



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

DIRECCIÓN DE POSGRADOS

**MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR
COMPUTADOR**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE MAGISTER EN MANUFACTURA Y DISEÑO
ASISTIDOS POR COMPUTADOR**

**TEMA: SIMULACIÓN POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS
FINITOS DEL IMPACTO FRONTAL DE UN BUS
INTERPROVINCIAL DE FABRICACIÓN NACIONAL, PARA
PROPONER LA MODIFICACIÓN DE LA NORMA TÉCNICA
ECUATORIANA NTE INEN 1323:2009.**

AUTOR: ING. SANTOS CORREA, LUIS ALBERTO

DIRECTOR: ING. OLMEDO SALAZAR, JOSÉ FERNANDO MSC.

SANGOLQUI

2017



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**SIMULACIÓN POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS DEL IMPACTO FRONTAL DE UN BUS INTERPROVINCIAL DE FABRICACIÓN NACIONAL, PARA PROPONER LA MODIFICACIÓN DE LA NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 1323:2009**” realizado por el señor **LUIS ALBERTO SANTOS CORREA** ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **LUIS ALBERTO SANTOS CORREA** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 23 de agosto de 2017



ING. JOSÉ FERNANDO OLMEDO SALAZAR MSC.
DIRECTOR



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR

AUTORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **LUIS ALBERTO SANTOS CORREA** con cédula de identidad N° 1003670310 declaro que este trabajo de titulación “**SIMULACIÓN POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS DEL IMPACTO FRONTAL DE UN BUS INTERPROVINCIAL DE FABRICACIÓN NACIONAL, PARA PROPONER LA MODIFICACIÓN DE LA NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 1323:2009**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas

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

Sangolquí, 23 de agosto de 2017



ING. LUIS ALBERTO SANTOS CORREA
CI: 1003670310



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR

AUTORIZACION

Yo. **LUIS ALBERTO SANTOS CORREA** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la Biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**SIMULACIÓN POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS DEL IMPACTO FRONTAL DE UN BUS INTERPROVINCIAL DE FABRICACIÓN NACIONAL, PARA PROPONER LA MODIFICACIÓN DE LA NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 1323:2009**”, cuyo contenido ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 23 de agosto de 2017



ING. LUIS ALBERTO SANTOS CORREA
CI: 1003670310

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a toda mi familia, en especial a mis hijos Luis Antonio y Julieta, a mi esposa Tamarita, a mi madre Teresita, a mis sobrinos Paquito y Margarita y a mis hermanos Pablo y Xime.

Gracias por darme todo su amor y la motivación que necesito, para seguir siempre hacia adelante...

Luis Alberto

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme dado la vida y por llenarla de bendiciones cada día.

Un agradecimiento muy especial al Ing. Fernando Olmedo por su tiempo y dedicación en apoyo a este proyecto.

De igual manera al Ing. Patricio Riofrio como Coordinador del Programa de Maestría.

Y a todos mis maestros que han sabido guiarme por la senda adecuada hacia el conocimiento.

Luis Alberto

INDICE

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORIA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACION (PUBLICACIÓN BIBLIOTECA VIRTUAL)	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
INDICE	vii
INDICE TABLAS	xi
INDICE FIGURAS	xi
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv

CAPITULO I..... 1**PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**..... 1

1.1 Situación Problemática 1

1.2 Problema 2

1.3 Objetivo General 3

1.4 Objetivos Específicos..... 3

1.5 Justificación e Importancia 3

1.6 Alcance..... 4

1.7 Limitaciones 5

CAPITULO II..... 6**MARCO CONCEPTUAL** 6

2.1 Antecedentes 6

2.2 Industria de Carrocerías en el Ecuador 8

2.2.1 El Autobús..... 9

2.2.2 Clasificación Vehicular 10

2.2.3 Espacio de Supervivencia 11

2.2.4 Requerimientos de Diseño 12

2.3 El Método del Elemento Finito.....	14
2.4 Tipos de Análisis.....	15
2.4.1 Análisis Lineales y no Lineales	15
2.4.2 Análisis Estáticos	17
2.4.3 Análisis Cuasi Estáticos	17
2.4.4 Análisis Dinámicos	17
2.4.5 Análisis Implícitos y Explícitos	19
2.5 Ecuación de Equilibrio Dinámico para Análisis de Respuesta Transitoria.....	19
2.6 Metodología de Solución para Análisis Dinámicos Transitorios.....	20
2.7 Tipos de Elementos.....	23
2.7.1 Elementos 1D.....	24
2.7.2 Elementos 2D.....	24
2.7.3 Elementos 3D.....	24
2.7.4 Otros Elementos.....	24
2.8 Proceso para Desarrollar un Análisis de Elementos Finitos	25
2.8.1 Modelado CAD	25
2.8.2 Pre Procesamiento y Discretización.....	26
2.8.3 Procesamiento	26
2.8.4 Pos procesado.....	26
2.9 Software CAE	26
2.9.1 Software CAE de Propósito General.....	27
2.9.2 Software CAE especializado.....	27
2.10 El Impacto	30
2.10.1 Ensayos de Impacto	31
2.10.2 Ensayo de Impacto Frontal	33
2.11 Regulaciones a los Ensayos de Impacto Frontal.	33
2.11.1 Unece 29	34
2.11.2 Unece 33 y 94	38

CAPÍTULO III	40
METODOLOGÍA	40
3.1 Ubicación	40
3.2 Diseño de Investigación	40
3.2.1 Investigación Bibliográfica	40
3.2.2 Investigación Descriptiva.....	41
3.2.3 Investigación Experimental.....	41
3.3. Procedimientos	41
CAPÍTULO IV	43
ANÁLISIS Y RESULTADOS	43
4.1 Modelado	43
4.1.1 Construcción del Modelo CAD.....	44
4.2 Pre Procesamiento	47
4.2.1 Unidades en LS Dyna	47
4.2.2 Preparación del Modelo	48
4.2.3 Componentes.....	48
4.2.4 Contacto entre Elementos	52
4.2.5 Mallado	52
4.2.6 Análisis de Calidad de Malla	54
4.2.7 Material	56
4.2.8 Condiciones de Borde	58
4.2.9 Tiempo de Ensayo.....	59
4.2.10 Control de Energía	59
4.3 Procesamiento	59
4.4 Pos Procesamiento	60
4.4.1 Simulación de impacto.....	60
4.4.2 Esfuerzo de Von Mises	61
4.4.3 Desplazamientos	63
4.4.4 Balance de Energía.....	64

4.5 Validación del Estudio	65
4.5.1 Validación Mediante el Método de Energía de Hourglass	65
4.5.2 Validación Mediante un Ensayo Físico	67
4.6 Propuesta de Modificación a la Norma NTE INEN 13223:2009	70
CAPÍTULO V	72
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
5.1 Conclusiones	72
5.2 Recomendaciones.....	73
BIBLIOGRAFÍA	74

INDICE TABLAS

Tabla 1 Listado de empresas homologadas por la ANT.	8
Tabla 2 Clasificación vehicular. NTE INEN 2656	11
Tabla 3 Cargas para prueba cuasi estática. NTE INEN 1323	13
Tabla 4 Velocidad de propagación de ondas en elementos.....	22
Tabla 5 Pruebas para vehículos de carga tipo N	34
Tabla 6 Unidades en LS Dyna	47
Tabla 7 Componentes del modelo.....	50
Tabla 8 Índice de calidad de malla.....	56
Tabla 9 Resultados de caracterización de material	57
Tabla 10 Resumen del estudio	60
Tabla 11 Resumen de ensayo de validación	69

INDICE FIGURAS

Figura 1 Ensayo de vuelco	2
Figura 2 Primer autobus con motor de combustión	10
Figura 3 Espacio de seguridad para un autobús	12
Figura 4 Prueba de vuelco.....	14
Figura 5 Análisis de la carrocería de un vehículo utilizando FEA	15
Figura 6 Curvas de comportamiento no lineal de diferentes materiales	16
Figura 7 Clasificación de análisis dinámicos.....	18
Figura 8 Método de resolución implícito y explícito	19
Figura 9 Sistema dinámico con un grado de libertad.....	19
Figura 10 Método de las diferencias centrales.....	20
Figura 11 Estabilidad de resultados a) $dt=0.004$ s y b) $dt=0.0004$	22
Figura 12 Algoritmo de resolución de dinámica explícita.....	23
Figura 13 Elementos 2D y 3D utilizados en software CAE.....	25
Figura 14 Simulación del impacto de un bastidor vehicular utilizando.....	28
Figura 15 Impacto contra un parabrisas	29
Figura 16 Simulación de un bus sometido a impacto frontal.....	30
Figura 17 Prueba de carga sobre el techo a un camión de bomberos	35
Figura 18 Diagrama de aplicación de prueba de impacto frontal	36
Figura 19 Prueba de impacto frontal a un bus de construcción China.....	36
Figura 20 Diagrama de aplicación de prueba de pilares A	37
Figura 21 Muñeco de prueba	38
Figura 22 Impacto frontal de un vehículo.....	39
Figura 23 Chasis Hino AK 8JRSA	43
Figura 24 Cercha Central	44
Figura 25 Sección de elemento estructural con espesor de pared cero	45
Figura 26 Detalle de chasis y motor.....	46
Figura 27 Detalle de “Rigid Wall” creado para la prueba	46
Figura 28 Componentes del modelo CAD	49
Figura 29 Asignando espesor a superficie intermedia	52

Figura 30 Elemento tipo <i>spider</i>	53
Figura 31 Mallado del modelo	54
Figura 32 Warpaje de elementos.....	55
Figura 33 Jacobiano de elementos	55
Figura 34 Diagrama esfuerzo deformación ingresado en LS Dyna	58
Figura 35 Restricciones de Rigid Wall	58
Figura 36 Simulación de impacto	61
Figura 37 Diagrama de esfuerzos Von Mises en el frente del bus.....	62
Figura 38 Diagrama de esfuerzos Von Mises en el chasis	63
Figura 39 Diagrama de desplazamiento total a los 150 ms.....	63
Figura 40 Diagrama de desplazamiento para nodo frontal	64
Figura 41 Balance de energía.....	64
Figura 42 Falsa deformación de un elemento	65
Figura 43 Energía total del sistema.....	66
Figura 44 Energía de Hourglass del sistema.....	66
Figura 45 Energía de Hourglass.....	67
Figura 46 Ensayo de tracción computacional.	68
Figura 47 Probeta de pruebas.....	69
Figura 48 Espacio de seguridad para el asiento del conductor.	70

RESUMEN

El presente trabajo de grado analiza el comportamiento estructural de la carrocería de un bus sometida a un impacto frontal mediante un análisis por el método de los elementos finitos en el paquete computacional LS Dyna, para proponer una modificación a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1323. La industria nacional de carrocerías para buses ha ido en constante crecimiento, tal es así que actualmente se tiene 48 empresas homologadas por la Agencia Nacional de Transito (ANT), que se reparten por varias ciudades del país, siendo Ambato la principal con el 65% de la producción nacional. Para que un nuevo diseño de carrocería sea aprobado por la ANT para circular en el país, este debe ser sometido a una serie de pruebas computacionales, demostrando que será capaz de soportar las diferentes cargas de diseño propuestas en la normativa nacional, sin embargo no se analiza su respuesta ante impactos frontales. Para poder lograr el objetivo planteado, se revisó las normativas nacionales e internacionales vigentes a la fecha, y diversa bibliografía que aporte con datos específicos para lograr la realización del presente estudio. Se realizó una caracterización del material estructural utilizado mediante un ensayo de tracción, se programó el pre procesador siguiendo recomendaciones de estudios similares con elementos de tipo bidimensional y un tamaño de malla promedio de 30 mm. Se determina un error de 0.3916 % mediante el método de la energía de Hourglass y de 3.87 % mediante una comparación con un ensayo físico conservador. Finalmente se ha observado que una carrocería de bus de construcción nacional no está diseñada para soportar cargas de impacto frontal, motivo por el cual se plantea la revisión a la normativa NTE INEN 1323.

PALABRAS CLAVE:

- **MECÁNICA COMPUTACIONAL**
- **ELEMENTOS FINITOS**
- **DINÁMICA EXPLÍCITA**
- **IMPACTO**
- **NTE INEN 1323**

ABSTRACT

The present work shows the structural behavior of a bus body subjected to a frontal impact by an explicit finite element analysis using LS Dyna software, to propose a modification to the Ecuadorian Technical Normative NTE INEN 1323. The national bus body industry has been constantly growing, so there are now 48 companies approved by National Traffic Agency ANT, which are distributed by several cities in the country. Ambato is the main one with about 65% of the national production. To approve a new body design by ANT, it must be subjected to a several computational tests, demonstrating that it will be able to withstand the different design loads proposed in the national regulations, so it doesn't review body response to frontal impacts. In order to achieve the stated objective, we reviewed the national and international regulations, and a variety of bibliography that provides specific data to achieve this study. A characterization of the structural material used was carried out by a tensile test, the preprocessor was programmed following recommendations of similar studies with two-dimensional elements and an average mesh size of 30 mm. An error of 0.3961% is determined by the Hourglass energy method and 3.87% by a comparison with a conservative physical test. Finally, it has been observed that a bus body of national construction is not designed to withstand loads of frontal impact, reason for which the revision to the norm NTE INEN 1323 is proposed.

KEY WORDS:

- **COMPUTATIONAL MECHANICS**
- **FINITE ELEMENT**
- **EXPLICIT DYNAMICS**
- **IMPACT**
- **NTE INEN 1323**

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación Problemática

El diseño mecánico de carrocerías para bus, es un proceso iterativo que consta de varias etapas lógicas y secuenciales, que tiene como fin la creación de un nuevo vehículo capaz de transportar pasajeros según las regulaciones de la Agencia Nacional de Tránsito (ANT). En nuestro país este proceso se basa mucho en la experiencia personal de los diseñadores y las empresas constructoras, donde cada vez, se busca mejorar su producción, generando diseños más eficientes y seguros.

Cada una de las etapas del diseño debe ser revisada y evaluada continuamente para garantizar que la carrocería diseñada cumpla con las exigencias de los futuros propietarios, y sobre todo las regulaciones de la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1323:2009

Gracias a los programas de simulación computarizada que utilizan el método de los elementos finitos en su código fuente, se ha podido desarrollar diferentes ensayos a las estructuras de buses, como los tipificados en la NTE INEN 1323, que si no fuera por este medio, en las condiciones actuales de la industria y el estado ecuatoriano, resultarían imposibles de realizar.

Los ensayos obligatorios indicados según la NTE INEN 1323, incluyen una prueba de vuelco, un ensayo de carga sobre el techo y un ensayo cuasi estático estructural. Para poder hacer estos ensayos de forma física se tendría que destinar buses completamente armados para ser sometidos a estas pruebas, donde si bien no serían destruidos por completo, si sufrirían graves daños, lo cual generaría costos muy altos de producción a la empresa. Por otra parte el estado no cuenta con un laboratorio certificado capaz de realizar este tipo de pruebas.

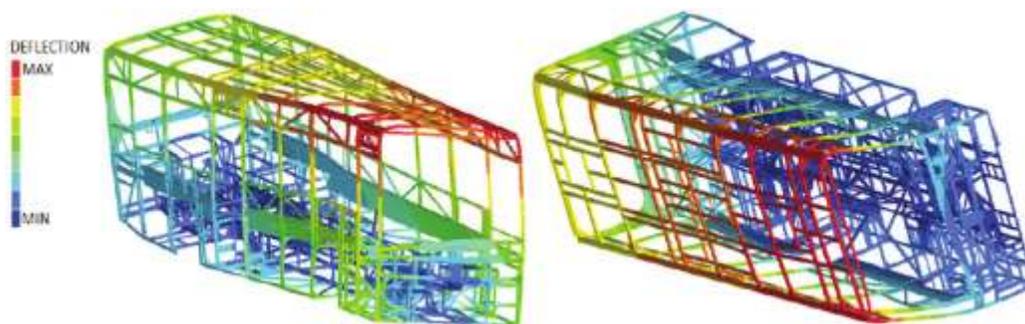


Figura 1 Ensayo de vuelco

Fuente: (Korta. 2013)

Se ha determinado que en Ecuador no existen normativas que sirvan de guía o referencia para el análisis de superestructuras vehiculares sometidas a una prueba de impacto frontal, en contraste con el marco legal internacional, el que sí contempla en sus normas este fenómeno físico.

(Manjarrez & Santillán, 2016, Pg. 119a)

El presente estudio pretende plantear los lineamientos necesarios para poder efectuar un ensayo de este tipo a los buses antes de su aprobación para circular en las vías ecuatorianas.

1.2 Problema

Actualmente, según datos de la Agencia Nacional de Tránsito (ANT), existen 55 empresas carroceras homologadas a nivel nacional, que se dedican a la construcción de carrocerías para buses. Esta industria ha estado en crecimiento constante, desde hace varios años debido a la alta demanda de transporte público que existe, tanto a nivel urbano como interprovincial, por esta razón se ha ido buscando los medios adecuados para mejorar la seguridad de todos los ocupantes.

La Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1323:2009 detalla los lineamientos a seguir para validar computacionalmente un diseño de carrocería para bus, mediante la aplicación de diversas cargas a la estructura y además con una prueba de vuelco, sin

embargo no se detalla el tipo de protección que debería tener para resistir un impacto frontal.

Dicha normativa muestra cómo está distribuido el espacio de supervivencia lateral y longitudinalmente, menciona que este espacio no debe ser invadido por ningún miembro de la estructura ante un impacto, claramente señala incluso el espacio de seguridad que debe haber en la cabina de mando, sin embargo no hay lineamientos para impactos frontales, que permita cumplir con esta normativa. Ante esta realidad nace la siguiente cuestión:

¿Es posible establecer los lineamientos necesarios para realizar una prueba de impacto frontal a autobuses de fabricación nacional, para proponer una enmienda a la Normativa Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1323:2009, tomando como referencia los datos obtenidos al realizar la simulación del impacto frontal de un autobús interprovincial en un software de elementos finitos?

1.3 Objetivo General

Simular mediante un software de elementos finitos el evento dinámico de colisión frontal de un autobús interprovincial, como base a la propuesta de una enmienda de la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1323:2009.

1.4 Objetivos Específicos

- Determinar el paquete computacional más adecuado para este tipo de ensayo.
- Establecer parámetros de simulación óptimos para el experimento.
- Validar los parámetros de pre procesamiento utilizados en el estudio.
- Proponer una enmienda a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1323:2009 para que se incluya el ensayo de impacto frontal.

1.5 Justificación e Importancia

El propósito de esta investigación es definir una línea clara para desarrollar simulaciones computarizadas en base al método de los elementos finitos de la colisión frontal de un autobus, para analizar la respuesta estructural y poder mejorar los diseños,

de esta manera salvaguardar la vida de los ocupantes de la cabina y evitar traumas físicos en los pasajeros del bus por desaceleraciones bruscas que suelen producirse en un impacto si no se disipa adecuadamente la energía cinética del movimiento.

Este estudio presenta una gran conveniencia y relevancia social pues se plantea la revisión de la norma NTE INEN 1323 con miras a mejorar la calidad de los diseños y productos automotrices nacionales.

Presenta diversos aportes sociales pues apunta a una problemática bastante común en las empresas ecuatorianas, que es la falta de experimentación y modernización de sus propuestas, sirve como base para que los estudiantes universitarios de ingeniería mecánica y automotriz inclinen sus objetivos académicos a este nicho de mercado que actualmente no se ha explotado.

Va en concordancia con los planes gubernamentales de diversificar la matriz productiva pues al tener productos de calidad debidamente probados y certificados podemos entrar en el mercado internacional promocionando al país como una marca de productos de calidad.

Se brinda además un gran aporte teórico a instituciones académicas como universidades e institutos tecnológicos y a la industria en general, pues se delinea los procesos a seguir para elaborar un análisis de elementos finitos de alto nivel.

La metodología utilizada en el presente trabajo servirá además como base para que otros investigadores la utilicen de referencia y puedan desarrollar proyectos similares donde se impliquen simulaciones por el método de los elementos finitos.

1.6 Alcance

Este proyecto tiene como finalidad desarrollar una simulación computacional del impacto frontal de la carrocería de un bus. Se da inicio al proyecto con la búsqueda de fuentes documentales en libros y estudios previos para considerar las principales implicaciones que hay que manejar en el presente estudio. Se elabora además un resumen de la situación actual de la industria carrocera del Ecuador, mirando desde una perspectiva externa el trabajo desarrollado por este sector productivo.

Se prepara un modelo tridimensional de un bus actualmente en operación, se asigna condiciones de frontera y se ejecuta el análisis. Con los datos obtenidos se prepara un informe final para el diseñador del modelo, en el cual se indican las principales ventajas y desventajas que presenta su trabajo y se realiza una propuesta de modificación a la norma NTE INEN 1323. Este estudio se basa en otros trabajos anteriores.

1.7 Limitaciones

En el país las simulaciones computacionales en el ámbito de la Ingeniería Automotriz, han ganado terreno gracias a la publicación de la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1323 en el año 2009. Desde ahí en adelante, se ha arcado un precedente que permite dar continuidad a este tipo de experimentación.

A pesar de estar varios años vigentes, Aun hay mucho desconocimiento en este ámbito y son muchos los factores que se pueden mejorar cada vez. En especial el del talento humano, pues son muy pocos los profesionales que se dedican a este ámbito de la ingeniería.

A pesar de existir este método de comprobación para carrocerías, también es necesario contar con un laboratorio para pruebas físicas, pero debido al costo de infraestructura, equipos y analistas expertos cabe recalcar que no existe ningún laboratorio para pruebas de impacto vehiculares en toda Sudamérica.

Sería muy importante que se pueda contar con un laboratorio de este tipo pues esto permitiría evaluar el comportamiento mecánico de una carrocería y mejorar los modelos que actualmente se producen en el país.

CAPITULO II

MARCO CONCEPTUAL

2.1 Antecedentes

En el repositorio digital de Escuela Politécnica Nacional, se encuentra la tesis de los autores Manjarrez Arias Félix Javier y Santillán Mariño Ernesto Ramiro, de julio del 2016, titulada análisis estructural a cargas de impacto frontal de un bus tipo interprovincial mediante el método de los elementos finitos. Cuyos objetivos principales son determinar el comportamiento estructural de la carrocería de un bus tipo interprovincial ante carga de impacto frontal mediante el método de los elementos finitos y comparar el resultado de esfuerzo de Von Mises obtenido mediante análisis matemática con los generados en un estudio computacional, y como conclusión se ha obtenido que, para efectuar el diseño estructural a gran escala, mediante asistencia computacional por software de dinámica explícita, se debe tomar en cuenta los siguientes pasos:

- a. Establecer un modelo sin errores ni interferencias.
- b. Definir claramente condiciones de borde para el modelo.
- c. Contar con un equipo computacional adecuado para este tipo de análisis.
- d. Validar adecuadamente el estudio realizado.
- e. Obtener adecuadamente la información requerida mediante un pos procesador. .

(Manjarrez & Santillán, 2016b)

De la séptima conferencia europea de LS DYNA se ha obtenido el artículo Simulación de impacto estructural de un vehículo F1 (*Crash Simulation of an F1 Racing Car Front Impact Structure*) de los autores, S. Heimbs, F. Strobel, P. Middendorf, S. Gardner, B. Eddington, J. Key, el objetivo de este estudio es aplicar el código de elementos finitos de LS DYNA para la simulación del impacto frontal de la estructura de un vehículo de competición F1 contra una pared rígida.

Para validar el estudio se hace una comparación de los resultados numéricos obtenidos con una prueba de impacto física en términos de desaceleración, absorción de energía y mecanismos de impacto, se hace un estudio con 78000 elementos y un tamaño de malla de 3 mm, se asigna una velocidad inicial de 15 m/s, se utiliza un modelo de material tipo sándwich “shell – solid - shell” para representar el material compuesto utilizado en el casco. Se asigna un tiempo de análisis de 110 ms.

Como resultados del estudio se obtiene una absorción de la energía cinética de 88 kJ por causa de la deformación y fractura del material, y la fricción entre la estructura y la pared rígida. La energía Hourglass resultante de los elementos no integrados, es menor al 5% del total.

(S. Heimbs, et al., 2009)

Del departamento de ingeniería mecánica del Instituto de Ingeniería y Tecnología de Godavari, se tiene el artículo científico de los autores, Tejasagar Ambati, K. Srikanth & P. Veeraraju, titulado, simulación de una prueba vehicular de impacto frontal (*Simulation of Vehicular Frontal Crash Test*), publicado en el año 2012, cuyo objetivo ha sido simular el impacto frontal de un automóvil y validar los resultados del estudio, contrastando los datos obtenidos con otro estudio similar llevado a cabo por el Centro Nacional de Análisis de Impactos, (NCAC) de los Estados Unidos.

Se utiliza el modelo Chevrolet C1500 pick-up, se asigna una velocidad inicial de 15,6 m/s, se recomienda un tiempo de análisis entre 0.02 a 0.2 ms, eligiendo 0,15 ms para ejecutar el presente estudio. Se utiliza 61 tipos de materiales diferentes, y se trabaja con elementos sólidos, cascarones tipo Belytschko Say y unidimensionales tipo Hughes Liu. Se tiene un número total de 10693 elementos.

Al final se obtienen resultados cercanos a los del estudio de la NCAC, con pequeñas diferencias producto de la capacidad computacional. Se obtiene como conclusión que la deformación en cabina es mínima, una gran parte de la energía es absorbida por el motor, guardachoque y refuerzos, durante los primeros 0.04 ms de iniciado el impacto.

(Tejasagar Ambati, K. Srikanth & P. Veeraraju; 2012)

2.2 Industria de Carrocerías en el Ecuador

En el Ecuador existen 55 industrias carroceras homologadas por la Agencia Nacional de Tránsito, los cuales abarcan grandes y pequeños talleres que se reparten en varios sectores del país, siendo Ambato la principal zona de producción con 25 de las 55 empresas y un 65 % de la producción nacional.

(CANFAC. 2015)

Tabla 1.

Listado de empresas homologadas por la ANT

Ciudad	Industrias Carroceras
Azuay	4
Chimborazo	6
Cotopaxi	1
Guayas	4
Pichincha	11
Sto. Domingo	3
Tungurahua	25
Manabí	1

Fuente: (ANT. 2017)

La industria de las carrocerías para bus ha estado en constante crecimiento debido al aumento en la demanda de transporte público, urbano e interurbano, es por este motivo que la industria ha innovado sus procesos tanto de diseño como de construcción.

Actualmente la industria carrocera apunta a la construcción de nuevos diseños más desafiantes como carrocerías auto portantes para buses interurbanos que amplifican el espacio de carga para equipaje y buses articulados para transporte urbano que de igual manera ayudan a aumentar el volumen de pasajeros a transportar.

Mediante un análisis realizado por la Cámara Nacional de Fabricantes de Carrocerías (CANFAC) en el año 2014, se describe al sector carrocerero en el Ecuador, donde se observa que este es un importante generador de empleos, pues genera 1538

plazas de trabajo directas, donde se da cabida también a personas con diferentes discapacidades y 889 plazas indirectas con los diferentes proveedores de materia prima y pre ensamblados como asientos, ventanas, entre otros.

Actualmente solo se utiliza un 60% de la capacidad real de producción, así se producen 127 carrocerías mensuales, de los cuales 62 corresponden a buses urbanos, 45 interprovinciales, 8 buses de turismo y 12 a buses escolares. Con estos resultados y un precio promedio de USD 70000 para buses interprovinciales y de turismo y de 55000 para buses escolares y urbanos, se calcula una facturación anual de 78.6 millones de dólares.

(CANFAC. 2014)

2.2.1 El Autobús

Un autobús es un tipo de vehículo diseñado para transportar varias personas a la vez, en rutas urbanas o interurbanas. Sus inicios los tiene en Francia donde se vio la necesidad de transportar varias personas a la vez desde el centro de la ciudad de Nantes hasta Richeburg, con la finalidad de hacer florecer a un negocio local. Se utilizaban carruajes movidos por caballos.

Se popularizó el término Omnibus ya que la última parada del recorrido estaba frente a una sombrerería llamada Omnes. Sin duda la idea de transportar personas fue muy exitosa, motivo por el cual en 1828 se trasladó a Paris y se fundó la Empresa General de Omnibus para transporte colectivo, sucesos similares ocurrieron en Londres y Nueva York un año después.

El primer autobús movido por un motor de combustión fue desarrollado por Karl Benz, llamado “Landauer” tenía una potencia de 15 CV y alcanzaba una velocidad de 15km/h, era capaz de transportar 8 pasajeros, su aspecto es similar al de un carruaje pero sin caballos.



Figura 2 Primer autobus con motor de combustión

Fuente: (Mercedes-Benz. 2016)

Con la invención de la locomotora en 1814, se popularizó muchísimo el tren como sistema de transporte colectivo, sin embargo debido a su costo de implementación y su incapacidad de adaptarse a nuevas rutas o destinos, siempre el autobús fue un complemento para el tren, en rutas urbanas e interurbanas.

Actualmente el Reglamento Técnico Ecuatoriano, regula la construcción de buses para transporte urbano, escolar, interprovincial y de turismo, siendo los dos primeros los de mayor producción debido a la alta demanda de pasajeros en rutas urbanas e interurbanas.

2.2.2 Clasificación Vehicular

Según la norma técnica ecuatoriana 2656:2012, se clasifica a los vehículos según si estos servirán para transporte de pasajeros o transporte de mercancías, de igual manera por el número de ruedas que posea, y por su peso bruto vehicular. En la siguiente tabla se resume lo expuesto.

Tabla 2**Clasificación vehicular**

Categoría	Descripción
L	Vehículos con menos de cuatro ruedas
M	Vehículos de cuatro ruedas o más diseñados para el transporte de pasajeros
M1	Vehículos de 8 asientos o menos sin contar al conductor
M2	Vehículos con más de 8 asientos sin contar el del conductor y peso bruto vehicular (PBV) de 5 toneladas o menos
M3	Vehículos con más de 8 asientos sin contar el del conductor y peso bruto vehicular superior a 5 toneladas.
N	Vehículos diseñados para transporte de mercancías
N1	Vehículos con PBV de 3,5 toneladas o menos
N2	Vehículos con PBV mayor a 3,5 toneladas hasta 12 toneladas
N3	Vehículos con PBV superior a 12 toneladas
O	Remolques con peso bruto vehicular superior a 10 toneladas

Fuente: (NTE INEN 2656)

2.2.3 Espacio de Supervivencia

Constituye la zona interna de la carrocería que no puede ser invadida por ningún miembro del automotor, ni tampoco deformarse ante una colisión, para salvaguardar la vida de los ocupantes.

(INEN 1323. 2009. Pg 1)

Si hablamos de un choque frontal, debe evitarse que penetren en el espacio de seguridad elementos como la columna de dirección, el tablero o partes de que se desprendan de él, el techo, los pedales, y los paneles delanteros. Las únicas formas de

comprobar si un diseño nos ofrece esta certeza, es mediante un ensayo físico de colisión, o mediante una simulación computacional del ensayo.

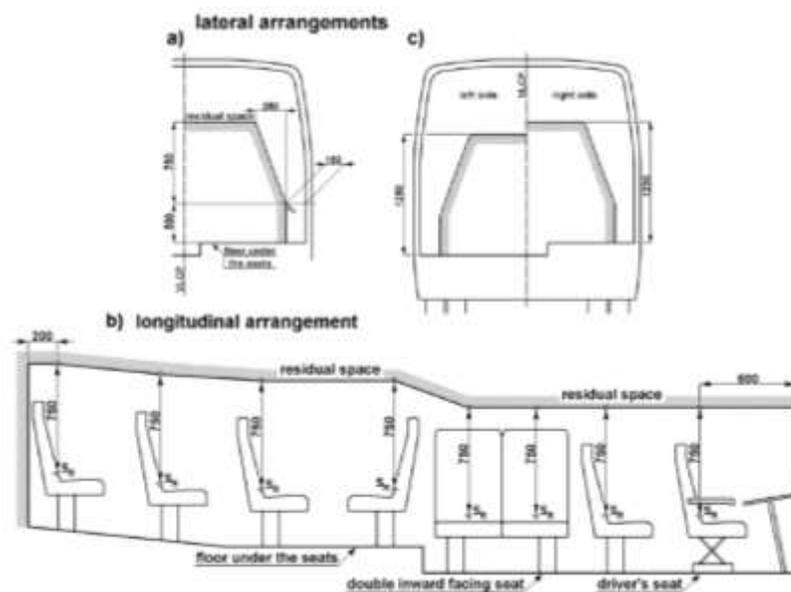


Figura 3 Espacio de seguridad para un autobús

Fuente: (UNECE. 2009)

2.2.4 Requerimientos de Diseño

Según la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1323:2009 la carrocería debe ser capaz de aprobar tres pruebas de manera física o en una simulación computarizada, cada una de estas, se describen a continuación.

Prueba Estática de Carga Sobre Techo

Se aplica sobre el techo de la carrocería una carga estática uniformemente distribuida equivalente al cincuenta por ciento (50%) del peso máximo admisible por el chasis. La carrocería no debe sufrir deformaciones que superen los 70 mm en ningún punto, ni tampoco invadir el área de supervivencia.

(NTE INEN 1323. 2009 Pg. 7)

Prueba Cuasi Estática

Es una prueba de análisis estructural de la carrocería del bus en la cual se debe someter a diferentes combinaciones de cargas de diseño, tanto dinámicas como estáticas.

Para superar esta prueba los elementos estructurales de una carrocería no deben generar deformaciones superiores a 1/240 veces la longitud de sus elementos. Se detallan las cargas utilizadas en esta prueba a continuación.

Tabla 3

Cargas para prueba cuasi estática

Carga	Definición
Muerta	Peso total de la carrocería terminada con todos sus accesorios
Viva	Masa de los ocupantes y su equipaje. Se determina según el tipo de bus.
Giro	En función a la velocidad de circulación del vehículo, radio de curvatura de la carretera y peralte
Frenado	En función a una desaceleración de 4 m/s ^s
Aceleración brusca	Igual y opuesta a la carga de frenado
Resistencia aerodinámica	Se calcula en función al área frontal del bus, coeficiente aerodinámico de resistencia, densidad del aire y velocidad de avance.

Fuente: (NTE INEN 1323)

Prueba de Vuelco

Se debe volcar al bus longitudinalmente, junto a una zanja totalmente seca y lisa de 800 mm de profundidad, tomando como eje de giro el borde del neumático que está más próximo. El bus debe inclinarse mediante una plataforma basculante hasta que por acción de su propio peso, resbale y caiga dentro de la zanja. Ningún elemento estructural deberá invadir el espacio de seguridad.

(UNECE Reg. 66, Pg. 15)

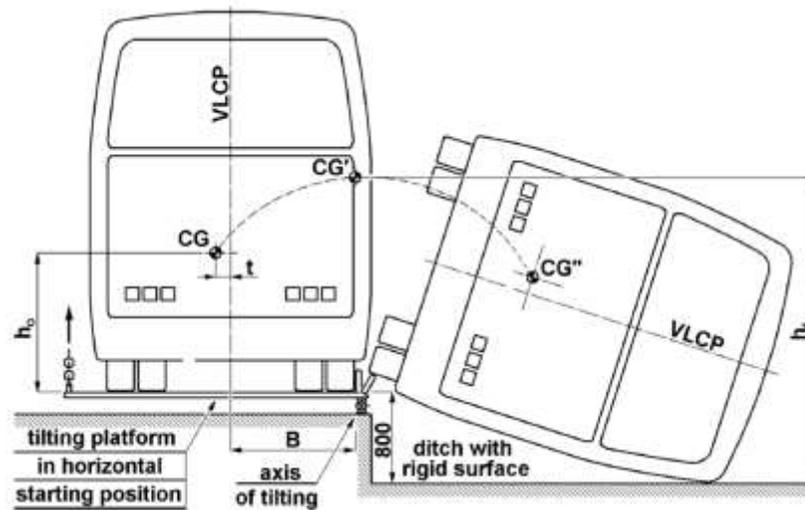


Figura 4 Prueba de vuelco

Fuente: (UNECE. 2009)

2.3 El Método del Elemento Finito

Los componentes mecánicos con formas simples se pueden analizar con mucha precisión por medio de métodos básicos de la mecánica, sin embargo, son muy pocas las veces que el diseñador tiene la suerte de toparse con elementos de este tipo en su trabajo diario. Usualmente también las propiedades del material, la condición de cargas, y otras condiciones de frontera pueden complicar un simple trabajo más allá de lo esperado. Para todas estas circunstancias la primera elección era simplemente realizar aproximaciones asumiendo condiciones más manejables, donde el resultado obtenido era pobre y poco preciso.

El método de los elementos finitos es un método numérico que brinda solución aproximada a un sistema de ecuaciones diferenciales parciales asociadas a un problema físico en particular de gran complejidad, que resultaría incalculable, con cualquier método matemático manual.

Básicamente un elemento finito resulta de la división del medio continuo en un número finito de partes deformables y bien definidas, a este proceso se le conoce como generación de malla. El comportamiento de cada uno de estos elementos se desarrolla en función de las características del material y las propiedades geométricas del elemento.

El proceso por el cual se divide a un componente mecánico real en elementos finitos se denomina discretización. Las estructuras que unen entre sí a los elementos se denominan nodos. Cada nodo puede tener seis grados de libertad, tres de desplazamientos y tres de rotación. Las cargas y las condiciones de frontera se pueden aplicar dentro del elemento (gravedad, dinámica, térmica, etc.), en la superficie del elemento o en los nodos del mismo.

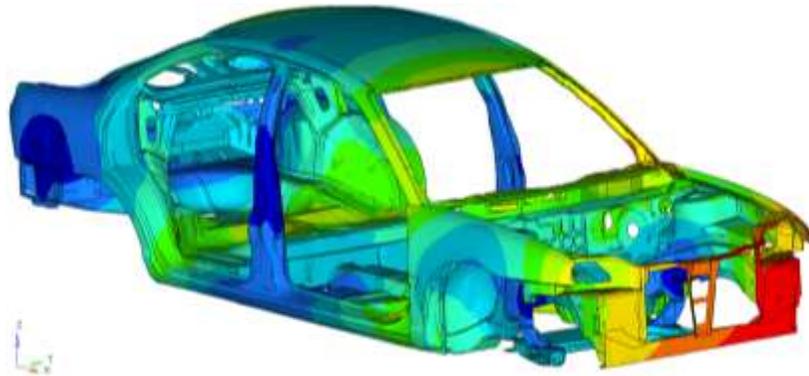


Figura 5 Análisis de la carrocería de un vehículo utilizando FEA

Fuente: (Hyper Works. 2015)

2.4 Tipos de Análisis

El desarrollo del método de los elementos finitos actualmente permite realizar los siguientes tipos de análisis:

- Análisis lineales y no lineales (en referencia al modelo del material).
- Análisis estáticos y dinámicos
- Análisis térmicos
- Dinámica de fluidos computacional (CFD)
- Análisis de ruido y vibración (NVH)
- Optimización topológica estructural

2.4.1 Análisis Lineales y no Lineales

Básicamente se podría decir que existen dos tipos de análisis de elementos finitos, ensayos lineales y no lineales. El primero nos habla de ensayos simples de bajo costo

computacional ya que solamente se trabaja con la parte elástica de la curva esfuerzo de formación de un material. Al tener un modelo lineal se puede predecir el comportamiento en los primeros y últimos niveles de esfuerzo, según la carga aplicada, como si fuera un simple resorte que obedece a la Ley de Hooke.

Al ser predecible el modelo del material se ahorra mucho gasto computacional, de igual manera al ser mínimas las deformaciones que presenta no se alteran las configuraciones de fuerzas y soportes; todos los contactos y condiciones de frontera están bien definidos y permanecen constantes en el tiempo durante todo el estudio.

Un análisis no lineal por el contrario, implica todo lo opuesto al anterior, es decir una curva de material totalmente impredecible, donde el programa tendrá que replantear las condiciones de esfuerzo y deformación, según la condición de carga todo el tiempo, esto genera un alto costo computacional. En este rango están los materiales dúctiles, elastoplásticos, viscoelásticos y viscoplásticos que tienen curvas esfuerzo, deformación polinomiales. Las deformaciones y rotaciones en nodos son superiores al 5% de su valor estándar.

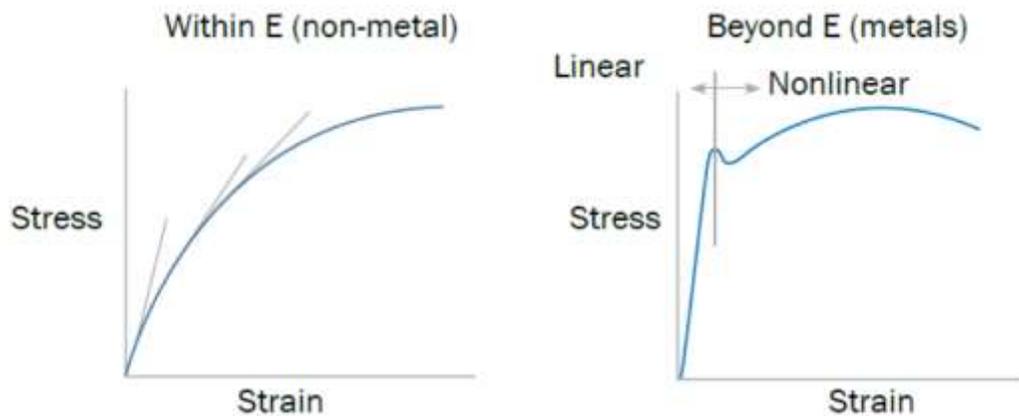


Figura 6 Curvas de comportamiento no lineal de diferentes materiales

Fuente: (Hyper Works. 2015)

2.4.2 Análisis Estáticos

Un sistema estático se caracteriza por interactuar con fuerzas que tienen un valor constante en el transcurso del tiempo, por ejemplo podemos mencionar obras civiles como edificios o puentes o cualquier tipo de estructura mecánica. En la industria automotriz las pruebas estáticas son las primeras que se realizan a las carrocerías y chasis de vehículos para verificar la versatilidad de su diseño, ante cargas teóricas sencillas.

Este tipo de análisis se rige mediante la siguiente ecuación de elementos finitos:

$$[u] * \{K\} = [P]$$

Donde K es la matriz de rigidez, u el vector de desplazamientos y P el vector de fuerzas. Para la resolución de esta ecuación se aplica el método de resolución directo.

2.4.3 Análisis Cuasi Estáticos

Son un tipo de análisis que se resuelven mediante un código dinámico, para obtener resultados estáticos. Son utilizados para procesos dinámicos muy lentos o ensayos donde el factor de carga o desplazamiento va incrementándose gradualmente durante periodos de tiempo muy largos.

2.4.4 Análisis Dinámicos

Describe a los sistemas en los cuales las cargas aplicadas varían con respecto al tiempo. Las cargas aplicadas a un evento dinámico pueden ser determinísticas (periódicas y no periódicas) y no determinísticas (pueden ser descritas según datos estadísticos).

Al igual que un evento estático, un evento dinámico puede ser lineal y no lineal; en un evento lineal las fuerzas aplicadas varían linealmente con respecto al tiempo, en un evento no lineal la fuerza aplicada no es constante en el dominio del tiempo.

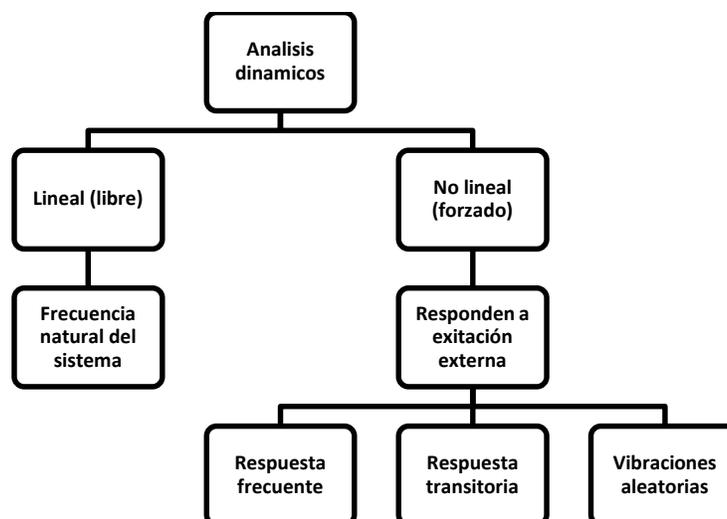


Figura 7 Clasificación de análisis dinámicos

Análisis Dinámico para Respuesta Frecuente

Se utiliza para calcular la respuesta de una estructura ante excitaciones periódicas, como resultado de un análisis de respuesta frecuente tenemos fuerzas, desplazamiento, velocidad, aceleración, deformación de la geometría y esfuerzos en el material. Este tipo de análisis se utiliza en el estudio de maquinaria rotativa, transmisiones y análisis de ruido y vibración de vehículos.

Análisis Dinámico para Respuesta Transitoria

Se utiliza para analizar objetos o estructuras sometidas a cargas de aplicación no frecuente, independientes del tiempo, como pueden ser las cargas producidas por un impacto, donde se libera una gran cantidad de energía en instantes muy cortos de tiempo. Se tiene como ejemplo general de este tipo de análisis las cargas producidas por el viento o por un terremoto a una estructura civil, la carga que se produce en un vehículo al pasar por un bache o ante una colisión, las cargas que producen las aves al chocar contra las alas de los aviones.

Análisis Dinámico para Respuesta Aleatoria

Se utiliza para el análisis de cargas que se presentan de forma aleatoria, estas se pueden definir mediante estadísticas y probabilidades.

2.4.5 Análisis Implícitos y Explícitos

Un ensayo implícito se caracteriza por presentar problemas simples donde no existen grandes deformaciones, el comportamiento del material es lineal y las cargas son constantes en el tiempo, se puede predecir el comportamiento de la malla y por tanto utilizar un “Time Step” muy alto. El gasto computacional que generan es bajo en relación a los análisis explícitos.

Un ensayo explícito se caracteriza por presentar grandes deformaciones y condiciones de frontera variables, materiales de comportamiento no lineal, entre otros que aumentarán el gasto computacional en forma exponencial

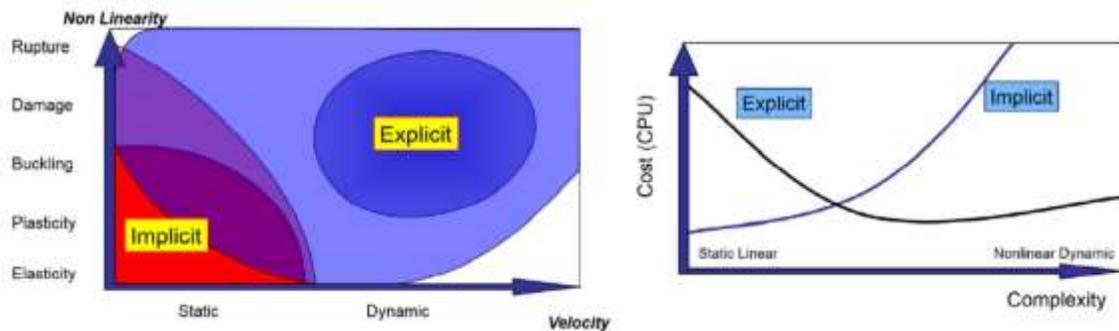


Figura 8 Método de resolución implícito y explícito

Fuente: (Hyper Works. 2015)

2.5 Ecuación de Equilibrio Dinámico para Análisis de Respuesta Transitoria

Dado el siguiente sistema dinámico con un solo grado de libertad:

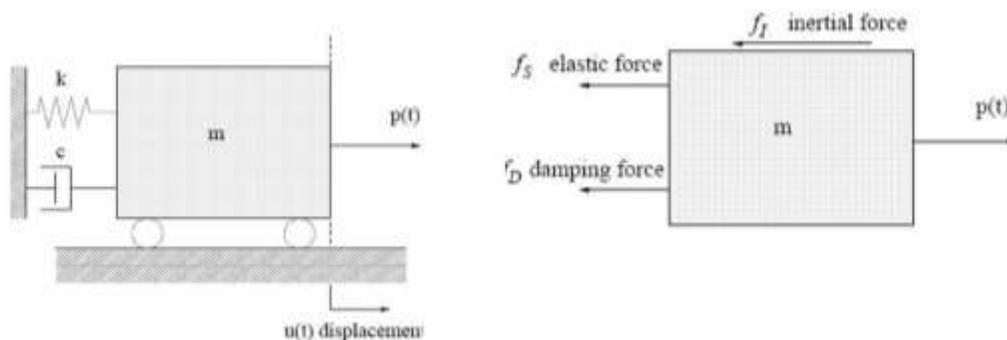


Figura 9 Sistema dinámico con un grado de libertad

Fuente: (LS Dyna. 2017)

Mediante el principio de equilibrio dinámico de d'Alembert se obtiene la ecuación:

$$f_e + f_a + f_i = F_{ext}$$

Reemplazando términos obtenemos la ecuación básica de equilibrio dinámico para análisis de respuesta transitoria:

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = F_{ext}$$

Donde $\{M\}$ es la matriz de masas, $\{C\}$ es la matriz de amortiguación, $\{K\}$ es la matriz de rigidez, F es el vector fuerzas y u es el vector de desplazamientos.

2.6 Metodología de Solución para Análisis Dinámicos Transitorios

La ecuación de movimiento puede escribirse de la siguiente manera:

$$[M] \left\{ \frac{d^2 u}{dt^2} \right\}_n + [C] \left\{ \frac{du}{dt} \right\}_n + [K] \{u\}_n = \{F_{ext}\}_n$$

Físicamente esto significa:

$$\begin{aligned} & \text{Fuerza inercial} + \text{Fuerza de amortiguación} + \text{Fuerza elástica o de rigidez} \\ & = \text{Fuerza externa} \end{aligned}$$

Por el método de las diferencias centrales se obtiene el equivalente de aceleración y velocidad.

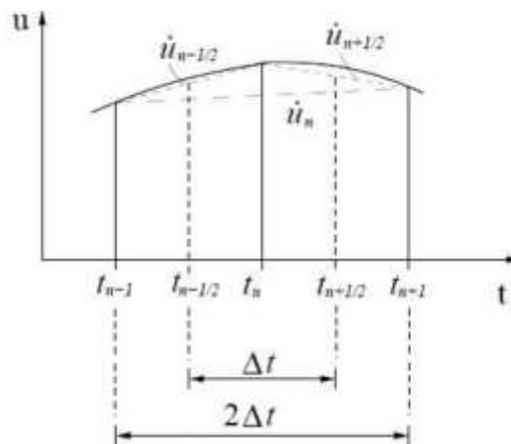


Figura 10 Método de las diferencias centrales

Fuente: (LS Dyna. 2017)

Velocidad:

$$\left\{ \frac{du}{dt} \right\}_n = \frac{1}{2\Delta t} * (u_{n+1} - u_{n-1})$$

Aceleración:

$$\left\{ \frac{d^2u}{dt^2} \right\}_n = \frac{1}{\Delta t} * (\dot{u}_{n+\frac{1}{2}} - \dot{u}_{n-\frac{1}{2}})$$

$$\left\{ \frac{d^2u}{dt^2} \right\}_n = \frac{1}{\Delta t} * \left(\frac{u_{n+1} - u_n}{\Delta t} - \frac{u_n - u_{n-1}}{\Delta t} \right)$$

$$\left\{ \frac{d^2u}{dt^2} \right\}_n = \frac{1}{\Delta t^2} * (u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1})$$

Se reemplazan estas ecuaciones en la ecuación general de movimiento y después de un proceso algebraico se obtiene la siguiente forma:

$$\left(M + \frac{1}{2} \Delta t C \right) u_{n+1} = \Delta t^2 \{ F_{ext} \}_n - (\Delta t^2 K - 2M) u_n - \left(M - \frac{\Delta t}{2} C \right) u_{n-1}$$

El esquema de las diferencias centrales es condicionalmente estable, se limita por el *time step*.

Para calcular el *time step* correcto para este caso, se debe hacer un análisis en base al tipo y tamaño de los elementos. En función de las características del material como módulo de Young, densidad del material, y coeficiente de Poisson, se determina la velocidad de propagación de ondas al interior del material representada por la letra c , como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 4

Velocidad de propagación de ondas en el material

Tipo de elemento	Criterio de cálculo
1D	$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$
2D	$c = \sqrt{\frac{E}{(1 - \nu^2)\rho}}$
3D	$c = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)\rho}}$

Fuente: (LS Dyna. 2017)

A continuación se utiliza uno de los siguientes criterios que relacionan al time step con la frecuencia natural del sistema o con la longitud del elemento y la velocidad de propagación de ondas.

$$\Delta t < \frac{2}{\omega}$$

$$\Delta t < \frac{l}{c}$$

(LS Dyna. 2017)

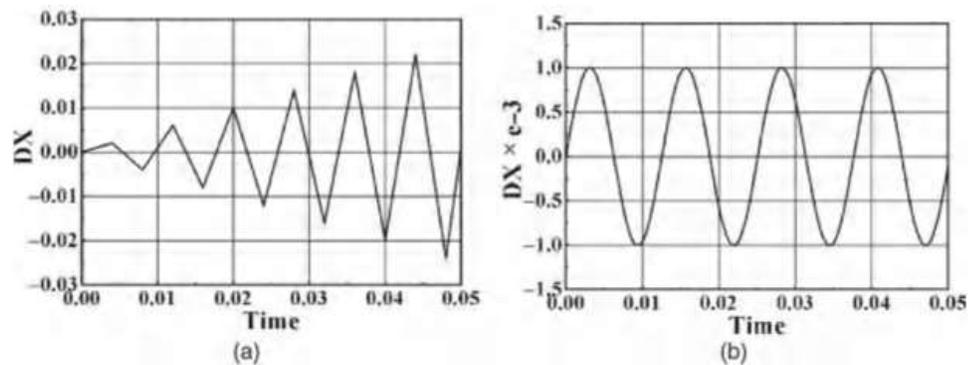


Figura 11 Estabilidad de resultados a) dt=0.004 s y b) dt=0.0004

Fuente: (Shen & Lei. 2012)

Entre menor sea el valor del *time step* se logrará obtener una solución mucho más estable y cercana a la realidad, se puede observar en este gráfico como afecta a la precisión de un resultado el uso de tiempos de cálculo demasiados grandes.

Finalmente se presenta el siguiente algoritmo que resume el proceso interno de cálculo para un código de análisis explícitos, donde se genera un bucle repetitivo entre la primera y la última instrucción hasta completar todo el proceso de cálculo.

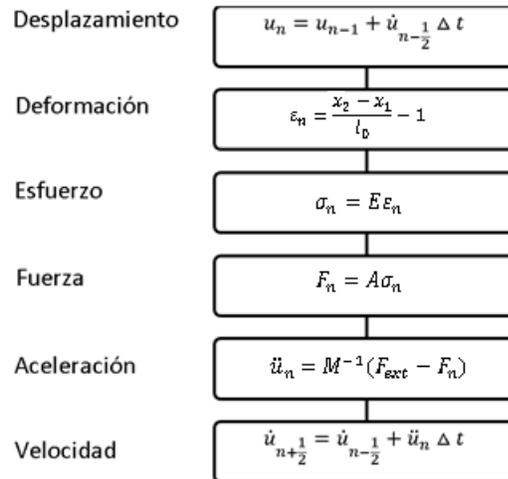


Figura 12 Algoritmo de resolución de dinámica explícita

Fuente: (Shen & Lei. 2012)

Como se puede observar, cada proceso depende del anterior, por lo que se realizan de manera secuencial, solamente para el primer laso de cálculo, se utilizan las condiciones iniciales dadas, de desplazamiento, velocidad y aceleración, y además se determina el valor de u_{-1} para facilidad de cálculo mediante la relación.

$$u_{-1} = u_0 - \Delta t \dot{u}_0 + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_0$$

2.7 Tipos de Elementos

Existen tres tipos de elementos para componer un análisis. del tipo de elemento que se elija, va a depender la precisión en los resultados calculados y el gasto computacional, de igual manera, según el tipo de elemento se deberán determinar

parámetros específicos para el análisis. a continuación se menciona cada uno de los elementos.

2.7.1 Elementos 1D

Se utilizan cuando una de las dimensiones del objeto en estudio es mucho mayor que las otras dos, por ejemplo en vigas, tuberías o elementos de sujeción como pernos. Estos elementos por su simplicidad se utilizan a veces para componer otros elementos especiales.

2.7.2 Elementos 2D

Se utilizan cuando una de las dimensiones del objeto en estudio es mucho menor que las otras dos, por ejemplo en placas, membranas, piezas de chapa, entre otros. Existen elementos 2D de tipo triangular con 3 o 6 nodos y cuadrilateral con 4 u 8 nodos. De igual manera cada nodo tendrá 6 grados de libertad, tres rotacionales y tres traslacionales.

2.7.3 Elementos 3D

Se utilizan cuando las tres dimensiones son comparables, por ejemplo en un bloque de motor, un cigüeñal, entre otros. Por lo general un análisis que contenga este tipo de elementos consume muchos recursos computacionales y los resultados son muy pobres. Existen elementos 3D de forma tetragonal con 4 o 10 nodos, pentagonal con 6 o 15 nodos y hexagonal con 8 o 20 nodos.

2.7.4 Otros Elementos

Existen otros elementos que tienen propósitos específicos por ejemplo los de tipo resorte y amortiguador que se utilizan por ejemplo en el modelado de sistemas de suspensión para automóviles o trenes de aterrizaje en aviones o en análisis multifísicos. Otro tipo especial es el elemento tipo spider, que se forma de la unión de varios elementos tipo beam.

(G. Budinass & K. Nisbett, 2011. Pg. 958)

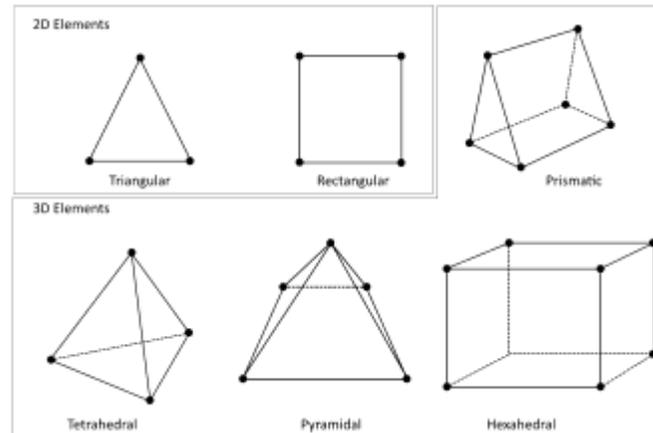


Figura 13 Elementos 2D y 3D utilizados en software CAE

Fuente: (Multiphysics Cyclopedia. 2016)

2.8 Proceso para Desarrollar un Análisis de Elementos Finitos

Para desarrollar un análisis de elementos finitos exitoso, se debe seguir un proceso que arranca en el desarrollo del modelo de dibujo asistido por computador (CAD). A continuación este debe ser exportado al programa pre procesador para prepararlo para la simulación y finalmente este se debe analizar. Para poder visualizar los resultados obtenidos se utiliza el pos procesado. A continuación se hace una descripción más detallada de cada etapa.

2.8.1 Modelado CAD

Un modelo CAD (Computer Aided Design) que represente el objeto físico en estudio debe ser preparado para introducirse al software de elementos finitos. El modelo CAD debe contener los detalles suficientes para que el estudio sea aceptable, sin embargo no debe contener demasiados pues se generaría una carga computacional innecesaria. Por ejemplo en un estudio de impacto frontal de un vehículo es necesario incluir una masa representativa del motor debido a la rigidez estructural que aporta a la carrocería y a las cargas que genera al chasis debido a la inercia del impacto. Sería completamente innecesario incluir ocupantes y detalles interiores si lo que se busca es estudiar únicamente el comportamiento de la carrocería en zonas de deformación programada. Por el contrario si lo que se busca en el estudio es la afectación de los pasajeros en el impacto, no es

necesario incluir todo el vehículo, basta con aplicar las cargas que se obtuvieron en la prueba de impacto en una plataforma más sencilla.

2.8.2 Pre Procesamiento y Discretización

La parte del programa de elementos finitos que permite someter al modelo a las condiciones que se desea simular se denomina pre procesador. Esta etapa inicia con la introducción del modelo CAD al software, que debe ser totalmente limpio y no contener errores, para lo cual existen comandos de análisis.

La etapa más importante del pre procesamiento es el mallado del modelo, que consiste en dividir al modelo CAD en pequeños dominios llamados elementos sobre los cuales se aplicarán y resolverán las ecuaciones de elementos finitos. Se dan detalles del modelo de material a utilizar, condiciones de cargas y apoyos, velocidad de desplazamiento, aceleraciones entre otros. Todas estas características serán traducidas por el programa, a la forma de un modelo matemático, que se resolverá en la etapa de procesamiento.

2.8.3 Procesamiento

El procesador es la parte del programa de elementos finitos que se encarga de resolver el modelo matemático entregado por el pre procesador, realizando un ensamble de todas las matrices, aplicando las condiciones de frontera impuestas y finalmente dando solución al sistema de ecuaciones generado.

2.8.4 Pos procesado

Al igual que en la etapa anterior, el procesador entregará un conjunto de datos para interpretar al pos procesador. Aquí el programa permite, verificar esfuerzos, deformaciones, aceleraciones, velocidades, desplazamientos y demás condiciones físicas que se deseen analizar, de manera gráfica o diagramada. De acuerdo a las posibilidades del programa.

2.9 Software CAE

El software de Ingeniería Asistida por Computador o “CAE” por sus siglas en ingles actualmente se ha convertido en una herramienta imprescindible en los procesos de

diseño y optimización industrial de dispositivos y procesos. Permite reducir el uso de prototipos y experimentos mediante simulaciones del dispositivo en su entorno físico y las posibles complicaciones de su uso como accidentes, golpes o caídas.

El software CAE actualmente se encuentra en constante desarrollo e investigación debido a la enorme cantidad de dinero que permite ahorrar a las compañías. Su uso se ha ampliado y ha pasado de ser algo exclusivo para las grandes compañías, para integrarse en el ámbito educativo y a la pequeña y mediana industria, inclusive en nuestro país.

2.9.1 Software CAE de Propósito General

Es un tipo de software que abarca el pre procesamiento, procesamiento y pos procesamiento, todo en un mismo entorno gráfico, para facilitar su manejo y agilizar el proceso de simulación, además, su característica fundamental es que, son capaces de resolver análisis de distintos tipos, como análisis estructurales, térmicos, electromagnéticos, CFD, NVH, entre otros. Son softwares muy poderosos y altamente difundidos, tenemos como ejemplo:

- Ansys
- Hyper Works
- Midas NFX
- MSC Nastran
- Abaqus

2.9.2 Software CAE especializado

Como su nombre lo indica son paquetes computacionales que fueron diseñados exclusivamente para realizar tareas específicas, por lo que tienen una gran precisión en los análisis que realizan. Pueden encontrarse simplemente como procesadores del modelo matemático que se pueden añadir a la interfaz de otro software de propósito general o como un paquete computacional integrado, algunos de estos son:

- LS Dyna: especialista en análisis de dinámica explícita no lineal.
- Madymo: especialista en sistemas de seguridad para ocupantes de medios de transporte y peatones, contiene una gran librería de muñecos de prueba y modelos antropométricos del cuerpo humano.

LS Dyna

Es un software especializado en el procesamiento de problemas altamente no lineales, es decir análisis estáticos o dinámicos de estructuras con grandes deformaciones y su interacción con fluidos, condiciones de frontera cambiantes, materiales no lineales, problemas de dinámica transitoria, eventos de corta duración donde las fuerzas inerciales son importantes como por ejemplo impactos automotrices, explosiones o conformado mecánico.

Las simulaciones que permite realizar LS Dyna son muy cercanas a la realidad lo que convierte al software en una herramienta muy poderosa que es ampliamente aceptada por las compañías automotrices para probar sus diseños sin necesidad de construir un prototipo, otras de sus características son:

El preprocesador de LS Dyna se denomina LS Prepros tiene algunas aplicaciones específicas orientadas al sector automotriz, permite implementar airbags, cinturones de seguridad, muñecos de prueba, sensores, acelerómetros, entre otros. De igual manera su post-procesador permite la rápida visualización de desplazamientos de los nodos, velocidades de deformación, aceleración, criterios de fallo de material, hasta la visualización de parámetros más específicos como el HIC (Head Injury Criterion) y el CSI (Chest Severity Index) detallados en las normativas de impacto frontal europeas.

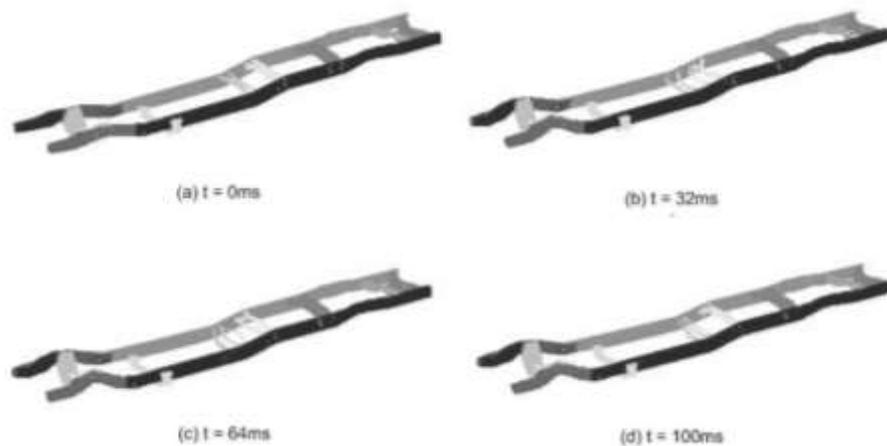


Figura 14 Simulación del impacto de un bastidor vehicular utilizando

Fuente: (LS Dyna. 2016)

Radioss de Hyper Works

Radioss es el procesador de Hyper Works utilizado para resolver análisis estructurales de alta no linealidad sometidos a cargas dinámicas. Es utilizado por la industria automotriz, naval, aeroespacial, entre otras a nivel mundial para probar la resistencia al impacto, y seguridad de sus diseños estructurales.

La librería de materiales que incluye Radioss incorpora una gran cantidad de materiales con comportamiento no lineal, como concretos, espumas, cauchos, aceros, materiales compuestos, biomateriales, entre otros. Cuenta con una biblioteca de muñecos de prueba, barreras de impacto e impactores, haciéndolo especialmente útil para pruebas de impacto automotrices.

Además de análisis de dinámica explícita Radioss es capaz de resolver, dinámica de fluidos computacional, hidrodinámica de partículas blandas, que se utiliza en el estudio de fluidos geológicos como la lava de un volcán o las olas del mar, propagación de grietas y fisuras en cascarones multicapas, que se utiliza por ejemplo en el análisis de impacto de peatones contra un parabrisas o en la industria electrónica para analizar el comportamiento de pantallas frente a una caída.



Figura 15 Impacto contra un parabrisas

Fuente: (Radioss. 2015)

2.10 El Impacto

De manera general, se considera un impacto a la aplicación de una carga sobre una estructura durante un tiempo inferior al periodo natural de vibración mínimo.

(S. Rao. 2012, Pg. 13)

Resulta del contacto entre dos cuerpos, pueden ser estos dos vehículos en movimiento o un vehículo en movimiento y una barrera fija, por un periodo de tiempo muy corto, y con una gran transferencia de energía, donde la energía cinética del movimiento se disipa en la carrocería de los vehículos a manera de deformaciones y aumentos de temperatura.

Si un bus colisiona de manera frontal, las fuerzas que se transmiten a los ocupantes dependerán de la rigidez de la carrocería. Por una parte se necesita una estructura lo suficientemente rígida para poder soportar todas las cargas dinámicas, estáticas y aerodinámicas, propias de su operación, pero en caso de producirse una colisión, la estructura debe ser capaz de deformarse lo suficiente para absorber la mayor cantidad de energía, sin invadir el espacio de seguridad del chofer y el acompañante.



Figura 16 Simulación de un bus sometido a impacto frontal

La severidad de un choque no se determina en base a la velocidad previa al impacto, sino por el cambio de velocidad Δv que el vehículo experimenta y por la rapidez con que se produce este cambio, es decir, la deceleración. La deceleración será determinada por la masa bruta del vehículo y la rigidez de los objetos que colisionan entre sí.

Durante un impacto se debe disipar toda la energía cinética que guardaba el bus, una parte es absorbida por la carrocería transformándose en deformación de sus miembros estructurales y aumento de temperatura, la otra parte de esa energía es absorbida por el cuerpo impactado. Al tratarse de una barrera demasiado rígida toda la energía deberá ser disipada por el bus.

De esta manera si la estructura es demasiado rígida los ocupantes podrían sufrir lesiones de gravedad debido a las desaceleraciones muy fuertes que van a experimentar, por el contrario al ser muy blanda, se podría invadir el espacio de seguridad guardado para el chofer y el acompañante.

2.10.1 Ensayos de Impacto

Actualmente los diseñadores automotrices y algunas entidades de control se dedican a reproducir choques en ambientes controlados tratando de simular lo más fielmente posible los accidentes reales, y observar así lo que ocurre. Estas pruebas reciben el nombre de “crash test” o ensayo de choque. Consisten en someter a un vehículo a distintos tipos de colisiones que para evaluar su comportamiento ante este tipo de eventualidad.

Un ensayo de choque constituye la última prueba de diseño en la cual se prueba de forma definitiva el conjunto de seguridad pasiva del automóvil ya que, con la máxima aproximación posible, se puede verificar el conjunto de sucesos que acompañan a una colisión. Básicamente existen cinco tipos de ensayos, los cuales han sido elaborados con el propósito de reproducir de manera muy cercana los diferentes sucesos posibles.

(P. Luque & D. Alvarez, 2007. Pg. 56)

- Ensayos de choque frontal, contra barrera fija o deformable y solapamiento total o parcial contra poste
- Ensayos de choque posterior, contra una barrera móvil
- Ensayos de choque lateral, contra una barrera móvil deformable o contra un poste fijo
- Ensayo de vuelco, dentro de una sanja de 800 mm.
- Ensayos de impacto de coche contra coche.

Como norma general para todos los ensayos de choque han de cumplirse las siguientes condiciones:

- Mantenimiento de la zona de supervivencia.- el habitáculo de pasajeros debe sufrir la menor deformación posible, el volante no debe sobrepasar cierta distancia en caso de desplazamiento y ningún elemento debe penetrar en la zona de seguridad.
- El desplazamiento residual del volante, medido en el centro de éste y en la parte superior de la columna de la dirección no será superior a 80 mm hacia arriba en vertical, ni a 100 mm hacia atrás en horizontal.
- No se deben producir lesiones graves en los ocupantes, los elementos situados en zonas de impacto no deben astillarse ni crear aristas vivas en caso de romperse. La aceleración en los maniqués de pruebas no debe sobrepasar los límites biomecánicos establecidos.
- Los sistemas de retención deben funcionar de manera correcta, las puertas deben mantenerse cerradas, los cinturones deben funcionar correctamente manteniendo fija la posición del ocupante, los anclajes de los cinturones y asientos deben mantenerse en su sitio y los airbags deben haber funcionado correctamente.
- No debe incendiarse el vehículo, el circuito de combustible debe permanecer estanco
- Facilitar la rápida evacuación de los heridos, permitiéndose abrir las puertas y destrabar los cinturones de seguridad posteriormente al evento.

Actualmente este tipo de ensayo solo se realiza a vehículos livianos de categoría M1 y vehículos de transporte de cargas tipo N. No existe normativa para buses o vehículos de categoría M3.

Según la región, existen organizaciones que se encargan de realizar los ensayos de choque a los automotores antes o durante su periodo de comercialización. Los resultados que ofrecen sirven a los consumidores para conocer el nivel de seguridad que ofrece el automotor que están pensando en adquirir y además como exigencia a los fabricantes automotrices para ejecutar de mejor manera sus proyectos.

- Global NCAP, Programa de Evaluación de Vehículos Nuevos por sus siglas en inglés, se encuentra presente en diferentes regiones del mundo, para América Latina tenemos Latin NCAP, en Europa, Euro NCAP, y en el sudeste asiático Asean NCAP.
- NHTSA, Administración Nacional para la Seguridad del Tráfico en Autopistas, es el ente de control de los Estados Unidos.
- NASVA, Agencia nacional de seguridad automotriz y asistencia a víctimas, presente en Japón.

(www.globalncap.org)

Además de las entidades de control los ensayos de choque son parte del proceso de diseño automotriz, por lo general se realizan simulaciones computacionales en las últimas etapas de diseño de los nuevos modelos para saber si serán o no capaces de superar requerimientos de los entes reguladores.

2.10.2 Ensayo de Impacto Frontal

Las regulaciones más importantes según el Foro Mundial, ayudan a prevenir los riesgos existentes en el impacto frontal y lateral, sin embargo, solamente 49 países aplican las regulaciones de las Naciones Unidas para impacto frontal y 47 aplican las regulaciones para impacto lateral.

De las fatalidades debidas a impactos vehiculares, un 55% corresponden a impactos frontales, alrededor del 40% a impactos laterales y el porcentaje restante incluye impactos posteriores y otros tipos de impacto. (OMS, 2015)

2.11 Regulaciones a los Ensayos de Impacto Frontal.

El impacto frontal actualmente solo se regula solamente para vehículos livianos y camiones para transporte de mercaderías, no se toma en cuenta a los buses de transporte de pasajeros, es por eso que se hace un análisis de las normativas internacionales más importantes, con el fin de recabar la información necesaria para poder llevar a cabo el presente estudio.

2.11.1 Unece 29

La regulación 29 de las Naciones Unidas está destinada a evaluar la resistencia y seguridad que ofrecen vehículos comerciales de carga tipo “N”, es decir camiones de transporte de mercancías y productos. Esta norma detalla tres ensayos:

Tabla 5

Pruebas para vehículos de carga tipo N

Prueba	Descripción
Prueba A	Ensayo de impacto frontal, para evaluar la resistencia de la cabina ante un impacto frontal.
Prueba B	Ensayo de impacto contra pilares A, para evaluar la resistencia ante un posible vuelco de 90° con subsecuente impacto frontal, en la parte alta de la cabina, frente al parabrisas.
Prueba C	Ensayo de carga sobre el techo, para evaluar la resistencia de la cabina ante un posible vuelco de 180°.

Fuente: (UNECE 29)

Para realizar estos ensayos, el vehículo debe tener montado el motor o un modelo equivalente en masa y dimensiones, de igual manera debe estar instalado en la cabina el mecanismo de dirección, volante, panel de instrumentos, y asientos del conductor y acompañantes. Las puertas de la cabina deben permanecer cerradas, pero deben poder abrirse después del ensayo.



Figura 17 Prueba de carga sobre el techo a un camión de bomberos

Fuente: (Ferrara Custom. 2015)

Ninguna de las pruebas definidas en la norma son necesarias si el constructor puede demostrar mediante una simulación computarizada que la cabina no tendrá ninguna deformación peligrosa para los ocupantes, es decir que no habrá invasión del espacio de supervivencia, si esta es sometida a cualquiera de las condiciones de prueba.

Prueba A

El impacto se realiza en contra de un bloque de acero de construcción rígida llamado impactor, con una masa no menor a 1500 kg, sus dimensiones deben ser 2500 mm de ancho por 800 mm de alto, con bordes redondeados a un radio de 10 mm.

El vehículo permanece estático durante la prueba, se deja caer el impactor que está suspendido por un par de barras rígidas ubicadas en el centro geométrico de la estructura, con una separación no menor a 1000 mm entre sí y con una longitud no menor de 3500 mm desde su punto de suspensión.

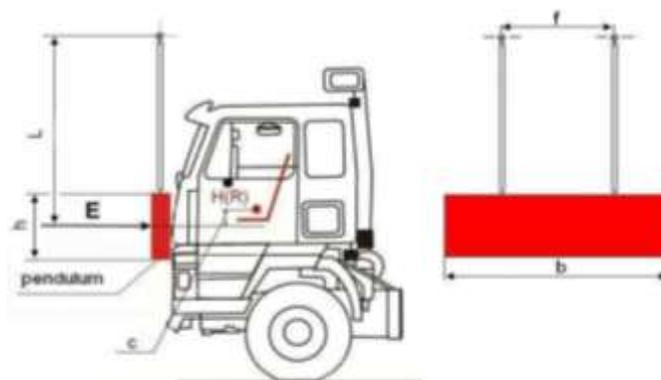


Figura 18 Diagrama de aplicación de prueba de impacto frontal

Fuente: (UNECE. 2012)

Se determina la ubicación del impactor mediante su centro de gravedad el cual debe estar 50 mm por debajo del punto R del asiento del conductor y alineado al plano medio longitudinal del vehículo.

La energía de impacto debe ser de 29.4 KJ para vehículos de categoría N1 y N2 con un peso bruto vehicular inferior a 7.5 Ton. y de 55 KJ en el caso de vehículos de categoría N2 y N3 con un peso bruto vehicular de 7.5 Ton.

En la figura 19 se puede ver como se ha realizado un ensayo de impacto según esta normativa a un bus de pasajeros de construcción China, para evaluar el comportamiento de la carrocería y mejorar así su diseño.



Figura 19 Prueba de impacto frontal a un bus de construcción China

Fuente: (CNBUS, 2016)

Prueba B

Se realiza de manera similar a la prueba A, con la diferencia que el impactor tiene forma cilíndrica, sus dimensiones son, 600 mm de diámetro y 2500 mm de longitud. Debe tener una masa mínima de 1000 kg y debe estrellarse con el punto medio de las bases superior e inferior del parabrisas.

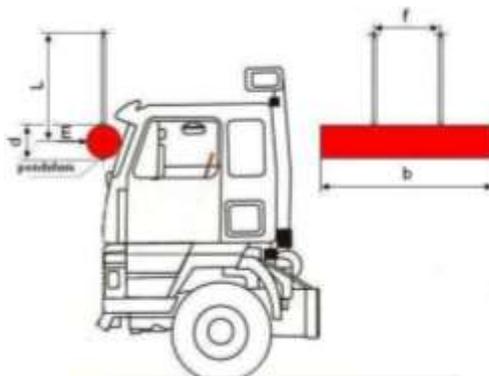


Figura 20 Diagrama de aplicación de prueba de pilares A

Fuente: (UNECE. 2012)

Luego de realizar las pruebas el espacio de supervivencia de la cabina debe deformarse al mínimo permitiendo libremente que se acomode sentado el maniquí definido en la figura 21, No debe producirse contacto entre el maniquí y ninguna parte sobresaliente con una dureza Shore igual o mayor a 50, a menos que estas puedan ser libremente removidas sin el uso de ninguna herramienta, aplicando una fuerza inferior a 100 N. Se debe ajustar todos los asientos de la cabina a la posición media para verificar el espacio de supervivencia.

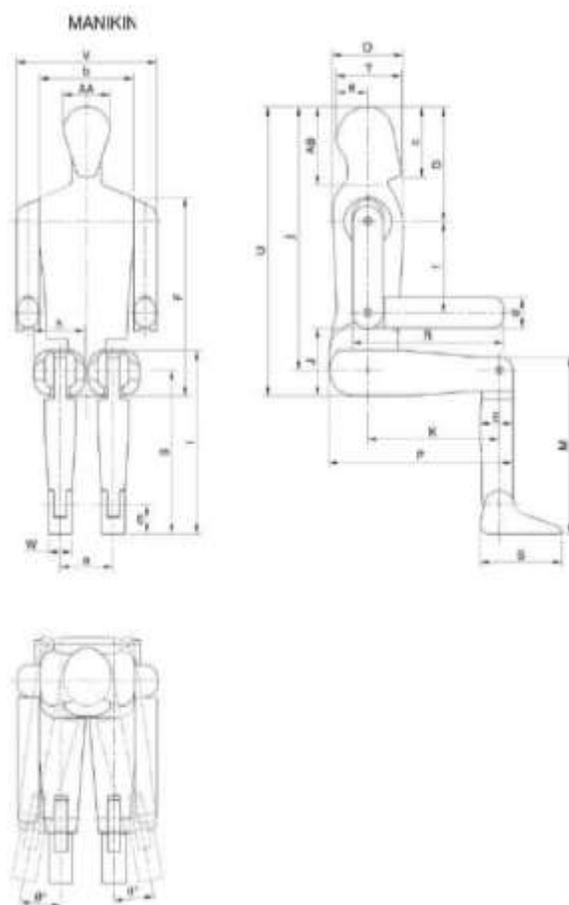


Figura 21 Muñeco de prueba

Fuente: (UNECE. 2012)

2.11.2 Unece 33 y 94

Para vehículos livianos de tipo M1 y M2 tenemos las normativas 33 y 94 de las Naciones Unidas, en las cuales se regula el comportamiento de la estructura y la protección que se ofrece a los ocupantes de vehículos sometidos a ensayos de impacto frontal, respectivamente.

El vehículo debe impactarse contra una barrera de concreto reforzada de 1,5 m de altura que cubra el 100% del ancho del vehículo y tenga una masa total de 70 ton. La superficie de impacto debe ser perpendicular a la trayectoria del vehículo con una ligera desviación horizontal de 1° , de tal manera que el lado que tiene el mecanismo de dirección impacte primero.

Existe una pequeña variación con respecto a la velocidad de impacto mínima del test que indican ambas normas, sin embargo se hace referencia que si la prueba es realizada a una velocidad mayor a la establecida, esta se considerará válida. La regulación 33 indica una velocidad entre 48,3 Km/h y 53,1 Km/h.



Figura 22 Impacto frontal de un vehículo

Fuente: (Car and Driver. 2016)

Después del impacto debe quedar un espacio libre de 450 mm entre los planos paralelos ubicados entre el punto R del asiento del conductor y el punto más sobresaliente del tablero, al menos debe poder abrirse una puerta del vehículo para poder evacuar a los pasajeros, la desaceleración máxima deberá ser de 80 g durante 3 ms.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Ubicación

La presente investigación se ha llevado a cabo en la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua, por ser la que acumula la mayor parte de la industria carrocería metalmecánica del país. Aquí se pudo conseguir el apoyo de diferentes empresas y organismos con quienes se socializó el proyecto y permitieron un acercamiento hacia el interior de sus industrias, brindando su experiencia y toda la instrumentaria requerida para poder realizar las pruebas físicas y computacionales planificadas.

3.2 Diseño de Investigación

A continuación se describe los diferentes métodos investigativos utilizados, indicando en cada uno, las diferentes alternativas y propuestas realizadas para obtener la información requerida para llevar a buen término el presente trabajo de investigación.

3.2.1 Investigación Bibliográfica

Se realizó una investigación bibliográfica en busca de las directrices básicas para el estudio, se consultó diferentes fuentes bibliográficas como libros y publicaciones de autores nacionales e internacionales, realizando un análisis del estado del arte actual que rodea este tipo de investigaciones.

Se efectuó entrevistas informativas a varios expertos en diseño de carrocerías para buses y al personal del Centro de Fomento Productivo de la Ciudad de Ambato, para recabar información del grado de utilización del método de los elementos finitos en la industria ecuatoriana.

Se visitó varias páginas web en busca de información histórica de las constructoras de carrocerías y otros datos particulares, obteniéndose una gran base de datos en la página web de la Cámara Nacional de Fabricantes de Carrocerías (CANFAC) y en la Agencia Nacional de Transito (ANT).

3.2.2 Investigación Descriptiva

Esta investigación también es de tipo descriptiva ya que intenta mostrar una posibilidad de mejora a la normativa ecuatoriana NTE INEN 1323y por tanto a la seguridad que brindan las carrocerías de construcción nacional a sus ocupantes. Además se describe los procedimientos para llevar a cabo este tipo de simulaciones computacionales.

3.2.3 Investigación Experimental

Finalmente es de tipo experimental por que se ha efectuado dos ensayos. El primero de manera física para obtener datos propios de los materiales utilizados en la construcción de carrocerías, se realizó una caracterización del material, mediante un ensayo de tracción, efectuado en el laboratorio de materiales de Centro Carrocero Metal Mecánico de la ciudad de Ambato.

El segundo y más importante experimento se llevó a cabo de manera computacional, realizando una simulación del impacto frontal de un autobús, con carrocería de construcción ecuatoriana, el cual ha sido el principal propósito del presente proyecto.

3.3. Procedimientos

Se hizo una revisión general de bibliografía nacional e internacional para recabar información que ayude a llevar a cabo el estudio, describir los fundamentos teóricos del método, y todo el desarrollo que existe actualmente en torno a este concepto.

Se hizo un análisis del estado del arte en nuestro país, donde se ha observado que este método de análisis y simulación estructural no tiene mucha difusión en el sector industrial.

A pesar de que, la normativa NTE INEN 1323, obliga a los constructores a someter a las carrocerías a las pruebas antes descritas, son únicamente las grandes empresas constructoras, las que tienen departamentos propios de diseño y simulación donde se evalúan mediante el método de los elementos finitos a los nuevos modelos de carrocerías. La mayoría de talleres encomiendan el desarrollo de este tipo de análisis a laboratorios certificados que han construido un modelo de negocio en torno a esta deficiencia.

Se analizó la normativa nacional, contrastando con lo expuesto en reglamentos europeos y estadounidenses, donde sobresalen las Regulaciones Vehiculares de la Comisión Económica de las Naciones Unidas (UNECE) y la normativa de la Administración Nacional de Seguridad del Tránsito y Autopistas (NHTSA), respectivamente.

Se determinó en base a la normativa que regula pruebas de impacto frontal para vehículos livianos y vehículos de transporte de carga las condiciones más adecuadas para desarrollar la prueba de impacto a un automotor,

Se obtuvieron probetas del material según las especificaciones determinadas en la norma NTE INEN 0109:2009, para ser sometidas a un ensayo de flexión y tracción, en el laboratorio de materiales del Centro de Fomento Productivo Carrocero Metal Mecánico de la ciudad de Ambato. El material utilizado fue acero grado A según NTE INEN 2415:2011. Se adjuntan al final del presente trabajo los resultados de esta prueba en forma de anexos.

Para construir el modelo CAD se solicitó a una empresa carrocera de la ciudad de Ambato su auspicio con un modelo de carrocería que haya sido aprobado por la Agencia Nacional de Tránsito y que esté actualmente en circulación. Se modeló el diseño utilizando el *software Solid Works*.

Finalmente, el estudio llegó a feliz término mediante el uso del *software* multifísico LS-Dyna distribuido por la empresa *Livermore Software Technology Corporation (LSTC)*. El procesamiento final del modelo se realizó con una estación de trabajo *Dell Precision™ T5600* con 128 Gb de memoria RAM y un procesador Intel *Xeon* de 16 *Cores*.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 Modelado

Para poder llevar a cabo un estudio de alta trascendencia, se ha solicitado a una empresa carrocería que tiene varios años de experiencia los planos aprobados de una unidad que actualmente se encuentre operativa en el país. Debido a un acuerdo de confidencialidad firmado, no se incluye su nombre ni ningún referente de la misma.

El diseño de la carrocería ha sido concebido para el chasis Hino AK-8JRSA, y ha sido homologada por la agencia nacional de tránsito en el 2016, para trabajar durante cuatro años, es decir el modelo, objeto de estudio estará circulando hasta el 2020.



Figura 23 Chasis Hino AK 8JRSA

Fuente: (Hino. 2017)

En base a los planos facilitados se levanta el modelo CAD en 3 dimensiones, teniendo especial atención en todos los detalles del diseño para que el modelo computacional sea exactamente igual al modelo real. Es importante construir el modelo de manera correcta, observando cada uno de los procesos de dibujo con la herramienta CAD. Muchas veces pequeños errores en la etapa CAD generan fallas imposibles de corregir en la etapa de mallado, a menos que se vuelva a dibujar.

Los errores que generalmente se cometen son: fusión de elementos, elementos solidos de espesores pequeños, superficies duplicadas, elementos estructurales

4.1.1 Construcción del Modelo CAD

La etapa de modelado CAD, inicia con la construcción de las cerchas centrales. Estas se dibujan según las medidas proporcionadas por el fabricante, a continuación mediante una operación de matriz se genera el primer bosquejo de la carrocería, el cual debe ser completado con los travesaños y refuerzos laterales.

El techo es la segunda parte que se modela, no se utiliza ningún tipo de perfil estructural, sino más bien canales con forma de omega que se fabrican manualmente en el taller constructor, doblando chapa de acero galvanizado. Para el piso se utiliza tubo cuadrado y canal tipo “U”. Se construyen también los apoyos para el chasis. Se observa una alta densidad de travesaños laterales en el piso, los cuales incrementan el soporte estructural de la carrocería.

Se incluyen otros elementos como las escotillas de techo, las cunas o alojamientos para los neumáticos, puerta de acceso, elementos de la cabina como el graderío de acceso, la cubierta del motor y el piso delantero. No se incluyen elementos de detalle como tablero, silla del conductor o volante. Finalmente se incluyen las estructuras frontales y posterior que se podría decir son las de mayor complejidad, debido a la curvatura de sus formas.

Es muy importante indicar que no se debe incluir ningún tipo de unión entre los elementos, estos solamente deben quedar a tope. Incluir elementos soldados genera un altísimo gasto computacional, que es totalmente innecesario en este estudio.

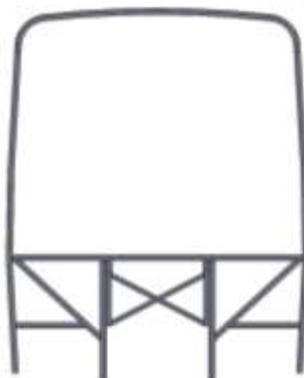


Figura 24 Cercha Central

Es recomendable realizar una inspección de campo en la planta de producción, observando los métodos de construcción. Ciertos fabricantes para una misma sección pueden utilizar tubo continuo o varios componentes soldados. Todos estos detalles generan un ensayo de mayor cercanía a la realidad.

Se debe tener en cuenta cual será el tipo de elemento que se utilizará para el estudio, pudiendo ser estos de tipo unidimensional, bidimensional o tridimensional. El presente modelo se trabaja en su mayoría con elementos bidimensionales, para esto es muy importante preparar el modelo desde el inicio, construyendo componentes tipo superficie con espesor cero.

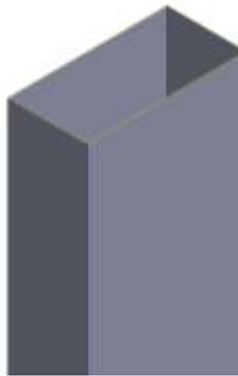


Figura 25 Sección de elemento estructural con espesor de pared cero

El chasis es un elemento que brinda rigidez estructural ante cualquier tipo de impactos ya sean estos laterales, frontales, posteriores o vuelco, por tanto es imprescindible incluir un modelo CAD del chasis Hino AK el cual se ha preparado en base a información tomada de manuales y catálogos técnicos del fabricante. Dicho chasis es de tipo escalera, está conformado por dos perfiles estructurales tipo “C” con varios travesaños laterales que le dan mayor rigidez y soporte.

Tiene tracción posterior con motorización frontal. Utiliza el motor J08EUD, tiene una cilindrada de 7.7 litros, con seis cilindros dispuestos en línea recta, tiene una masa en seco de 736 Kg. Debe ser considerado necesariamente en el presente estudio debido a la energía inercial que conservaría en caso de un choque. También aporta rigidez estructural.

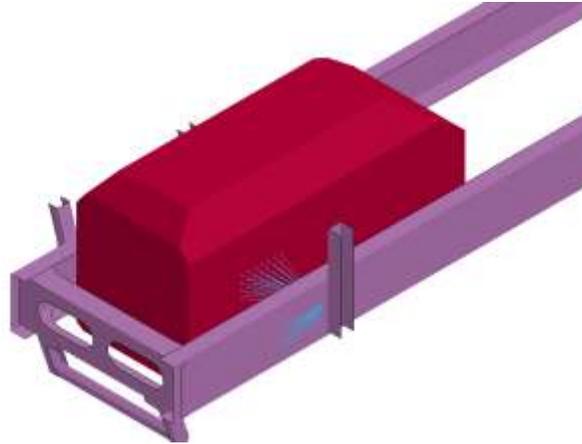


Figura 26 Detalle de chasis y motor

Se recomienda dar colores diferentes a cada sección estructural para optimizar la vista del modelo y poder diferenciar rápidamente cada parte. Es preferible utilizar colores vivos y vistosos que den un buen contraste entre sí.

Para desarrollar este estudio se ha tomado en cuenta la regulación 33 de impacto frontal de la UNECE, la cual dictamina que la barrera debe ser de construcción rígida y tener una altura de 1,5 metros, esta barrera debe estar lo más cerca posible del punto más saliente del bus.

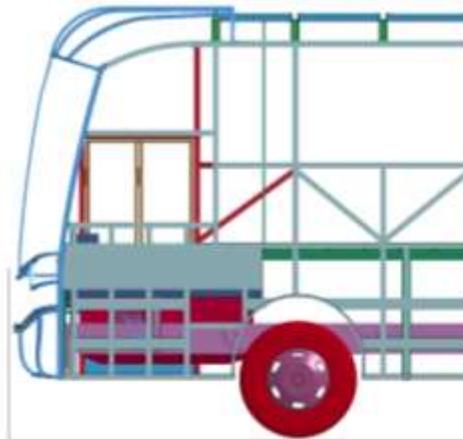


Figura 27 Detalle de “Rigid Wall” creado para la prueba

4.2 Pre Procesamiento

Como se analizó en el capítulo dos, el pre procesamiento es la etapa del estudio donde se deben introducir todos los datos del ensayo en el software, se divide en varias etapas que se van analizando a continuación. De la correcta programación de esta etapa depende el éxito del estudio.

4.2.1 Unidades en LS Dyna

Los programas de simulación por el método de los elementos finitos, son adimensionales, es decir no manejan unidades. Las relaciones internas que se han programado, permiten hacer una combinación de unidades de distintas maneras, las cuales deben ser conocidas por el programador para evitar errores de ingreso de datos en el pre procesamiento y de lectura de resultados en el pos procesamiento.

El presente estudio se realiza con la configuración mostrada en la tabla 6

Tabla 6

Unidades utilizadas por LS Dyna

Magnitud	Unidad
Masa	Ton
Longitud	mm
Tiempo	s
Fuerza	N
Energía	N-mm
Carga	MPa
Módulo de Young	MPa
Velocidad	mm/s
Gravedad	mm/s ²

Fuente: (LS Dyna. 2017)

4.2.2 Preparación del Modelo

Ocasionalmente debido a procedimientos indebidos dentro del proceso CAD o en el momento de exportar archivos al software CAE, suelen obtenerse ciertos errores en la topología del dibujo y entre superficies adyacentes, estos pueden ser:

- Entrecruzamientos
- Separaciones
- Líneas de partición
- Superficies duplicadas
- Superficies perdidas

Todos estos conflictos en la topología CAD suele generar numerosos errores durante el proceso de mallado, generando muchos elementos con formas irregulares que generan un gasto computacional muy elevado además de resultados pobres de baja precisión. Limpiar y simplificar las superficies nos darán una calidad óptima de malla, dando a este ensayo mayor rigurosidad.

(Manual Hyper Works, 2015)

Tener errores en la topología por lo general genera elementos de muy mala calidad, triángulos muy agudos o cuadriláteros de formas poco aceptables. Existe índices que ayudan a comprobar la calidad de los elementos en un estudio de este tipo, los principales son, Jacobianos y Warpaje, que se analizan más adelante.

4.2.3 Componentes

En modelos de alta complejidad como el actual, se debe trabajar agrupando los componentes en conjuntos según la parte macro que conformen. Por ejemplo a todos los elementos que conforman el piso del bus se los agrupa en un solo conjunto denominado “piso”, y de manera similar se debe trabajar con el techo, frontal, posterior, chasis, laterales y partes especiales.

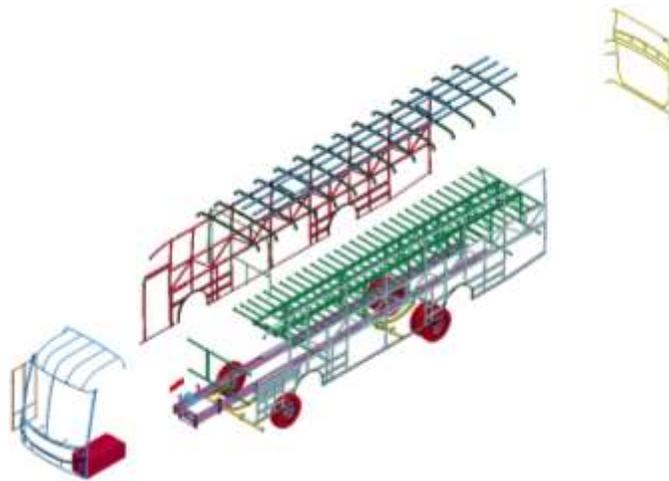


Figura 28 Componentes del modelo CAD

Las ventajas de trabajar agrupando los componentes del modelo es para poder dar un mejor pre procesamiento asignando materiales, y espesores de manera directa a los componentes que tienen relación, además que se puede verificar los errores de la geometría de manera individual, analizando previamente varias estructuras sencillas de bajo gasto computacional en lugar de tener que evaluar todo el modelo.

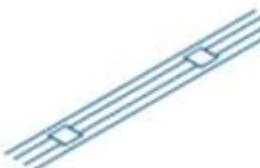
Se enlistan a continuación los componentes en los cuales se ha separado el modelo, para su desarrollo.

Tabla 7**Componentes del modelo**

Núm.	Componente	Modelo
1.	Neumáticos	
2.	Gradas, piso frontal	
4.	Posterior	
6.	Motor	
7.	Cubierta del motor	
8.	Techo	
9.	Ejes	
10.	Puerta	

Continúa



11.	Lateral derecho	
12.	Lateral izquierdo	
13.	Piso y soportes de chasis	
14.	Ballestas	
15.	Chasis	
16.	Aros	
51.	Pared rígida	
55.	Frontal	
60.	Refuerzo techo	

4.2.4 Contacto entre Elementos

Una operación muy importante que se lleva a cabo durante la etapa del pre procesamiento es la designación de geometrías en contacto. Para evitar gasto computacional en análisis de estructuras complejas, se evita la designación de juntas soldadas, y se aplica simplemente la herramienta compartir topología, que le indica al programa CAE que existe una junta entre los elementos en selección. El contacto debe estar bien hecho para que posteriormente en el mallado no exista desuniones o desfases lo que produciría una falla en la simulación final, ya que existirían elementos que se desprendan de manera brusca del modelo.

4.2.5 Mallado

El mallado consiste en generar un modelo matemático del problema, en base a toda la información que se ha ingresado al software, para la simulación. Un software de elementos finitos únicamente utiliza la malla que se ha generado del problema, quedando la geometría CAD únicamente como referencia.

En lo posible no se deben utilizar triángulos debido a que su forma geométrica induce mayor rigidez a la malla, mientras que un cuadrilátero mantiene el grado de deformabilidad estructural deseado para este caso.

El modelo CAD que se ha preparado para el presente estudio, no tiene asignado ningún espesor, este se asigna en el momento del mallado, indicando al programa que las superficies modeladas corresponden a una capa intermedia a la cual hay que asignar espesor por ambos lados. Es decir en los elementos que asigna un espesor de dos milímetros, se asigna un milímetro para cada lado de la superficie.



Figura 29 Asignando espesor a superficie intermedia

Fuente: (LS Dyna. 2016)

Para el presente estudio se utiliza en la mayoría elementos tipo *Shell* o cascarón bidimensionales, sin embargo para tratar de optimizar el gasto computacional se han hecho uso de otros tipos de elementos como se especifica a continuación.

Elementos especiales. Se han utilizado elementos de sujeción tipo *spider*, para la unir el motor y el chasis, estos elementos proporcionan una sujeción firme, con una carga computacional muy baja. La unión se realiza entre varios nodos de cada una de las estructuras, eliminando concentración de esfuerzos en el material. En realidad estos elementos constituyen varios elementos unidimensionales tipo *Beam*, con un nodo en común que sirve como aglutinante.

Elementos tridimensionales, se utilizan en el motor, para poder denotar la alta concentración de masa del mismo. Se asignan características y propiedades de acuerdo a las especificaciones del fabricante que se han incluido en la sección de anexos.

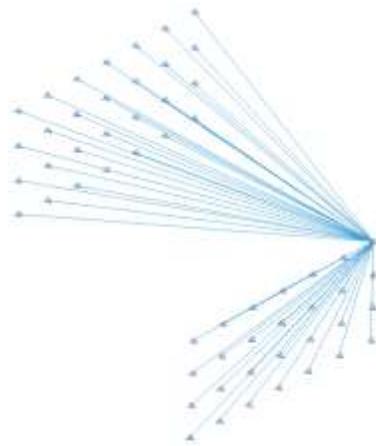


Figura 30 Elemento tipo *spider*

Elementos bidimensionales, son todos los elementos estructurales del bus, lo único que cambia en todos ellos son las dimensiones y el espesor. Existen diferentes tipos de configuraciones de procesamiento para elementos tipo *Shell*, con una configuración tipo Belytshko Tsay, que es el tipo de elementos recomendado por LS Dyna para análisis de dinámica explícita.

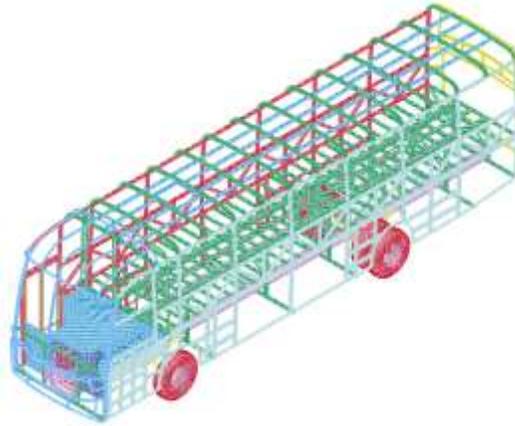


Figura 31 Mallado del modelo

4.2.6 Análisis de Calidad de Malla

Existen varios factores que muestran la calidad de la malla de un modelo. Estos se definen mediante parámetros geométricos propios de cada uno de los elementos, por lo general si uno de estos parámetros ha fallado en un elemento, también fallaran todos los demás, por el contrario si un parámetro se encuentra bien calificado, estarán en la misma condición todos los demás, por este motivo no hace falta analizar a todos los parámetros sino solamente los principales.

Warpage

Es la medida del ángulo formado entre los dos planos que se obtiene al dividir un cuadrilátero por una sus diagonales, el proceso se repite nuevamente para la segunda diagonal y se hace una comparación entre ambas para verificar cual es la peor medida, esta se muestra al final para cada elemento.

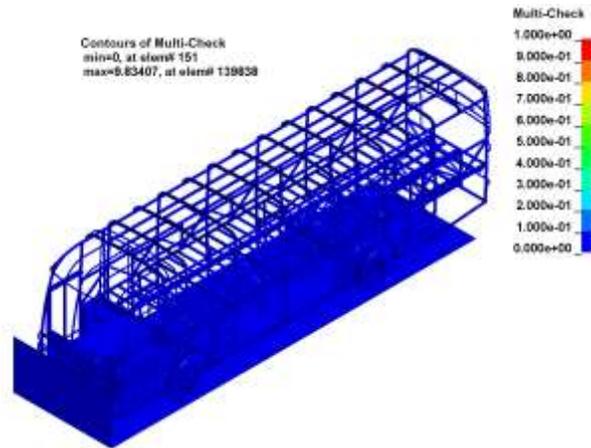


Figura 32 Warpaje de elementos

Jacobiano

Es la medida de la desviación de un elemento dado de su forma original. Por ejemplo para cuadrados se espera que todos sus ángulos sean de noventa grados, mientras que para triángulos, se espera que todos sus ángulos sean de sesenta grados. El jacobiano de un elemento se evalúa con valores entre uno y menos uno, donde uno corresponde a un elemento perfecto.

Se observa en el análisis ejecutado al modelo que no existe ningún elemento fuera del rango permitido por LS Dyna, por tanto se realiza el siguiente análisis.

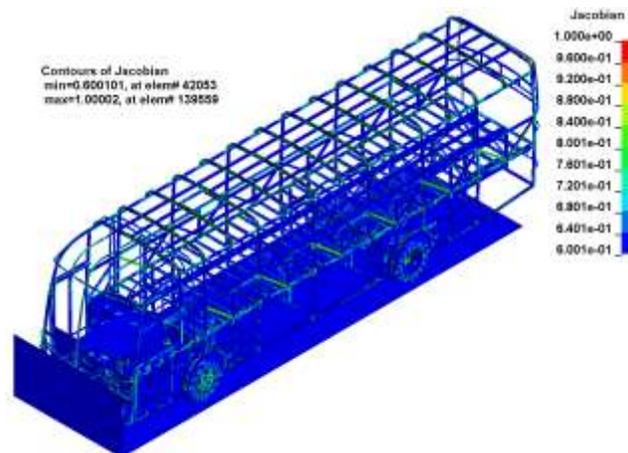


Figura 33 Jacobiano de elementos

Skewness

En elementos triangulares se calcula este valor, obteniendo el ángulo mínimo que se forma entre las líneas que unen a los nodos de cada elemento, con la parte media del lado opuesto. Se reporta la diferencia entre noventa grados, menos el menor ángulo medido.

Para elementos de tipo cuadrilateral, se calcula este valor, obteniendo el ángulo mínimo formado entre las líneas que unen las partes medias de los lados opuestos de cada lado, se reporta la diferencia entre noventa grados, menos el menor ángulo medido.

Tabla 8
Índice de calidad de malla

Índice de calidad	Ideal	Precaución	Inaceptable	Parámetro máximo calculado
Warpage	0	15	30	9.83
Skewness	0	40	70	40
Jacobiano	1	0.6	0.3	0.56

4.2.7 Material

Por lo general todos los programas de elementos finitos, traen librerías pre cargadas de materiales que se pueden utilizar en los análisis, sin embargo, se tiene también la opción de incluir características propias del material constructivo real de la carrocería en análisis.

En el presente caso se trabaja con perfil estructural de acero grado A, según la NTE INEN 2415. Para obtener las características mecánicas de este material y aprovechar esta ventaja del software, se sometió a pruebas de tracción a cinco probetas de este material en el laboratorio de análisis de materiales del Centro de Fomento Productivo Carrocero Metal Mecánico de la ciudad de Ambato, obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 9**Resultados de caracterización de material.**

Probeta	Límite elástico (MPa)	Límite último (MPa)	Módulo de Young (GPa)
1	342.27	374.69	308,1
2	340.53	366.64	257,8
3	337.14	374.30	298,6
4	356.27	377.77	270,4
5	360.96	397.65	285,1
Media	347.433	378.21	284,0
Acero Grado A	270	310	n/d

En base a los datos obtenidos de la caracterización del material, se obtiene el diagrama esfuerzo deformación real de la probeta. Para esto se elabora un programa en Excell que permite recalcular los datos obtenidos mediante el centro de pruebas. Para esto se emplean las siguientes ecuaciones obtenidas de la publicación de *F. Hosford. Mechanical Behavior of Materials*

$$\sigma_{real} = s(1 + e)$$

$$\epsilon_{real} = \ln(1 + e)$$

Donde σ_{real} y ϵ_{real} corresponden al esfuerzo y deformación real del material, s corresponde al esfuerzo ingenieril y e al desplazamiento calculado en relación a la variación de longitud sobre la longitud real. Estas ecuaciones son aplicables por debajo del encuellamiento de la probeta; a partir de aquí se calcula el resto de la curva mediante la relación simple $\sigma = F/A$ obteniéndose el área, a partir del volumen de la longitud calibrada de la probeta y el porcentaje de estiramiento.

Se emplea el modelo de material *Picewise linear plasticity*, propio de *LS Dyna*, que permite el ingreso de la curva esfuerzo deformación del material y todas sus propiedades como módulo de Young, coeficiente de Poisson, límite de esfuerzo elástico y esfuerzo de rotura. Solamente se debe ingresar el modelo plástico del material, ya que el modelo elástico queda cubierto con el módulo de Young y el límite elástico.

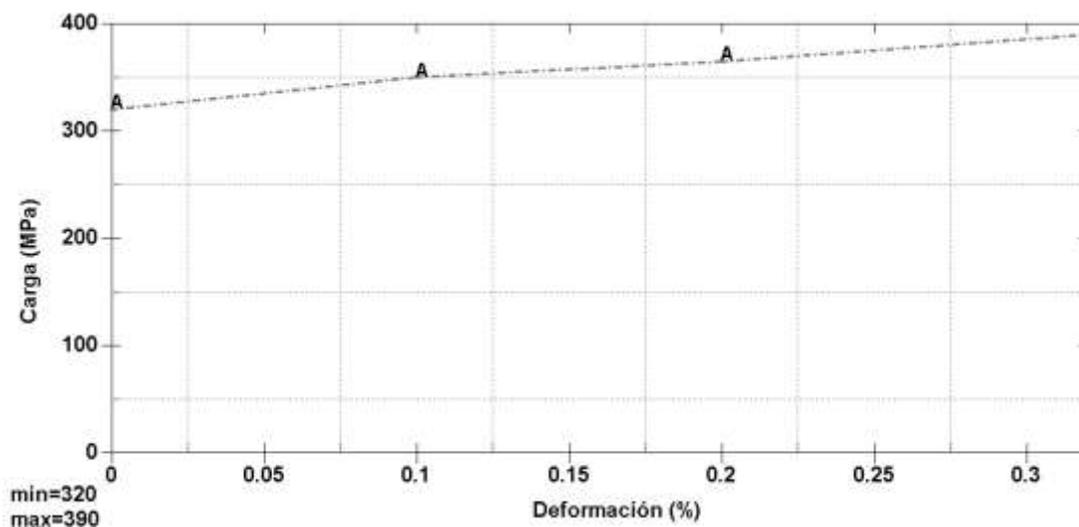


Figura 34 Diagrama esfuerzo deformación ingresado en LS Dyna

4.2.8 Condiciones de Borde

Se deben indicar los nodos que permanecerán fijos y los que tendrán movimiento durante el estudio, es decir es aquí donde se le da la característica de barrera rígida a la estructura que impactará el bus, y también donde se asigna la velocidad de viaje a la estructura.

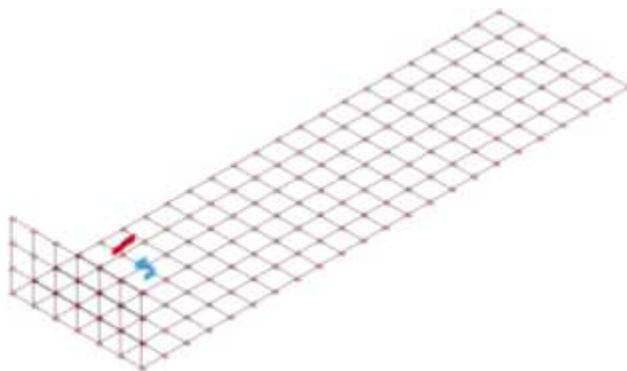


Figura 35 Restricciones de Rigid Wall

Se asigna una velocidad de desplazamiento lineal de 15000 mm/s que equivale a 54 Km/h, en la dirección del eje z positivo, cumpliendo lo establecido por la normativa UNECE 33, a todos los nodos de la estructura del bus.

4.2.9 Tiempo de Ensayo

Se observa en otros estudios de impacto similares que los tiempos promedio de programación están entre 100 ms y 150 ms, siendo los primeros 70ms los más críticos del estudio cuando se dan los picos de liberación de energía disipada.

Se programa el tiempo de duración del ensayo en 150 ms, que servirán para evaluar todo el impacto. No se debe sobrepasar estos tiempos ya que el computador va a perder tiempo de cálculo sin obtener ningún resultado relevante.

4.2.10 Control de Energía

Finalmente se debe programar el control de energía del modelo, estas opciones permitirán calcular las energías internas de cada elemento y la energía de Hourglass. Esta última corresponde a un valor netamente teórico que permite evaluar la calidad del estudio.

En mallas que resultan demasiado gruesas para el elemento en estudio, la energía de *Hourglass* se propagará a través de todos los nodos causando una falla crítica del estudio. La energía de *Hourglass* debe ser menor al 5% de la energía interna para dar el estudio como válido. LS Dyna provee una tarjeta que permite programar el control de energía *Hourglass* disminuyendo sus efectos nocivos para la malla.

4.3 Procesamiento

Una vez finalizada la etapa CAD y establecidos todos los parámetros del pre procesamiento, finalmente se ejecuta el análisis. Para el procesamiento se ha utilizado un equipo tipo *Work Station Dell Precision™ T5600* con 128 Gb de memoria RAM, a continuación se detalla el resumen del análisis.

Tabla 10**Resumen del estudio**

Parámetro	Valor
Modelo de material	Piece Wise Linear Plasticity
Módulo de Young	284 GPa
Velocidad de impacto	15000 mm/s
Gravedad	9800 mm/s ²
Condiciones de apoyos	Solamente en el <i>rigid wall</i>
Número de nodos	139126
Número de elementos	139826
Time step	1 ms
Tiempo de ensayo	150 ms
Tiempo de procesamiento	3h 52min

4.4 Pos Procesamiento

En esta etapa final del ensayo, se hace un análisis de los resultados calculados por el programa. Gracias al pos procesador de un software de elementos finitos, se puede visualizar de manera gráfica los esfuerzos, desplazamientos y reacciones de cada elemento frente a las sollicitaciones mecánicas que se han programado.

4.4.1 Simulación de impacto.

Uno de los principales objetos del análisis es verificar de manera visual el resultado de la simulación. A continuación se presenta gráficamente los resultados obtenidos con un *time step* de 20 ms.

Se observan deformaciones a lo largo de toda la estructura, pero en especial en la parte frontal. Se observa un gran desplazamiento de los elementos frontales, siendo el chasis el último elemento de soporte. Se observa como este último es el que resiste la mayoría del impacto, llegándose a deformar tanto que el motor es desplazado.

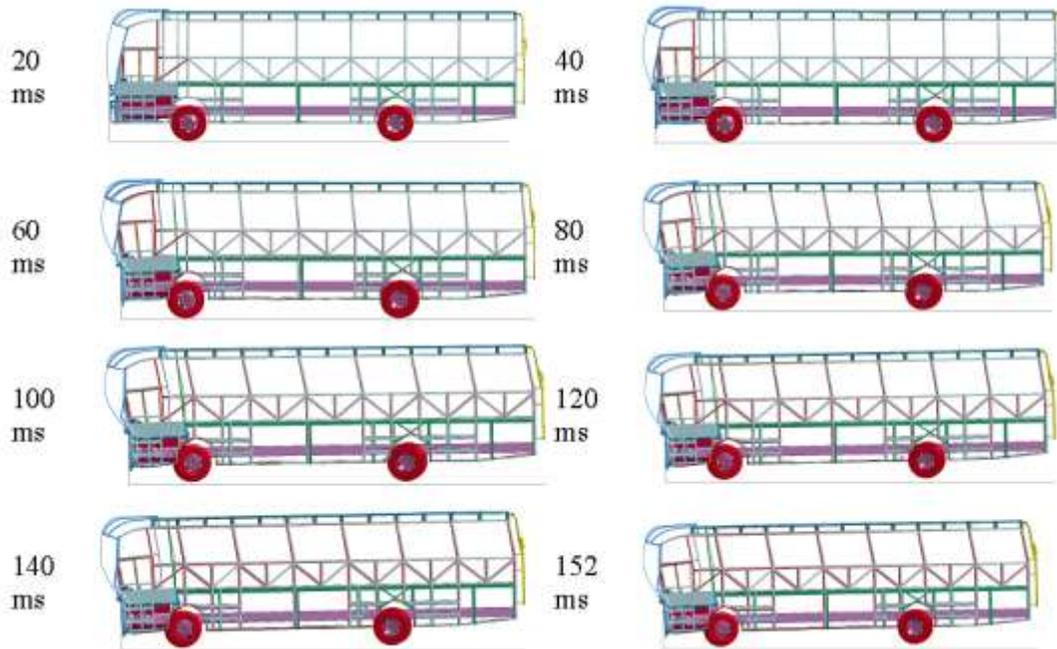


Figura 36 Simulación de impacto

4.4.2 Esfuerzo de Von Mises

El esfuerzo de Von Mises se obtiene mediante un análisis triaxial de las cargas aplicadas sobre un elemento. Corresponde a una teoría de falla la cual predice si el elemento será o no capaz de soportar una carga de diseño, en este caso se lo utiliza para determinar el esfuerzo total existente sobre cada miembro estructural, durante y después de la prueba de impacto.

Se observa que la mayoría de los elementos en la cabina del bus llegan a esfuerzos críticos, superando el límite máximo de rotura impuesto para el estudio. Estos esfuerzos se empiezan a generar desde que la parte frontal entra en contacto con la barrera rígida, se vuelven máximos propagándose por toda la carrocería del bus al instante $t = 40$ ms que es cuando se produce el mayor intercambio de energías de cinética en deformación.

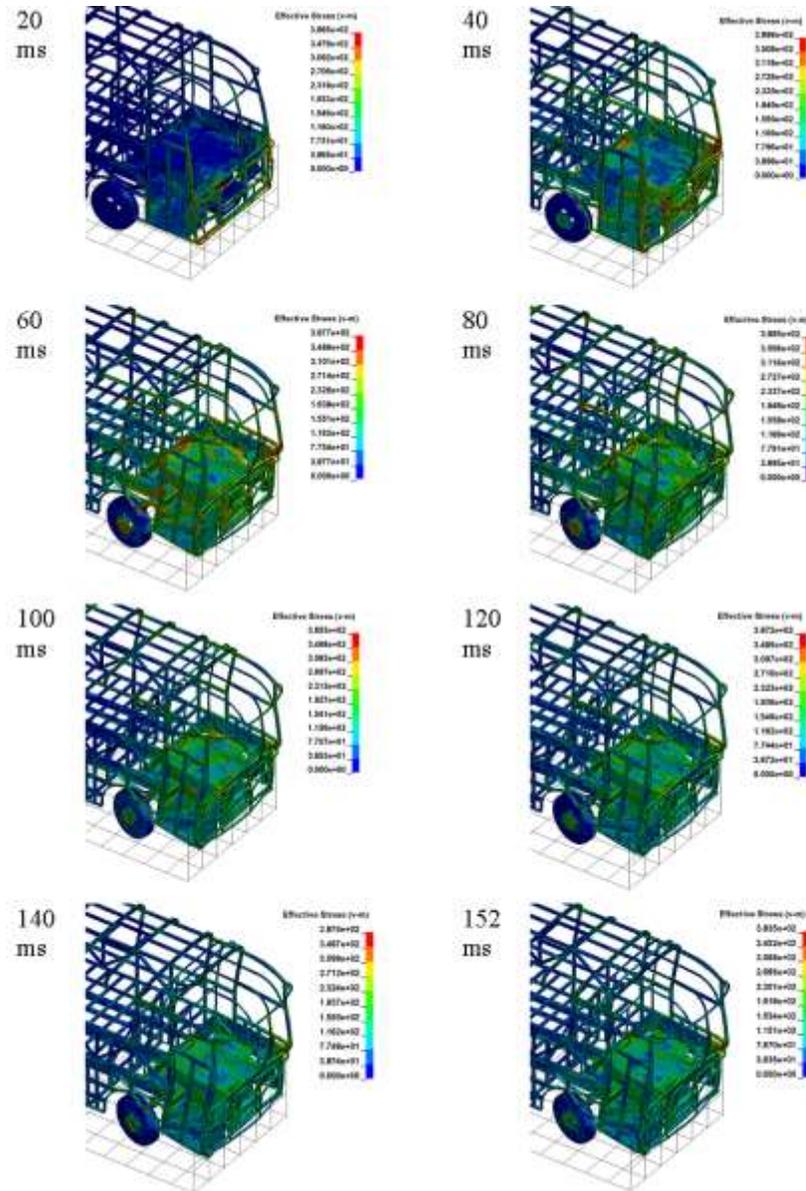


Figura 37 Diagrama de esfuerzos Von Mises en el frente del bus

Se hace también un análisis de los esfuerzos de Von Mises en el chasis, observándose que este elemento del bus es vital en la absorción de la energía del impacto. Después de que toda la parte frontal de la carrocería colapsa, es el chasis, el principal elemento de soporte de las cargas de impacto, deformándose paulatinamente y liberando parte de la energía cinética durante el impacto.

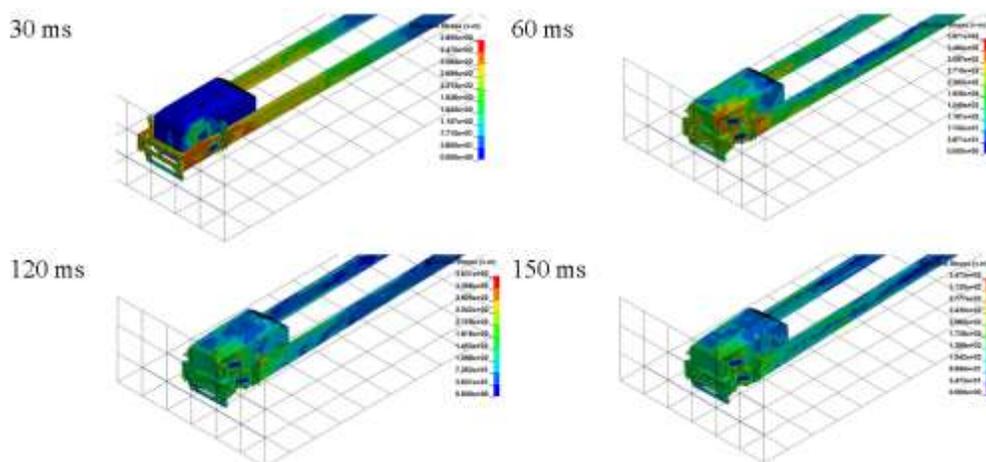


Figura 38 Diagrama de esfuerzos Von Mises en el chasis

4.4.3 Desplazamientos

Tomando como referencia la parte posterior del autobús, se calcula un desplazamiento total de 720 mm, de los cuales 410 mm corresponden a la deformación fuera de la cabina del bus y los 310 mm restantes corresponden a una intrusión en la zona de seguridad reservada de la parte delantera.

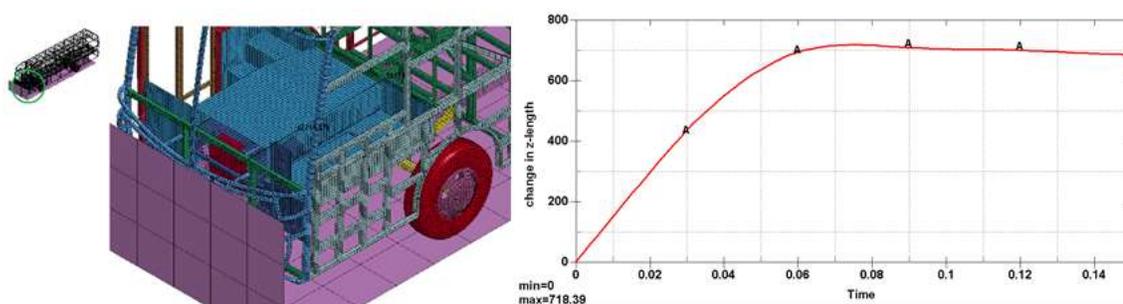


Figura 39 Diagrama de desplazamiento total a los 150 ms

Una invasión de 310 mm al área de seguridad de la cabina se considera muy peligrosa, probablemente sería mortal o podría causar discapacidad permanente a los ocupantes de esta sección del autobús.

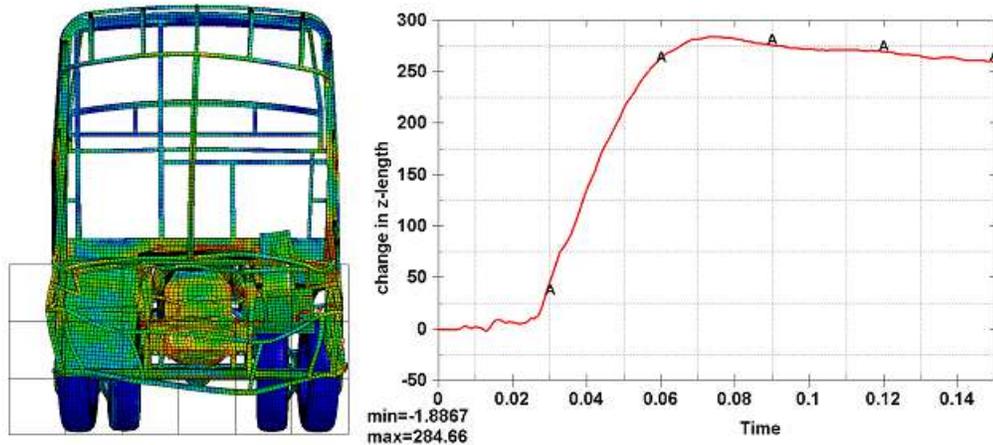


Figura 40 Diagrama de desplazamiento para nodo frontal

4.4.4 Balance de Energía

Toda la energía cinética del bus al momento del impacto debe ser disipada por la estructura en forma de deformación de sus elementos constitutivos. Se observa que, mientras la energía total permanece constante, la energía cinética decae totalmente a los 40 ms. Por el contrario mientras esta va en descenso, la energía interna del sistema aumenta súbitamente, formando un entrecruzamiento que denota como ocurre la transformación de energía.

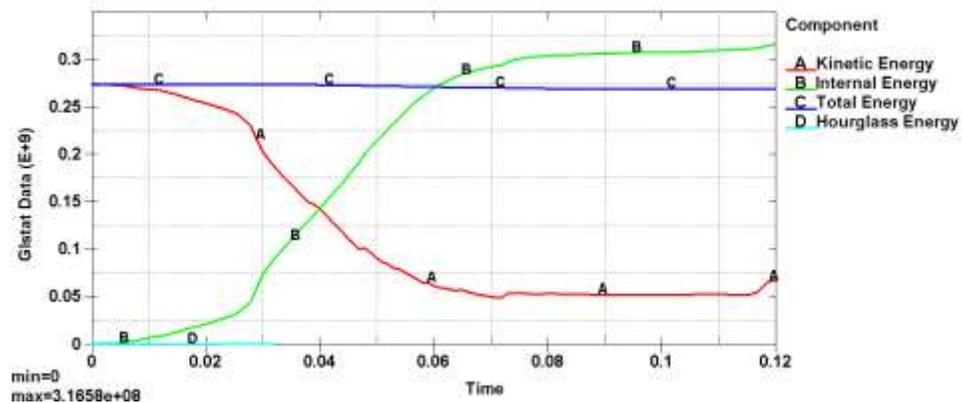


Figura 41 Balance de energía

La energía interna de los elementos estructurales llega a ser de 308 KJ, a los 100 ms, sin embargo se observa que queda un remanente de 75 KJ de energía cinética debido a que los elementos de la carrocería no han sido dispuestos adecuadamente para disipar las cargas generadas por un impacto frontal.

4.5 Validación del Estudio

La mejor manera de validar un ensayo computacional, siempre será comparándolo con un experimento físico de iguales características, llevado a cabo en condiciones exactamente iguales a las programadas dentro del software. Sin embargo, si esta fuese la única manera de validar un análisis computacional, ciertamente volvería a este desarrollo algo carente de sentido, inaplicable y altamente costoso.

Por ejemplo para el caso del impacto frontal de un autobús, tendríamos que repetir este experimento en la realidad, esto traería consigo una gran inversión económica, además, a nivel sudamericano, no existe ningún laboratorio certificado para pruebas de impacto vehiculares.

En solución a este problema se han desarrollado métodos de verificación y validación de resultados para análisis computacionales. En el presente estudio se ha desarrollado dos verificaciones que se detallan a continuación.

4.5.1 Validación Mediante el Método de Energía de Hourglass

La energía de Hourglass constituye una falsa deformación de un elemento que anula las cargas aplicadas sobre él. Esta distorsión produce una energía de deformación igual a cero, que puede propagarse rápidamente en mallas con elementos demasiado grandes a manera de una cristalización. Por lo general los softwares de análisis por el método de los elementos finitos, tienen controles internos que anulan esta condición, mediante algoritmos matemáticos.



Figura 42 Falsa deformación de un elemento

Para validar el estudio por este método, se debe evaluar la energía Hourglass positiva que se desarrolla en torno a los elementos del modelo. Para validar el estudio, la energía de Hourglass debe permanecer por debajo del 5 % con relación a la energía total.

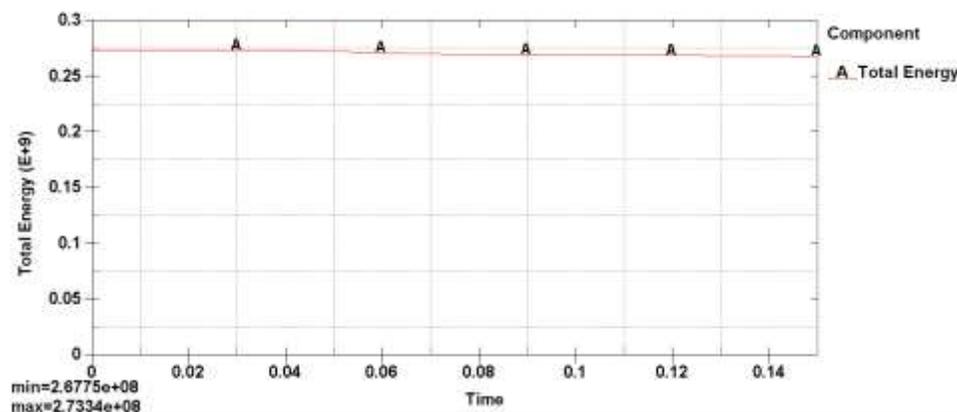


Figura 43 Energía total del sistema

Como se observa en las figuras 44 y 45, la energía total del sistema tiene un valor promedio de 270 KJ mientras la energía de Hourglass tiene un valor pico en el instante $t = 28$ ms, con un valor de 1 KJ. Mediante una relación simple se determina el porcentaje de la energía de Hourglass del estudio, que llega a ser del 0.3916%, valor menor al 5% máximo indicado.

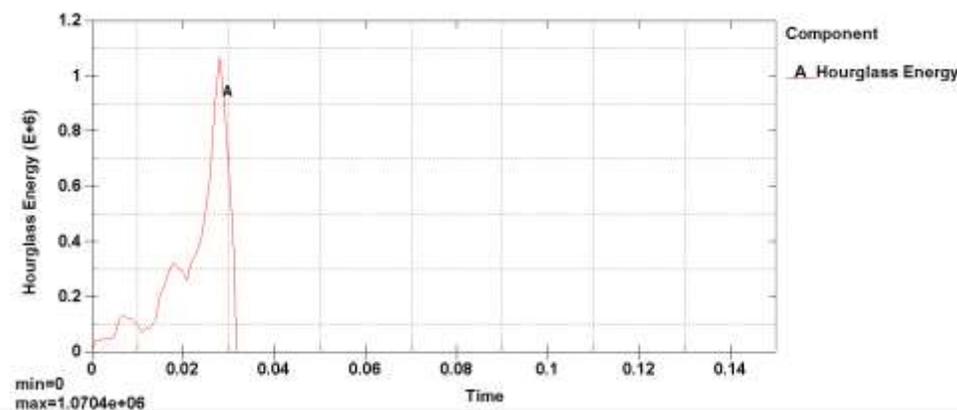


Figura 44 Energía de Hourglass del sistema

Mediante este método se puede certificar que el estudio tiene validez y un alto grado de confianza, pues el error calculado llega a un valor máximo de 0.3916 inferior al 1% en el instante $t=30$ ms. este instante por tanto resulta crítico para el estudio, debido a la transferencia de energía entre todos los miembros estructurales.

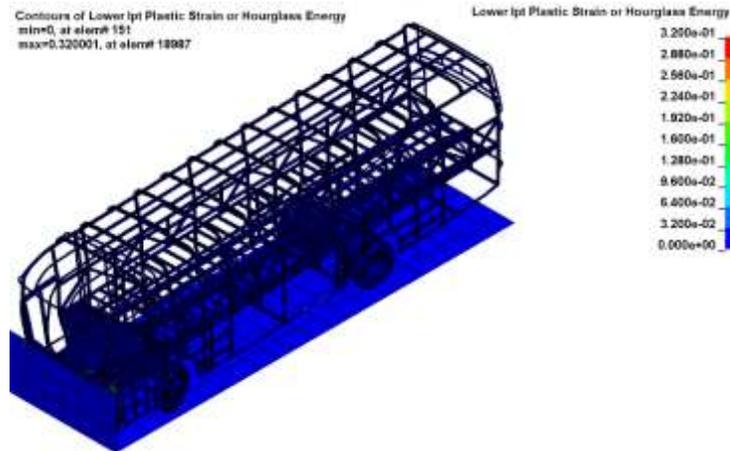


Figura 45 Energía de Hourglass

4.5.2 Validación Mediante un Ensayo Físico

Consiste en desarrollar un experimento sencillo, bajo condiciones controladas que se pueda repetir de manera exacta dentro del entorno computacional. Por ejemplo se puede elegir cualquier tipo de ensayo mecánico de caracterización de materiales, como el ensayo de tracción. En el presente trabajo se le ha dado a este ensayo una doble utilidad sirviendo también para caracterizar el material.

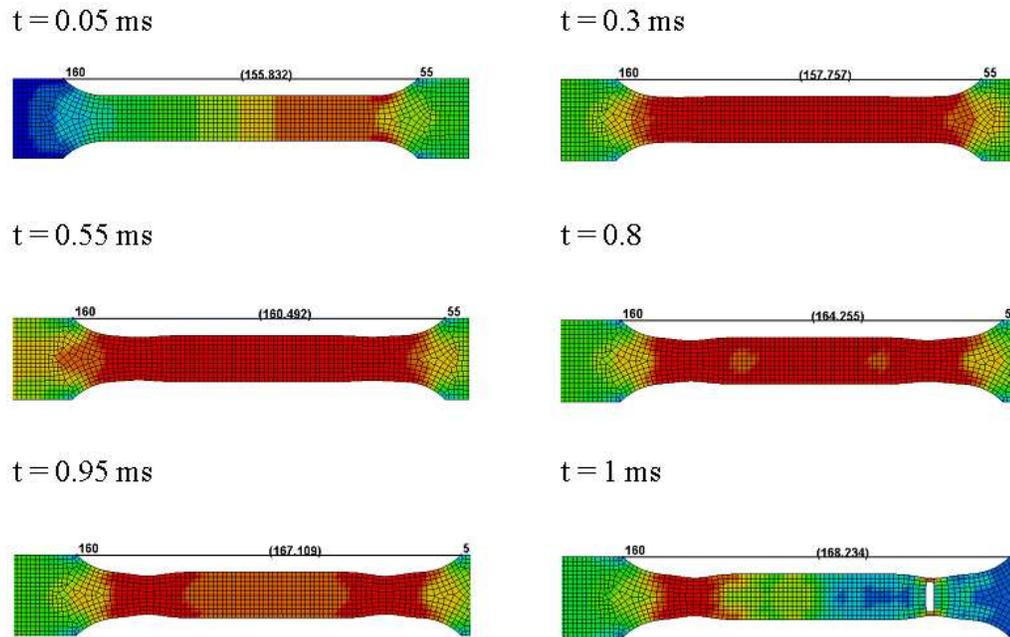


Figura 46 Ensayo de tracción computacional.

Las condiciones físicas de desarrollo del ensayo de tracción real, deben ser programadas dentro del software, debiéndose obtener convergencia entre los resultados obtenidos de la prueba real y la prueba virtual.

Tabla 11

Resumen de ensayo de validación

Parámetro	Valor
Longitud calibrada inicial	155.707 mm
Longitud calibrada final	168.359 mm
Modelo de material	Piece Wise Linear Plasticity
Módulo de Young	284 GPa
Condiciones de carga	15116 N, entre 684 nodos
Condiciones de apoyos	70 mm a cada extremo
Número de nodos	3509
Número de elementos	3275
Time step	0.005 ms
Tiempo de ensayo	2 ms
Energía total del sistema	192 J
Energía de Hourglass	0.356 J

Se hace una comparación entre la longitud de la probeta real y la probeta computacional después del ensayo, obteniéndose una longitud del área calibrada de 175 mm y 168.234 mm respectivamente. En base a estos resultados se puede determinar el rango de error del estudio, estableciéndose en 3.87%.

**Figura 47** Probeta de pruebas

4.6 Propuesta de Modificación a la Norma NTE INEN 1323:2009

En observación a lo expuesto en el presente estudio, se propone la modificación de la norma NTE INEN 1323, para adjuntar a su lista de requerimientos de aprobación de una carrocería de bus, un ensayo de impacto frontal, con la finalidad de salvaguardar la vida del chofer y los ocupantes de la cabina de mando y en cumplimiento de lo expuesto en la misma ley.

Se observa que se hace referencia al espacio de supervivencia no solo de manera transversal sino también de manera longitudinal, abarcando el área entera dentro del bus, incluyendo a los pasajeros y a los ocupantes de la cabina de mando. Según la norma, se establece que el espacio de supervivencia por delante del respaldo del asiento del conductor debe estar a una distancia de 600 mm.

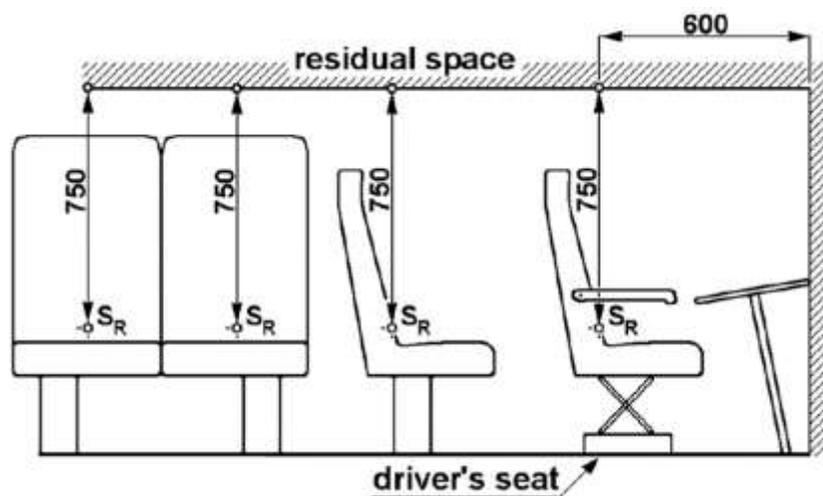


Figura 48 Espacio de seguridad para el asiento del conductor.

Fuente: (UNECE Reg. 66)

A pesar del claro indicativo de este gráfico, no existe dentro de la normativa ningún lineamiento que ayude a establecer el cumplimiento de este requisito. Por tanto se hace la presente propuesta de modificación. En la cual se debería detallar lo siguiente:

- Se debe someter a la estructura del bus a un ensayo de impacto frontal para verificar la resistencia de la estructura, conservando el área de supervivencia sin ninguna invasión de miembros estructurales.
- El ensayo debe realizarse incluyendo un modelo del chasis y el motor, iguales en masa y dimensiones a los componentes reales.
- Se debe impactar de manera frontal al bus contra una barrera de construcción rígida que debe tener una dimensión mínima de 1.5 metros de alto y 3 metros de largo.
- El vector velocidad y desplazamiento del bus deben ser perpendiculares al plano formado por la barrera de impacto, la velocidad de desplazamiento del bus deberá ser como mínimo 14 m/s.
- No se deberá obtener deformaciones ni desplazamientos de ningún miembro estructural que invadan el área de seguridad en la cabina a fin de salvaguardar la vida de los ocupantes.
- Se podrá realizar esta prueba mediante una simulación computacional según lo detalla el anexo 9 de la Regulación 66 de las Naciones Unidas.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se ha simulado el impacto frontal de la carrocería de un bus utilizando el paquete computacional LS Dyna, ya que es un software especialmente diseñado para análisis de impacto, y eventos de dinámica explícita no lineal, donde hay grandes deformaciones del material y liberación de energía en instantes muy cortos de tiempo.

Se establecieron parámetros de simulación óptimos para este estudio mediante la revisión documental, por tanto se trabajó con un tamaño de malla de 30 mm para toda la parte estructural, con elementos bidimensionales y un modelo de material *piece wise linear plasticity* que permite ingresar datos reales mediante un proceso de caracterización de materiales, mediante pruebas físicas.

Se validaron los resultados mediante dos métodos de comprobación obteniéndose un error de 0.3916 % mediante el método de la energía de Hourglass y de 3.87 % mediante el método de comparación con un análisis físico conservador. Ambos rangos se enmarcan por debajo del 5% de error aceptable en este tipo de análisis estructurales.

Se ha observado que las estructuras diseñadas por los carroceros del país no cuentan con ningún sistema de protección para salvaguardar la vida de los ocupantes de la cabina ante un impacto frontal. Los elementos estructurales dispuestos en la carrocería son muy débiles y no alcanzan a disipar toda la energía cinética proveniente de la marcha del vehículo.

Se ha propuesto la enmienda a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1323:2009, para incluir un análisis de resistencia ante impactos frontales en los requerimientos que debe aprobar una carrocería para ser homologada por la ANT.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda dar continuación a este estudio realizando una caracterización del material utilizado en las partes frontal y posterior del bus, para posteriormente repetir el análisis y verificar el grado de ayuda que brinda esta estructura.

Diseñar un atenuador de impactos adecuado para ser instalado en los buses que permita absorber una mayor cantidad de energía antes de deformar a los elementos estructurales de la carrocería, ya que actualmente no se dispone de ninguna estructura de seguridad para este tipo de sucesos, solamente se instala una estructura frontal de fibra de vidrio que no sirve como disipador de energía, su alto grado de fragilidad no lo hace conveniente para esta función.

Se recomienda analizar la propuesta realizada de modificación a la norma con otros académicos y personal dedicado a la industria de carrocerías para su implementación y cumplimiento en la NTE INEN 1323, con el objeto de salvaguardar la vida de los ocupantes de la cabina.

BIBLIOGRAFÍA

- Altair University Academic Program. (2015). *Crash Analysis With Radioss*. 1° Ed. Recuperado el 21 de junio de 2016 de, <http://www.altairuniversity.com/free-ebooks-2/>
- Altair University Academic Program. (2015). *Practical Aspects of Finite Element Simulation*. Recuperado el 21 de junio del 2016 de, <http://www.altairuniversity.com/free-ebooks-2/>
- Ambati, T., Srikanth, K. & Veeraraju, P. (2012). *Simulation of Vehicular Frontal Crash Test*. Recuperado el 22 de junio del 2016 de, http://www.idc-online.com/technical_references
- ANT. (2017). *Listado de Empresas Fabricantes de Carrocerías Autorizadas por ANT*. Recuperado el 1 de agosto del 2017 de, <http://www.ant.gob.ec/index.php/descargable/file/1885-listado-de-empresas-fabricantes-de-carrocerias-autorizadas-por-ant-04-11-2013>
- Budinas, G. & Nisbett, K. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. 8 Ed. México D.F - México: Mc Graw Hill.
- CANFAC (2014), *Informe Diagnostico del Sector Carrocero*. Recuperado el 22 de febrero de 2017 de: <http://canfacecuador.com/Informe-Final-Diagnostico-Sector-Carrocero.pdf>.
- Chapra, C. (2006). *Métodos Numéricos para Ingenieros*. 5° Ed. México D.F - México: Mc Graw Hill.
- Gesiecke, E. (2006). *Dibujo y Comunicación Gráfica*. 3 Ed. Mexico D.F - México: Pearson Education.
- Gokhale, S. (2008). *Practical Finite Element Analysis*. Pune - India: Finite to Infinite.
- Korta, J. (2013). *Multi-Material Design Optimization of a Bus Body Structure*. Recuperado el 20 de marzo del 2017 de, https://www.researchgate.net/figure/276709883_fig4_Fig-4-final-design-modifications

- Liu, Y. (2006). *Crashworthiness Analysis of Finite Element Truck Chassis Model Using LS Dyna*. Recuperado el 21 de febrero del 2017 de, <http://www.dynalook.com/international-conf-2010/Automotive-3-3.pdf>
- Livermore Software Technology Corporation, (2017). *LS-DYNA Keyword User's Manual*. Recuperado el 21 de febrero de 2017 de: <http://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna-manual-r10.0-vol-i>
- Livermore Software Technology Corporation, (2006). *LS-DYNA Theoretical Manual*. Recuperado el 21 de febrero de 2017 de: http://www.lstc.com/pdf/ls-dyna_theory_manual_2006.pdf
- Luque, P. & Álvarez, D. (2007). *Investigación de Accidentes de Tráfico. Manual de Reconstrucción*. Coruña - España: Netbiblo.
- Manjarrez, F. & Santillán, E. (2016). *Análisis Estructural a Cargas de Impacto Frontal de un Bus Tipo Interprovincial Mediante el Método de los Elementos Finitos*. Recuperado el 13 de marzo del 2017 de, <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16531/1/CD-7196.pdf>
- Narayana, K. (2006). *Machine Drawing*. 3 Ed. Nueva Dheli - India: New Age Internatinal Publisher.
- Rao, S. (2006). *Vibraciones*. 5° Ed. México D.F: Pearson Education.
- INEN. (2009). *NTE 1323: Vehículos Automotores. Carrocerías de Buses. Requisitos*. Recuperado el 5 de julio de 2016 de, http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/05/nte_inen-en_1323.pdf
- INEN. (2009). *NTE 0109: Ensayo de Tracción para Materiales Metálicos a Temperatura Ambiente*. Recuperado el 5 de julio de 2016 de, http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/05/nte_inen-en_0109.pdf
- INEN. (2012). *NTE 2656: Clasificación vehicular*. Recuperado el 5 de julio de 2016 de, http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/05/nte_inen-en_2656.pdf
- INEN. (2016). *NTE 2415: Tubos de Acero al Carbono Soldados para Aplicaciones Estructurales y Usos Generales. Requisitos*. Recuperado el 5 de julio de 2016 de,

http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/05/nte_inen-en_2415.pdf

UNECE. (2012). *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*. Recuperado el 2 de junio del 2016 de, <https://www.unece.org/trans/welcome.html>

UNECE. (2006). *Regulation No. 66: Uniform Technical Prescriptions Concerning the Approval of Large Passenger Vehicles with Regard to the Strength of their Superstructure*. Recuperado el 2 de junio del 2016 de, <https://www.unece.org/trans/welcome.html>

Heimbs, S. et al. (2009) *Crash Simulation of an F1 Racing Car Front Impact Structure*. Recuperado el 4 de abril del 2017 de, <https://www.dynamore.de/en/downloads/papers/09-conference/papers/B-I-02.pdf/view>

Shen, R. & Lei G. (2012). *Introduction to the Explicit Finite Element Method for Nonlinear Transient Dynamics*. Hoboken NJ – Estados Unidos: John Wiley & Sons.

Szuladzinski, G. (2010). *Formulas for Mechanical and Structural Shock and Impact*. Boca Raton, FL – Estados Unidos: CRC

World Health Organization. (2015). *Global Status Report on Road Safety*. Recuperado el 21 de febrero del 2017 de, http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/en/