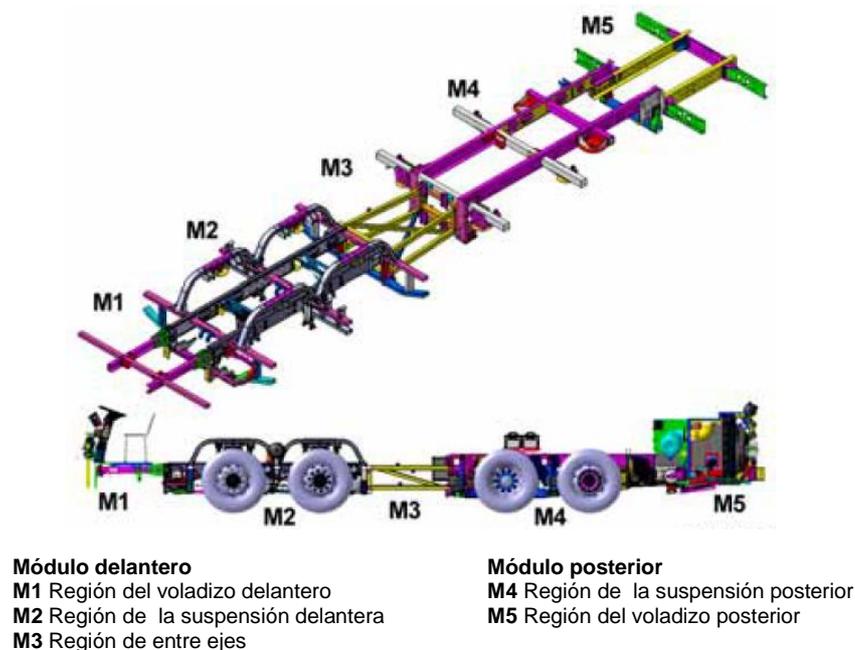


Figura 5 Configuración del chasis para carrocería autoportante

Fuente: (Mercedes Benz, 2016)

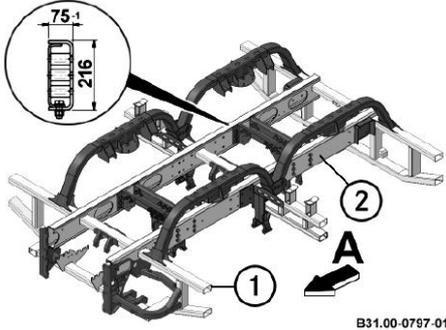
2.3.2. Materiales del bastidor

“Debido a las elevadas solicitaciones de este componente, el material es de alta resistencia, sus esfuerzos máximos tanto a la ruptura (S_u) como a la fluencia (S_y) son elevados y sus componentes de aleación contienen elementos que favorecen y aumentan dicha resistencia” (Cepeda, 2006)

Para el bastidor del chasis se utilizan perfiles estructurales detalladas en la tabla 1.

Tabla 1

Perfiles estructurales utilizados en la fabricación del bastidor

 <p>Figura 6 Sección de bastidor y perfil estructural utilizado en su construcción</p> <p>1. Tubo DIN 2395; 2. Acero EN10149</p> <p>Fuente: (Mercedes Benz, 2016)</p>	<p>El tubo de perfil inoxidable constituye una solución óptima en las aplicaciones que requieran: sostener cargamentos grandes a expensas de la distribución, sometiéndose de mejor manera a la torsión, a la fatiga y a los impactos.</p>
<p>1. Tubo DIN 2395</p> <p>Propiedades Mecánicas</p> <p>$S_y \geq 235 \text{ MPa}$</p> <p>$S_u = 360 - 470 \text{ Mpa}$</p> <p>Alargamiento $\geq 23\%$</p>	<p>Estos aceros combinan excelentes propiedades mecánicas (durabilidad, resistencia a la fatiga y a impactos) con una buena aptitud al conformado y</p>

2. Acero EN10149

soldabilidad. Constituyen una solución óptima en aquellas aplicaciones en las que la reducción de peso es un factor prioritario. Gracias a su alto límite elástico, estos aceros se utilizan frecuentemente como alternativa a los aceros estructurales. (Arcelormittal, 2014)

Propiedades Mecánicas

$$S_y \geq 265 \text{ MPa}$$

$$S_u = 410 - 560 \text{ Mpa}$$

$$\text{Alargamiento} \geq 20\%$$

Fuente: (TOTAL MATERIA, 2016)

2.4. La Carrocería

“La carrocería es aquella parte del vehículo cuyo cuerpo estructural es destinado al alojamiento de los pasajeros, la cual debe soportar las fuerzas estáticas y dinámicas al estar en movimiento” (Esmeraldas, 2016).

“La carrocería debe asegurar un espacio de supervivencia seguro para los pasajeros. En tal virtud se construyen carrocerías con mayor confiabilidad, puesto que absorben mejor el impacto ante una colisión, choque o estrellamiento mediante la deformación controlada de los elementos estructurales de la parte delantera y posterior del vehículo sin que incida en el compartimiento de los pasajeros”. (López Pazmiño, 2015)

En la figura 7 se muestra la estructura MILENIUM I construido por carrocerías M&L para buses urbanos.

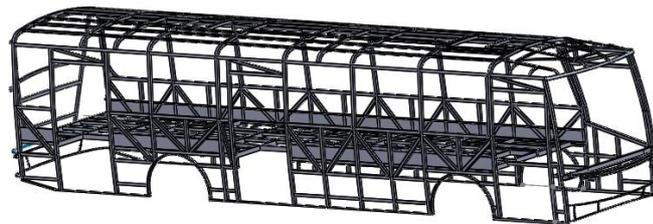


Figura 7 Carrocería Milenium I

Fuente Carrocerías M&L

2.4.1. Carrocería autoportante

En conformidad con la NTE (INEN 1668, 2015) define “como estructura autoportante cuando su estructura forma parte esencial del bastidor.

Desempeñando así las funciones de chasis de cara a conseguir la rigidez del conjunto”.

Un bus autoportante es una estructura integral, la cual sirve de apoyo o soporte a otros componentes, formando una unidad. Suele estar construida a partir de perfilería de acero de alto límite elástico. Toda la perfilería se ensambla entre sí mediante cordón de soldadura, construyéndose una gran jaula de acero tridimensional, como se visualiza en la figura 8.



Figura 8 Carrocería con estructura autoportante

El bus de tipo autoportante tiene la característica que en la parte central no tiene un chasis continuo, en cual se debe estructurar de la manera más eficiente posible para que se unan los módulo posterior del motor con el módulo delantero de la dirección, como se puede visualizar en la figura 9:

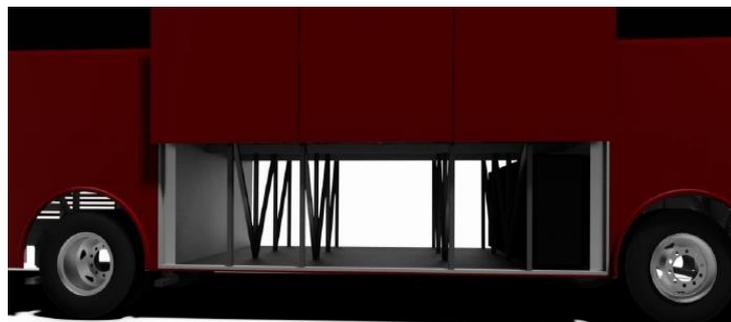


Figura 9 Zona de maleteros de bus con carrocería autoportante

La presente investigación se enfoca en el análisis de los principales componentes estructurales de las unidades de transporte interprovincial de tipo autoportante

“La estructura también conocida como superestructura o estructura de esqueleto, es el sistema estático superior del vehículo, donde se encuentra el habitáculo de los pasajeros y el conductor, que provee resistencia, rigidez y soporte físico a la carrocería, está diseñada para absorber y dispersar la energía proveniente de pesos muertos, condiciones de manejo, irregularidades impactos y colisiones mediante el re direccionamiento de la misma desde miembros expuestos hacia miembros menos solicitados a través de juntas rígidas, consiguiendo su disipación” (Andrade & Méndez, 2012).

Los principales componentes de una estructura autoportante son:

A. Armazón delantero

El armazón delantero es una estructura de soporte, fijación y unión de elementos de la carrocería, sujeta elementos eléctricos, electrónicos y mecánicos, sobre ella descansa el panel frontal, además ofrece resistencia ante colisiones y a la fuerza del viento y lluvia en la conducción por lo que se construye de manera reforzada

En la figura 10 se puede observar el conjunto estructural delantero

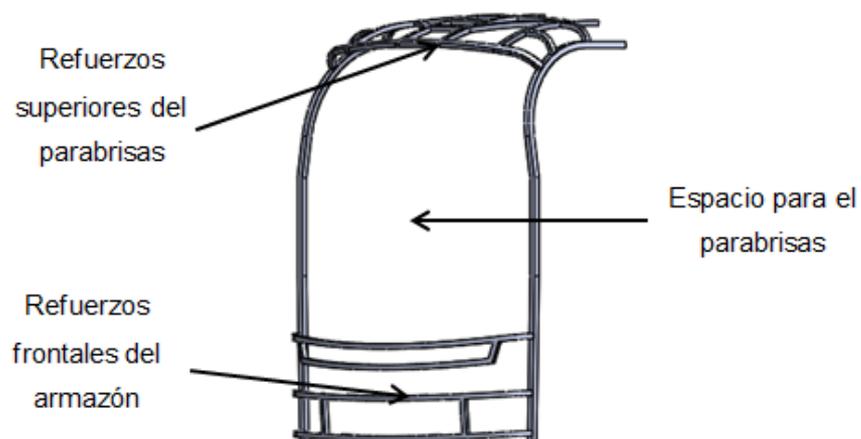


Figura 10 Armazón delantero

“Los esfuerzos que actúan en la parte frontal de la carrocería son: tensión, compresión, flexión y torsión, siendo esta última una de las más importantes puesto que las reacciones actúan desde la superficie de la carretera sobre la carrocería hacia la derecha e izquierda alternativamente. La estructura frontal, incluyendo los miembros transversales en el extremo frontal del bastidor del chasis, deben formar un arco con alta rigidez torsional, como se observa en la figura 11”. (HINO MOTORS LTDA., 2000)

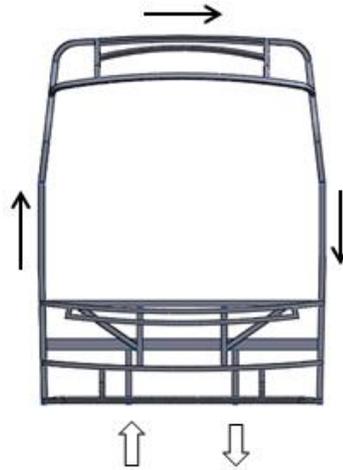


Figura 11 Carga torsional sobre el arco delantero de la carrocería

B. Armazón central

El conjunto estructural central está conformado por columnas metálicas que van de izquierda a derecha formando arcos uniformes también llamados pórticos, en donde se ubican los espacios de la puerta de ingreso y salida de pasajeros, así como también las ventanas. Los pórticos son las unidades estructurales fundamentales de soporte de la estructura. En la figura 12 se puede observar el conjunto estructural central

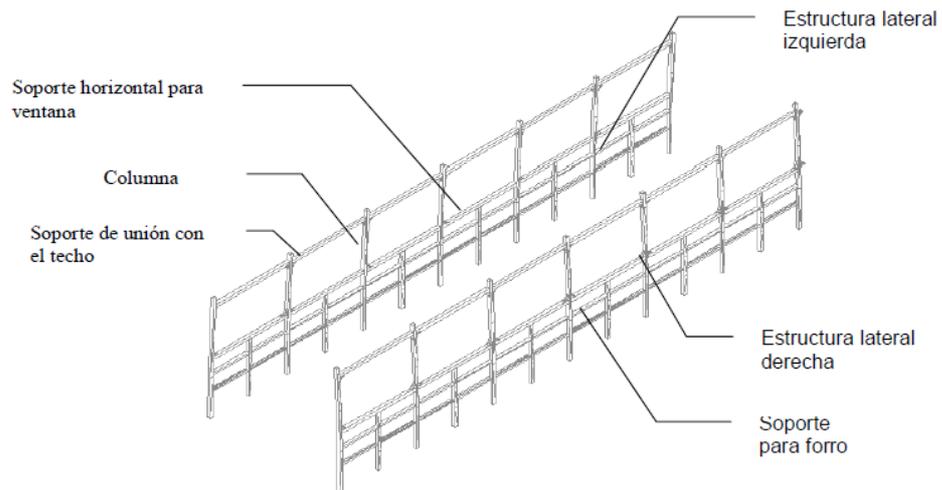


Figura 12 Armazón Central

Las cargas flexionantes, torsionales, laterales y las fuerzas verticales, longitudinales y transversales que actúa sobre el bus es soportada por la rigidez del esqueleto de las estructuras laterales del lado derecho e izquierdo que brindan soporte formando el cuerpo de la carrocería lo cual se puede visualizar en la figura 13.

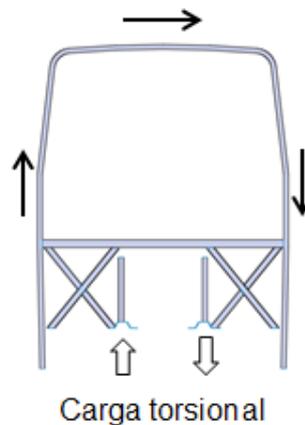


Figura 13 Carga torsional sobre la estructura lateral del bus

C. Armazón posterior

El conjunto estructural del armazón posterior se construye de manera reforzada ya que debe soportar el motor, sobre ella descansa el panel posterior, además ofrece resistencia ante colisiones.

En la figura 14 se puede observar el conjunto estructural posterior

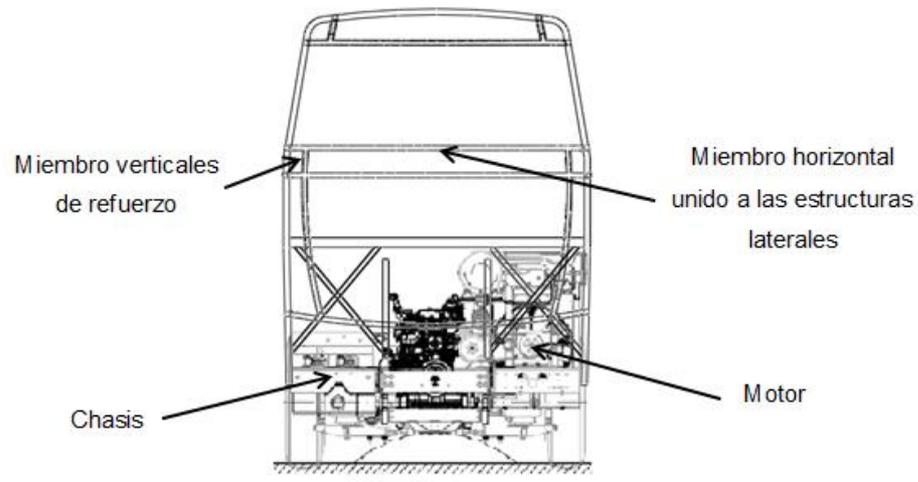


Figura 14 Armazón Posterior

D. Armazón del piso

El conjunto estructural correspondiente al nivel del piso del vehículo es el encargado de unir el conjunto estructural delantero con el posterior mediante largueros y travesaños.

El piso del vehículo se divide en dos partes:

- Piso para el habitáculo
- Piso para el maletero

En la figura 15 se puede observar el conjunto del piso

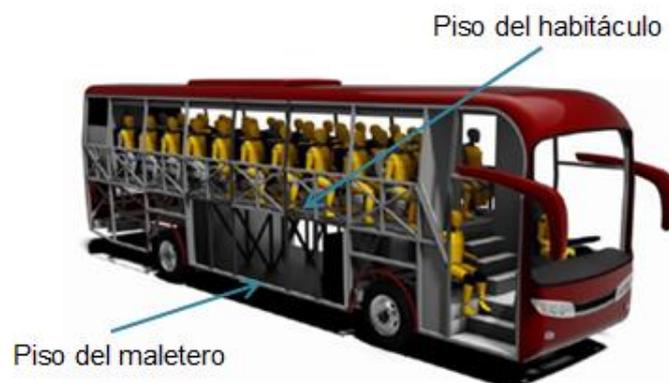


Figura 15 Armazón del piso

“La estructura del piso no solo que soporta directamente el peso de la carga útil del vehículo, sino que juega un rol importante en la unión del bastidor del chasis con la carrocería del bus y asegura la rigidez estructural total de la resistencia, como se puede visualizar en la figura 16”. (HINO MOTORS LTDA., 2000)

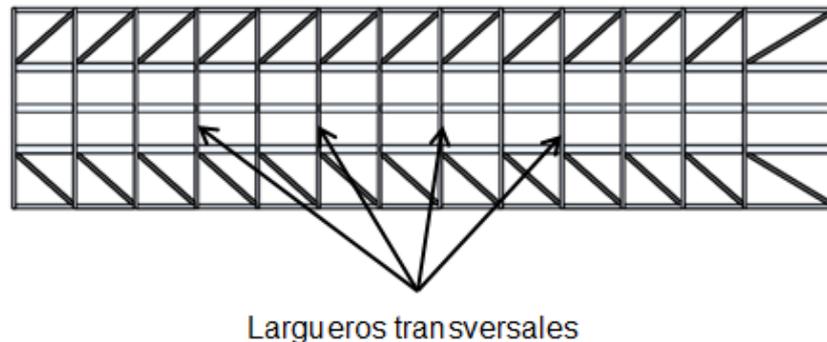


Figura 16 Disposición de largueros transversales en el piso del bus

E. Armazón del techo

El conjunto estructural superior debe resistir una carga estática distribuido uniformemente sin experimentar deformaciones en ningún punto.

En la figura 17 se puede observar el conjunto estructural superior

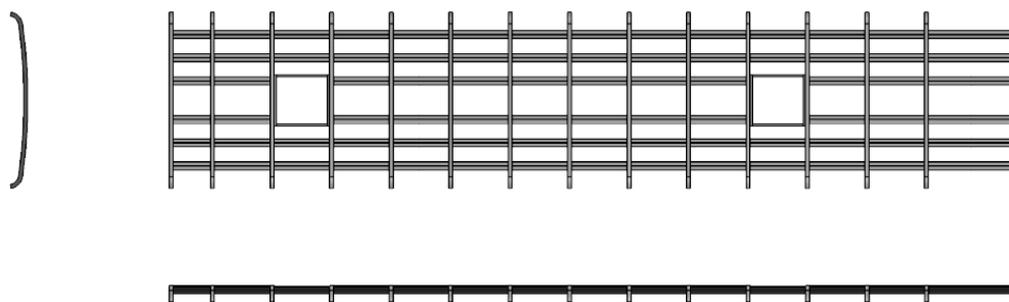


Figura 17 Armazón del techo

“El esqueleto del armazón del techo muestra estructuras de forma de enrejamiento con contrafuertes extendidos en la dirección frontal-posterior de la carrocería y contrafuertes extendidos en la dirección derecha-izquierda. Para incrementar la rigidez torsional de la estructura del techo y

asegurar la exactitud dimensional, los contrafuertes son dobladas de una pieza sencilla de metal y están conectados con los travesaños teniendo prioridad, como se puede visualizar en la figura 18". (HINO MOTORS LTDA., 2000)

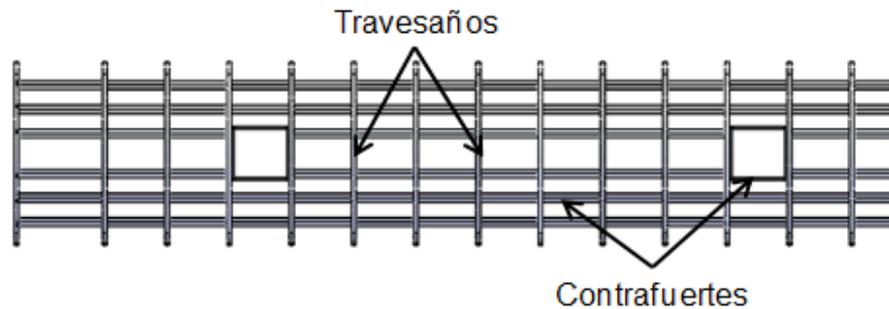


Figura 18 Esqueleto del armazón del techo

F. Paneles exteriores

Los paneles exteriores se encargan de brindar el aspecto estético al bus, están continuamente expuestos al agua de la lluvia, polvo y demás circunstancias climáticas adversas que ocasionan el daño prematuro de los materiales utilizados, es por esto que se utiliza materiales revestidos como medida de precaución contra el óxido como aceros bañados con zinc al carbón o acero electro-galvanizado.

En la figura 19 se puede observar los paneles exteriores de la carrocería

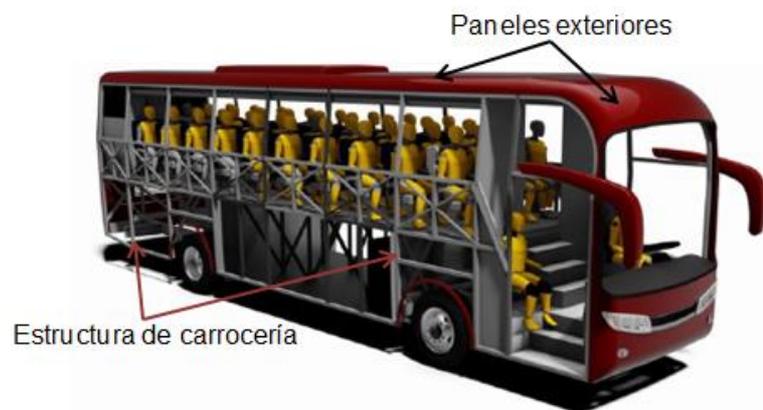


Figura 19 Paneles exteriores de la carrocería

2.5. Normas para el diseño de carrocerías de buses

La presente investigación estuvo fundamentada bajo las siguientes normativas y reglamentos:

- Normativa Técnica Ecuatoriana INEN 1323
- Reglamento Técnico Ecuatoriano INEN 043

2.5.1. Normativa Técnica Ecuatoriana INEN 1323

“Esta norma establece los requisitos generales para el diseño, fabricación y montaje de carrocerías de buses para todas sus modalidades, la cual se aplica a todas las carrocerías de buses, sean importadas o de construcción nacional. Esta norma incluye a las carrocerías que son parte de los chasis carrozados importados y carrocerías autoportantes” (INEN 1323, 2009)

Esta norma incluye a las carrocerías que son parte de los chasis carrozados importados y carrocerías autoportantes.

A. DEFINICIONES

Para los efectos de la presente NTE - INEN se adoptan las definiciones establecidas en la NTE INEN ISO 3833 vigente, NTE INEN 1155 vigente y las que a continuación se detallan:

Carrocería.- “Conjunto de estructura, elementos de seguridad y confort que se adiciona al chasis de forma fija, para el transporte de personas” (INEN 1323, 2009)

Carrocería autoportante.- “Aquella que en su diseño conforma el bastidor e incluye en su estructura los anclajes necesarios para el equipo mecánico y eléctrico” (INEN 1323, 2009).

Bastidor o chasis.- “Constituye el soporte de todos los órganos principales del vehículo (motor, transmisión, suspensión sobre la que se apoya, dirección, ruedas, frenos)” (INEN 1323, 2009).

Espacio de supervivencia.- “Es el volumen que se obtiene en el compartimiento de ocupantes, desplazando en línea recta en el plano vertical y transversal indicado en la figura 20 y figura 21 respectivamente, de

manera que se pase por el punto SR desde el punto SR del ultimo asiento exterior a través del punto SR de cada asiento exterior intermedio hasta el punto SR del primer asiento exterior del ocupante” (INEN 1323, 2009).

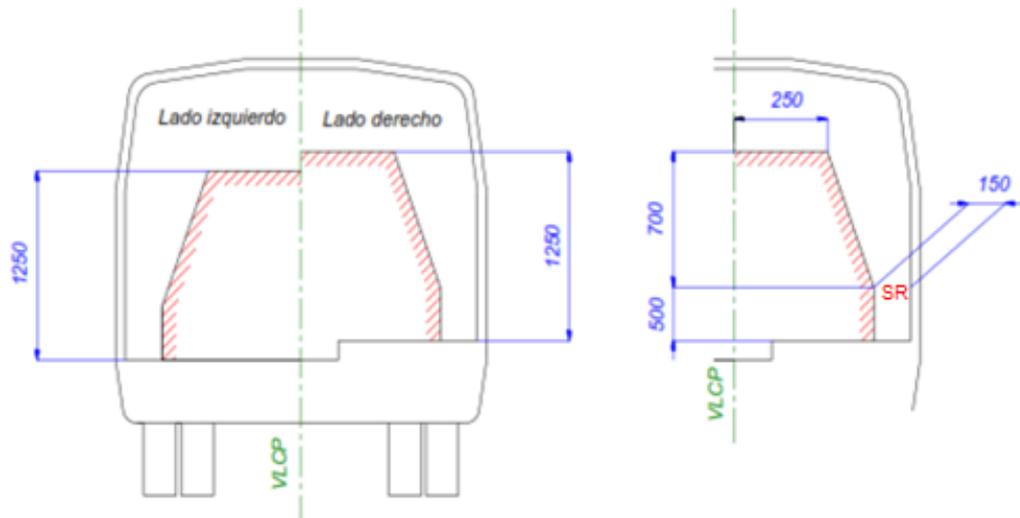


Figura 20 Espacio de supervivencia (Vista transversal)

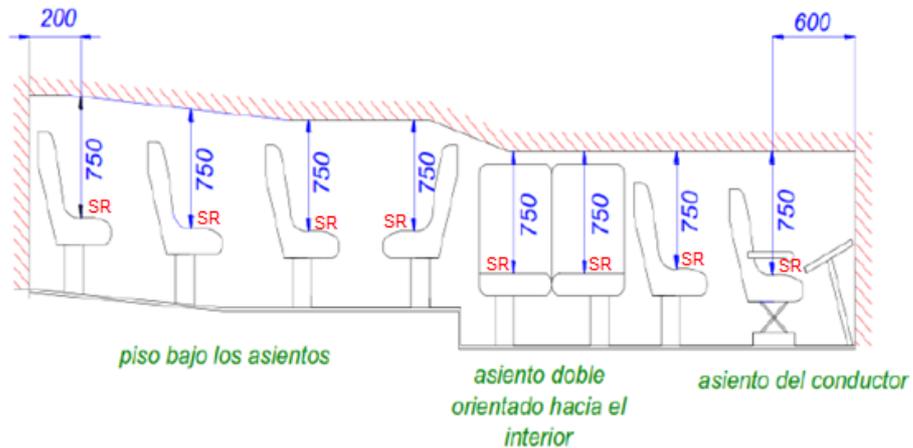


Figura 21 Espacio de supervivencia (Vista longitudinal)

Peso máximo admisible para el chasis.- “Conocido también como capacidad de carga, es la carga útil máxima emitida para el cual fue diseñado el vehículo, este valor es proporcionado por el fabricante del chasis” (INEN 1323, 2009).

B. DISPOSICIONES GENERALES

“Consideraciones de diseño de la carrocería. Se debe considerar lo siguiente: Las especificaciones del chasis, lo cual incluye:

- Tipo de servicio de la carrocería
- Peso bruto vehicular (PBV)
- Capacidad de carga de los ejes
- Peso del chasis en vacío o tara, total y por ejes
- Relación peso/potencia.

La estabilidad, lo cual incluye:

- Distribución de masa
- Altura del centro de gravedad
- Dimensiones de la carrocería
- Rigidez de suspensión
- Capacidad de inclinación

El confort, lo cual incluye:

- Aislamiento acústico y térmico
- Ventilación
- Hermeticidad
- Ergonomía.

El mantenimiento, lo cual incluye:

- Accesibilidad a los elementos del vehículo.

La seguridad, lo cual incluye:

- Seguridad activa y pasiva

Método de anclaje y montaje, lo cual incluye:

- Disposiciones y recomendaciones del fabricante del chasis.

Estructura, lo cual incluye:

- Materiales metálicos y no metálicos.

- Uniones y juntas
- Tratamientos de materiales.
- Geometría y Resistencia estructural". (INEN 1323, 2009)

C. REQUISITOS

Cargas de diseño

Para el análisis cuasi estático de la estructura de la carrocería se aplicarán las cargas a continuación numeradas:

A. Cargas vivas

Se determinan de acuerdo a la Normativa (INEN 1323, 2009), detallada en la tabla 2

Tabla 2

Cargas vivas de diseño

Tipo de servicio	Masa de 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 (INEN 1323, 2009)

B. Carga de Giro (G)

“Debe calcularse 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. Esta fuerza centrífuga deberá ser inferior a la fuerza de vuelco,

calculada sobre la base del peso total del bus a plena carga y su centro de gravedad. La velocidad crítica y el radio de giro” se establece en la Norma (INEN 1323, 2009) en función de la tabla 3

Tabla 3

Velocidad del vehículo, Radio mínimo y Peralte en carreteras

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

Fuente (INEN 1323, 2009)

C. Carga de Frenado (F)

“Cuando actúan los frenos de un vehículo, las fuerzas de inercia que lo impulsan a seguir su movimiento están aplicadas al centro de gravedad del vehículo; como el centro de gravedad está situado inevitablemente, a una cierta altura del suelo, crea un par de fuerzas que tiende a hacer girar a todo el vehículo sobre el eje delantero como si quisiera efectuar un salto mortal hacia delante (Figura 22). Este efecto dinámico de las fuerzas de inercia sobre el vehículo se denomina transferencia de carga”. (Arana & Dután, 2009)

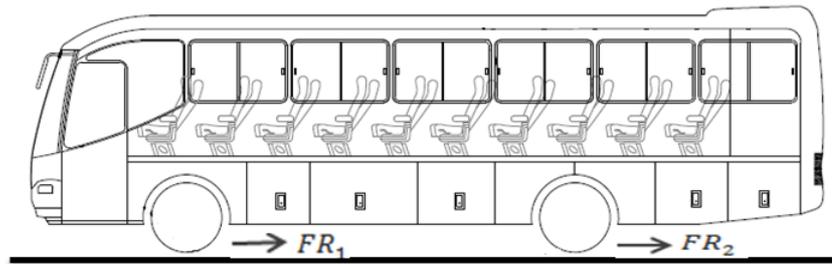


Figura 22 Fuerza de inercia aplicada en el instante de frenado

La transferencia de carga provoca en la carrocería una torsión en toda su línea longitudinal, tal como sucede en la figura 23.

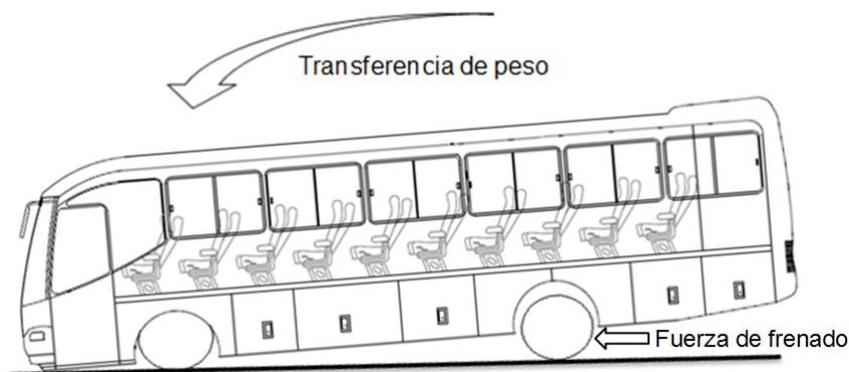


Figura 23 Vehículo sometido a un frenado brusco

D. Carga de aceleración brusca (A_b)

“La carga de aceleración brusca siempre se considera mucho menor en comparación a la carga de frenado brusco, puesto que por ejemplo: si se quiere acelerar de 0 a 90 Km/h conlleva un largo tiempo para autobuses incluso si se necesitara acelerar de urgencia; pero si se viaja a 90 Km/h y por causa de emergencia se necesita frenar se tiene pocos segundos para hacerlo, lo que implica tener mayores cargas en esta instancia”. (Arana & Dután, 2009)

Según la normativa (INEN 1323, 2009) esta carga es obtenida de acuerdo al criterio de la carga de frenado pero en este caso se la considera en sentido contrario

E. Carga por resistencia del aire frontal (Raf)

“Se la aplicará como la fuerza del aire actuante sobre un área correspondiente a la proyección del bus en un plano perpendicular a su eje longitudinal”.

De acuerdo a la normativa (INEN 1323, 2009) Se utilizará la siguiente ecuación:

$$R_{af} = \left(\frac{1}{2}\right) * C_x * \rho * A_f * V^2$$

Ecuación 1 Carga por resistencia al aire frontal

Dónde:

R_{af} = Carga por resistencia Aerodinámica, en (N).

ρ = Densidad del aire, en (Kg/m^3).

V = Velocidad del aire, en (m/s). (Como mínimo 25 m/s).

A_f = Área correspondiente a la proyección del bus en un plano perpendicular a su eje longitudinal, en (m^2).

C_x = Coeficiente de resistencia frontal del aire. (Como mínimo 0.7)

Combinaciones de Cargas Básicas

Las carrocerías se diseñan para que soporten esfuerzos los cuales son determinados de acuerdo a los métodos de combinaciones de cargas básicas especificados en la Normativa INEN 1323:2009:

- A. Método ASD (Allowable Strength Design)
- B. Método LRFD (Load Resistance Factor Design)

A. Método ASD (Allowable Strength Design)

1. M
2. M + V
3. M + V + G
4. M + V + F

5. $M + V + F + R_{af}$
6. $M + V + R_{af}$
7. $M + V + A_b$
8. $M + V + A_b + R_{af}$

Dónde:

M = Carga Muerta

V = Carga Viva

G = Gravedad

F = Carga de frenado

R_{af} = Carga por resistencia Aerodinámica

A_b = Aceleración brusca

B. Método LRFD (Load Resistance Factor Design)

$$1,4 M + V$$

Ecuación 2 Combinación 1 método LRFD

$$1,2 M + 1,6V + 0,5G$$

Ecuación 3 Combinación 2 método LRFD

$$1,2 M + 0,5V + 1,6G$$

Ecuación 4 Combinación 3 método LRFD

$$1,2M + 1,6F + 0,8 R_{af}$$

Ecuación 5 Combinación 4 método LRFD

$$1,2 M + 0,5V + 0,5F + 1,3R_{af}$$

Ecuación 6 Combinación 5 método LRFD

$$1,2 M + 1,5 A_b + 0,5V$$

Ecuación 7 Combinación 6 método LRFD

$$0,9 M - 1,3R_{af}$$

Ecuación 8 Combinación 7 método LRFD

$$0,9 M + 1,3R_{af}$$

Ecuación 9 Combinación 8 método LRFD

“Las cargas combinadas, según los dos métodos (ASD y LRFD), deben alcanzar una deformación elástica de todos los componentes de la estructura de la carrocería iguales o menores a 1/240 veces su longitud”. (INEN 1323, 2009)

2.5.2. Reglamento técnico Ecuatoriano INEN 043

“Este Reglamento Técnico Ecuatoriano establece los requisitos que deben cumplir los buses interprovinciales e intraprovinciales de transporte masivo de pasajeros con la finalidad de proteger la vida y la seguridad de las personas, el ambiente y la propiedad, y prevenir prácticas engañosas que puedan inducir a error a los fabricantes o usuarios finales”. (INEN 043, 2010)

A. DEFINICIONES

Para los efectos del presente Reglamento Técnico Ecuatoriano se adoptan las definiciones establecidas en las NTE INEN 960, 1 155, 1 323, 1 669, 2 292, 2 204, 2 207, 612, INEN ISO 3779, en los Reglamentos Técnicos Ecuatorianos RTE INEN 011, 034 y en la Ley Orgánica de Transporte Terrestres, Tránsito y Seguridad Vial y su Reglamento General y adicionalmente las que a continuación se detallan:

Altura de un vehículo.- “Dimensión vertical total de un vehículo, desde la superficie de la vía hasta la parte superior del mismo”. (INEN 043, 2010)

Ancho de un vehículo.- “Dimensión transversal de un vehículo en su parte más extensa”. (INEN 043, 2010)

Ángulo de aproximación.- “Es el ángulo en un plano desde el punto de vista del vehículo, formado por el nivel de la superficie en la cual el vehículo está parado y la línea tangente que se forma entre el punto de contacto del radio del neumático delantero y la parte más baja de la parte delantera del vehículo”. (INEN 043, 2010)

Ángulo de salida.- “Es el ángulo en un plano desde el punto de vista del vehículo, formado por el nivel de la superficie en la cual el vehículo está

parado y la línea tangente que se forma entre el punto de contacto del radio del neumático posterior y la parte más baja de la parte posterior del vehículo”. (INEN 043, 2010)

Compartimiento de pasajeros.- “El espacio destinado a los pasajeros, excluido cualquier espacio ocupado por instalaciones fijas”. (INEN 043, 2010)

Corredor central.- “Espacio libre o área útil del vehículo excluyendo las áreas de entrada y salida, cobranza, conductor y asientos de pasajeros” (INEN 043, 2010)

Diseño original.- “Comprende los planos, normas técnicas de fabricación y demás documentos técnicos en los cuales se sustentan los requisitos del diseño de origen del vehículo”. (INEN 043, 2010)

Escotilla.- “Abertura en la parte superior de la carrocería para efectos de ventilación y salida de emergencia”. (INEN 043, 2010)

Longitud de un vehículo.- “La distancia total entre los puntos extremos del vehículo en el eje longitudinal (incluido los parachoques)”. (INEN 043, 2010)

Piso.- “La parte de la carrocería en la que reposan los pies de los pasajeros sentados y los del conductor, así como los soportes de los asientos”. (INEN 043, 2010)

Salidas de emergencia.- “Son las ventanas laterales, puertas o cualquier otro medio de fácil y rápido desprendimiento o apertura desde el interior del vehículo, a ser usados en circunstancias excepcionales para salida de los ocupantes en casos de peligro”. (INEN 043, 2010)

Vista total.- “Visión libre de obstáculos con excepción central del parabrisas y los parantes del frente del vehículo”. (INEN 043, 2010)

B. REQUISITOS

ESPECIFICACIONES DEL MOTOR

Arrancabilidad en pendiente.- “Los vehículos de transporte interprovincial e intraprovinciales deben cumplir con la Norma Española UNE 26 358 vigente, con una pendiente del 25%”. (INEN 043, 2010)

Capacidad de aceleración en plano.- “El tren debe tener la potencia, torque y relación de transmisión que le permita alcanzar una velocidad mínima de 40km/h, partiendo de una condición de reposo y en una superficie plana, en un lapso de 22,5 s a Peso Bruto Vehicular (PBV) cuando se verifique de acuerdo a ensayo indicado en el numeral 6 del presente Reglamento Técnico Ecuatoriano”. (INEN 043, 2010)

ESPECIFICACIONES DEL CHASIS

“Debe ser certificado, de diseño original para transporte de pasajeros, sin modificaciones, aditamentos o extensiones a su diseño original y cumplir con las Normas Técnicas Ecuatorianas NTE INEN aplicables vigentes. Para el caso de chasis con motor delantero debe ser adelantado con respecto al eje delantero, de diseño original”. (INEN 043, 2010)

Capacidad del chasis.- “El chasis debe disponer de una capacidad mínima de pasajeros, de conformidad con lo establecido en la ley de Transporte Terrestre, Transito y Seguridad Vial y su Reglamento General”. (INEN 043, 2010)

ESPECIFICACIONES DE LA CARROCERÍA

a) Material de la estructura.- “Deben ser perfiles estructurales protegidos contra la corrosión que cumplan con las Normas Técnicas Ecuatorianas NTE INEN correspondientes vigentes.

Cualquiera que sea el material utilizado en la estructura de la carrocería del vehículo, las partes que la componen deben presentar sólida fijación entre sí a través de, entre otros, soldadura, remaches o tornillos, de modo de evitar ruidos y vibraciones del vehículo, cuando se encuentre en movimiento, además de garantizar a través de los refuerzos necesarios, la resistencia suficiente para soportar en los puntos de concentración de carga (apoyos soportes, uniones, aberturas, todo tipo de esfuerzo al que puedan estar sometidos”. (INEN 043, 2010)

b) Parachoques frontal y posterior.- “Deben disponer de parachoques frontal y posterior. No deben sobresalir de la carrocería en más de 300mm y

debe contar con elementos de sujeción que aseguren la absorción de impactos”. (INEN 043, 2010)

c) Ventanas laterales.- “Deben ser de cierres herméticos y vidrios de seguridad para uso automotor con un espesor mínimo de 4mm y que cumplan los requisitos establecidos en el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 034 y la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 669 vigentes. La altura máxima debe ser de 1000mm”. (INEN 043, 2010)

d) Unión chasis – carrocería.- “Las uniones entre chasis y la carrocería se realizarán siguiendo exclusivamente las recomendaciones del fabricante del chasis para autobús, indicadas en su manual de fabricación y montaje de carrocerías de autobuses”. (INEN 043, 2010)

e) “En los autobuses, en el caso que existan desniveles en el pasillo de tránsito interno para pasajeros, debe accederse mediante rampas o peldaños con las siguientes características.

e.1) Peldaños.- Huella de 250mm y contrahuella de 200mm

e.2) Rampa.- Inclinación máxima del veinte por ciento (20%) cuando no existan escalones en el pasillo. De quince por ciento (15%) en el caso que existan escalones.

e.3) Debe evitarse, que los bordes de los escalones existentes en el pasillo de tránsito de pasajeros se sitúen en las zonas entre asientos o entre otros asientos y mamparas”. (INEN 043, 2010)

Para la construcción de un bus con carrocería autoportante se debe tomar en cuenta todas las cargas que soporta la estructura, por lo cual se debe apoyar del diseño y la ingeniería asistida por computador.

2.5.3. Diseño e Ingeniería Asistida por computador

A. Diseño asistido por computador (CAD)

El diseño asistido por computador asiste a profesionales de diseño en sus actividades específicas con el fin de crear representaciones gráficas en 2D o 3D.

El software CAD es utilizado para la animación computacional por medio del cual se realiza cálculos para determinar formas y tamaños óptimos para la variedad de productos y aplicaciones en el diseño industrial y a su vez para la creación de superficie o sólidos en 3D.

El proceso de CAD consiste en cuatro etapas.

1. Modelado geométrico

Es la forma matemática y analítica a un objeto físico, se utilizan comandos (líneas, superficies, cuerpos, dimensiones) lo que da origen a una representación geométrica exacta.

2. Análisis y optimización del diseño

Después de haber determinado el diseño geométrico, se somete a un análisis de las propiedades físicas del modelo (esfuerzos, deformaciones, deflexiones, vibraciones)

3. Revisión y evaluación del diseño

Se comprueba si existe alguna interferencia, abertura o elementos basura entre los diversos componentes lo cual es útil para evitar problemas en el ensamble y el uso de la pieza.

4. Documentación y dibujo (drafting):

Se realizan planos de detalle en diferentes vistas y diferentes escalas, buscando la mejor perspectiva para su representación.

B. Ingeniería Asistida por computador (CAE)

La ingeniería asistida por computador consiste en el uso de software computacional para simular desempeño con el fin de mejorar los diseños de productos para una amplia gama de industrias, sus características, propiedades, viabilidad, y rentabilidad. Esto incluye la simulación, validación y optimización procesos.

El proceso de CAE consiste en tres etapas.

1. Pre procesado
2. Solución
3. Post proceso

C. Análisis por elementos finitos (AEF)

“Los programas de AEF (análisis por elementos finitos), permiten obtener soluciones aproximadas de problemas que sean susceptibles de ser representados por un sistema de ecuaciones diferenciales”. (Carvajal, 2013)

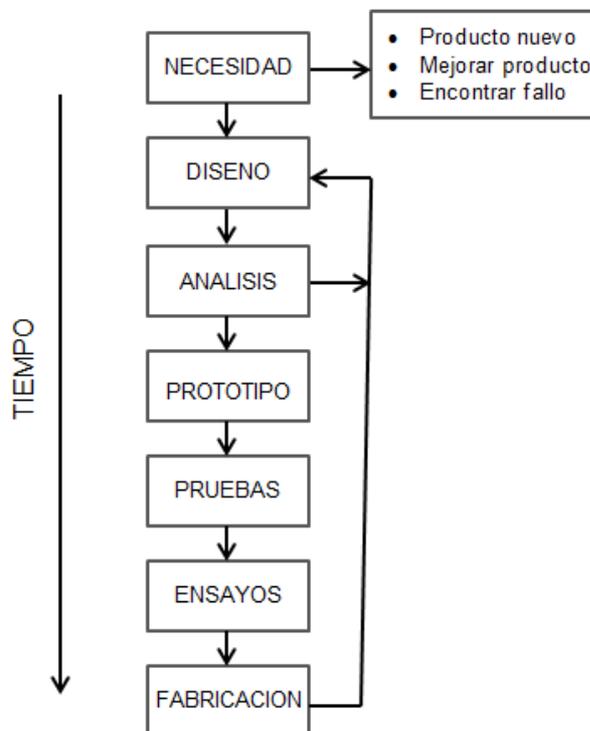


Figura 24 Proceso de análisis y diseño por elementos finitos

2.5.4. Método de Elementos Finitos (MEF)

El método de elementos finitos, es un método numérico empleado para la solución de problemas de ingeniería que involucran un alto grado de complejidad sobre geometrías complejas, cargas no distribuidas y determinación de propiedades de materiales, por lo que generalmente no es posible obtener alguna solución analítica directamente de expresiones matemáticas.



Figura 25 Modelo en Software CAD, Elemento Mecánico

En las áreas en las que el método de elementos finitos se aplica para la solución de problemas destacan:

- Transporte de masa
- Análisis de estructura
- Problemas de transferencia de calor

Solución Analítica es aquella expresión matemática que arroja valores para determinada incógnita la cual es válida para cualquier sección del cuerpo en un número infinito de ocasiones dentro del cuerpo

“Estas soluciones analíticas, generalmente requieren la solución de ecuaciones diferenciales ya sean parciales u ordinarias, las cuales, debido a que se analizan geometrías complejas, cargas distribuidas y determinación de propiedades de materiales, no son posibles de resolver”. (Jiménez, 2004)



Figura 26 Modelo en Software CAD, Discretizado en Software CAE

La formulación que se propone mediante el uso del método de elementos finitos, permite que el problema sea planteado como una serie de ecuaciones algebraicas simultaneas, dado que el problema tiene que ser discretizado, este método numérico obtiene valores aproximados de las incógnitas en un numero finito de ocasiones dentro del cuerpo.

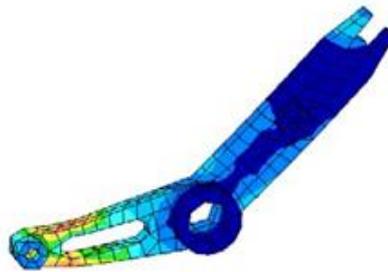


Figura 27 Análisis de esfuerzos en cargas estáticas de la pieza

A. Discretización

“Es el proceso de modelación de un cuerpo que consiste en la división equivalente del mismo, en un sistema conformado por cuerpos más pequeños (elementos finitos) interconectados por medio de puntos comunes o nodos, los cuales forman superficies y se comportan como volúmenes de control independientes, los que a su vez son afectados por las condiciones de frontera que afecten al cuerpo estudiado como un todo. Durante la aplicación del método de elementos finitos, en lugar de intentar resolver el problema como un todo en una sola operación, se divide el cuerpo del problema en un numero finito de elementos, los cuales a su vez se resuelven simultáneamente y se obtienen el resultado de un todo

conformado por cada resultado arrojado por los elementos finitos”. (Jiménez, 2004)

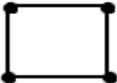
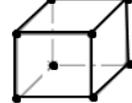
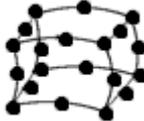
B. Tipos de elementos

“Los elementos son uni, bi o tridimensionales, llamados también elementos de línea, superficie y volumen, respectivamente. Asimismo, pueden ser de diferente orden, término que se refiere al orden de la función (usualmente un polinomio) que define la distribución de desplazamiento a través del elemento” (Esmeraldas, 2016).

En la tabla 4 se visualiza los tipos de elementos finitos lineales y cuadráticos.

Tabla 4

Elementos finitos comunes

	1-D		2-D		3-D		
LINEALES							
	Línea de 2 nodos	Línea de 2 nodos	Triángulo de 3 nodos	Cuadrilátero de 4 nodos	Línea de 2 nodos	Tetraedro de 4 nodos	Hexaedro de 8 nodos
CUADRÁTICOS							
	Línea de 3 nodos	Línea de 3 nodos	Triángulo de 6 nodos	Cuadrilátero de 8 nodos	Línea de 3 nodos	Tetraedro de 10 nodos	Hexaedro de 20 nodos

“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” (Esmeraldas, 2016).

2.5.5. Procedimiento para el MEF

A. Pre proceso (Construcción del modelo)

Los pasos del pre proceso permite:

- Introducir los datos de entrada para realizar el proceso de simulación
- Representar el sistema físico a ser analizado
- Precisar las propiedades de cada elemento)
- Concretar las propiedades geométricas de los elementos (dimensiones, áreas, volúmenes)
- Puntualizar los tipos de elementos que se va a utilizar como beam, shell o solid)
- Definir las restricciones físicas de los elementos como contactos o interferencias)
- Definir el modelo (Nodos, elementos)
- Generar la malla (triangular para cascaras y tetrahédico para sólidos)

B. Solución

En este proceso genera y resuelve las ecuaciones que se generan y condiciones dadas en el pre proceso, almacenar las variables y encontrar el tiempo de solución

C. Post proceso

El post proceso permite:

- Representar de manera numérica y gráfica los resultados
- Gestiona una gran cantidad de datos generadas en el proceso anterior

- Calcular factores de seguridad

2.5.6. Mallado

El proceso empieza con la creación de un modelo geométrico. Luego, el programa subdivide el modelo en partes pequeñas de formas sencillas llamadas elementos, que están conectadas en puntos comunes llamados nodos. El proceso de subdividir el modelo en pequeñas partes se llama mallado. Los programas de análisis de elementos finitos consideran al modelo como una red de elementos interconectados.

El tamaño de mallado es muy importante para predecir la falla de un material.

La generación de malla para el análisis por elementos finitos presenta un efecto sobre la exactitud de las soluciones numéricas por lo que se solicita mayor precisión, esto quiere decir que mientras la malla utilizada en la estructura sea más fina los resultados obtenidos van a ser más precisos

2.5.7. Calidad de malla

La calidad de la malla tiene un papel fundamental en la precisión de los resultados.

Verificación de relación de aspecto

Para una malla sólida, la precisión numérica se logra mejor mediante una malla con elementos tetraédricos perfectos y uniformes cuyas aristas sean de igual longitud. Para una geometría general, no es posible crear una malla de elementos tetraédricos perfectos. Debido a las aristas pequeñas, la geometría curva, las operaciones lámina y las aristas vivas, algunos de los elementos generados pueden tener algunas aristas mucho más largas que otras. Cuando las aristas de un elemento tienen una notable diferencia en su longitud, la precisión de los resultados se ve perjudicada.

A. Criterio Jacobiano

“El criterio Jacobiano permite determinar la calidad de malla; este criterio calcula y prueba todos los elementos, excepto los triángulos y tetraedros. Una proporción alta indica que la correspondencia entre el espacio y el espacio real del elemento se está convirtiendo en computacionalmente poco fiable” (Esmeraldas, 2016).

Un cuadrilátero tiene una relación Jacobiana en un rango de -1.0 a 1.0, se refiere a 1.0 como el elemento de malla perfecto (se aprecia en la tabla 5) y realiza una comparación entre todos los elementos de malla si el promedio se acerca a 1.0 quiere decir que el elemento computacional es altamente fiable.

“Cuando un nodo tiende a desplazarse desde una esquina hacia el centro del elemento de línea, la proporción sube el Jacobiano, lo que puede ocasionar con el tiempo que por cualquier movimiento adicional se rompa el elemento” (Esmeraldas, 2016)

Tabla 5

Calidad de malla según el Criterio Jacobiano



Inacceptable	Malo	Aceptable	Bueno	Muy bueno	Excelente
-1,00 / -0,6	-0,5 / -0,2	-0,1 / 0,00	0,00 / 0,1	0,2 / 0,5	0,6 / 1,00

B. Orthogonal Quality

El rango para la calidad ortogonal es de 0 a 1, donde un valor de 0 indica una inaceptable calidad de malla y un valor de 1 indica una excelente calidad de malla, apreciándose en la tabla 6

Tabla 6**Calidad de malla ortogonal**


Inaceptable	Malo	Aceptable	Bueno	Muy bueno	Excelente
0 - 0,001	0,001 – 0,14	0,15 – 0,20	0,20 – 0,69	0,70 – 0,95	0,95 – 1,00

C. Skewness

El rango para la calidad asimétrica es de 0 a 1, donde un valor de 0 indica una excelente calidad de malla y un valor de 1 indica una inaceptable calidad de malla, apreciándose en la tabla 7.

Tabla 7**Calidad de malla asimétrica**


Excelente	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Malo	Inaceptable
0 - 0,25	0,25 – 0,50	0,50 – 0,80	0,80 – 0,94	0,95 – 0,97	0,98 – 1,00

2.5.8. Problemas no lineales

Cuando se realiza el análisis estructural se debe contemplar el comportamiento lineal de los materiales empleados en la geometría, al recibir cargas estos materiales tienden a sufrir pequeñas deformaciones, las cuales pueden ser válidas de acuerdo al comportamiento lineal, el comportamiento de linealidad o no linealidad se observa en la curva esfuerzo - deformación (Figura 28) en la cual la tensión no es linealmente dependiente de la deformación. La curva permanece en forma lineal hasta llegar al límite elástico en el cual el material se deforma completamente y justo después de ese punto se observa que ya no tiene un comportamiento lineal por lo que al extremarse llegara a su punto de fractura

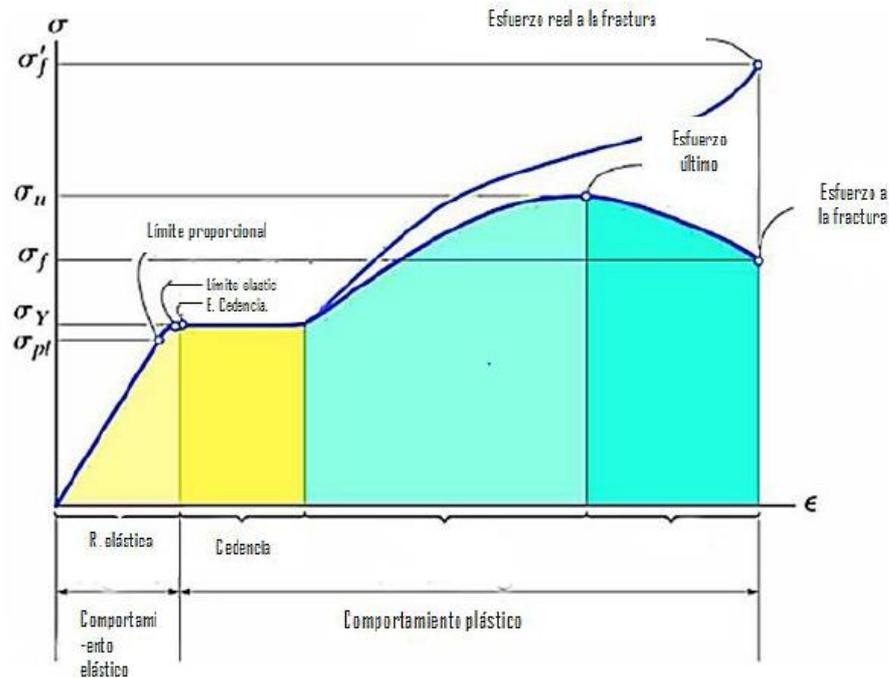


Figura 28 Diagrama esfuerzo-deformación

A. Esfuerzo

“Las fuerzas internas de un elemento están ubicadas dentro del material por lo que se distribuyen en toda el área, justamente se denomina esfuerzo a la fuerza por unidad de área, la cual se denota con la letra griega sigma (σ) y es un parámetro que permite comparar la resistencia de dos materiales, ya que establece una base común de referencia”. (Caraballo, 2014)

B. Deformación

La deformación es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo.

“La resistencia del material no es el único parámetro que debe utilizarse al diseñar o analizar una estructura, controlar las deformaciones para que la estructura cumpla con el propósito para el cual se diseñó tiene la misma o mayor importancia. El análisis de las deformaciones se relaciona con los cambios en la forma de la estructura que generan las cargas aplicadas” (Caraballo, 2014).

C. Tensión de Von Mises

La tensión de Von Mises se utiliza a menudo para determinar la deformación que se produce en el material cuando se somete a una condición de carga compleja. Esto se logra mediante el cálculo de la tensión de Von Mises y comparándolo con límite de elasticidad del material.

D. Factor de Seguridad

“Si se tiene que evitar una falla estructural, las cargas que una estructura es capaz de soportar deben ser mayores que las cargas a las que se va a someter cuando este en servicio. Como la resistencia es la capacidad de una estructura para resistir cargas, el criterio anterior se puede replantear como sigue: la resistencia real de una estructura debe ser mayor que la resistencia requerida. La relación de la resistencia real entre la resistencia requerida se llama factor de seguridad. Naturalmente, el factor de seguridad debe ser mayor que 1.0 para evitar falla. Dependiendo de las circunstancias, los factores de seguridad varían desde un poco más que 1.0 hasta 10. La Falla puede equivaler a la fractura y el completo colapso de la estructura o puede significar que las deformaciones se han vuelto tan grandes que la estructura ya no puede realizar sus funciones”. (Cano, 2015)

La resistencia real de una estructura debe ser mayor que la resistencia requerida. La relación de la resistencia real entre la resistencia requerida se llama factor de seguridad n :

$$\text{Factor de seguridad } n = \frac{\text{resistencia real}}{\text{resistencia requerida}}$$

Ecuación 10 Factor de seguridad

E. Esfuerzos admisibles

“Los factores de seguridad se definen e implantan de diversa formas. Para muchas estructuras es importante que el material permanezca dentro del intervalo linealmente elástico, para evitar deformaciones permanentes

cuando se quiten las cargas. En estas condiciones se establece el factor de seguridad con respecto al esfuerzo de fluencia (o la resistencia de fluencia) se obtienen un esfuerzo admisible (o esfuerzo de trabajo) que no se debe rebasar en lugar alguno de la estructura”. (Cano, 2015)

De este modo:

$$\text{Esfuerzo admisible } n = \frac{\text{resistencia de fluencia}}{\text{factor de seguridad}}$$

Ecuación 11 Esfuerzo Admisible

A tensión y corte respectivamente:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{n_1}$$

Ecuación 12 Esfuerzo a Tensión

$$\sigma_{adm} = \frac{\tau_y}{n_1}$$

Ecuación 13 Esfuerzo a corte

Dónde:

$\sigma_y ; \tau_y$ = Esfuerzos de fluencia

$n_1 ; n_2$ = factores de seguridad correspondientes

CAPÍTULO III

3. INGENIERÍA ESTRUCTURAL DE UNA CARROCERÍA DE BUS AUTOPORTANTE

3.1. Introducción

El análisis estructural es un proceso sistemático en el cual se obtiene las características del comportamiento cuando está sometido a ciertas cargas. Para conseguir este resultado la estructura debe separarse en los elementos que lo constituyen y aplicar las cargas a cada elemento de la estructura.

El análisis estructural se lo realiza por medio de pruebas en la estructura real del bus o en modelos físicos realizados a escala como impresión en 3D, aunque la más solicitada debido a su precisión es mediante un modelo matemático.

Para el análisis estructural se debe tomar en cuenta las condiciones de equilibrio entre fuerzas, compatibilidad de deformaciones, la relación entre fuerza y desplazamiento en todos los elementos de la estructura basándose en la concepción de una estructura como un cuerpo elástico ideal pero con la finalidad de realizar el análisis el cuerpo se puede dividir en varios miembros.

En el presente estudio se realiza un análisis estructural de cada parámetro con la finalidad de interpretar comportamientos de la carrocería autoportante en distintas condiciones como gravedad, masas, aceleraciones, velocidades, entre otros, para lo cual se ve la necesidad de conocer las características tanto del chasis utilizado como de la estructura a diseñar.

3.2. Especificaciones y descripción del chasis utilizado en la carrocería autoportante

Para la construcción de buses interprovinciales autoportantes, Carrocerías M&L utilizará el chasis para bus Mercedes Benz O500 R/1830/30, el cual servirá de soporte para la construcción de la carrocería

autoportante. En la figura 29 se observa el esquema del chasis Mercedes Benz O500 R/1830/30

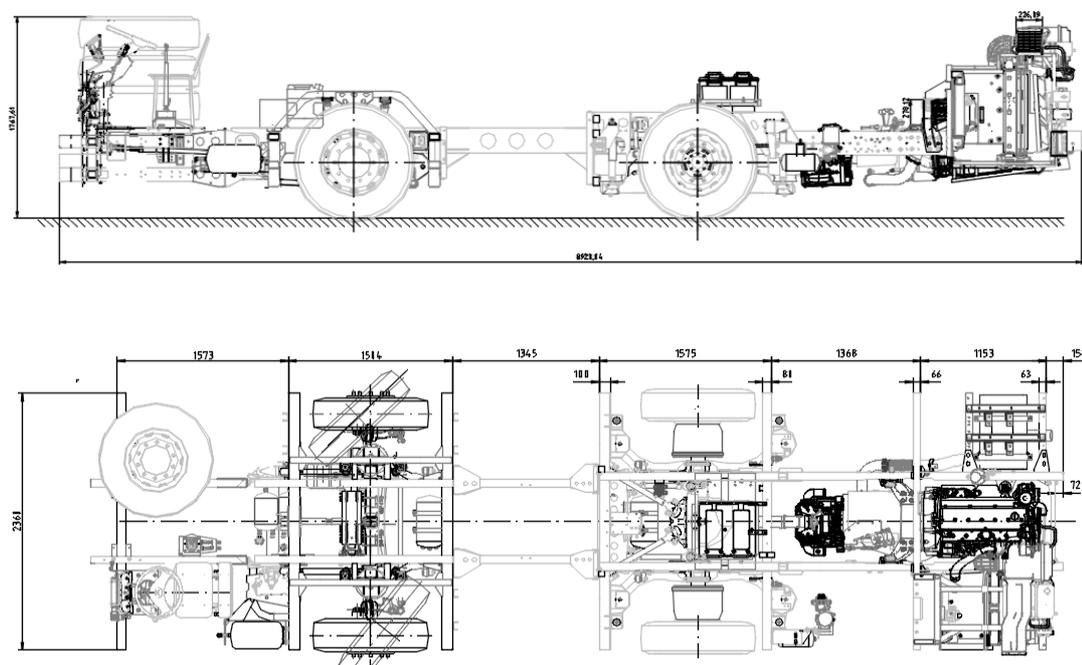


Figura 29 Esquema del chasis Mercedes Benz O500 R/1830/30

El concepto modular del chasis O 500 R/1830/30 facilita el trabajo de carrozados, disminuyendo la necesidad de cambios en la estructura del chasis y garantizando mayor calidad en el producto final. Se admite su carrozado hasta 13,20 m. de longitud.

En la Tabla 8 se detallan las especificaciones del chasis Mercedes Benz O500 R/1830/30

Tabla 8

Especificaciones del chasis Mercedes Benz O500 R/1830/30

DIMENSIONES DEL CHASIS	
Entre ejes	3000 mm
Largo total	8920 mm
Ancho del chasis	2458 mm
Trocha: eje delantero/ eje trasero	2036 / 1798 mm
Voladizo: delantero (mín - máx)/ trasero	2200 o 2570 / 3350 mm

CONTINÚA 

Altura del chasis	1768 mm
Ángulo: de entrada/de salida	13° 41" / 8°
Largo total carrozado	13200 mm
CARACTERÍSTICAS	
Peso bruto vehicular	18500 kg
Peso del chasis	5866 kg
MOTOR	
Modelo	MB OM 926 LA
Potencia máxima	225 KW (306 cv) a 2200 rpm
Torque máximo	1200 Nm (122,4 mkgf) de 1200 a 1600 rpm
Cilindros	6 Cilindros
Cilindraje	7200 cm^3
NEUMÁTICOS	
Dimensiones	295 / 80 R 22,5

Fuente (AutoLíder, 2017)

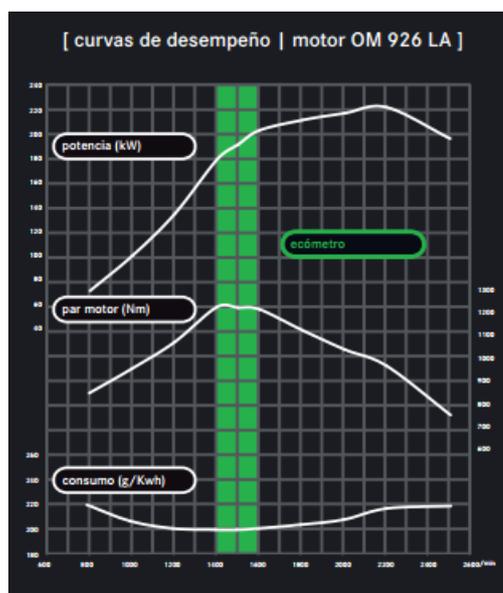


Figura 30 Curvas de desempeño Motor Mercedes Benz OM 926 LA

Fuente (AutoLíder, 2017)

Características estructurales de la carrocería autoportante.

La estructura autoportante fue diseñada para transportar a 45 pasajeros, conductor y tripulante. En la tabla 9 se muestran las dimensiones principales:

Tabla 9

Dimensiones generales de la estructura autoportante

DIMENSIONES	
Largo exterior (mm)	12 127
Ancho exterior (mm)	2 554
Área frontal (m ²)	7,976
Área del techo (m ²)	49,24

3.3. Material empleado en el armazón de la carrocería autoportante

El diseño y cálculo estructural de la carrocería es planteado sobre un chasis Mercedes Benz O500 R/1830/30 y comprende la aplicación de materiales que según el Reglamento (INEN 043, 2010) se utiliza perfil estructural que cuenta con protección contra la corrosión, este concepto se puede complementar de acuerdo a la Normativa (INEN 2415, 2016) que “trata sobre los requisitos mecánicos de la tubería, la cual debe cumplir con las especificaciones de esfuerzos a la tracción, fluencia y porcentajes de elongación” establecidos en la Tabla 10.

Tabla 10

Clasificación y propiedades mecánicas de los tubos

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

CONTINÚA 

A	Tubos estructurales	270	310	25
B	sección cuadrada,	315	400	23
C	rectangular o	345	425	21
D	especial	250	400	23

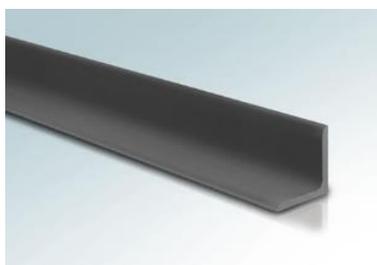
Fuente (INEN 2415, 2016)

De acuerdo a la tabla 9, carrocerías M&L utilizan perfiles estructurales de sección cuadrada, rectangular o especial de grado B y D que cumplan con la Normativa vigente (INEN 2415, 2016) como es el perfil estructural A500 y A36 para la construcción de los buses:

3.3.1. Acero ASTM A36

“Es el material estructural más usado para la construcción de estructuras en el mundo. Es fundamentalmente una aleación de hierro (Mínimo 98%), con contenidos de carbono menores del 1% y otras pequeñas cantidades de minerales como manganeso, para mejorar su resistencia, fosforo, azufre, sílice y vanadio para mejorar su soldabilidad y resistencia a la intemperie. Es un material usado para la construcción de estructuras de gran resistencia, producido a partir de materiales muy abundantes en la naturaleza. Entre sus ventajas está la gran resistencia a la tensión y compresión con un costo razonable”. (Aranda & Dután, 2009)

El acero ASTM A36 es el material estructural con mas usos en el ámbito carrocerero ecuatoriano para la fabricación de buses por sus características técnicas, composición química y propiedades mecánicas. En la figura 31 se visualiza la calidad del acero para un perfil angular.



Especificaciones:

Largo Normal:	6 metros
Recubrimiento:	Negro
Espesores:	Desde 2,00 a 12,70 mm
Norma de Calidad:	ASTM A-36
Calidad de Acero:	DIN 17100 / ST 37-2 / ASTM A-36

Figura 31 Especificaciones de ángulo ASTM A36

Fuente (IPAC ACERO, 2017)

Ventajas y desventajas del acero ASTM A 36 como material estructural

Tabla 11

Acero ASTM A36 - Ventajas

“Alta resistencia	La alta resistencia del acero por unidad de peso desarrolla el poco peso de la estructura
Uniformidad	Las propiedades del acero no cambian apreciablemente con el tiempo
Durabilidad	Con mantenimiento adecuado la estructura de acero durará indefinidamente
Ductilidad	Propiedad que tiene un material para soportar grandes deformaciones sin fallar bajo altos esfuerzos de tensión
Tenacidad	Propiedad de un material para absorber energía en grandes cantidades
Facilidad para unir varios miembros	Soldadura, tornillos, remaches
Posibilidad de prefabricar los miembros de una estructura	Variedad de formas y tamaños”

Funte: (Arana & Dután, 2009)

Tabla 12

Acero ASTM A36 - Desventajas

“Costo de mantenimiento	La mayor parte de los aceros son susceptibles a la corrosión al estar expuestos al agua y aire; deben pintarse periódicamente
Susceptibilidad al pandeo	Entre más largos y esbeltos son los miembros a compresión, mayor es el riesgo de pandeo
Corrosión	A la intemperie se forma óxido de hierro en su superficie, al no combatirse el acero queda completamente corroído”

Funte: (Arana & Dután, 2009)

Propiedades Mecánicas del acero estructural ASTM A 36

Las propiedades mecánicas del acero estructural ASTM A 36 se visualizan en la tabla 13

Tabla 13

Propiedades mecánicas del Acero ASTM A36 utilizado en la construcción de la carrocería autoportante

PROPIEDADES MECÁNICAS	
ASTM A-36	Módulo de elasticidad $E = 200\,000 \text{ Mpa}$
	Resistencia a la fluencia $S_y = 250 \text{ MPa}$ $S_y = 36 \text{ Ksi}$ $S_y = 2530 \text{ Kg/cm}^2$
	Resistencia a la tracción máxima $S_u = 460 \text{ Mpa}$ $S_u = 66,7 \text{ Ksi}$ $S_u = 4690,69 \text{ Kg/cm}^2$
	Radio de Poisson $\nu = 0,27$
	Densidad $\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$

3.3.2. Acero ASTM A500

El acero ASTM A500 posee una capa de 'óxido negro' sobre toda su superficie con el fin de actuar como cubierta protectora y evitar la corrosión. Este tipo de acero está disponible en tubos de sección circular hueca (HSS), de sección cuadrada y rectangular formados en frío. En la figura 32 se visualiza los perfiles estructurales de sección rectangular y sección cuadrada.



Figura 32 Perfiles estructurales ASTM A500 de sección rectangular y sección cuadrada

Fuente (IPAC ACERO, 2017)

Ventajas del acero ASTM A 500 como material estructural

- Facilidad para unir varios miembros mediante soldadura, tornillos, remaches
- Variedad en tipos de perfilería: Cuadrada, rectangular, circular, entre otros
- Bajo costo de adquisición
- Material reutilizable

Desventajas del acero ASTM A 500 como material estructural

- Acero inadecuado para someterlo a cargas dinámicas
- Susceptible a la fatiga y pandeo.
- Costo de mantenimiento elevado.
- Protección contra fuego.

Propiedades Mecánicas del acero estructural ASTM A 500

Las propiedades mecánicas del acero estructural ASTM A 500 se visualizan en la tabla 14

Tabla 14

Propiedades mecánicas de perfile ASTM A 500 utilizados en la construcción de la carrocería autoportante.

ASTM A-500	Módulo de elasticidad E= 200 000 Mpa
	Resistencia a la fluencia Sy= 320 MPa Sy= 46 Ksi Sy= 3235 Kg/cm ²
	Resistencia a la tracción máxima Su= 430 Mpa Su=58 Ksi Su= 4360 Kg/cm ²
	Radio de Poisson $\nu = 0,27$
	Densidad $d = 7850 \text{ Kg/m}^3$

3.3.3. Especificaciones de perfiles utilizados en la carrocería

La carrocería autoportante cuenta con los siguientes perfiles detallados en la Tabla 15:

Tabla 15

Perfiles de la carrocería autoportante

UNIDAD ESTRUCTURAL	DESIGNACIÓN (mm)	MATERIAL Acero	APLICACIÓN
	Tubo rectangular TR 80x50x3	ASTM A500	Durmientes transversales
	Tubo cuadrado TC 50X2	ASTM A500	Tejido del piso

CONTINÚA 

Piso	Perfil C 50X100x50x3	ASTM A36	Durmientes centrales
	Perfil angular L 50x3	ASTM A36	Tejido
Laterales	Tubo cuadrado TC 50X2	ASTM A500	Pórtico principal de la estructura
	Tubo cuadrado TC 50X2	ASTM A500	Estructura principal
	Tubo cuadrado TC 50X2	ASTM A500	Tejido lateral
	Tubo cuadrado TC 50X2	ASTM A500	Faldón
Techo	Tubo cuadrado TC 30X1,5	ASTM A500	Marco ventilación
	Tubo cuadrado TC 50X2	ASTM A500	Pórtico principal de la estructura
	Perfil Z 20x50x50x50x2	ASTM A36	Tejido longitudinal
Frontal	Tubo cuadrado TC 50X3	ASTM A500	Pórtico principal de la estructura
	Tubo cuadrado TC 40X2	ASTM A500	Tejido frontal
Posterior	Tubo cuadrado TC 50X2	ASTM A500	Pórtico principal de la estructura
	Tubo cuadrado TC 40X2	ASTM A500	Tejido posterior
Plataforma	Tubo cuadrado TC 50x2	ASTM A500	Soporte de estructura
	Tubo rectangular TR 100x50x5	ASTM A500	Durmiente bodega central
	Tubo rectangular TR 60x40x2	ASTM A500	Soporte de estructura
Anclajes	Anclaje 60X220x96x4	ASTM A36	Unión de carrocería – Bastidor
	Anclaje 60X67x96x5	ASTM A36	Unión de carrocería – Bastidor

3.4. Geometría estructural empleado en la construcción de la carrocería autoportante

A continuación se presenta la descripción de la geometría estructural empleado en la construcción de la carrocería autoportante para Carrocerías M&L:

3.4.1. Geometría estructural de los armazones laterales

La estructura del armazón lateral es realizada con perfiles de acero estructural ASTM A500 unidos mediante soldadura, estableciéndose un sistema estructural de nodos rígidos, los materiales que se proponen para la construcción comprende de perfiles de tubo cuadrado de (50x50x2) mm que forman un pórtico transversal al chasis que conforma los laterales y el techo (figura 33), el perfil lateral desde el marco de ventana hacia el faldón está compuesto de tubo cuadrado de (50x50x2) mm distribuido longitudinalmente a lo largo de la estructura y la parte inferior del faldón está compuesto de tubo cuadrado de (50x50x2) mm. Apreciándose en la figura 34.

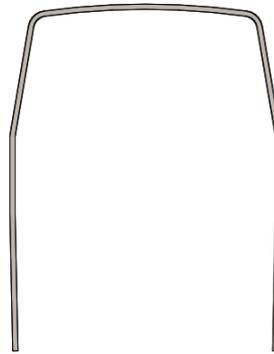


Figura 33 Esquema tipo pórtico

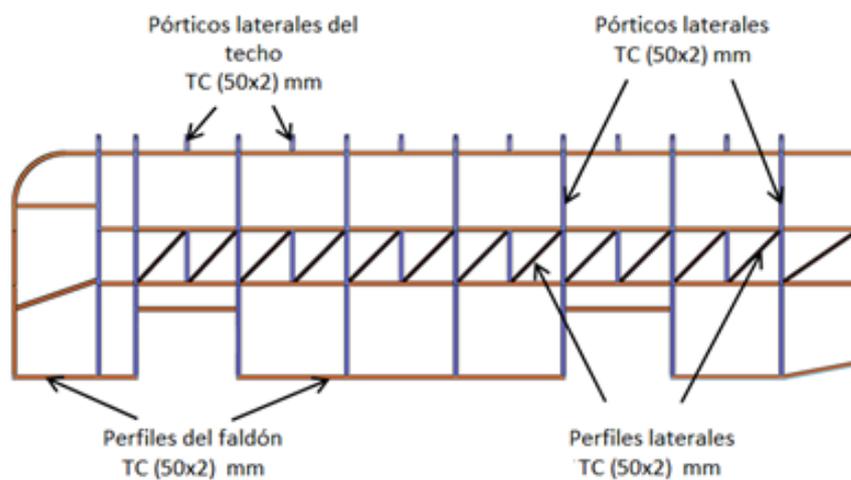


Figura 34 Geometría estructural del armazón lateral

3.4.2. Geometría estructural de la plataforma – piso

Los perfiles principales (durmientes) es realizada con perfiles de acero estructural ASTM A500, está compuesto de tubo rectangular TR (80x40x3) mm. que se distribuyen transversalmente a lo largo del chasis y elementos de apoyo de tubo cuadrado TC (50x2) mm. además de perfil tipo C central que se ubica longitudinalmente de (50x100x50x2) mm. Formando una estructura tipo rejilla con un perfil angular L de (50x3) mm en su contorno, como se puede apreciar en la figura 35

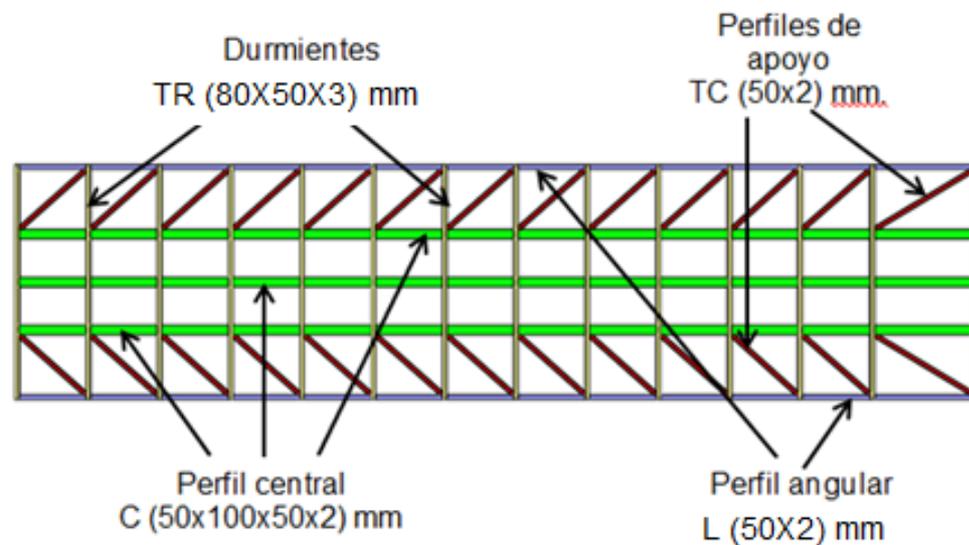


Figura 35 Geometría estructural de la plataforma – piso

3.4.3. Geometría estructural del techo.

Es realizada con perfiles de acero estructural ASTM A500. Está conformada transversalmente por el arco de tubo cuadrado TC (50x2) mm, (figura 30) unidas longitudinalmente por medio de perfiles Z (20x50x50x50x2) mm construidos con perfil estructural ASTM A 36 y marcos diseñados para las salidas de emergencia y ventilación de TC (30X1,5) mm. Se puede apreciar en la figura 36.

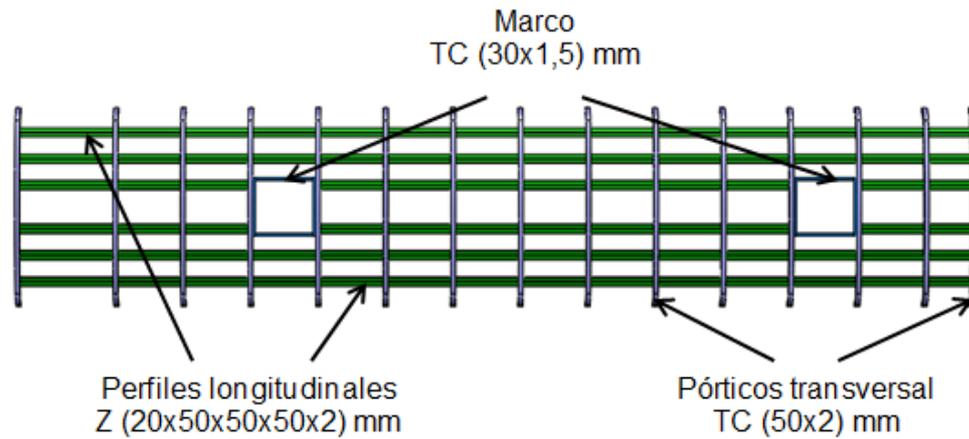


Figura 36 Geometría estructural del techo

3.4.4. Geometría estructural del frente y posterior.

Su configuración estructural es realizada con perfiles de acero estructural ASTM A500, está diseñada tanto en su parte frontal como posterior con perfiles de tubo cuadrado de TC (40x2) mm. los cuales van unidos a la estructura principal conformada por los laterales y el piso, se puede apreciar en la figura 37 y figura 38.

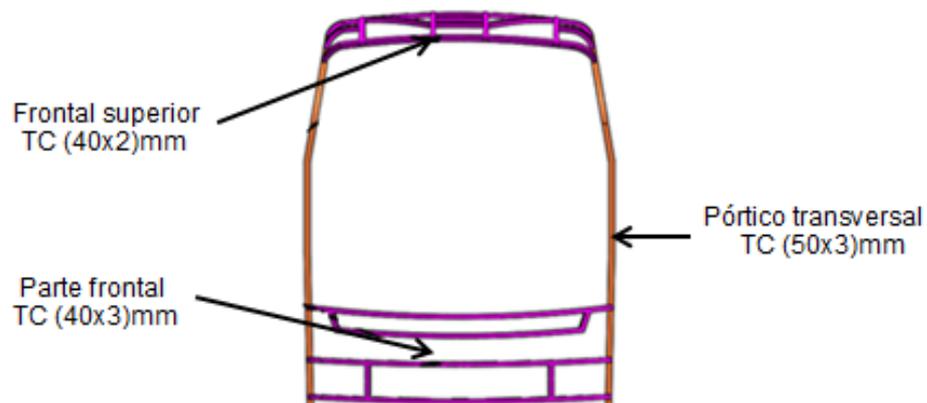


Figura 37 Geometría estructural del frente

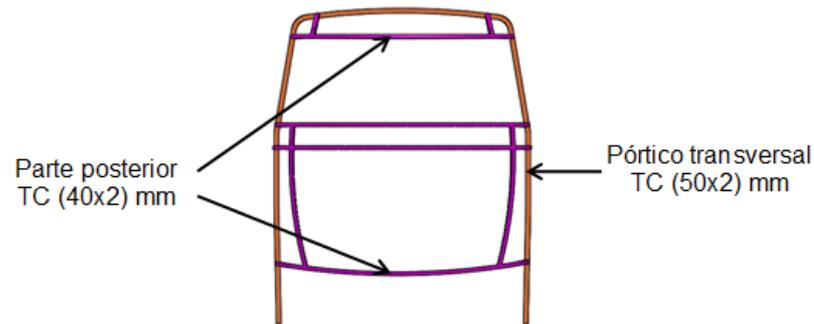


Figura 38 Geometría estructural posterior

3.4.5. Geometría estructural de plataforma y anclajes

Los perfiles principales es realizada con perfiles de acero estructural ASTM A500, están compuestos de tubo rectangular TR (100x50x3) mm los cual se instala de manera longitudinal a lo largo del chasis, sobresalen elementos de apoyo de tubo cuadrado TC (50x2) mm y TR (60x40x2) mm además del perfil que forma la bodega central de la estructura de tubo rectangular TR (100x50x3)mm, como se puede apreciar en la figura 39.

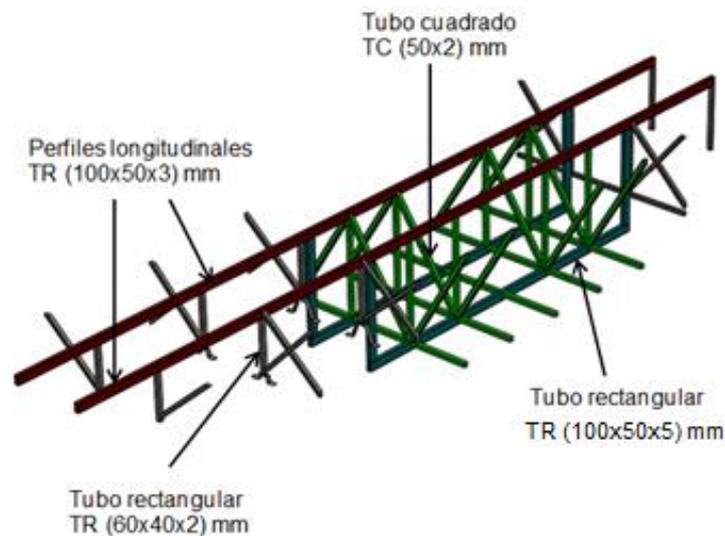


Figura 39 Geometría estructural de plataforma y anclajes

Los anclajes los cuales van montados sobre el chasis y sirven de sujeción con la carrocería son elaborados con perfiles de acero estructural ASTM A500 rectangular, como se puede observar en la figura 40.



Figura 40 Perfil unión (Construido)

3.5. Estudio de las fuerzas que actúan sobre la carrocería

La carrocería está sujeta a una variedad de fuerzas, también debe resistir cargas estáticas y dinámicas sin sufrir ningún tipo de deformación, evitando que el espacio de supervivencia resulte invadido

En el análisis se aplican dos criterios para el estudio de fuerzas y cargas:

- Criterio de efectos producidos.
- Criterio de magnitud y dirección (fuerzas dinámicas).

3.5.1. Criterio de efectos producidos.

Los efectos más importantes que las cargas producen en la acción de una estructura autoportante son las siguientes:

Cargas de flexión.

“Las cargas de flexión son aquellas que provocan deflexión en las vigas que conforman la carrocería, están producidas por la acción del peso de la carga útil sobre la estructura y las fuerzas de reacción provenientes de la superficie de rodamiento” (Andrade & Méndez, 2012).

“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 por fuerzas de flexión”. (Andrade & Méndez, 2012)

La figura 41 señala el comportamiento de las cargas flexionantes en la estructura autoportante.

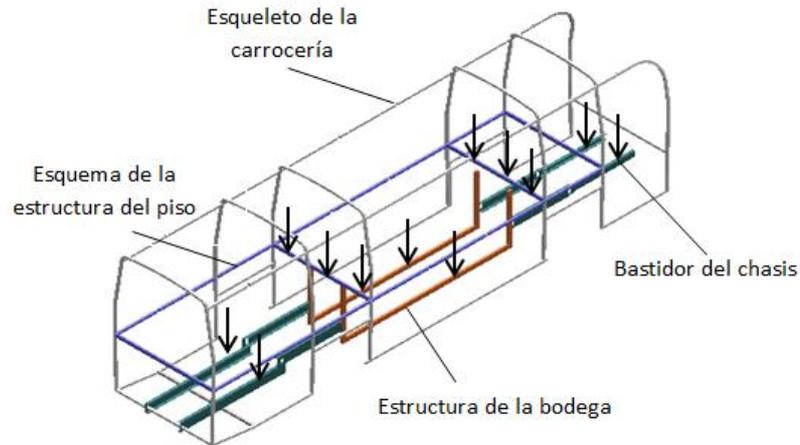


Figura 41 Comportamiento de las cargas flexionantes

Cargas torsionales

“Son las fuerzas que tratan de torcer la carrocería, y que se presentan a los costados de la misma en direcciones contrarias, produciendo un momento torsor. Resultan de las interacciones alternativas derecha-izquierda 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. Cuando el vehículo está en operación, la fuerza torsional, resultante de las fuerzas de reacción desde la superficie de rodamiento, que actúan alternativamente sobre los lados de la carrocería del bus y el incremento de la carga debido a vibración, actúan sobre el bus repetidamente. Estas cargas conducen a extremas deformaciones y concentración de esfuerzo en todas las partes de la estructura de la carrocería, especialmente en las partes en donde hay rigidez insuficiente” (Andrade & Méndez, 2012)

La figura 42 señala el comportamiento de las cargas torsionales en la estructura autoportante

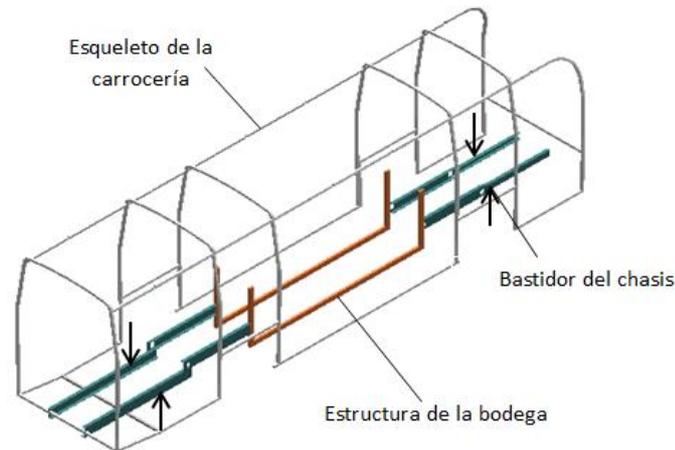


Figura 42 Comportamiento de las cargas torsionales.

Cargas laterales

“Las cargas laterales se producen durante giros rápidos donde la unidad está sometida a una aceleración centrífuga que permite seguir la trayectoria de la curva. A consecuencia de ello, la estructura estará sometida a una fuerza centrífuga que cargará los paneles y columnas de la misma y los ocupantes constatarán los efectos de una fuerza centrípeta que tiene tendencia a sacarlos de su ubicación” (Andrade & Méndez, 2012).

La figura 43 señala el comportamiento de las cargas laterales, mostrando la parte externa de la estructura sin incluir el interior

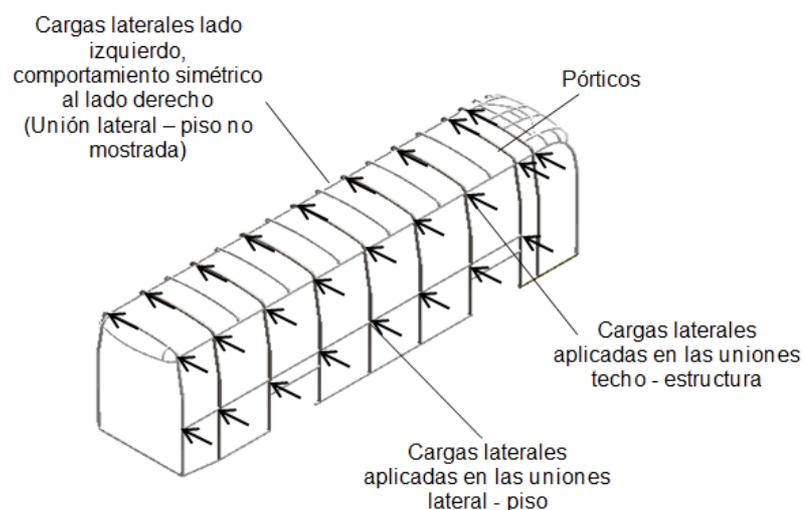


Figura 43 Comportamiento de las cargas laterales, mostrando la parte externa de la estructura sin incluir el interior

3.5.2. Criterio de magnitud y dirección (Fuerzas dinámicas)

La estructura autoportante debe resistir todas las fuerzas dinámicas que se producen en la marcha del vehículo.

Fuerzas verticales

“Las fuerzas dinámicas verticales se forman a causa de las aceleraciones debidas a los movimientos de la suspensión. También al tomar las curvas aparecen 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 trasero a través de las ballestas de la suspensión. Se propagan desde las fijaciones posteriores de la suspensión y desde el voladizo de la carrocería, pasando por los largueros del piso, saliendo y subiendo por los costados de la carrocería y siguiendo hacia adelante a las vigas bajo las cuales están montadas las ballestas del eje trasero” (Andrade & Méndez, 2012).

La figura 44 muestra las fuerzas verticales en la parte posterior de la estructura

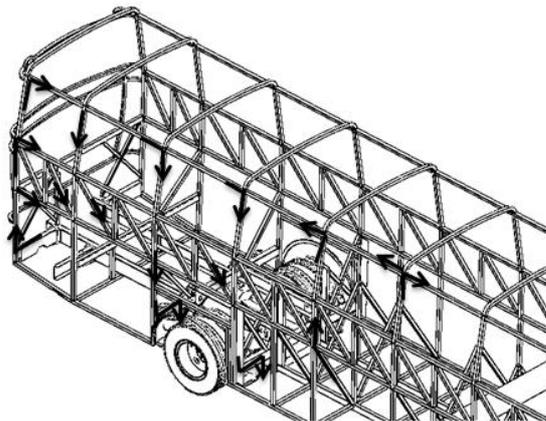


Figura 44 Fuerzas verticales en la parte posterior de la estructura

Al conducir por caminos irregulares también pueden aparecer torsiones cuando una rueda delantera y una posterior a lados opuestos son comprimidas.

La figura 45 muestra las fuerzas verticales en la parte delantera de la estructura.

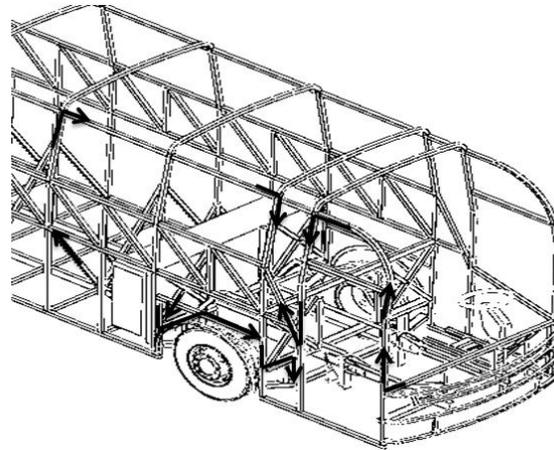


Figura 45 Fuerzas verticales que actúan en la parte delantera de la estructura autoportante

Fuerzas Longitudinales

Al frenar el bus las fuerzas que producen los pasajeros y su equipaje se transiten al piso descendiendo por los soportes hacia las barras estabilizadoras.

“Las fuerzas longitudinales son las que aparecen normalmente al frenar el vehículo pero pueden formarse también al pasar sobre baches del pavimento. Al frenar el vehículo, el peso se transmite a los costados de la carrocería donde es absorbido por las estructuras laterales. Las fuerzas se reúnen en la parte inferior de los costados de la carrocería propagándose a través del piso o soportes del mismo al bastidor y a través de las barras estabilizadoras a las ruedas” (Andrade & Méndez, 2012).

La figura 46 muestra las fuerzas longitudinales en la estructura autoportante

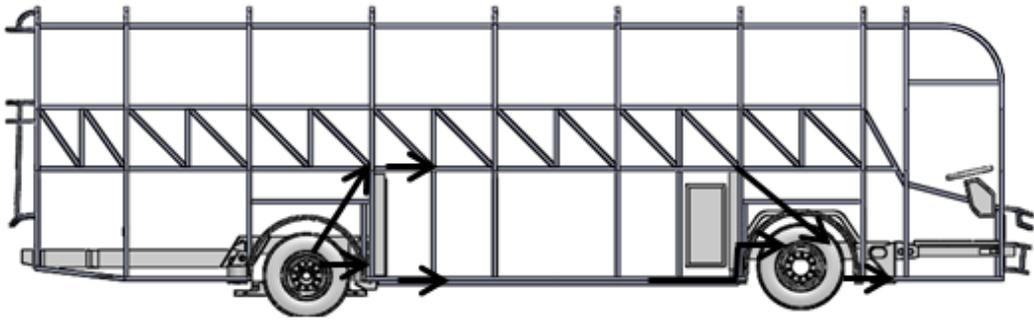


Figura 46 Fuerzas longitudinales que actúan en la estructura autoportante

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. Estas fuerzas son absorbidas principalmente por el piso y en cierta medida por el techo” (Andrade & Méndez, 2012).

La figura 47 muestra el comportamiento de cargas transversales en curvas.

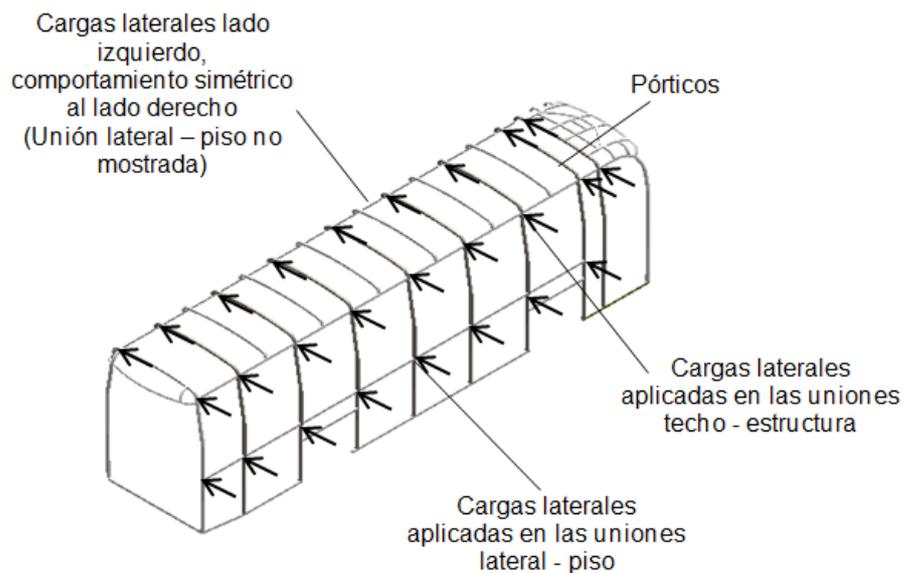


Figura 47 Cargas transversales que actúan en las curvas sobre la carrocería autoportante

3.6. Cargas aplicadas a la carrocería de un bus autoportante

3.6.1. Cargas estáticas

“Son cargas que invierten un tiempo considerable en aplicarse. Las cargas estáticas varían su magnitud de cero a los valores definitivos tan lentamente, que las aceleraciones que en estas condiciones reciben los elementos de las estructuras son despreciablemente pequeñas” (Esmeraldas, 2016).

Las cargas estáticas corresponden a los elementos estructurales, los pasajeros y su carga, los cuales aplicadas a la carrocería deben ser soportadas por la estructura autoportante.

Carga Muerta

Se llama carga muerta al conjunto de acciones que se producen por el peso propio de la construcción, incluye el peso de la estructura misma y el de los elementos no estructurales

“La carga muerta corresponde al peso total de la carrocería autoportante incluyendo los componentes estructurales y no estructurales permanentes. Es decir, la carrocería autoportante terminada con todos sus accesorios” (Esmeraldas, 2016), se puede apreciar en la Figura 48:



Figura 48 Carga muerta – Bus terminado

Carga Viva

La carga viva corresponde a la carga por ocupación. Se la considera como distribuida uniformemente en los respectivos elementos estructurales de la carrocería autoportante. Incluye por lo tanto todo aquello que no tiene posición fija y definitiva como el peso de los pasajeros y sus equipajes.



Figura 49 Carga viva aplicada a un bus
Fuente (Grupo Dial, 2012)

3.6.2. Cargas dinámicas

Las cargas dinámicas tienden a modificar tanto la magnitud de las tensiones como las deformaciones que se llevan a cabo, esto afecta a la forma y límite de rotura de los materiales, aplicándose a un período relativamente corto.

Las cargas dinámicas se transmiten a través de las estructuras del piso y laterales produciendo debilitamiento en la estructura que es propensa a concentrar esfuerzos tanto por el número de veces que se produce la incidencia como la magnitud. La carga dinámica también puede originar en la estructura efectos vibratorios originando deformaciones tan grandes que conducen al colapso de la estructura.

Carga de frenado (CF)

“Se presentan cuando el vehículo es sometido a una aceleración negativa (sentido contrario al movimiento) dando como resultado la presencia de este tipo de fuerzas que actúan empujando la estructura en el sentido del

movimiento original debido a la inercia de la unidad. Del mismo modo, cuando el vehículo experimenta aceleraciones en el mismo sentido del movimiento, se presentan cargas hacia atrás que se oponen al mismo, por el motivo descrito” (Andrade & Méndez, 2012).

La figura 50 señala el comportamiento de las cargas de frenado, mostrando la parte externa de la estructura sin incluir el interior

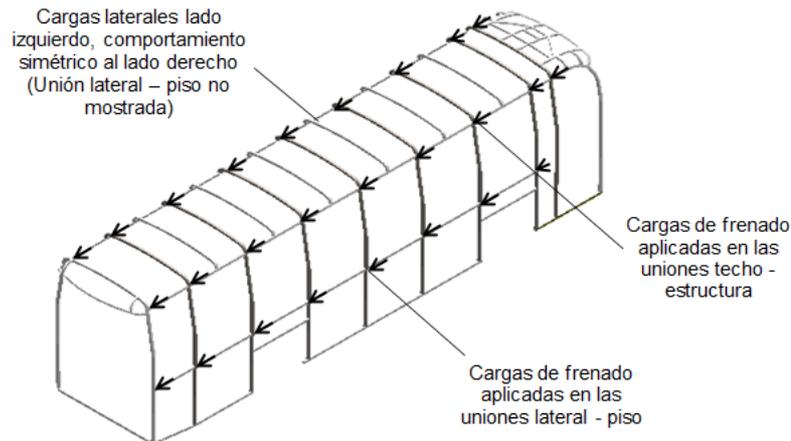


Figura 50 Comportamiento de las cargas de frenado, mostrando la parte externa de la estructura sin incluir el interior

Carga de aceleración brusca (CAb)

Corresponde a la fuerza producida por la aceleración brusca del vehículo. (INEN 1323, 2009)

La carga de aceleración brusca es menor comparando a la carga de frenado brusco puesto que al acelerar conlleva un largo tiempo en llegar a una velocidad determinada, en cambio al frenar se lo puede realizar en pocos segundos significando mayores cargas en ese instante.

Carga de giro (CG)

“Corresponde a la fuerza producida por el giro de un vehículo. El automóvil, al describir una trayectoria curvilínea, se ve sometido a la fuerza centrífuga, como si se pusiera a girar en redondo sobre una circunferencia cuyo centro coincide con el centro geométrico de la curva de la carretera.

Aunque no realice un giro de 360°, por pequeña que sea la longitud del trazado en curva de la carretera, aparece la fuerza centrífuga” (Andrade & Méndez, 2012).

En la Figura 51 se muestra la carga de giro actuando sobre la carrocería

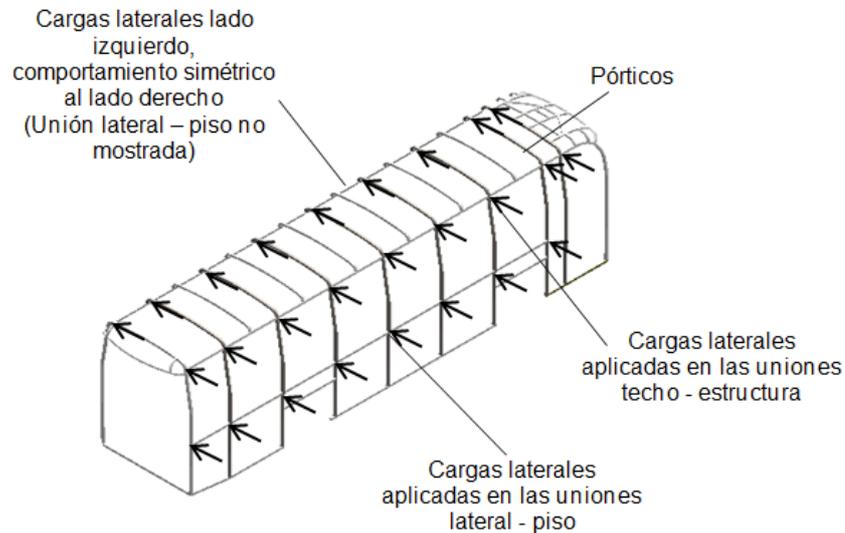


Figura 51 Cargas de giro actuantes sobre la carrocería autoportante

Carga por resistencia del aire frontal (CRaf)

Corresponde a la fuerza producida por el aire sobre el área correspondiente a la proyección del bus en el plano frontal, como se muestra en la Figura 52.

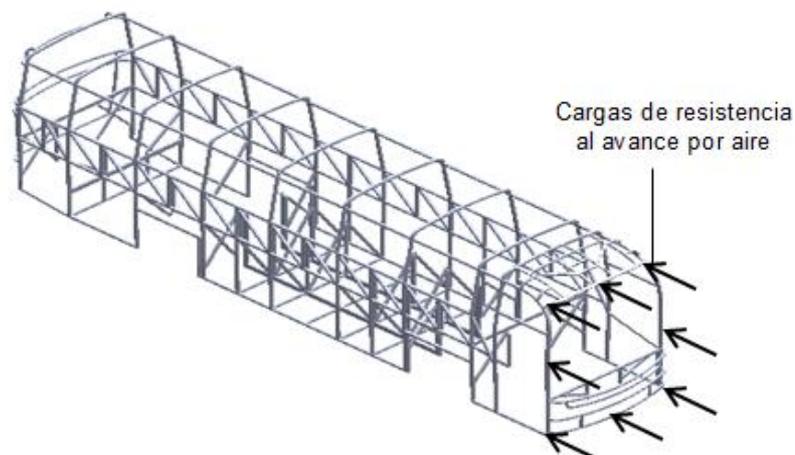


Figura 52 Carga por resistencia al aire frontal actuante sobre la carrocería autoportante

3.7. Análisis y selección de software

Para lograr el mejor resultado en la construcción de la carrocería autoportante es necesario realizar estudios precisos tanto estáticos como dinámicos.

En la actualidad se emplean software de alta precisión y rendimiento para el diseño y el análisis estructural de la carrocería autoportante, con el fin de optimizar materiales de construcción, gastos computacionales y horas de trabajo, logrando visualizar el desplazamiento elástico y la deformación de una carrocería que se encuentra sometida a varios tipos de cargas, identificando falencias y corrigiéndolas de manera más rápida y eficaz, teniendo como resultado un diseño estructural de muy alta precisión.

Alternativas de selección – Software CAD

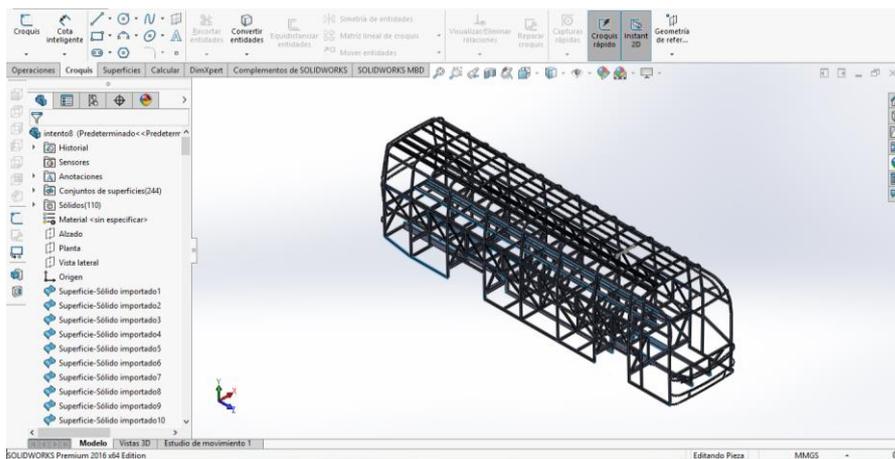


Figura 53 Interfaz Software CAD

- Permite el modelado de diseños basados en miembros estructurales que representan una realidad física.
- Permite definir, dibujar, seleccionar, asignar, analizar, desplegar, editar, ocultar y diseñar elementos o conjunto de elementos convertidos en sistemas estructurales a través de su interfaz con el usuario.
- Cuenta con una librería propia la cual dispone de perfilera y materiales que se pueden definir, editar o agregar a la estructura modelada

- Permite realizar la planimetría de los modelos antes diseñados los cuales posteriormente se dirigirán a la construcción física del modelo.
- Permite evaluar el impacto ambiental del diseño, simular virtualmente en situaciones reales y optimizar su desempeño.
- Está basado en un motor de modelado de sólidos que contiene comandos de creación, edición de superficies complejas.
- Permite evaluar ensambles de varias piezas antes modeladas

Alternativas de selección – Software CAD

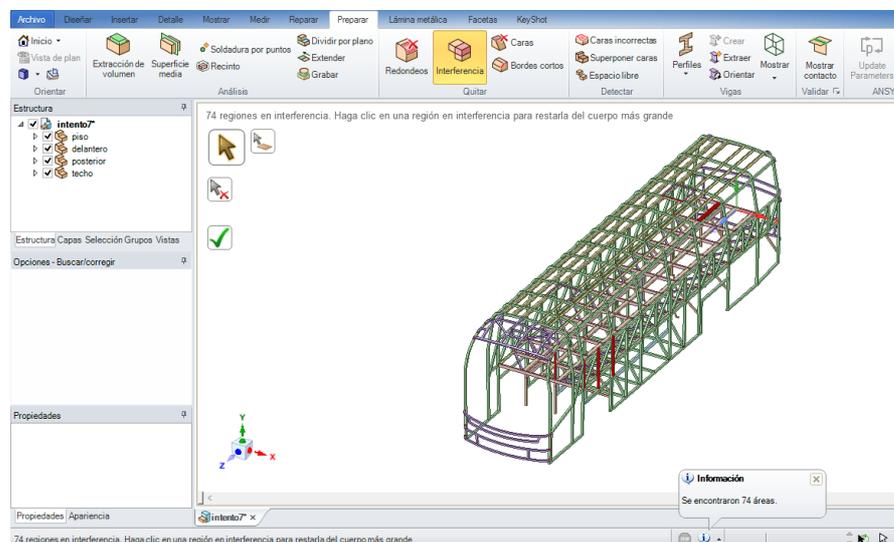


Figura 54 Interfaz Software CAD

- Es un software de modelación muy eficaz, ofrece herramientas intuitivas perfectas para la ingeniería, obteniendo como resultado un software con potencia, facilidad de uso y flexibilidad.
- Permite la modificación del modelado, materiales, métodos de diseño y procesos de fabricación sin la necesidad de empezar desde cero.
- Proporciona una herramienta de diseño simple, rápida y flexible con la finalidad de crear modelos y preparar la geometría de las estructuras de manera rápida y eficaz
- Permite a los usuarios crear, editar y preparar modelos para la impresión 3D

- Ayuda a editar y preparar modelos para la fabricación, minimizando el tiempo de trabajo y producción.

Alternativas de selección – Software CAE

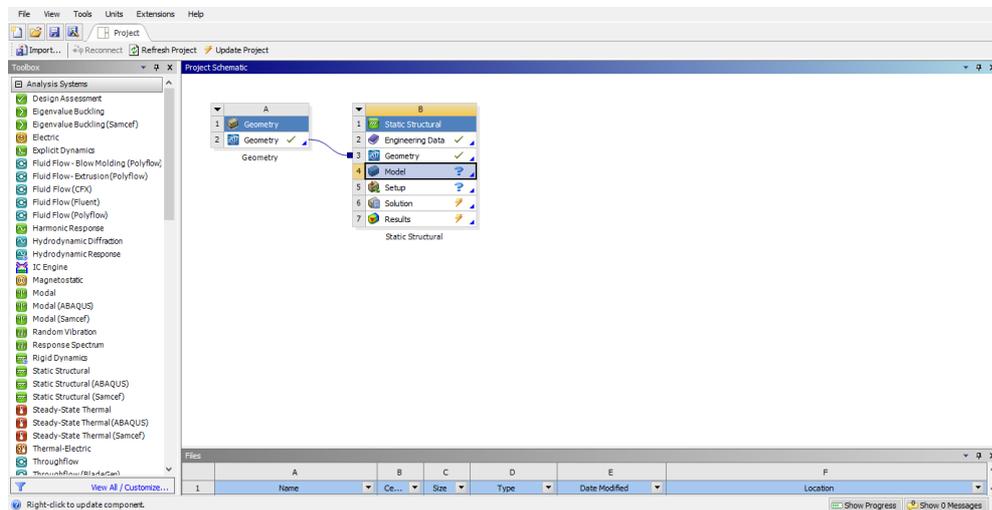


Figura 55 Interfaz Software CAE

Según (Esmeraldas, 2016) en su tesis 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, menciona las alternativas de selección con los que cuenta el software CAE, lo cual engloba la participación de diferentes módulos que son de gran ayuda para el procesamiento y buen desenvolvimiento del software en el análisis estructural.

- Permite predecir la confiabilidad de diseños estructurales mediante un análisis estático o dinámico, en torno a lo que sucede en el mundo real.
- Permite la modificación y configuración de las propiedades tanto físicas, químicas o mecánicas del material, a través de la base de datos de Ingeniería (Engineering Data).

- La aplicación de condiciones de frontera (restricciones, masas, velocidades, etc.) también son parámetros que se pueden considerar en la configuración, dependiendo de tipo de estudio a realizar.
- Admite la visualización y configuración del mallado de todo sistema estructural.
- El uso de este módulo permite analizar la estructura obteniendo una solución dinámica explícita, y la verificación de resultados por medio de un posprocesador”.

CAPITULO IV

4. METODOLOGÍA DEL MODELADO Y VALIDACIÓN ESTRUCTURAL

4.1. Importación de la geometría al software

Considerando la norma técnica de construcción de carrocerías (INEN 1323, 2009), se proyectó para efecto del análisis la carrocería autoportante de bus interprovincial que se observa en los planos de la figura 56.

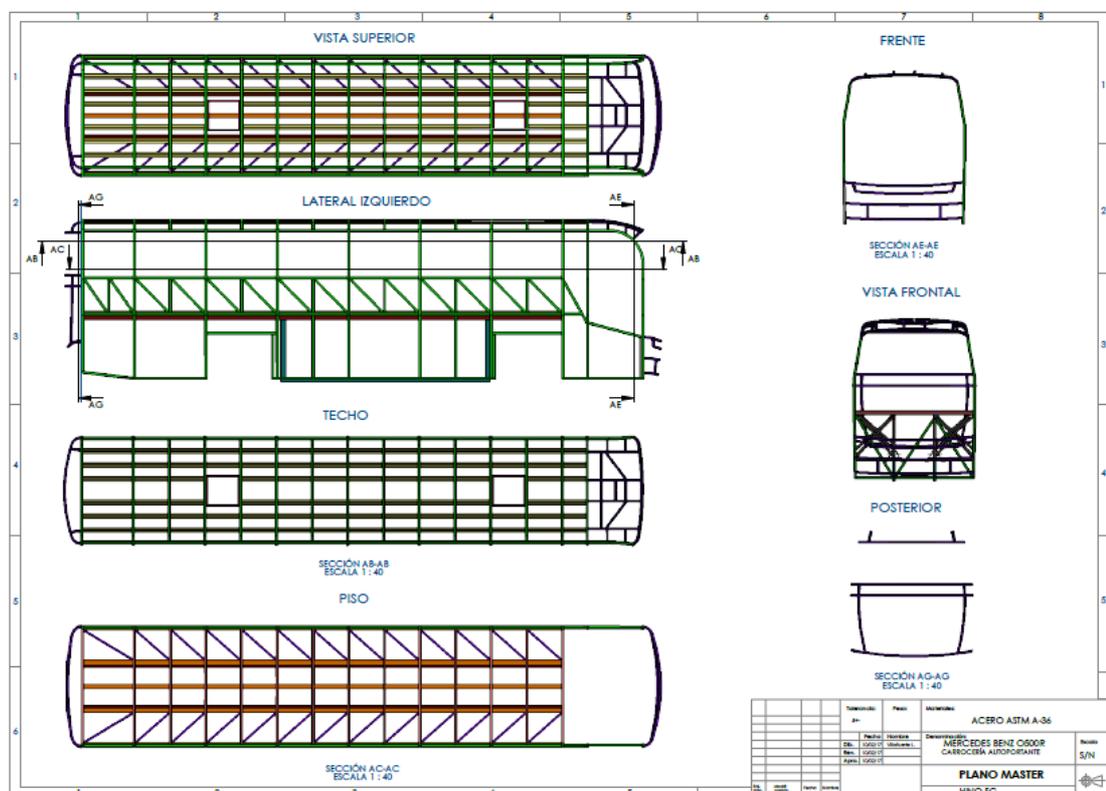


Figura 56 Planos de la carrocería autoportante

Con el fin de que la simulación se acerque a la realidad se exige un modelado tridimensional, haciendo uso del software CAD.

El modelado se realizó con elementos tipo sólidos, con la finalidad de posteriormente convertirlos a superficies.

En la figura 57 se visualiza el boceto de la estructura autoportante.

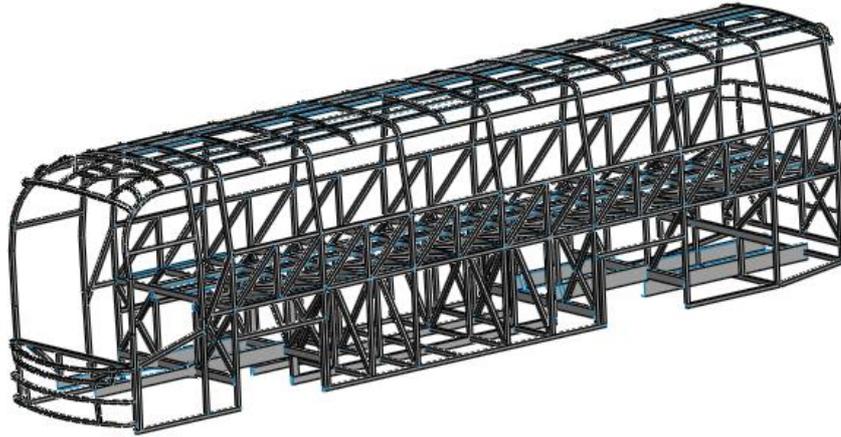


Figura 57 Boceto de la estructura autoportante

4.2. Verificación de la geometría

Se puede actuar directamente sobre las interferencias que por efecto se producen en las operaciones generadas en el modelado de la carrocería. Existen programas CAD que facilitan la detección de fallas en el modelo de dibujo mediante herramientas visuales.

En el presente análisis se comprueba la geometría, interferencias y contactos mediante las herramientas de detección.

La estructura realizada en CAD se guarda con la extensión Parasolid.*x_t, (texto o binario) la cual ayuda a la exportación de la estructura y posteriormente su modificación sin necesidad de empezar desde cero. Teniendo en cuenta que el modelado no debe poseer ningún tipo de interferencia entre estructuras se procede a modificarlo utilizando las herramientas disponibles como corte, dividir, combinar entre otras, en la figura 58 se visualiza una sección del modelado en el cual existen áreas con interferencias

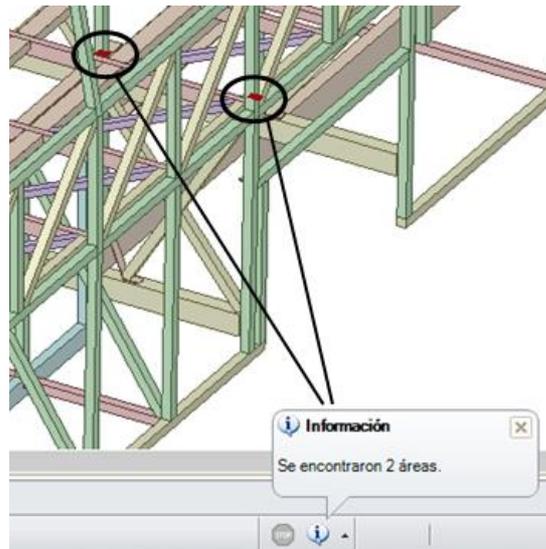


Figura 58 Interferencias en los elementos de la carrocería

Antes de pasar al análisis en el Software CAE se debe configurar el modelo para que pase de ser un elemento sólido a superficial, esto se logra mediante la eliminación de caras en cada elemento estructural, como se muestra en la sección de la carrocería en la figura 59.

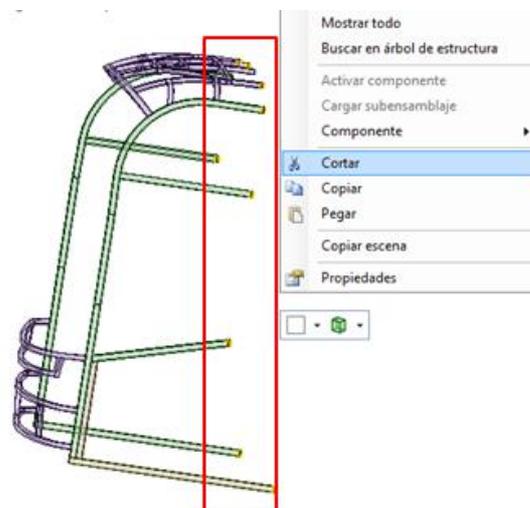


Figura 59 Configuración de elemento sólido a superficial

Ahora se puede observar que los elementos estructurales tenga contacto entre sí, caso contrario nos ocurriría errores posteriores en la simulación estática en el software CAE.

“Los contactos son necesarios para producir fielmente el comportamiento del sistema real, que exista interacción continua entre dos zonas de

elementos diferentes. Por ello, en el modelo se define un contacto continuo durante todo el proceso de análisis” (Donaire, Septiembre 2016)

En la figura 60 se observa una sección de la carrocería autoportante donde existe contactos entre superficies. Nótese que existen contactos de color azul y rojo.

- **Color azul:** Área con contacto bien definido
- **Color Rojo:** Área sin contacto

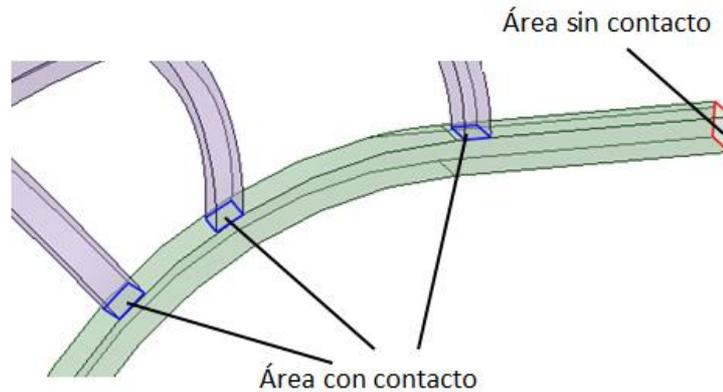


Figura 60 Contactos entre superficies

4.3. Pre-proceso del análisis estático

En el pre-procesamiento del análisis estático se debe tener definido un modelo apropiado y bien estructurado, que represente las características estructurales del sistema físico o abstracto seleccionado.

A continuación se describe el pre-proceso del análisis estático realizado con los datos de entrada de la estructura autoportante.

Se importa el modelo al Software CAE como un elemento estructural. Se Visualiza en la figura 61.

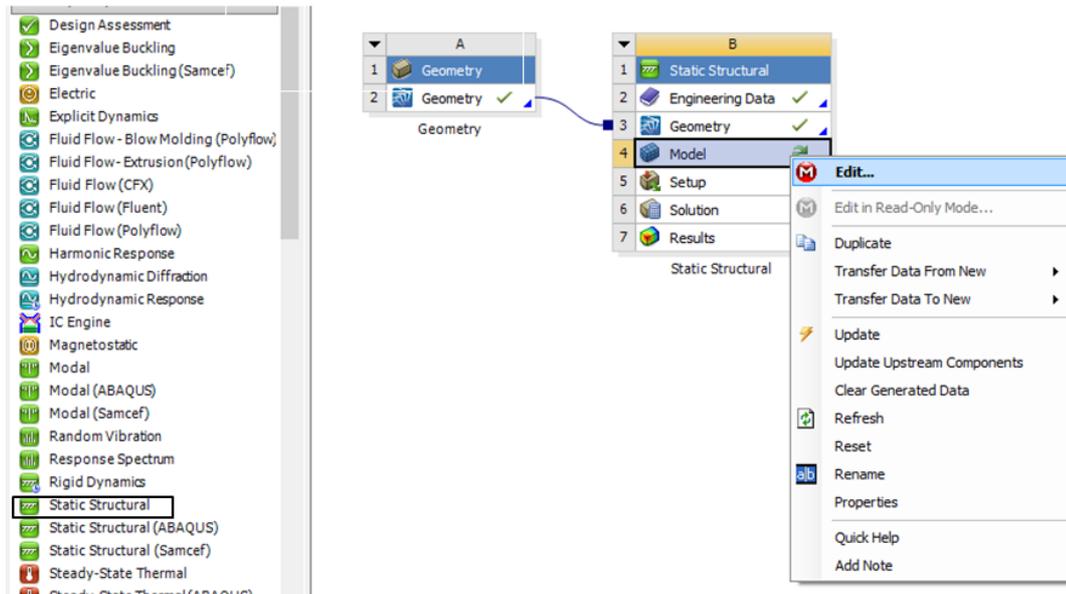


Figura 61 Importación de la estructura al Software CAE

4.3.1. Asignación de materiales

A través de la base de datos de ingeniería (Engineering Data) se puede aplicar los materiales en cada componente que va a ser analizados en la simulación. En el caso de no existir en la base de datos el material a ser estudiado se procede a la edición de sus propiedades. En la figura 62 y figura 63 se muestra la edición de las propiedades del acero ASTM A36 y ASTM A500, respectivamente.

1	Contents of Engineering Data	Source	Description
2	Material		
3	Structural Steel ASTM A36		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1

Properties of Outline Row 3: Structural Steel ASTM A36				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7850	kg m ⁻³	
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's M...		
8	Young's Modulus	2E+05	MPa	
9	Poisson's Ratio	0,27		
10	Bulk Modulus	1,4493E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7,874E+10	Pa	
12	Field Variables			
16	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		
20	Strain-Life Parameters			
28	Tensile Yield Strength	250	MPa	
29	Compressive Yield Strength	250	MPa	
30	Tensile Ultimate Strength	460	MPa	

Figura 62 Propiedades Acero Estructural A36 en Engineering Data

4	Structural Steel ASTM A500	Source	Description
*	Click here to add a new material		

Properties of Outline Row 4: Structural Steel ASTM A500				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7850	kg m ⁻³	
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's M...		
8	Young's Modulus	2E+05	MPa	
9	Poisson's Ratio	0,27		
10	Bulk Modulus	1,4493E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7,874E+10	Pa	
12	Field Variables			
16	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		
20	Strain-Life Parameters			
28	Tensile Yield Strength	320	MPa	
29	Compressive Yield Strength	250	MPa	
30	Tensile Ultimate Strength	430	MPa	

Figura 63 Propiedades Acero Estructural A500 en Engineering Data

Los aceros estructurales utilizados son materiales no lineales ya que se busca obtener un comportamiento inelástico en los elementos de la carrocería autoportante

En las figuras 64 y 65 se observa los elementos que forman parte de la carrocería autoportante, teniendo en cuenta la asignación del material planteado a cada miembro estructural.

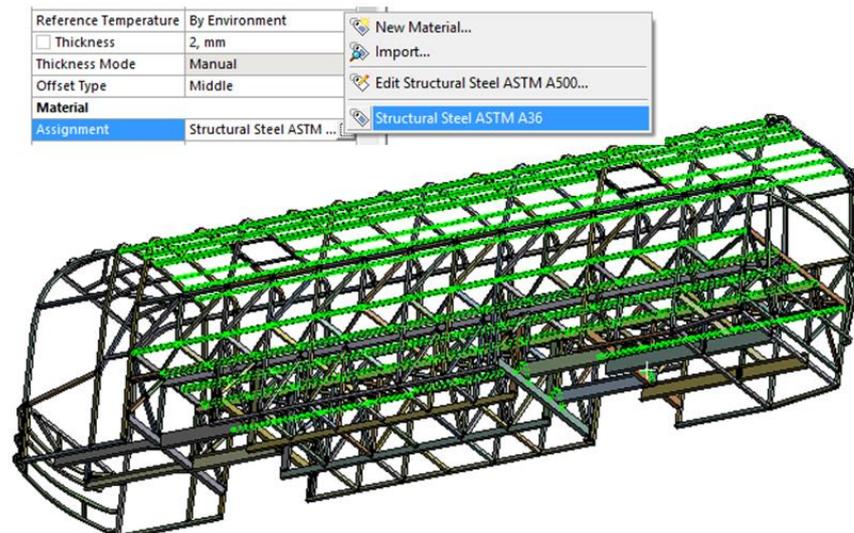


Figura 64 Asignación del acero ASTM A36 a cada elemento de la estructura autoportante

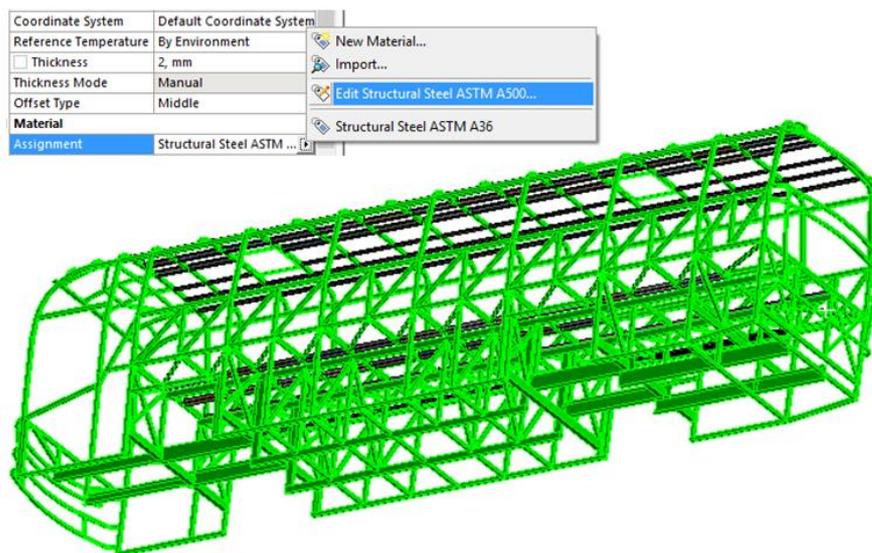


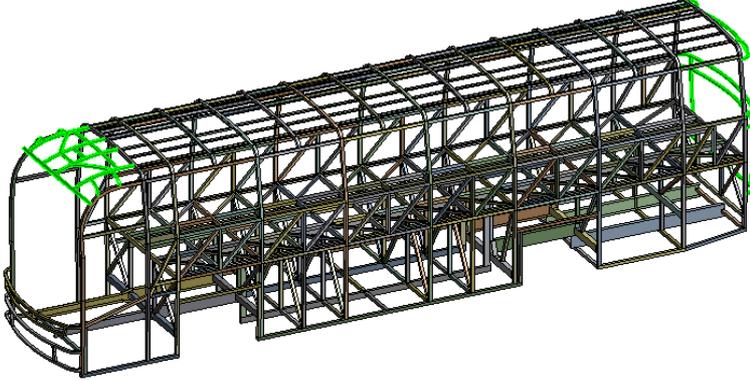
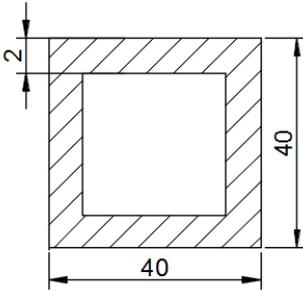
Figura 65 Asignación del acero ASTM A500 a cada elemento de la estructura autoportante

4.3.2. Asignación de la sección de los elementos

Según la tabla 12 “Perfiles de la carrocería autoportante” del Capítulo III, señala el perfil utilizado en la superestructura autoportante. La mayor parte de los elementos poseen una sección cuadrada tubular, cada una con diferentes medidas según la función que deban cumplir. A cada elemento estructural se le asigna el espesor del perfil como se detalla en la tabla 16:

Tabla 16

Asignación de espesores en los elementos estructurales de la carrocería autoportante

Elementos estructurales																											
																											
<p>Figura 66 Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento cuadrado y 2 mm de espesor</p>																											
Sección del elemento	Asignación del espesor del elemento: 2mm																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #e0e0e0;">Details of "Multiple Selection"</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>⊕ Graphics Properties</td> <td></td> </tr> <tr> <td>⊖ Definition</td> <td></td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Suppressed</td> <td>No</td> </tr> <tr> <td>Stiffness Behavior</td> <td>Flexible</td> </tr> <tr> <td>Coordinate System</td> <td>Default Coordinate System</td> </tr> <tr> <td>Reference Temperature</td> <td>By Environment</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> Thickness</td> <td>2, mm</td> </tr> <tr> <td>Thickness Mode</td> <td>Manual</td> </tr> <tr> <td>Offset Type</td> <td>Middle</td> </tr> <tr> <td>⊖ Material</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Assignment</td> <td>Structural Steel</td> </tr> <tr> <td>Nonlinear Effects</td> <td>Yes</td> </tr> </tbody> </table>	Details of "Multiple Selection"		⊕ Graphics Properties		⊖ Definition		<input type="checkbox"/> Suppressed	No	Stiffness Behavior	Flexible	Coordinate System	Default Coordinate System	Reference Temperature	By Environment	<input checked="" type="checkbox"/> Thickness	2, mm	Thickness Mode	Manual	Offset Type	Middle	⊖ Material		Assignment	Structural Steel	Nonlinear Effects	Yes
Details of "Multiple Selection"																											
⊕ Graphics Properties																											
⊖ Definition																											
<input type="checkbox"/> Suppressed	No																										
Stiffness Behavior	Flexible																										
Coordinate System	Default Coordinate System																										
Reference Temperature	By Environment																										
<input checked="" type="checkbox"/> Thickness	2, mm																										
Thickness Mode	Manual																										
Offset Type	Middle																										
⊖ Material																											
Assignment	Structural Steel																										
Nonlinear Effects	Yes																										
<p>Figura 67 Sección del tubo cuadrado con 2 mm de espesor</p>																											
Elementos estructurales																											

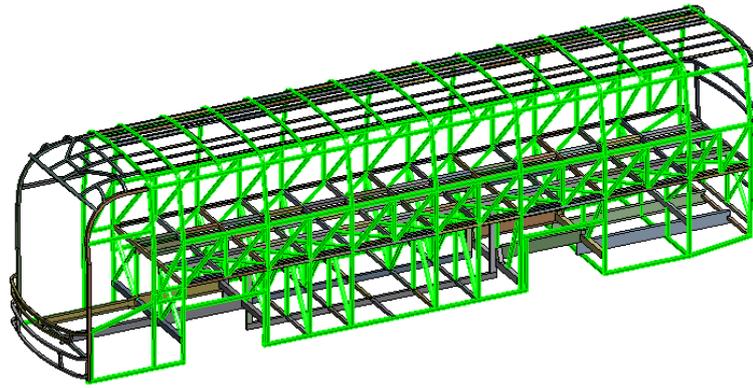


Figura 68 Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento cuadrado y 2 mm de espesor

Sección del elemento

Asignación del espesor del elemento:

2mm

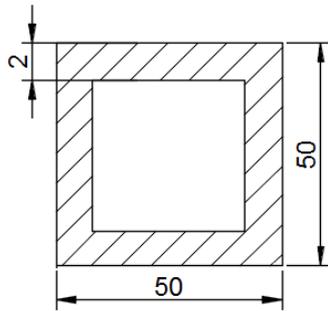


Figura 69 Sección del tubo cuadrado con 2 mm de espesor

Details of "Multiple Selection"	
+ Graphics Properties	
- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
<input checked="" type="checkbox"/> Thickness	2, mm
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
- Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes

Elementos estructurales

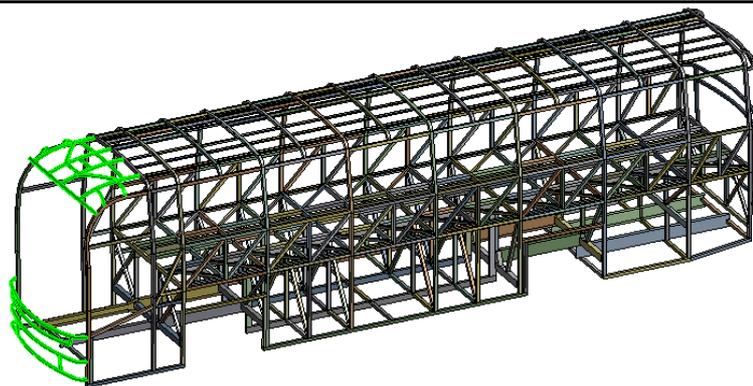


Figura 70 Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento cuadrado y 3 mm de espesor

Sección del elemento

Asignación del espesor del elemento:

3mm

CONTINÚA

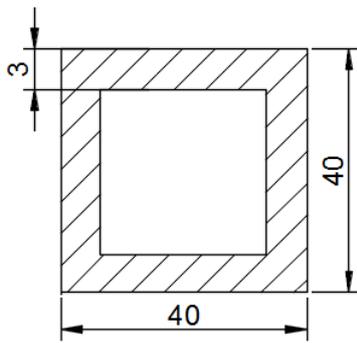
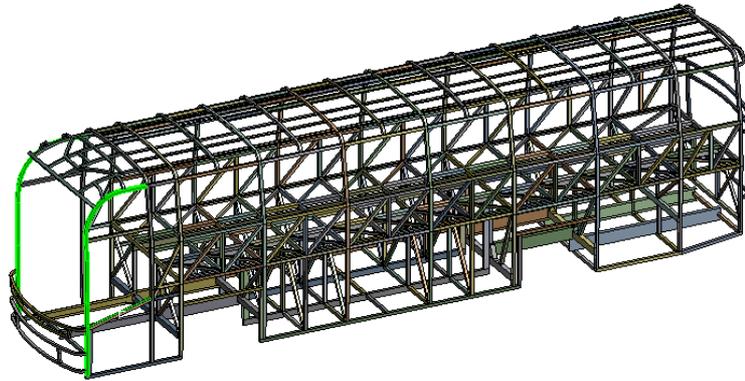


Figura 71 Sección del tubo cuadrado con 3 mm de espesor

Details of "Plataforma\Superficie"	
+ Graphics Properties	
- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
<input checked="" type="checkbox"/> Thickness	3, mm
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
- Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes

Elementos estructurales



Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento cuadrado y 3 mm de espesor

Sección del elemento

Asignación del espesor del elemento:

3 mm

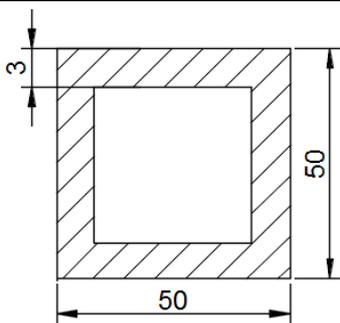
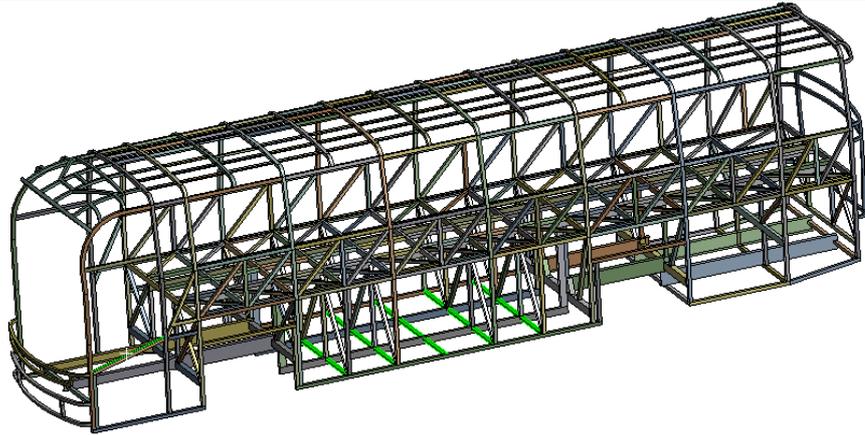


Figura 72 Sección del tubo cuadrado con 3 mm de espesor

Details of "Plataforma\Superficie"	
+ Graphics Properties	
- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
<input checked="" type="checkbox"/> Thickness	3, mm
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
- Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes

Elementos estructurales



Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento cuadrado y 5 mm de espesor

Sección del elemento

Asignación del espesor del elemento:

5 mm

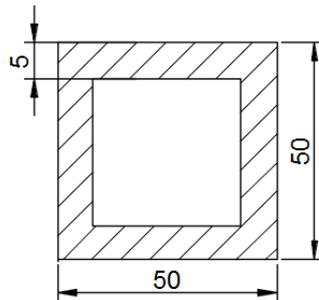


Figura 73 Sección del tubo cuadrado con 5 mm de espesor

Details of "Plataforma\Superficie"	
+ Graphics Properties	
- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
<input checked="" type="checkbox"/> Thickness	5, mm
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
- Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes

Elementos estructurales

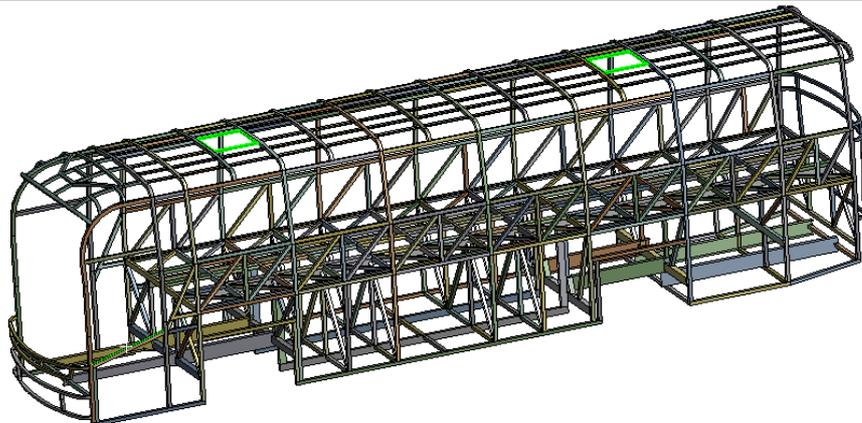
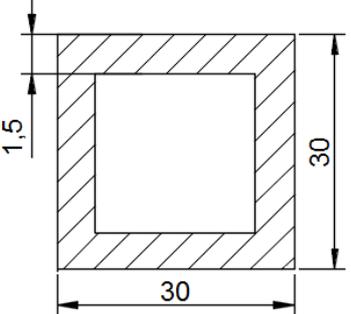
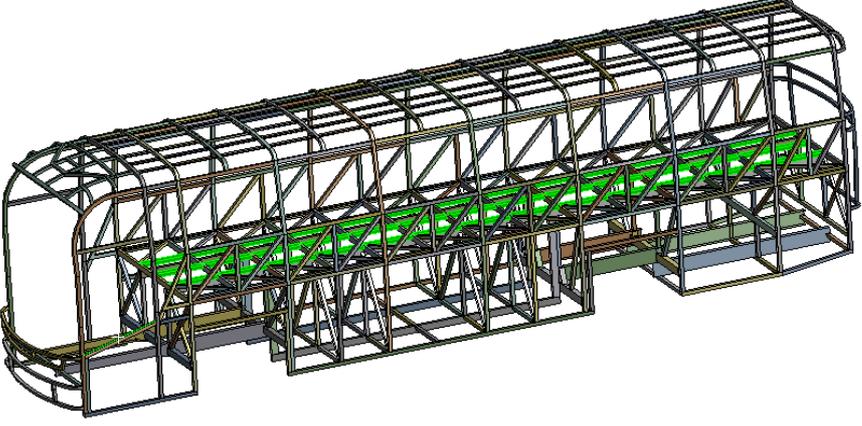
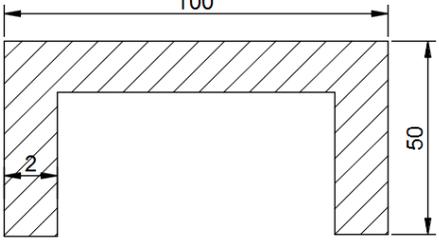


Figura 74 Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento cuadrado y 1,5 mm de espesor

CONTINUA 

Sección del elemento	Asignación del espesor del elemento: 1,5 mm																										
 <p data-bbox="327 672 742 784">Figura 75 Sección del tubo cuadrado con 1,5 mm de espesor</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Details of "Techo\Superficie"</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">+ Graphics Properties</td> </tr> <tr> <td colspan="2">- Definition</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Suppressed</td> <td>No</td> </tr> <tr> <td>Stiffness Behavior</td> <td>Flexible</td> </tr> <tr> <td>Coordinate System</td> <td>Default Coordinate System</td> </tr> <tr> <td>Reference Temperature</td> <td>By Environment</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> Thickness</td> <td>1,5 mm</td> </tr> <tr> <td>Thickness Mode</td> <td>Manual</td> </tr> <tr> <td>Offset Type</td> <td>Middle</td> </tr> <tr> <td colspan="2">- Material</td> </tr> <tr> <td>Assignment</td> <td>Structural Steel</td> </tr> <tr> <td>Nonlinear Effects</td> <td>Yes</td> </tr> </tbody> </table>	Details of "Techo\Superficie"		+ Graphics Properties		- Definition		<input type="checkbox"/> Suppressed	No	Stiffness Behavior	Flexible	Coordinate System	Default Coordinate System	Reference Temperature	By Environment	<input checked="" type="checkbox"/> Thickness	1,5 mm	Thickness Mode	Manual	Offset Type	Middle	- Material		Assignment	Structural Steel	Nonlinear Effects	Yes
Details of "Techo\Superficie"																											
+ Graphics Properties																											
- Definition																											
<input type="checkbox"/> Suppressed	No																										
Stiffness Behavior	Flexible																										
Coordinate System	Default Coordinate System																										
Reference Temperature	By Environment																										
<input checked="" type="checkbox"/> Thickness	1,5 mm																										
Thickness Mode	Manual																										
Offset Type	Middle																										
- Material																											
Assignment	Structural Steel																										
Nonlinear Effects	Yes																										
Elementos estructurales																											
 <p data-bbox="327 1321 1380 1400">Figura 76 Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento en "C" y 2 mm de espesor</p>																											
Sección del elemento	Asignación del espesor del elemento: 2 mm																										
 <p data-bbox="311 1825 758 1904">Figura 77 Sección del perfil en "C" con 2 mm de espesor</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Details of "Multiple Selection"</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">+ Graphics Properties</td> </tr> <tr> <td colspan="2">- Definition</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Suppressed</td> <td>No</td> </tr> <tr> <td>Stiffness Behavior</td> <td>Flexible</td> </tr> <tr> <td>Coordinate System</td> <td>Default Coordinate System</td> </tr> <tr> <td>Reference Temperature</td> <td>By Environment</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> Thickness</td> <td>2, mm</td> </tr> <tr> <td>Thickness Mode</td> <td>Manual</td> </tr> <tr> <td>Offset Type</td> <td>Middle</td> </tr> <tr> <td colspan="2">- Material</td> </tr> <tr> <td>Assignment</td> <td>Structural Steel</td> </tr> <tr> <td>Nonlinear Effects</td> <td>Yes</td> </tr> </tbody> </table>	Details of "Multiple Selection"		+ Graphics Properties		- Definition		<input type="checkbox"/> Suppressed	No	Stiffness Behavior	Flexible	Coordinate System	Default Coordinate System	Reference Temperature	By Environment	<input checked="" type="checkbox"/> Thickness	2, mm	Thickness Mode	Manual	Offset Type	Middle	- Material		Assignment	Structural Steel	Nonlinear Effects	Yes
Details of "Multiple Selection"																											
+ Graphics Properties																											
- Definition																											
<input type="checkbox"/> Suppressed	No																										
Stiffness Behavior	Flexible																										
Coordinate System	Default Coordinate System																										
Reference Temperature	By Environment																										
<input checked="" type="checkbox"/> Thickness	2, mm																										
Thickness Mode	Manual																										
Offset Type	Middle																										
- Material																											
Assignment	Structural Steel																										
Nonlinear Effects	Yes																										
Elementos estructurales																											

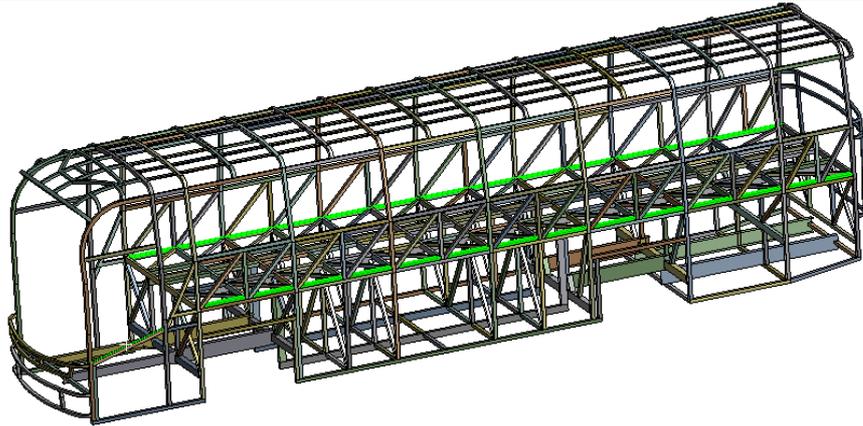
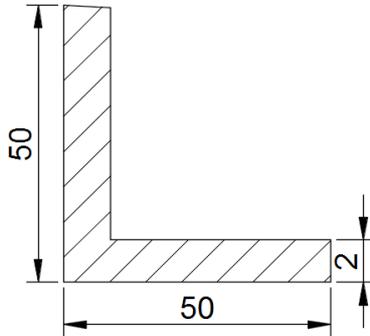


Figura 78 Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento en "L" y 2 mm de espesor

Sección del elemento

Asignación del espesor del elemento:

2 mm



Details of "Multiple Selection"	
+ Graphics Properties	
- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
<input checked="" type="checkbox"/> Thickness	2, mm
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
- Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes

Figura 79 Sección del perfil en "L" con 2 mm de espesor

Elementos estructurales

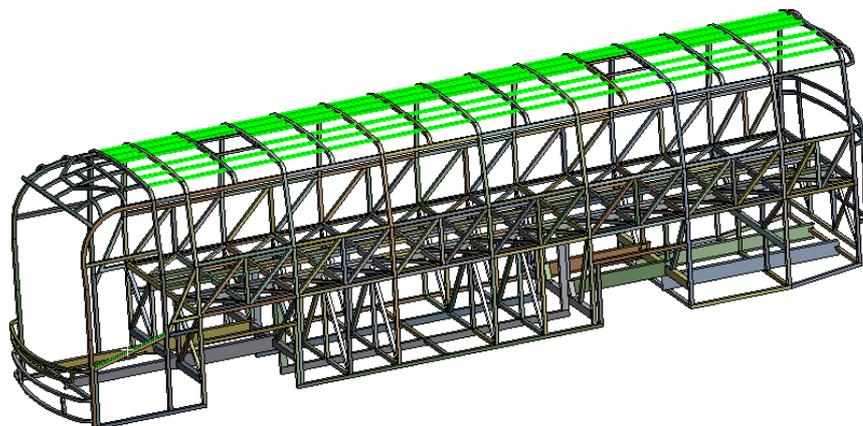


Figura 80 Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento en "Z" y 2 mm de espesor

Sección del elemento

Asignación del espesor del elemento:

2 mm

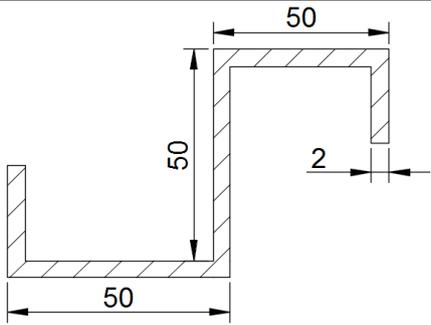


Figura 81 Sección del perfil en "Z" con 2 mm de espesor

Details of "Multiple Selection"	
+ Graphics Properties	
- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
<input checked="" type="checkbox"/> Thickness	2, mm
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
- Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes

Elementos estructurales

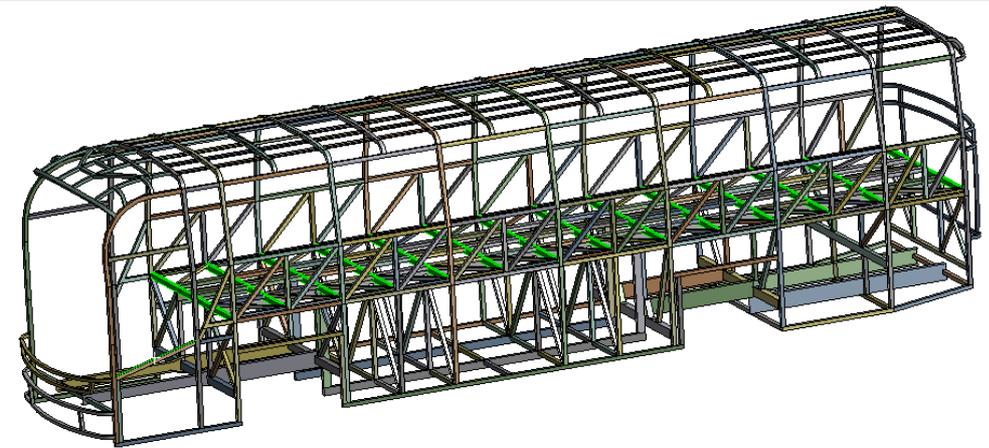


Figura 82 Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento rectangular y 3 mm de espesor

Sección del elemento

Asignación del espesor del elemento:

3 mm

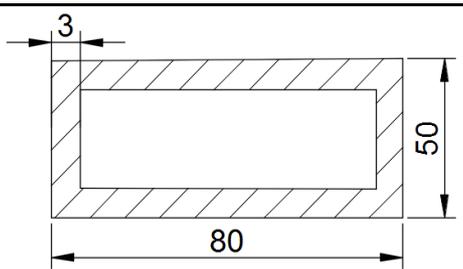


Figura 83 Sección del tubo rectangular con 3 mm de espesor

Details of "Plataforma\Superficie"	
+ Graphics Properties	
- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
<input checked="" type="checkbox"/> Thickness	3, mm
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
- Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes

Elementos estructurales

CONTINÚA 

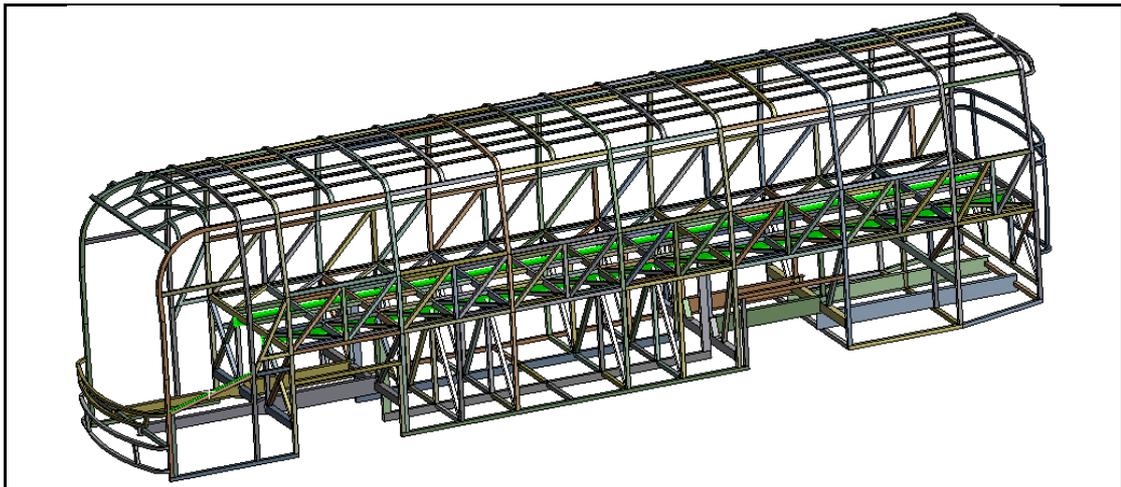


Figura 84 Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento rectangular y 3 mm de espesor

Sección del elemento

Asignación del espesor del elemento:

3 mm

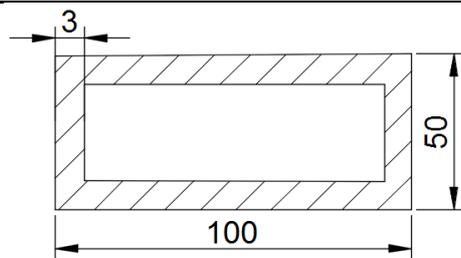


Figura 85 Sección del tubo rectangular con 3 mm de espesor

Details of "Plataforma\Superficie"

Graphics Properties	
Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
<input checked="" type="checkbox"/> Thickness	3, mm
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes

Elementos estructurales

CONTINÚA 

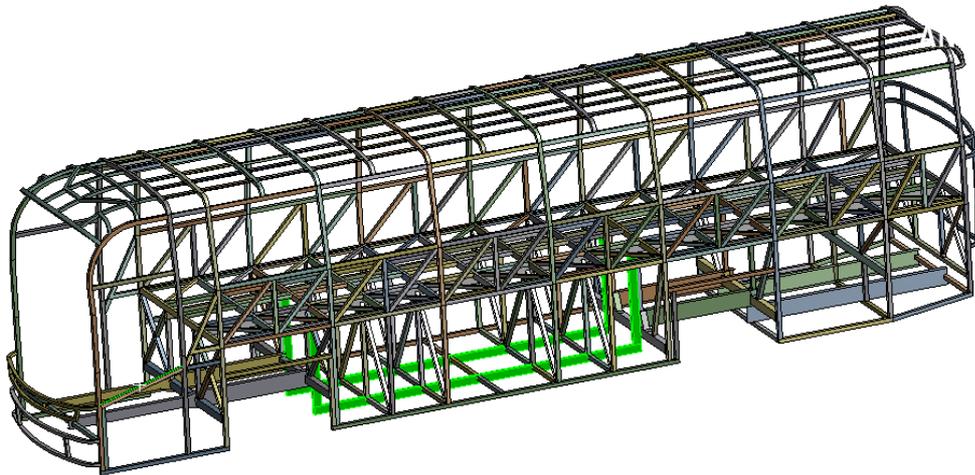


Figura 86 Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento rectangular y 5 mm de espesor

Sección del elemento

Asignación del espesor del elemento:

5 mm

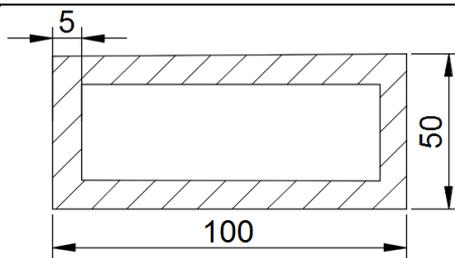


Figura 87 Sección del tubo rectangular con 5 mm de espesor

Details of "Plataforma\Superficie"

+ Graphics Properties	
- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
<input checked="" type="checkbox"/> Thickness	5, mm
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
- Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes

Elementos estructurales

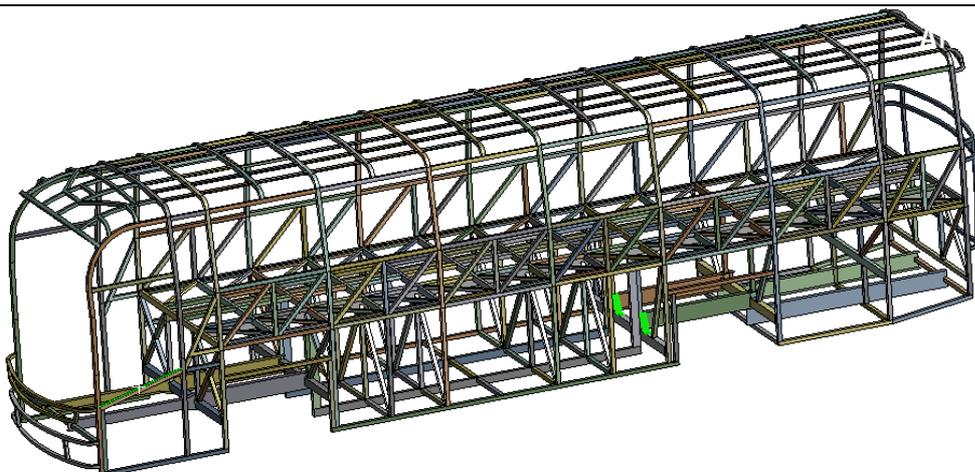


Figura 88 Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento y 4 mm de espesor

Sección del elemento

Asignación del espesor del elemento:

CONTINÚA 

4 mm

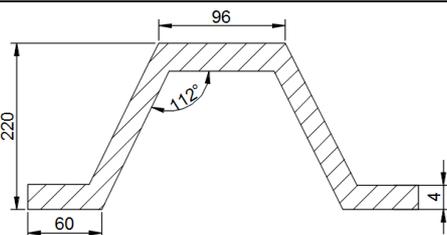


Figura 89 Sección del perfil de “unión” con 4 mm de espesor

Details of "Plataforma\Superficie"	
+ Graphics Properties	
- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	4, mm
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
- Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes

Elementos estructurales

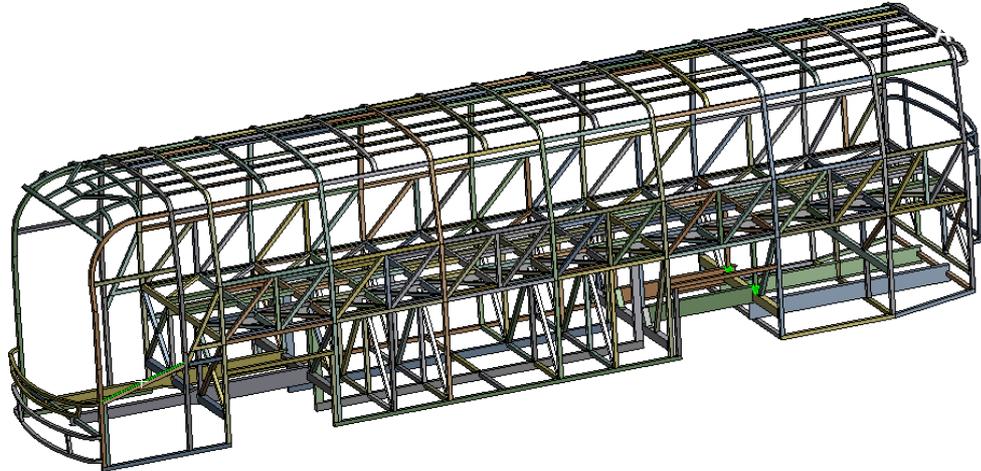


Figura 90 Elementos estructurales de la carrocería autoportante con sección del elemento y 5 mm de espesor

Sección del elemento

Asignación del espesor del elemento:

5 mm

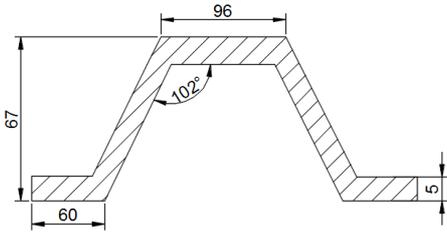


Figura 91 Sección del perfil de “unión” con 5 mm de espesor

Details of "Plataforma\Superficie"	
+ Graphics Properties	
- Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Thickness	5, mm
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Middle
- Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes

CONTINÚA

4.3.3. Mallado

Para simular la estructura del bus autoportante, los elementos utilizados fueron tipo SHELL (Superficie). Se ha representado los detalles geométricos más importantes del diseño estructural, para lograr la mayor concordancia con la realidad posible.

En el proceso de mallado se trata de tener elementos cuadriláteros siendo los más predominantes, aunque también se necesita triángulos adicionales ya que existen regiones donde se requiere que la malla tome forma.

La malla esta generada por el conjunto de nodos que será más o menos fina según sea la separación entre los nodos o según el tamaño de los elementos.

Es importante que los elementos esten unidos por un nodo, si dos nodos estan ocupando la misma posicion pero no estan fundidos la comunicación no se comunicara de un nudo a otro dando como resultado errores en el analisis, fallas de lectura o el resultado final sea invalido

En la figura 92 se puede observar la generación de la malla en la estructura autoportante

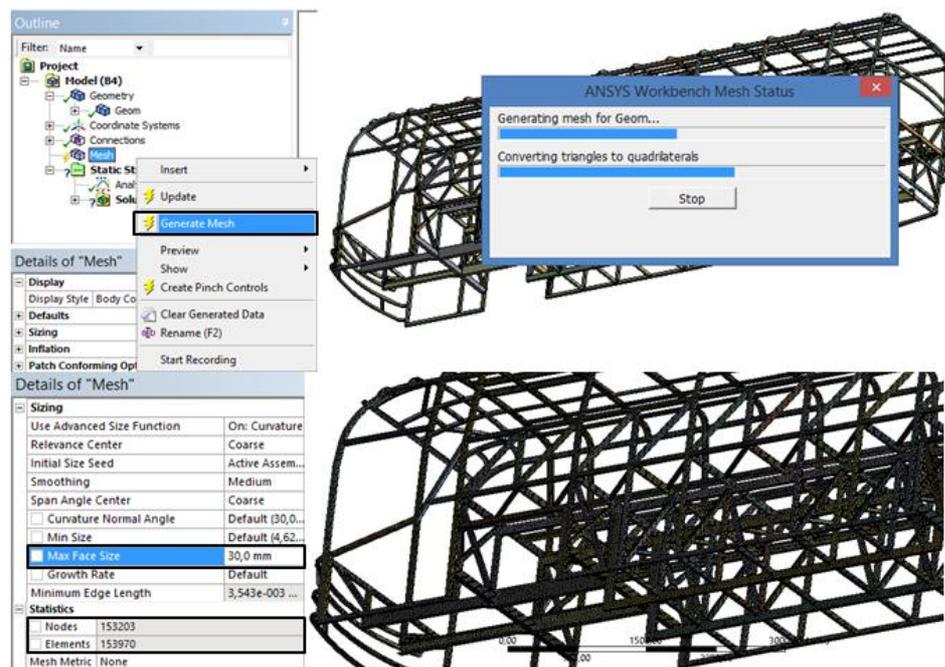


Figura 92 Mallado generado sobre la estructura autoportante)

4.3.4. Calidad de Mallado

La calidad de la malla tiene un papel fundamental en la precisión de los resultados.

Una vez concluido el proceso de mallado se obtuvieron 152742 nodos, 153577 elementos. Como se observa en la Figura 92

Para una malla sólida, la precisión numérica se logra mejor mediante una malla con elementos tetraédricos perfectos y uniformes cuyas aristas sean de igual longitud. Para una geometría general, no es posible crear una malla de elementos tetraédricos perfectos. Debido a las aristas pequeñas, la geometría curva, las operaciones lámina y las aristas vivas, algunos de los elementos generados pueden tener algunas aristas mucho más largas que otras. Cuando las aristas de un elemento tienen una notable diferencia en su longitud, la precisión de los resultados se ve perjudicada.

A. Criterio Jacobiano

“El criterio Jacobiano permite determinar la calidad de malla; este criterio calcula y prueba todos los elementos, excepto los triángulos y tetraedros. Un cuadrilátero tiene una relación Jacobiana de 1 si sus caras opuestas son todos paralelos entre sí. Cuando un nodo tiende a desplazarse desde una esquina hacia el centro del elemento de línea, la proporción sube el Jacobiano, lo que puede ocasionar con el tiempo que por cualquier movimiento adicional se rompa el elemento” (Esmeraldas, 2016).

Se considera que un radio Jacobiano de 40 o menos es aceptable. La figura 93 muestra el radio Jacobiano producido con un valor de 16, el cual está dentro del rango moderado considerando una buena calidad de malla.

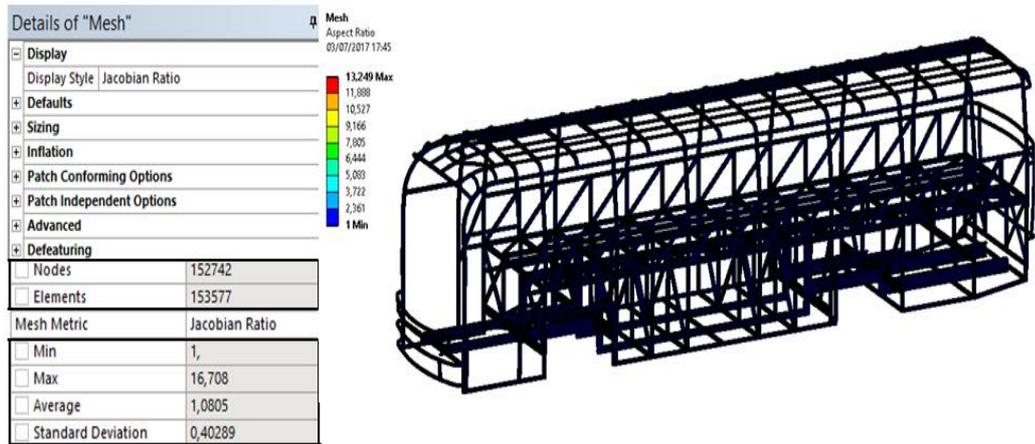


Figura 93 Calidad de malla según el Radio Jacobiano

En la Figura 94 se observa un gráfico estadístico del mallado de la carrocería de acuerdo al criterio del radio Jacobiano

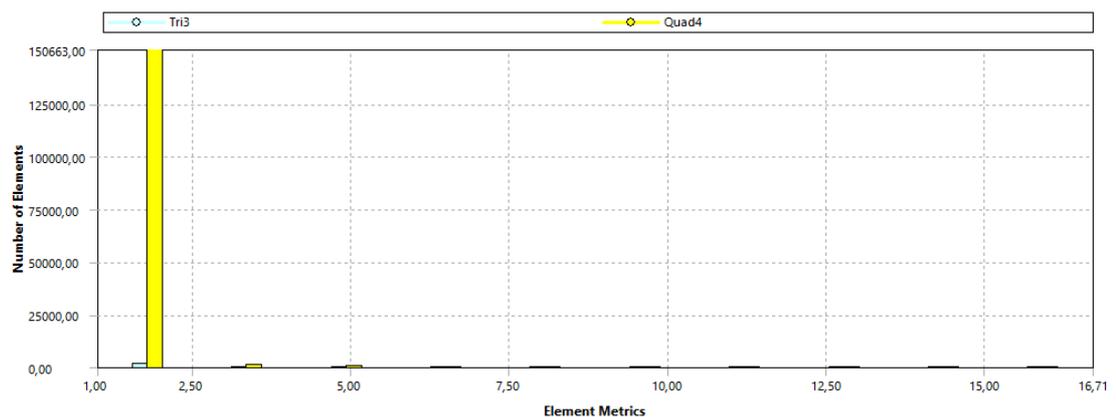


Figura 94 Gráfico estadístico del mallado de la carrocería de acuerdo al criterio del radio Jacobiano

B. Orthogonal Quality

El rango para la calidad ortogonal es de 0 a 1, donde un valor de 0 indica una inaceptable calidad de malla y un valor de 1 indica una excelente calidad de malla, se puede apreciar en la tabla 6 del Capítulo II.

La figura 95 muestra el Orthogonal Quality producido con un valor de 0.98315, el cual está dentro del rango moderado considerando una excelente calidad de malla.

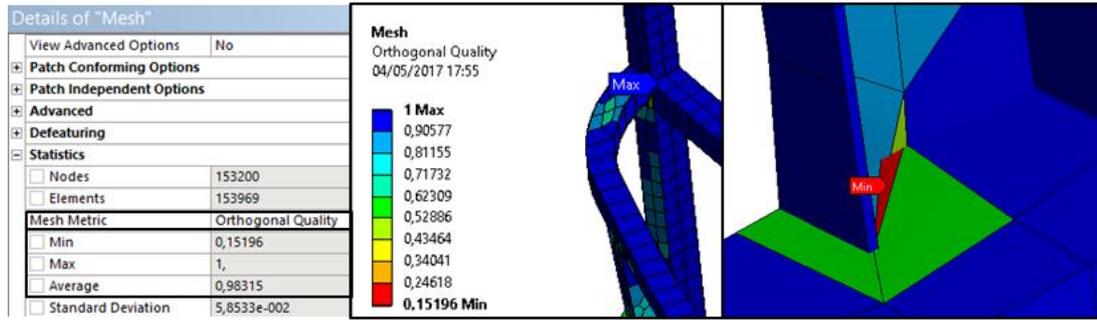


Figura 95 Mallado de la carrocería de acuerdo al criterio de Calidad Ortogonal

En la Figura 96 se observa un gráfico estadístico del mallado de la carrocería de acuerdo al criterio de Calidad Ortogonal.

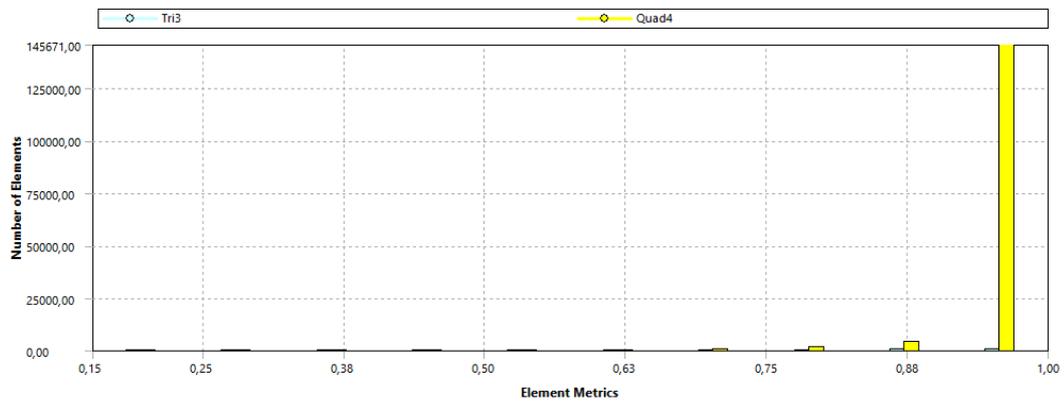


Figura 96 Gráfico estadístico del mallado de la carrocería de acuerdo al criterio de Calidad Ortogonal

C. Skewness

El rango para la calidad asimétrica es de 0 a 1, donde un valor de 0 indica una excelente calidad de malla y un valor de 1 indica una inaceptable calidad de malla, se puede apreciar en la tabla 6 del Capítulo II

La figura 97 muestra la calidad Sknewness producido con un valor de 0.06685, el cual está dentro del rango moderado considerando una excelente calidad de malla

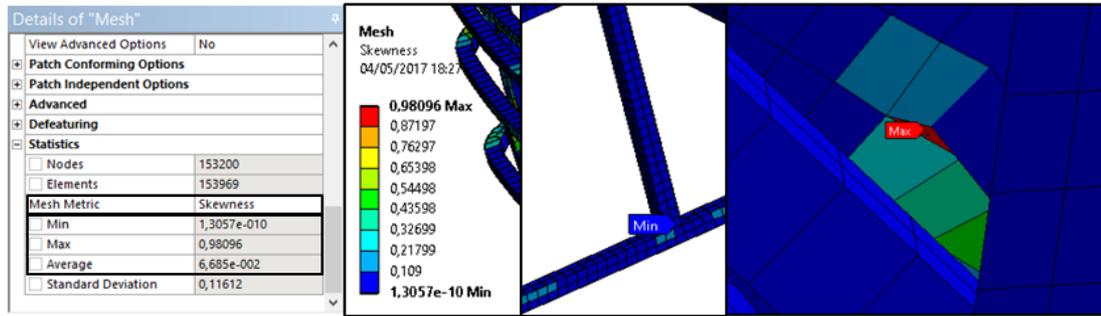


Figura 97 Mallado de la carrocería de acuerdo al criterio de Calidad Skewness

En la Figura 98 se observa un gráfico estadístico del mallado de la carrocería de acuerdo al criterio de Calidad Skewness.

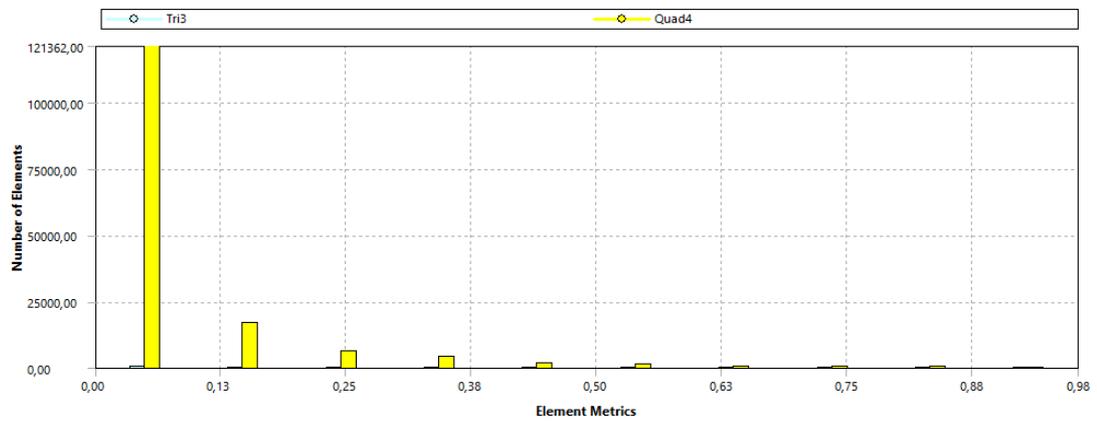


Figura 98 Gráfico estadístico del mallado de la carrocería de acuerdo al criterio de Calidad Skewness

4.3.5. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera representan las restricciones que se van a colocar sobre la estructura, realizando en modelo entre las conexiones de elementos que no restrinja deformaciones que no ocurrirían en la vida real.

Para los análisis cuasi-estáticos, las condiciones de borde se cumplen con lo solicitado en la Normativa (INEN 1323, 2009):

- “Combinaciones de Carga solicitada según método LFRD (Load resistance factor design) y/o método ASD (Allowable strength design)

NTE (INEN 1323, 2009) numeral 5.1.2.2 y numeral 5.1.1.1 respectivamente”.

“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)” (INEN 1323, 2009).

A. Asignación de soportes en la estructura

La estructura de la carrocería está unida a los anclajes del chasis (Figura 99) mediante soldadura, por lo que forman una sola unidad estructural observándose que la unión no presenta grados de libertad, por lo que aproximara como un empotramiento o soporte fijo a la suspensión.

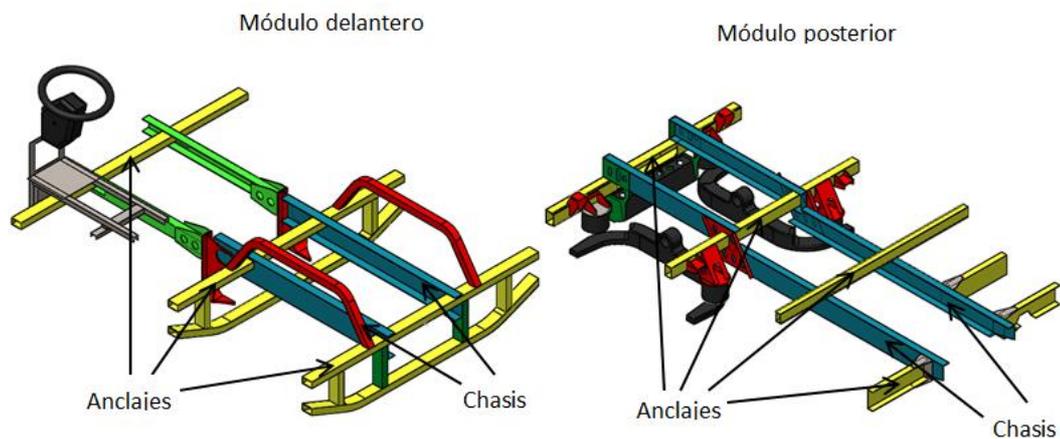


Figura 99 Anclajes del chasis autoportante

Los soportes fijos son aplicados en el chasis, en los puntos especificados en la figura 100, con la finalidad de que al momento de realizar el análisis dinámico la estructura de la carrocería autoportante no se separe del chasis.

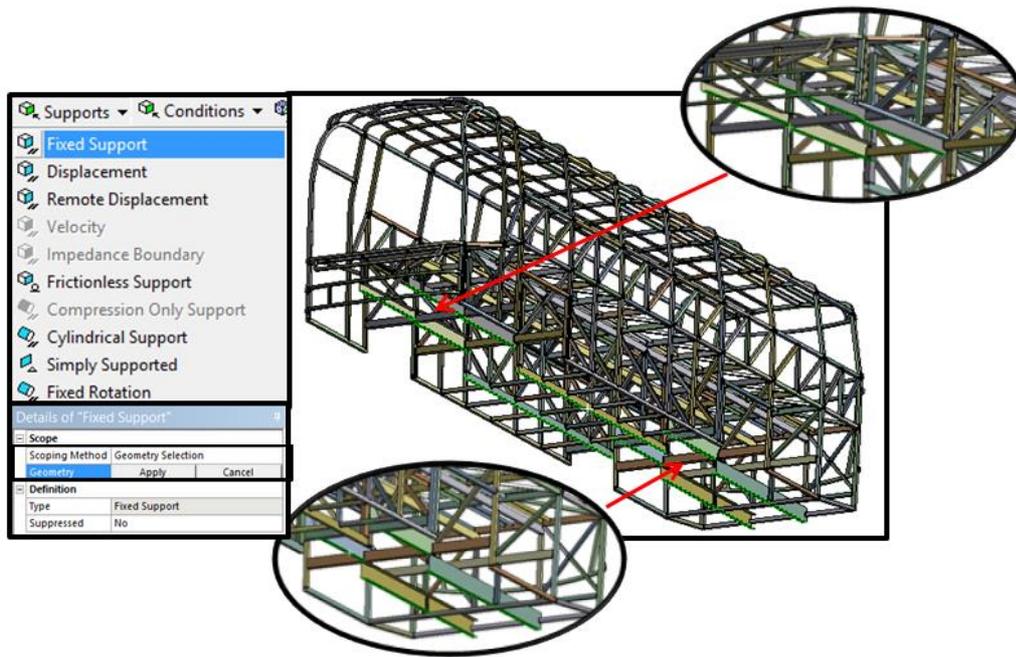


Figura 100 Aplicación de los soportes fijos en la estructura autoportante

B. Asignación de fuerza de Gravedad

La fuerza de gravedad es la fuerza de atracción hacia el centro de la Tierra la cual todo cuerpo posee, por lo tanto es indispensable asignarla en la estructura autoportante con el fin de que los análisis efectuados salgan lo más parecido posible a la realidad.

En la figura 101 se observa la dirección a la cual se dirige la gravedad en la estructura autoportante

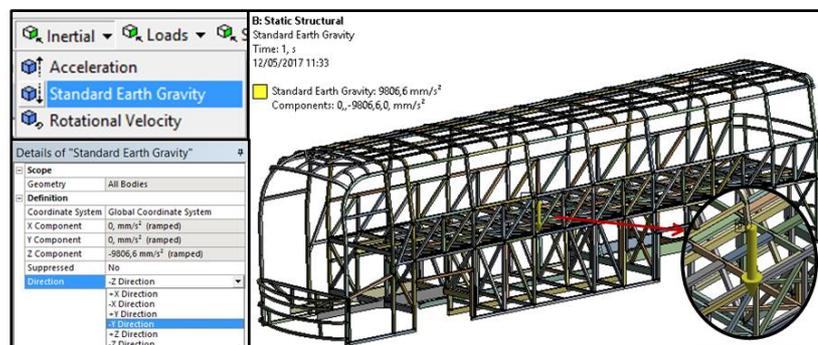


Figura 101 Aplicación de la fuerza de gravedad en la estructura autoportante

4.3.6. Establecimiento y simulación de cargas actuantes

4.3.7. Cargas constantes

Las cargas constantes vienen dadas por el peso propio de la estructura y las cargas muertas que soporta.

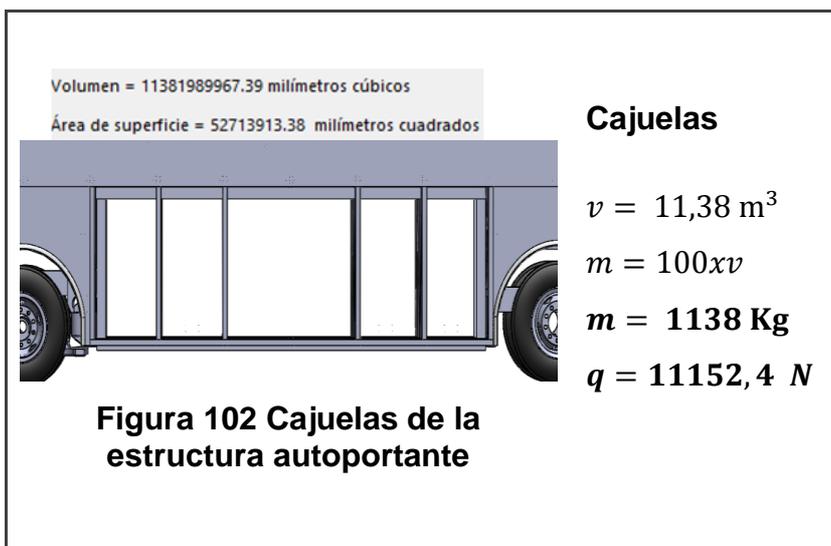
“Las cargas constantes son aquellas cuya magnitud permanece invariable en el tiempo del cual se realiza el análisis estructural. Son conocidas como cargas muertas. Dentro de este grupo de cargas, se considerará el aporte de todos los elementos que son indispensables para su funcionamiento al peso total. A continuación se establecen las masas y cargas consideradas”: (Cepeda, 2006)

A. Carga de cajuelas

“Es debida al equipaje, es una carga uniformemente distribuida en el compartimiento de equipajes, se establece en kilogramos (kg) en función de la capacidad volumétrica del mismo como $100 \cdot V$, donde V es el volumen de la cajuela en m^3 ”. (Cepeda, 2006)

Tabla 17

Carga de cajuelas

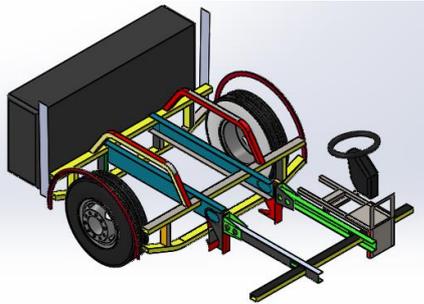
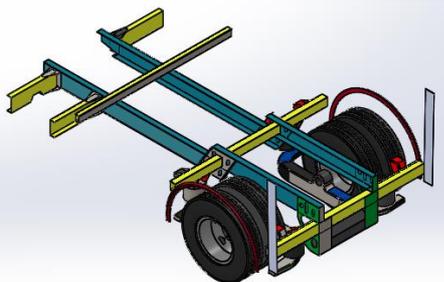


A continuación se detallan las cargas muertas consideradas para la simulación:

B. Masa y Carga del chasis

Tabla 18

Masa de chasis Mercedes Benz O500R 1830

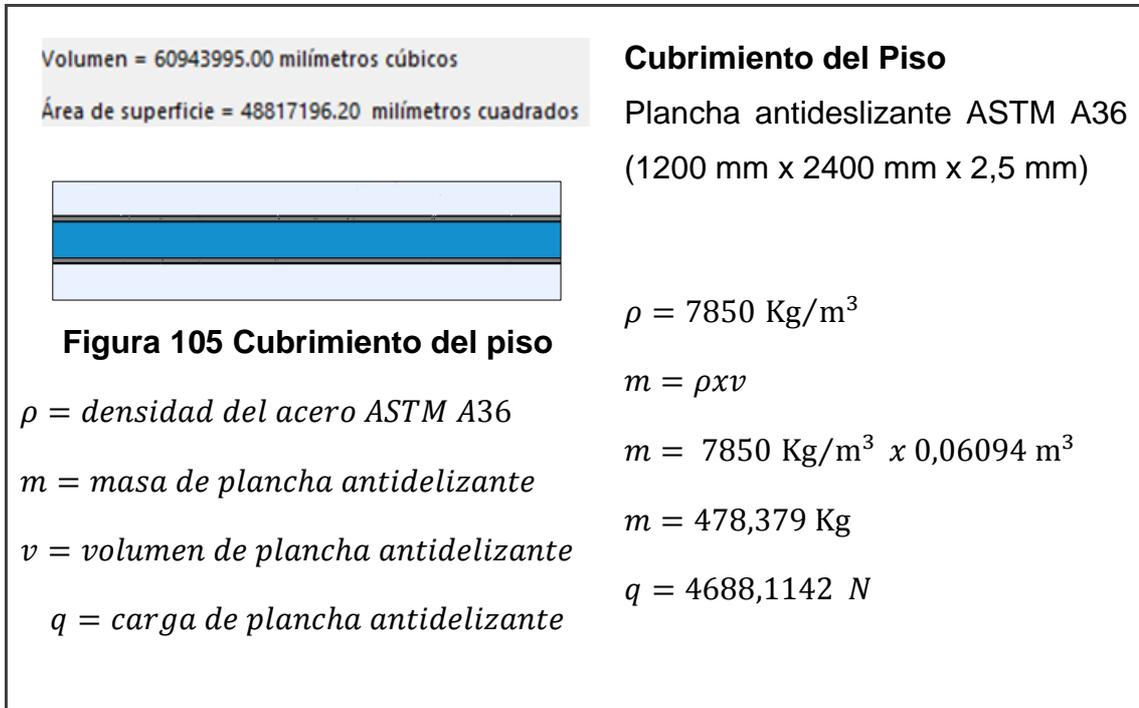
	<p>Módulo delantero</p>
	<p>$m = 1\,294 \text{ Kg}$</p>
	<p>$q = 12\,681,2 \text{ N}$</p>
<p>Figura 103 Módulo delantero del chasis Mercedes Benz O500R</p>	
	<p>Módulo trasero</p>
	<p>$m = 4\,572 \text{ Kg}$</p>
	<p>$q = 44\,805,6 \text{ N}$</p>
<p>Figura 104 Módulo posterior del chasis Mercedes Benz O500R</p>	
<p>Masa total chasis</p>	<p>$m = 5\,866 \text{ Kg}$</p>
<p>Carga total</p>	<p>$q = 57\,486,8 \text{ N}$</p>

Fuente: (Mercedes Benz, 2016)

C. Masa y carga de la estructura autoportante

Tabla 19

Masa y carga de la estructura autoportante



CONTINÚA 

Volumen = 22149287.91 milímetros cúbicos

Área de superficie = 49247364.11 milímetros cuadrados



Figura 106 Cubrimiento del techo

Cubrimiento del techo

Plancha Galvanizada ASTM A653
(1220 mm x 2120 mm x 0,9 mm)

$$\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$$

$$m = \rho x v$$

$$m = 7850 \text{ Kg/m}^3 \times 0,02215 \text{ m}^3$$

$$m = 173,8775 \text{ Kg}$$

$$q = 1703,9995 \text{ N}$$

Volumen = 36462481.11 milímetros cúbicos

Área de superficie = 45648279.94 milímetros cuadrados



Figura 107 Cubrimiento lateral izquierdo

Cubrimiento lateral

Plancha de acero ASTM A36
(Rollo x 1220 mm x 1 mm)

$$\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$$

$$m = \rho x v$$

$$m = 7850 \text{ Kg/m}^3 \times 0,03646 \text{ m}^3$$

$$m = 286,211 \text{ Kg}$$

$$q = 2804,8678 \text{ N}$$

CONTINUÍA 

Volumen = 24185303.79 milímetros cúbicos
 Área de superficie = 43754268.58 milímetros cuadrados



Figura 108 Cubrimiento lateral derecho

Cubrimiento lateral

Plancha de acero ASTM A36
 (Rollo x 1220 mm x 1 mm)

$$\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$$

$$m = \rho x v$$

$$m = 7850 \text{ Kg/m}^3 \times 0,02418 \text{ m}^3$$

$$m = 189,813 \text{ Kg}$$

$$q = 1860,1674 \text{ N}$$

Volume	3,0776e+008 mm ³
Mass	2415,9 kg

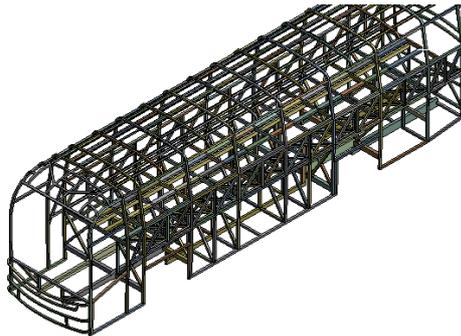


Figura 109 Masa de la estructura autoportante

Estructura

Estruct. Frontal: $m = 91,944 \text{ Kg}$

Estruct. Posterior: $m = 61,96 \text{ Kg}$

Estruct. laterales: $m = 427,24 \text{ Kg}$

Estruct. del Techo: $m = 511,46 \text{ Kg}$

Estruct. del piso: $m = 408,32 \text{ Kg}$

Estruct. de plataf.: $m = 664,67 \text{ Kg}$

Masa Total $m = 2415,9 \text{ Kg}$

Carga Total $q = 23675,82 \text{ N}$

D. Masa y carga de vidrios

Tabla 20

Obtención de la densidad de vidrios y parabrisas utilizados en carrocerías M&L

Obtención densidad vidrio	Datos
$v = l a x l b x e$ <p>Ecuación 14 Volumen</p> $v = 1,318 \text{ m} \times 0,513 \text{ m} \times 0,005 \text{ m}$ $v = 0,003 \text{ m}^3$	$m = 8,45 \text{ Kg}$ $l a = 1318 \text{ mm}$ $l b = 513 \text{ mm}$ $e = 5 \text{ mm}$
$\rho = \frac{m}{v}$ <p>Ecuación 15 Densidad</p> $\rho = \frac{8,45 \text{ Kg}}{0,003 \text{ m}^3}$ $\rho = 2816,667 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$	$m = \text{masa del vidrio}$ $v = \text{volumen del vidrio}$ $l a, l b = \text{dimensiones del vidrio}$ $e = \text{espesor del vidrio}$ $\rho = \text{densidad del vidrio}$

Tabla 21

Calculo de masa y carga de parabrisas y vidrio de la carrocería autoportante

Propiedades Físicas obtenidas en SolidWorks	Masa Calculada del vidrio

CONTINÚA 

Volumen = 30261547.38 milímetros cúbicos

Área de superficie = 11927161.70 milímetros cuadrados

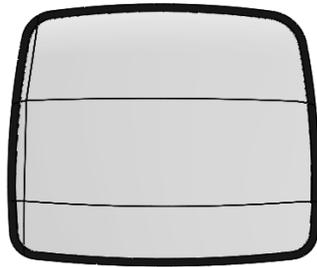


Figura 110 Parabrisas delantero

Parabrisas delantero

$$m = \rho x v$$

$$m = 2816,667 \frac{Kg}{m^3} \times 0,0303 m^3$$

$$m = 85,345 Kg$$

$$q = 836,38 N$$

Volumen = 11150944.70 milímetros cúbicos

Área de superficie = 4499034.11 milímetros cuadrados



Figura 111 Parabrisas posterior

Vidrio posterior

$$m = \rho x v$$

$$m = 2816,667 \frac{Kg}{m^3} \times 0,0112 m^3$$

$$m = 31,546 Kg$$

$$q = 309,1508 N$$

Volumen = 62346648.51 milímetros cúbicos

Área de superficie = 24347959.13 milímetros cuadrados

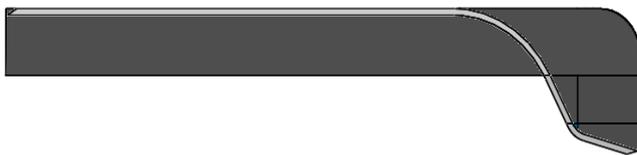


Figura 112 Vidrios laterales derecho

Ventanas laterales

$$m = \rho x v$$

$$m = 2816,667 \frac{Kg}{m^3} \times 0,06234 m^3$$

$$m = 175,5910 Kg$$

$$q = 1720,792 N$$

CONTINÚA 

<p>Volumen = 70209435.40 milímetros cúbicos</p> <p>Área de superficie = 27499362.66 milímetros cuadrados</p>  <p>Figura 113 Vidrios laterales izquierdo</p>	<p>Ventanas laterales</p> $m = \rho x v$ $m = 2816,667 \frac{Kg}{m^3} x 0,0702 m^3$ $m = 197,731 Kg$ $q = 1937,7542 N$
Masa Total vidrios	$m = 417,4303 Kg$
Carga Total	$q = 4090,816 N$

E. Masa y carga de fibra de Vidrio

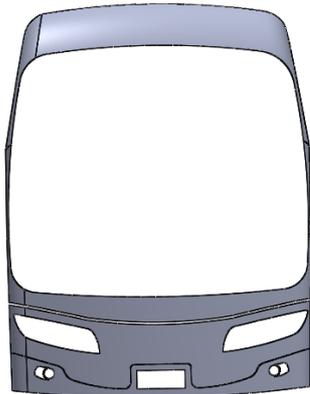
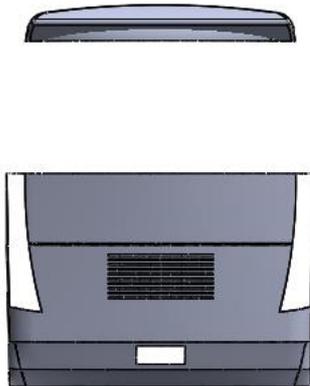
Tabla 22

Obtención de la densidad de fibra de vidrio tomado en probeta de 20mm x 20 mm x en carrocerías M&L

Obtención densidad fibra de vidrio	Datos tomados de probeta de fibra de vidrio
$v = l a x l b x e$	$m = 0,155 Kg$
$v = 0,28 m x 0,38 m x 0,002m$	$l a = 280 mm$
$v = 0,0002 m^3$	$l b = 380 mm$
$\rho = \frac{m}{v}$	$e = 2 mm$
$\rho = \frac{0,155 Kg}{0,0002 m^3}$	$m = masa de la probeta$
$\rho = 775 \frac{Kg}{m^3}$	$v = volumen de la probeta$
	$l a, l b = dimensiones de la probeta$
	$e = espesor de la probeta$
	$\rho = densidad de la fibra de vidrio$

Tabla 23

Masa de fibra de vidrio utilizado en la parte frontal y posterior de la estructura autoportante

Elemento	Masa calculada
<p>Volumen = 48108940.54 milímetros cúbicos Área de superficie = 10032539.50 milímetros cuadrados</p>  <p>Figura 114 Fibra de vidrio delantero</p>	<p>Fibra de vidrio delantera</p> $m = \rho x v$ $m = 775 \frac{Kg}{m^3} x 0,0481 m^3$ $m = 37,27 Kg$ $q = 365,319 N$
<p>Volumen = 56082042.46 milímetros cúbicos Área de superficie = 11302268.89 milímetros cuadrados</p>  <p>Figura 115 Fibra de vidrio posterior</p>	<p>Fibra de vidrio posterior</p> $m = \rho x v$ $m = 775 \frac{Kg}{m^3} x 0,056 m^3$ $m = 43,4 Kg$ $q = 425,32 N$
<p>Masa Total fibra de vidrio</p>	<p>$m = 80,67 Kg$</p>
<p>Carga Total</p>	<p>$q = 790,566 N$</p>

F. Masa y carga de los asientos

Tabla 24

Masa y carga de los asientos del conductor tripulante y pasajeros del bus autoportante

 <p>Figura 116 Asiento conductor</p>	<p>Asiento del conductor</p> <p>$m = 34,93 \text{ Kg}$</p> <p>$q = 342,314 \text{ N}$</p>
 <p>Figura 117 Asientos Pasajeros</p>	<p>Asiento de pasajeros</p> <p>Total pasajeros: 44</p> <p>Total acompañantes: 1</p> <p>$m = 30,2 \text{ Kg}$</p> <p>$q = 295,96 \text{ N}$</p>
<p>Masa Total asientos</p>	<p>$m = 1393,93 \text{ Kg}$</p>
<p>Carga Total</p>	<p>$q = 13660,514 \text{ N}$</p>

CAPITULO V

5. METODOLOGÍA DE LA SIMULACIÓN, ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y MODELADO

5.1. Cargas necesarias para el funcionamiento de la unidad.

Tabla 25

Cargas necesarias para el funcionamiento de la unidad.

ITEM	VALOR (Kg)	VALOR (N)
Chasis	$m = 5866,000 \text{ Kg}$	$q = 57486,800 \text{ N}$
Estructura	$m = 2415,900 \text{ Kg}$	$q = 23675,820 \text{ N}$
Planchas de recubrimiento	$m = 1128,285 \text{ Kg}$	$q = 11057,148 \text{ N}$
Parabrisas y Vidrios de Seguridad	$m = 417,430 \text{ Kg}$	$q = 4090,816 \text{ N}$
Fibra de Vidrio	$m = 80,670 \text{ Kg}$	$q = 790,566 \text{ N}$
Asientos	$m = 1393,930 \text{ Kg}$	$q = 13660,514 \text{ N}$
Cajuelas	$m = 1138,000 \text{ Kg}$	$q = 11152,400 \text{ N}$

El peso de la estructura es de 2415,9 (kg). El dato se obtuvo del modelo matemático donde se verificó el peso propio de la estructura (reacciones sin carga externa), de acuerdo al acero ASTM A36 y ASTM A 500 utilizado en el modelado.

También se consideran los pesos de los accesorios (que incluyen: TV, DVD, tubos del pasamano, radio) y el incremento en el peso del acero estructural debido a la soldadura en un 5%, así como también se toma un incremento del 5% por los elementos que no han sido tomados, lo que resulta:

Masa de la estructura + 10% adicionales

$$m = 2415,9 \text{ kg} + 24,159 \text{ Kg}$$

$$m = 2440,059 \text{ Kg}$$

$$q = 23912,5782 \text{ N}$$

Posteriormente la carga muerta total es de:

$$m = 12464,374 \text{ Kg}$$

$$q = 122150,8252 \text{ N}$$

5.1.1. Cargas Dinámicas

A. Cargas vivas

Las cargas vivas constituyen el peso de pasajeros y tripulación. Se considera que, la unidad transporta 45 pasajeros sentados y 2 tripulantes. La tabla 26 muestra los valores de simulación:

Tabla 26

Cargas vivas analizadas

ÍTEM	VALOR (Kg)	VALOR (N)
Peso por pasajero	$m = 75 \text{ Kg}$	$q = 735 \text{ N}$
Peso conductor	$m = 75 \text{ Kg}$	$q = 735 \text{ N}$
Peso tripulante	$m = 75 \text{ Kg}$	$q = 735 \text{ N}$
TOTAL CARGAS VIVAS	$m = 3450 \text{ Kg}$	$q = 33810 \text{ N}$

B. Carga de Giro (G)

La carga de giro se calcula referente a La velocidad crítica que debe ser considerada de al menos 90 km/h y el radio de giro se establece en función de la tabla 4 “Velocidad del vehículo, Radio mínimo y Peralte en carreteras” obtenido de (INEN 1323, 2009) estudiada en el Capítulo II, en la cual se detalla lo siguiente:

<i>Velocidad del vehículo:</i>	$V = 100 \frac{Km}{h}$
<i>Radio de curvatura de la carretera:</i>	$R_c = 450 m$
<i>masa total de la carrocería autoportante:</i>	$M_T = 15914,374 Kg$

Reemplazando en la ecuación de carga de Giro:

$$G = M_T \cdot \frac{\left(\frac{V}{3,6}\right)^2}{R_c}$$

Ecuación 16 Carga de giro

$$G = 15914,374 (Kg) \cdot \frac{\left(\frac{100 \frac{Km}{h}}{3,6}\right)^2}{450 m}$$

$$G = 27288,021 N$$

C. Carga de Frenado (F)

Para el cálculo de la carga de frenado establece una desaceleración mayor o igual a $af = -4 m/s^2$

$$F = M_T \cdot af$$

Ecuación 17 Carga de frenado

$$F = 15914,374 (Kg) \cdot (4 m/s^2)$$

$$F = 63657,496 N$$

D. Carga de aceleración brusca (A_b)

La carga de aceleración brusca es calculada de acuerdo al criterio de la carga de frenado pero en sentido contrario

$$A_b = - 63657,496 N$$

E. Carga por resistencia al aire frontal (R_{af})

La fuerza aerodinámica de resistencia al avance en función de la forma, tamaño y velocidad del vehículo. La fuerza de resistencia al avance se define con la siguiente ecuación:

$$R_{af} = \frac{1}{2} C_x \cdot \rho \cdot A_f \cdot V^2$$

Ecuación 18 Carga por resistencia al aire frontal

dónde:

R_{af} : Carga por resistencia aerodinámica (N).

C_x : Es el coeficiente de resistencia al avance, adimensional

ρ : Representa la densidad del aire en el lugar donde el vehículo presta servicio, (kg/m³)

V : Es la velocidad de traslación del vehículo, (km/h).

A_f : Representa el área proyectada frontal de la carrocería, en sección transversal, (m²)

Coeficiente de resistencia aerodinámica al avance para vehículos y autobuses.

El coeficiente de resistencia aerodinámica al avance es la resistencia que ofrece un cuerpo en el momento en que se mueve dentro de un fluido por razón de su forma. Los vehículos actuales tienen coeficientes de resistencia de 0.30 a 0.55. La tabla a continuación muestra los valores de éstos para vehículos y autobuses. Para análisis detallados de la resistencia al aire de automóviles y buses se utilizan prueba en túneles de viento.

Tabla 27

Coeficiente de resistencia aerodinámica al avance para vehículos y autobuses.

Vehículo	Tipo	C_D
Automóvil	De carrera	0,17
	Aerodinámica	0,23

CONTINUÍA 

	Convencional	0,52
Camión	Convencional	0,60
Autobús	Convencional	0,70

Fuente: Manual Marks del Ingeniero Mecánico.

Densidad del aire

El valor de la densidad del aire varía con la altitud del lugar de prueba. A nivel del mar la densidad del aire es $\rho_0 = 1,225 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$, con una presión atmosférica $P_0 = 760 \text{ mmHg}$.

La siguiente tabla muestra valores de atmósfera estándar:

Tabla 28

Valores de la densidad del aire

ALTITUD		RELACIÓN PRESIÓN $\left(\frac{P}{P_0}\right)$	RELACIÓN DENSIDAD $\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)$
(pies)	(m)		
0	0	1,0000	1,0000
5000	1524	0,8320	0,8617
10000	3048	0,6870	0,7385
15000	4572	0,5643	0,6292

Fuente: (Cepeda, 2006)

Para el análisis se debe tomar en cuenta las condiciones más desfavorables que tendría que soportar la carrocería en el Ecuador, por lo tanto se compara la densidad sobre el nivel del mar y la densidad equivalente a los 2850 m de altura de Quito.

Por lo tanto se debe interpolar los datos de la tabla anterior.

$$\rho = 0,8617 + (2850 - 1524) \frac{(0,7385 - 0,8617)}{(3048 - 1524)}$$

$$\rho = 0,7545$$

la densidad del aire para la ciudad de Quito es de

$$\rho = 0,7545 \times 1,225 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$$

$$\rho = 0,9242 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$$

Para determinar una carga por resistencia de viento que simule las condiciones más desfavorables, se tomará la densidad a nivel del mar resultando tener mayor oposición al movimiento, se tomará como densidad del aire el valor al nivel del mar ($\rho = 1,225 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$), porque presenta mayor oposición al movimiento.

Velocidad y área proyectada frontal de la carrocería autoportante

La realidad es que los conductores de buses en el Ecuador no respetan la velocidad establecida que es de 90 Km/h , por lo tanto para el análisis se considera una velocidad de 100 Km/h.

El área frontal proyectada de la carrocería fue tomada del diseño modelado el cual nos dio como resultado $A = 7,976 m^2$.

Con los datos obtenidos reemplazamos en la ecuación 18 para obtener la carga de resistencia del viento:

$$R_{af} = \frac{1}{2} C_x \cdot \rho \cdot A_f V^2$$

$$R_{af} = \frac{1}{2} \cdot (0,7) \cdot \left(1,225 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)\right) \cdot 7,976 (m^2) \cdot \left(27,77 \frac{m}{s}\right)^2$$

$$\mathbf{R_{af} = 2638,665 N}$$

5.1.2. Aplicación de Cargas

A continuación se muestran las cargas actuantes en la estructura autoportante:

Tabla 29

Cargas que actúan en el análisis de la estructura

TIPO DE CARGA	VALOR
Carga muerta (M)	$M = 122150,825 \text{ N}$
Carga Viva (V)	$V = 33810 \text{ N}$
Carga de giro (G)	$G = 27288,021 \text{ N}$
Carga de Frenado (F)	$F = 63657,496 \text{ N}$
Carga de aceleración brusca (Ab)	$A_b = 63657,496 \text{ N}$
Carga de resistencia aerodinámica (Raf)	$R_{af} = 2638,665 \text{ N}$

Las cargas estáticas y dinámicas se asignan a la carrocería autoportante de acuerdo a las especificaciones de la Normativa NTE INEN 1323:2009. En la tabla 30 se observa la asignación de las cargas estáticas sobre la estructura del bus autoportante las cuales se encuentran distribuidas uniformemente como lo especifica la normativa INEN 1323:2009.

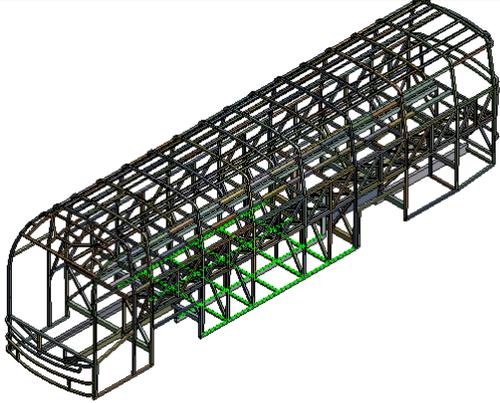
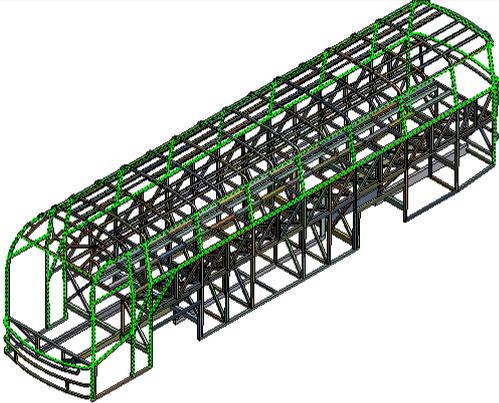
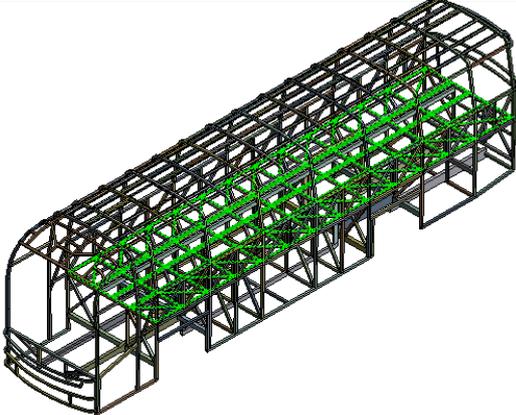
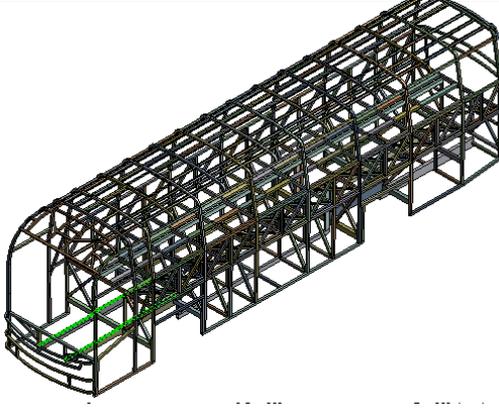
Tabla 30

Asignación de cargas estáticas y dinámicas

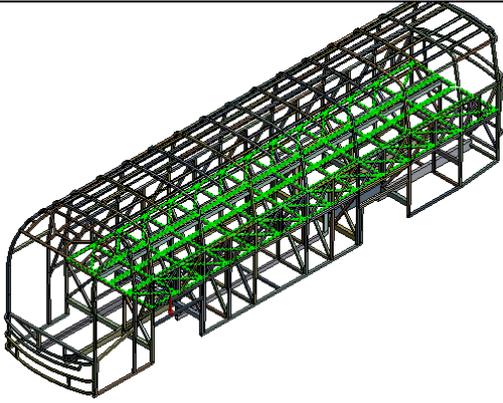
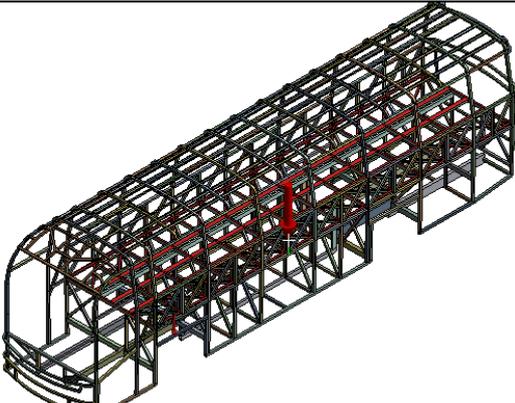
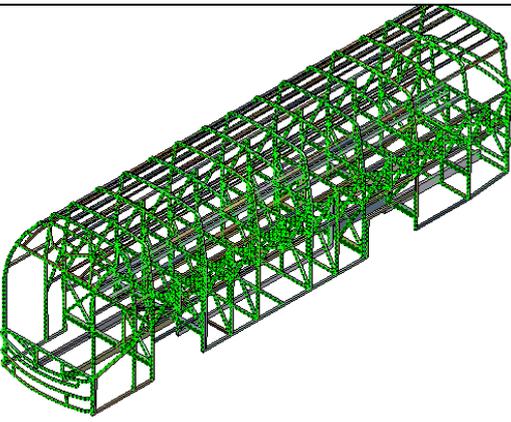
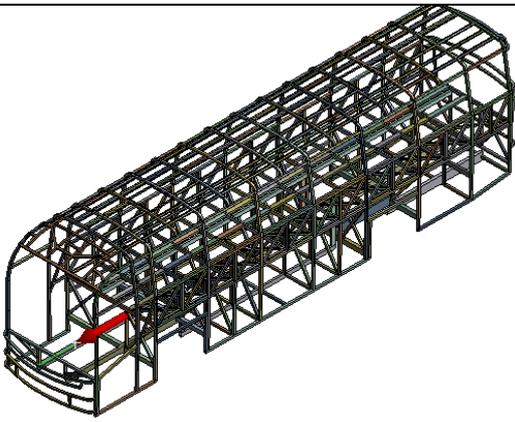
Carga Muerta	
a) Carga cajuelas	b) Carga vidrios

CONTINÚA

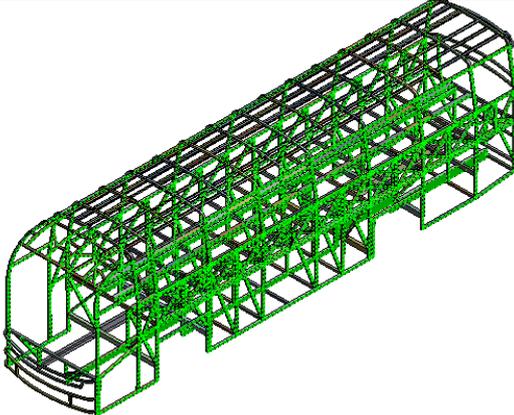
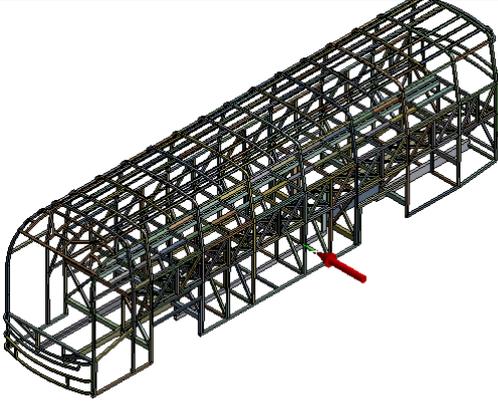
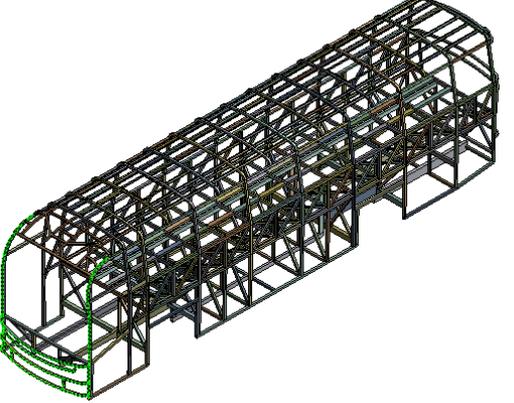
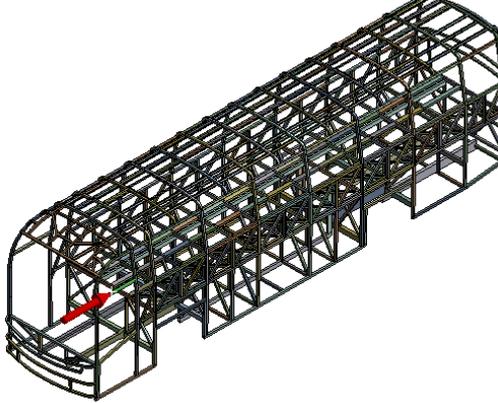


 <p>Figura 118 Asignación de cargas muertas sobre las cajuelas de la carrocería</p>	 <p>Figura 119 Asignación de cargas muertas sobre los perfiles de contorno de vidrios en la carrocería</p>
<p>c) carga asientos</p>	<p>d) Carga chasis</p>
 <p>Figura 120 Asignación de cargas muertas sobre el piso de la carrocería</p>	 <p>Figura 121 Asignación de cargas muertas sobre el chasis</p>
<p>Cargas Vivas</p>	
<p>Selección de elementos</p>	<p>Selección de dirección</p>

CONTINÚA 

	
<p>Figura 122 Asignación de cargas vivas sobre el piso de la carrocería</p>	<p>Figura 123 Selección de dirección de carga sobre la carrocería</p>
<p>Carga de aceleración brusca</p>	
<p>Selección de elementos</p>	<p>Selección de dirección</p>
	
<p>Figura 124 Asignación de cargas de aceleración brusca sobre las perfiles de la carrocería</p>	<p>Figura 125 Selección de dirección de aceleración brusca sobre la carrocería</p>
<p>Carga de giro</p>	
<p>Selección de elementos</p>	<p>Selección de dirección</p>

CONTINÚA 

	
<p>Figura 126 Asignación de cargas de giro sobre los perfiles de la carrocería</p>	<p>Figura 127 Selección de dirección de cargas de giro sobre la carrocería</p>
<p>Carga de resistencia al aire frontal</p>	
<p>Selección de elementos</p>	<p>Selección de dirección</p>
	
<p>Figura 128 Asignación de cargas por resistencia al aire frontal sobre los perfiles de la carrocería</p>	<p>Figura 129 Selección de dirección de carga por resistencia al aire frontal sobre la carrocería</p>
<p>Carga de frenado</p>	
<p>Selección de elementos</p>	<p>Selección de dirección</p>

CONTINÚA 

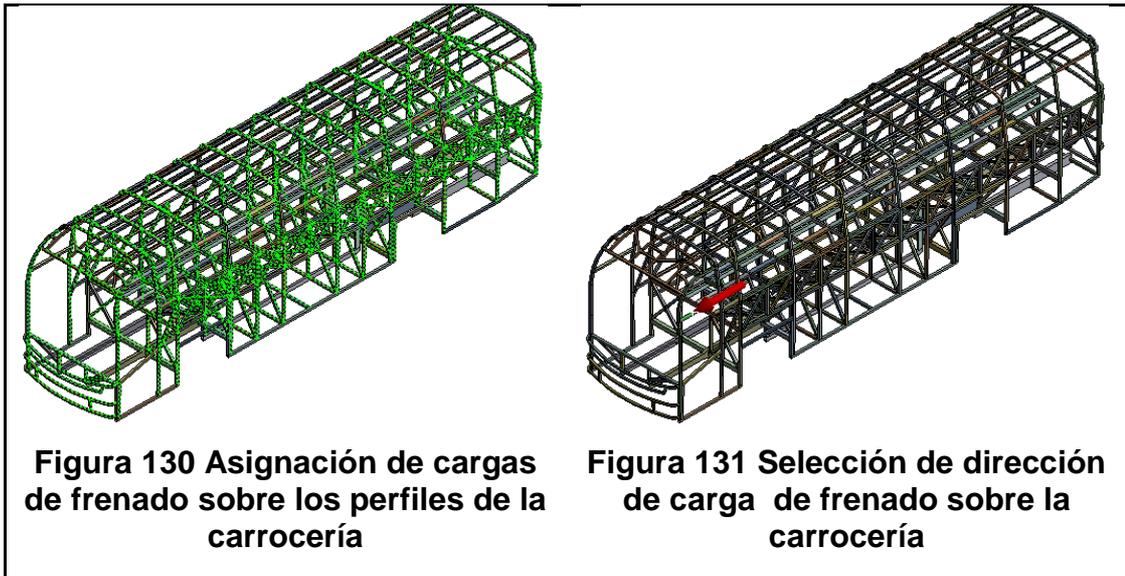


Figura 130 Asignación de cargas de frenado sobre los perfiles de la carrocería

Figura 131 Selección de dirección de carga de frenado sobre la carrocería

5.2. Resultados obtenidos en base a las combinaciones de cargas según la Norma NTE INEN 1323:2009

Los resultados que se presentan a continuación están basados en el análisis que permite determinar la validación de la estructura.

La Norma NTE (INEN 1323, 2009) establece que: “para el análisis de la estructura de la carrocería autoportante se aplican cargas estáticas y dinámicas en base a combinaciones de carga LRFD”.

En la Tabla 31 se muestra la combinación y los valores de cargas para el análisis.

Tabla 31

Combinaciones de cargas recomendadas por AISC-LRFD

COMBINACIÓN	VALOR
1. $1,4M + V$	1. 204821,155 N
2. $1,2M + 1,6V + 0,5G$	2. 214321,005 N
3. $1,2M + 0,5V + 1,6G$	3. 207146,823 N
4. $1,2M + 1,6F + 0,8R_{af}$	4. 250543,915 N

CONTINÚA 

5. $1,2M + 0,5V + 0,5F + 1,3R_{af}$	5. 198745,002 N
6. $1,2M + 1,5A_b + 0,5V$	6. 258972,234 N
7. $0,9M - 1,3R_{af}$	7. 106505,478 N
8. $0,9M + 1,3R_{af}$	8. 113366,007 N

Las estructuras de las carrocerías deben ser diseñadas de tal manera que resistan los esfuerzos determinados. El método de diseño que se emplea para el análisis de la carrocería autoportante es el LRFD. A continuación se muestra las combinaciones de cargas del método empleado:

Combinación 1

Se aplica las cargas señaladas en la Normativa INEN 1323:2009, la combinación 1 tiene la configuración $1,4M+V$ con un valor de 204821,155 N

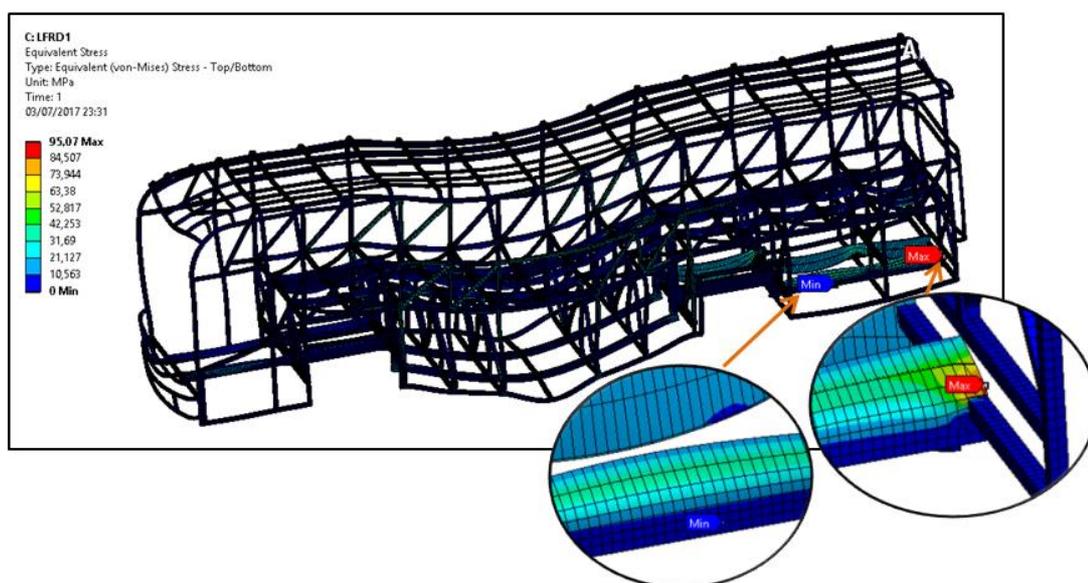


Figura 132 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 1 (Tensión equivalente – Von Mises)

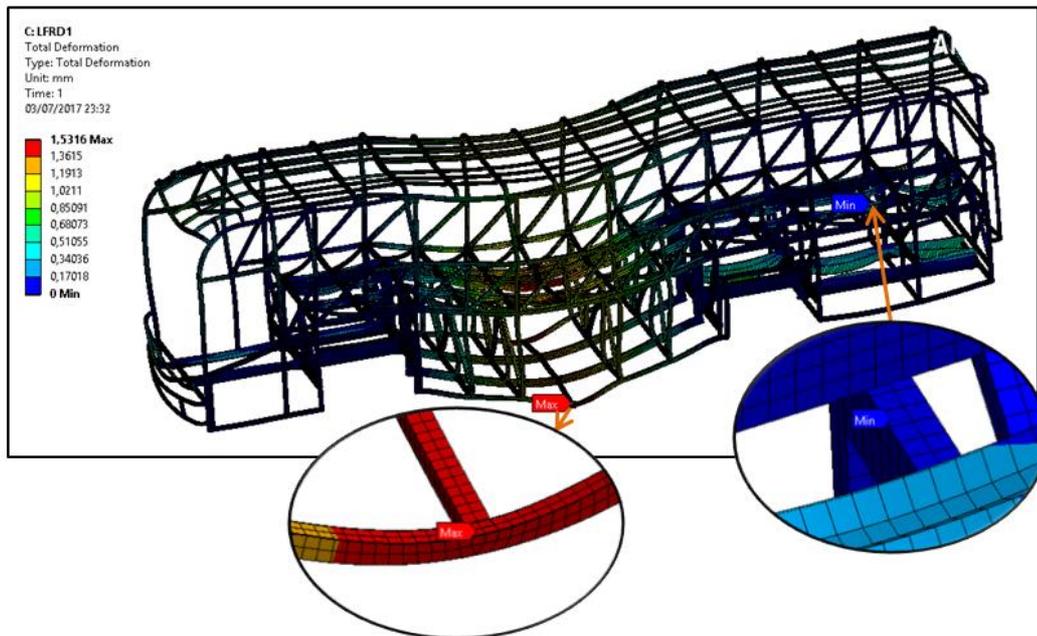


Figura 133 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 1 (deformación total)

Luego del análisis realizado a la carrocería autoportante aplicada la combinación 1 del método LRFD se obtiene los siguientes resultados:

- Existe una mayor carga en la parte posterior izquierda de la unión chasis – aleta (Figura 132)
- Aplicando la tensión equivalente por Von Mises existe una carga máxima de 95,07 Mpa. Muy por debajo en el límite de fluencia del acero A500 utilizado; $S_y = 320$ MPa (Figura 132)
- Los componentes del frente y posterior no presentan elementos comprometidos.
- Existe mayor deformación en el tejido de la bodega, parte central izquierda con 1,53 mm (Figura 133)
- El techo presenta deformaciones menores
- La menor deformación se produce en la parte posterior del lateral derecho (pórtico lateral) con 0 mm.
- La menor carga se produce en el módulo posterior, región M4 con 0 MPa

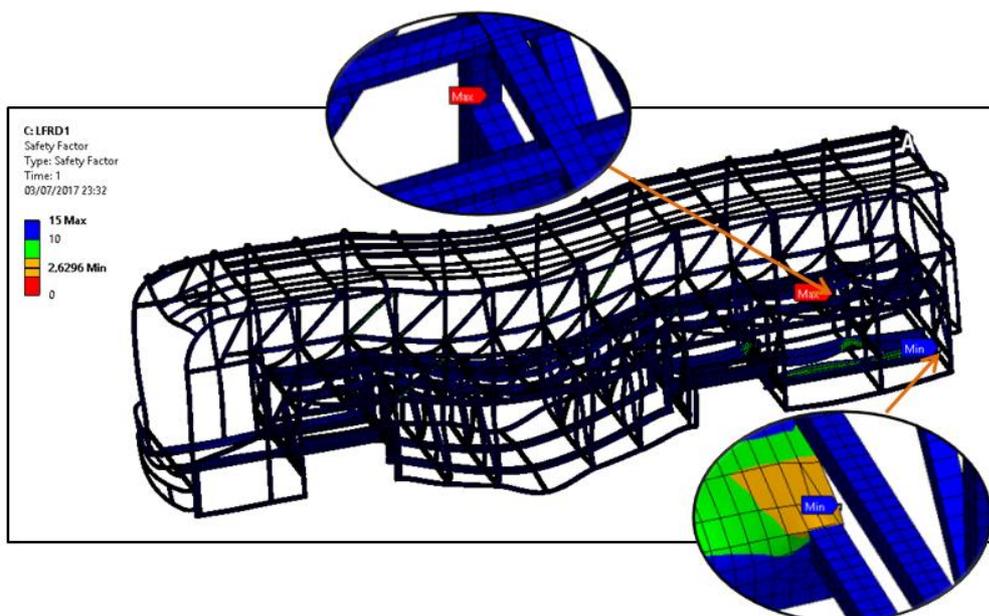


Figura 134 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 1 (factor de seguridad)

- El factor de seguridad de la carrocería autoportante aplicada la combinación 1 del método LRFD es de 2,6, considerándose aceptable para el modelado.

Combinación 2

Se aplica las cargas señaladas en la Normativa INEN 1323:2009, la combinación 2 tiene la configuración $1,2M+1,6V+0,5G$ con un valor de 214321,005 N

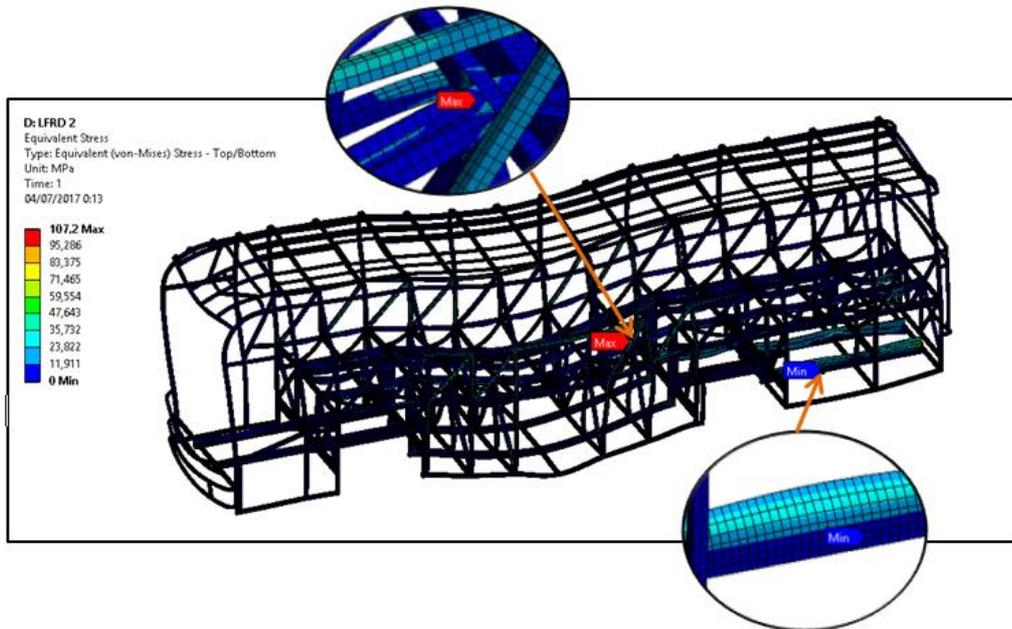


Figura 135 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 2 (Tensión equivalente – Von Mises)

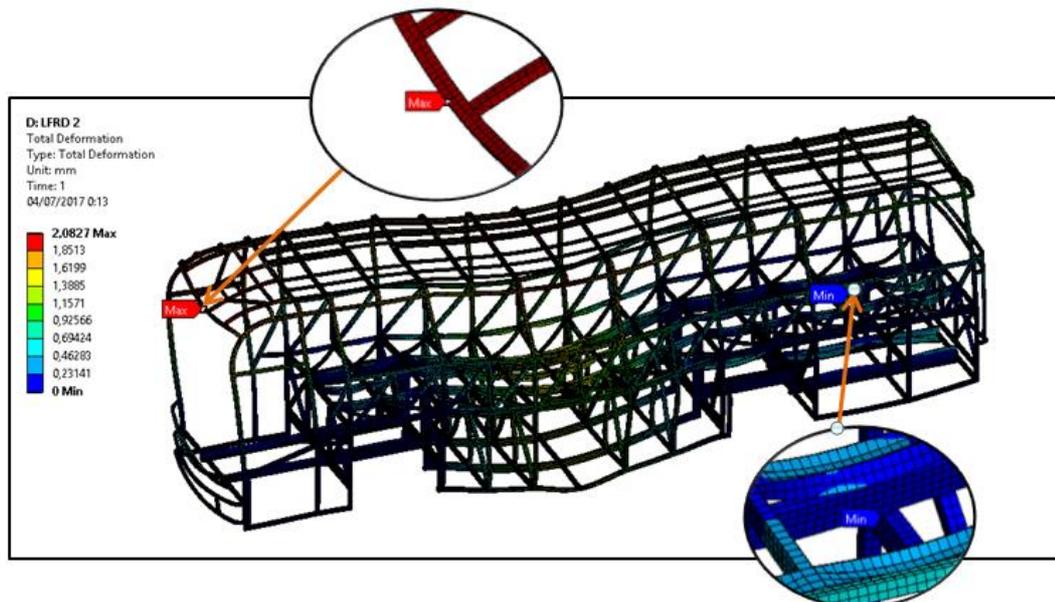


Figura 136 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 2 (deformación total)

Luego del análisis realizado a la carrocería autoportante aplicada la combinación 2 del método LRFD se obtiene los siguientes resultados:

- Existe una mayor carga en la parte central del refuerzo interno del tejido en el piso (Figura 135)

- Aplicando la tensión equivalente por Von Mises existe una carga máxima de 107,2 Mpa. Muy por debajo en el límite de fluencia del acero A36 utilizado; $S_y = 250$ MPa (Figura 135)
- Los elementos del frente y posterior no presenta elementos comprometidos.
- Existe mayor deformación en la parte frontal del techo con 2,08 mm (Figura 136)
- Los laterales presentan elementos comprometidos menores
- El techo presenta una deformación menor
- La menor deformación se produce en la parte posterior del lateral derecho (pórtico lateral) con 0 mm.
- La menor carga se produce en el módulo posterior, región M4 con 0 MPa

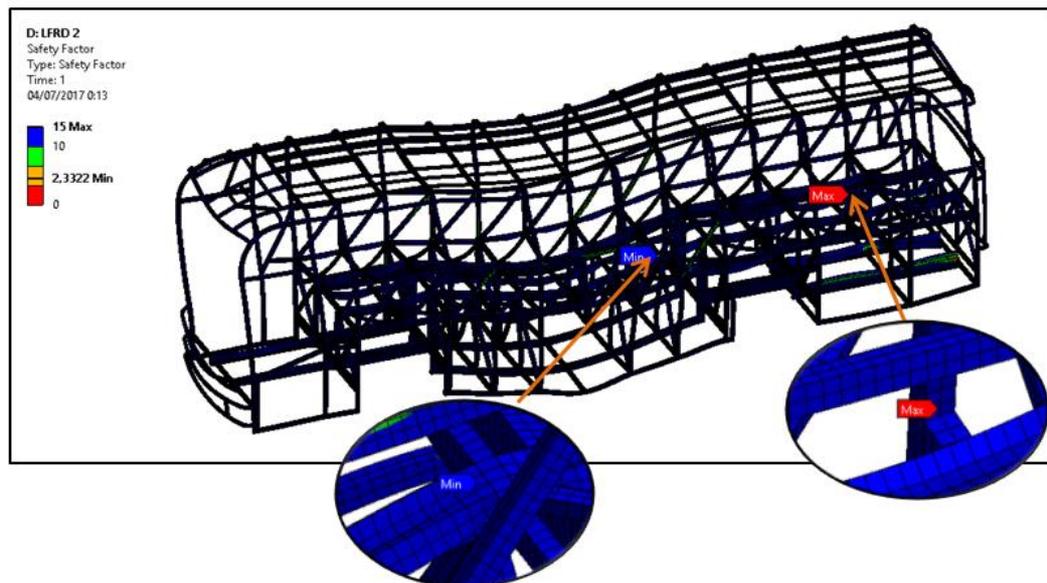


Figura 137 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 2 (factor de seguridad)

- El factor de seguridad de la carrocería autoportante aplicada la combinación 2 del método LRFD es de 2.3, considerándose aceptable para el modelado.

Combinación 3

Se aplica las cargas señaladas en la Normativa INEN 1323:2009, la combinación 3 tiene la configuración $1,2M+0,5V+1,6G$ con un valor de 207146,823 N

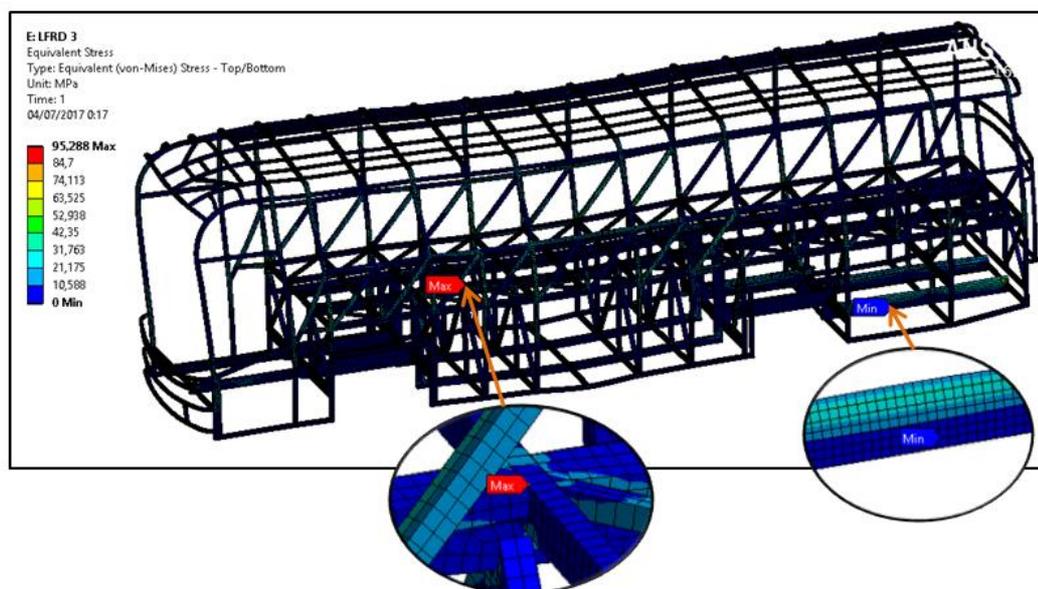


Figura 138 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 3 (Tensión equivalente – Von Mises)

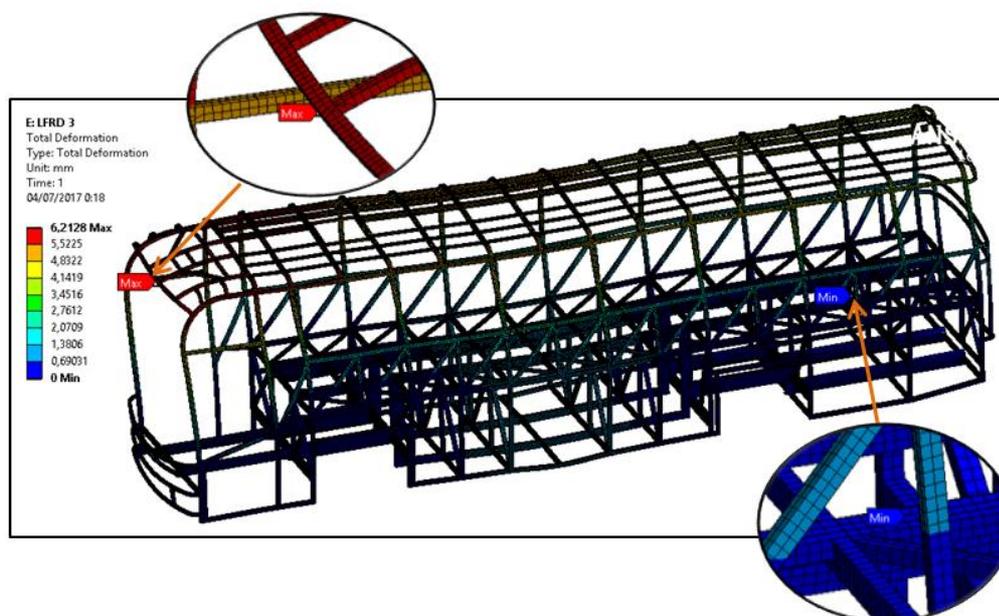


Figura 139 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 3 (deformación total)

Luego del análisis realizado a la carrocería autoportante aplicada la combinación 3 del método LRFD se obtiene los siguientes resultados:

- Existe una mayor carga en el refuerzo interno de larguero tejido del piso en la parte central delantera (Figura 138)
- Aplicando la tensión equivalente por Von Mises existe una carga máxima de 95,28 Mpa. Muy por debajo en el límite de fluencia del acero A36 utilizado; $S_y = 250 \text{ MPa}$ (Figura 138)
- Los elementos posteriores no presentan elementos comprometidos.
- Existe mayor deformación en la parte frontal del techo con 3,66 mm (Figura 139)
- Los laterales no presentan elementos comprometidos.
- El techo y cajuelas presentan deformaciones menores.
- La menor deformación se produce en la parte posterior del lateral derecho (pórtico lateral) con 0 mm.
- La menor carga se produce en el módulo posterior, región M4 con 0 MPa

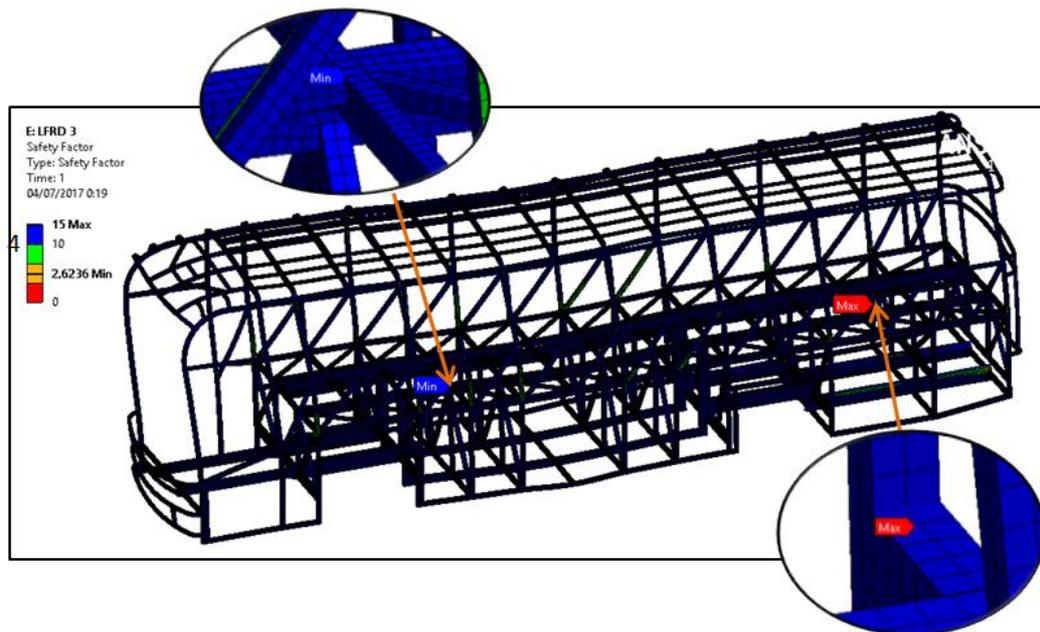


Figura 140 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 3 (factor de seguridad)

- El factor de seguridad de la carrocería autoportante aplicada la combinación 3 del método LRFD es de 2.62, considerándose aceptable para el modelado.

Combinación 4

Se aplica las cargas señaladas en la Normativa INEN 1323:2009, la combinación 4 tiene la configuración $1,2M+1,6F+0,8Raf$ con un valor de 250543,915 N

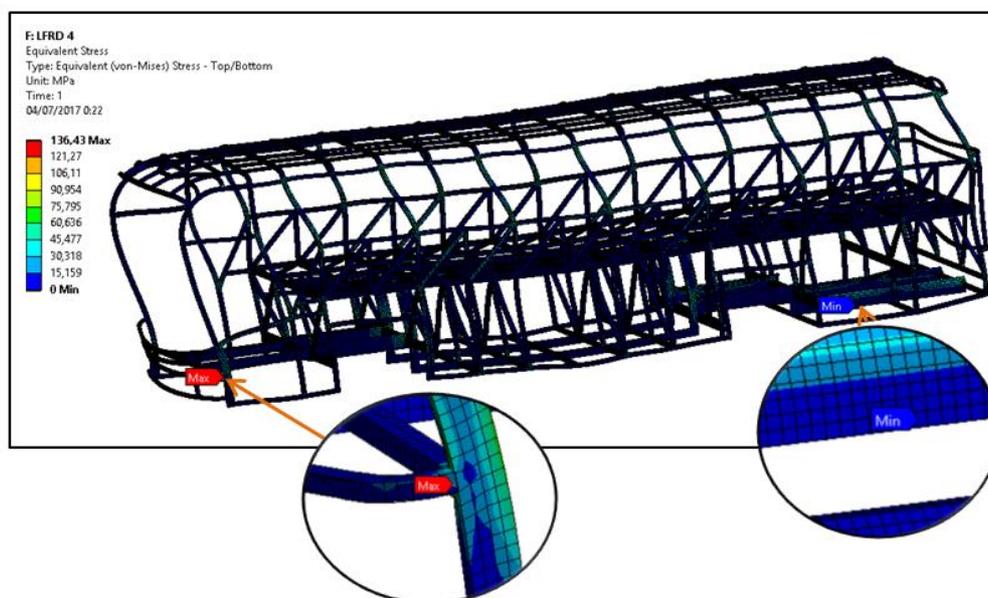


Figura 141 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 4 (Tensión equivalente – Von Mises)

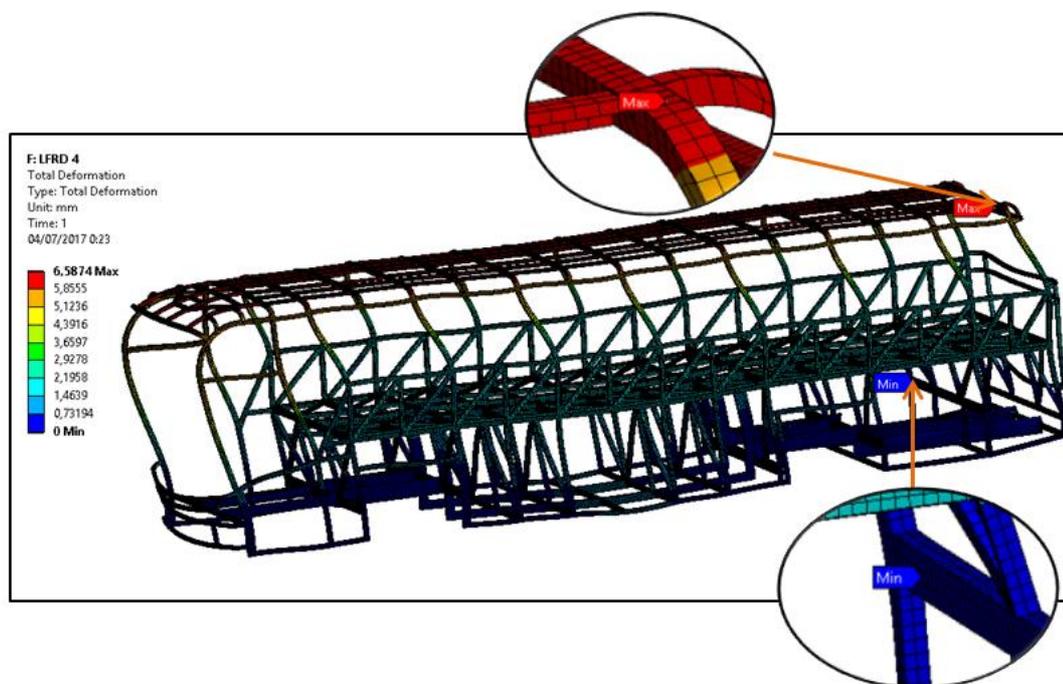


Figura 142 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 4 (deformación total)

- Existe una mayor carga en la unión frente – lateral izquierdo (Figura 141)

- Aplicando la tensión equivalente por Von Mises existe una carga máxima de 247,28 Mpa. Muy por debajo en el límite de fluencia del acero A500 utilizado; $S_y = 320 \text{ MPa}$ (Figura 141)
- El frente y posterior presentan deformaciones mayores.
- Existe mayor deformación en la unión techo – posterior con 6,58 mm (Figura 142)
- El tejido de cajuelas, techo y piso presentan deformaciones menores.
- La menor deformación se produce en la parte posterior del lateral derecho (pórtico lateral) con 0 mm.
- La menor carga se produce en el módulo posterior, región M4 con 0 MPa

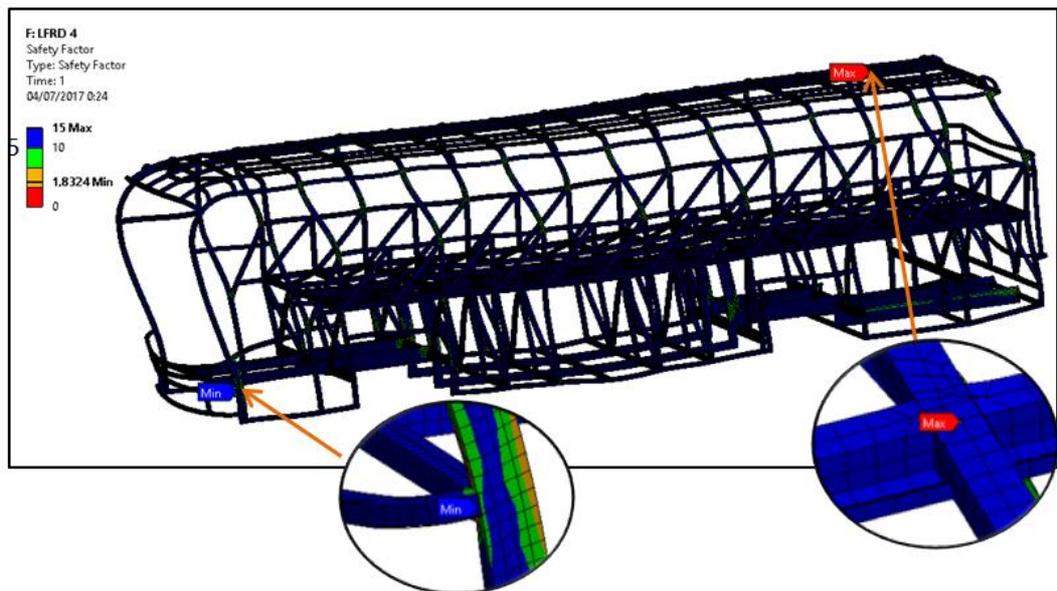


Figura 143 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 4 (factor de seguridad)

- El factor de seguridad de la carrocería autoportante aplicada la combinación 4 del método LRFD es de 1.83, considerándose aceptable para el modelado.

Combinación 5

Se aplica las cargas señaladas en la Normativa INEN 1323:2009, la combinación 5 tiene la configuración $1,2M+0,5V+0,5F+1,3Raf$ con un valor de 198745,002 N

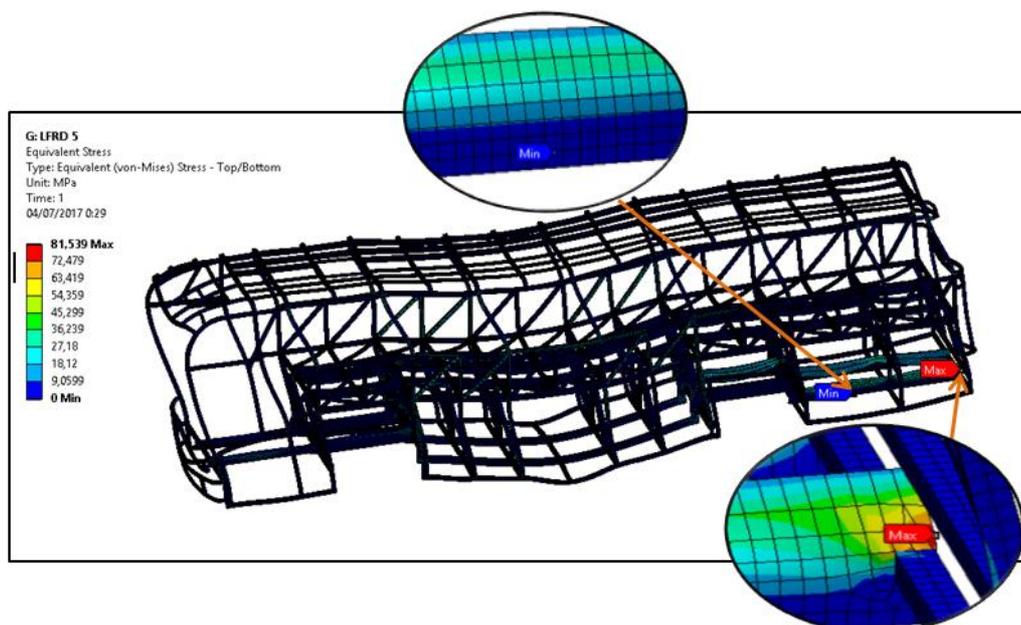


Figura 144 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 5 (Tensión equivalente – Von Mises)

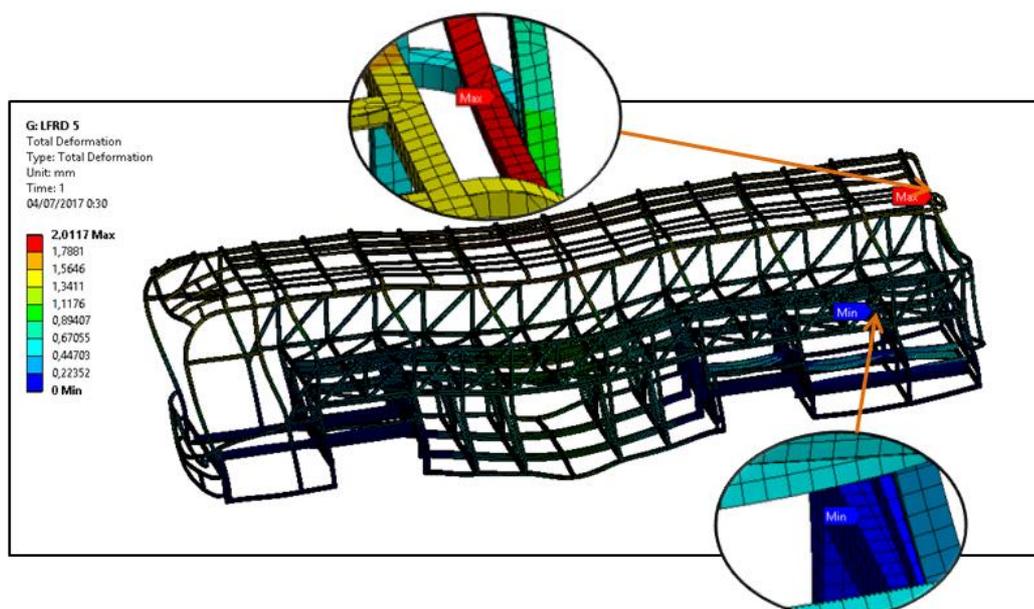


Figura 145 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 5 (deformación total)

Luego del análisis realizado a la carrocería autoportante aplicada la combinación 5 del método LRFD se obtiene los siguientes resultados:

- Existe una mayor carga en la parte posterior izquierda de la unión chasis – aleta del M4 (Figura 144)

- Aplicando la tensión equivalente por Von Mises existe una carga máxima de 81, 53 Mpa. Muy por debajo en el límite de fluencia del acero A500 utilizado; $S_y = 320 \text{ MPa}$ (Figura 144)
- El frente y posterior presenta deformaciones menores.
- Existe mayor deformación en la parte central del techo con 1,81 mm (Figura 145)
- El tejido del techo no presenta elementos comprometidos.
- Las cajuelas presentan deformaciones menores.
- La menor tensión y deformación se produce en la parte posterior del lateral derecho (pórtico lateral) con 0 mm.
- La menor carga se produce en el módulo posterior, región M4 con 0 MPa

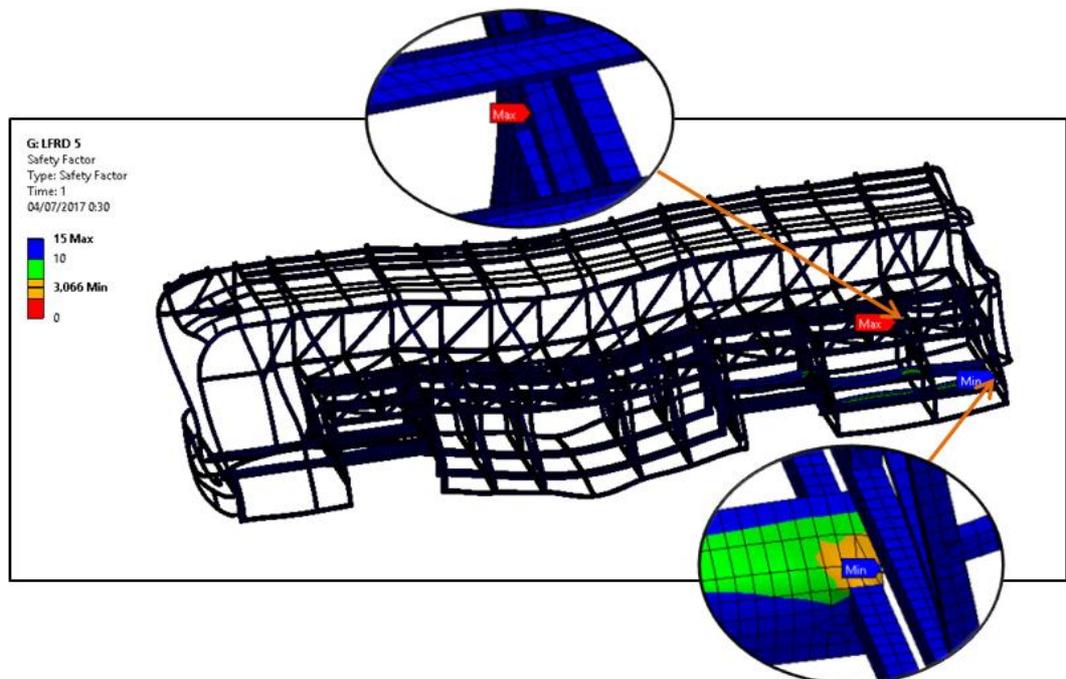


Figura 146 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 5 (factor de seguridad)

- El factor de seguridad de la carrocería autoportante aplicada la combinación 5 del método LRFD es de 3.06, considerándose aceptable para el modelado.

Combinación 6

Se aplica las cargas señaladas en la Normativa INEN 1323:2009, la combinación 6 tiene la configuración $1,2M+1,5A_b+0,5V$ con un valor de 258972,234 N

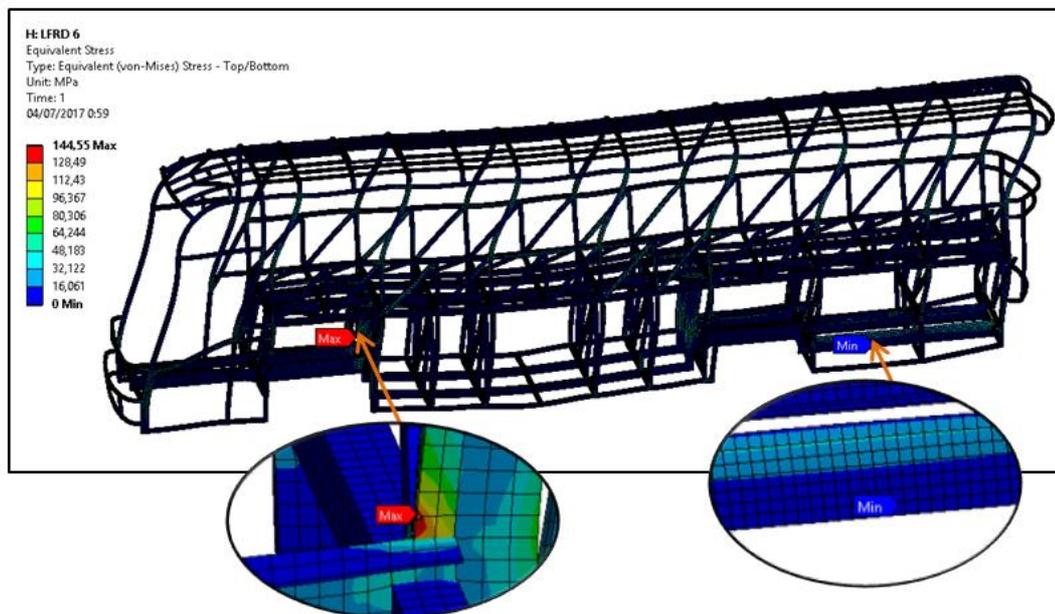


Figura 147 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 6 (Tensión equivalente – Von Mises)

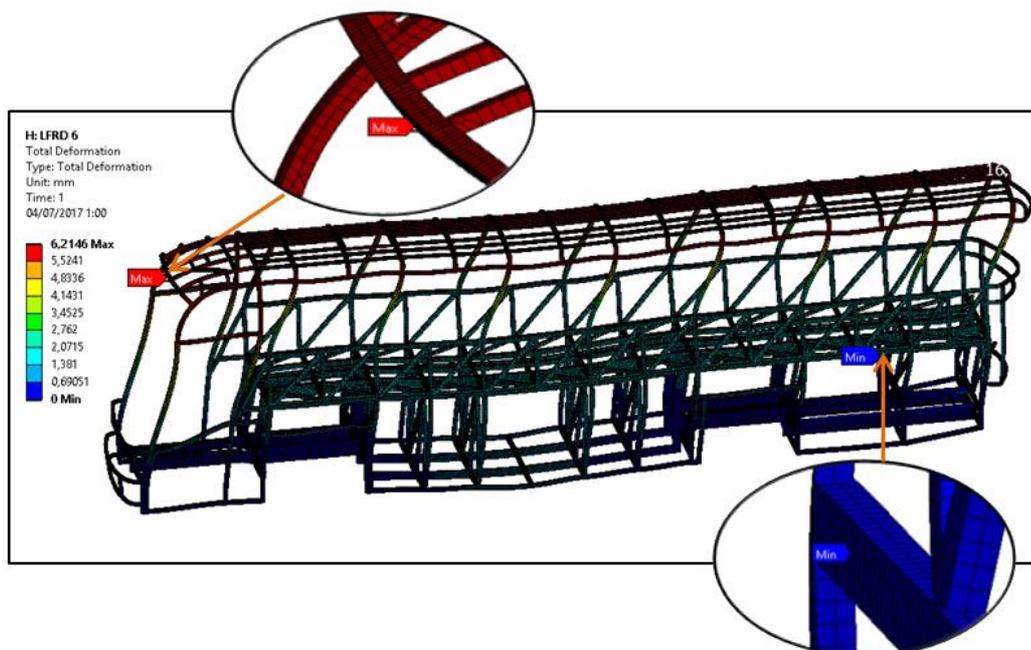


Figura 148 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 6 (deformación total)

Luego del análisis realizado a la carrocería autoportante aplicada la combinación 6 del método LRFD se obtiene los siguientes resultados:

- Existe una mayor carga en la columna derecha de sostén piso – chasis en M2 de la región frontal (Figura 147)
- Aplicando la tensión equivalente por Von Mises existe una carga máxima de 144.55 Mpa. Muy por debajo en el límite de fluencia del acero A500 utilizado; $S_y = 320$ MPa (Figura 147)
- El frente y posterior presenta elementos comprometidos.
- Existe mayor deformación en la parte central del techo con 6.21 mm (Figura 148)
- El tejido de cajuelas y piso presentan deformaciones menores.
- La menor deformación se produce en la parte posterior del lateral derecho (pórtico lateral) con 0 mm.
- La menor carga se produce en el módulo posterior, región M4 con 0 MPa

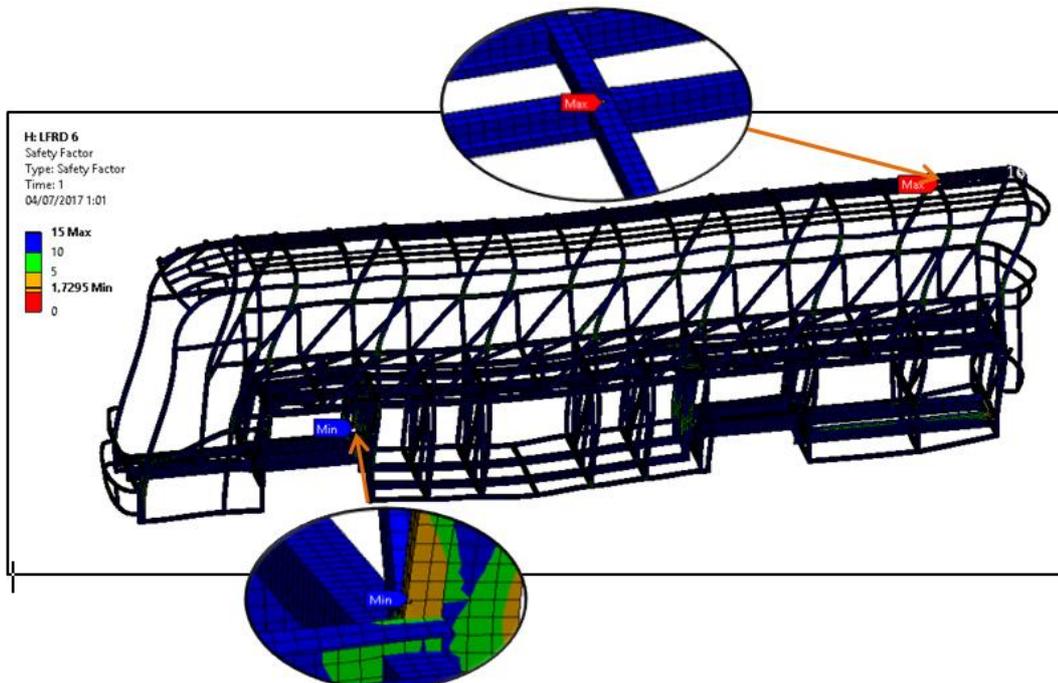


Figura 149 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 6 (factor de seguridad)

- El factor de seguridad de la carrocería autoportante aplicada la combinación 6 del método LRFD es de 1.72, considerándose aceptable para el modelado.

Combinación 7

Se aplica las cargas señaladas en la Normativa INEN 1323:2009, la combinación 7 tiene la configuración 0,9M-1,3Raf con un valor de 106505,478 N

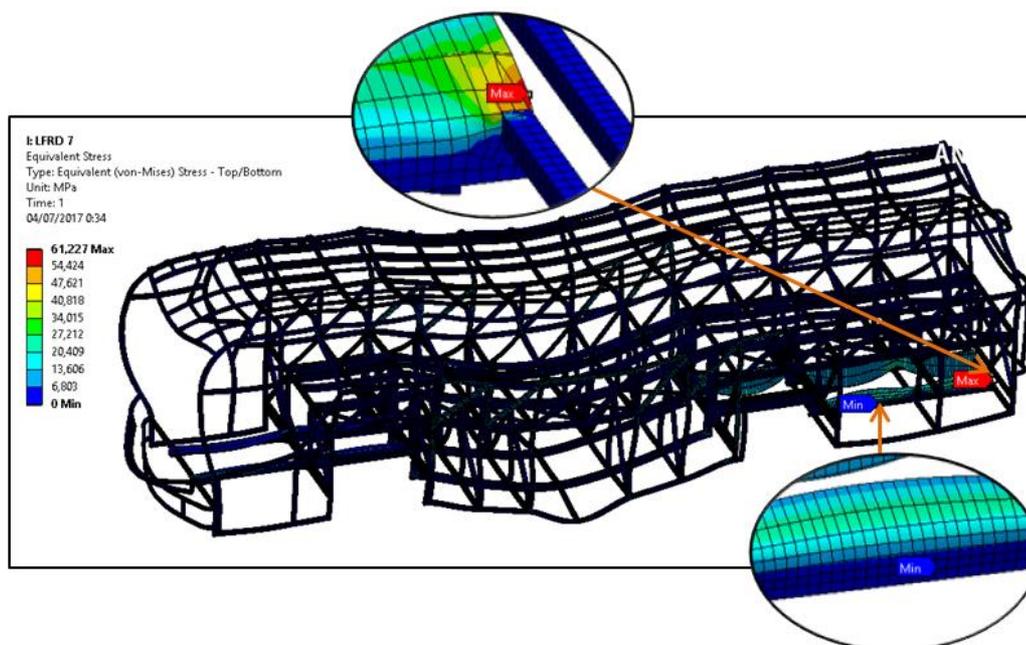


Figura 150 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 7 (Tensión equivalente – Von Mises)

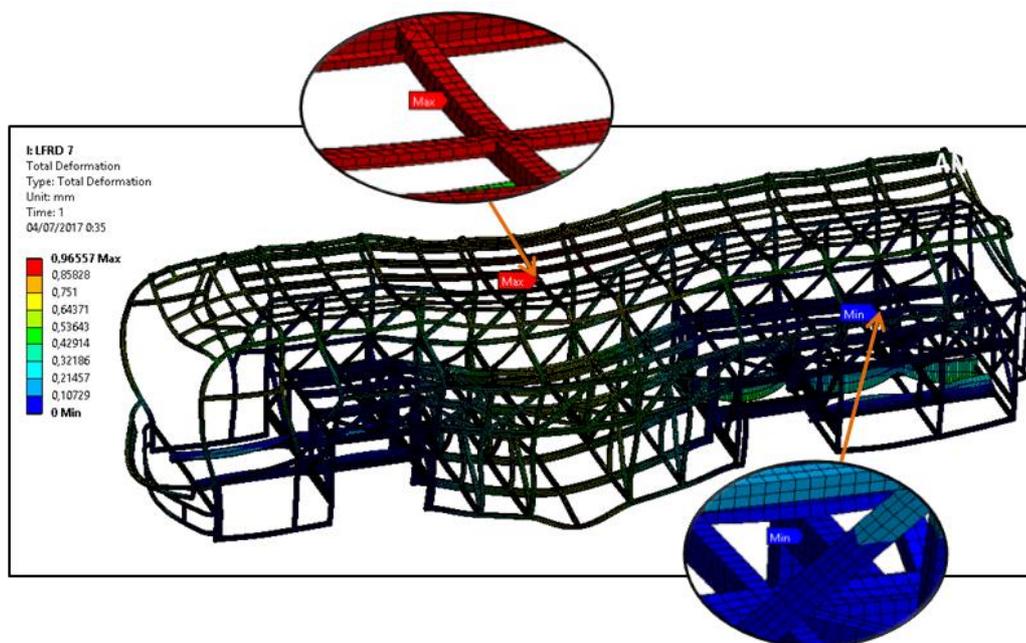


Figura 151 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 7 (deformación total)

Luego del análisis realizado a la carrocería autoportante aplicada la combinación 7 del método LRFD se obtiene los siguientes resultados:

- Existe una mayor carga en la parte posterior izquierda de la unión chasis – aleta del M4 (Figura 150)
- Aplicando la tensión equivalente por Von Mises existe una carga máxima de 61,22 Mpa. Muy por debajo en el límite de fluencia del acero A500 utilizado; $S_y = 320$ MPa (Figura 150)
- Existe mayor deformación en la parte central del tejido del techo con 0,96 mm (Figura 151)
- Las cajuelas y techo presentan deformaciones mayores.
- La menor deformación se produce en la parte posterior del lateral derecho (pórtico lateral) con 0 mm.
- La menor carga se produce en el módulo posterior, región M4 con 0 MPa

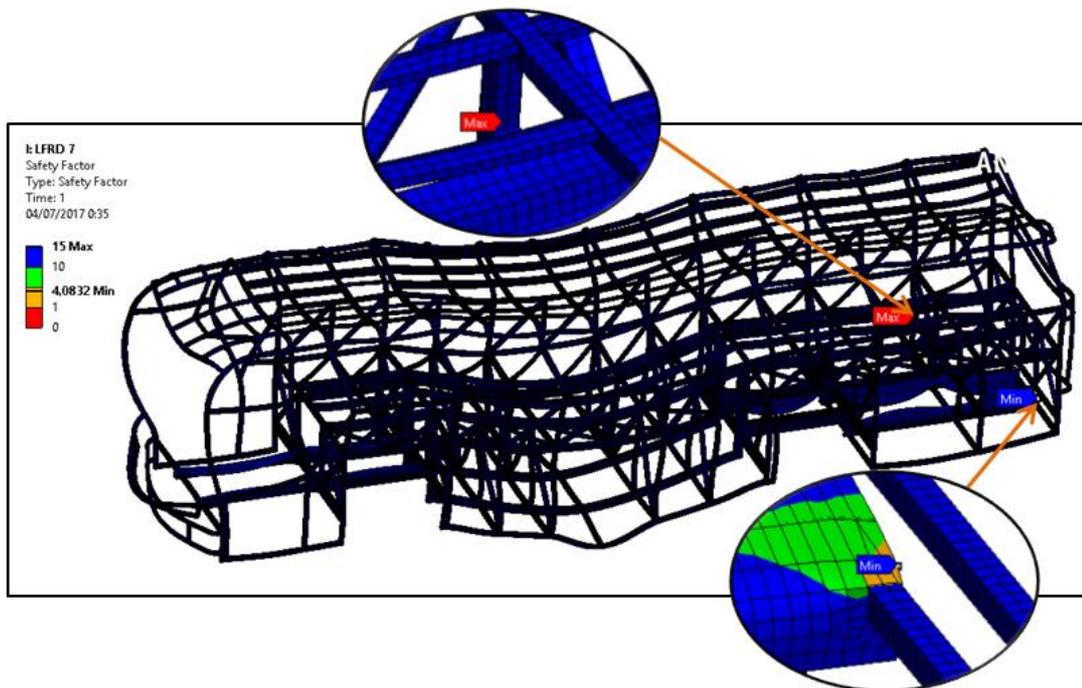


Figura 152 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 7 (factor de seguridad)

- El factor de seguridad de la carrocería autoportante aplicada la combinación 7 del método LRFD es de 4.08, considerándose aceptable para el modelado.

Combinación 8

Se aplica las cargas señaladas en la Normativa INEN 1323:2009, la combinación 8 tiene la configuración $0,9M+1,3Raf$ con un valor de 113366,007 N

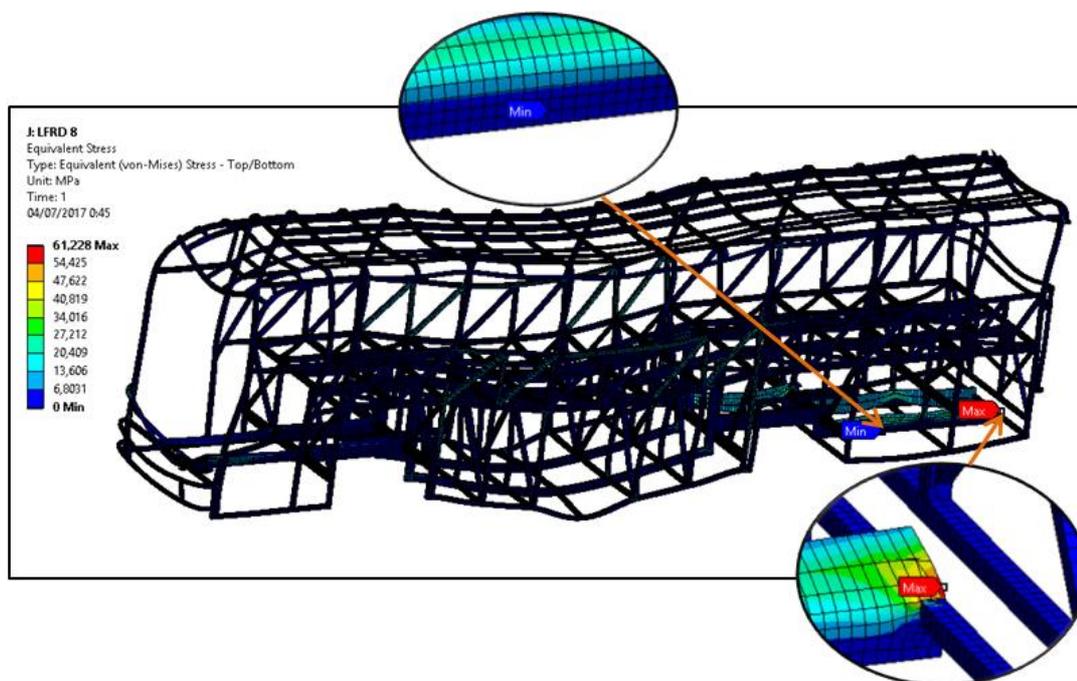


Figura 153 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 8 (Tensión equivalente – Von Mises)

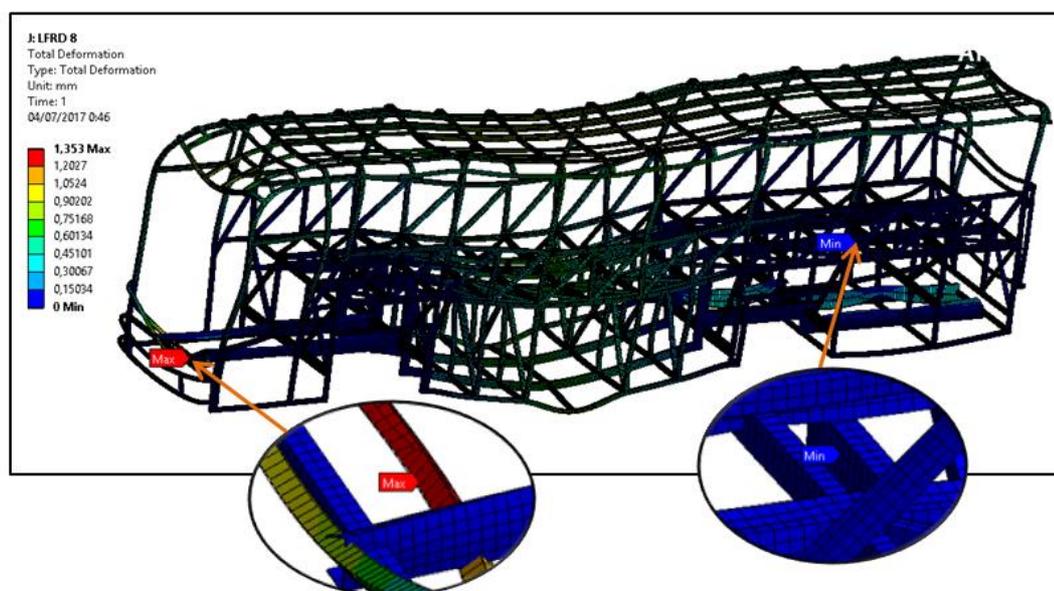


Figura 154 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 8 (deformación total)

Luego del análisis realizado a la carrocería autoportante aplicada la combinación 8 del método LRFD se obtiene los siguientes resultados:

- Existe una mayor carga en la parte posterior izquierda de la unión chasis – aleta del M4 (Figura 153)
- Aplicando la tensión equivalente por Von Mises existe una carga máxima de 61.22 Mpa. (Figura 153). Muy por debajo en el límite de fluencia del acero A500 utilizado; $S_y = 320$ MPa
- Existe mayor deformación en la parte frontal inferior con 1.35 mm (Figura 154)
- La menor deformación se produce en la parte posterior del lateral derecho (pórtico lateral)) con 0 mm.
- La menor carga se produce en el módulo posterior, región M4 con 0 MPa

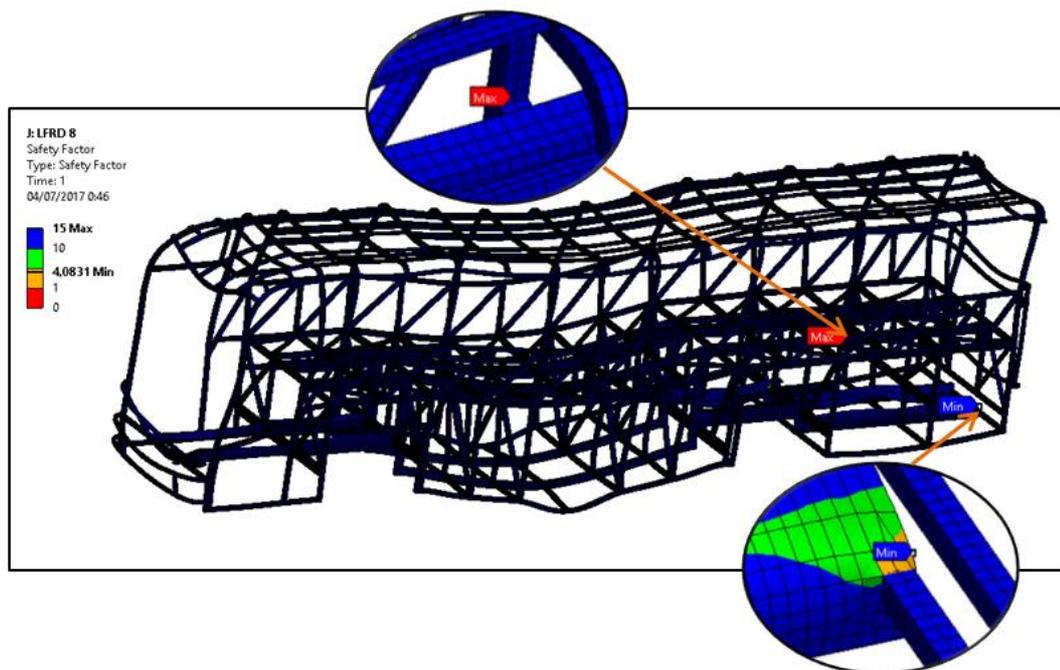


Figura 155 Aplicación del criterio de diseño LRFD bajo la acción de carga 8 (factor de seguridad)

El factor de seguridad de la carrocería autoportante aplicada la combinación 8 del método LRFD es de 4.08, considerándose aceptable para el modelado.

5.3. Resumen de las combinaciones de cargas aplicadas a la carrocería autoportante

Tabla 32

Resumen de combinaciones de cargas aplicadas a la carrocería autoportante

Combinación LRFD	Valor (Mpa)		Valor (mm)	
	Esfuerzo Máx.	Esfuerzo Mín	Deformación Máx	Deformación Mín.
Combinación 1	95,07	0	1,53	0
Combinación 2	107,2	0	2,08	0
Combinación 3	95,28	0	6,21	0
Combinación 4	136,43	0	6,58	0
Combinación 5	81,53	0	2,01	0
Combinación 6	144,35	0	6,21	0
Combinación 7	61,22	0	0,96	0
Combinación 8	61,22	0	1,35	0

Según el análisis de esfuerzo y deformación aplicando las combinaciones de cargas sobre la carrocería autoportante según el método LRFD que señala la Normativa INEN 1323:2009, determina que la combinación 6 presenta el mayor esfuerzo sobre la estructura autoportante con 144,35 MPa y la combinación 4 presenta mayor deformación resultante con 6,58 mm.

5.4. Resistencia de la estructura

5.4.1. Acorde a las cargas combinadas

La Normativa (INEN 1323, 2009) señala que: “las cargas combinadas, según el método LRFD, deben alcanzar una deformación elástica de todos los componentes de la estructura de la carrocería iguales o menores a 1/240 veces su longitud”.

La combinación 4 del método LRFD presenta mayor deformación resultante, en la Figura 156 se observa que el elemento estructural que

presenta la mayor deformación (6,58 mm) se encuentra en la la unión techo – posterior de la carrocería, el cual posee una longitud de 1765,29 mm.

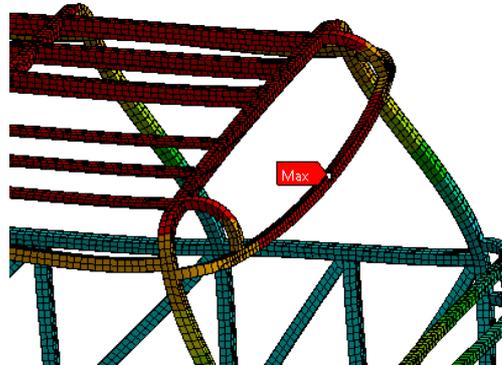


Figura 156 Elemento estructural sometido a mayor deformación

Se verifica si este valor cumple con la deformación igual o menor a $1/240$ veces su longitud:

$$\text{Deformación del elemento estructural} = \frac{1}{240}$$

Ecuación 19 Deformación del elemento estructural

$$\text{Deformación del elemento estructural} = \frac{1765,29 \text{ mm}}{240} = 7,35 \text{ mm}$$

$$L_{240} = 7,35 \text{ mm} > 6,58 \text{ mm}$$

El valor obtenido de la deformación del perfil estructural de la carrocería autoportante es menor que lo establecido en la Normativa (INEN 1323, 2009), lo que señala que la estructura autoportante cumple con el análisis cuasi-estático bajo las condiciones y parámetros de la Normativa en estudio.

5.4.2. Factor de seguridad

Se obtiene el factor de seguridad acorde a cada una de las cargas combinadas aplicadas a la carrocería autoportante, las cuales se encuentran resumidas en la tabla 33:

Tabla 33

Factor de seguridad por cada carga combinada según el método LRFD aplicada a la carrocería autoportante

Combinación de carga	Valor
Combinación 1	$n = 2,6$
Combinación 2	$n = 2,3$
Combinación 3	$n = 2,62$
Combinación 4	$n = 1,83$
Combinación 5	$n = 3,06$
Combinación 6	$n = 1,72$
Combinación 7	$n = 4,08$
Combinación 8	$n = 4,08$

El factor de seguridad debe ser mayor que 1.0 para evitar falla. En todos los casos de combinaciones de cargas sobre la carrocería ningún factor de seguridad mínimo es menor a 1,0, por lo tanto no existe riesgo de falla en los elementos estructurales

5.4.3. Carga estática sobre el techo

Acorde a la Normativa (INEN 1323, 2009) apartado 5.1.5.1, “se examina la resistencia a la estructura autoportante, lo cual indica que el techo soporta la carga estática del 50 % del peso máximo admisible para el chasis”, según (Mercedes Benz, 2016) el peso admisible de carga para el modelo de Chasis O500R 1830 es de 18500 Kg. lo cual indica que el techo de la estructura debe soportar:

$$Carga\ techo = 0,5(18500\ kg) \cdot 9,8\ m/s^2$$

$$Carga\ techo = 90650\ N$$

La carga aplicada al techo no debe deformar a su estructura sobre los 70 mm. para certificar la seguridad de la superestructura.

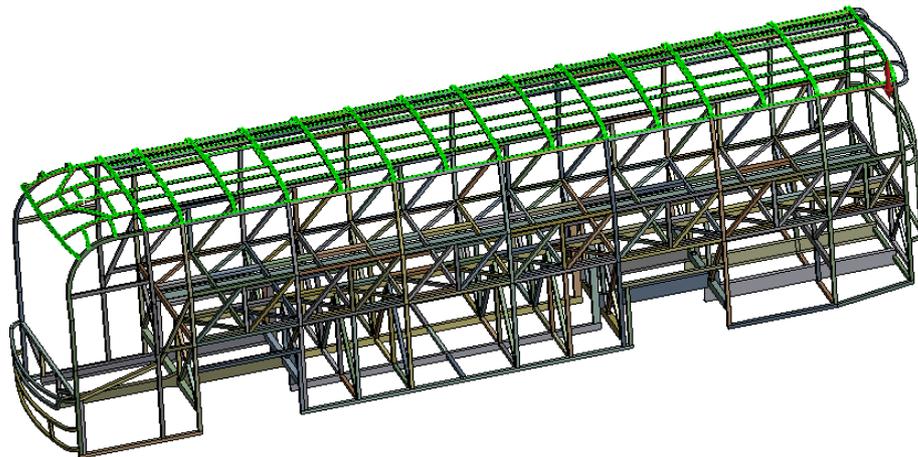


Figura 157 Carga distribuida sobre el techo de la carrocería

En la figura 158 se observa la deformación máxima producida en el techo, la cual es de 11,019 mm, cumpliendo con los solicitado en la Normativa INEN 1323:2009, que señala que el techo debe soportar el 50% del peso máximo admisible para el chasis

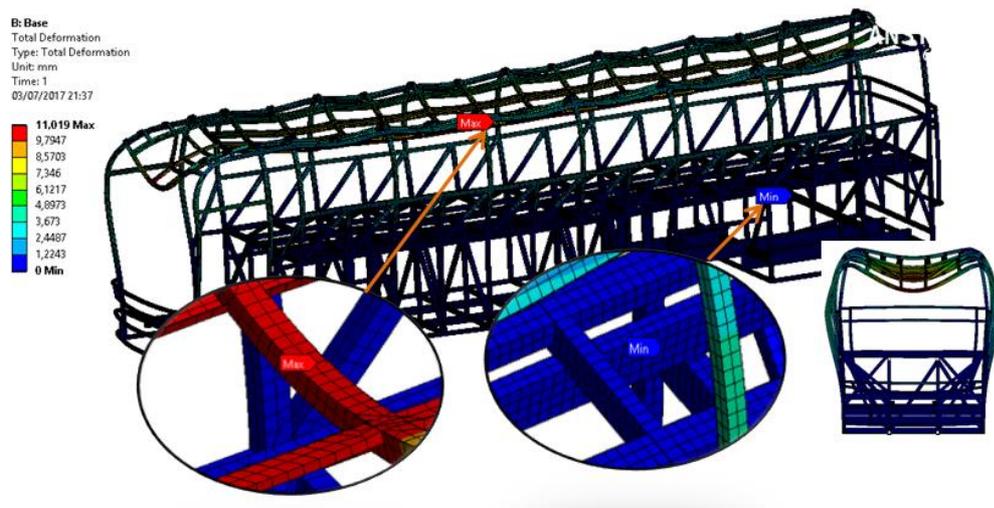


Figura 158 Deformación máxima efectuada en el techo de la carrocería autoportante

5.5. Propuesta de diseño para el bus autoportante

Mediante la presente investigación se propone el análisis estructural de la carrocería autoportante generando un diseño seguro, confiable y estéticamente agradable a la vista del consumidor para la producción en serie de este tipo de modelo de bus y posteriormente la comercialización en

el mercado nacional, por esta razón se pone a consideración las siguientes pautas:

5.6. Regiones para la fijación de la carrocería al chasis

“Los chasis O500 R disponen de travesaños (alas) laterales para mejorar la fijación de la estructura de la carrocería sobre el chasis. Los extremos de estas "alas" podrán ser retrabajados para adecuarlos a la carrocería y al proceso de carrozado debiéndose conservar las regiones de fijación de cualquier soporte de fijación de componentes del chasis.” (Mercedes Benz, 2013).

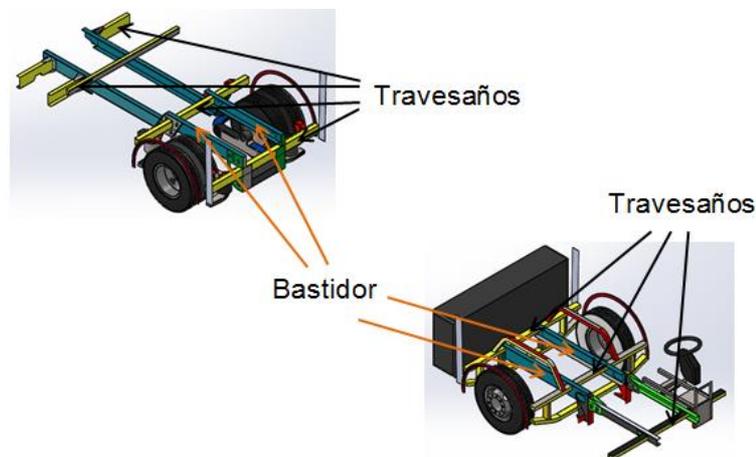


Figura 159 Configuración travesaños y bastidor

Fijación Módulo 1

“El primer travesaño de los chasis se destina al amarre de las columnas laterales de la carrocería, además de ser un elemento estructural del bastidor del chasis y del puesto del conductor.” (Mercedes Benz, 2013)

Debido a las distintas configuraciones de carrocería, el primer travesaño cuenta con regulación, en la figura 163 se visualiza el primer travesaño a ser regulado.

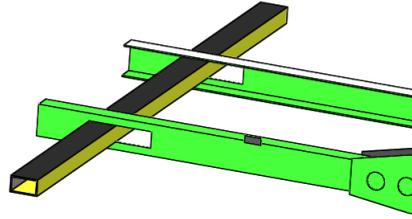


Figura 160 Primer travesaño modificable

Fijación módulos 2 y 4

Para fijación de la carrocería sobre los travesaños se podrá utilizar el refuerzo interno de los largueros.

La figura 161 muestra un ejemplo de fijación de la carrocería en el refuerzo interno de los largueros del módulo 2 y 4

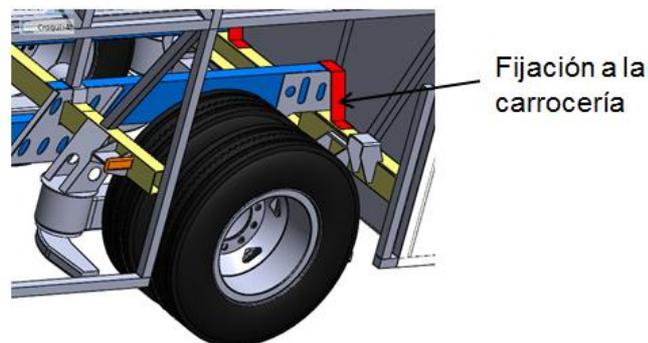


Figura 161 Fijación de la carrocería en el refuerzo interno de los largueros

Fijación módulo 3

En el montaje de la carrocería autoportante se utiliza una estructura central armada, unida a los módulos delantero y trasero, con el fin de obtener maleteros de mayor capacidad volumétrica.

La fijación de la estructura de la carrocería autoportante deberá realizarse a través de soldadura en las superficies planas del bastidor del chasis

La figura 162 y 163 muestran un ejemplo de la fijación de los módulos 2 y 4 con la estructura de la bodega (módulo 3) mediante soldadura.

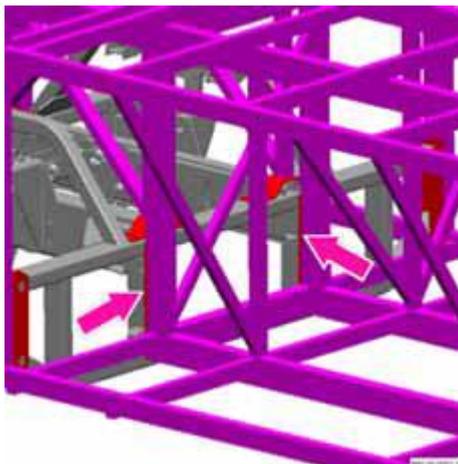


Figura 162 Fijación de módulos mediante soldadura

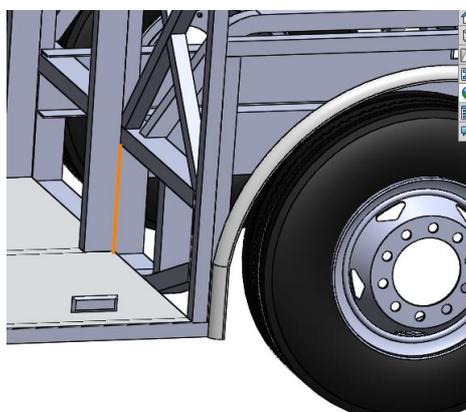


Figura 163 Fijación del módulo 2 mediante soldadura

Fijación módulo 5

Para fijar la carrocería en el módulo 5 hay que utilizar los travesaños originales del chasis.

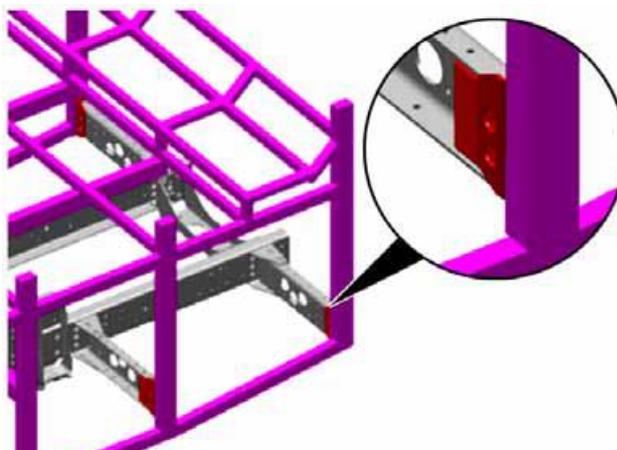


Figura 164 Travesaños en el módulo 5

5.7. Soldadura

La unión de los elementos de la carrocería, así como su unión con el chasis es de suma importancia ya que el resultando debe garantizar una estructura rígida entre sí a través de la soldadura realizada.

En si la carrocería autoportante se caracteriza por la perfilería la cual es ensamblada con los travesaños del chasis mediante cordón de soldadura construyéndose una gran jaula de acero en los cuales sus elementos no pueden ser desmontados.

La figura 165 muestra los tipos de juntas que existen en la construcción de la carrocería autoportante

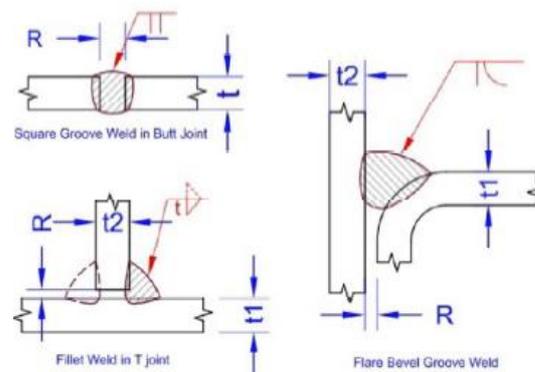


Figura 165 Tipos de juntas a soldar

La carrocería utiliza dos tipos de suelda:

- Soldadura SMAW
- Soldadura GMAW

Soldadura por arco con electrodo metálico revestido (SMAW)

“Se trata de una técnica en la cual el calor de soldadura es generado por un arco eléctrico entre la pieza de trabajo (metal base) y un electrodo metálico consumible (metal de aporte) recubierto con materiales químicos en una composición adecuada (fundente).” (De maquinas y herramientas, 2013)

Parámetros de soldadura SMAW

La tabla 34 muestra los parámetros de soldadura SMAW utilizado en los elementos de la carrocería autoportante

Tabla 34

Parámetros de soldadura SMAW

Material de aporte		Corriente		Voltaje (Voltios)	Velocidad de avance (cm/min)
Clase	Tipo y polaridad	Diámetro (mm)	Amperaje (A)		
E6011	DC+	3,2	67 A 82	20-30	La necesaria para lograr el tamaño y perfil adecuado

Fuente: (Carrocerías M&L, 2017)

Soldadura por arco de metal y gas (GMAW)

“Este proceso de soldadura se establece un arco eléctrico entre un alambre que es alimentado de manera continua y la pieza a soldar. La protección del arco, se efectúa a través de un gas que puede ser inerte (Argón o Helio) proceso MIG: Metal Inert Gas; o activo (CO₂ o Mezcla Ar-CO₂) proceso MAG: Metal Active Gas.” (Centro de conocimientos ESAB, 2014)

Parámetros de soldadura GMAW

La tabla 35 muestra los parámetros de soldadura GMAW utilizado en los elementos de la carrocería autoportante

Tabla 35

Parámetros de soldadura GMAW

Material de aporte		Corriente		Voltaje (Voltios)	Velocidad de avance (cm/min)
Clase	Tipo y polaridad	Diámetro (mm)	Amperaje (A)		
ER70s - 6	DC+	0,9	67 A 82	120-140	La necesaria para lograr el tamaño y perfil adecuado

Fuente: (Carrocerías M&L, 2017)

La soldadura utilizada en la unión carrocería-chasis es de 6 mm de espesor

En la figura 166 se visualiza la carrocería autoportante soldada al chasis formando una estructura rígida.



Figura 166 Conjunto chasis - carrocería autoportante

5.8. Diseño estético de la carrocería autoportante

Se trata de realizar un modelado del bus terminado con los detalles y elementos requeridos para su aprobación, construcción y posterior funcionamiento dentro del País.

Para lo cual se verificara que cumpla con los requisitos aplicados para vehículos diseñados y equipados para el transporte de pasajeros interprovincial, detallado en la Normativa (INEN 1668, 2015) con la finalidad de proteger la vida y la seguridad de las personas, el ambiente y la propiedad.

5.8.1. Configuración interna

La configuración interna se realizó de acuerdo a la normativa (INEN 1668, 2015). La figura 167 muestra la disposición de los asientos dentro del habitáculo del bus.

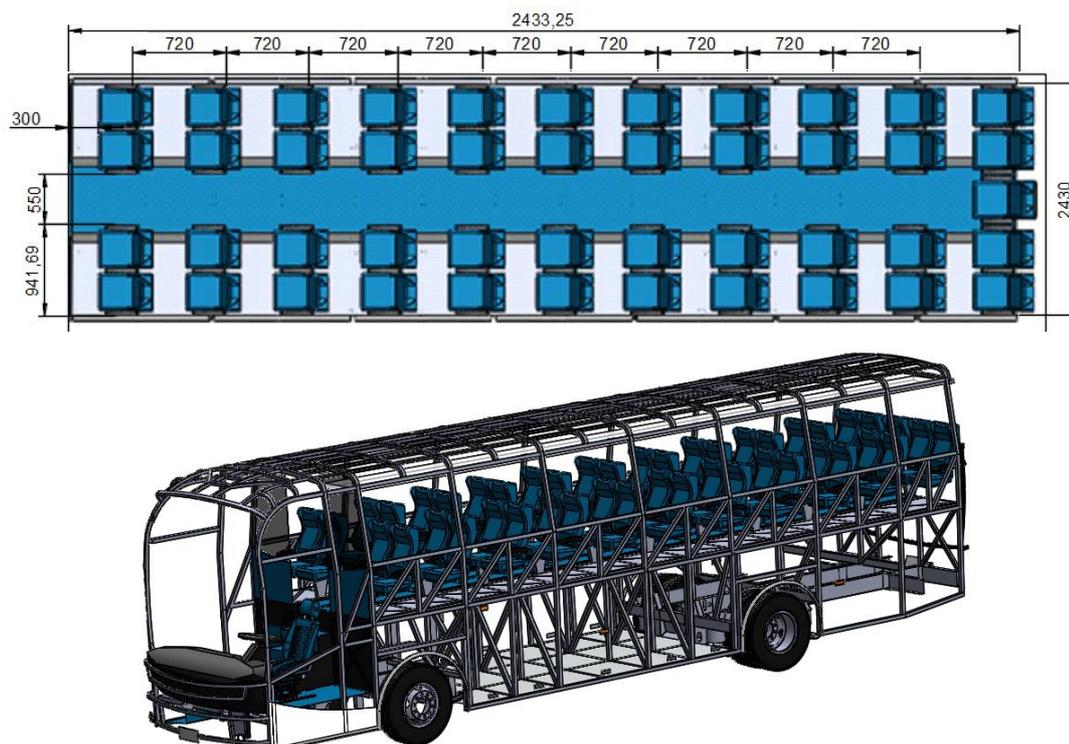


Figura 167 Disposición de los asientos

5.8.2. Configuración del habitáculo

“Los vehículos de transporte interprovincial deben tener una división entre el habitáculo del conductor y de los pasajeros, la misma que estará constituida de una parte superior con vidrio de seguridad la parte inferior podrá estar constituida de material sólido hasta una altura máxima de 700 mm, con puerta de acceso hacia el habitáculo de pasajeros” (INEN 1668, 2015).

La figura 168 muestra la configuración de la cabina de conducción.

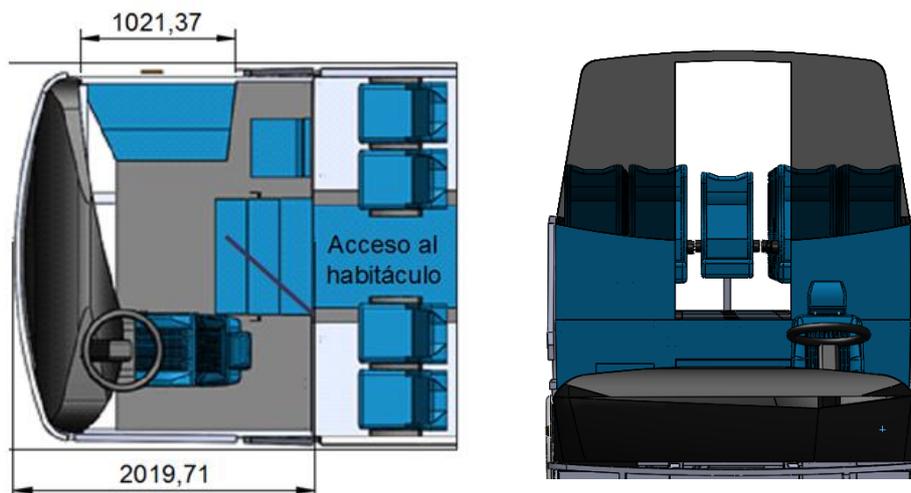


Figura 168 Configuración de la cabina de conducción.

5.8.3. Configuración de recubrimientos laterales, techo y bodegas

Los recubrimientos utilizados en la carrocería autoportante se puede visualizar en la tabla 36:

Tabla 36

Forrados utilizados en la carrocería autoportante

Área de forrado	Designación
Piso	Plancha antideslizante ASTM A36
Techo	Plancha galvanizada ASTM A653
Laterales	Plancha galvanizada ASTM A653
Forrado interior	Plancha de acero ASTM A36

La figura 169 y 170 muestra el forrado o recubrimiento exterior e interior respectivamente



Figura 169 Recubrimiento exterior de la carrocería autoportante

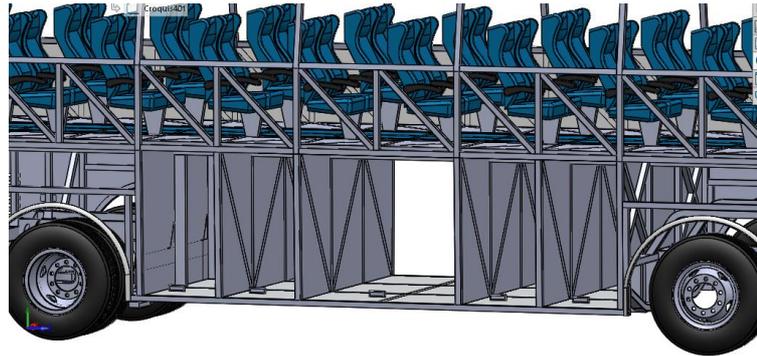


Figura 170 Recubrimiento interior de la carrocería autoportante

5.8.4. Configuración parte delantera y posterior

La parte delantera y posterior de la carrocería autoportante se realizará con fibra de vidrio de 2-3 mm de espesor de acuerdo a las necesidades que se presenten, la figura 171 muestra el acabado respectivo.



Figura 171 Parte delantera y posterior carrocería autoportante

5.8.5. Configuración Vidrios

Los vidrios laminados de alta seguridad utilizados en la carrocería autoportante de acuerdo a la normativa 1669 es de 4 mm de espesor y el parabrisas es de 5 mm de espesor, la figura 172 muestra tales elementos instalados en el bus.



Figura 172 Vidrios y parabrisas de la carrocería autoportante

5.9. Características de diseño

La figura 173 se puede encontrar el diseño estético propuesto en el software CAD



Figura 173 Diseño estético de bus autoportante

La tabla 37 muestra las características de diseño las cuales cumplen la Normativa (INEN 1668, 2015)

Tabla 37

Características de diseño bus autoportante

Especificaciones Técnicas			
Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1668	Nominación	Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1668	Nominación
Denominación	BUS	Carrocería	Autoportante
Número de pasajeros	45	Numero de ejes	2
Peso bruto	12441 Kg	Motor	Diesel
Neumáticos		295/80 R 22,5	
Dimensiones externas			
Largo total	12 127 mm	Ancho total	2 554 mm

CONTINÚA 

Altura total	3 650 mm	Ángulo de acometida	8°
Voladizo posterior	66% distancia entre ejes	Voladizo delantero	2000 mm
Ventanas laterales			
Ventana espesor	4 mm	Altura ventana	1038 mm
Parachoques			
Altura parachoques frontal	409 mm	Altura parachoques posterior	522 mm
Puertas de ingreso y salida			
Ancho libre	1152 mm	Altura	2091 mm
Ubicación		Delante del eje delantero	
Salidas de emergencia			
2 por cada fila de ventanas laterales			
Ventilación			
Escotillas	0,36 mm ²	Ventilación delantera	Sistema antivaho
Portaequipajes			
Volumen		11,38 m ³	
Dimensiones internas			
Altura interna	1920 mm	Altura primer peldaño	376 mm
Altura piso - ventana	703 mm	Distancia mampara - asiento	423,49 mm
Corredor central	485 mm	Distancia entre asientos	300 mm

5.10. Análisis aerodinámico del bus autoportante

El modelo fue sometido a un análisis aerodinámico (Túnel de viento) en el software CAD. El resultado obtenido es de interés ya que al visualizar las

líneas de flujo de aire, la aspersión, velocidad y presión que el bus está sometido se logra conocer la respuesta aerodinámica frente al fluido en condiciones de funcionamiento.

“Un túnel de viento comprende una sección de prueba donde se monta el vehículo y se aplica una gran cantidad de aire sobre la superficie del vehículo desde diferentes ángulos. Este viento puede ser soplado o bien aspirado por uno o más ventiladores. Por lo general todos los datos se pueden recoger a partir de varios sensores y técnicas de visualización. Así se pueden observar ciertas características geométricas que afectan el rendimiento aerodinámico.” (Autoproyectos, 2013)

Para realizar el análisis aerodinámico se debe activar el complemento Flow Simulation como se visualiza en la figura 174

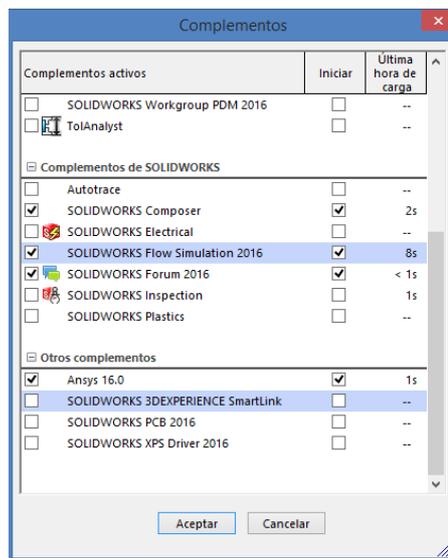
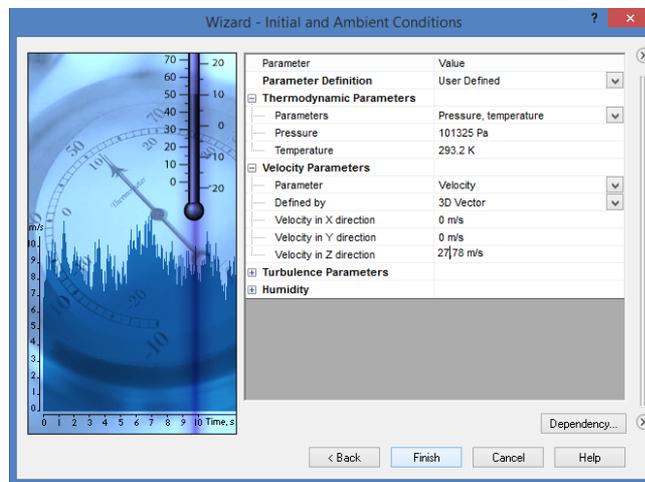


Figura 174 Activación de Flow Simulation

En el análisis se plantean las condiciones las cuales el bus va a experimentar durante su funcionamiento, estas condiciones se visualizan en la tabla 38 y se realiza el ingreso en Flow Simulation como se muestra en la figura 175.

Tabla 38**Condiciones de funcionamiento de bus autoportante**

ÍTEM	VALOR
Presión	101325 Pa
Temperatura	293,2 °K
Velocidad del bus	27,78 m/s
Densidad del aire	1,225 Kg/m ³
Humedad relativa del aire	50%

**Figura 175 Ingreso de datos a Flow Simulation**

Se realiza la modificación del tamaño del túnel de viento verificando el dominio computacional a raíz del origen que son:

$$X = [-3,5 \text{ m} ; 3,5 \text{ m}]$$

$$Y = [-2 \text{ m} ; 3,5 \text{ m}]$$

$$Z = [-1,5 \text{ m} ; 15 \text{ m}]$$

Este dominio queda representado en el túnel de viento que muestra en la figura 176.

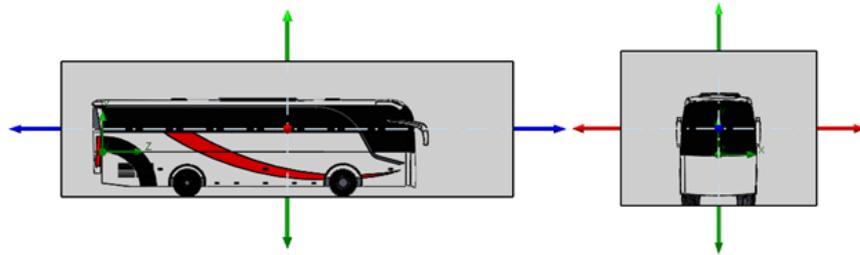


Figura 176 Dominio computacional del túnel de viento

La trayectoria del fluido también se debe configurar, para lo cual se selecciona las caras del bus que van a tener contacto durante su recorrido frontal. La figura 177 muestra la selección de las caras que actúan en la trayectoria del fluido.

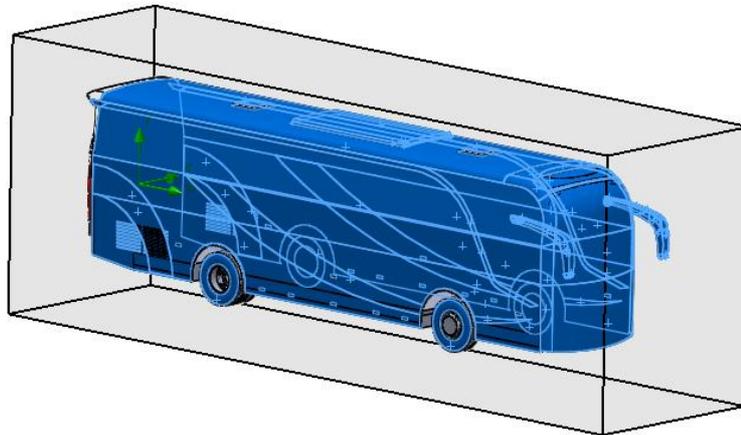
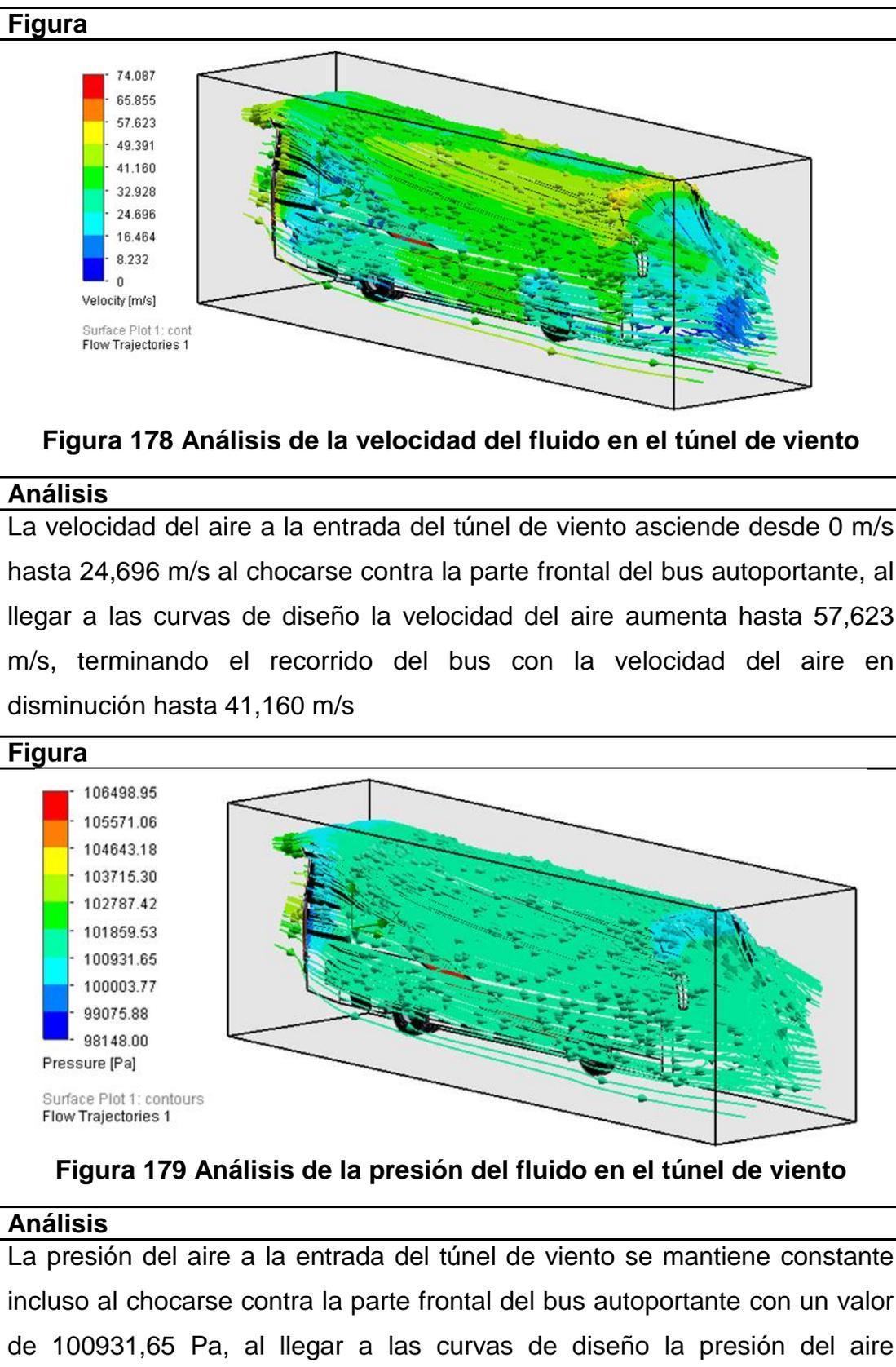


Figura 177 Caras que actúan en la trayectoria del fluido

Al someter a el bus autoportante al túnel de viento se obtuvo datos máximos como la velocidad del viento, presión, densidad y temperatura ejercida por el viento. Lo cual se puede observar en la tabla 39.

Tabla 39

Análisis realizado al bus autoportante mediante el túnel de viento



CONTINÚA →

disminuye hasta 100003,77 Pa, terminando el recorrido del bus con la presión del aire en aumento hasta 103715,30 Pa.

Figura

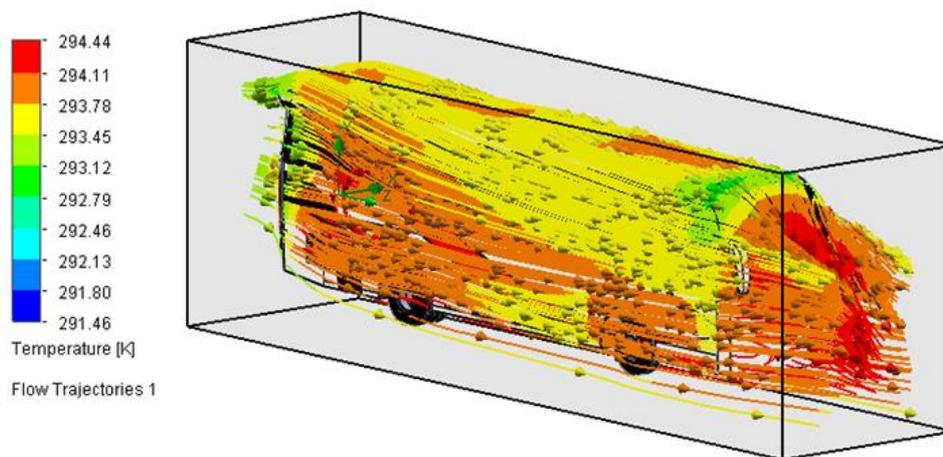
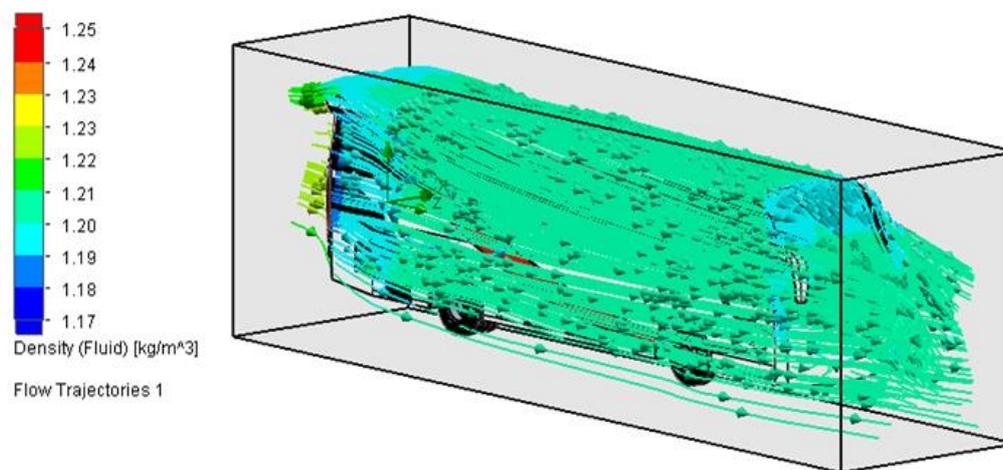


Figura 180 Análisis de la temperatura del fluido en el túnel de viento

Análisis

La temperatura del aire a la entrada del túnel de viento se mantiene constante con un valor de 294,1°K hasta chocar contra la parte frontal del bus autoportante donde la temperatura haciende a 294,44°K, al llegar a las curvas de diseño la temperatura del aire disminuye hasta 293,12°K, terminando el recorrido del bus con la presión del aire en aumento hasta 293,45°K.

Figura



CONTINÚA



Figura 181 Análisis de la densidad del fluido en el túnel de viento
Análisis
La densidad del aire a la entrada del túnel de viento se mantiene constante incluso al chocarse contra la parte frontal del bus autoportante con un valor de 1,20 Kg/m ³ , al llegar a las curvas de diseño la densidad del aire disminuye hasta 1,19 Kg/m ³ , terminando el recorrido del bus con la presión del aire en aumento hasta 1,22 Kg/m ³ .

La tabla 40 muestra las metas obtenidas en FlowSimulation luego de haber realizado el análisis aerodinámico de la estructura:

Tabla 40

Metas obtenidas en el análisis aerodinámico

Nombre	Unidad	Valor
Densidad	kg/m ³	1.21
Fuerza (Y)	N	1113.947
Fuerza (Z)	N	-2656.455
Velocidad Máxima	m/s	36.390
Número de Reinolds	kg/m ³	7400058.13
Cy	kg/m ³	0.30
Cz	kg/m ³	-0.72
Potencia	kg/m ³	-73583.79

De acuerdo a los datos obtenidos en la tabla 40, se destaca la fuerza tomada como resistencia aerodinámica (2656,455 N) y el coeficiente de resistencia al avance (0,72).

5.11. Resistencia Aerodinámica y potencia utilizada

La resistencia aerodinámica es la fuerza que sufre un cuerpo al moverse a través del aire.

La fuerza de resistencia es siempre de sentido opuesto al de la velocidad relativa que adquiere la carrocería autoportante en condiciones de funcionamiento, por lo que la fuerza de resistencia aerodinámica se opone al avance de un cuerpo a través del aire.

Este valor se obtuvo en el análisis aerodinámico de la carga por resistencia al aire frontal (Fuerza en z) con un valor de:

$$R_{af} = 2656.455 \text{ N}$$

Como la resistencia aerodinámica se refleja en una fuerza que se opone al movimiento, también existirá un gasto energético necesario para vencer dicha resistencia conocida como potencia, la cual se calcula mediante la siguiente ecuación de potencia requerida:

$$\text{Potencia} = \text{Fuerza} * \text{Velocidad}$$

$$\text{Potencia} = \frac{1}{2} C_x \cdot \rho \cdot A_f V^3$$

Ecuación 20 Potencia requerida

dónde:

R_{af} : Carga por resistencia aerodinámica (N).

C_x : Es el coeficiente de resistencia al avance, adimensional

ρ : Representa la densidad del aire en el lugar donde el vehículo presta servicio, (kg/m³)

V : Es la velocidad de traslación del vehículo, (m/s).

A_f : Representa el área proyectada frontal de la carrocería, en sección transversal, (m²)

$$\text{Potencia} = \frac{1}{2} \cdot (0,7) \cdot \left(1,225 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) \right) \cdot 7,976 \text{ (m}^2\text{)} \cdot \left(27,77 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^3$$

$$\text{Potencia} = 73,58 \text{ KW}$$

El valor de la potencia se compara con el obtenido en el software en la tabla 40.

De acuerdo al resultado obtenido de la ecuación 20 “potencia requerida”, el motor Mercedes Benz con una potencia de 225 KW necesita 73,58 KW para vencer la resistencia al aire frontal.

5.12. Renderización

La renderización es la creación de una imagen digital a partir del modelado cuyo objetivo es dar una apariencia realista desde cualquier perspectiva del modelo, el software utilizado para este propósito es el Photoview 360 (Figura 182)

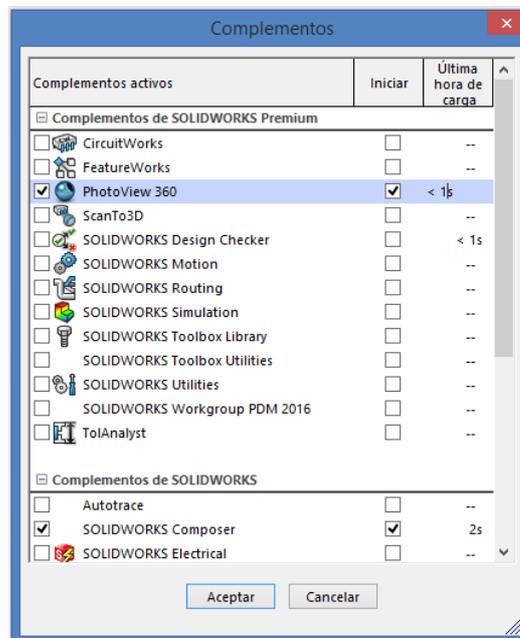


Figura 182 Activación de Photoview 360

El modelo 3D se somete a varios procesos, que con el uso de técnicas de texturizado de materiales, iluminación, distribución de color, (Figura 183) crea efectos ópticos que se asemejan a situaciones reales aparentando ser una fotografía.

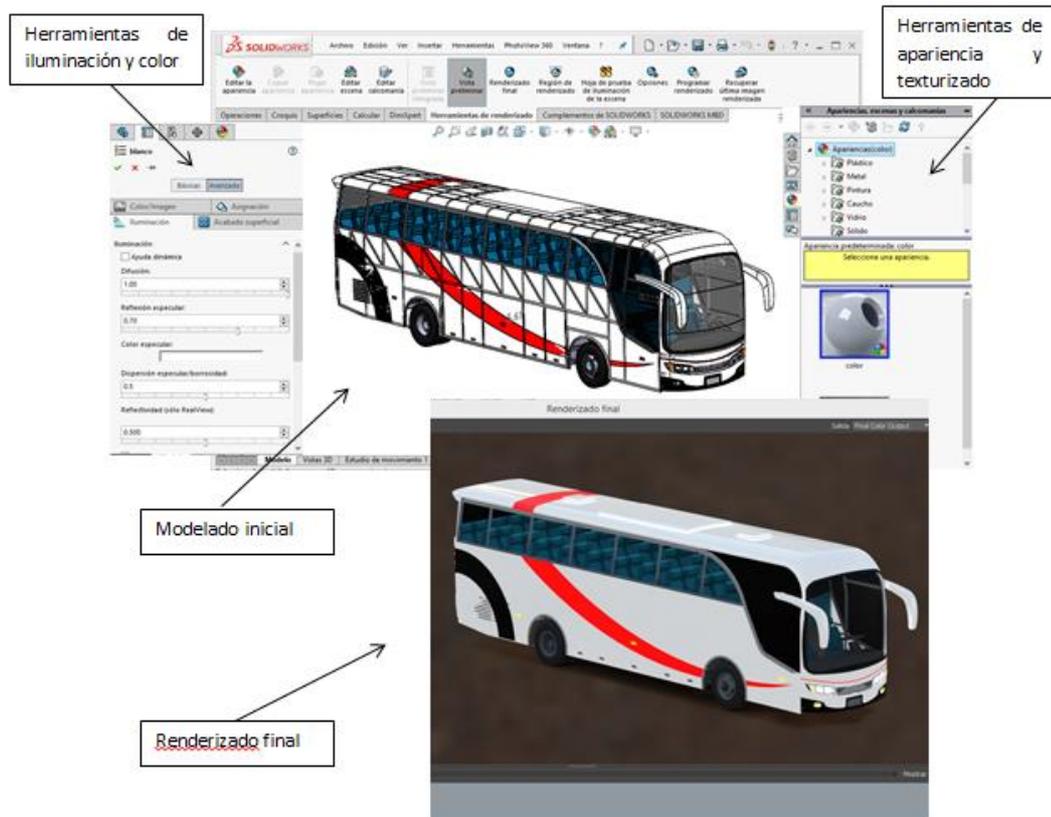


Figura 183 Técnicas y herramientas de renderizado en Photoview 360

En la figura 184 se visualiza el bus autoportante renderizado.



Figura 184 Bus autoportante renderizado

El modelo de bus autoportante muestra un aspecto visualmente agradable teniendo un chasis Mercedes Benz O500R 18/30 Euro 3, motor posterior de 306 Cv de potencia. La Carrocería es un modelo estilizado que tiene una capacidad para 45 pasajeros, asientos con inclinación de 160 grados con apoyapiés. Sus dimensiones son: 12127 mm de longitud, 2554 mm de ancho y 3650 mm de altura. Cumpliendo con los requerimientos establecidos en las Normativas Técnicas Ecuatorianas: INEN 1323, 2009; INEN 1669, 2015 y El Reglamento Técnico Ecuatoriano INEN 043; 2010.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Al finalizar la trabajo de titulación, se determinan las siguientes conclusiones:

- Un bus con carrocería autoportante es una estructura integral que forma una unidad con su chasis mediante cordones de soldadura constituyendo una gran jaula de acero tridimensional. Una de las características principales es el uso del chasis discontinuo, dividido en 2 partes permitiendo modificar su distancia entre ejes y así brindar un mayor espacio en la zona central de maleteros o bodegas.
- Se obtuvo información teórica mediante el catálogo de construcción de carrocerías para chasis Mercedes Benz O500R18/3, el cual detalla los parámetros a tomar en cuenta para el dimensionamiento inicial a partir de la adquisición del chasis, configuración de componentes sobre cada módulo del bastidor y la construcción del bus autoportante, también se obtuvo planos, manuales de construcción y memorias técnicas de materiales empleados en la estructura a través del departamento de producción de carrocerías M&L.
- El presente análisis parte de un estudio detallado que determina el modelado geométrico y matemático de una estructura autoportante para bus interprovincial dirigido para Carrocerías M&L, conociendo las condiciones a las cuales es sometida la misma durante su funcionamiento, estableciendo las pautas adecuadas para verificar su resistencia a través del cumplimiento de Normas (NTE INEN 1323, NTE INEN 1668, NTE INEN 2415) y Reglamentos (RTE INEN 043) vigentes en el País.
- La Normativa Técnica Ecuatoriana INEN 1323 establece los requisitos generales para el diseño, fabricación y montaje de carrocerías de buses interprovinciales las cuales incluye a las carrocerías autoportantes que son objeto de estudio del trabajo de titulación. Esta Normativa debe ser cumplida estrictamente con el fin de garantizar la seguridad de los pasajeros que hacen uso de los medios

de transporte, por este motivo en Ecuador es de vital importancia su ejecución.

- El Reglamento Técnico Ecuatoriano INEN 043 establece los requisitos que deben cumplir los buses interprovinciales con la finalidad de proteger la vida y la seguridad de las personas, el ambiente y la propiedad, aparte de prevenir errores de geometría en el proceso de diseño y posterior fabricación.
- La Normativa Técnica Ecuatoriana INEN 2415 establece los requisitos que deben cumplir los tubos de acero al carbono soldados para la aplicación en la construcción de la carrocería autoportante los cuales utilizan perfiles estructurales de sección cuadrada, rectangular o especial de grado B y D que cumplan con la Normativa vigente tales como el perfil estructural A500 y A36
- En el bus en condición de funcionamiento actúan 7 tipos de cargas que afectan el desarrollo de la unidad: cargas constantes en la estructura fabricada, debida a los viajeros, resistencia al aire o viento, cargas de aceleraciones y frenados bruscos, debido al giro de la unidad, debido a las irregularidades de las vías, las cuales actúan en conjunto de acuerdo a las condiciones de manejo, para esto se determina 8 combinaciones de cargas de acuerdo a la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1323, simulando las condiciones de utilización reales de la unidad
- Se utiliza la metodología de modelado 3D en software CAD en la simulación y análisis en la Unidad de transporte utilizando herramientas computacionales apropiadas para el modelado geométrico de la estructura, para la comprobación de interferencia y contactos de los perfiles diseñados; posteriormente el análisis de la superestructura mediante Software CAE.
- La malla realizada en el modelado de la estructura autoportante debe ser de buena calidad con la finalidad de que el análisis cuasiestático propine resultados exactos por lo que se utilizó tres indicadores para medir la calidad de malla: Orthogonal Quality, Skewness, y radio

Jacobiano, en cada método de medición la calidad de malla fue excelente.

- La carrocería autoportante cumple con los requisitos establecidos en la Norma NTE INEN 1323:2009 para el análisis cuasi-estático, en lo que respecta a:

Resistencia de la estructura en base a combinaciones de cargas

- La máxima deformación de la carrocería autoportante se presenta en la combinación 4 del método LRFD con un valor de 6,58 mm y se verifica que cumple con lo estipulado en la norma, pues alcanza una deformación del elemento menor a 1/240 veces su longitud

$$\text{Deformación del elemento estructural} = \frac{1765,29 \text{ mm}}{240} = 7,35 \text{ mm}$$

$$L_{240} = 7,35 \text{ mm} > 6,58 \text{ mm}$$

Lo cual señala que la deformación se encuentra por debajo del límite aceptable sin ocasionar ruptura de los elementos.

- La máxima carga que soporta la carrocería autoportante se presenta en la combinación 6 del método LRFD con un valor de 144,35 MPa bajo el criterio de esfuerzos de Von Mises, el cual no apunta a una ruptura de los perfiles estructurales

Deformación máxima del techo en la estructura autoportante

- La deformación máxima producida en el techo al soportar la carga estática del 50 % del peso máximo admisible para el chasis, es de 11,019 mm por lo tanto cumple con lo establecido dentro de la Norma INEN 1323 debido a que la estructura presenta una deformación menor de 70 mm.
- Un túnel de viento comprende una sección de prueba donde se aplica gran cantidad de viento sobre la superficie del bus autoportante mediante el cual se obtuvieron datos máximos como la carga aerodinámica (4541,32 N), cargas laterales (1591 N), presión ejercida (0,1 MPa), velocidad del viento (49,391 m/s), temperatura ejercida por el viento (294,44°K), cumpliendo con los parámetros de diseño para su producción en serie.

- Se elaboró un informe para carrocerías M&L con los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Titulación.

RECOMENDACIONES

- Verificar las especificaciones del chasis para carrocerías autoportante, verificando el destino para el trabajo dirigido, el número de ejes, el peso bruto necesitado, y la distancia entre ejes fijado en la Normativa Técnica Ecuatoriana INEN 1323, así como también los acoples, travesaños y el dimensionamiento adecuado. También se debe tomar en cuenta la modificación de las “alas” que cumplan con lo especificado en el manual de construcción de Mercedes Benz
- Cumplir con las Normativas y Reglamentos establecidos por el INEN a fin de garantizar la seguridad y dimensionamiento requerido para la homologación en la ANT, este proceso es de vital importancia puesto que es un punto de partida para un futuro responsable en la construcción de buses autoportantes en el Ecuador
- Las herramientas computacionales son de vital importancia por lo que se recomienda actualizarlas permanentemente asegurando confiabilidad en los resultados adquiridos.
- El modelo realizado en CAD no debe presentar errores de geometría, de interferencias, y mantener el contacto entre elementos ya que al momento de la simulación presenta errores e inconvenientes con resultados erróneos o nulos
- Utilizar una malla de buena calidad (0,3) mediante el uso de elementos triangulares, cuadráticos, tetraedros que presentan excelente distribución de deformación hacia la solución real. La calidad de mallado se puede comparar mediante las tablas establecidas en el Capítulo II.
- Tener especial atención en el modelado de las partes que son mas vulnerables a los efectos de las cargas como los elementos del piso, techo y la unión
- Continuar con el estudio de carrocerías autoportantes, tanto en el campo de impactos, cinturones de seguridad individuales, pruebas de vuelco y optimización de materiales de construcción evaluando en todos los casos las condiciones de seguridad

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Aceros Otero. (13 de Mayo de 2013). *Aceros Otero*. Recuperado el 21 de Febrero de 2017, de <http://www.acerosotero.cl/index.html>

Andrade, L., & Méndez, P. (2012). *Estudio del diseño de una carrocería con análisis de esfuerzos estáticos y dinámicos de un autobús de la marca Patricio Cepeda calificada con norma ISO 9001-2008 mediante la aplicación de un software para el cálculo de las fuerzas*. Latacunga: ESPE.

Arana, D., & Dután, V. (2009). *Estudio de aceros estructurales para la construcción de carrocerías de buses*. Quito: EPN.

Arcelormittal. (25 de Julio de 2014). *industry_arcelormitta*. Recuperado el 14 de Junio de 2017, de <http://industry.arcelormittal.com/catalogue/H20/ES>

AutoLíder. (26 de mayo de 2017). *Autolider*. Recuperado el 14 de Junio de 2017, de <http://www.autoliderecuador.com.ec/comerciales/index.php/vehiculo/item/o-500-r-1830>

Autoproyectos. (14 de Junio de 2013). *Autoproyectos news*. Recuperado el 01 de Julio de 2017, de <http://autoproyecto.com/2013/06/la-aerodinamica-y-el-tunel-del-viento.html>

Cano, L. (14 de Enero de 2015). *Academia.Edu*. Recuperado el 06 de Junio de 2017, de http://www.academia.edu/23012894/FACTOR_DE_SEGURIDAD_Y_ESFUERZO_DE_DISEÑO_PERMISIBLE_ESFUERZO_DE_TRABAJO

Caraballo, L. (2014). *Esfuerzo y Deformación*. Porlamar: Porlamar.

Carrocerías M&L. (2017). *M&L*. Ambato: M&L.

Carvajal, M. (23 de Septiembre de 2013). *Scribd*. Recuperado el 21 de Febrero de 21, de <https://es.scribd.com/document/166820556/00-Intr-Ansys>

Centro de conocimientos ESAB. (14 de Septiembre de 2014). *Centro de conocimientos ESAB*. Recuperado el 23 de Mayo de 2017, de http://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/proceso_soldadura_gma_w.cfm

Cepeda, J. (2006). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL SISTEMA ESTRUCTURAL DEL AUTOBÚS FELINE PARA LA EMPRESA CARROCERA MIRAL BUSES*. Quito: ESPE.

De maquinas y herramientas. (26 de Julio de 2013). *De maquinas y herramientas*. Recuperado el 13 de Abril de 2017, de <http://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/soldadura-smaw-que-es-y-procedimiento>

DIPAC. (2015). *Catalogo*. Manta: Dipac.

Disprocar. (13 de Mayo de 2008). *elchapista*. Recuperado el 27 de Enero de 2017, de http://www.elchapista.com/chasis_carrocerias_vehiculos.html

Donaire, J. (7 de Septiembre de 2016). *Comparativa de modelos de simulación de vuelco de autobuses segun los procedimientos del reglamento 66*. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid.

EL TELEGRAFO. (30 de Julio de 2016). *Alianza ecuatoriano-china fabricará 1.200 buses*, págs. 2-3.

Esmeraldas, C. (2016). *ANÁLISIS ESTRUCTURAL BASADO EN SIMULACIÓN POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE UNA CARROCERÍA DE BUS INTERPROVINCIAL SOMETIDA A PRUEBA DE IMPACTO LATERAL PARA DETERMINAR LA GEOMETRÍA Y MATERIALES APLICABLES QUE GARANTICEN LA SEGURIDAD DE LOS PASAJEROS*. Latacunga: ESPE-L.

HINO MOTORS LTDA. (2000). *Manual para montaje de carrocerías*. Japón: HINO.

INEN 038. (2009). *BUS URBANO*. Quito: INEN.

INEN 043. (2010). *BUS INTERPROVINCIAL E INTRAPROVINCIAL*. Quito: INEN.

INEN 1323. (2009). *VEHICULOS AUTOMOTORES. CARROCERIAS DE BUSES. REQUISITOS*. Quito: INEN.

INEN 1668. (2015). *VEHÍCULOS DE TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS INTRARREGIONAL, INTERPROVINCIAL E INTRAPROVINCIAL. REQUISITOS*. Quito: INEN.

INEN 2205. (2010). *Vehículos Automotores. Bus Urbano. Requisitos*. Quito: INEN.

INEN 2415. (2016). *TUBOS DE ACERO AL CARBONO SOLDADOS PARA APLICACIONES ESTRUCTURALES Y USOS GENERALES*. Quito: INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. (2017).

Interempresas. (5 de Julio de 2010). *Autobuses: ¿integrales, basados en chasis o mixtos?* Recuperado el 30 de Enero de 2017, de <https://www.interempresas.net/FlipBooks/L/>

IPAC ACERO. (2017). *Catálogo IPAC de productos y Servicios*. Ambato: IPAC ACERO.

Irizar. (7 de Julio de 2016). *Komunitatea*. Recuperado el 30 de Enero de 2017, de <http://mukom.mondragon.edu/master-ingenieria-industrial/oferta-trabajo/>

Jiménez, M. (2004). *Análisis y optimización con interacción de Dummy, de la carrocería del automóvil "Tubolare SAND CAR" de Tecnoidea SA de CV, en impacto frontal empleando el método de elementos finitos en ALGOR FEA, mediante la simulación de eventos mecánicos*. Puebla: Universidad de las Américas de Puebla.

LA HORA. (25 de Julio de 2016). *La producción de carrocerías cae un 40%*, págs. 3-4.

López Pazmiño, L. F. (2015). *ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DEL CHASIS HINO AK8JRSA Y SU INCIDENCIA EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO GENERAL DEL BUS INTERPROVINCIAL EN LA INDUSTRIA METÁLICA CEPEDA (IMCE)*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

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

Mercedes Benz. (2013). *Directivas para la construcción de carrocerías*. Mercedes Benz.

Mercedes Benz. (2016). *Catalogo Chasis O500R 1830*. Brasil: Mercedes Benz.

Norton, R. (2011). *Diseño de máquinas*. México, D.F.: Pearson.

Rivas, J. (23 de Mayo de 2010). *Rivas diseños*. Recuperado el 30 de Enero de 2017, de <http://www.bus-america.com/JAR/index.htm>

Ruiz, J. (28 de Octubre de 2013). *Blogspot*. Recuperado el 27 de Enero de 2017, de http://juanluisalconero.blogspot.com/2013/10/carrocerias-de-vehiculos_23.htm

Sitec. (2014). *Sitec*. Recuperado el 4 de 12 de 2015, de <http://www.sitec.com.ar/productos-y-servicios/>

TOTAL MATERIA. (12 de Enero de 2016). *Total materia la base de datos mas extensa del mundo*. Recuperado el 03 de Julio de 2017, Obtenido de: <http://search.totalmateria.com/MaterialDetails/MaterialDetail?vkKey=1055090&keyNum=391&type=3&hs=0>

Tubos Colmena. (2017). *ASTM A500*. Tubos Colmena.

USM COLOMBIA S.A. (2013). *SPACECLAIM*. COLOMBIA: SPACECLAIM.

Verdezoto, J. (2015). *DISEÑO DE UNA CARROCERÍA DE UN BUS INTERPROVINCIAL EN CONFORMIDAD CON EL INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN (NORMA INEN 1323:2009) Y VALIDACIÓN MEDIANTE MECÁNICA COMPUTACIONAL*. Quito: ESPE.

Vinueza, A. (12 de 01 de 2014). *ECUABUS, la primera web de Busología Ecuatoriana*. Obtenido de ECUABUS, la primera web de Busología Ecuatoriana: <http://ecuabus.net/SilverSC.html>

Vinueza, Á. (13 de Abril de 2015). *ECUABUS*. Obtenido de <http://ecuabus.net/SilverSC.html>

ANEXOS



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

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por el señor: **LUIS ENRIQUE VILLAFUERTE BUÑAY**

En la ciudad de Latacunga, a los **2 días de AGOSTO del 2017.**

Ing. Guido Torres

DIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:



Ing. Víctor Danilo Zambrano

DIRECTOR DE CARRERA

Dr. Freddy Jaramillo

SECRETARIO ACADÉMICO