

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO

Tema: “Determinación de configuraciones estructurales de un frente de autobús interprovincial y su incidencia en la resistencia al impacto frontal mediante el método de elementos finitos”.

Trabajo de Titulación, modalidad Informe de Investigación, previo a la obtención del Grado Académico de Magister en Diseño Mecánico

Autor: Ing. Santiago Alejandro López Ortiz.

Director: Ing. César Hernán Arroba Arroba, Mg

Ambato – Ecuador

2016

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica

El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación, modalidad Informe de Investigación presidido por el Ingeniero Segundo Francisco Pazmiño Gavilanes, Magister e integrado por los señores: Ingeniero Christian Byron Castro Miniguano, Magister, Ingeniero Gonzalo Eduardo López Villacís, Magister, designados por la Unidad Académica de Titulación de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Informe de Investigación con el tema: “Determinación de configuraciones estructurales de un frente de autobús interprovincial y su incidencia en la resistencia al impacto frontal mediante el método de elementos finitos”, elaborado y presentado por el señor Ingeniero Santiago Alejandro López Ortiz, para optar por el Grado Académico de Magister en Diseño Mecánico; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación, modalidad Informe de Investigación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.

Ing. Segundo Francisco Pazmiño Gavilanez, Mg.

Presidente del Tribunal

Ing. Christian Byron Castro Miniguano, Mg.

Miembro del Tribunal

Ing. Gonzalo Eduardo López Villacís, Mg.

Miembro del Tribunal

AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación, modalidad Informe de Investigación, presentado con el tema: “Determinación de configuraciones estructurales de un frente de autobús interprovincial y su incidencia en la resistencia al impacto frontal mediante el método de elementos finitos”, le corresponde exclusivamente a: Ingeniero Santiago Alejandro López Ortiz, Autor bajo la Dirección de Ingeniero César Hernán Arroba Arroba, Magister, Director del Trabajo de Titulación, modalidad Informe de Investigación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Santiago Alejandro López Ortiz

c.c.0603845959

AUTOR

Ing. César Hernán Arroba Arroba, Mg

c.c.1803011277

DIRECTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, modalidad Informe de Investigación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.

Ing. Santiago Alejandro López Ortiz
c.c.0603845959

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

Portada.....	i
Autoría de la investigación.....	ii
Derechos de Autor.....	iii
Índice de Contenidos.....	iv
Lista de Anexos.....	viii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tablas.....	xi
Agradecimiento.....	xii
Dedicatoria.....	xiii
Resumen Ejecutivo.....	xiv

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
EL PROBLEMA de investigación	2
1.1 Tema	2
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.2.1 Contextualización.....	2
1.2.2 Análisis crítico.....	4
1.2.3 Prognosis.....	4
1.2.4 Formulación del problema.....	5
1.2.5 Preguntas directrices.....	5
1.2.6 Delimitación del problema.....	5
1.2.6.1 Delimitación del contenido.....	5
1.2.6.2 Delimitación espacial.....	5
1.2.6.3 Delimitación temporal.....	6
1.3 Justificación	6
1.4 Objetivos	7
1.4.1 General	7

1.4.2	Específicos	7
CAPÍTULO II.....		8
MARCO TEÓRICO		8
2.1	Antecedentes investigativos	8
2.1.1	Antecedentes	8
2.2	Fundamentación filosófica	9
2.3	Fundamentación legal.....	10
2.4	Fundamento Teórico.....	10
2.4.1	Mecánica de Materiales.....	10
2.4.1.1	Deformación	10
2.4.1.2	Esfuerzo 12	
2.4.2	Métodos de Elementos Finitos.....	13
2.4.2.1	Áreas de análisis.	14
2.4.2.2	Métodos de análisis.	15
2.4.2.3	Aplicación de los elementos finitos a la mecánica de materiales.	16
2.4.2.4	Análisis no lineal.	18
2.4.2.5	Análisis dinámico de estructuras elástica.....	21
2.4.2.6	Simulación virtual de choque de vehículos mediante análisis no lineal explícito. 22	
2.4.3	Superestructura del autobús	24
2.4.3.1	Componentes de la superestructura de un autobús	25
2.4.3.2	Recomendaciones de fabricantes para el diseño de la superestructura de autobuses (Mercedes Benz, 1999).....	26
2.4.4	Ensayos de impacto de Autobuses.....	29
2.4.4.1	Normativa referente a la resistencia en un impacto frontal.	29
2.4.4.2	Regulación del impacto frontal de acuerdo a reglamento R 29 de la UNECE. 31	
2.5	Categorías fundamentales	35
2.6	Hipótesis.....	35
2.7	Señalamiento de variables.....	35
2.7.1	Variable independiente.....	35
2.7.2	Variable dependiente	35
2.7.3	Término de relación.....	35

CAPITULO III	36
METODOLOGÍA	36
3.1 Enfoque	36
3.2 Modalidad básica de la investigación.....	36
3.2.1 Bibliográfica	36
3.2.2 Experimental	36
3.3 Nivel o tipo de investigación	36
3.3.1 Descriptiva	36
3.3.2 Asociación de variables.....	37
3.3.3 Explicativo	37
3.4 Población y muestra	37
3.4.1 Población.....	37
3.4.2 Muestra.....	37
3.5 Operacionalización de variables	37
3.5.1 Variable independiente.....	38
3.5.2 Variable dependiente	39
3.6 Plan de recolección de información	41
3.6.1 Observación	41
3.6.2 Documental	41
3.6.3 Experimental	41
3.7 Plan de procesamiento de la información	41
3.7.1 Procesamiento de la información recogida	41
3.7.2 Análisis e interpretación de los resultados.....	42
CAPÍTULO IV.....	43
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	43
4.1 Análisis de resultados	43
4.1.1 Proceso propuesto para el análisis de resultados	43
4.2 Recolección de datos preliminares	44
4.2.1 Características de la carrocería	44
4.2.2 Materiales utilizados en la carrocería	45
4.3 Modelo de elemento finito de la sección frontal	46
4.3.1 Generación de la geometría.....	46

4.3.2	Modelo para simulación de impacto según el reglamento UNECE R 29	50
4.3.3	Preparación de la geometría.....	51
4.3.4	Generación de la Malla	54
4.3.6	Velocidad inicial del péndulo	57
4.3.7	Definición del Material	59
4.4	Simulación del impacto frontal según el reglamento UNECE R 29	60
4.4.1	Resultados de la simulación del impacto frontal	61
4.5	Validación de los resultados	63
4.6	Análisis de resultados	64
4.7	Verificación de la hipótesis.....	87
	CAPÍTULO V	90
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
5.1	Conclusiones	90
5.2	Recomendaciones	91
	Bibliografía	92

LISTA DE ANEXOS

Anexo A1 Reglamento R 29 de la UNECE, concerniente la aprobación de vehículos con vista a la protección del ocupante de la cabina de un vehículo comercial.....	93
Anexo A2 Especificaciones del perfil estructural cuadrado utilizado en la superestructura.....	114
Anexo A3 Especificaciones del perfil estructural rectangular utilizado en la superestructura.....	115
Anexo A4 Ensayo de simulación computacional del impacto mediante el método de elementos finitos.....	116
Anexo A5 Planos de especificaciones del modelo 7.....	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Esfuerzo – Deformación Unitaria.	11
Figura 2. Análisis de esfuerzos en la estructura de un autobús.	14
Figura 3. Métodos de soluciones aproximadas para problemas de ingeniería	15
Figura 4. Idealización de un sistema con elementos finitos.	16
Figura 5. Comportamiento elástico plástico de un material cargado axialmente..	19
Figura 6. Diagrama de la estructura de los métodos de integración directa.	22
Figura 7. Simulación de un impacto frontal entre 2 vehículos.	23
Figura 8. Chasis hino FC disponible en mercado ecuatoriano	25
Figura 9. Imagen del montaje de la carrocería.	26
Figura 10. Paneles que conforman la superestructura de un autobús.	26
Figura 11. Elementos estructurales del bastidor.	27
Figura 12. Estructura de los paneles laterales.	27
Figura 13. Estructura del panel del techo.	28
Figura 14 Comportamiento de la deformación de un autobús en un impacto frontal.	29
Figura 15. Movimientos del ocupante durante un impacto frontal.	31
Figura 16. Impacto frontal de acuerdo al reglamento R 29 de UNECE	32
Figura 17. Maniquí usado para verificar el espacio de supervivencia.	33
Figura 18. Categorías Fundamentales	35
Figura 19 Diagrama del proceso de análisis de resultados	43
Figura 20. Modelo de bus interprovincial.	44
Figura 21. Modelo tridimensional de los componentes de la superestructura de un autobús	45
Figura 22. Modelo del chasis.	47
Figura 23. Modelado de las placas de sujeción del volante.	48
Figura 24. Modelo del volante.	48
Figura 25. Modelo del maniquí de prueba según el reglamento UNECE R 29.	49
Figura 26. Modelo del péndulo de impacto según el reglamento UNECE R 29. .	50
Figura 27. Modelo de los componentes para simulación de impacto según el reglamento UNECE R 29.	51
Figura 28. Geometría de los componentes del modelo discreto.	53

Figura 29. Mallado de los componentes para simulación de impacto según el reglamento	54
Figura 30. Control de malla en unión de componentes.	55
Figura 31. Distancias entre el volante y el espacio de supervivencia.	56
Figura 32. Gráfica de Esfuerzo – Deformación del material utilizado en la simulación.	59
Figura 33. Proceso de verificación antes de ejecutar la simulación.	60
Figura 34. Simulación del impacto frontal impacto según el reglamento UNECE R 29. a) Instante de inicio del impacto, tiempo=0,000s. b) Durante el impacto, tiempo=0,029s. c) Máxima intrusión, tiempo=0,152s. d) Fin de la simulación, tiempo=0,200s.	61
Figura 35. Desplazamiento del volante respecto al espacio de supervivencia en la dirección Y.....	62
Figura 36. Deformación plástica efectiva del frente de la superestructura del autobús.	62
Figura 37. Gráfica de las energías presentes en el impacto frontal.	63
Figura 38. Sección del frente para análisis del comportamiento frente al impacto frontal.	64
Figura 39. Distribución t de student de datos.....	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de los vehículos de transporte público de pasajeros intraregional, interprovincial e intraprovincial.	24
Tabla 2.2 Capacidades permitidas de pasajeros.	24
Tabla 2.3 Descripción de las regulaciones respecto a la seguridad de los ocupantes de vehículos.	30
Tabla 2.4 Características físicas del maniquí de prueba.	33
Tabla 3.1 Matriz de la variable independiente.	38
Tabla 3.2 Matriz de la variable dependiente.	39
Tabla 4.1 Dimensiones generales del modelo de autobús interprovincial.	44
Tabla 4.2 Descripción de los componentes y materiales de la superestructura del autobús.	45
Tabla 4.3 Características de los elementos finitos utilizados.	51
Tabla 4.4. Descripción del tipo de geometría utilizado en los componentes del modelo.	53
Tabla 4.5 Tipo de interacción entre componentes del modelo.	56
Tabla 4.6 Características de tipo de contacto utilizado para la simulación.	57
Tabla 4.7 Características del material utilizado en el modelo discreto.	59
Tabla 4.8 Características de los modelos de estudio.	65
Tabla 4.9 Contraste de hipótesis para los modelos analizados.	89

AGRADECIMIENTO

Al Ing. César Arroba, Mg director de tesis, autoridades y profesores de la Maestría de Diseño Mecánico por su gestión y conocimientos impartidos. A la empresa CORPMEGABUS CIA. LTDA por facilitar el desarrollo del presente trabajo. Al Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero por la colaboración y prestación de servicios.

DEDICATORIA

A Dios la mayor fuente de sabiduría y fortaleza, a mis padres y hermanos por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. A mis amigos por sus consejos y enseñanzas.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO

TEMA:

“DETERMINACIÓN DE CONFIGURACIONES ESTRUCTURALES DE UN
FRENTE DE AUTOBÚS INTERPROVINCIAL Y SU INCIDENCIA EN LA
RESISTENCIA AL IMPACTO FRONTAL MEDIANTE EL MÉTODO DE
ELEMENTOS FINITOS”

AUTOR: Ing. Santiago Alejandro López Ortiz

DIRECTOR: Ing. César Hernán Arroba Arroba, Mg

FECHA: 23 de Septiembre del 2016

RESUMEN EJECUTIVO

La investigación se basa en la simulación de un impacto frontal de la sección frontal de un autobús interprovincial mediante el método de elemento finito para analizar la resistencia de diferentes configuraciones estructurales y verificar el cumplimiento del Reglamento R 29 de la UNECE. Para realizar la simulación se generó la geometría de los componentes principales de un autobús interprovincial que intervienen en un impacto frontal, asignando las propiedades mecánicas del material y condiciones de frontera que recreen el evento lo más cercano a la realidad, luego se determinó que elementos estructurales se ven más afectados durante el choque con el fin de modificar sus características y crear modelos que puedan ser evaluados bajo las mismas condiciones del ensayo. De los modelos obtenidos se validan y analizan los resultados de la simulación numérica con el propósito de encontrar una configuración estructural con la que ninguno de los componentes de la carrocería invada el espacio de supervivencia del conductor y se cumpla con el reglamento UNECE R 29.

Descriptor: Impacto frontal, Carrocería, Autobús, Espacio de supervivencia, Simulación, FEA, UNECE R 29, Resistencia, Seguridad pasiva, Deformaciones.

TECHNICAL UNIVERSITY OF AMBATO
POSTGRADUATE CENTER
MECHANICAL DESIGN MASTER DEGREE PROGRAM

THEME:

“DETERMINATION OF STRUCTURAL CONFIGURATIONS OF A FRONT
INTERPROVINCIAL BUS AND ITS IMPACT ON FRONTAL IMPACT
RESISTANCE BY FINITE ELEMENT METHOD”

AUTHOR: Ing. Santiago Alejandro López Ortiz

TUTOR: Ing. César Hernán Arroba Arroba, Mg

DATE: 23 de Septiembre del 2016

EXECUTIVE SUMMARY

The Research is based on the frontal impact simulation of the front section bus with the Finite Element Method for analyzing the resistance of different structural configurations and verify compliance with Regulation ECE R29.

To simulate the geometry of the main components of an interprovincial bus involved in a frontal impact was made by allocating the material's mechanical properties and boundary conditions to recreate the closest to real event, then was determined that Structural Elements they are more affected during the crash in order to change their characteristics and create models that can be evaluated under the same test conditions. From the obtained models are validated and analyze numerical simulation results in order to find a structural configuration with which none of the components of the body intrudes driver survival space and comply with regulations UNECE R 29.

Keywords: Frontal Impact, Bodywork, Bus, Survival space, Simulation, FEA, UNECE R 29, Resistance , Passive safety, Deformations.

INTRODUCCIÓN

En el trabajo de Titulación, modalidad Informe de Investigación, denominado “Determinación de configuraciones estructurales de un frente de autobús interprovincial y su incidencia en la resistencia al impacto frontal mediante el método de elementos finitos” es de mucha importancia para el mejoramiento de los sistemas de protección en las fábricas de autobuses del país.

La investigación fue desarrollada con datos obtenidos en la fábrica de un bus interprovincial para generar un modelo CAD y simular un impacto frontal bajo las condiciones del Reglamento UNECE R 29 y determinar la resistencia de la superestructura.

En el capítulo I, se analiza el planteamiento del problema desde: contextualización, análisis crítico, prognosis, formulación del problema, preguntas directrices, delimitación del problema, justificación y el planteamiento de los objetivos.

En el capítulo II, se conforma el Marco Teórico para sustentar el trabajo de investigación, se elabora: los antecedentes, el fundamento teórico, fundamentación filosófica y legal, las categorías fundamentales, la hipótesis y el señalamiento de las variables.

En el capítulo III, se explica la metodología a seguir en el proceso de investigación y está conformado por: enfoque, modalidad básica de investigación, población y muestra, operacionalización de variables, plan de recolección de datos y el plan de procesamiento de la información.

En el capítulo IV, se obtienen los resultados de la investigación y se procesan, el capítulo está compuesto por: análisis de resultados, recolección de datos preliminares, modelo de elemento finito de la sección frontal, simulación del impacto frontal según el reglamento UNECE R 29, validación de resultados, análisis de resultados y la verificación de la hipótesis.

Por último, en el capítulo V, se generan las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Tema

“Determinación de configuraciones estructurales de un frente de autobús interprovincial y su incidencia en la resistencia al impacto frontal mediante el método de elementos finitos.

1.2 Planteamiento del problema.

1.2.1 Contextualización.

Durante el diseño de carrocerías de autobuses la seguridad del conductor y los pasajeros en un accidente es una tarea importante a considerar, para ello muchas naciones poseen sus propias normativas y reglamentos que garantizan la integridad de sus ocupantes en eventos como choques o vuelcos. Además, es notable el desarrollo en temas de seguridad de países de la Unión Europea que sirven como referencia para países que no cuentan con su propia normativa.

A nivel mundial es ampliamente utilizado el reglamento ECE R 029 para la homologación de vehículos comerciales medianos y pesados en los cuales es requerido asegurar el espacio de supervivencia del ocupante de la cabina, éste consta de tres ensayos que son: impacto frontal, resistencia del techo y ensayo de partición. El ensayo de impacto frontal se ha implementado a otros tipos de vehículos como el caso de un vehículo comercial liviano en India (Sharma M, 2013), en el cual concluye que la posición del péndulo juega un papel importantes en la determinación del espacio de supervivencia y se debe posicionar la placa de impacte basándose en la posición de los ocupantes de vehículos de la categoría N1.

También son conocidos varios trabajos que analizan el impacto frontal simulado con Métodos de Elementos Finitos MEF en los que se validan los resultados teóricos con experimentales (Tejasagar A, 2012), (Mirzaamiri R, 2012). Otra reglamentación muy conocida para los países norteamericanos es la FMVSS N° 208 de la NHSTA que analiza el impacto frontal contra obstáculos como: barreras, pared rígida y vehículos en diferentes direcciones de impacto para evaluar la protección de los ocupantes del vehículo.

En Norteamérica (Tech and et al, 2005) presentan un estudio con simulación de un impacto frontal de un bus contra una pared rígida utilizando las recomendaciones de la norma norteamericana y comparando los resultados con los de obtenidos experimentalmente de una sección de la superestructura del bus. En diversos trabajos como el de (Walber M et al, 2014) se estudian otros componentes del autobús como la placa de sujeción de los asientos ya que son considerados críticos en caso de un impacto frontal por la severidad del daño en los ocupantes que puede ocurrir.

En el Ecuador existen trabajos relacionados al comportamiento de la superestructura de un bus en eventos de choques como el realizado por (Cárdenas D et al, 2014) donde se calcula la energía absorbida en un impacto frontal como parte de la presentación de una propuesta de diseño estructural para una carrocería de buses de servicio interprovincial y el trabajo de (Arroba C, 2013) que tiene como objetivo analizar el comportamiento mecánico de una sección de la superestructura de un autobús interprovincial sometido a volcadura.

La industria carrocera principalmente en la zona centro del país ha visto un incremento importante en su producción, en parte por el planeamiento y proyectos impulsados por el Ministerio de Industrias y Productividad (MIPRO), la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SEMPLADES) entre otros, dentro del marco del cambio de la matriz productiva constituyéndose por ejemplo en la segunda actividad principal de la provincia de Tungurahua con un número de 1342 personas ocupadas, con una producción promedio mensual de 127 carrocerías con una facturación promedio mensual de 6550 000 dólares según un informe de la

Cámara Nacional de Fabricantes de Carrocerías CANFAC realizada en abril de 2014.

1.2.2 Análisis crítico.

La reglamentación impuesta por la Agencia Nacional de Tránsito ANT donde se establecen las normas de cumplimiento para la homologación vehicular no toman en cuenta el efecto de un impacto frontal sobre la seguridad de los ocupantes como en el caso de reglamentaciones internacionales, junto a la falta de laboratorios en nuestro país para realizar ensayos de impacto en vehículos, la complejidad y gran cantidad de recursos para realizar ensayos de choque simulado y la falta de investigaciones en el área de interés causa que sean escasos los conocimientos del comportamiento de la superestructura de los autobuses que prestan el servicio de transporte público, interprovincial, turismo o escolar, constituyéndose en un motivo de preocupación si consideramos que el choque frontal fue el tercer tipo principal de siniestros de tránsito en el año 2014 luego del choque lateral y el atropellamiento, según estadísticas de la ANT.

Además organizaciones nacionales como Justicia Vial en un informe del 2011 señala que el 60% de los autobuses no cumplen con la norma INEN 1323 para la construcción de la carrocería, además advierten el mal uso del chasis de camión en lugar del chasis de ómnibus como es recomendado por último la utilización de materiales como tubos galvanizados con poca capacidad de deformarse y una separación entre cerchas muy grande convierten a éste tipo de vehículos en un riesgo para la seguridad de los pasajeros.

1.2.3 Prognosis.

La falta de un estudio de diferentes configuraciones estructurales de la sección frontal de la superestructura de un autobús y su incidencia en la resistencia a un impacto frontal supone un riesgo para la integridad de la superestructura al no conocer el comportamiento mecánico y que en un choque supone grandes deformaciones de la superestructura e incluso llegar a la fractura de alguno de sus componentes que por consecuencia pondría en compromiso la seguridad de los ocupantes del vehículo. Además, se debe tomar en cuenta que los modelos

fabricados se encuentran prestando un servicio de transporte de pasajeros y no son sometidos a ningún tipo de control del estado real de superestructura y su capacidad de seguridad pasiva.

1.2.4 Formulación del problema.

¿Las configuraciones estructurales de la sección frontal de un autobús, incidirá sobre su resistencia en un choque frontal?

1.2.5 Preguntas directrices.

¿Se puede simular un impacto frontal aplicando las condiciones y restricciones del procedimiento de ensayo descrito en del reglamento R 029 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa?

¿Las deformaciones resultantes en relación al espacio de supervivencia del modelo de un autobús interprovincial cumple con el reglamento R 029 de UNECE?

¿Qué tipo de modificaciones de la configuración estructural en el frente de la carrocería de un autobús interprovincial se pueden hacer para que se cumpla el reglamento R 029 de UNECE?

¿En qué componentes de la sección frontal de la superestructura se producirá ruptura o deformaciones plásticas excesivas luego del impacto frontal?

1.2.6 Delimitación del problema.

1.2.6.1 Delimitación del contenido.

Las áreas de conocimiento para esta investigación se encuentran dentro de la Ingeniería Mecánica, Diseño Mecánico, Resistencia de Materiales y utilizando herramientas de cálculo como el Método de Elementos Finitos.

1.2.6.2 Delimitación espacial.

El estudio de las configuraciones estructurales de la sección frontal de un autobús se llevará a cabo en taller de producción de la empresa fabricante de carrocerías

MEGABUS ubicada en la ciudad de Riobamba provincia de Chimborazo. La simulación del impacto frontal mediante el método de elementos finitos se realizará en el Centro de Fomento Carrocero situado en la ciudad de Ambato provincia de Tungurahua.

1.2.6.3 Delimitación temporal.

El estudio se realizará en un período que comprende los meses Noviembre 2015 – Septiembre 2016.

1.3 Justificación

El desarrollo de sistemas de seguridad activa o pasiva en los vehículos es uno de los principales objetivos en la industria automotriz moderna, de tal manera que los fabricantes de vehículos invierten gran cantidad de recursos en la investigación y perfeccionamiento de sistemas cada vez más versátiles que aseguren la seguridad de los pasajeros y más aún cuando se considera un número de pasajeros grande como en el caso de autobuses de servicio urbano, interprovincial, de turismo y escolar.

Por ser el choque frontal uno de los siniestros de tránsito con mayor ocurrencia existe la necesidad de someter a la superestructura de los autobuses a pruebas, ensayos y análisis que nos permitan medir parámetros como: resistencia, rigidez, energía absorbida, puntos críticos y características del comportamiento mecánico de la carrocería.

El reglamento R 029 de la que en principio fue creado para la homologación de vehículos comerciales pesados, pero por la importancia de los datos obtenidos y la validación de los mismos mediante diversas técnicas experimentales es considerada en diversos países para el estudio del impacto frontal en vehículos de transporte de pasajeros. Este estudio significa un aporte para garantizar una protección adecuada de los pasajeros en un siniestro de éste tipo y además proveerá al fabricante de carrocerías MEGABUS la información necesaria para la evaluación del estado actual de sus carrocerías y posibles modificaciones en su diseño.

Otra información relevante que se obtendrá de éste estudio es: estado final de los componentes críticos de la superestructura, energía absorbida por la superestructura; éste análisis se desarrolla mediante métodos de elementos finitos que proporcionan un mejor entendimiento del fenómeno, proporcionan datos confiables y constituyen una aplicación de los conocimientos de Diseño Mecánico al ambiente real de la industria carrocera local.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Analizar configuraciones estructurales en un frente de un autobús interprovincial y su resistencia a un impacto frontal mediante el método de elementos finitos.

1.4.2 Específicos

- Establecer la geometría del modelo, las condiciones de borde y la aplicación de las recomendaciones del reglamento R029 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa con el fin de obtener resultados más cercanos a impacto real.
- Modificar la estructura frontal del autobús interprovincial mediante la variación de espesores y el uso de diferentes componentes estructurales para obtener la configuración más resistente al impacto frontal.
- Evaluar el cumplimiento del reglamento R029 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa en las diferentes configuraciones estructurales, verificando la no intrusión del espacio de supervivencia durante el impacto frontal con el propósito de ofrecer una alternativa de diseño más seguro a los fabricantes de autobuses.
- Observar el modo de fallo de los materiales mediante el análisis de los resultados obtenidos en la simulación para identificar componentes críticos de la sección frontal de la superestructura del autobús.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes investigativos

2.1.1 Antecedentes

En la Universidad de Wichita en Estados Unidos se determinó la cinemática y el mecanismo de daño de los pasajeros del autobús en un impacto frontal cuyo escenario es definido por el estudio de reportes de accidentes fatales que involucran a autobuses y se concluye que la cabeza y el cuello son las zonas del cuerpo con mayor daño ya sea por el contacto cuerpo a cuerpo o por el contacto del cuerpo contra el asiento del vehículo (Olivares, Yadav, 2009).

En el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Thonburi en Tailandia se analizó la resistencia estructural y las características de deformación de la superestructura de un autobús sometido a un impacto frontal mediante las regulaciones del reglamento R029. Se modela la sección frontal con la ayuda del programa HYPERMESH y el análisis es configurado como un código dinámico explícito no lineal en ABAQUS. La seguridad pasiva basada en el espacio de supervivencia no fue satisfactoria para el modelo estudiado por lo que se proponen otros modelos basados en dos zonas estructurales que aumentan la absorción de energía y protegen al conductor de cualquier contacto con la estructura (Jongpradist P, Senawat S, Muangto B, 2015).

Para validar los resultados de los ensayos propuestos en el reglamento R029 con valores obtenidos por Métodos de Elementos Finitos. La fábrica de camiones y buses ASHOK LEYLAND creó simulaciones que se formularon para verificar varios aspectos de la seguridad de la cabina mediante el software ALTAIR y el solver RADIOSS y se observó que existe una buena correlación de los datos teóricos y los datos experimentales atestando el uso de métodos numéricos en

diferentes investigaciones (Philip J, Mungale S, 2013). Otro caso que estudia un modelo de bus y su comportamiento en un choque es el realizado por el Colegio de Ingeniería de la Universidad Estatal de Florida donde se crea un modelo por Elementos Finitos de todo el autobús asignando los diferentes componentes y materiales y asignando los mismos tipos de conexiones y uniones para realizar un estudio de impacto frontal y lateral en diferentes escenarios, otro objetivo de este trabajo fue analizar una estructura modificada a partir del modelo de fábrica como muchos de los fabricantes de autobuses lo hacen en nuestro país. Se concluye que los resultados numéricos fueron comparados con los resultados experimentales en diferentes niveles de validación, encontrando una buena correlación para cada caso; el ensayo de volcamiento de acuerdo a la norma R 66 puede registrar perturbaciones de las condiciones iniciales dependiendo de la estructura del bus.. (Kwasniewski L, et al, 2005).

El efecto que tiene el proceso de conformado en diferentes componentes estructurales en un choque también fue estudiado, un ejemplo es el estudio realizado por varios investigadores del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Waterloo en Canadá que determinan en primera instancia el esfuerzo residual y la reducción de espesor producidos en el conformado de perfiles circulares de aluminio de rieles tipo S, medidos con técnicas experimentales y validadas mediante simulaciones numéricas para llegar a la conclusión de que la fuerza pico en el impacto aumenta entre un 25-30% y la energía absorbida en el punto de desgarro se incrementa en un 18 % solo por el efecto del conformado.(Oliveira D, et al, 2006)

2.2 Fundamentación filosófica

La presente investigación que trata sobre las configuraciones estructurales del frente de un autobús interprovincial y su resistencia en un impacto frontal cabe dentro del paradigma crítico propositivo; es crítico porque se conseguirá ampliar los conocimientos del comportamiento ante un choque frontal de un autobús de fabricación nacional y es propositivo porque se puede aplicar el procedimiento para predecir y disminuir el daño causado sobre la superestructura y el ocupante en un choque frontal.

2.3 Fundamentación legal

La presente investigación se desarrollará basándose en el reglamento UNECE R 29 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa en relación a la protección de los ocupantes de la cabina de un vehículo comercial.

2.4 Fundamento Teórico

2.4.1 Mecánica de Materiales

La mecánica de materiales es una rama de la mecánica que estudia los efectos internos de esfuerzos y deformaciones en un cuerpo sólido que está sometido a un estado de cargas externas. El esfuerzo está asociado a la resistencia del material del cual está hecho el cuerpo, mientras la deformación se refiere al cambio de forma que experimenta el cuerpo. Además, la Mecánica de Materiales incluye el estudio de la estabilidad estructural de sus componentes en situaciones como el pandeo, para ello esta ciencia utiliza diversos métodos de cálculo basados en códigos de ingeniería y principios físicos. (Hibbeler R, 2011)

En la asignatura se estudian las propiedades mecánicas de los materiales que los definen mecánicamente, estos términos tales como: elasticidad, inelasticidad, plasticidad, límite de fluencia, límite de resistencia última, energía de deformación, capacidad de carga, etc. Por ello se tiene gran aplicación en diferentes áreas de la ingeniería como: Aeronáutica, Mecánica, Civil, Biomédica entre otras, ya que con sus conceptos se fundamenta el diseño y análisis de diversos sistemas mecánicos y estructurales, a continuación se describen dos conceptos que son: (Gere J, 2009)

2.4.1.1 Deformación

Al estudiar la interacción de un cuerpo con fuerzas externas y el efecto estático o dinámico producido sobre él, se hacen tres tipos de consideraciones respecto a su capacidad de deformarse y son:

-Sólido rígido o no deformable.

-Sólido deformable.

-Sólido real.

De ellos el estudio del sólido deformable es el más apropiado para aplicar principios y métodos de cálculo que difícilmente se aplicarían para el sólido real, en consecuencia, las deformaciones calculadas se entienden que se producen en un material homogéneo y que mantienen sus propiedades físicas, químicas y mecánicas iguales en las diferentes direcciones. También podemos distinguir las deformaciones unitarias cuando las relacionamos a las dimensiones originales del cuerpo y totales si las consideramos como el cambio final sus distancias. Las deformaciones de un cuerpo pueden considerarse elásticas cuando el esfuerzo no supera el límite o esfuerzo de fluencia del material como se ve en la Figura 1 y al retirarse sus cargas regresa a su forma original, y son llamadas deformaciones plásticas cuando el esfuerzo producido supera el límite mencionado y queda un cambio de forma remanente aun al retirar sus cargas. El uso de los diagramas de Esfuerzo – Deformación Unitaria que es propio para cada material es muy útil para apreciar los valores de esfuerzo o límites de ruptura fluencia o proporcionalidad.

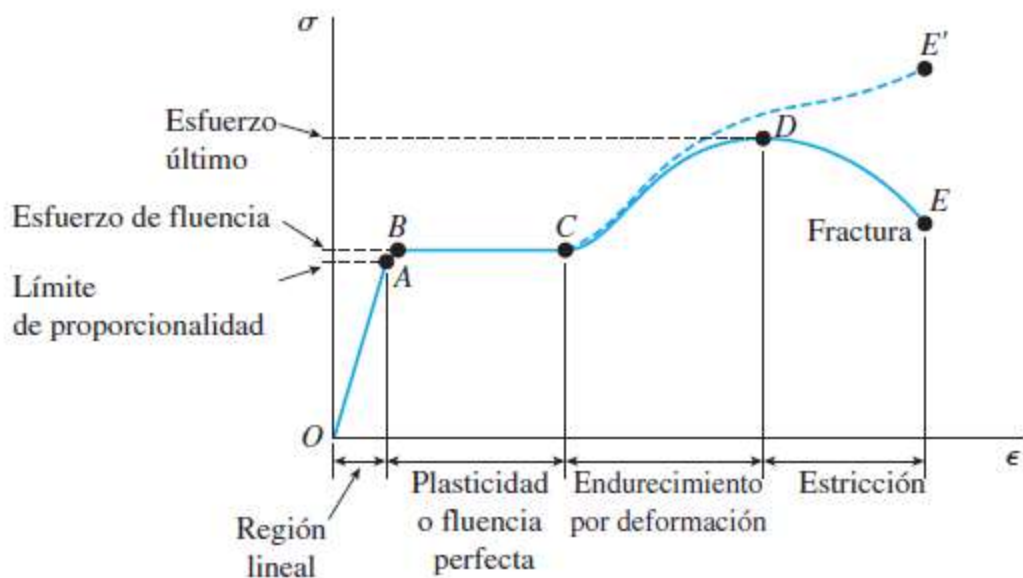


Figura 1. Diagrama de Esfuerzo – Deformación Unitaria.

(Fuente: Modificada de (Hibbeler R, 2011))

2.4.1.2 Esfuerzo

El esfuerzo se considera el resultado de la oposición interna que presenta un cuerpo al sometimiento de cargas o fuerzas externas ya sean puntuales o distribuidas, si consideramos que las fuerzas internas consiguen el equilibrio estático del cuerpo y que se distribuyen sobre un área determinada entonces podemos definir según la dirección respecto al área dos tipos de esfuerzos: normales o axiales y tangenciales o cortantes, se pueden determinar sus valores mediante las siguientes relaciones. (Hibbeler R, 2011)

Si el esfuerzo normal es producido por una carga perpendicular al área, el esfuerzo se denomina tracción o compresión.

$$\sigma = \frac{F_n}{A} \quad (2.1)$$

Mientras que, si la carga produce un momento de giro sobre el cuerpo, se le designa como un esfuerzo de flexión.

$$\sigma_f = \frac{M_f \cdot c}{I} \quad (2.2)$$

Ahora para los esfuerzos tangenciales producidos por una carga paralela al área, el esfuerzo se llama cortante debido al efecto que produce.

$$\tau = \frac{F_c}{A_c} \quad (2.3)$$

El último esfuerzo es el producido por un momento que trata de torcer al cuerpo sobre el que se aplica, así que se llamará esfuerzo de torsión.

$$\tau = \frac{T \cdot c}{J} \quad (2.4)$$

Donde

σ = Esfuerzo Normal.

τ = Esfuerzo Tangencial.

F_n = Fuerza Normal.

A = Área transversal del cuerpo para el análisis.

M_f = Momento flector aplicado al cuerpo.

c = Distancia entre el eje neutro del área y la fibra exterior más lejana.

I = Segundo momento de inercia del área del cuerpo estudiada.

T = Momento torsor.

J = Momento polar de inercia de la sección analizada.

Las unidades de los esfuerzos comúnmente utilizadas corresponden a MPa y psi según el sistema. Estos esfuerzos pueden ser combinados dependiendo del tipo de carga y el lugar de aplicación.

2.4.2 Métodos de Elementos Finitos

La idea del uso de métodos de elementos finitos parte de la necesidad de resolver problemas complejos al remplazarlo por uno simplificado, esto supone que no se ha de determinar la solución exacta para el problema en análisis sino una solución aproximada. En muchos casos el uso de herramientas matemáticas no es suficiente cuando se requieren analizar problemas prácticos, en tales casos el uso de métodos de elementos finitos es preferible ya que nos da la posibilidad de mejorar y refinar las soluciones aproximadas mediante la colaboración de recursos computacionales.

En los métodos de elementos finitos la solución viene dada por la unión de pequeñas subregiones interconectadas llamadas elementos finitos, un cuerpo o forma geométrica definida están estructurados por varios de éstos elementos que contienen en sí sus propias soluciones dependiendo de las condiciones de equilibrio general de la estructura y de las variables que se relacionan al sistema físico. (Zienkewicz O, 2005)

2.4.2.1 Áreas de análisis.

Hay un número de áreas de interés muy amplio para la aplicación de métodos de elementos finitos, se mencionan entre las principales las siguientes:

- Mecánica estructural, análisis estático y dinámico.
- Transferencia de calor, análisis estable y transitorio.
- Mecánica de fluidos.
- Ingeniería de control.

Mecánica estructural. La naturaleza del análisis mecánico estructural puede ser lineal o no lineal con aplicaciones que buscan determinar las deformaciones y la distribución de esfuerzos, también relacionadas con la estabilidad de la estructura y que está sujeta a cargas y condiciones externas de origen mecánico o térmico. Las principales áreas de estudios son: estática, vibración de estructuras convencionales y rotativas con o sin amortiguamiento, estabilidad, respuesta dinámica, viscoelasticidad, plasticidad, fractura y propagación de grieta, desplazamientos y esfuerzos térmicos, esfuerzos residuales y optimización, un ejemplo es el análisis estructural de un autobús como se muestra en la siguiente figura. (Zienkewicz O, 2005)

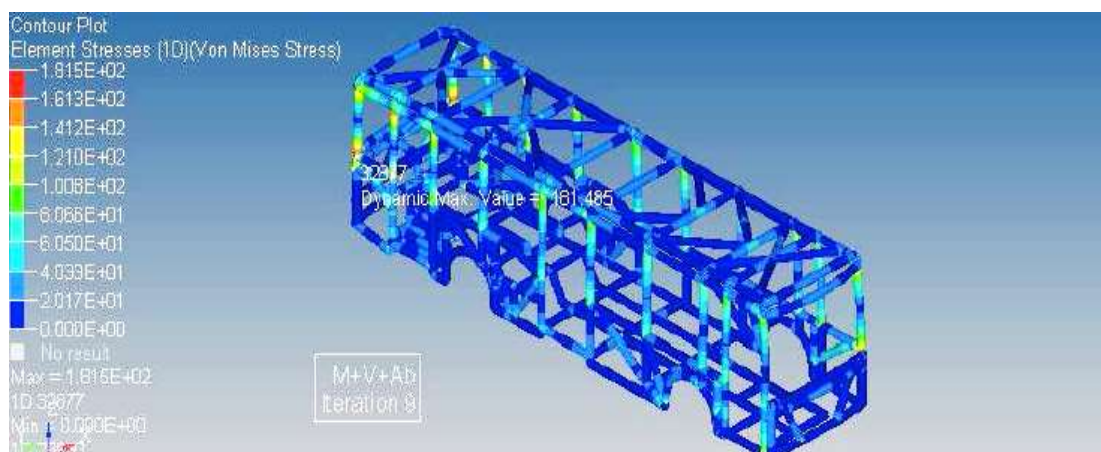


Figura 2. Análisis de esfuerzos en la estructura de un autobús.
(Fuente: (Pozo J, 2014))

2.4.2.2 Métodos de análisis.

Los problemas de ingeniería se plantean en base a casos prácticos que pueden ser representados por ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales con sus condiciones de frontera inscritas. La resolución de estas ecuaciones se puede conseguir mediante la integración o derivación de las mismas, en el primer método se rempazan con derivaciones finitas para aproximar a la solución mientras que mediante el otro enfoque se consigue una desratización más precisa de dominios de soluciones irregulares y está basado en el uso de funciones triples con parámetros indeterminados. También el método de residuo ponderado o el método de función de prueba pueden utilizarse para encontrar la solución. En la mecánica de sólidos la ecuación diferencial que gobierna el fenómeno es la ecuación de energía potencial o alguna variante de ésta.

En los métodos de elementos finitos una continuidad es discretizada en dominios pequeño o elementos, se procura el uso de funciones de prueba en cada elemento para lo cual el método minimiza la energía potencial total. La idea es que la discretización arroje un resultado similar al que se daría analizando el sistema completamente continuo. (Gupta K, 2003)

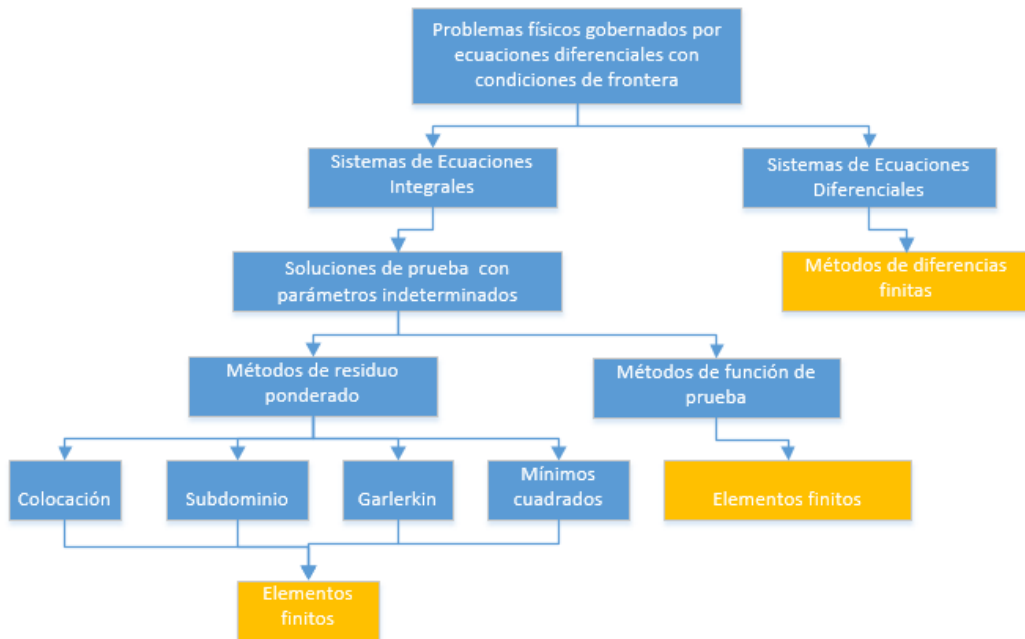


Figura 3. Métodos de soluciones aproximadas para problemas de ingeniería (Fuente: Modificada de (Gupta K, 2003))

Las funciones de prueba para el campo de variables con cada elemento son seleccionados de una interpolación adecuada de estos valores en los nodos de cada elemento, la aplicación de una de las dos formulaciones integrales provee las matrices de propiedad del elemento deseado. Un arreglo apropiado de estas matrices produce el sistema global de ecuaciones que son modificadas para incorporar las condiciones de frontera. En la solución se dan valores de funciones nodales desconocidas, a partir de estos valores nodales otro dato puede ser obtenido como respuesta. Por ejemplo: en el área de la mecánica estructural, los desplazamientos nodales son las incógnitas calculadas y las variables derivadas son los esfuerzos generados. Los esfuerzos pueden ser determinados a partir de los desplazamientos nodales una vez que se han determinado de la resolución del sistema de ecuaciones. (Gupta K, 2003)

2.4.2.3 Aplicación de los elementos finitos a la mecánica de materiales.

Un análisis de un sistema mecánico o estructural siempre involucra el cálculo de los esfuerzos y las deformaciones producidas por las cargas externas sean mecánicas o térmicas, estas magnitudes sirven como indicadores y medios de verificación de un diseño seguro. EL análisis envuelve primero la discretización de continuidad de un problema (estático o dinámico) del que se obtienen varias ecuaciones algebraicas que pueden ser resueltas hasta determinar sus incógnitas. Según (Gupta K, 2003), el procedimiento que generalmente es utilizado está compuesto por los siguientes pasos:

1. Idealizar la continuidad como un conjunto de regiones pequeñas conocidas como elementos finitos, como se observa en la siguiente figura.

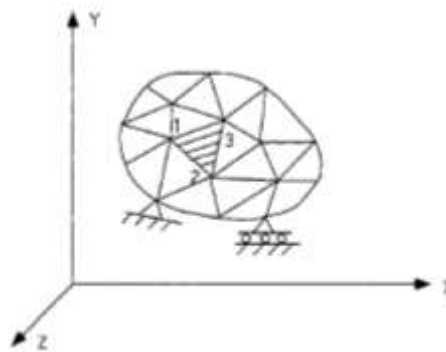


Figura 4. Idealización de un sistema con elementos finitos.

(Fuente: (Gupta K, 2003))

2. Seleccionar los nodos en las fronteras entre elementos con el propósito de establecer las funciones de interpolación.
3. El uso de funciones de interpolación para expresar los valores de desplazamiento en los puntos de los elementos interiores en términos de variables nodales.
4. Desarrollo de matrices de fuerza – desplazamientos usando el método de residuos ponderados o principios de variación.
5. Ensamble de las matrices de equilibrio en coordenadas globales para todos los elementos de matriz y resolución del conjunto de ecuaciones algebraicas para los valores nodales desconocidos.
6. Calcular los elementos de esfuerzo y deformación a partir de los desplazamientos nodales calculados.

Para un análisis estructural en general es necesario desarrollar ecuaciones de matrices basadas en la teoría de elasticidad de los materiales comúnmente utilizados en este tipo de aplicaciones, la zona lineal que demuestra un comportamiento elástico con deformaciones muy pequeñas en consecuencia de la aplicación de cargas y en un material anisotrópico las deformaciones elásticas se expresan en un sistema rectangular cartesiano relacionando a los esfuerzos tridimensionales correspondientes mediante la ley de Hooke, el sistema de deformaciones totales puede ser expresado así: (Gupta K, 2003)

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \varepsilon_E + \varepsilon_T + \varepsilon_I \\ \varepsilon &= C\sigma + \varepsilon_T + \varepsilon_I\end{aligned}\tag{2.11}$$

Para lo cual

$$\begin{aligned}\varepsilon_E &= \{\varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy} \varepsilon_{zz} \varepsilon_{xy} \varepsilon_{yz} \varepsilon_{zx}\} \\ \sigma &= \{\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{zz} \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{zx}\}\end{aligned}$$

Donde σ , ε_E son los vectores del esfuerzo y las deformaciones elásticas respectivamente. C es un constante de relación, ε_T representa las deformaciones térmicas y ε_I representa las deformaciones iniciales. De la ecuación (2.11) se puede despejar el esfuerzo mediante una relación inversa.

$$\sigma = D\varepsilon - D\varepsilon_T - D\varepsilon_I\tag{2.12}$$

Donde D es el inverso de C .

La matriz D esfuerzo –deformación es simétrica y tiene la siguiente forma compuesta de 21 constantes independientes para un material anisotrópico.

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & \dots & \dots & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & \dots & \dots & d_{26} \\ & & & & & \vdots \\ d_{61} & \text{Simetrica} & & & & d_{66} \end{bmatrix}$$

Mientras que para un material ortotrópico con tres planos ortogonales simétricos, la matriz se reduce a:

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & D_{22} \end{bmatrix}$$

Se pueden introducir las variables: Módulo de elasticidad **E**, Modulo elástico a cortante **G**, coeficiente de Poisson γ , que caracterizan a un material y que pueden ser obtenidos de ensayos de tensión y corte. Ahora las componentes de la matriz D para un material isotrópico asumen los siguientes valores:

$$d_{11} = d_{22} = d_{33} = \frac{(1 - \gamma)E}{(1 + \gamma) \cdot (1 - 2\gamma)}$$

$$d_{12} = d_{13} = d_{23} = \frac{\gamma E}{(1 + \gamma) \cdot (1 - 2\gamma)}$$

$$d_{44} = d_{55} = d_{66} = G = \frac{E}{2(1 + \gamma)}$$

Para problemas tipo lamina (Shell) o tipo placa (Plate) las relaciones de esfuerzo - deformación de un caso general de un material anisotrópico es esfuerzo se expresa como:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & \dots & \dots & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & \dots & \dots & d_{26} \\ & & & & & \vdots \\ d_{61} & \text{Simetrica} & & & & d_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{bmatrix}$$

2.4.2.4 Análisis no lineal.

Generalmente en el estudio de la mecánica de sólidos de las pequeñas deformaciones producidas en un cuerpo se usa una relación lineal para determinar la variación de deformación conforme varia una carga externa que resulta en un esfuerzo. Existen problemas donde esta relación deja de ser aplicable, por ejemplo:

cuando el material presenta un comportamiento viscoelástico o plástico, otro caso sería cuando la geometría del cuerpo es modificada debido a grandes deformaciones producidas en el cuerpo en el proceso de carga.

Un problema se considera no-lineal si la matriz de rigidez y el vector de cargas dependen de los desplazamientos (Wu S, 2008). Para sistemas estructurales y componentes sólidos se puede clasificar la no-linealidad de acuerdo a:

a) No-linealidad de material

Un comportamiento plástico clásico de los sólidos está caracterizado por una única relación esfuerzo – deformación la cual es independiente del valor de la carga, pero a la vez es dependiente de la secuencia de aplicación de la carga. Ahora se puede definir a la plasticidad como la presencia de deformaciones irreversibles aun cuando la carga sea retirada. Al momento de la descarga se mostrará la diferencia del comportamiento uniaxial para un material elástico que mantiene la trayectoria de la curva de esfuerzo – deformación y un material plástico con un cambio significativo de la trayectoria inicial en la curva.

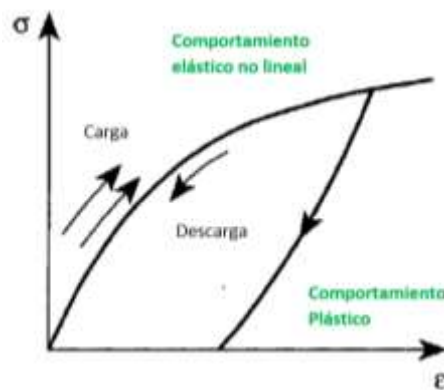


Figura 5. Comportamiento elástico plástico de un material cargado axialmente.
(Fuente: Modificado de (Zienkewicz O, 2005))

Un comportamiento plástico más real está definido por un límite de fluencia (σ_y) donde los valores de deformación inferiores a este cumplen una relación lineal y posterior al límite se produce una etapa de plasticidad ideal para pasar a la etapa de endurecimiento por deformaciones donde la relación esfuerzo – deformación deja de ser lineal. Si el estado de esfuerzos pasa de ser uniaxial a ser multiaxial el

concepto de fluencia debe ser generalizado, para ello es importante señalar que en el desarrollo de una matriz de nueve componentes para representar el tensor solamente se utilizan 6 componentes de las usadas anteriormente, para ello se hace una distinción con una barra bajo ($\underline{\sigma}, \underline{\varepsilon}$) el signo de uso general. (Zienkewicz O, 2005)

Uno de los primeros científicos en sugerir una relación para definir el comportamiento plástico de un material fue Von Misses, su fundamento se basa en los incrementos de deformaciones a partir del límite de fluencia. Muchos autores han validado esta hipótesis resultando aceptada para la mayoría de materiales experimentados.

$$d\underline{\varepsilon}^p = d\lambda F \cdot \underline{\sigma} \quad (2.13)$$

Donde:

$\underline{\varepsilon}^p$ = Tensor de la deformación plástica

$d\lambda$ = Constante proporcional referente a la consistencia plástica

F= Condición de plasticidad asociativa

b) No-linealidad geométrica

En el análisis de esfuerzos y deformaciones de elementos mecánicos generalmente se supone que el área de sección transversal del cuerpo permanece constante durante la aplicación de cargas externas, esto es válido para problemas donde los valores de deformaciones son relativamente pequeños. La no linealidad geométrica se refiere al cambio de la sección transversal que obedece al principio de conservación de masa y es determinada mediante la relación de Poisson; esta consideración se debe tomar en cuenta en casos donde el sólido se somete a grandes deformaciones. (Zienkewicz O, 2005)

c) **No linealidad en las condiciones de frontera**

La no linealidad se produce cuando las condiciones que relacionan el contacto de diversos cuerpos durante un análisis son variables, incluso se puede producir el contacto de una porción de un cuerpo contra otra porción del mismo; éste escenario puede ser resultado de la geometría del cuerpo y las deformaciones resultantes.

Se puede considerar a un análisis no-lineal como una consecución de etapas como se muestra a continuación: (Kim H, 2007)

- Desarrollo del modelo, dependiendo de las capacidades y necesidades.
- Formulación de las ecuaciones gobernantes, se profundizará más adelante sobre el tema.
- Discretización de las ecuaciones, proceso realizado por computadoras en la actualidad pero que requiere el entendimiento por parte del usuario.
- Solución de las ecuaciones, elección de parámetros decisivos para la solución del modelo.
- Interpretación de resultados, criterio para la detección de posibles errores.

2.4.2.5 Análisis dinámico de estructuras elásticas

Existen casos en los que sistemas estructurales están sujetos a cargas dinámicas dependientes del tiempo, donde se requiere conocer la respuesta de la estructura en cuanto a esfuerzos y deformaciones. Para cargas determinísticas cuando son conocidas las funciones de fuerzas la respuesta también es determinista y se puede calcular directamente mediante el método de superposición modal o un método de integración paso a paso o integración directa. En el método de superposición modal cualquier función de carga puede ser tomada como la suma de una serie de pequeñas cargas y la respuesta para la fuerza total se toma como la respuesta acumulada de pasos individuales este método es apropiado para problemas de tipo lineal, mientras en el segundo método la formulación paso a paso se adapta a cada incremento de tiempo y se puede adaptar a una variedad de problemas lineales y no lineales. (Gupta K, 2003)

Método de integración directa. - La limitación del método de superposición nodal para el cálculo de respuesta de excitación dinámica puede ser disipada al aplicar

diversos métodos de integración directa como los que se indica en la figura siguiente. Ahora se puede resolver problemas que involucren frecuencias del espectro o problemas no lineales.

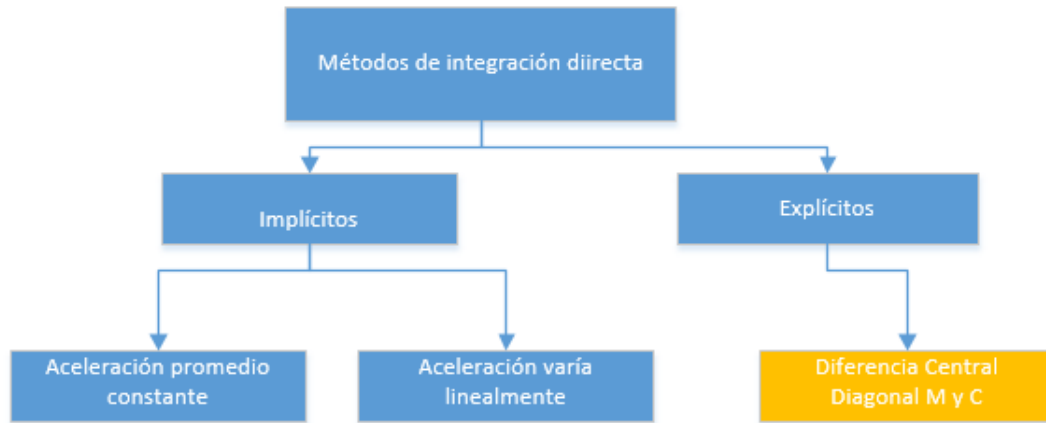


Figura 6. Diagrama de la estructura de los métodos de integración directa.
(Fuente: Modificada de (Gupta K, 2003))

La técnica de resolución puede ser de tipo implícito cuando se calcula el estado del sistema en una ecuación que implica el estado actual y el estado posterior del sistema donde la dependencia del tiempo no es relevante en el problema; otra característica que se presenta en este tipo de problemas es que la aceleración de los cuerpos se mantiene constante o varía linealmente por ejemplo análisis estáticos estructurales. Mientras el método explícito resuelve la ecuación solo analizando el estado posterior al estado actual del sistema produciendo tiempos de resolución menores y siendo el de mayor aplicación en la resolución numérica computacional. Este método es útil para la solución de problemas que dependen del tiempo y experimentan variaciones no lineales de la aceleración de los cuerpos así como grandes deformaciones tal como los casos de: choque, explosión, impacto, etc. (Gupta K, 2003)

2.4.2.6 Simulación virtual de choque de vehículos mediante análisis no lineal explícito.

La simulación de impacto de vehículos es ampliamente utilizada en la actualidad por fabricantes de la industria automotriz, entidades dedicadas a la homologación de vehículos e investigadores relacionados a la seguridad de ocupantes. Esta técnica

permite reducir el valor de costos y tiempo requeridos en ensayos de choque (crash test) o la construcción de prototipos, permitiendo el desarrollo y mejoramiento de los diseños y sistemas de seguridad.



Figura 7. Simulación de un impacto frontal entre 2 vehículos.
(Fuente: (Moradi R, 2013))

La simulación requiere de un software que analice: grandes deformaciones de elementos explícitos bidimensionales o tridimensionales, el contacto entre superficies, asignación de materiales y condiciones de frontera; estas características permiten la obtención de un modelo y una solución discreta que se acerque más al modelo físico real. Además, es necesario contar con una herramienta de post-procesado que permita el análisis y presentación de resultados, mostrando valores de desplazamientos, velocidades, aceleraciones, esfuerzos, etc.

Para evaluar si la simulación de un impacto entre varios cuerpos está dando respuestas cuasi-estáticas y la solución numérica del modelo discreto es correcto, se plantea un balance de energías aplicando la siguiente ecuación: (LS-DYNA Theory Manual, 2006)

$$E_I + E_V + E_{FD} + E_{KE} - E_W = E_I = Constante \quad (2.14)$$

Donde:

E_I = Energía interna, producida por la energía de deformación elástica y plástica y la energía artificial asociada a un control hourglass.

E_V = Energía disipada por mecanismos viscosos.

E_{FD} = Energía friccional.

E_{KE} = Energía cinética.

E_W = Trabajo producido por fuerzas externas.

2.4.3 Superestructura del autobús

El autobús es un medio de movilización de personas en diferentes entornos y con diferentes necesidades, por ello se puede clasificar a los autobuses según su utilización como se muestra a continuación:

- Transporte Urbano
- Transporte interprovincial, intraprovincial, interregional
- Transporte Escolar

Para fines de normalización los vehículos de transporte de pasajeros interprovincial, intraprovincial, interregional se clasifican en dos tipos según la siguiente tabla: (RTE INEN 043, 2010)

Tabla 2.1 Clasificación de los vehículos de transporte público de pasajeros intraregional, interprovincial e intraprovincial.

Denominación	Número de ocupantes incluido el conductor
Minibus	Desde 27 hasta 3
Bus	A partir de 36

(Fuente: (RTE INEN 043, 2010))

Otro cumplimiento que debe cumplir éste tipo de vehículos se refiere a las capacidades máximas de personas y el peso del chasis. (RTE INEN 043, 2010)

Tabla 2.2 Capacidades permitidas de pasajeros.

Según el tipo de vehículo	Número de ejes	PBV promedio de un chasis	Capacidad de pasajeros
Minibus	2 ejes	10 000 kg	Máx 35
Bus	2 ejes	17 000 kg	Máx 45
	Más de 2 ejes	24 000 kg	Máx 53

(Fuente: (RTE INEN 043, 2010))

2.4.3.1 Componentes de la superestructura de un autobús

La superestructura de un autobús cumple dos funciones básicas; la primera es brindar el soporte, fijación y forma a la unidad de transporte, y la segunda función es asegurar la integridad de los pasajeros y ocupantes del vehículo según (Cepeda J, 2006). Los componentes principales de una superestructura de autobús son los siguientes:

Chasis o bastidor: Compone el soporte de todos los sistemas principales del vehículo (motor, suspensión, transmisión, etc). Es utilizado principalmente en vehículos de carga como camiones y autobuses o en casos especiales como autos de competencia, además proporciona el soporte necesario para montar los componentes que mueven la unidad y todos los sistemas mecánicos que lo componen.



Figura 8. Chasis hino FC disponible en mercado ecuatoriano
(Fuente: <http://www.teojama.com>)

Carrocería: Constituye la parte física de la unidad de transporte, está en contacto con los ocupantes al estar dispuesta en ella componentes como: asientos, ventanas, piso, forraje, etc. Además, conforma el soporte estructural del vehículo y le provee de una forma geométrica específica.



Figura 9. Imagen del montaje de la carrocería.
(Fuente: (López F, 2010))

2.4.3.2 Recomendaciones de fabricantes para el diseño de la superestructura de autobuses (Mercedes Benz, 1999)

Entre el bastidor y la superestructura se forma una sola unidad capaz de resistir todas las cargas que actúen como resultado de la operación normal del vehículo. En ninguna circunstancia los esfuerzos producidos sobre la superestructura y el chasis deben provocar deformaciones plásticas.

La superestructura está conformada por 6 paneles como se observa en la figura inferior. Para aumentar la resistencia de los paneles se recomienda el uso de tirantes diagonales y en la unión de los elementos estructurales de los paneles se debe transmitir las fuerzas de forma adecuada.

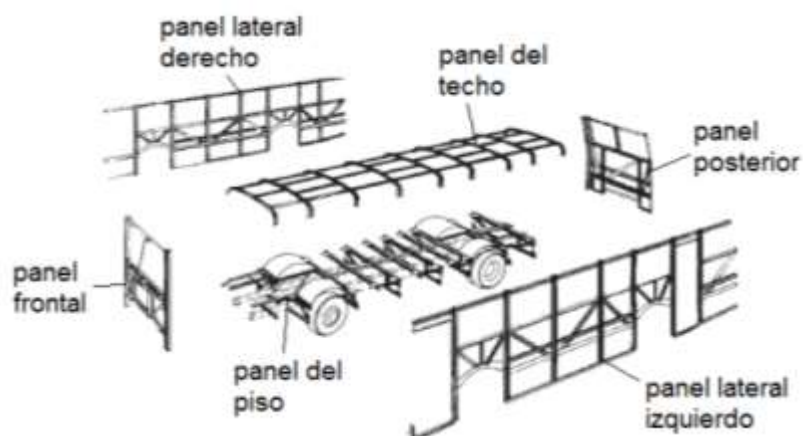


Figura 10. Paneles que conforman la superestructura de un autobús.
(Fuente: (Pozo J, 2014))

a) **Estructura del panel del piso:** El bastidor está compuesto por largueros y alas laterales, en una estructura de panel de piso bajo los perfiles son colocados por encima de los largueros del bastidor y los travesaños se fijan paralelos a las alas laterales. Los extremos de los travesaños y las alas convergen con el extremo inferior de las columnas de los paneles laterales. Mientras las alas laterales cumplen la función de mejorar la fijación de los paneles laterales con el bastidor.

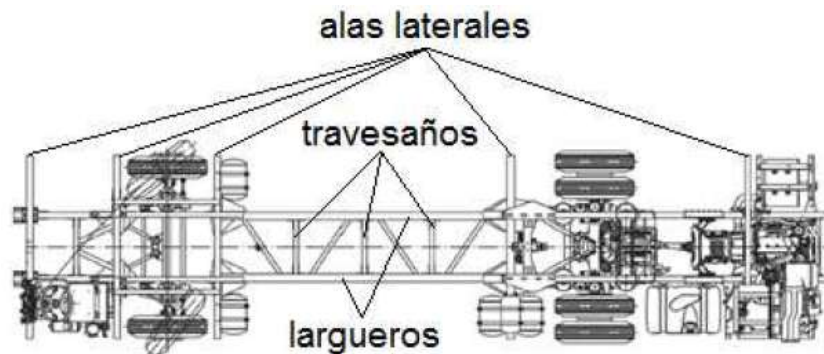


Figura 11. Elementos estructurales del bastidor.
(Fuente: (Pozo J, 2014))

b) **Estructura de los paneles laterales:** Debido a que los paneles laterales están soportando esfuerzos longitudinales durante la aceleración y el frenado y a esfuerzos transversales en el momento que el vehículo toma una curva, éstos paneles deben ser construidos con un entrelazado de tirantes diagonales en los espacios que deja el piso y las ventanas. Estos tirantes deben fijarse a las columnas y a las vigas horizontales como se ve en la figura siguiente.

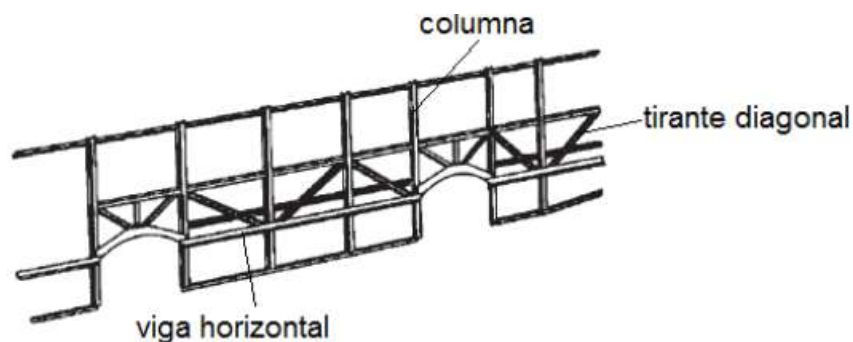


Figura 12. Estructura de los paneles laterales.
(Fuente: (Pozo J, 2014))

Las columnas de los paneles laterales deben ser posicionadas de tal manera que los extremos inferiores de las mismas se unan con los extremos de los travesaños y las alas laterales. Además, se deben incluir en las alas laterales ciertas aperturas encima de los ejes delantero y posterior para las ruedas, la altura debe considerar la magnitud del movimiento vertical máximo del sistema de suspensión y el uso de diferentes tipos de neumáticos. La disposición de refuerzos de unión entre las columnas laterales y travesaños del piso pueden ser considerados para casos de mayor exigencia, estos refuerzos también pueden ser ubicados entre las columnas laterales y el panel del techo.

c) Estructura de los paneles frontal y posterior: La estructura del panel frontal y la del panel posterior permiten aumentar la rigidez transversal de la superestructura y se deben construir con un entrelazado de tirantes diagonales. Se debe tomar en cuenta en el proceso de diseño un espacio para la remoción e instalación el motor. Además, en el panel posterior debe diseñarse una tapa para la verificación de los niveles de fluidos y los procesos de mantenimiento del motor.

d) Estructura del panel del techo: El panel del techo está sometido a esfuerzos longitudinales, transversales y de torsión. Se construye mediante arcos dispuestos en posición transversal y perfiles dispuestos en posición longitudinal. Los arcos deben estar ubicado de tal manera que sus extremos se unan con los extremos superiores de las columnas de los paneles laterales, En caso de solicitar mayor rigidez se pueden agregar tirantes diagonales.

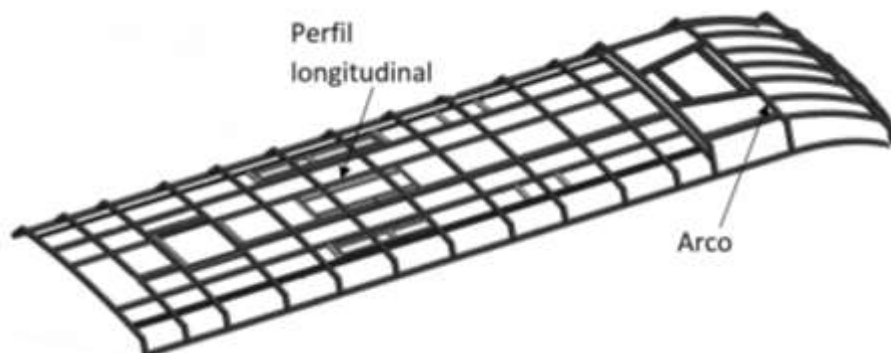


Figura 13. Estructura del panel del techo.

(Fuente: Autor)

2.4.4 Ensayos de impacto de Autobuses

Un ensayo de choque es una forma de ensayo destructivo diseñado con el fin de cerciorar un diseño seguro del vehículo o alguno de sus componentes. Para ello es importante analizar el impacto bajo diferentes condiciones y durante diferentes tipos de impacto, es así que algunos fabricantes realizan ensayos a diferentes ángulos, diferentes lados y contra diferentes objetos como barreras u otros vehículos.

Los ensayos más comunes que se realizan son los siguientes:

- Ensayo de impacto frontal, reglamento UNECE R 29
- Ensayo de impacto posterior, reglamento UNECE R 34
- Ensayo de impacto lateral, reglamento UNECE R 95 o reglamento ECE R 24
- Ensayo de volcamiento, reglamento UNECE R 66

Muchos de estos ensayos en la industria automotriz tienen sus regulaciones debido a las siguientes razones:

- Para proveer la salvedad de los ocupantes, bienes y reducir los accidentes.
- Para proveer cooperación internacional en la determinación de condiciones técnicas mínimas en sistemas y partes de vehículos.
- Por el rápido incremento del número de vehículos producidos.

2.4.4.1 Normativa referente a la resistencia en un impacto frontal.

Existen regulaciones para asegurar la protección de los ocupantes en coche frontal, el análisis se realiza estudiando el comportamiento de la superestructura o de componentes como asientos o parabrisas. La norma americana FMVSS 208, FMVSS 203 y FMVSS209 son algunas de reglamentaciones actuales que se aplican en manera general a vehículos pequeños.

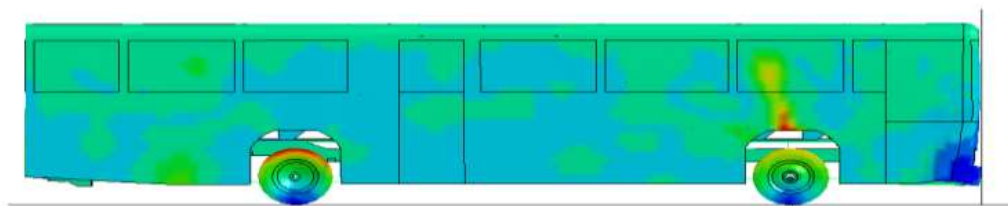


Figura 14 Comportamiento de la deformación de un autobús en un impacto frontal.
(Fuente: (Julaluk C))

La comunidad europea y algunos países han adoptado regulaciones comunes en base a la norma UNECE R 29 referente a la seguridad de ocupantes de vehículos en colisión frontal, en la tabla 2.3 se muestran diferentes normas aplicables para diferentes tipos de vehículos. Por ejemplo, para la categoría M1 con un peso menor a 2500 kg se aplica la regulación UNECE R 24, la seguridad para impacto lateral está regulada por UNECE R 95 para vehículos de las categorías N1 y M1.

Tabla 2.3 Descripción de las regulaciones respecto a la seguridad de los ocupantes de vehículos.

Nº	Seguridad del Ocupante	Tipo de vehículos	Regulación de seguridad
1	Seguridad en colisión frontal	M1 ≤ 2,5 ton	ECE R 94
2	Seguridad en impacto lateral	M1, N1	ECE R 95
3	Seguridad en impacto posterior	M1	ECE R 34
4	Seguridad del espacio de supervivencia	Categoría N	ECE R 29

(Fuente: Traducido de (Sharma M, 2013))

Otra información importante revela que el tipo principal de impacto es el frontal, sin embargo, cuando es acompañado de volcamiento éste llega a ser fatal, por lo que se recomienda dos consideraciones de diseño para la protección de los ocupantes:

- 1) Reducción de las desaceleraciones del ocupante (sujeto por cinturón) mediante la deformabilidad intencional de la estructura.
- 2) Limitación de la deformación del compartimiento del pasajero para evitar el aplastamiento de los pasajeros. Se cree que la segunda tendencia debería tener mayor importancia. Es necesario garantizar un mínimo espacio llamado “espacio de supervivencia”. Esto también es necesario en caso de accidentes graves.

Un impacto típico de un automóvil contiene en sí dos impactos. El primer impacto ocurre cuando el vehículo impacta otro vehículo u objeto. El segundo impacto

sucedo cuando los ocupantes del vehículo impactan con el interior del automotor o son expulsados fuera de él. La segunda colisión se produce inmediatamente (milisegundos) luego de la primera. El cinturón de seguridad evita la segunda colisión o minimiza las potenciales lesiones que pueden producirse por consecuencia del impacto con otros objetos internos del vehículo. (Sharma M, 2013)

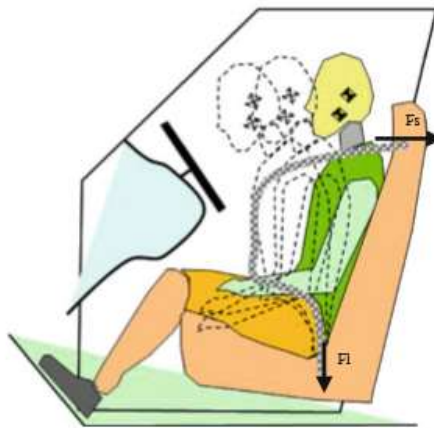


Figura 15. Movimientos del ocupante durante un impacto frontal.

(Fuente: (Sharma M, 2013))

2.4.4.2 Regulación del impacto frontal de acuerdo a reglamento R 29 de la UNECE.

La regulación R 29 no considera la medición de daños para la evaluación de la seguridad, pero considera el espacio de supervivencia como un criterio muy importante para el aseguramiento de la integridad del ocupante de la cabina. De acuerdo al reglamento R 29 (Anexo A1) para vehículos con un peso bruto superior a 7,5 toneladas, debe aplicarse una energía de impacto del péndulo de 55 KJ, el péndulo tiene una superficie de golpe de 2,500 mm x 800 mm y está hecho de acero con una masa distribuida de al menos 1500 Kg, además sus aristas deben ser redondeadas con un radio de curvatura de 10mm±5mm. El péndulo será suspendido en dos apoyos fijos ubicados a 1000 mm de distancia y a 3500 mm desde el eje de suspensión hasta el centro geométrico del péndulo. La superficie de impacto debe estar en contacto con la parte más saliente del vehículo y la posición del centro de gravedad del péndulo (punto H) es de 50 mm debajo del punto-R del asiento del conductor. (UNECE R 29, 2007)

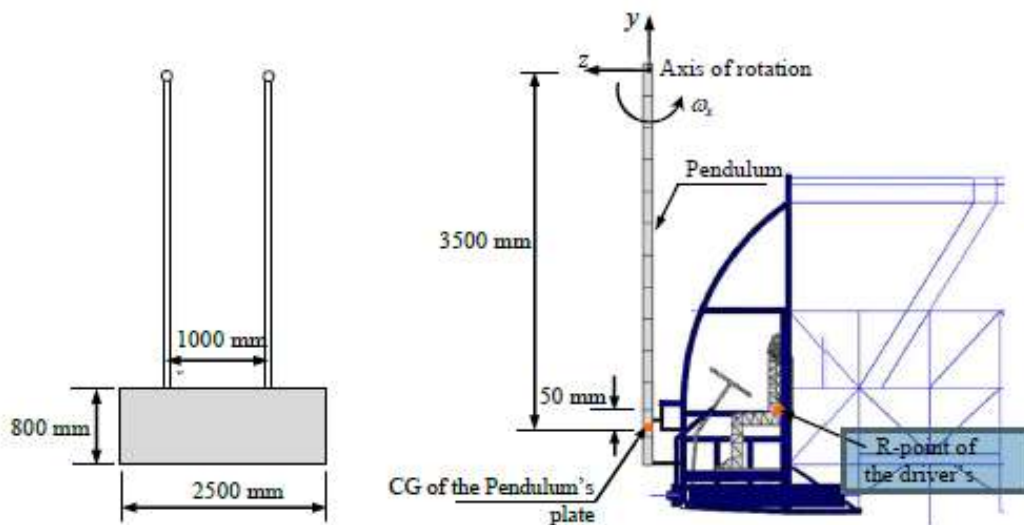


Figura 16. Impacto frontal de acuerdo al reglamento R 29 de UNECE
(Fuente: (Jangradist P, 2015))

La velocidad de impacto angular puede ser calculada de la aplicación de la energía de impacto E, como se muestra a continuación:

$$E = \frac{1}{2} \cdot I_{xx} \cdot \omega^2$$

Donde

I_{xx} = Momento de inercia del péndulo respecto al eje x

E= Energía de impacto (55 KJ)

ω = Velocidad angular

Para el aseguramiento del espacio de supervivencia del ocupante, ningún componente estructural o parte del vehículo luego del impacto debe estar en contacto con el maniquí que se utiliza como modelo y con dimensiones especificadas en la siguiente figura. (UNECE R 29, 2007)

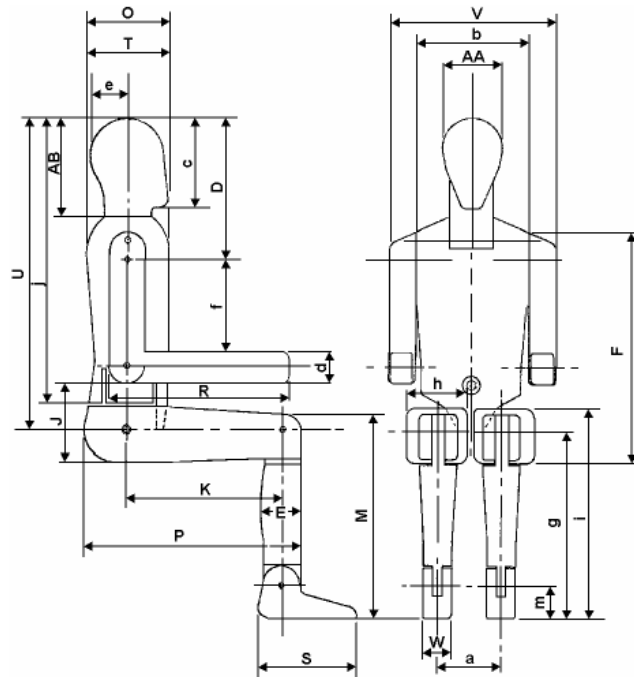


Figura 17. Maniquí usado para verificar el espacio de supervivencia.
(Fuente: (UNECE R 29, 2007))

Tabla 2.4 Características físicas del maniquí de prueba.

Material	Poli estireno con densidad=0,0169 g/cm ³		
Masa	4,54 kg		
Dimensiones	AA	Ancho de cabeza	15,3 cm
	AB	Altura de cabeza cuello	24,4 cm
	D	Distancia desde el extremo de la cabeza hasta el pivote del hombro	35,9 cm
	E	Profundidad de pantorrilla	10,6 cm
	F	Altura desde el asiento al hombro	62,0 cm
	J	Altura del apoyo del codo	21,0 cm
	M	Altura de rodilla	54,6 cm
O	Profundidad de pecho	23,0 cm	
P	Distancia desde el asiento trasero a la pantorrilla	59,5 cm	

R	Distancia desde el apoyo de codo a la punta del dedo	49,0 cm
S	Largo del pie	26,6 cm
T	Largo de la cabeza	21,1 cm
U	Altura desde el asiento a la cabeza	90,0 cm
V	Ancho de hombros	45,3 cm
W	Ancho de pie	7,7 cm
a	Distancia entre punto central de la cadera	17,2 cm
b	Ancho de pecho	30,5 cm
c	Altura de cabeza y mentón	22,1 cm
d	Ancho de antebrazo	9,4 cm
e	Distancia entre línea central del torso y el posterior de cabeza	10,2 cm
f	Distancia entre el hombro y el apoyo del codo	28,3 cm
g	Altura del cuello al suelo	50,5 cm
h	Ancho de muslo	16,5 cm
i	Altura de rodillas	56,5 cm
j	Distancia entre la cabeza y el punto H	81,9 cm
k	Distancia entre la cadera y a rodilla	42,6 cm
m	Altura piso tobillo	8,9 cm

(Fuente: Traducido de (UNECE R 29, 2007))

2.5 Categorías fundamentales

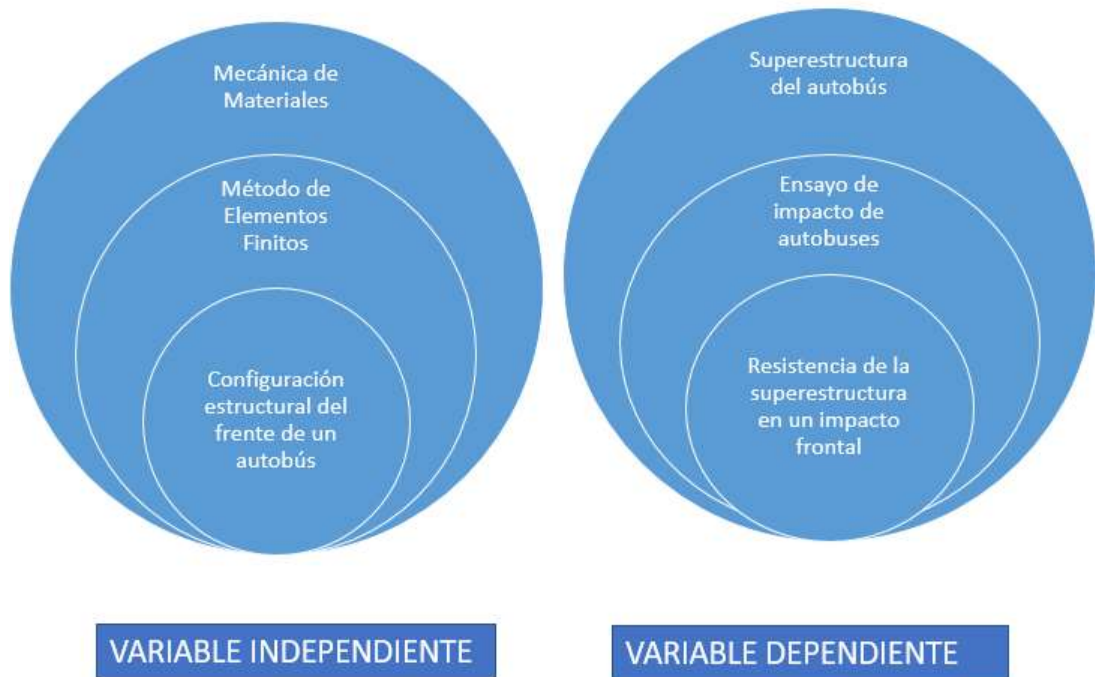


Figura 18. Categorías Fundamentales
(Fuente:Autor)

2.6 Hipótesis

Las configuraciones estructurales de la sección frontal del autobús inciden en la resistencia de la superestructura en un impacto frontal.

2.7 Señalamiento de variables

2.7.1 Variable independiente

Configuración estructural del frente de un autobús.

2.7.2 Variable dependiente

Resistencia de la superestructura en un impacto frontal.

2.7.3 Término de relación

Incidirá

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1 Enfoque

Para el presente proyecto investigativo se utilizará un enfoque predominantemente cuantitativo ya que las propiedades mecánicas, la deformación y la fractura de los componentes estructurales, se miden o calculan mediante asignación numérica a dichas variables. El enfoque cualitativo también se empleará en menor medida para la verificación del cumplimiento o no del reglamento UNECE R 29.

3.2 Modalidad básica de la investigación

3.2.1 Bibliográfica

La investigación es sustentada en fuentes bibliográficas provenientes de: artículos científicos, libros, trabajos de tesis, publicaciones, manuales técnicos y normas que permiten el análisis del área de conocimiento y su contexto.

3.2.2 Experimental

La investigación será experimental debido a que se determinaran las deformaciones y los esfuerzos mediante simulaciones lo que permitirá analizar la resistencia de la superestructura en un choque frontal.

3.3 Nivel o tipo de investigación

3.3.1 Descriptiva

El estudio será descriptivo ya que se trata de describir el comportamiento mecánico de la superestructura calculando su deformación y su influencia sobre la seguridad de los ocupantes.

3.3.2 Asociación de variables

El nivel de la investigación es de asociación de variables ya que se va a interpretar los valores de las variables mencionadas.

3.3.3 Explicativo

La investigación será de tipo explicativo ya que nos permitirá dar a conocer a la empresa MEGABUS el estado de sus carrocerías y su comportamiento en un choque frontal y cómo influye sobre la seguridad de los pasajeros, además se puede sugerir una configuración en especial que resulte ser más efectiva al momento de conservar la seguridad de ocupantes y estructura.

3.4 Población y muestra

3.4.1 Población

La población en el presente trabajo es tomada de diferentes tipos de autobuses destinados al:

- Servicio Urbano
- Servicio Interprovincial
- Servicio Escolar

Todos ellos construidos en la fábrica de carrocerías MEGABUS.

3.4.2 Muestra

La muestra seleccionada se hace en función al modelo más vendido que es el modelo para servicio de transporte interprovincial, del cual se analizará la sección frontal ya que es la porción del bus que soportará la mayor energía proveniente de un impacto frontal.

3.5 Operacionalización de variables

3.5.1 Variable independiente

Determinación de configuraciones estructurales de un frente de autobús interprovincial.

Tabla 3.1 Matriz de la variable independiente

CONCEPTUALIZACIÓN	CATEGORÍAS	INDICADORES	ÍNDICE	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
<p>La determinación de las configuraciones estructurales se refiere al tipo de arreglo (forma, posición o número) de diferentes perfiles estructurales de pared delgada que forman parte de la cabina de la superestructura y que van a estar en contacto con los objetos colisionados.</p> <p>Estas configuraciones pueden ser creadas mediante la modelación tridimensional con la ayuda de un software CAD y se toman como base los diseños del fabricante para modelos de autobuses interprovincial.</p>	Tipo de perfil estructural	Espesor	2-3 mm (espesores comerciales)	Modelación CAD
			Geometría	Tubo cuadrado Tubo rectangular Placa
	Sistema estructural del frente	Elementos estructurales críticos que absorben el impacto	6, 9 y 11 componentes estructurales	Modelación CAD

(Fuente: Autor)

3.5.2 Variable dependiente

Resistencia de la superestructura en un impacto frontal.

Tabla 3.2 Matriz de la variable dependiente

CONCEPTUALIZACIÓN	CATEGORÍAS	INDICADORES	ÍNDICE	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
La resistencia de la superestructura de un autobús puede ser entendida como la capacidad que tiene la misma en no producir deformaciones en sus componentes que afecten al espacio de supervivencia de los ocupantes, otra consideración es determinar la cantidad y ubicación de los componentes que experimenten fractura ya que pueden convertirse en verdaderas armas corto punzantes al	Deformación de la estructura	Seguro	Ningún componente estructural está en contacto con el ocupante según el reglamento UNECE R 29	Análisis no lineal mediante simulación numérica en software.
		Inseguro	Uno o más componentes estructurales están en contacto con el ocupante según el reglamento UNECE R 29	Reglamento UNECE R 29

verse expuestas al contacto con los ocupantes del vehículo.				
	Resistencia mecánica de los componentes	Ruptura Fluencia	El esfuerzo equivalente es mayor al Límite de ruptura del material 389,5 MPa (ASTM A500) El esfuerzo equivalente es mayor al límite de fluencia 250 MPa y menor al límite de ruptura del material 389,5 MPa	Análisis no lineal mediante simulación numérica en software. Observación directa

(Fuente: Autor)

3.6 Plan de recolección de información

La información se recogerá en base a la operacionalización de las variables y se utiliza las siguientes técnicas.

3.6.1 Observación

Se toma nota de todo lo considerado importante con el fin de describir y analizar los hechos de significación especial que ayudará a tener una base informativa suficiente.

3.6.2 Documental

El análisis bibliográfico obtenido de libros, artículos científicos, revistas técnicas, manuales, normativas, que permite realizar correctamente las simulaciones e interpretar los datos obtenidos.

3.6.3 Experimental

El uso de técnicas numéricas y de un software eficiente es necesario para la obtención de datos de las simulaciones tanto para el conformado de la sección como para el choque frontal.

3.7 Plan de procesamiento de la información

3.7.1 Procesamiento de la información recogida

Los datos que se obtengan de las simulaciones numéricas con un software de aplicación se procesarán mediante:

- Gráficos del modelo tridimensional que permitan visualizar los valores de los esfuerzos mediante una escala de colores con el fin de localizar los valores máximos y mínimos y las zonas críticas del componente estructural.
- Gráficos del desplazamiento del volante y del espacio de supervivencia en la dirección vertical para observar si existe intrusión de un componente respecto al otro.

- Gráficos del modelo tridimensional que muestre las deformaciones de la superestructura luego del impacto frontal.
- Curvas que permitan diferenciar los resultados de la energía cinética, energía interna, energía de fricción, energía hourglass y energía total obtenidas de las simulaciones.

3.7.2 Análisis e interpretación de los resultados

Los datos de las deformaciones producidas en la colisión de las diferentes configuraciones y combinaciones estructurales obtenidas mediante un análisis no lineal servirán para verificar el cumplimiento de las recomendaciones del Reglamento 29 de la UNECE además se podrá verificar si algún componente experimenta fractura y analizar zonas críticas de la sección frontal, esto con la ayuda de simulaciones mediante el uso de métodos de elementos finitos que se desarrollan como sistemas dinámicos explícitos.

Una vez que los datos obtenidos nos permitan verificar la hipótesis se podrá proponer el uso de una determinada configuración o proponer un nuevo modelo en caso de que ningún arreglo cumpla las funciones deseadas, esto permitirá evaluar el estado actual de las carrocerías y proponer soluciones en caso de que involucre riesgo a la seguridad de los ocupantes del vehículo.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis de resultados

4.1.1 Proceso propuesto para el análisis de resultados

A continuación, se muestra un diagrama de flujo que indica el procedimiento para la obtención de resultados del estudio de la resistencia de la sección frontal de la superestructura de un autobús interprovincial en un impacto frontal mediante la aplicación del método de elementos finitos.

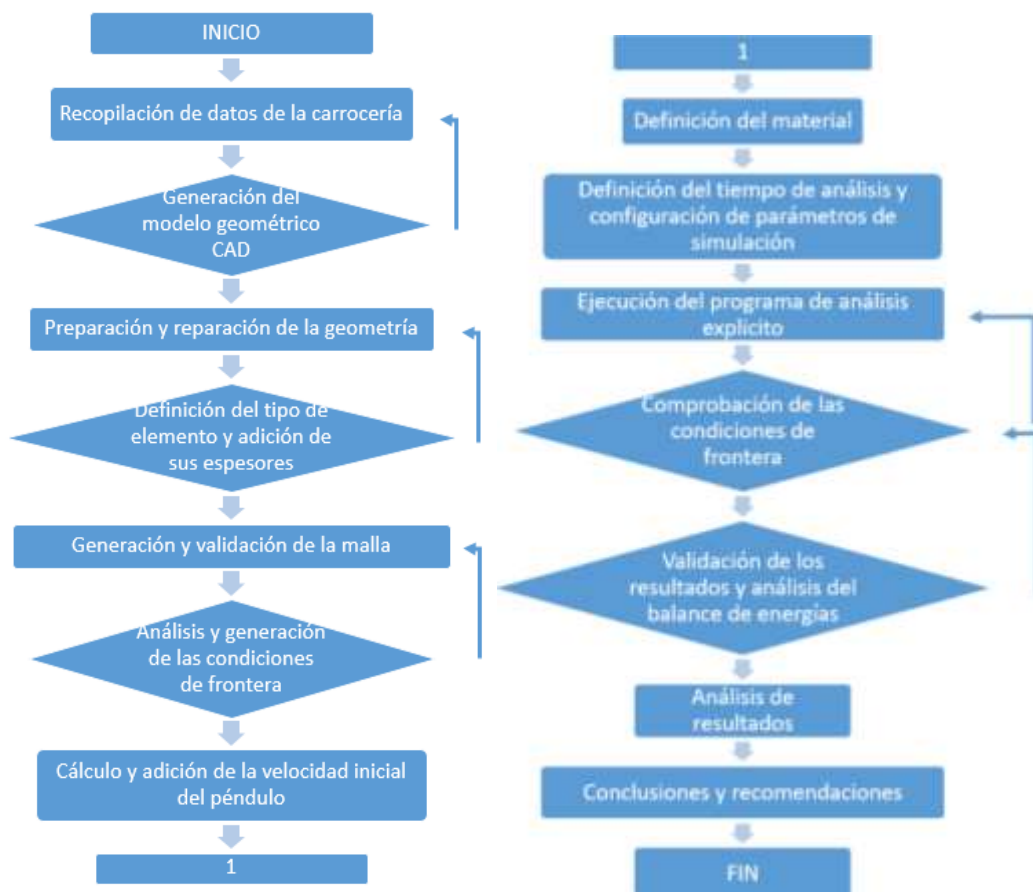


Figura 19 Diagrama del proceso de análisis de resultados
(Fuente: Autor)

4.2 Recolección de datos preliminares

En una etapa inicial es necesario conocer las características y propiedades generales del autobús interprovincial, para ello se obtienen datos directamente del fabricante de carrocerías considerando el modelo más actualizado y de mayor producción que en éste caso es el utilizado para servicio interprovincial.



Figura 20. Modelo de bus interprovincial.
(Fuente: www.megabuss.com.ec)

4.2.1 Características de la carrocería

Las dimensiones generales de la carrocería fueron tomadas de un autobús terminado y puesto en funcionamiento y se presentan en la tabla 4.1. La carrocería es montada sobre un chasis tipo Hino AK.

Tabla 4.1 Dimensiones generales del modelo de autobús interprovincial.

Ítem	Valor	Unidad
Distancia entre ejes	5800	mm
Ancho total	2600	mm
Altura total	3700	mm
Voladizo delantero	2350	Mm
Voladizo posterior	3390	Mm
Peso Carrocería	Aprox 6200	Kg
Peso Chasis	4765	Kg

(Fuente: Autor)

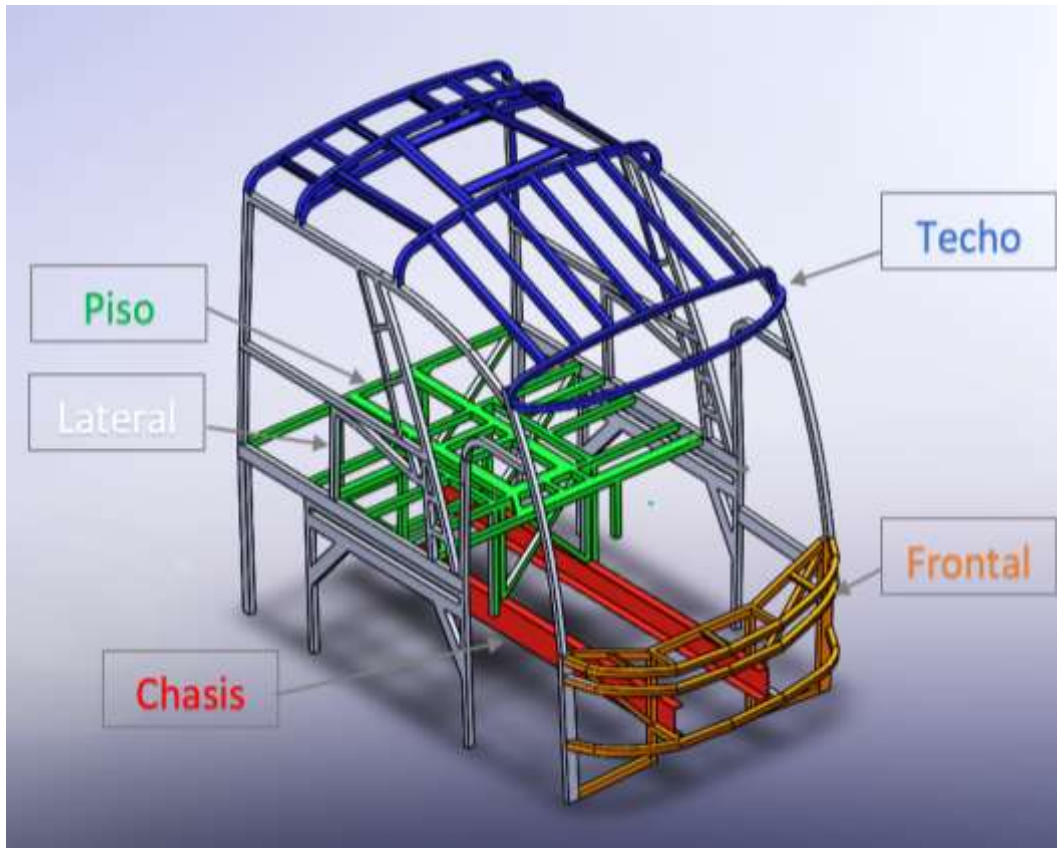


Figura 21. Modelo tridimensional de los componentes de la superestructura de un autobús
(Fuente: Autor)

4.2.2 Materiales utilizados en la carrocería

Existe una variedad de componentes estructurales con geometría, espesor y materiales de diferentes tipos. A continuación, se describen los elementos que conforman el frontal de la carrocería y que servirán para el desarrollo del tema de estudio.

Tabla 4.2 Descripción de los componentes y materiales de la superestructura del autobús.

SECCIÓN	APLICACIÓN	MATERIAL	DESCRIPCIÓN
Piso	Durmientes transversales principales	Acero ASTM A500	Tubo 50x50x3
	Durmientes entre pórticos	Acero ASTM A500	Tubo 50x50x2

Laterales	Pórtico principal de la estructura	Acero ASTM A500	Tubo 50x50x3
	Armado de la estructura fija	Acero ASTM A500	Tubo 50x50x2
	Refuerzos intermedios	Acero ASTM A500	Tubo 50x50x2
	Marco sobre puerta	Acero ASTM A36	G400x100x10x1,6
Techo	Largueros del techo	Acero ASTM A500	Tubo 50x50x2
	Tubo principal del pórtico	Acero ASTM A500	Tubo 50x50x2
	Intermedios entre pórticos	Acero ASTM A36	Z45x45x20x1,6
Frontal	Pórtico central	Acero ASTM A500	Tubo 50x50x2
	Estructura principal	Acero ASTM A500	Tubo 50x50x2
	Absorbedor de impacto	Acero ASTM A500	Tubo 50x50x3
	Refuerzos y divisor de parabrisas	Acero ASTM A500	Tubo 40x40x2

(Fuente: Autor)

4.3 Modelo de elemento finito de la sección frontal

4.3.1 Generación de la geometría

El modelado de la carrocería fue realizado en un programa CAD tomando en cuenta las dimensiones del chasis, los paneles laterales, el piso y el frontal de la superestructura del autobús, se consideró que la sección de estudio es hasta la primera ventana a partir de la puerta ya que un estudio completo de la superestructura requeriría demasiados recursos de memoria y procesamiento. Los

componentes que no cumplen funciones de resistencia y rigidez estructural fueron eliminados con el fin de simplificar el modelo. Además, se requirió generar geometrías de los elementos de ensamblaje que interactúan en el impacto frontal o que se requieren para realizar la simulación de la prueba de impacto, estos son:

- a) Chasis
- b) Placas de sujeción del volante.
- c) Base del volante.
- d) Volante.
- e) Piso de la cabina.
- f) Maniquí de prueba.
- g) Péndulo de impacto.
- h) Sujeciones del péndulo.

a) Chasis

El chasis es formado por perfiles estructurales tipo C 230x80x7 y es uno de los principales miembros estructurales ya que sobre él se ensamblan elementos como la carrocería, piso, motor, sistema de suspensión. Por este motivo las fuerzas generadas en el impacto frontal del bus son transmitidas al mismo y son consideradas en este estudio, a continuación, se muestra el modelo CAD simplificado del chasis que se utiliza.



Figura 22. Modelo del chasis.
(Fuente: Autor)

b) Placas de sujeción del volante

Son elementos utilizados para la sujeción del volante y piso, además sirve como división de la cabina del conductor y la carrocería. Su espesor es de 3 mm y se fijan principalmente mediante pernos.

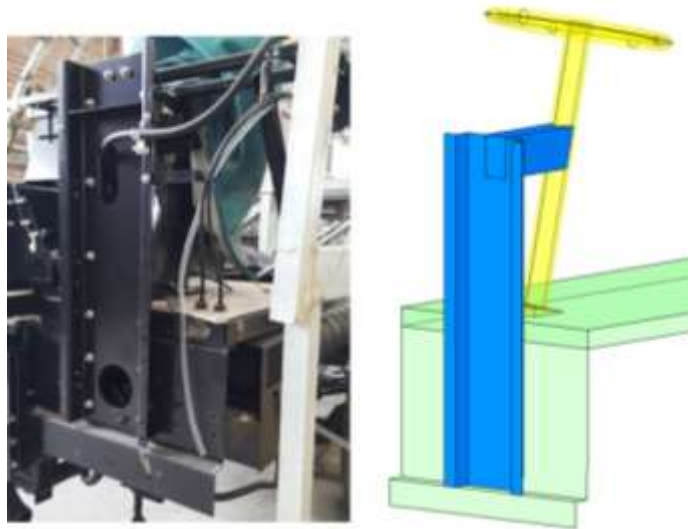


Figura 23. Modelado de las placas de sujeción del volante.
(Fuente: Autor)

c) Base del volante y volante

La base sirve para fijar la estructura del volante al piso de la cabina con cierto ángulo de inclinación que es parte del diseño del vehículo. El volante de 460 mm de diámetro es considerado el principal elemento de contacto contra el conductor en caso de un choque provocando el mayor daño debido a su proximidad con el mismo.



Figura 24. Modelo del volante.
(Fuente: Autor)

d) Piso

Para este estudio se considera un modelo simplificado del piso debido a la gran cantidad de componentes y geometrías complejas de las que se compone, en gran parte está formado de una lámina de acero de 3 mm de espesor y su principal función es mantener al ocupante y elementos de la cabina en una superficie estable.

e) Maniquí de Prueba según reglamento UNECE R 29

Se debe utilizar un maniquí según el reglamento UNECE R 29 para verificar el espacio de supervivencia, las dimensiones del mismo se detallan en el anexo A1, se destaca el punto R que significa un punto definido por el fabricante del vehículo para cada posición del asiento y que es establecido respecto a un sistema de referencia tridimensional.

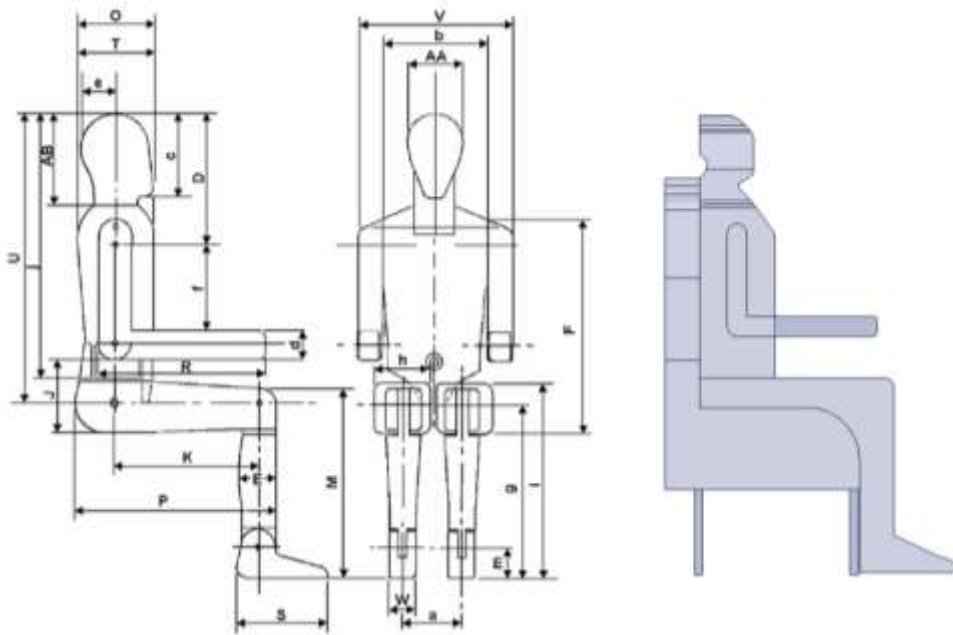


Figura 25. Modelo del maniquí de prueba según el reglamento UNECE R 29.
(Fuente: Autor)

f) Péndulo de impacto según reglamento UNECE R 29

El péndulo debe poseer una superficie plana y rectangular de 2500 mm de ancho y 800 mm de alto y al menos una masa de 1500 kg. El péndulo se sujetará por dos vigas fijadas rígidamente y una separación no menor a 1000 mm y con una distancia

de al menos 3500 mm de longitud desde el eje de suspensión al centro geométrico del péndulo.

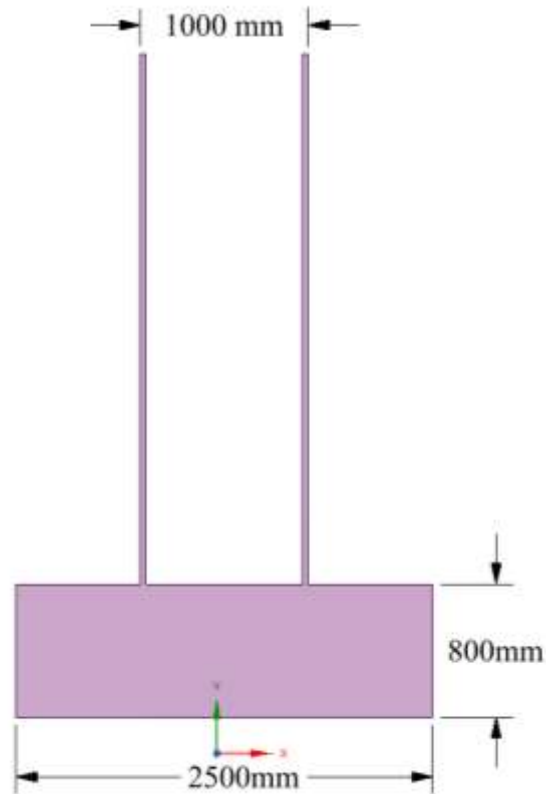


Figura 26. Modelo del péndulo de impacto según el reglamento UNECE R 29.
(Fuente: Autor)

4.3.2 Modelo para simulación de impacto según el reglamento UNECE R 29

Se considera un modelo de análisis para investigar el comportamiento de la estructura de acuerdo a los lineamientos del reglamento UNECE R 29 y determinar la resistencia o las modificaciones necesarias para el cumplimiento del mismo. El modelo tridimensional está compuesto de tres partes principales que son: La estructura del bus, el maniquí de prueba y el péndulo de impacto. Según el reglamento se debe ubicar el péndulo de tal manera que exista una distancia de 50 ± 5 mm entre su centro de gravedad o punto H y el centro de gravedad del maniquí o llamado punto R asimismo el péndulo se ubica en posición vertical y su cara de impacto debe estar en contacto con la parte más saliente del vehículo. A continuación, se puede observar el ensamblaje de todos los componentes del modelo con las especificaciones de distancias recomendadas.

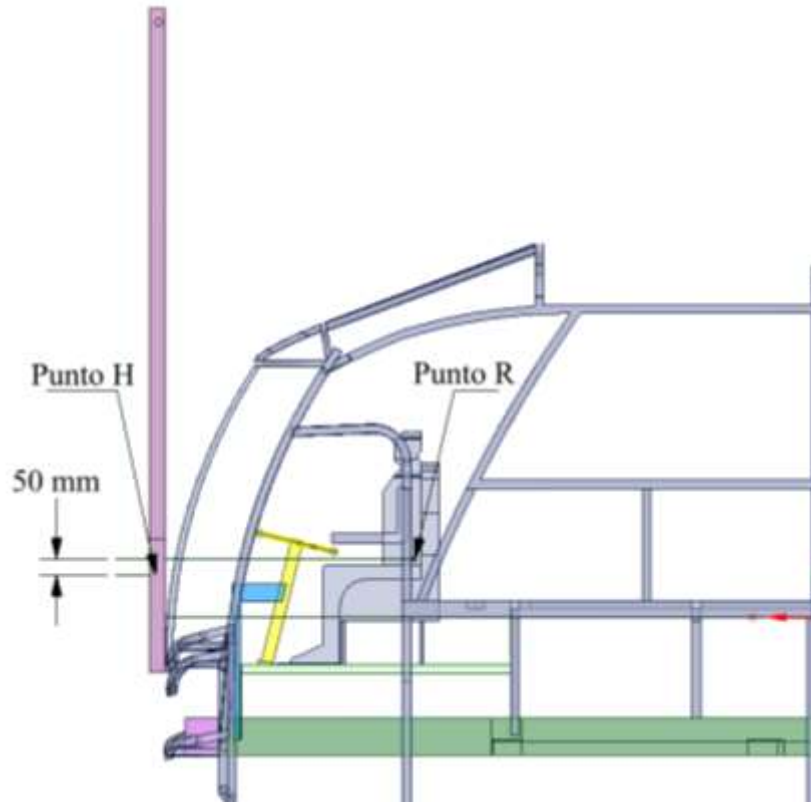
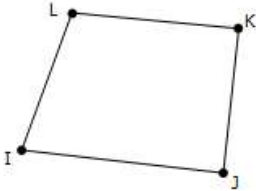



Figura 27. Modelo de los componentes para simulación de impacto según el reglamento UNECE R 29.
(Fuente: Autor)

4.3.3 Preparación de la geometría.

El modelo es corregido y preparado para el análisis mediante herramientas propias del software utilizado en la generación de la geometría, se utilizan dos tipos de elemento que son: solido (solid) y cascaron (shell) para definir los componentes, las características de los elementos finitos utilizados se indican a continuación.

Tabla 4.3 Características de los elementos finitos utilizados.

Característica	Descripción
ELEMENTO SHELL	

Formulación	<p>ELFORM 16</p> <p>Tipo 16 es en elemento Shell de integración completa con interpolaciones de deformación asumidas es recomendado para estructuras sólidas complejas con buena precisión y alto costo computacional. (LS-DYNA Theory Manual, 2006)</p>
Factor de corte transversal	<p>SHRF 0,833</p> <p>El valor de 0,833 corresponde al factor de corte transversal del elemento de 4 nodos.</p>
Número de Puntos de Integración	<p>NIP 3</p> <p>Dos puntos de integración son suficientes para materiales elásticos lineales mientras para el análisis de elemento Shell en el rango plástico se recomienda el uso de 3 puntos de integración para obtener una mayor estimación de la energía interna.(ANSYS LS-DYNA User´s Guide)</p>
Espesor	<p>Variable desde 2 a 4</p> <p>Se considera que la deformación no cambia el valor del espesor para la obtención de la solución numérica.</p>
ELEMENTO SOLID	
Formulación	<p>ELFORM 13</p> <p>El elemento Tipo 13 de forma tetraédrica tiene un punto nodal de esfuerzo promedio, recomendado cuando el coeficiente de Poisson es mayor a 0 como en metales y elastómeros. (LS-DYNA Theory Manual, 2006)</p>

(Fuente: Autor)

En la siguiente figura se indican que tipo de elemento geométrico se utilizó en los diferentes componentes y el valor del espesor asignado.

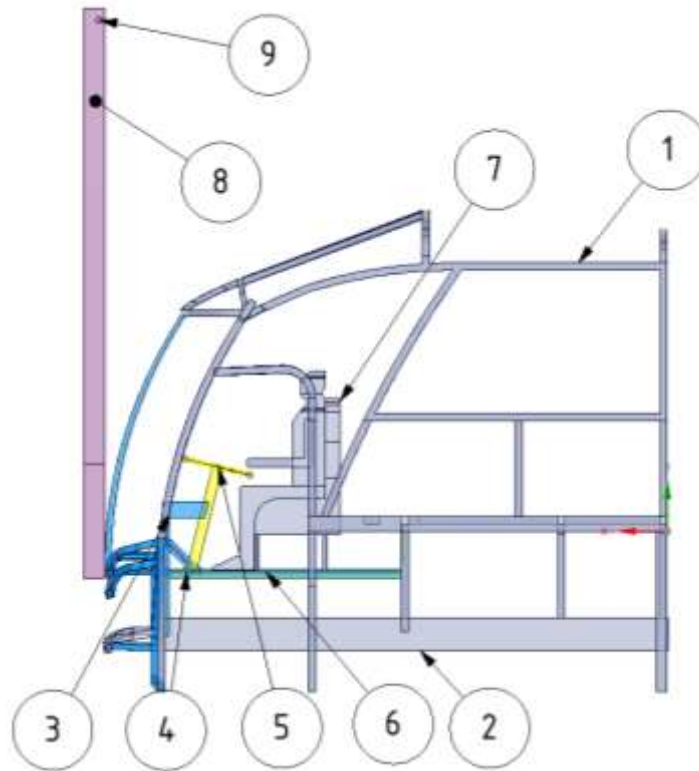


Figura 28. Geometría de los componentes del modelo discreto.
(Fuente: Autor)

Tabla 4.4. Descripción del tipo de geometría utilizado en los componentes del modelo.

N °	COMPONENTE	TIPO	ESPESOR (mm)	COMPORTAMIENTO
1	Carrocería	Cascarón (Shell)	2	Elástico-Plástico
2	Chasis	Cascarón (Shell)	7	Elástico-Plástico
3	Placas de sujeción del volante.	Cascarón (Shell)	3	Elástico-Plástico
4	Base del volante.	Cascarón (Shell)	3	Elástico-Plástico
5	Volante.	Cascarón (Shell)	3	Elástico-Plástico

6	Piso de la cabina.	Cascarón (Shell)	3	Elástico-Plástico
7	Maniquí de prueba.	Cascarón (Shell)	2	-
8	Péndulo de impacto.	Sólido (Solid)	-	Rígido
9	Sujeciones del péndulo	Sólido (Solid)	-	Rígido

(Fuente: Autor)

4.3.4 Generación de la Malla

Para análisis dinámicos explícitos solo ciertos tipos de elementos de malla son soportados debido a limitaciones del software, para elementos tipo sólido se utiliza: tetraedro, pirámide, hexaedro. Mientras los elementos utilizados para cascarones son triángulos y cuadriláteros. Para el modelo de estudio del impacto frontal se utiliza tetraedros en los elementos sólidos y cuadriláteros en los elementos cascarón. El tamaño de elemento de malla general máximo es de 50mm y el tamaño mínimo es de 13,62 mm con un total de 15 531 nodos y 23 403 elementos.

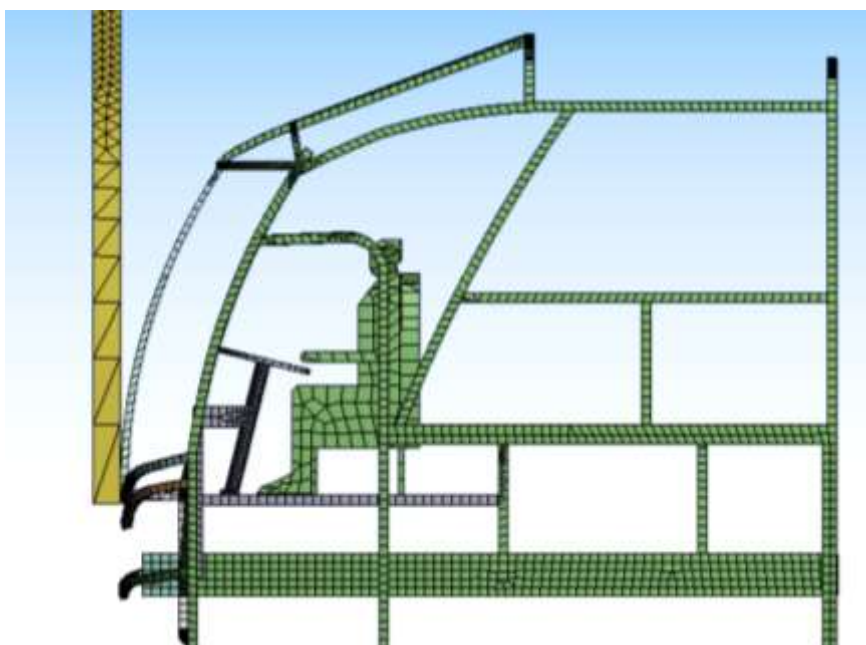


Figura 29. Mallado de los componentes para simulación de impacto según el reglamento UNECE R 29.

(Fuente: Autor)

Como recomendación general se debe colocar nodos en apoyos, puntos de aplicación de cargas y donde se requiera analizar con mayor detalle valores de desplazamientos, esfuerzos o temperaturas. En elementos triangulares y cuadriláteros la relación de “aspect Ratio” se debe acercar a 1,0, de igual manera al evaluar la calidad de malla se considera eficiente cuando el valor es cercano a 1. (Arroba, 2013)

El tamaño de los elementos se controla en algunos componentes para reducir el tiempo de procesamiento y en las uniones de contactos entre componentes se asegura que los nodos de las mallas sean compartidos y coincidentes. Por último, el proceso de mallado se valida mediante el análisis de la calidad de malla que tiene un valor promedio de 0,847 en calidad de elemento.

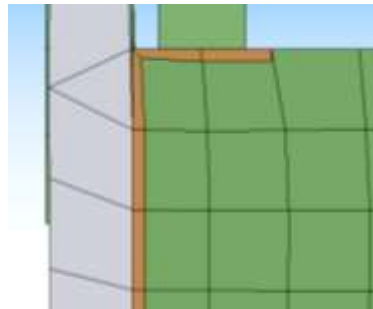


Figura 30. Control de malla en unión de componentes.
(Fuente: Autor)

4.3.5 Condiciones de borde y especificaciones de la norma.

El ensayo de impacto frontal sugiere fijar la estructura del bus para eliminar los desplazamientos longitudinales del chasis mediante el uso de cadenas o cuerdas, otra consideración es evitar el desplazamiento vertical utilizando bloques de madera colocados debajo del chasis. En el programa utilizado para la simulación se pueden recrear estas restricciones mediante el uso de las opciones de sujeciones fijas. Otra recomendación es acerca de la ubicación del maniquí debido a que el asiento tiene un recorrido longitudinal variable, por ese motivo se ubica el asiento en la posición media obteniendo las dimensiones mostradas en la figura de abajo respecto al volante.

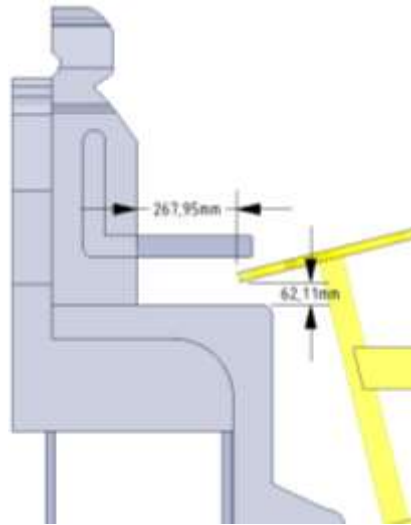


Figura 31. Distancias entre el volante y el espacio de supervivencia.
(Fuente: Autor)

La interacción de los componentes se asigna para recrear el modelo físico mediante el un modelo discreto lo más parecido, además, se toma en cuenta el costo computacional y de tiempo por lo que se simplifica el contacto entre superficies asumiendo un coeficiente de fricción igual a cero. En la siguiente tabla se describe el tipo de interacción asignado.

Tabla 4.5 Tipo de interacción entre componentes del modelo.

Interacción entre componentes	Tipo de Contacto
Péndulo (8), Sujeciones de péndulo (9)	Contacto Sin fricción
Péndulo (8), Carrocería (1), Chasis (2), Placas de sujeción de volante (3), Base de Volante (4), Piso de la cabina (6)	Contacto sin fricción
Maniquí de prueba (7), Carrocería (1), Chasis (2), Placas de sujeción de volante (3), Base de Volante (4), Piso de la cabina (6)	No existe contacto

(Fuente: Autor)

El tipo de contacto que se utiliza para obtener la solución discreta es automático y tiene las siguientes características y es definida por defecto en el programa.

Tabla 4.6 Características de tipo de contacto utilizado para la simulación.

Característica	Descripción
Definición	<p>Tipo 13: *</p> <p>CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE</p> <p>Es un tipo de contacto que considera el espesor del cascaron (shell) y que no tiene una orientación específica. Se requiere un mínimo espacio entre las superficies que entrarán en contacto, para permitir penetraciones iniciales de nodos el espacio entre superficies deber al menos mayor que el promedio del espesor de las superficies involucradas. En el caso de contacto entre elementos solidos no es necesario un espacio entre ellos.</p>
Opción de penalidad	<p>SOFT 2</p> <p>La formulación de penalidad alterna chequea los segmentos vs promedio de penetración de segmento, luego de encontrarse segmentos penetrados, las fuerzas normales del contacto son penalizadas.</p>

(Fuente: (LS- DYNA Keyword User's Manual, 2001))

4.3.6 Velocidad inicial del péndulo

El péndulo debe tener una velocidad basada en la energía cinética que se debe generara, para el caso de vehículos con un peso superior a las 7 toneladas como el caso del autobús que se está analizando le energía es de 55 KJ, por lo tanto, el cálculo de la velocidad se puede determinar mediante la aplicación de la fórmula de energía de impacto.

$$E = \frac{1}{2} \cdot I_{xx} \cdot \omega^2$$

Donde

E, Energía de impacto (55 KJ según la norma R 029)

I_{xx} , Momento de Inercia respecto al eje x respecto al eje de rotación.

ω , Velocidad angular de impacto del péndulo.

Para calcular el momento de inercia del péndulo respecto al eje de rotación, se utiliza el teorema de Steiner que se describe mediante la siguiente ecuación:

$$I_{xx} = I_{xc} + m \cdot L^2$$

Siendo

I_{xc} , Momento de Inercia respecto al centro de gravedad del péndulo

m, Masa del péndulo

L, Longitud desde el centro de gravedad del péndulo hasta el centro de rotación.

Datos

$$I_{xc} = 117,65 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

$$m = 2509 \text{ Kg}$$

$$L = 3,48 \text{ m}$$

$$I_{xx} = 117,65 + (2509 \times 3,48^2)$$

$$I_{xx} = 30502,65 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot E}{I_{xx}}}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot (55000 \text{ N.m})}{30502,65 \text{ Kg.m}^2}}$$

$$\omega = 1,89 \text{ rad/s}$$

4.3.7 Definición del Material

El material utilizado en la mayoría de los elementos de estudio que conforman la superestructura del autobús es el acero ASTM A500 y ASTM A36 de similares propiedades mecánicas, para las simulaciones del impacto frontal se utilizará el primero de los mencionados. El comportamiento elástico y plástico de éste material ha sido estudiado y validado en trabajos anteriores y utilizado en diferentes investigaciones relacionadas al tema (Arroba, 2013). En la siguiente gráfica de esfuerzo – deformación unitaria se puede apreciar el comportamiento mecánico del acero ASTM A500 y en los anexos A2, A3 se puede observar mas propiedades de los perfiles estructurales utilizados en la superestructura del autobús.



Figura 32. Gráfica de Esfuerzo – Deformación del material utilizado en la simulación.
(Fuente: Autor)

Las características del modelo del material que se asigna en el programa son las presentadas en la siguiente tabla, éste modelo fue escogido ya que su comportamiento es el más cercano al fenómeno físico.

Tabla 4.7 Características del material utilizado en el modelo discreto.

Característica	Descripción
Definición	Tipo 24 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY Es un material elasto-plástico con una curva de esfuerzo-deformación que puede ser definida. También se puede definir la falla basado en la deformación plástica o el mínimo time step.
Densidad de Masa	RO 7,89E-009
Módulo de Young	E 2,1E+005
Radio de Poisson	PR 3E-001

(Fuente: Autor)

4.4 Simulación del impacto frontal según el reglamento UNECE R 29

El tiempo de análisis utilizado es de 0,22 s que toma en cuenta el instante del impacto del péndulo contra el vehículo hasta el momento que rebota ya que es un suficiente para observar la deformación de la carrocería y comprobar el cumplimiento del reglamento. Las unidades establecidas están en el sistema métrico y se simplifica el modelo reduciendo algunas secciones de la carrocería para reducir los recursos computacionales requeridos. Antes del proceso de simulación se recomienda una revisión del modelo que se muestra con el siguiente diagrama de bloques.

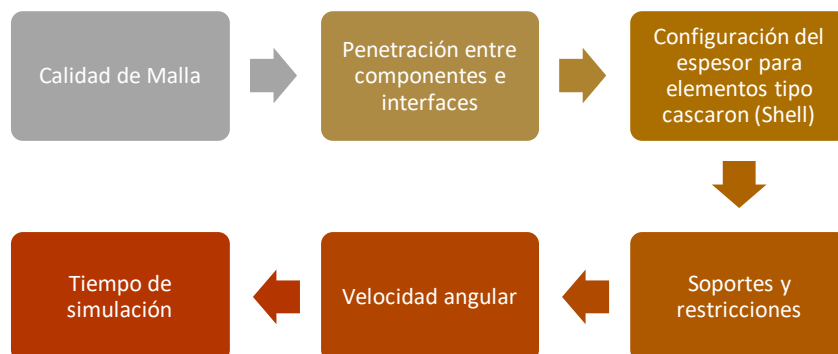


Figura 33. Proceso de verificación antes de ejecutar la simulación.

(Fuente: Autor)

4.4.1 Resultados de la simulación del impacto frontal

Los resultados de la simulación muestran la deformación producida en la carrocería durante y luego del impacto frontal, observando claramente que no se cumple el reglamento UNECE R 29 debido a la intrusión del volante dentro de la zona de supervivencia del ocupante.

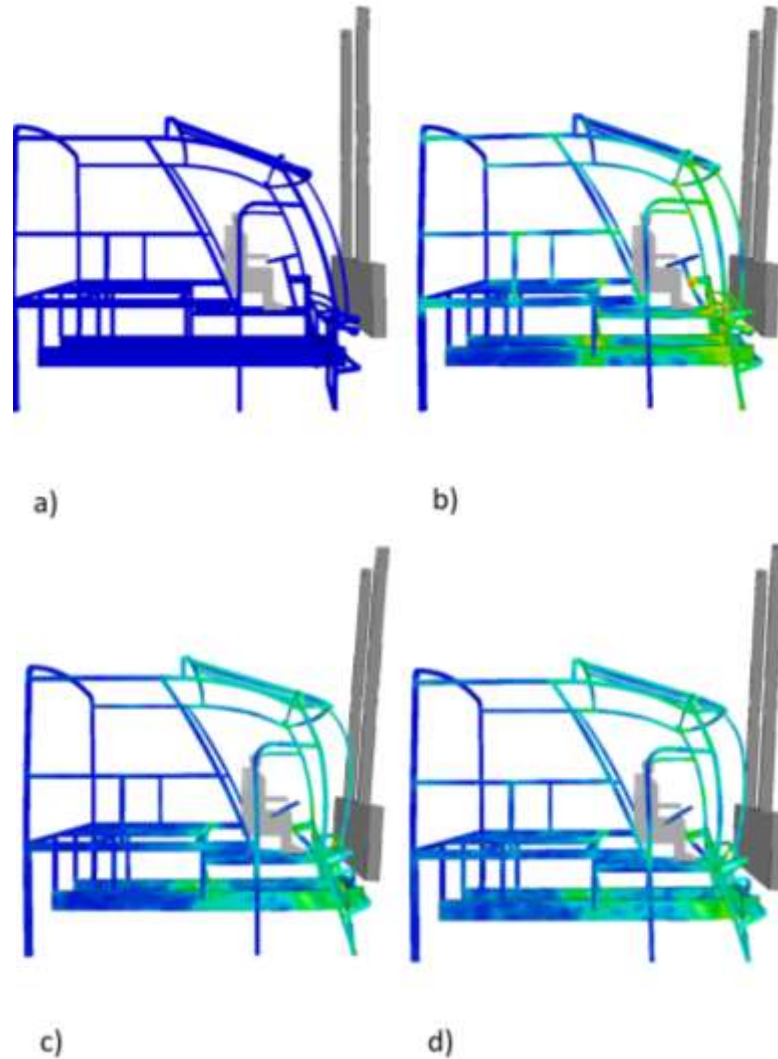


Figura 34. Simulación del impacto frontal según el reglamento UNECE R 29. **a)** Instante de inicio del impacto, tiempo=0,000s. **b)** Durante el impacto, tiempo=0,029s. **c)** Máxima intrusión, tiempo=0,152s. **d)** Fin de la simulación, tiempo=0,200s.

(Fuente: Autor)

La intrusión del volante en el espacio de supervivencia puede ser determinado mediante la medición del desplazamiento en la dirección Y del volante y del maniquí que representa el espacio de supervivencia. Se observa que la intrusión se produce en el tiempo de 0,03 s y llega a un valor máximo de 153 mm en el tiempo de 0,11 s.



Figura 35. Desplazamiento del volante respecto al espacio de supervivencia en la dirección Y.
(Fuente: Autor)

La deformación plástica luego del impacto frontal de algunos componentes ubicados principalmente en el frente de la carrocería se puede observar en la siguiente figura, con estos resultados también nos indican la mayor afectación de los miembros estructurales para un posterior análisis de los mismos.

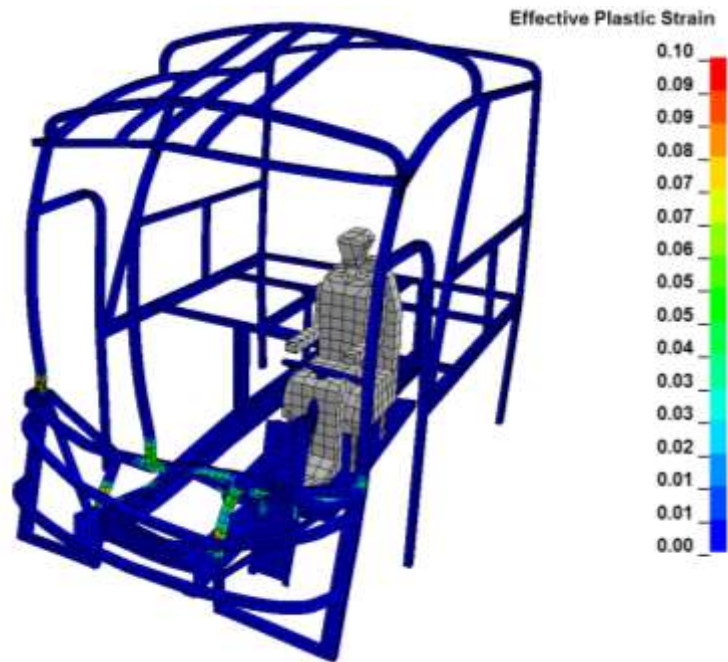


Figura 36. Deformación plástica efectiva del frente de la superestructura del autobús.
(Fuente: Autor)

4.5 Validación de los resultados

La validez del modelo puede ser determinado en base al principio de conservación de energía que debe indicar la transformación de energía cinética en forma decreciente debido a la desaceleración del péndulo y el incremento de la energía interna a causa de la capacidad de energía absorbida en el impacto por los componentes de la superestructura, también se debe cumplir una recomendación que el valor máximo de la energía hourglass y la energía de fricción sean menor al 10% de la energía, un incremento desproporcionado de estos valores generalmente se debe a problemas asociados a la interferencia de superficies provocadas por penetraciones iniciales de los nodos de un componente dentro de la malla de otro componente que reflejan en el incremento de las fuerzas internas . Una vez verificados estos valores se puede asegurar que el modelo proporciona datos aceptables y cercanos al fenómeno real.

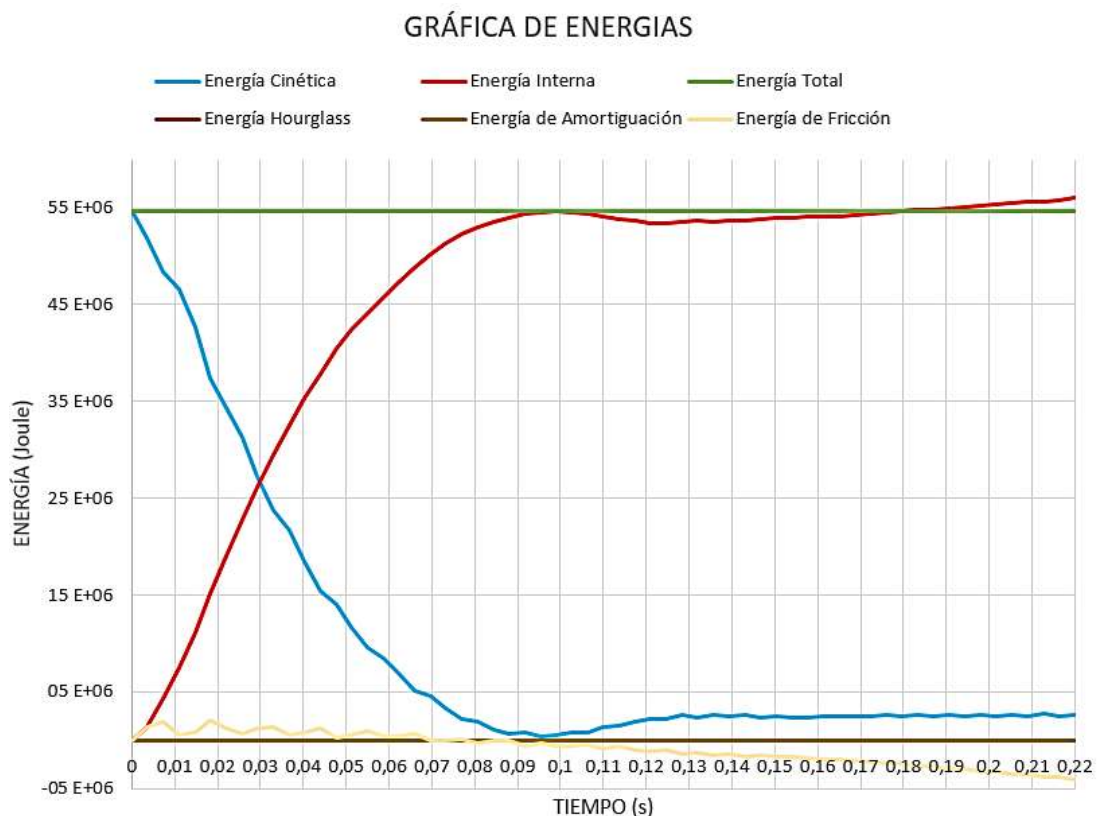


Figura 37. Gráfica de las energías presentes en el impacto frontal.
(Fuente: Autor)

Los resultados de energía muestran un comportamiento normal y asegura la confiabilidad de la simulación, además la energía de fricción que alcanza un valor de 4,03 KJ no supera el 10% de la energía total que según el reglamento UNECE R 29 para vehículos de peso mayor a 7 toneladas debe ser de 55 KJ.

4.6 Análisis de resultados

Como se muestra en la siguiente figura existen varios componentes estructurales que absorben mayor energía en el impacto y como consecuencia sufren mayores deformaciones y esfuerzos, con ésta consideración se procede a tomar como elemento de estudio a estos componentes para observar el comportamiento de la estructura frente al impacto si su espesor y configuración varían.

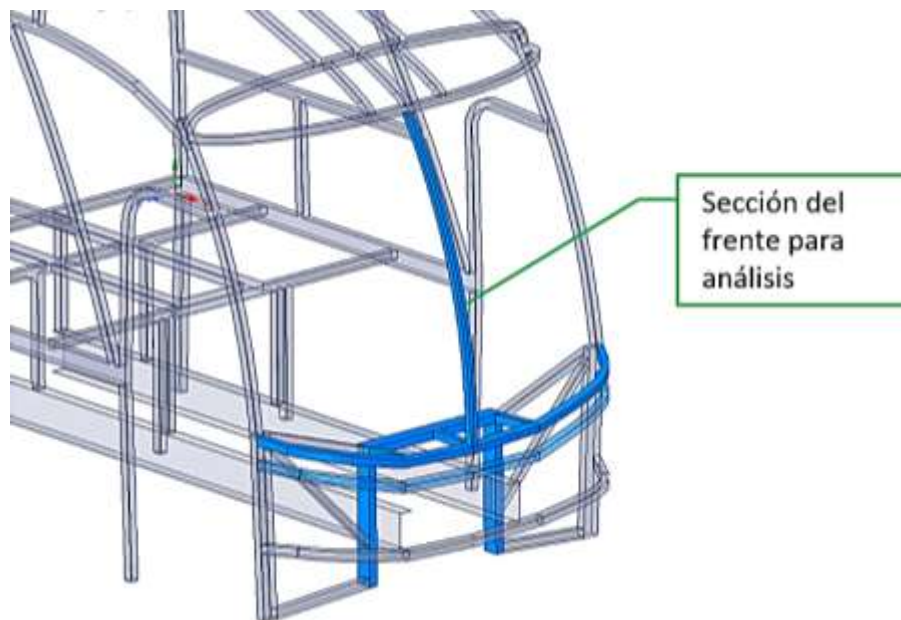


Figura 38. Sección del frente para análisis del comportamiento frente al impacto frontal.
(Fuente: Autor)

La sección de análisis está compuesta de varios perfiles estructurales que se listan a continuación indicando la variación en espesor, tipo de perfil o número de componentes, estas modificaciones se hacen con el propósito de aumentar la resistencia de la sección frontal y conseguir que se cumpla en reglamento UNECE R 29.

Tabla 4.8 Características de los modelos de estudio.

MODELO	DESIGNACIÓN	COMPONENTES	ESPESOR (mm)	TOTAL DE COMPONENTES
1	Pórtico Central	3 Tubos cuadrados 50x50	2	9
	Absorbedores de impacto	2 Tubos cuadrados 50x50	2	
	Refuerzos extremos	2 Tubo cuadrados 40x40	2	
	Refuerzo central	1 Tubo rectangular 40x20	2	
	Divisor de parabrisas	1 Tubo cuadrado 40x40	2	
2	Pórtico Central	3 Tubos cuadrados 50x50	3	9
	Absorbedores de impacto	2 Tubos cuadrados 50x50	3	
	Refuerzos extremos	2 Tubo cuadrados 40x40	3	
	Refuerzo central	1 Tubo rectangular 40x20	3	
	Divisor de parabrisas	1 Tubo cuadrado 40x40	3	
3	Pórtico Central	3 Tubos cuadrados 50x50	3	6
	Absorbedores de impacto	2 Tubos cuadrados 50x50	3	
	Refuerzos extremos	Sin refuerzo	3	
	Refuerzo central	Sin refuerzo	3	
	Divisor de parabrisas	1 Tubo cuadrado 40x40	3	

4	Pórtico Central	3 Tubos rectangulares 100x50	2	9
	Absorbedores de impacto	2 Tubos cuadrados 50x50	2	
	Refuerzos extremos	2 Tubo cuadrados 40x40	2	
	Refuerzo central	1 Tubo rectangular 40x20	2	
	Divisor de parabrisas	1 Tubo cuadrado 40x40	2	
5	Pórtico Central	3 Tubos rectangulares 100x50	3	9
	Absorbedores de impacto	2 Tubos cuadrados 50x50	3	
	Refuerzos extremos	2 Tubo cuadrados 40x40	3	
	Refuerzo central	1 Tubo rectangular 40x20	3	
	Divisor de parabrisas	1 Tubo cuadrado 40x40	3	
6	Pórtico Central	3 Tubos rectangulares 100x50	3	6
	Absorbedores de impacto	2 Tubos cuadrados 50x50	3	
	Refuerzos extremos	Sin refuerzo	3	
	Refuerzo central	Sin refuerzo	3	
	Divisor de parabrisas	1 Tubo cuadrado 40x40	3	
7	Pórtico Central	3 Tubos rectangulares 100x50	2	11

	Absorbedores de impacto	2 Tubos cuadrados 50x50	3	
	Refuerzos extremos	2 Tubo cuadrados 40x40	2	
	Refuerzo central	1 Tubo rectangular 40x20	2	
	Divisor de parabrisas	1 Tubo cuadrado 40x40	2	
	Placa refuerzo	2 Placas triangulares	6	
8	Pórtico Central	3 Tubos cuadrados 50x50	3	11
	Absorbedores de impacto	2 Tubos cuadrados 50x50	3	
	Refuerzos extremos	2 Tubo cuadrados 40x40	3	
	Refuerzo central	1 Tubo rectangular 40x20	3	
	Divisor de parabrisas	1 Tubo cuadrado 40x40	3	
	Placa 3refuerzo	2 Placas triangulares	6	
9	Pórtico Central	3 Tubos rectangulares 100x50	3	9
	Absorbedores de impacto	2 Tubos cuadrados 50x50	3	
	Refuerzos extremos	Sin refuerzo	3	
	Refuerzo central	Sin refuerzo	3	
	Divisor de parabrisas	1 Tubo cuadrado 40x40	3	
	Placa refuerzo	2 Placas triangulares	6	

(Fuente: Autor)

■ Modificaciones hechas a la sección frontal.

En las siguientes fichas se muestran los resultados de los 9 modelos analizados con los principales datos obtenidos de la simulación, para los 3 modelos principales se validó la simulación en un laboratorio particular con el fin de observar la correlación de los valores obtenidos, los mismos se puede observar en el Anexo A4.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA



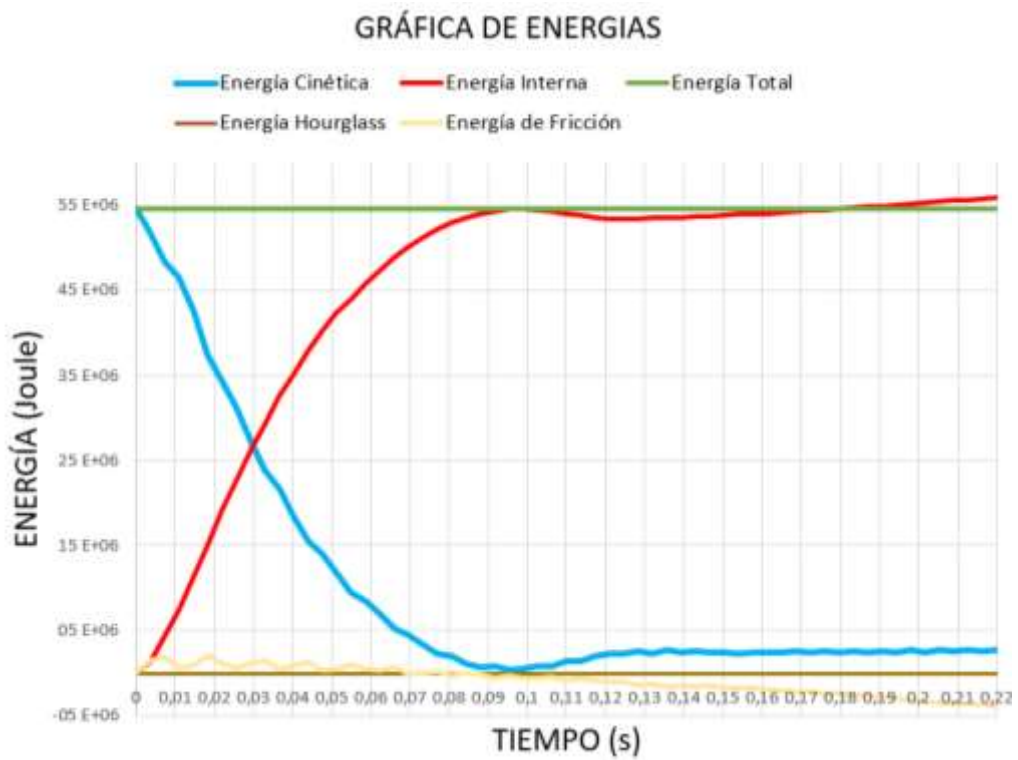
MAESTRIA EN DISEÑO MECÁNICO

SIMULACIÓN DE IMPACTO FRONTAL MODELO 1

Probeta N°	1	Muestra de:	Superestructura de un autobús interprovincial
Normas Aplicables	Reglamento UNECE R 29		
Fecha de ejecución	18-08-2016	Realizado por	Ing. Santiago López
		Revisado por	Ing. Mg. Cesar Arroba
Element Quality Max	0,99	Element Quality Min	0,05
Cantidad de Nodos	15531	Cantidad de elementos	23403
Tiempo de procesamiento	52 min	Numero de procesadores	4 de 2.6 Ghz
Velocidad del péndulo ²⁹⁷⁴	1,89 rad/s	Masa del modelo	2974 kg

RESULTADOS DEL ENSAYO

t=0,000 s	t=0,029 s	t=0,051 s	t=0,176 s



REESULTADOS REGISTRADOS

Invade el volante el espacio de supervivencia

SI



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA



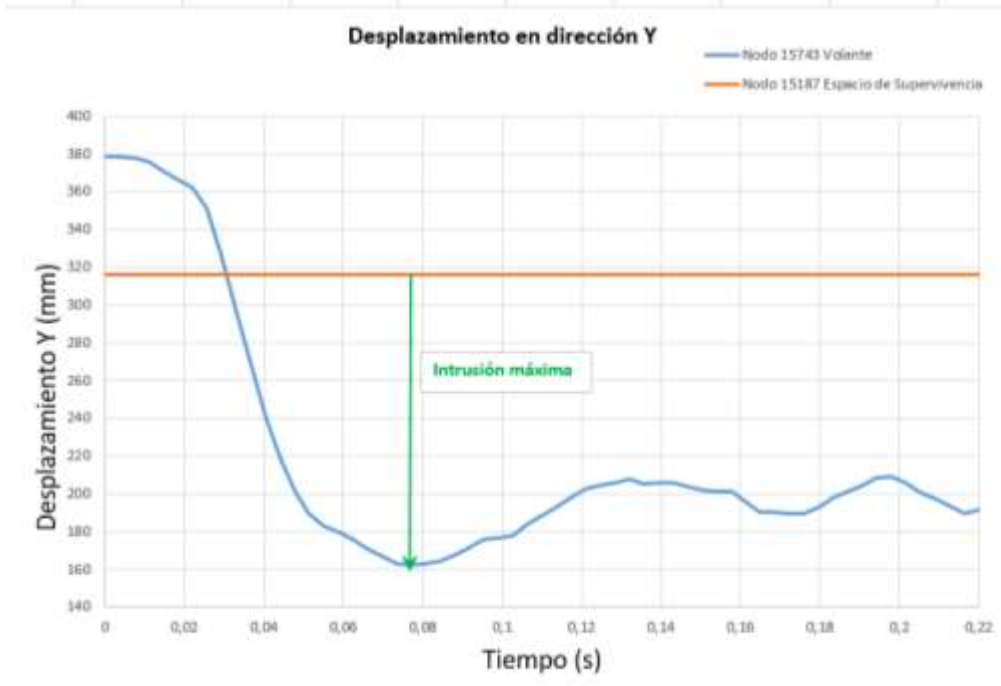
MAESTRIA EN DISEÑO MECÁNICO

SIMULACIÓN DE IMPACTO FRONTAL MODELO 2

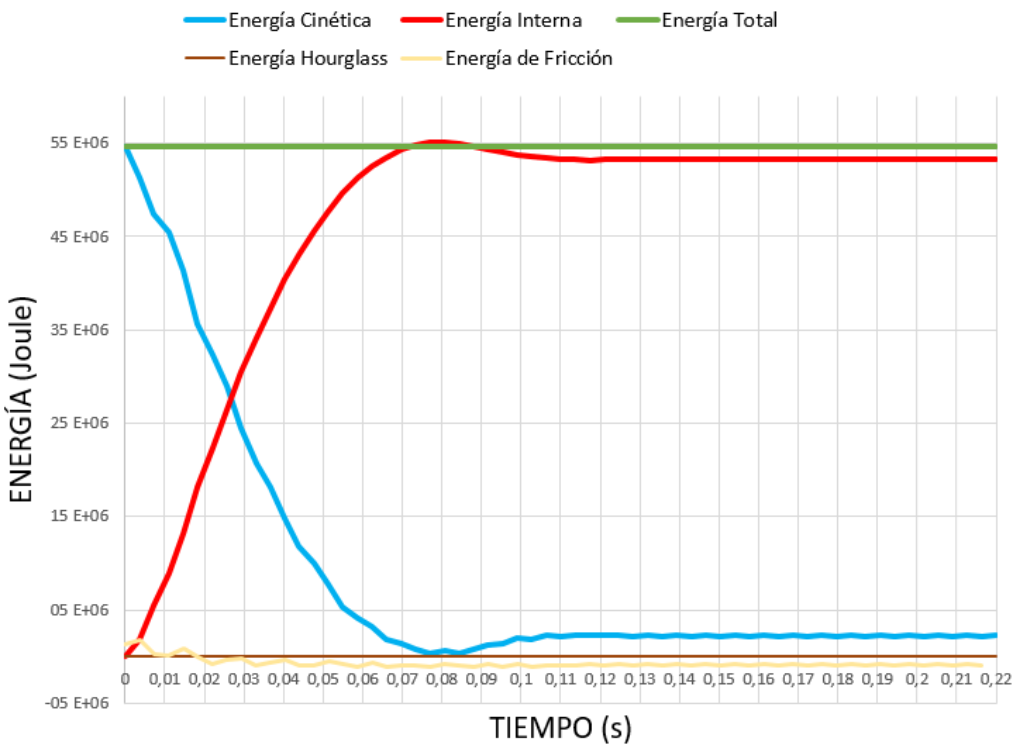
Probeta N°	2	Muestra de:	Superestructura de un autobús interprovincial
Normas Aplicables	Reglamento UNECE R 29		
Fecha de ejecución	18-08-2016	Realizado por	Ing. Santiago López
		Revisado por	Ing. Mg. Cesar Arroba
Element Quality Max	0,99	Element Quality Min	0,05
Cantidad de Nodos	15538	Cantidad de elementos	23409
Tiempo de procesamiento	52 min	Numero de procesadores	4 de 2.6 Ghz
Velocidad del péndulo2974	1,89 rad/s	Masa del modelo	2990 kg

RESULTADOS DEL ENSAYO

t=0,000 s	t=0,029 s	t=0,051 s	t=0,172 s



GRÁFICA DE ENERGIAS



REESULTADOS REGISTRADOS

Invade el volante el espacio de supervivencia	SI
---	-----------



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA



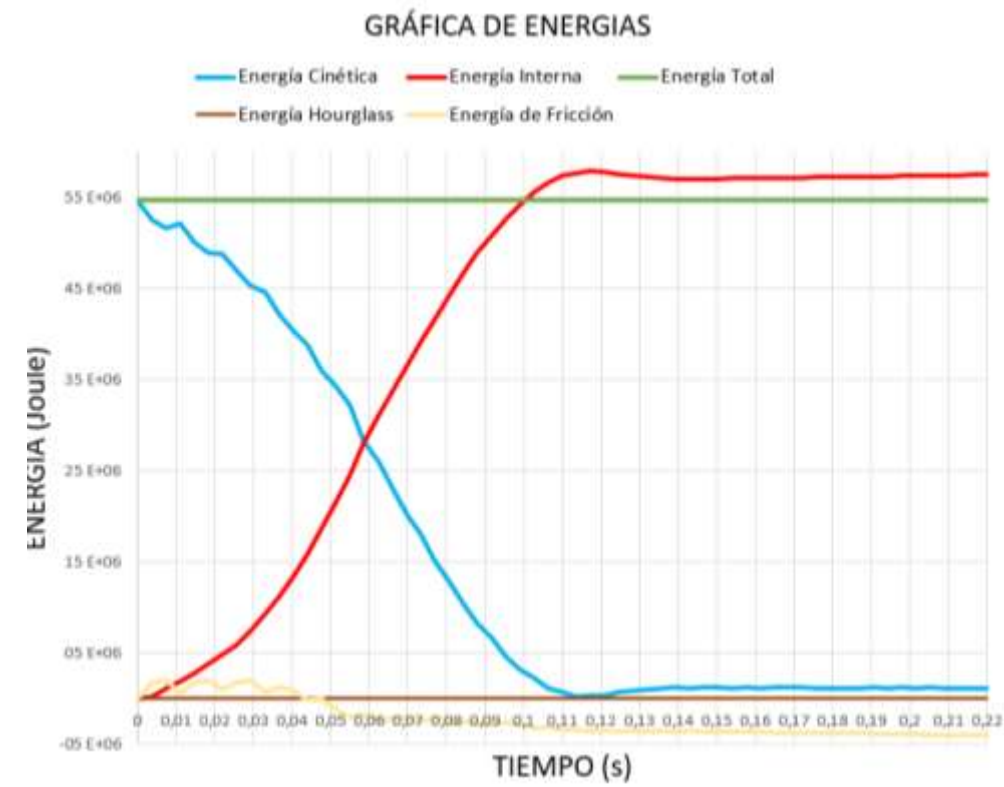
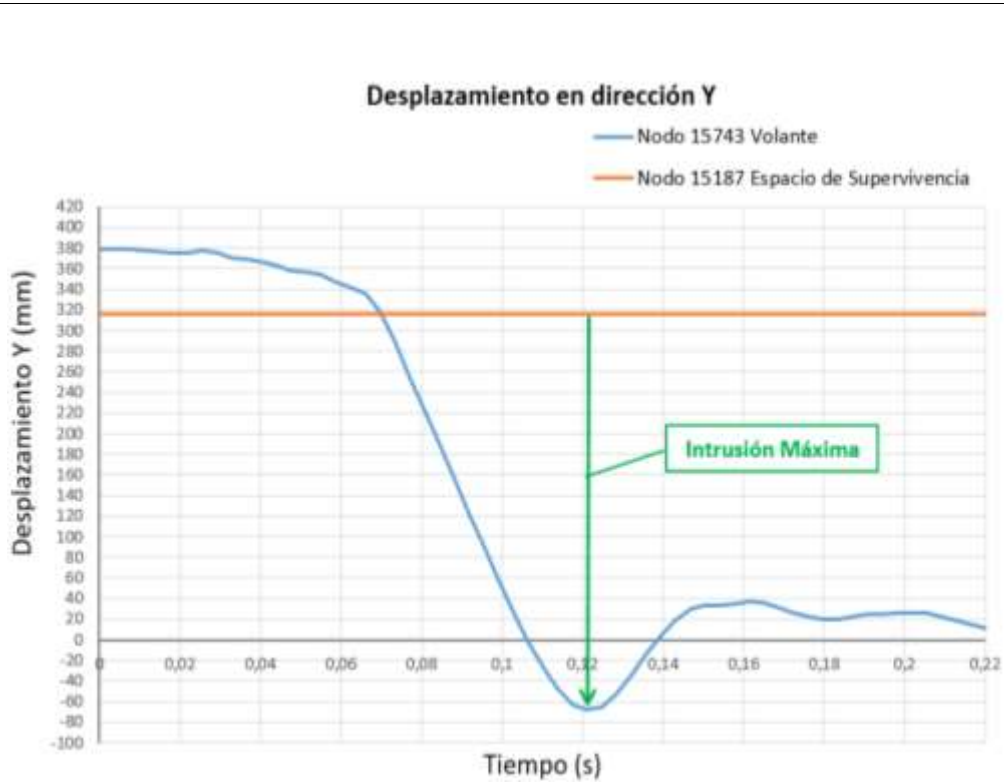
MAESTRIA EN DISEÑO MECÁNICO

SIMULACIÓN DE IMPACTO FRONTAL MODELO 3

Probeta N°	3	Muestra de:	Superestructura de un autobús interprovincial
Normas Aplicables	Reglamento UNECE R 29		
Fecha de ejecución	18-08-2016	Realizado por	Ing. Santiago López
		Revisado por	Ing. Mg. Cesar Arroba
Element Quality Max	0,99	Element Quality Min	0,03
Cantidad de Nodos	15412	Cantidad de elementos	23268
Tiempo de procesamiento	1h03 min	Numero de procesadores	4 de 2.6 Ghz
Velocidad del péndulo ²⁹⁷⁴	1,89 rad/s	Masa del modelo	2986 kg

RESULTADOS DEL ENSAYO

t=0,000 s	t=0,029 s	t=0,051 s	t=0,172 s



REESULTADOS REGISTRADOS

Invade el volante el espacio de supervivencia	SI
---	-----------



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA



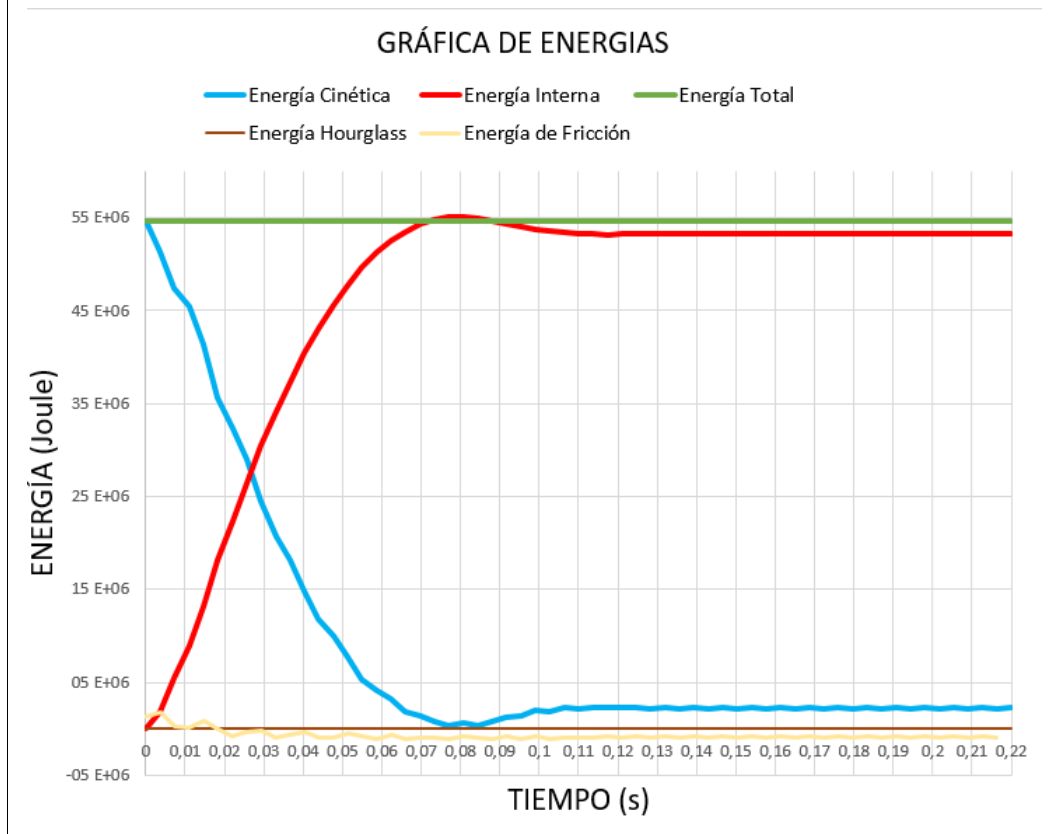
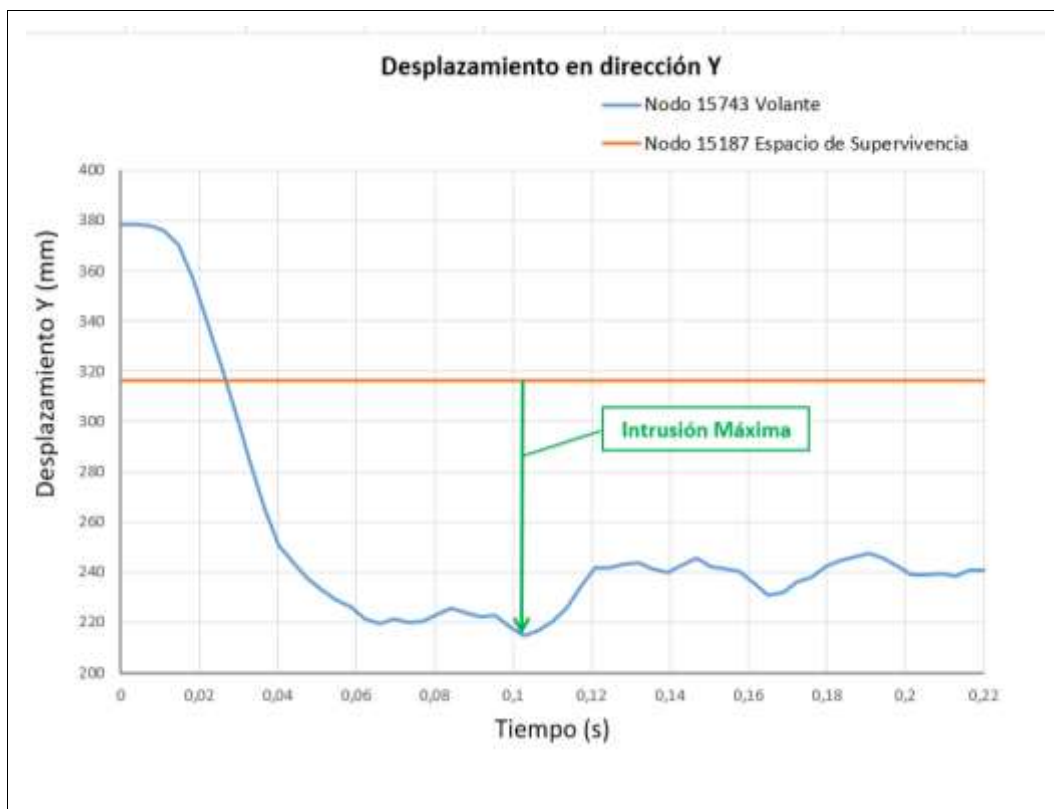
MAESTRIA EN DISEÑO MECÁNICO

SIMULACIÓN DE IMPACTO FRONTAL MODELO 4

Probeta N°	4	Muestra de:	Superestructura de un autobús interprovincial
Normas Aplicables	Reglamento UNECE R 29		
Fecha de ejecución	18-08-2016	Realizado por	Ing. Santiago López
		Revisado por	Ing. Mg. Cesar Arroba
Element Quality Max	0,99	Element Quality Min	0,05
Cantidad de Nodos	15583	Cantidad de elementos	23415
Tiempo de procesamiento	53 min	Numero de procesadores	4 de 2.6 Ghz
Velocidad del péndulo ²⁹⁷⁴	1,89 rad/s	Masa del modelo	3084 kg

RESULTADOS DEL ENSAYO

t=0,000 s	t=0,029 s	t=0,051 s	t=0,172 s



REESULTADOS REGISTRADOS	
Invade el volante el espacio de supervivencia	SI



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA







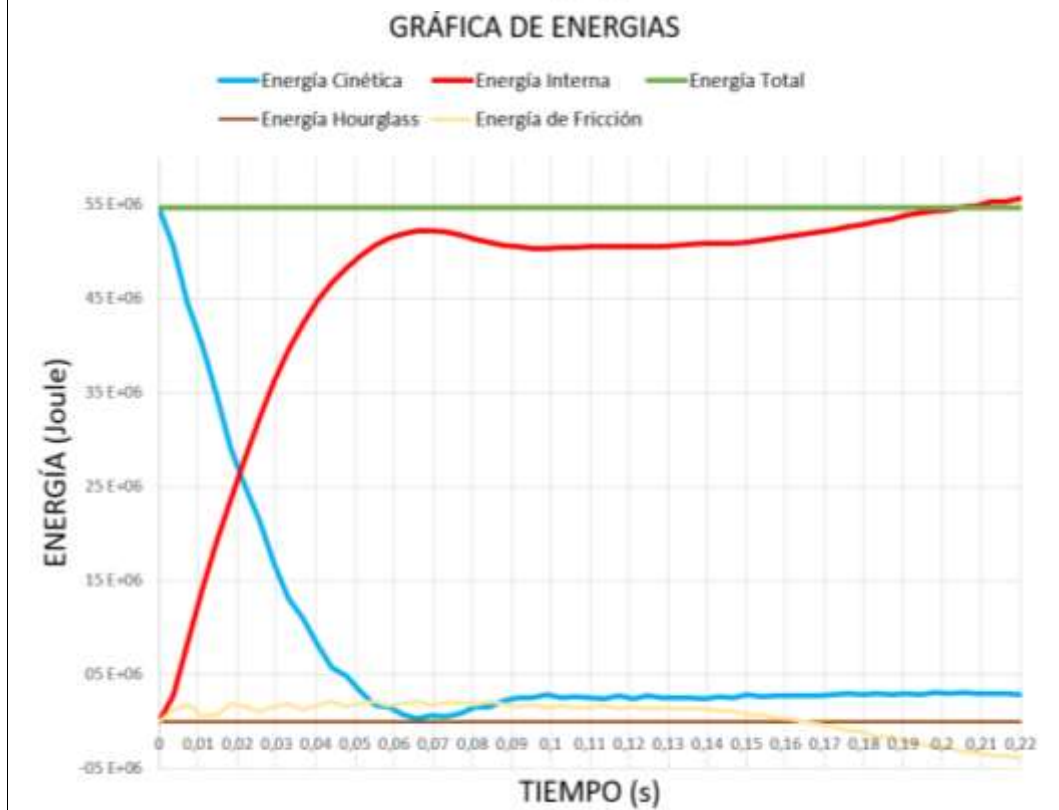
MAESTRIA EN DISEÑO MECÁNICO

SIMULACIÓN DE IMPACTO FRONTAL MODELO 5

Probeta N°	5	Muestra de:	Superestructura de un autobús interprovincial
Normas Aplicables	Reglamento UNECE R 29		
Fecha de ejecución	18-08-2016	Realizado por	Ing. Santiago López
		Revisado por	Ing. Mg. Cesar Arroba
Element Quality Max	0,99	Element Quality Min	0,03
Cantidad de Nodos	15518	Cantidad de elementos	23352
Tiempo de procesamiento	56 min	Numero de procesadores	4 de 2.6 Ghz
Velocidad del péndulo ²⁹⁷⁴	1,89 rad/s	Masa del modelo	3101 kg

RESULTADOS DEL ENSAYO

			
t=0,000 s	t=0,029 s	t=0,051 s	t=0,172 s



REESULTADOS REGISTRADOS	
Invade el volante el espacio de supervivencia	SI



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA



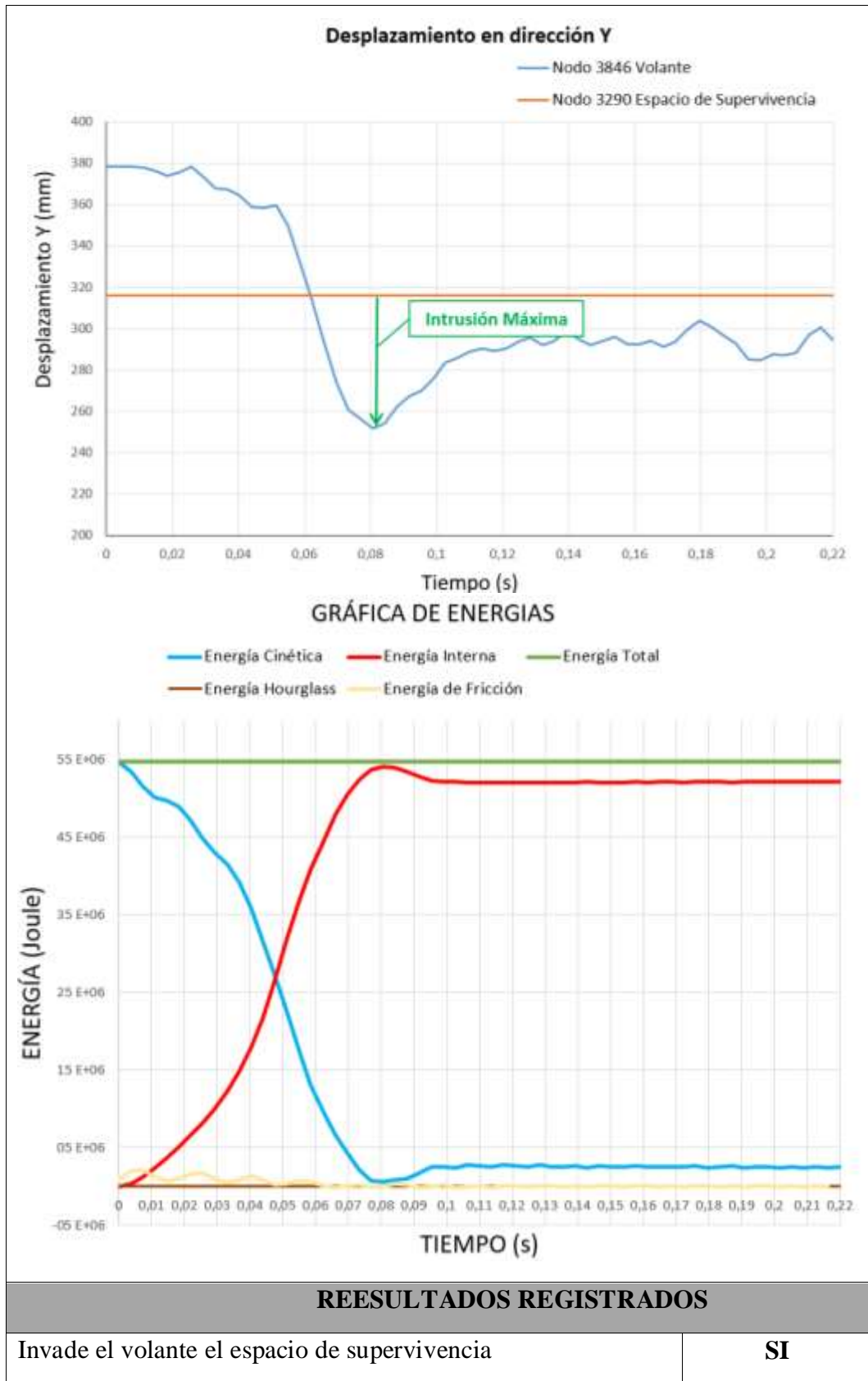
MAESTRIA EN DISEÑO MECÁNICO

SIMULACIÓN DE IMPACTO FRONTAL MODELO 6

Probeta N°	6	Muestra de:	Superestructura de un autobús interprovincial
Normas Aplicables	Reglamento UNECE R 29		
Fecha de ejecución	18-08-2016	Realizado por	Ing. Santiago López
		Revisado por	Ing. Mg. Cesar Arroba
Element Quality Max	0,99	Element Quality Min	0,03
Cantidad de Nodos	15458	Cantidad de elementos	23280
Tiempo de procesamiento	53 min	Numero de procesadores	4 de 2.6 Ghz
Velocidad del péndulo ²⁹⁷⁴	1,89 rad/s	Masa del modelo	3098 kg

RESULTADOS DEL ENSAYO

t=0,000 s	t=0,029 s	t=0,051 s	t=0,172 s





UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA



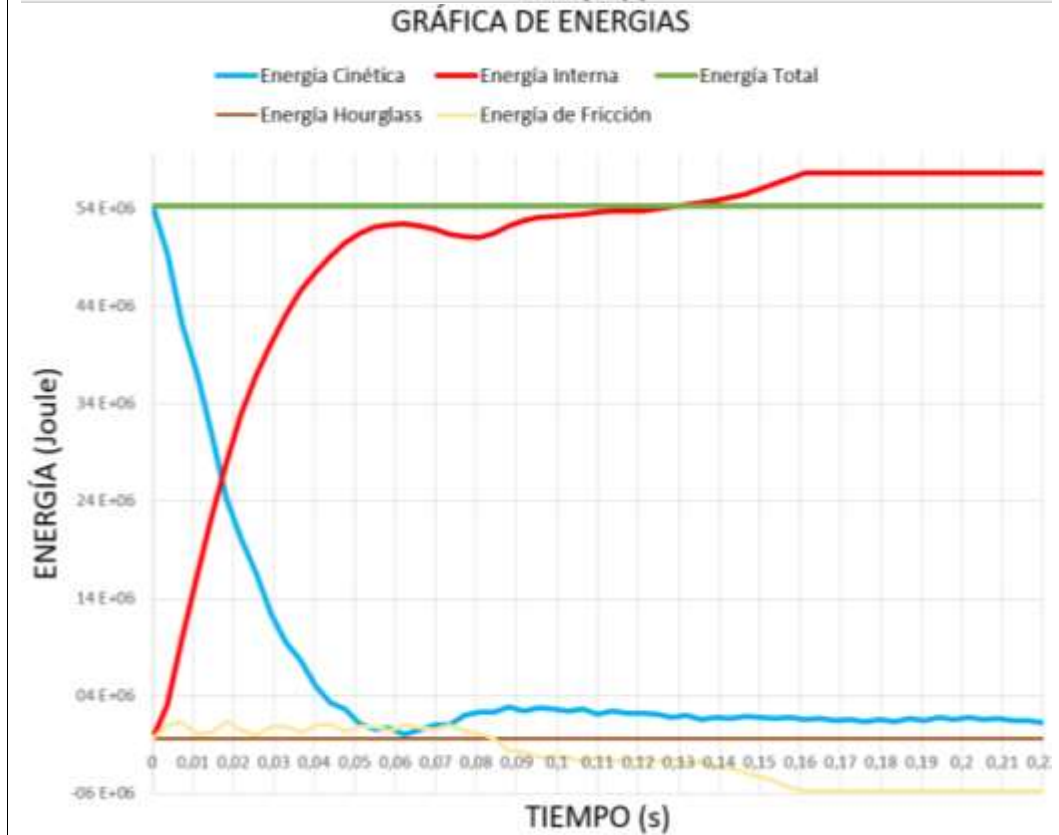
MAESTRIA EN DISEÑO MECÁNICO

SIMULACIÓN DE IMPACTO FRONTAL MODELO 7

Probeta N°	7	Muestra de:	Superestructura de un autobús interprovincial
Normas Aplicables	Reglamento UNECE R 29		
Fecha de ejecución	18-08-2016	Realizado por	Ing. Santiago López
		Revisado por	Ing. Mg. Cesar Arroba
Element Quality Max	0,99	Element Quality Min	0,03
Cantidad de Nodos	15529	Cantidad de elementos	23369
Tiempo de procesamiento	50 min	Numero de procesadores	4 de 2.6 Ghz
Velocidad del péndulo ²⁹⁷⁴	1,89 rad/s	Masa del modelo	3093 kg

RESULTADOS DEL ENSAYO

t=0,000 s	t=0,029 s	t=0,051 s	t=0,172 s



REESULTADOS REGISTRADOS	
Invade el volante el espacio de supervivencia	NO



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA



MAESTRIA EN DISEÑO MECÁNICO

SIMULACIÓN DE IMPACTO FRONTAL MODELO 8

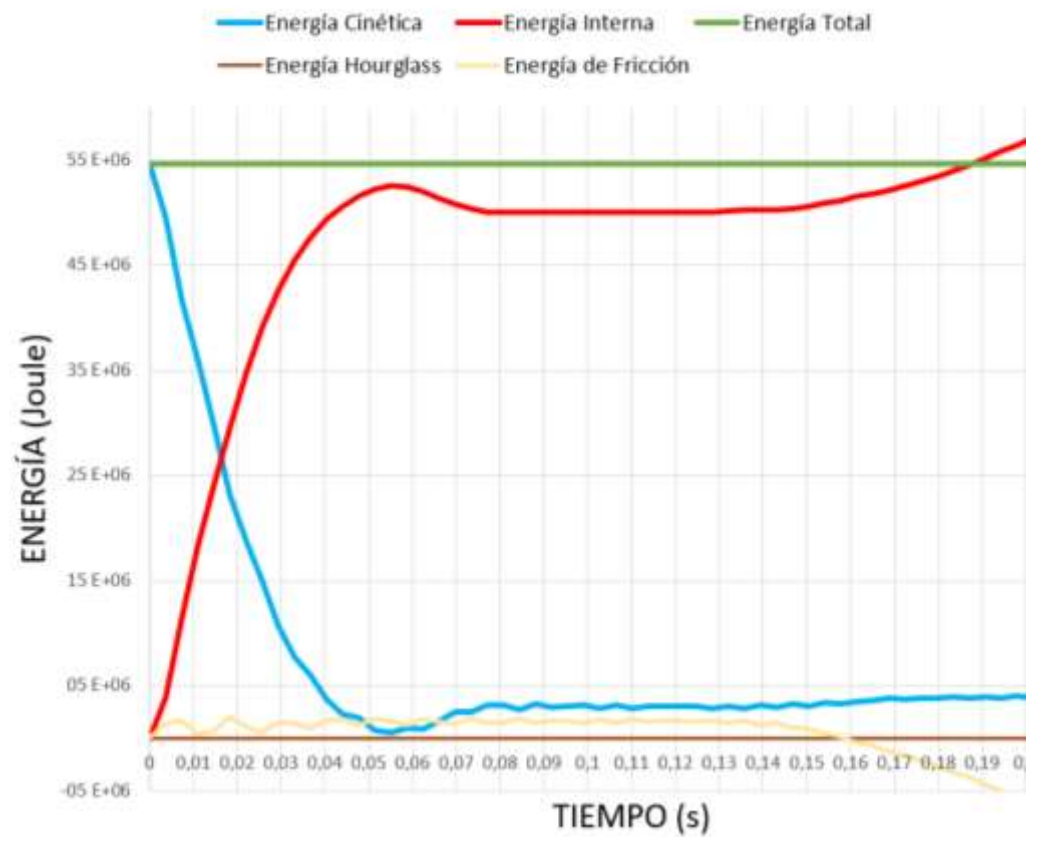
Probeta N°	8	Muestra de:	Superestructura de un autobús interprovincial
Normas Aplicables	Reglamento UNECE R 29		
Fecha de ejecución	18-08-2016	Realizado por	Ing. Santiago López
		Revisado por	Ing. Mg. Cesar Arroba
Element Quality Max	0,99	Element Quality Min	0,03
Cantidad de Nodos	15529	Cantidad de elementos	23369
Tiempo de procesamiento	52 min	Numero de procesadores	4 de 2.6 Ghz
Velocidad del péndulo ²⁹⁷⁴	1,89 rad/s	Masa del modelo	3099 kg

RESULTADOS DEL ENSAYO

t=0,000 s	t=0,029 s	t=0,051 s	t=0,172 s



GRÁFICA DE ENERGIAS



REESULTADOS REGISTRADOS	
Invade el volante el espacio de supervivencia	SI



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA



MAESTRIA EN DISEÑO MECÁNICO

SIMULACIÓN DE IMPACTO FRONTAL MODELO 9

Probeta N°	9	Muestra de:	Superestructura de un autobús interprovincial
Normas Aplicables	Reglamento UNECE R 29		
Fecha de ejecución	18-08-2016	Realizado por	Ing. Santiago López
		Revisado por	Ing. Mg. Cesar Arroba
Element Quality Max	0,99	Element Quality Min	0,03
Cantidad de Nodos	15469	Cantidad de elementos	23297
Tiempo de procesamiento	52 min	Numero de procesadores	4 de 2.6 Ghz
Velocidad del péndulo ²⁹⁷⁴	1,89 rad/s	Masa del modelo	3100 kg

RESULTADOS DEL ENSAYO

t=0,000 s	t=0,029 s	t=0,051 s	t=0,172 s



REESULTADOS REGISTRADOS	
Invade el volante el espacio de supervivencia	SI

4.7 Verificación de la hipótesis

Como parte final del presente estudio se establece que la hipótesis planteada “Las configuraciones estructurales de la sección frontal del autobús inciden en la resistencia de la superestructura en un impacto frontal” debe ser analizada con un contraste de hipótesis de varianza desconocida y distribución t de Student. mediante la siguiente ecuación: (Zamora, 5 ed)

$$t = \frac{\bar{x} - u_0}{S/\sqrt{n}}$$

Donde

u_0 =Desplazamiento

\bar{x} = Desplazamiento medido

S= desviación típica de la muestra

n= Número de pruebas

La variable que se toma encuentra para contrastar la hipótesis es el desplazamiento en el eje Y, que indica un valor de 316,31 mm representando el espacio de supervivencia y los valores de desplazamiento de cada modelo que en el caso de ser igual o menor al del espacio de supervivencia se considera como intrusión y no cumplimiento del reglamento R 29. Planteamos el caso para el primer modelo de la siguiente manera;

1) Hipótesis.

La hipótesis nula: es que el desplazamiento medido en el modelo es menor que el desplazamiento del espacio de supervivencia produciéndose la intrusión de la estructura de la carrocería en el maniquí.

La hipótesis alternativa: es que el desplazamiento medido en el modelo es mayor que el desplazamiento del espacio de supervivencia sin que se produzca la intrusión de la estructura de la carrocería en el maniquí.

$$H_0: u \leq 316,31$$

$$H_1: u > 316,31$$

2) Supuestos.

- Se desconoce σ
- Contraste unilateral

3) Estadístico de Contraste.

$$t = \frac{\bar{x} - u_0}{S/\sqrt{n}} \rightarrow t_{316,31}$$

4) Regla de decisión, con el nivel de significación adoptado $\alpha=0,05$ debido al 95% de fiabilidad esperado.

Si $t_{\text{calculado}} < t_{\alpha}$, Se Acepta H_0

5) Cálculo

$$t_{\alpha=5\%} = 1,86$$

$$S = 54,55$$

$$t = \frac{\bar{x} - u_0}{S/\sqrt{n}} = \frac{162 - 316,31}{54,55/3} = -8,46$$

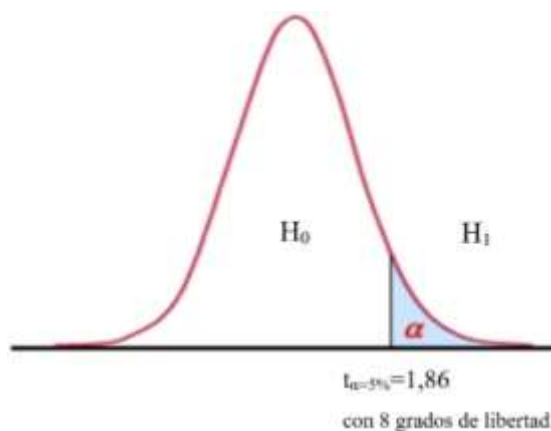


Figura 39. Distribución t de student de datos.
(Fuente: Autor)

6) Conclusión

Como $-8,46 < 1,86$; Se Acepta la hipótesis nula

A continuación, se contrasta todos los modelos y se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.9 Contraste de hipótesis para los modelos analizados.

Modelo	Contraste	Conclusión
2	$-8,52 < 1,86$	Se Acepta la hipótesis nula
3	$-8,48 < 1,86$	Se Acepta la hipótesis nula
4	$-8,05 < 1,86$	Se Acepta la hipótesis nula
5	$-8,48 < 1,86$	Se Acepta la hipótesis nula
6	$-8,47 < 1,86$	Se Acepta la hipótesis nula
7	$8,49 > 1,86$	Se Acepta la hipótesis alterna
8	$-8,57 < 1,86$	Se Acepta la hipótesis nula
9	$-8,49 < 1,86$	Se Acepta la hipótesis nula

(Fuente: Autor)

El análisis estadístico muestra que en el caso del modelo 7 se acepta la hipótesis alterna, esto significa que las configuraciones estructurales realizadas al modelo inicial si inciden en la resistencia al impacto de la superestructura del autobús y además se prueba que se cumple con la condición del reglamento R 29 de la UNECE de no invadir el espacio de supervivencia del ocupante de la cabina al no existir intrusión de la estructura de la carrocería en el maniquí. Las dimensiones generales, tabla de materiales y tabla de soldaduras del modelo 7 se especifican en los planos del Anexo A5.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Mediante el análisis de resultados de las simulaciones de los modelos propuestos y simulados mediante el método de elementos finitos, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Se estableció una geometría del modelo con los principales componentes estructurales de la superestructura, a la que se le aplicó todas las condiciones de frontera (ejemplo fijación de apoyos móviles, contacto entre superficies, etc) y recomendaciones en cuanto al peso del péndulo, ubicación del péndulo y vehículo, velocidad de impacto, según el reglamento UNECE R 29, permitiendo obtener una simulación lo más cercana a un impacto real y la posibilidad de evaluar diferentes diseños en busca de vehículos más seguros.
- La variación de la configuración se aplicó a las siguientes variables de una sección crítica establecida en base a la deformación plástica y energía absorbida en el impacto: Espesor de 2 y 3 mm. Geometría: tubo cuadrado 50x50, tubo rectangular 100x50. Número de componentes: 6, 9 y 11, de lo cual se obtuvo 9 modelos que se simularon con las mismas condiciones de frontera y velocidad inicial de impacto con el propósito de evaluar la resistencia y el comportamiento de cada uno.
- El modelo 1 se genera con las condiciones originales de la superestructura de un bus interprovincial y se observa la intrusión del espacio de supervivencia por lo tanto el incumplimiento del reglamento UNECE R 29, esto puede servir de referencia para que el fabricante de carrocerías mejore el diseño y aumente la seguridad pasiva del vehículo.
- Los modelos 2, 3, 4, 5, 6, 8 y 9 fueron modificados como se indica en la tabla 4.8 observando que ninguno de ellos cumple con el reglamento UNECE R 29 debido a la intrusión del espacio de supervivencia, cabe notar que en los modelos 8 y 9 se

tiene un incremento de la energía de fricción y energía interna debido a la interferencia de las superficies en contacto.

- El modelo 7 el cual se modifica el espesor a 3 mm, el pórtico central con tubo rectangular de 100x 50 y la colocación de una placa triangular de 6 mm de espesor, cumple con el reglamento ECCE R29 ya que ningún componente invade el espacio de supervivencia. Además, se determina que existe una distancia post impacto de 5 mm entre el volante y el espacio de supervivencia, ésta puede ser una alternativa de diseño que puede ser analizado por los fabricantes de carrocerías para el mejoramiento de la seguridad de los autobuses.
- Se observa en la figura 34 la deformación plástica efectiva de la superestructura que los miembros verticales del pórtico central y el divisor de parabrisas presenta un modo de falla por fluencia y con la mayor deformación plástica, por lo que se consideran críticos, Además no se observa falla por ruptura de ningún componente de la superestructura.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda al fabricante revisar sus diseños y de ser posible implementar el modelo 7 que cumplió con el Reglamento R 29, esto supondría una mejora en la seguridad pasiva del vehículo y mayor protección del ocupante.
- El presente trabajo solo considera los componentes estructurales principales de la carrocería por lo que se sugiere analizar nuevos modelos agregando más componentes del vehículo como son los sistemas de dirección, refrigeración generación, etc. Con el fin de determinar su influencia en la resistencia a impacto frontal.
- Se aportaría en gran medida si los resultados de las simulaciones producidas en éste trabajo se pudieran validar con análisis experimentales que muestren las deformaciones y modo de falla de la superestructura.

Bibliografía

- Arroba, C. (2013). *Estudio del comportamiento mecánico de una sección de la superestructura del autobus interprovincial marca miral infiniti en chasis hino ak sometida a volccadura, mediante los programas ansys ls-dyna y su incidencia en el espacio de supervivencia*. Universidad Técnica de Ambato.
- Beck G, Simon, A. (1987). Prediction of residual stresses. En N.-L. A, *Advances in surface treatments* (pp. 307-320). Pergamon Press.
- Cámara Nacional de Fabricantes de Carrocerías. (2014). *Informe Diagnóstico del Sector Carrocero*.
- Cepeda J. (2006). *Análisis del comportamiento mecánico del sistema estructural del autobus feline para la empresa carrocera mmiral buses*. Escuela Politécnica del Ejército.
- Gere J, Goodno, B. (2009). *Mecánica de Materiales*. Cengage.
- Gupta K, Meek, J. (2003). *Finite Element Multidisciplinary Analysis*. AIAA.
- Hibbeler R. (2011). *Mecánica de Materiales*. Prentice Hall.
- Jangpradist P, Senawat, S. (2015). Improvement of crashworthiness of Bus Structure under Frontal Impact. *Conference: 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics*. Incheon: Korea.
- Julaluk C, Sujeeprapa, C. *Study of effects of vehicle- front shapes and impact speeds on post- crash kinematic and injury mechanisms*. King Mongkuts University of North Bangkok.
- Kannengiesser T, Grunder, K. (2013). Stress and Strain Determination. En C. H, *Handbook of Technical Diagnostics*.(pp. 94-108). Springer.
- Kim H, Ben, G. (2007). *Comparison of Experimental Results with FEM for Impact Response Behavior of CFRP Tubes and CFRP/Al Hybrid Beams for Absorbing Impact Energy in Full-lap and Side Collisions of Automobiles*. Institute of Industrial Technology, Nihon University.
- Kudryavtsev, Y. (2008). Residual Stress. En Sharpe, *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics* (pp. 371-386). Springer.
- Kwasniewski L, Nimbalkar, R. (2005). Crashworthiness assesment of a paratransit bus. *International Journal of Imact Engineering*, 32.(pp. 883-888).
- López F. (2010). Diagnóstico de Autobuses. *CESVIMAP*, 3.
- LS- DYNA Keyword User´s Manual. (2001).
- LS-DYNA Theory Manual. (2006).

- Mercedes Benz. (1999). *Directrices para MONTaje de Superestructuras y Equipos en Chasis y Plataformas*.
- Mirzaamiri R, Esfahanian, M. (2012). Test Simulation and Structure Improvement of IKCO 2624 Truck According to ECE - R29 Regulation. *International Journal of Automotive Engineering*.(pp180-192).
- Moradi R, Septally, R. (2013). Use of Finite Element Analysis for the Prediction of Driver Fatality Ratio Based on Vehicle Intrusion Ratio in Head-On Collisions. *Scientific Research*.
- Niku-Lary, A. (1987). *Advances in Surface Treatments*. Pergamon Books L t d .
- Olivares G, Yavad, V. (2009). Injury mechanisms to mass transit bus during frontal, side and rear impact crash scenarios. *Conferencia Técnica Internacional sobre la seguridad mejorada de vehículos, 11*.(pp.09-27).
- Philip J, Mungale, S. (2013). Correlation of test Results for ECE R 29 load cases with CAE simulation. *Altair Technology Conference*. India.
- Pozo J. (2014). *Propuesta de procedimientos de análisis de diseño de superestructuras de autobuses*. Mexico.
- Prime, M. (1999). Measuring residual stress and the resulting stress intensity factor in compact tension specimens. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and*.(pp.195 – 204).
- RTE INEN 043. (2010). REGLAMENO TÉCNICO ECUATORIANO RTE INEN "VEHICULOS DE TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS INTRAREGIONAL, INTERPROVINCIAL E INTRAPROVINCIAL".
- Sharma M. (2013). Protection of Occupants for Survival Space as per ECCE R29: A Study of Regulatory Requirements, New Proposals and Challenges of Implementation in Global Context. *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress* (pp. 747-768). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Singh M. (2013). Frontal Crash of bus. (pp. 533-547). Altair Technology Conference.
- Tech T, Iturrioz, I. (2005). Study of a frontal bus impact against a rigid wall. *WIT Transactions on engineering Sciences, 49*.
- Tejasagar A, Srinkanth. K. (2012). Simulation of Vehicular Frontal Crash-Test. *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering*, Vol 2.
- UNECE R 29. (2007). VEHICLES WITH REGARD TO THE PROTECCION OF THE OCUPANTS OF DE CAB OF A COMMERCIAL VEHICLE. UNECE.

- Walber M, Agenor, F. Evaluation of the fastening in the frame of a road bus submitted to frontal impact. *Latin American Journal of Solid and Structures*, 11.(pp.1463-1489).
- Wu S, Qiu, W. (2008). Nonlinear transient dynamic analysis by explicit finite element with iterative consistent mass matrix. *Communications in numerical methods in engineering*.
- Zamora, M. (5 ed). *Estadística descriptiva e inferencial*.
- Zienkewicz O, Taylor. R. (2005). *The finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Elsevier Butterworth-Heinemann.

ANEXOS

Anexo A1 Reglamento R 29 de la UNECE, concerniente la aprobación de vehículos con vista a la protección del ocupante de la cabina de un vehículo comercial.

2 January 2012

Agreement

Concerning the adoption of uniform technical prescriptions for wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles and the conditions for reciprocal recognition of approvals granted on the basis of these prescriptions*

(Revision 2, including the amendments which entered into force on 16 October 1995)

Addendum 28: Regulation No. 29

Revision 2

Incorporating all valid text up to:

02 series of amendments - Date of entry into force: 27 February 1999

Supplement 1 to the series 02 of amendments - Date of entry into force: 11 June 2007

03 series of amendments - Date of entry into force: 30 January 2011

Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants of the cab of a commercial vehicle



UNITED NATIONS

* Former title of the Agreement: Agreement Concerning the Adoption of Uniform Conditions of Approval and Reciprocal Recognition of Approval for Motor Vehicle Equipment and Parts, done at Geneva on 20 March 1958.

Regulation No. 29

Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants of the cab of a commercial vehicle

Contents

	<i>Page</i>
1. Scope	4
2. Definitions.....	4
3. Application for approval	5
4. Approval	5
5. Requirements.....	6
6. Modifications and extension of the approval of the vehicle type	7
7. Conformity of production.....	7
8. Penalties for non-conformity of production	7
9. Production definitely discontinued.....	8
10. Transitional provisions	8
11. Names and addresses of Technical Services responsible for conducting approval tests and of Type Approval Authorities	9
Annexes	
1 ECE Type-approval documentation	10
Part 1 – Model information document.....	10
Part 2 – Communication.....	12
2 Arrangements of approval marks	13
3 Test procedure.....	14
Appendix 1: Instructions for securing vehicles to the test bed	18
Appendix 2: Manikin to be used to verify the survival space	21
4 Procedure for determining the "H" point and the actual torso angle for seating positions in motor vehicles	23
Appendix 1: Description of the three-dimensional H point machine (3-D H machine)	24
Appendix 2: Three dimensional reference system	25
5 Reference data concerning seating positions.....	26

1. Scope

This Regulation applies to vehicles with separate driver's cab of category N¹ with regard to the protection of the occupants of the cab.

2. Definitions

For the purposes of this Regulation:

- 2.1. "*Approval of a vehicle*" means the approval of a vehicle type pursuant to the requirements of this Regulation, with regard to the protection of the occupants of the cab of a vehicle in the event of head-on impact or of overturning.
- 2.2. "*Vehicle type*" means a category of motor vehicle which does not differ in such essential respects as:
 - 2.2.1. The dimensions, shapes and materials of the components of the vehicle cab; or
 - 2.2.2. The manner of attachment of the cab to the chassis frame;
- 2.3. "*Transverse plane*" means a vertical plane perpendicular to the longitudinal plane of the vehicle;
- 2.4. "*Longitudinal plane*" means a plane parallel to the median longitudinal plane of the vehicle;
- 2.5. "*Cab-over engine vehicle*" means a vehicle where more than half of the engine length is rearward of the foremost point of the windshield base and the steering wheel hub is in the forward quarter of the vehicle length.
- 2.6. "*R point*" means the seating reference point as defined in Annex 4, paragraph 2.4.
- 2.7. "*H-point*" means the point defined in Annex 4, paragraph 2.3.
- 2.8. "*Test A*" means a frontal impact test intended to evaluate the resistance of a cab in frontal impact accident.
- 2.9. "*Test B*" means an impact test to the A-pillars of the cab intended to evaluate the resistance of a cab in a 90° rollover accident with subsequent impact.
- 2.10. "*Test C*" means a cab roof strength test intended to evaluate the resistance of a cab in a 180° rollover accident.
- 2.11. "*A-pillar*" means the foremost and outermost roof support.
- 2.12. "*Windscreen*" means the frontal glazing of the vehicle situated between the A-pillars.

¹ As defined in the Consolidated Resolution on the Construction of Vehicles (R.E.3.), document ECE/TRANS/WP.29/78/Rev.2, para. 2

3. Application for approval

- 3.1. The application for approval of a vehicle type with regard to the protection of the occupants of the cab of a vehicle shall be submitted by the vehicle manufacturer or by his duly accredited representative.
- 3.2. It shall be accompanied by drawings of the vehicle, showing the position of the cab on the vehicle and the manner of its attachment, and by sufficiently detailed drawings relating to the structure of the cab, all the said drawings being submitted in triplicate. A model for the information document relating to the construction features is given in Annex 1, Part 1.

4. Approval

- 4.1. If the vehicle type submitted for approval pursuant to this Regulation meets the requirements of paragraph 5 hereof, approval of that vehicle type shall be granted.
- 4.2. An approval number shall be assigned to each type approved. Its first two digits (at present 03 corresponding to the 03 series of amendments) shall indicate the series of amendments incorporating the most recent major technical amendments made to the Regulation at the time of issue of the approval. The same Contracting Party may not assign the same number to another vehicle type within the meaning of paragraph 2.2 above.
- 4.3. Notice of approval or of extension or of refusal or of withdrawal of approval or production definitely discontinued of a vehicle type pursuant to this Regulation shall be communicated by the Parties to the Agreement which apply this Regulation by means of a form conforming to the model in annex 1 to this Regulation.
- 4.4. There shall be affixed, conspicuously and in a readily accessible place specified on the approval form, to every vehicle conforming to a vehicle type approved under this Regulation, an international approval mark consisting of:
- 4.4.1. A circle surrounding the letter "E" followed by the distinguishing number of the country which has granted the approval² and
- 4.4.2. the number of this Regulation, followed by the letter "R", a dash and the approval number, to the right of the circle prescribed in paragraph 4.4.1.;
- 4.5. If the vehicle conforms to a vehicle type approved, under one or more other Regulations annexed to the Agreement, in the country which has granted approval under this Regulation, the symbol prescribed in paragraph 4.4.1. need not be repeated; in such a case the additional numbers and symbols of all the Regulations under which approval has been granted in the country which has granted approval under this Regulation shall be placed in vertical columns to the right of the symbol prescribed in paragraph 4.4.1.
- 4.6. The approval mark shall be clearly legible and be indelible.
- 4.7. The approval mark shall be placed close to or on the vehicle data plate.

² The distinguish numbers of the Contracting Parties to the 1958 Agreement are reproduced in Annex 3 to Consolidated Resolution on the Construction of Vehicles (R.E.3), document ECE/TRANS/WP.29/78/Rev.2.

- 4.8. Annex 2 to this Regulation gives examples of arrangements of approval marks.

5. Requirements

5.1. General requirements

- 5.1.1. The cab of the vehicle shall be so designed and so attached to the vehicle as to eliminate to the greatest possible extent the risk of injury to the occupants in the event of an accident.

- 5.1.2. Vehicles of categories N_1 and vehicles of categories N_2 with a gross vehicle mass not exceeding 7.5 t shall be subjected to the tests A and C, as described in Annex 3, paragraphs 5. and 7..

However a vehicle type which has been approved according to Regulation No. 33 or to Regulation No. 94 may be considered to have satisfied the requirements on frontal impact (test A).

- 5.1.3. Vehicles of categories N_3 and vehicles of categories N_2 with a gross vehicle mass exceeding 7.5 t shall be subjected to the tests A, B, and C, as described in Annex 3, paragraphs 5., 6. and 7..

- 5.1.4. Test A (frontal impact) shall only be conducted on Cab-over-Engine vehicles.

- 5.1.5. One, two or three cabs, at the manufacturer's choice, may be used for the purpose of demonstrating compliance with paragraphs 5.1.2. or 5.1.3. above. However both phases in test C, if applicable, shall be conducted on the same cab.

- 5.1.6. None of the tests A, B, C, need be carried out if the manufacturer can show by computer simulation or calculations of the strength of the component parts of the cab or by other means to the satisfaction of the Technical Service that the cab will not undergo deformation dangerous to the occupants (penetration into the survival space) if subjected to the conditions of the tests.

5.2. Survival space required after the test or tests

- 5.2.1. After undergoing each of the tests referred to in paragraphs 5.1.2. or 5.1.3., the cab of the vehicle shall exhibit a survival space allowing accommodation of the manikin defined in Annex 3, Appendix 2, on the seat, when the latter is in its median position, without contact between the test manikin and non-resilient parts with a Shore-Hardness of 50 or more. No account shall be taken of non-resilient parts which can be moved away without any tools from the test manikin by using a force of less than 100 N. To facilitate installation, the manikin may be inserted in dismantled form and assembled in the cab. For this purpose, the seat shall be adjusted to its most rearward position and the manikin completely assembled and so placed that its H point coincides with the R point. The seat shall then be moved forward to its median position for the assessment of the survival space. As an alternative to the test manikin defined in Annex 3, Appendix 2, a fiftieth percentile Hybrid II or III male dummy, with or without measuring instrumentation, the description of which is given in Regulation No. 94, may be used.

- 5.2.2. The space so defined shall be verified for every seat provided by the manufacturer.

- 5.3. Other conditions
- 5.3.1. During the tests the components by which the cab is secured to the chassis frame may be distorted or broken, provided that the cab remains attached to the chassis frame.
- 5.3.2. None of the doors shall open during the tests, but the doors shall not be required to open after testing.

6. Modification and extension of approval of the vehicle type

- 6.1. Every modification of the vehicle type shall be notified to the Type Approval Authority which approved the vehicle type. The department may then either:
 - 6.1.1. Consider that the modifications made are unlikely to have an appreciable adverse effect, and that in any case the vehicle still complies with the requirements;
 - 6.1.2. Or require a further test report from the Technical Service responsible for conducting the tests.
- 6.2. Confirmation or refusal of approval, specifying the alterations, shall be communicated by the procedure specified in paragraph 4.3. above to the Contracting Parties to the Agreement which apply this Regulation.
- 6.3. The competent authority issuing an extension of approval shall assign a series number for such an extension and inform thereof the other Parties to the 1958 Agreement applying this Regulation by means of a communication form conforming to the model in Annex 1 to this Regulation.

7. Conformity of production

The conformity of production procedures shall comply with those set out in the Agreement, Appendix 2 (E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.2), with the following requirements:

- 7.1. A vehicle approved pursuant to this Regulation shall be so manufactured as to conform to the type approved by meeting the requirements of paragraph 5. above.
- 7.2. The Competent Authority which has granted approval may at any time verify the conformity of control methods applicable to each production unit. The normal frequency of such inspections shall be once every two years.

8. Penalties for non-conformity of production

- 8.1. The approval granted in respect of a vehicle type, pursuant to this Regulation, may be withdrawn if the requirement laid down in paragraph 7.1. above is not complied with.
- 8.2. If a Party to the Agreement which applies this Regulation withdraws an approval it has previously granted, it shall forthwith so notify the other Contracting Parties applying this Regulation by means of a communication form conforming to the model in Annex 1 to this Regulation.

9. Production definitely discontinued

If the holder of the approval completely ceases to manufacture a type of vehicle approved in accordance with this Regulation, he shall so inform the authority which granted the approval. Upon receiving the relevant communication, that authority shall inform thereof the other Parties to the 1958 Agreement which apply this Regulation by means of a communication form conforming to the model in Annex 1 to this Regulation.

10. Transitional provisions

- 10.1. As from the official date of entry into force of the 02 series of amendments, no Contracting Party applying this Regulation shall refuse to grant ECE approval under this Regulation as amended by the 02 series of amendments.
- 10.2. As from 1 October 2002 Contracting Party applying this Regulation shall grant ECE approvals only if the requirements of this Regulation, as amended by the 02 series of amendments are satisfied.
- 10.3. As from 1 October 2006 Contracting Party applying this Regulation may refuse to recognize approvals which were not granted in accordance with the 02 series of amendments to this Regulation.
- 10.4. As from the official date of entry into force of the 03 series of amendments, no Contracting Party applying this Regulation shall refuse to grant ECE approval under this Regulation as amended by the 03 series of amendments.
- 10.5. As from 72 months after the date of entry into force of the 03 series of amendments Contracting Parties applying this Regulation shall grant ECE approval under this Regulation to the new types of cabs only if the requirements of this Regulation, as amended by the 03 series of amendments, are satisfied.
- 10.6. Contracting Parties applying this Regulation shall not refuse to grant extensions of approval to the preceding series of amendments to this Regulation.
- 10.7. Contracting Parties applying this Regulation shall continue to grant approvals to those types of vehicles which comply with the requirements of this Regulation as amended by the preceding series of amendments during the 72 months' period which follows the date of entry into force of the 03 series of amendments.
- 10.8. No Contracting Party applying this Regulation shall refuse national or regional type approval of a vehicle type approved to the 03 series of amendments to this Regulation.
- 10.9. Even after the entry into force of the 03 series of amendments to this Regulation, approvals of the vehicles to the preceding series of amendments to this Regulation shall remain valid and Contracting Parties applying this Regulation shall continue to accept them.

**11. Names and addresses of Technical Services
responsible for conducting approval tests and of
Type Approval Authorities**

The Parties to the Agreement which apply this Regulation shall communicate to the Secretariat of the United Nations the names and addresses of the Technical Services conducting approval tests, and of the Type Approval Authorities which grant approval and to which forms certifying approval or extension, or refusal or withdrawal of approval, issued in other countries, are to be sent.

Annex 1 - ECE type-approval documentation

Part 1 - Model information document

Pursuant to Regulation No. 29 relating to type-approval of the cab

The following information, if applicable, must be supplied in triplicate and include a list of contents. Any drawings must be supplied in appropriate scale and in sufficient detail on size A4 or on a folder of A4 format. Photographs, if any, must show sufficient detail.

1. General
- 1.1. Make (trade name of manufacturer):
- 1.2. Type:
- 1.3. Means of identification of type, if marked on the vehicle:
- 1.3.3. Location of that marking:
- 1.4. Category of vehicle¹:
- 1.5. Name and address of manufacturer:
- 1.6. Address(es) of assembly plant(s):
2. General Construction Characteristics of the Vehicle
- 2.1. Photographs and/or drawings of a representative vehicle:
- 2.2. Dimensional drawing of the whole vehicle:
- 2.3. Number of axles and wheels:
- 2.6. Position and arrangement of the engine:
- 2.7. Driving cab (cab-over-engine or bonnet)²
- 2.8. Hand of drive:
3. Masses and Dimensions (in kg and mm) (refer to drawing where applicable)
- 3.1. Technically permissible maximum laden mass stated by the manufacturer:
- 3.2. Technical permissible maximum mass for the front axle or axles of the vehicle:
4. Cab
- 4.1. Type of cab: (normal/sleeper/top-sleeper)³:

¹ As defined in the Consolidated Resolution on the Construction of Vehicles (R.E.3.), document ECE/TRANS/WP.29/78/Rev.2, para. 2

² Cab-over-engine means a configuration in which more than half of the engine length is rearward of the foremost point of the windshield base and the steering wheel hub in the forward quarter of the vehicle length.

³ Delete where not applicable (there are cases where nothing needs to be deleted when more than one entry is applicable).

- 4.2. Materials used and methods of construction:
- 4.3. Door configuration and number of doors:
- 4.4. Drawings of door latches and retention components and their position in the doors:
- 4.5. Number of seats:
- 4.6. R-points:
- 4.7. Detailed description of the cab of the vehicle type including its dimensions, configuration and constituent materials and its attachment to any chassis frame:
- 4.8. Drawings of the cab and those parts of its interior arrangement which have an influence on the residual space:
- 5. Steering
- 5.1. Schematic diagram(s) of the steering control(s):
- 5.2. Range and method of adjustment (if any), of the steering control:

Annex 1 - Part 2

Communication

(maximum format: A4 (210 x 297 mm))



issued by: Name of administration:

.....
.....
.....

concerning²: APPROVAL GRANTED
APPROVAL EXTENDED
APPROVAL REFUSED
APPROVAL WITHDRAWN
PRODUCTION DEFINITELY DISCONTINUED

of a vehicle type with regard to protection of the occupants of the cab of a vehicle pursuant to Regulation No. 29.

Approval No:

Extension No:

1. Trade name or mark of the vehicle:
2. Vehicle type:
3. Manufacturer's name and address:
4. If applicable, name and address of manufacturer's representative:
5. Brief description of the cab's design and method of attachment:
6. Vehicle submitted for approval on:
7. Technical Service responsible for conducting approval tests:
8. Date of report issued by that service:
9. Number of report issued by that service:
10. Approval granted/refused/extended/withdrawn²
11. Position of approval mark on the vehicle:
12. Place:
13. Date:
14. Signature:

The list of documents deposited with the Type Approval Authority which has granted approval is annexed to this communication and may be obtained on request.

¹ Distinguishing number of the country which has granted/extended/refused or withdrawn approval.

² Strike out what does not apply.

Annex 2

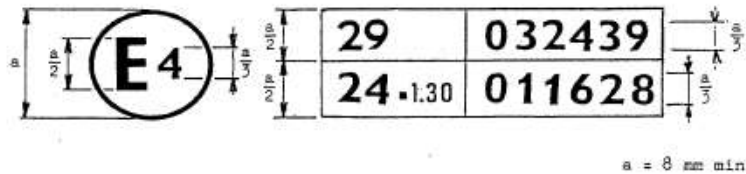
Arrangements of approval marks

Model A
 (See paragraph 4.4. of this Regulation)



The above approval mark affixed to a vehicle shows the vehicle type concerned has with regard to the protection of the occupants of the cab of a commercial vehicle, been approved in the Netherlands (E 4), under the number 03249. The first two digits of the approval number indicate the Regulation No. 29 already included the 03 series of amendments when the approval was given.

Model B



The above approval mark affixed to a vehicle shows that the vehicle type concerned has been approved in the Netherlands (E 4) pursuant to Regulations Nos. 29 and 24¹ (In the case of the latter Regulation the corrected absorption coefficient is 1.30 m³). The approval numbers indicate that on the dates on which these approvals were granted, Regulations Nos. 29 and 24 included the 03 series of amendments.

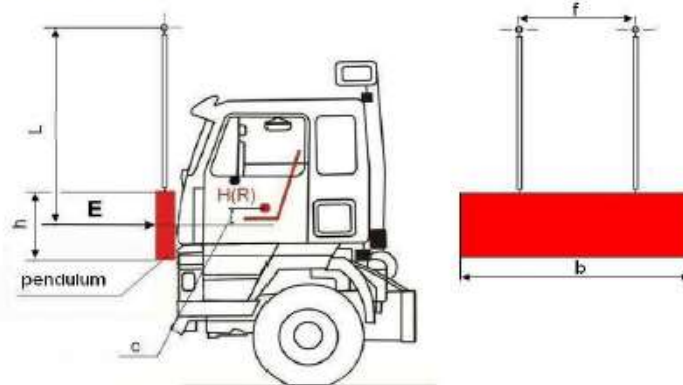
¹ The second number is given merely as an example.

Annex 3

Test procedure

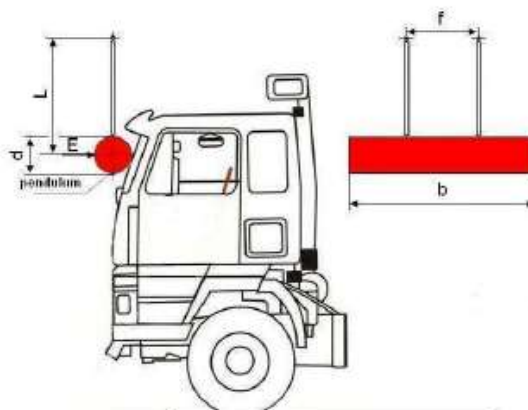
1. Doors
Before the tests the doors of the cab shall be closed but not locked.
2. Engine
For test A the engine, or a model equivalent thereto in mass, dimensions and mounting, shall be fitted to the vehicle.
3. Cab
The cab shall be equipped with the steering mechanism, steering wheel, instrument-panel and the driver and passenger seats. The steering wheel and the seating position shall be adjusted to their positions for normal use as prescribed by the manufacturer.
4. Anchorage of the cab
For test A, the cab shall be mounted on a vehicle. For tests B, C the cab shall, at the manufacturer's choice, be mounted either on a vehicle or on a separate frame. The vehicle or frame shall be secured in the manner prescribed in Appendix 1 to this annex.
5. Front impact test (test A)

Figure 1
Front impact test (test A)



- 5.1. The impactor shall be made of steel and its mass shall be evenly-distributed; its mass shall not be less than 1,500 kg. Its striking surface, rectangular and flat, shall be 2,500 mm wide and 800 mm high (see b and h on figure 1). Its edges shall be rounded to a radius of curvature of 10 mm± 5 mm.
- 5.2. The impactor assembly shall be of rigid construction. The impactor shall be freely suspended by two beams rigidly attached to it and spaced not less than 1,000 mm apart (see f on figure 1). The beams shall be not less than 3,500 mm long from the axis of suspension to the geometric centre of the impactor (L on figure 1).
- 5.3. The impactor shall be so positioned that in the vertical position:
 - 5.3.1. Its striking face is in contact with the foremost part of the vehicle;
 - 5.3.2. Its centre of gravity is $c=50 +5/ - 0$ mm below the R point of the driver's seat, and
 - 5.3.3. its centre of gravity is in the median longitudinal plane of the vehicle.
- 5.4. The impactor shall strike the cab at the front in the direction towards the rear of the cab. The direction of impact shall be horizontal and shall be parallel to the median longitudinal plane of the vehicle.
- 5.5. The impact energy shall be:
 - 5.5.1. 29.4 kJ in the case of vehicles of category N_1 and of vehicles of category N_2 with a gross vehicle mass not exceeding 7.5 t.
 - 5.5.2. 55 kJ in the case of vehicles of category N_3 and of vehicles of category N_2 with a gross vehicle mass exceeding 7.5 t.
6. Front pillar impact test (Test B)

Figure 2
Front pillar impact test (Test B)



- 6.1. The impactor shall be rigid and its mass shall be evenly-distributed; its mass shall not be less than 1,000 kg. The impactor shall be cylindrical with a diameter d of the cylinder of 600 ± 50 mm and a length b of not less than 2,500 mm. Its edges shall be rounded to a radius of curvature of not less than 1.5 mm.
- 6.2. The impactor assembly shall be of rigid construction. The impactor shall be freely suspended by two beams rigidly attached to it and spaced not less than $f = 1,000$ mm apart. The beams shall not be less than $L = 3,500$ mm long from the axis of suspension to the geometric centre of the bob impactor.
- 6.3. The impactor shall be so positioned that when its suspension is in the vertical position:
 - 6.3.1. Its striking face is in contact with the foremost part of the cab;
 - 6.3.2. Its median longitudinal line is horizontal and perpendicular to the median longitudinal vertical plane of the cab;
 - 6.3.3. Its center of gravity is midway between the lower and the upper windscreen frame, as measured along the windscreen and along the median longitudinal vertical plane of the cab;
 - 6.3.4. Its centre of gravity is in the median longitudinal plane of the cab;
 - 6.3.5. Its length is equally distributed over the width of the vehicle, overlapping the full width of both A-pillars.
- 6.4. The impactor shall strike the cab at the front in the direction towards the rear of the cab. The direction of impact shall be horizontal and shall be parallel to the median longitudinal plane of the vehicle.
- 6.5. The impact energy shall be 29.4 kJ
7. Roof strength test (Test C)

Figure 3
Roof strength test (Test C)



- 7.1. For vehicles of category N_2 with a gross vehicle mass exceeding 7.5 t and of category N_3 , both tests as described in paragraphs 7.3. and 7.4. below, in that order, shall be conducted on the same cab.
- 7.2. For vehicles of category N_2 with a gross vehicle mass not exceeding 7.5 t and of category N_1 , only the test as described in paragraph 7.4. below shall be conducted.
- 7.3. Dynamic pre-loading of vehicles of category N_2 with a gross vehicle mass exceeding 7.5 t and of category N_3 (see P_1 on figure 3).
 - 7.3.1. The impactor shall be rigid and its mass shall be evenly distributed; its mass shall not be less than 1,500 kg.
 - 7.3.2. The striking surface of the impactor shall be rectangular and flat. Its dimensions shall be sufficiently large such that, when positioned in accordance with paragraph 7.3.3. below, no contact will occur between the cab and the edges of the impactor.
 - 7.3.3. The impactor and/or the cab shall be so positioned that, at the time of impact:
 - 7.3.3.1. The striking face of the impactor is at an angle of 20° to the median longitudinal plane of the cab. Either the impactor or the cab may be tilted;
 - 7.3.3.2. The striking face of the impactor covers the whole length of the top side of the cab;
 - 7.3.3.3. The median longitudinal line of the impactor is horizontal and parallel to the median longitudinal plane of the cab.
 - 7.3.4. The impactor shall strike the upper side of the cab such that at the time of the impact the prescriptions of paragraph 7.3.3. above are satisfied. The direction of impact shall be perpendicular to the surface of the impactor and perpendicular to the median longitudinal line of the cab. Either the impactor or the cab may be moving, as long as the positioning requirements are satisfied.
 - 7.3.5. The impact energy shall be minimum 17.6 kJ.
- 7.4. Roof strength test (see P_2 on figure 3)
 - 7.4.1. The loading device shall be made of steel and its mass shall be evenly distributed.
 - 7.4.2. The loading face of the device shall be rectangular and flat. Its dimensions shall be sufficiently large such that, when positioned in accordance with paragraph 7.4.4. below, no contact will occur between the cab and the edges of the device.
 - 7.4.3. A linear bearing system may be included between the device and its supporting structure to allow for lateral motion of the cab roof away from the side that was impacted in the pre-load phase of paragraph 6.3., if applicable.
 - 7.4.4. The loading device shall be so positioned that, during the test:
 - 7.4.4.1. It is parallel to the x-y plane of the chassis;
 - 7.4.4.2. It moves parallel to the vertical axis of the chassis;
 - 7.4.4.3. Its loading face covers the whole area of the cab roof.
 - 7.4.5. A static load shall be applied by the loading device to the roof of the cab, corresponding to the maximum mass authorised for the front axle or axles of the vehicle, subject to a maximum of 98 kN.

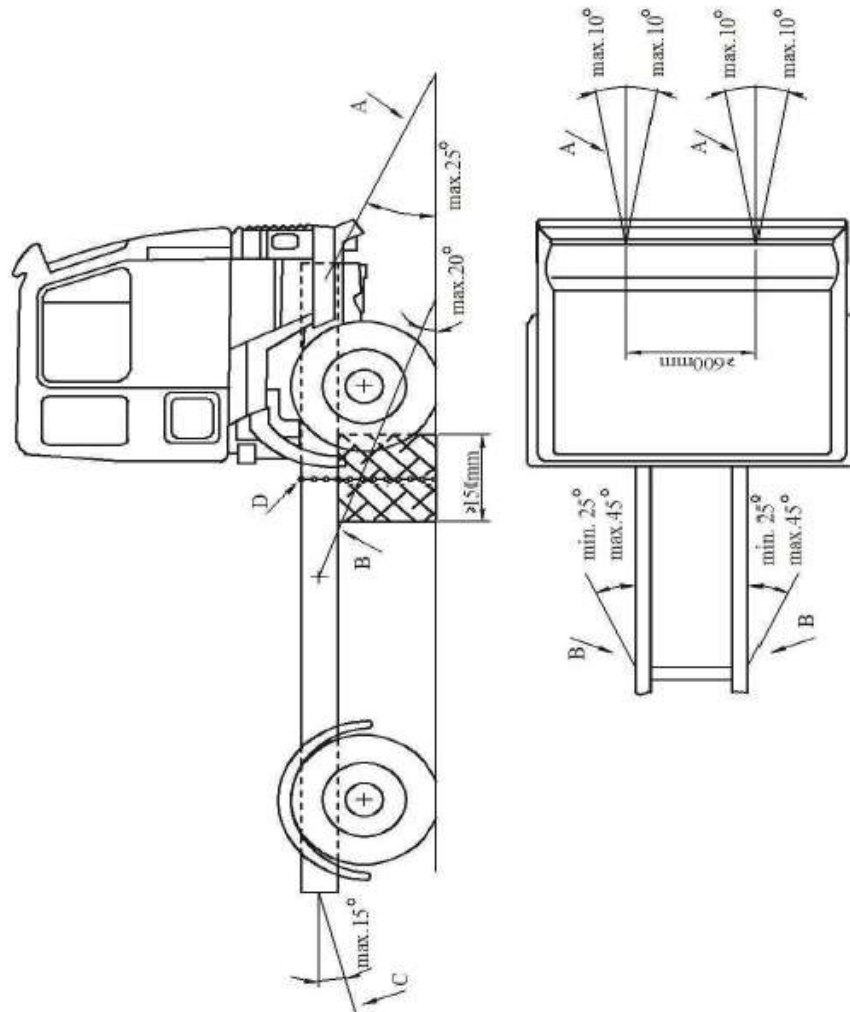
Annex 3 - Appendix 1

Instructions for securing vehicles to the test bed

1. Frontal impact
Test A shall be applied to a cab mounted on the vehicle in the following way (see figure 1 below).
- 1.1. Anchoring chains or ropes
Each anchoring chain or rope shall be of steel and shall be capable of withstanding a tractive load of at least 10 tons.
- 1.2. Blocking of the chassis frame
The longitudinal members of the chassis frame shall be supported on wooden blocks across their full width and over a length of not less than 150 mm. The front edges of the blocks must not be situated forward of the rearmost point of the cab, nor rearward of the mid-point of the wheel base. At the manufacturer's request the chassis frame shall be set in the attitude it takes up when loaded.
- 1.3. Longitudinal attachment
Rearward movement of the chassis frame shall be limited by chains or ropes A attached to the front of the chassis frame symmetrically in relation to its longitudinal axis, the points of attachment being not less than 600 mm apart. The chains or ropes shall when tensioned form a downward angle of not more than 25° with the horizontal and their projection on a horizontal plane shall form an angle of not more than 10° with the longitudinal axis of the vehicle. The chains or ropes may cross one another.
- 1.4. Lateral attachment
Lateral movement shall be limited by chains or ropes B attached to the chassis frame symmetrically in relation to its longitudinal axis. The points of attachment to the chassis shall be not more than 5 m and not less than 3 m from the front of the vehicle. The chains or ropes shall when tensioned form a downward angle of not more than 20° with the horizontal and their projection on a horizontal plane shall form an angle of not less than 25° and not more than 45° with the longitudinal axis of the vehicle.
- 1.5. Tensioning of chains or ropes and rear attachment
The chain or rope C shall, to begin with, be placed under a load of approximately 1 kN. All slack in the four chains or ropes A and B shall then be taken up and chain or rope C shall be subjected to a tensile stress of not less than 10 kN. The angle of chain or rope C with the horizontal shall not exceed 15°. A vertical blocking force of not less than 500 N shall be applied at point D between the chassis frame and the ground.

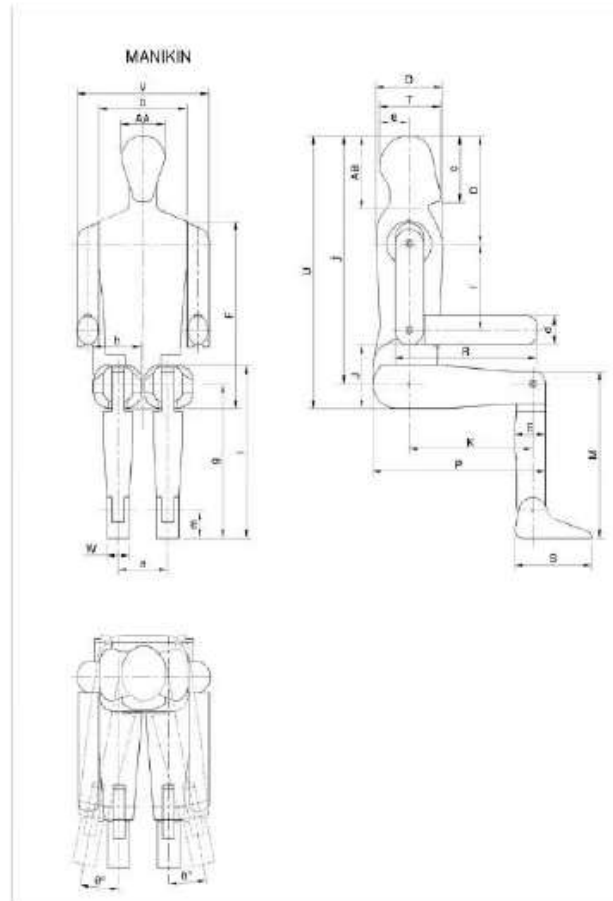
- 1.6. Equivalent mounting
At the request of the manufacturer the test may be carried out with the cab mounted on a special frame, on condition that this method of mounting is shown to be equivalent to mounting on the vehicle.
2. Front pillars impact
 - 2.1. Cab mounted on the vehicle (see fig. 1)
Measures shall be taken to ensure that the vehicle does not shift appreciably during the test. For this purpose the hand-brake shall be applied, a gear engaged and the front wheels wedged with chocks.
 - 2.2. Cab mounted on a frame
Measures shall be taken to ensure that the cab does not shift appreciably during the test.
3. Roof strength
 - 3.1. Cab mounted on the vehicle
Measures shall be taken to ensure that the vehicle does not shift appreciably during the test. For this purpose the hand-brake shall be applied, a gear engaged and the front wheels wedged with chocks. Deformation of the various components of the suspension (springs, tyres, etc.) shall be eliminated by means of rigid members.
 - 3.2. Cab mounted on a frame
Measures shall be taken to ensure that the frame does not shift appreciably during the test.

Figure 1 - Front impact test
The cab is mounted on the vehicle



Annex 3 - Appendix 2


Manikin to be used to verify the survival space



<i>Dimensions</i>		
<i>Name</i>	<i>Description</i>	<i>Dimension, in mm</i>
AA	Breadth of head	153
AB	Combined height of head and neck	244
D	Distance from top of head to shoulder pivot	359
E	Calf depth	106
F	Height from seat to top of shoulder	620
J	Height of elbow rest	210
M	Knee height	546
O	Chest depth	230
P	Distance from seat back to knee	595
R	Distance from elbow to fingertip	490
S	Length of foot	266
T	Length of head	211
U	Height from seat to top of head	900
V	Shoulder breadth	453
W	Breadth of foot	77
a	Distance between hip point centers	172
b	Chest breadth	305
c	Height of head and chin	221
d	Forearm thickness	94
e	Distance between vertical centerline of torso and rear of head	102
f	Distance between shoulder pivot and elbow pivot	283
g	Knee pivot height from ground	505
h	Thigh breadth	165
i	Lap height (Sitting)	565
j	Distance from top of head to "H" point	819
k	Distance between hip pivot and knee pivot	426
m	Ankle pivot height from ground	89
θ	Lateral rotation of the legs	20°

Anexo A2 Especificaciones del perfil estructural cuadrado utilizado en la superestructura.


CUADRADO



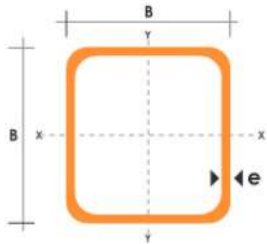
TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO

Especificaciones Generales


- Norma:** ASTM A-500
- Recubrimiento:** Negro o galvanizado
- Largo normal:** 6.00m
- Otros largos:** Previa Consulta
- Dimensiones:** Desde 20.00mm a 100.00mm
- Espesor:** Desde 2.00mm a 3.00mm



DIMENSIONES			AREA	EJES X-Xe Y-Y		
A	ESPESOR	PESO	AREA	I	W	i
mm	mm	Kg/m	cm2	cm4	cm3	cm
20	1,2	0,72	0,90	0,53	0,53	0,77
20	1,5	0,88	1,05	0,58	0,58	0,74
20	2,0	1,15	1,34	0,69	0,69	0,72
25	1,2	0,90	1,14	1,08	0,87	0,97
25	1,5	1,12	1,35	1,21	0,97	0,95
25	2,0	1,47	1,74	1,48	1,18	0,92
30	1,2	1,09	1,38	1,91	1,28	1,18
30	1,5	1,35	1,65	2,19	1,46	1,15
30	2,0	1,78	2,14	2,71	1,81	1,13
40	1,2	1,47	1,80	4,38	2,19	1,25
40	1,5	1,82	2,25	5,48	2,74	1,56
40	2,0	2,41	2,94	6,93	3,46	1,54
40	3,0	3,54	4,44	10,20	5,10	1,52
50	1,5	2,29	2,85	11,06	4,42	1,97
50	2,0	3,03	3,74	14,13	5,65	1,94
50	3,0	4,48	5,61	21,20	8,48	1,91
60	2,0	3,66	3,74	21,26	7,09	2,39
60	3,0	5,42	6,61	35,06	11,69	2,34
75	2,0	4,52	5,74	50,47	13,46	2,97
75	3,0	6,71	8,41	71,54	19,08	2,92
75	4,0	8,59	10,95	89,98	24,00	2,87
100	2,0	6,17	7,74	122,99	24,60	3,99
100	3,0	9,17	11,41	176,95	35,39	3,94
100	4,0	12,13	14,95	226,09	45,22	3,89
100	5,0	14,40	18,36	270,57	54,11	3,84




Anexo A3 Especificaciones del perfil estructural rectangular utilizado en la superestructura.



DIPAC®

PRODUCTOS DE ACERO



TUBO ESTRUCTURAL RECTANGULAR

Especificaciones Generales

Norma: ASTM A-300


Recubrimiento: Negro o galvanizado

Largo normal: 6.00m

Otros largos: Previa Consulta

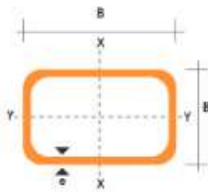
Dimensiones: Desde 12.00mm a 39.00mm a 40.00mm a 80.00mm


Espesor: Desde 2.00mm a 3.00mm



RECTANGULAR

DIMENSIONES				AREA	EJES X-X			EJES Y-Y		
A	B	ESPESOR	PESO	AREA	I	W	i	I	W	i
mm	mm	mm	Kg/m	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm
20	40	1,2	1,09	1,32	2,61	1,30	1,12	0,68	0,68	0,63
20	40	1,5	1,35	1,65	3,26	1,63	1,40	1,09	1,09	0,61
20	40	2,0	1,78	2,14	4,04	2,02	1,37	1,33	1,33	0,79
25	50	1,5	1,71	2,10	6,39	2,56	1,74	2,19	1,75	1,02
25	50	2,0	2,25	2,74	8,37	3,35	1,75	2,80	2,24	1,01
25	50	3,0	3,30	4,14	12,56	5,02	1,74	3,99	3,19	0,99
30	50	1,5	1,88	2,25	7,27	2,91	1,80	3,32	2,21	1,21
30	50	2,0	2,41	2,94	9,52	3,81	1,80	4,28	2,85	1,21
30	50	3,0	3,30	4,21	12,78	5,11	1,74	5,66	3,77	1,16
30	70	2,0	3,03	3,74	22,20	6,34	2,44	5,65	3,90	1,25
30	70	3,0	4,48	5,41	30,50	8,71	2,37	7,84	5,23	1,20
40	60	1,5	2,29	2,91	14,90	4,97	2,26	7,94	3,97	1,65
40	60	2,0	3,03	3,74	18,08	6,13	2,22	9,81	4,90	1,62
40	60	3,0	4,48	5,41	25,31	8,44	2,16	13,37	6,69	1,57
30	70	1,5	2,34	2,91	18,08	5,17	2,49	4,76	3,17	1,28
30	70	2,0	2,93	3,74	22,20	6,34	2,44	5,65	3,90	1,25
30	70	3,0	4,25	5,41	30,50	8,71	2,37	7,84	5,23	1,20
40	80	1,5	2,76	3,74	31,75	7,94	2,91	10,77	5,39	1,70
40	80	2,0	3,66	4,54	37,32	9,33	2,87	12,70	6,35	1,67
40	80	3,0	5,42	6,61	52,16	13,04	2,81	17,49	8,75	1,63
50	100	2,0	4,52	5,74	74,94	14,99	3,61	25,65	10,26	2,11
50	100	3,0	6,71	8,41	106,34	21,27	3,56	35,97	14,39	2,07
50	150	2,0	6,17	7,74	207,45	27,66	5,18	37,17	14,87	2,19
50	150	3,0	9,17	11,41	298,35	39,78	5,11	52,54	21,02	2,15





www.dipacmanta.com

39

Anexo A4 Ensayo de simulación computacional del impacto mediante el método de elementos finitos.



Centro de Fomento Productivo
Metalmecánico Carrocero



Honorable Gobierno
Provincial de Tungurahua

ENSAYO DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

1. Objetivo

Verificar el comportamiento mecánico de una sección de autobús sometida a choque utilizando ANSYS – LS-DYNA.

1.1. Objetivos Específicos.

Determinar los esfuerzos de Von - Misses

2. Antecedentes

Por medio de oficio con fecha 28 de julio de 2016, el Ing. Santiago Alejandro López Ortiz estudiante de último año de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato – UTA, solicita se de las facilidades para realizar el ensayo de simulación utilizando la licencia del software ANSYS para su tema de tesis **“Determinación de Configuraciones Estructurales de un Frente de un Autobús Interprovincial y su incidencia en la Resistencia al Impacto Frontal Mediante el Método de Elementos Finitos”**, con la dirección del Ing. Mg. Cesar Arroba, profesor de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la UTA, para la obtener el grado Académico – Magister en Diseño Mecánico

3. Alcance

Aplica a todos los ensayos y simulaciones de la sección de autobús sometida a choque, con las variantes entregadas por el Ing. Santiago López al Centro de fomento Productivo Carrocero Metalmecánico en el área de CAD- CAM y CAE.

4. Definiciones

- **CAD-CAM:** Laboratorio de diseño y manufactura asistida por computadora.
- **CAE:** Laboratorio de Ingeniería asistida por computador.

5. Normativa aplicable

No se aplica ninguna normativa. Los datos experimentales son del cliente: Ing. Santiago López.

6. Identificación del Método de ensayo

Código: IN-DI-001
Fecha de Elaboración: 08-06-2016
Fecha de última aprobación: 20-06-2016
Revisión: 1

ENSAYO DE SIMULACIÓN ESTRUCTURAL
MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Página 1 de 8



Nombre del método: Ensayo de Simulación de esfuerzos mediante elementos finitos

Tipo de método: Experimental

7. Materiales de Referencia

Los materiales de referencia utilizados son proporcionados por el cliente:

- MAT_RIGID
- MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY

8. Descripción

Se realiza el ensayo dinámico mediante ANSYS – LS DYNA de la sección de autobús sometida a coche con las condiciones de borde impuestas por el Ing. Santiago López.

9. Análisis e interpretación de resultados.

Mediante gráficas y tablas se presentarán los resultados obtenidos del software Ansys y se indicará el valor correspondiente al esfuerzo Von-Mises.

Código: IN-DI-001

Fecha de Elaboración: 08-06-2016

Fecha de última aprobación: 20-06-2016

Revisión: 1

ENSAYO DE SIMULACIÓN ESTRUCTURAL
MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Página 2 de 8



9.1. Prueba CMI

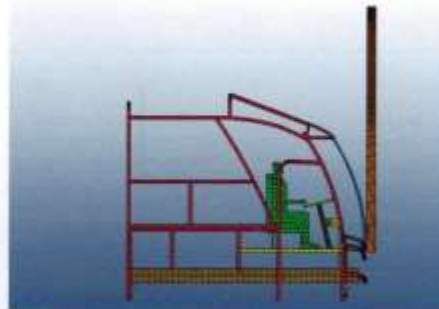
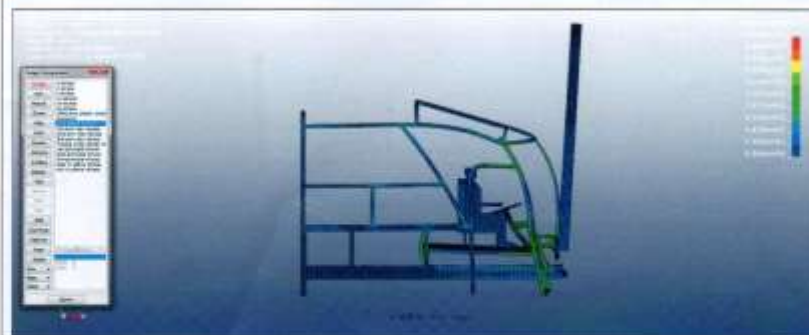


Figura 1: Prueba CMI antes de la simulación.

TABLA 1. SIMULACIÓN DEL ENSAYO DINÁMICO PARA SECCIÓN DE UN AUTOBUS SOMETIDA A CHOQUE PRUEBA CMI

Fecha de ejecución	17/08/2016	Muestra de:	Sección Autobús
Norma Aplicable	N/A		
Paquete Computacional:	ANSYS Professional NLS; ANSYS LS-DYNA HPC-8.	Realizado por:	Ing. Luis Navarrete L.
		Revisado por:	Ing. Alvaro Corral.
Aspecto Ratio Max:		Aspecto Ratio Min:	
Calidad del elemento mínimo:		Calidad del elemento máximo:	
Cantidad de Nodos:		Cantidad de elementos:	
Tiempo de procesamiento	1 hora 27 minutos y 50 segundos	Numero de procesadores	8 de 2,5 GHz

RESULTADOS DE ENSAYO



End Time / Time Step		Maximun Number Of Cycles	
Safety Factor		Esfuerzo Eq. Mínimo	
Esfuerzo Von - Mises	718.212 Mpa	Deformación última:	
Deformación mínima:			

Código: IN-DI-001

Fecha de Elaboración: 08-06-2016

Fecha de última aprobación: 20-06-2016

Revisión: 1

ENSAYO DE SIMULACIÓN ESTRUCTURAL
MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Página 3 de 8





Factor de Seg. Mínimo:		Factor de Seg. Máximo:	
------------------------	--	------------------------	--

9.2. Prueba E2

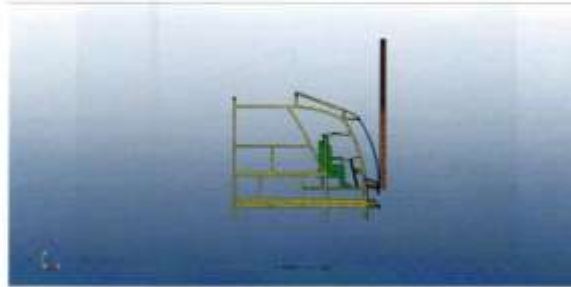


Figura 2: Prueba E2 antes de la simulación.

TABLA 2. SIMULACIÓN DEL ENSAYO DINAMICO PARA SECCION DE UN AUTOBUS SOMETIDA A CHOQUE PRUEBA E2			
Fecha de ejecución	18/08/2016	Muestra de:	Sección Autobús
Norma Aplicable	N/A		
Paquete Computacional:	ANSYS Professional NLS; ANSYS LS-DYNA HPC-8.	Realizado por:	Ing. Luis Navarrete L.
		Revisado por:	Ing. Álvaro Corral.
Aspecto Ratio Max:		Aspecto Ratio Min:	
Calidad del elemento mínimo:		Calidad del elemento máximo:	
Cantidad de Nodos:		Cantidad de elementos:	
Tiempo de procesamiento	18 minutos y 54 segundos	Numero de procesadores	8 de 2,5 GHz



Código: IN-DG-001

Fecha de Elaboración: 08-06-2016

Fecha de última aprobación: 20-06-2016

Revisión: 1

ENSAYO DE SIMULACIÓN ESTRUCTURAL
MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Página 4 de 8

End Time / Time Step		Maximum Number Of	
Safety Factor		Cycles	
Esfuerzo Von - Misses	747.13 Mpa	Esfuerzo Eq. Mínimo	
Deformación mínima:		Deformación última:	
Factor de Seg. Mínimo:		Factor de Seg. Máximo:	

9.3. Prueba CM4

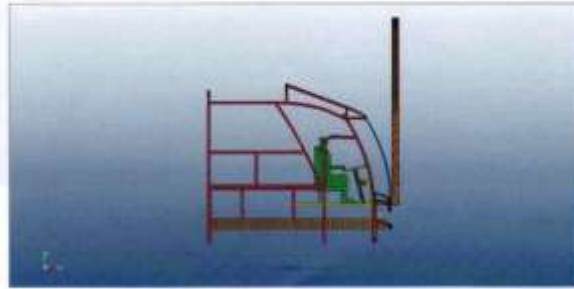
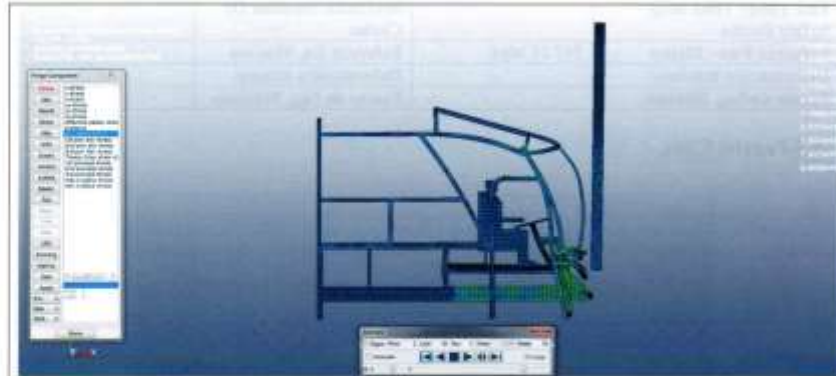


Figura 3: Prueba CM4 antes de la simulación.

TABLA 3. SIMULACIÓN DEL ENSAYO DINAMICO PARA SECCION DE UN AUTOBUS SOMETIDA A CHOQUE PRUEBA CM4.			
Fecha de ejecución	18/08/2016	Muestra de:	Sección Autobús
Norma Aplicable	N/A		
Paquete Computacional:	ANSYS Professional NLS; ANSYS LS- DYNA HPC-8.	Realizado por:	Ing. Luis Navarrete L.
		Revisado por:	Ing. Álvaro Corral,
Aspecto Ratio Max:		Aspecto Ratio Min:	
Calidad del elemento mínimo:		Calidad del elemento máximo:	
Cantidad de Nodos:		Cantidad de elementos:	
Tiempo de procesamiento	15 minutos y 33 segundos	Numero de procesadores	8 de 2,5 GHz.
RESULTADOS DE ENSAYO			



End Time / Time Step		Maximun Number Of Cycles	
Safety Factor		Esfuerzo Eq. Mínimo	
Esfuerzo Von - Mises	792.199 Mpa	Deformación última:	
Deformación mínima:		Factor de Seg. Máximo:	
Factor de Seg. Mínimo:			

10. Conclusiones

Se obtuvo resultados de esfuerzos de Von – Misses siendo la prueba CM4 la que presenta mayor esfuerzo con un valor de 792.199 Mpa.

11. Licencia

A continuación, se muestra las especificaciones generales del equipamiento implementado en el Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero del H. Gobierno Provincial de Tungurahua:

Tipo de Software

CAE (ANSYS – LS DYNA) – Licencia Software de Ingeniería Asistida por Computadora.

Especificaciones:

DISPLAY THE LICENSE STATUS:

ANSYS Licensing Interconnect path = 2325@FEA1-PC;2325@172.16.2.35

ANSYS FLEXlm license path = 1055@FEA1-PC;1055@172.16.2.35

***** Note: Due to a FLEXlm limitation, all tasks may not be found *****

***** LICENSE SERVER STATUS: 1055@FEA1-PC *****

Imutil - Copyright (c) 1989-2014 Flexera Software LLC. All Rights Reserved.

Flexible License Manager status on Wed 2/3/2016 10:36

[Detecting lmgrd processes...]

License server status: 1055@FEA1-PC

License file(s) on FEA1-PC: C:\Program Files\ANSYS Inc\Shared
Files\Licensing\license_files\ansyslmd.lic:

FEA1-PC: license server UP (MASTER) v11.12.1

Vendor daemon status (on FEA1-PC):

ansyslmd: UP v11.12.1

Feature usage info:

Users of prfnls: (Total of 1 license issued; Total of 0 licenses in use)

Users of a_spaceclaim_dirmod: (Total of 1 license issued; Total of 0 licenses in use)

Users of anshpc: (Total of 4 licenses issued; Total of 0 licenses in use)

Users of dysmp: (Total of 8 licenses issued; Total of 0 licenses in use)

Users of dyna: (Total of 1 license issued; Total of 0 licenses in use)

***** LICENSE SERVER STATUS: 1055@172.16.2.35 *****

Imutil - Copyright (c) 1989-2014 Flexera Software LLC. All Rights Reserved.

Flexible License Manager status on Wed 2/3/2016 10:36



Centro de Fomento Productivo
Metalmeccánico Carrocero



Elaborado Por:

Ing. Edwin Javier Morejón Sánchez

Analista Técnico en Diseño y simulación Estructural

Centro de Fomento Productivo Metal-mecánico Carrocero

H. Gobierno Provincial de Tungurahua

Revisado Por:

Ing. Álvaro Corral



Supervisor de Investigación Desarrollo e Investigación

Centro de Fomento Productivo Metal-mecánico Carrocero

H. Gobierno Provincial de Tungurahua

Ambato, 24 de Agosto de 2016

No. Factura: 001-002-000001362

Código: IN-DI-001

Fecha de Elaboración: 08-06-2016

Fecha de última aprobación: 20-06-2016

Revisión: 1

ENSAYO DE SIMULACIÓN ESTRUCTURAL
MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS.

Página 8 de 8

Anexo A5. Planos de especificaciones del modelo 7.