



Análisis de lesiones en el conductor para impactos frontales por simulación computacional

Driver injury analysis for frontal impacts by computational simulation

Análise de lesões de motorista para impactos frontais por simulação computacional

Carlos Iván Paucar-Tubon ^I

cpaucar605@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2684-8371>

Edwin Rodolfo Pozo-Safla ^{II}

edwin.pozo@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8931-3577>

Socrates Miguel Aquino-Arroba ^{III}

socrates.aquino@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-6393-9408>

Correspondencia: cpaucar605@gmail.com

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 23 de noviembre de 2022 * **Aceptado:** 12 de diciembre de 2022 * **Publicado:** 14 de enero de 2022

- I. Ingeniero Automotriz, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- II. Magíster en Diseño, Producción y automatización industrial, Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Grupo de Investigación GIEBI, Chimborazo, Ecuador.
- III. Magíster en Diseño, Producción y automatización industrial, Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica, Grupo de Investigación GIEBI, Chimborazo, Ecuador.

Resumen

Se realizó el estudio y análisis de las lesiones producidas en el conductor en impactos frontales según el reglamento N°94 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas, utilizando un modelo virtual de autobús interprovincial generado en un software CAD y un maniquí especializado en la recolección de datos de las lesiones críticas producidas durante la simulación en el software LS-DYNA. Para establecer la malla que conforman los elementos estructurales del autobús, barrera rígida y maniquí se utilizaron elementos tipo SHELL y SOLID en dos dimensiones, el cual permite alcanzar una malla analógica, recomendada por el desarrollador del software para un mallado aceptable. Los resultados adquiridos permitieron conocer que la estructura del autobús en la simulación a velocidad de 25 km/h se deforma en la sección frontal 9.9 cm; por lo que el conductor no sufre lesiones graves cumpliendo la norma internacional, en cambio los ensayos sometidos a velocidad de 50 km/h el modelo se deforma en la sección frontal 52.3 cm por lo que los índices de seguridad de lesiones en los conductores no son aceptables. Se recomienda que los autobuses se fabriquen con la sección del conductor reforzada, que se implemente nuevas tecnologías de seguridad activa y pasiva para ayudar en la protección al conductor.

Palabras Clave: Tecnología y ciencias de la ingeniería; impacto automovilístico; simulación de impacto frontal; diseño asistido por ordenador (CAD); ingeniería asistida por ordenador (CAE).

Abstract

The research and analysis of the injuries produced in the driver in frontal impacts according to the regulation N°94 of the Economic Commission for Europe of the United Nations was carried out using a virtual model of an interprovincial bus generated in a CAD software and a dummy specialized in the collection of data of the critical injuries produced during the simulation in the LS-DYNA software. To establish the mesh that conforms the structural elements of the bus, rigid barrier and dummy, SHELL and SOLID type elements were used in two dimensions, which allows to achieve an analog mesh, recommended by the software developer for an acceptable meshing. The acquired results allowed to know that the structure of the bus in the simulation at a speed of 25 km/h was deformed in the frontal section 9.9 cm; so the driver does not suffer serious injuries complying with the international standard, on the other hand the tests submitted at a speed of 50 km/h the model was deformed in the frontal section 52.3 cm so the safety indexes of injuries in the

drivers are not acceptable. It is recommended that buses be manufactured with a reinforced driver's section and that new active and passive safety technologies be implemented to help protect the driver.

Keywords: Technology and engineering sciences; automobile impact; frontal impact simulation; computer aided design (CAD); computer aided engineering (CAE).

Resumo

O estudo e análise das lesões produzidas no motorista em impactos frontais foi realizado de acordo com o regulamento N° 94 da Comissão Econômica para a Europa das Nações Unidas, utilizando um modelo virtual de ônibus interprovincial gerado em um software CAD e um manequim especializada na coleta de dados das lesões críticas produzidas durante a simulação no software LS-DYNA. Para estabelecer a malha que compõe os elementos estruturais do ônibus, barreira rígida e manequim, foram utilizados elementos do tipo SHELL e SOLID em duas dimensões, o que permite chegar a uma malha analógica, recomendada pelo desenvolvedor do software para uma malha aceitável. Os resultados adquiridos permitiram saber que a estrutura do ônibus na simulação a uma velocidade de 25 km/h foi deformada na seção frontal em 9,9 cm; Assim, o condutor não sofre lesões graves, cumprindo a norma internacional. Para lesões aos motoristas não são aceitáveis. Recomenda-se que os ônibus sejam fabricados com seção do motorista reforçada, que sejam implementadas novas tecnologias de segurança ativa e passiva para ajudar a proteger o motorista.

Palavras-chave: Ciências da tecnologia e engenharia; impacto automóvel; simulação de impacto frontal; desenho assistido por computador (CAD); engenharia assistida por computador (CAE).

Introducción

Durante años se han producido múltiples accidentes de tránsito en los que involucra a autobuses de transporte público, en los cuales, los conductores han sido los más afectados ante un impacto frontal. Gracias al desarrollo tecnológico en la industria automotriz se puede llevar a cabo ensayos virtuales con una infinidad de programas computacionales desarrollados para la recreación de movimientos reales en casos de colisiones frontales, laterales, posteriores, superiores e inferiores, estos accidentes se producen en rutas de servicio por diversos factores, estos pueden ser por el exceso de velocidad, falla de frenos, impericias del conductor, exceso de peso permitido etc.,

permitiendo modificar o crear nuevas formas y variaciones en la geometría de la carrocería del autobús que permita brindar seguridad al conductor y los ocupantes, de manera que la estructura a deformarse en una colisión frontal no alcance a producir lesiones graves a los ocupantes expuestos al siniestro, con el desarrollo de la investigación se pretende el uso de softwares computacionales para el diseño y modelado, como LS-DYNA en la utilización del análisis en el comportamiento de la carrocería y conductor en el impacto, enfocándose en el desarrollo del daño que sufre el conductor en partes críticas del cuerpo mediante el impacto frontal.

Materiales

Marco teórico

Estado del arte

Los ordenamientos más cruciales según el Foro Mundial, ayudan a prever el peligro existente en impactos frontales y laterales, sin embargo, solamente 49 países adjudican los ordenamientos de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para una colisión frontal y 47 aplican los ordenamientos para una colisión lateral. Del infortunio producido por siniestros de automotores, Estos son producidos en su mayoría por colisiones frontales con 55%, el otro índice alto que cubre 40% pertenece a colisiones laterales y el índice restante del 5% cubre varios tipos de colisiones. (Santos, 2017 pp. 33)

Los ensayos para evitar lesiones en los ocupantes de autobuses de transporte público interprovincial se realizan basándose en las normativas validas de la Comisión Económica para Europa (CEPE/UNECE), implementando medidas de seguridad con la creación de normas y reglamentos que garanticen la disminución del contacto físico de la estructura deformada de un bus con respecto a los ocupantes cuando estén sujetos a una colisión frontal. La unión europea publicó el reglamento N°94 y N°95 referente a la homologación de los vehículos en casos de impactos frontales para salvaguardar a sus ocupantes, y los aspectos que establecen son; Toda modificación que influya directamente en la estructura, como también al número y tipo de los asientos de los ocupantes, la decoración o el acondicionamiento en su interior, la posición de los controles del vehículo o del conjunto mecánico, y que pudiera intervenir directamente en la capacidad de la parte delantera del automotor para absorber energía deberá ponerse en conocimiento del servicio administrativo que conceda la homologación.

La unión europea de acuerdo al reglamento N°94 y N°95 establece disposiciones uniformes relativas a la homologación de los automotores con relación al resguardo de los ocupantes en caso de una colisión frontal, las carrocerías están expuestas al perfeccionamiento constante por las innovaciones tecnológicas con respecto al desarrollo técnico y, la carrocería a seguido en parte una evolución técnica.

En el continente europeo se realizan ensayos de resistencia y comportamiento en situaciones de impactos frontales, evaluando lesiones en la cabeza, tórax, abdomen y pelvis, considerándola respuesta a velocidades a 56 ± 1 km/h, si en el ensayo de impacto del autobús se realiza a velocidades superiores a la propuesta y este lograrse cumplir los requerimientos de la norma el estudio se considerará satisfactorio. (Reglamento No 94 CEPE/ONU)

Autobús

El autobús está conformado por una parte mecánica y una parte estructural o también llamada carrocería. La parte mecánica está formada por diversos elementos que conforman un vehículo como son el sistema de propulsión, sistema transmisión, sistema de refrigeración entre otros. La sección de la carrocería es la estructura del autobús, está constituido por elementos estructurales y láminas de metal las cuales están sujetas mediante juntas empernadas o soldadas, permite aportar en el soporte de las partes mecánicas.

El modelo de bus con chasis, esta con formado por un bastidor que no debe ser confundido con la carrocería, consiste en una estructura interna que sostiene y aporta rigidez, formando a un vehículo, es análogo al esqueleto de un animal. Para el caso de un vehículo consta de un armazón que integra entre sí y sujeta tanto los componentes mecánicos, como el grupo moto-propulsor y la suspensión de las ruedas, motor incluyendo la carrocería.

Figura 1: Chasis.



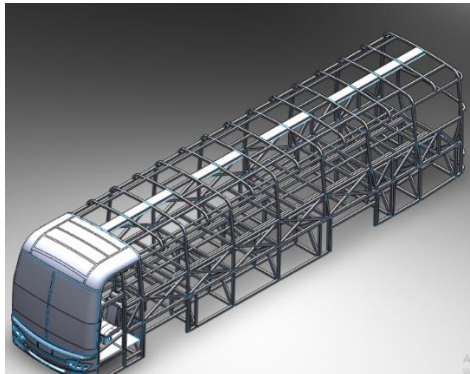
Fuente: Autolider Ecuador S.A.

Carrocería metálica

Una carrocería metálica se define como una estructura de forma cubica especial destinada para trasladar personas en cuanto esté efectuado el trayecto del autobús de un punto hacia otro, la misión fundamental de la carrocería es albergar y resguardar a los pasajeros.

Cumple con la principal característica de ser el armazón del autobús, la carrocería debe concentrar la mayor cantidad de energía liberada en el impacto por medio de la deformación proporcional y controlada de la sección frontal, posterior, lateral u otras partes del autobús, sin que afecten la integridad y compartimento a los pasajeros. La estructura debe garantizar características de solidez resistencia y seguridad, obedeciendo en todo sentido los requisitos de las normas vigentes en cada país. (CEDE)

Figura 2: Diseño CAD de una carrocería.



Realizado por: Paucar C, 2021

Partes de la carrocería

Estructura central

Está constituida por un habitáculo o armadura de soporte, es el conjunto de partes que permite proporcionar soporte, resistencia, rigidez y estabilidad a la carrocería

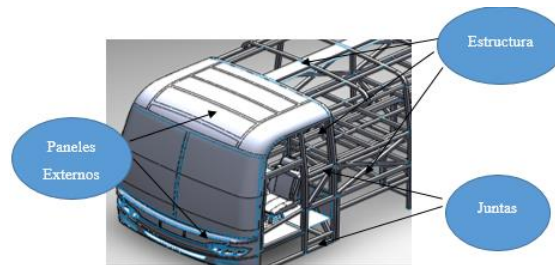
Paneles externos

Superficie que está directamente en conexión con el ambiente exterior de la región de trabajo.

Juntas

Constituyen los elementos utilizados para la unión de partes estructurales. Las conexiones fundamentales ocupadas son las uniones soldadas, empernadas y adheridas, esto varía por el requerimiento de partes a unir ya sean estos elementos estructurales, elementos funcionamiento principal, recubrimiento y confort. (Cepeda, 2017)

Figura 3: Diseño CAD partes de una carrocería.



Realizado por: Paucar C, 2021

Seguridad en los vehículos

Seguridad pasiva

El concepto de seguridad pasiva engloba todos los sistemas adoptados para proteger a los ocupantes de vehículos contra lesiones, o para reducir sus consecuencias una vez que se ha producido el accidente.

En una colisión, toda la energía cinética que tenía, debido a su velocidad, se convierte en energía de deformación, agotándola en deformar y romper las estructuras metálicas del vehículo y sus ocupantes que involucran directamente en la distribución de energía generada al impacto.

Los autobuses disponen de mecanismos de seguridad pasiva que son altamente importantes, a continuación, se detallan algunos de los principales sistemas:

- Cinturón de seguridad tres puntos.
- Asientos confiables y adaptables
- Reposacabezas ergonómicos.

- Tablero de control de instrumentos de mando deformables.
- Airbag.
- Carrocerías de deformación progresiva.

Seguridad activa

En términos simples, los sistemas de seguridad activa son aquellos que contribuyen a un mejor y más seguro funcionamiento del auto, con el objetivo de reducir al mínimo las posibilidades de accidentarse. Es decir que su rol es preventivo.

Esta seguridad operante está conformada por sistemas especializados que disponen todos los autobuses en movimiento para afianzar la garantía en los recorridos que estos deben cumplir.

Los autobuses están conformados por distintos sistemas de seguridad activa por lo que detallaremos los principales:

Sistema de frenos, dirección, suspensión, elementos de adherencia con el suelo (neumáticos), sistema de iluminación, sistema control de estabilidad

Materiales para fabricar la carrocería

El material más utilizado en nuestro medio por las fábricas constructoras de carrocerías son los tubos estructurales de sección cuadrada, rectangular, ángulos, canales tipo C o especial de grado A con un límite de fluencia mínimo de 270 MPa, la resistencia a la tracción mínima es de 310 MPa y una elongación porcentual mínima, a menor o igual a 3.05 de espesor. Cabe recalcar que este material ha sido seleccionado por la mayoría de los fabricantes por su costo accesible y la baja relación del peso final de la carrocería.

Tabla 1: Clasificación y propiedades de los tubos la norma NTE INEN 2415.

Grado	Descripción	Límite de fluencia min. (MPa)	Resistencia a la tracción min. (MPa)	Elongación % min. $\geq 3,05$ mm de espesor
AC	Tubo Para usos generales	205 a 340	----	≥ 25
A	Tubos estructurales	230	310	25
B		290	400	23
C	Sección cuadrada, rectangular o especial	315	425	21
D		250	400	23
A	Tubos estructurales	270	310	25
B		315	400	23
C	Sección cuadrada, rectangular o especial	345	425	21
D		250	400	23

¹ASTM A500/A500M Tabla 2 Tensile requirements.

Fuente: INEN 2415, 2016. **Realizado por:** Paucar C, 2021

Maniquí de ensayo (Dummy)

Los maniqués para ensayos de choque (Dummy), son muñecos antropomórficos que tienen como finalidad suplantar al ser humano en los test de choque a las que están sujetos los vehículos. Están compuestos con una serie de sensores colocados por todas las partes críticas que conforman el ser humano, con los que, se calcula varios criterios, permitiendo calificar la gravedad del infortunio que se expone en la persona. (Muñoz & López, 2007 pp. 63-71.)

Figura 4: Dummy real híbrido III 50% percentil.



Fuente: (HUMANESTICS GRUP)

Hybrid III

Es el maniqué de prueba de choque más empleado en el mundo para la evaluación de sistemas que están sujetas a seguridad automotriz en pruebas de colisión frontal. Originalmente es desarrollado por General Motors, el diseño masculino del percentil 50 Híbrido III, como se muestra en la Tabla 2, ahora es mantenido y desarrollado por Humanetics junto con los Comités de Biomecánica de la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) y la Administración Nacional de Seguridad y Transporte en Carreteras (NHTSA).

Tabla 2: Comparación de masas entre el modelo virtual y el maniqué hybrid III 50 %.

CONJUNTO		Requisitos norma		Peso medio maniqués (kg)	Peso Modelo FEM (kg)
		Mín. (kg)	Máx. (kg)		
Cabeza	Cabeza	4,49	4,59	4,55	4,54
	Cuello	1,49	1,59	1,51	1,55
Tórax	Torso Superior	17,05	17,33	17,07	17,27
Pelvis	Torso Inferior	22,90	23,81	23,07	23,07
Pierna	Pierna Superior	5,90	6,08	5,97	6,04
	Pierna Inferior	4,22	4,36	4,40	4,35
	Pie	1,09	1,23	1,15	1,14
Brazo	Brazo Superior	1,91	2,09	2,03	1,96
	Brazo Inferior	1,65	1,75	1,69	1,67
	Mano	0,52	0,61	0,55	0,53
TOTAL MANIQUÉ IIIH-50th		76,52	78,88	77,76	77,81

Fuente: Martínez & otros, pp. 804

Solucionador multifísico LS-DYNA

Su aplicación está directamente relacionada con las industrias automotriz, aeroespacial, de construcción, militar, manufacturera y de bioingeniería. La aplicación de este método se basa en el análisis de las deformaciones transitorias no lineales que se llevan a cabo en un intervalo reducido de tiempo. (ANSYS/LTS.)

La aplicación de LS-DYNA en el ámbito automotriz es apreciado cuando se realiza el análisis del diseño en los automotores. Esto permite conocer a ciencia cierta el comportamiento del automotor frente a un siniestro y los principales efectos producidos a los ocupantes en el instante de la colisión.

Pasos a seguir en el cálculo

Estos métodos disponen de ciertos pasos a seguir para resolver cualquier estudio. (Frías, 2004 pp. 121)

a) Pre-procesador.

- Dibujar los modelos de autobuses.
- Selección del tipo de elementos a utilizar en la obtención de la carrocería como en la totalidad de elementos que conforman el autobús.
- Seleccionar el material que se va a utilizar en los autobuses, que pueden obtenerse de acuerdo a estándares y normas de fabricación de cada país.
- Asignación de propiedades de los materiales a los diferentes componentes de los modelos de autobuses.
- Mallado de los componentes de los modelos de autobuses.
- Aplicación de las cargas exteriores en los modelos de autobuses estos pueden ser puntuales, lineales o superficiales.
- Aplicación de las condiciones de contorno en cada uno de los modelos.

b) Calculador

- Seleccionar el cálculo dinámico a realizar en los modelos de autobuses.
- Selección de intervalos de tiempo para cada simulación.

c) Inicio del cálculo

El programa resuelve de acuerdo a los parámetros y condiciones proporcionadas para cada modelo de cada uno de los ensayos a realizar, generando la solución.

d) Post-procesador

Este nos permite conocer resultados en forma numérica como también de manera gráfica.

Impacto frontal

El impacto frontal demuestra que es la forma de accidente con una elevada concurrencia en todos los espacios viales, exponiendo a todo tipo de vehículo destinado al traslado de personas, estas formas de traslado conllevan a que los usuarios estén expuestos a una serie de traumatismos que afecten a su integridad en situaciones de colisión. De esta manera el estudio del impacto de un autobús se da mediante el software LS-DYNA y se produce en la sección delantera. El impacto que se da entre el autobús y la barrera debe cubrir todo el ancho delantero del autobús como se muestra en la Figura 5. La barrera utilizada en el impacto es rígida para representar la naturaleza deformable del autobús. Es una forma rigurosa de conocer y visualizar las lesiones de los individuos expuestos, el comportamiento de la estructura frontal de un autobús sin que exista instrucción de elementos hacia el espacio de supervivencia de los ocupantes.

Figura 5: Impacto frontal de autobús método FEM. software LS-DYNA



Realizado por: Paucar C, 2021

Reglamento N° 94 de la Comisión Económica para Europa (CEPE)

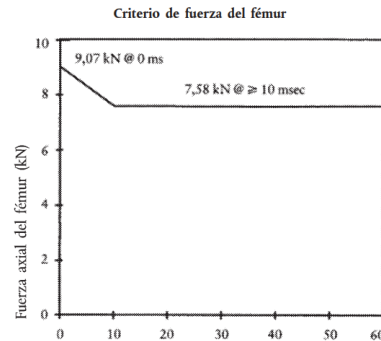
Las pruebas están desarrolladas según los requerimientos CEPE, cumpliendo con los parámetros, criterios y especificaciones propuestos, los cuales se precisan en los siguientes puntos.

Criterios de comportamiento

- El criterio de comportamiento de la cabeza (**HPC**) no deberá sobrepasar a 1 000, y la rapidez proveniente de la cabeza no sobrepasará los 80 g durante más de 3 ms.
- El criterio de compresión del tórax (**THCC**) no sobrepasara los 50 mm.
- El criterio de viscosidad ($V * C$) para el tórax no sobrepasara a 1,0 m/s

- El criterio de fuerza del fémur (**FFC**) no deberá ser superior al criterio de comportamiento fuerza-tiempo de 9,07 KN como se muestra la Figura 6.

Figura 6: Criterio fuerza del fémur.



Fuente: Reglamento No 94 CEPE/ONU, 2009

También se tomará el inciso del comportamiento la pelvis del reglamento N°95 el lateral 5.2.1.3. (Reglamento No 95 CEPE/ONU. pp 97).

- El criterio en la conducta de la pelvis deberá presentar una resistencia máxima sobre la sínfisis púbica menor o equivalente a 6 KN.

Procedimiento de ensayo

El procedimiento se detalla en los numerales 1, 1.1, 1.4, 1.4.1, 1.4.2, 1.4.2.1, 1.4.2.2, 1.4.2.3, 1.4.2.4, 1.4.2.5, 3, 3.1, 3.2, 4. Instalación y preparación del vehículo según Reglamento No 94 CEPE/ONU. (Anexo 3 del Reglamento No 94 CEPE/ONU. pp 64-66).

- Terreno de ensayo.

El área entre la barrera y vehículo estén libres de elementos que intervengan en el ensayo.

- *Estado del vehículo.*

La condición principal del vehículo será la representación de su elaboración en serie abarcando todos sus componentes naturales y permanecerá de forma habitual en su curso.

- Masa del vehículo.

Para el ensayo, el peso del vehículo de estudio competará a la tara del mismo. En los sistemas que contengan aceite, refrigerante, etc. pueden permanecer vacíos, teniendo en cuenta que estos deben ser recompensados posteriormente.

- Impulso y transcurso del vehículo.

Deberá el vehículo ser propulsado por el mecanismo que goce.

- Velocidad de ensayo.

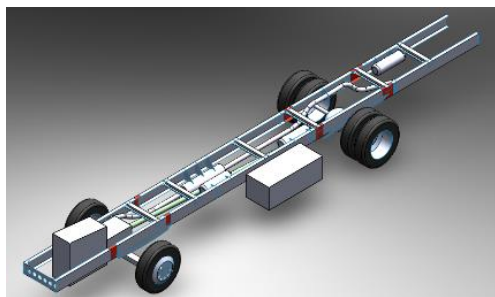
La velocidad en el instante de la colisión es de $56 - 0, + 1$ km/h. De forma que si en el estudio se plantea una velocidad superior y el vehículo satisface las estipulaciones de la norma, el ensayo se considerará satisfactorio.

Metodología

Modelado y diseño de un autobús

El modelado se realiza con software especializado en diseño **CAD 3D** y planos en **2D**, el cual nos permite representar de forma virtual los distintos componentes que conforman la parte mecánica del autobús como son el batidor, aros, neumáticos, depósito de combustible sistema de transmisión etc. como se muestra en la figura 6. Los componentes estructurales están conformados por partes tipo Shell (superficies), esto ayuda a exponer una estimación de forma superior en los resultados de esfuerzos como en deformaciones. Además, se tomó la resolución de suprimir ciertos detalles y partes de los modelos de autobuses que no interfieran en la resistencia de la estructura que conforma la carrocería en siniestros frontales, de manera que el gasto computacional es bajo porque permite alcanzar el desarrollo de modelos mucho más ligeros.

Figura 6: Modelado chasis

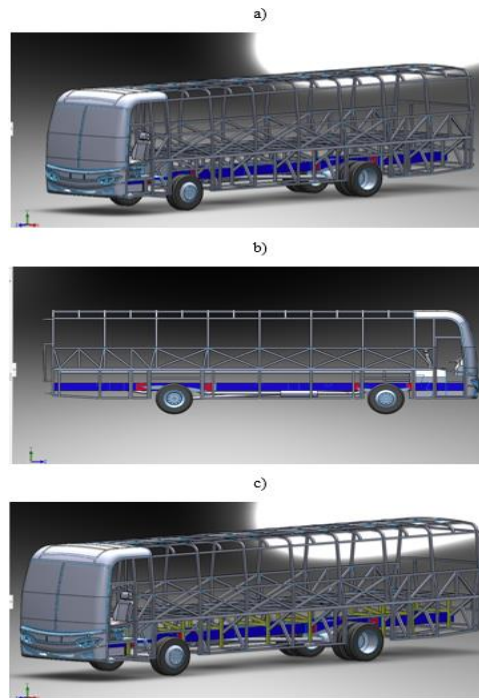


Realizado por: Paucar C, 2021

Modelado de la carrocería

La estructura del autobús respeta todas las dimensiones otorgadas por la norma INEN 1668, los anclajes fueron diseñados con características que aporten a la sujeción y soporte en la unión entre la parte mecánica de propulsión y la carrocería, como se puede observar de color amarillo en la Figura 7.

Figura 7: Modelado de la carrocería a) Vista en perspectiva de la carrocería, b) Vista lateral disposición del motor, c) Unión de anclajes al chasis.

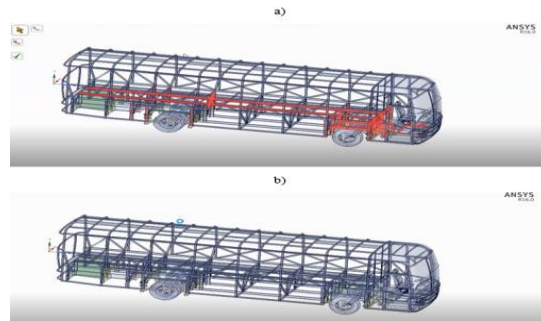


Realizado por: Paucar C, 2021

Corrección de los modelos CAD

Los modelos CAD están sujetos a varios conflictos en el modelado por lo que es necesario una revisión preliminar de todos elementos del diseño. Existen herramientas que es muy eficaz para la detección de errores antes de generar la malla, evitando generar índices bajos de calidad de malla.

Figura 8: a) carrocería con errores de modelado, b) carrocería sin errores



Realizado por: Paucar C, 2021

Generación de malla

La malla creada para los componentes de las carrocerías está formada por elementos cuadráticos y triangulares tipo Shell. El tamaño de malla es muy importante ya que entre menor sea el tamaño de los elementos mayor será la calidad y el desarrollo computacional.

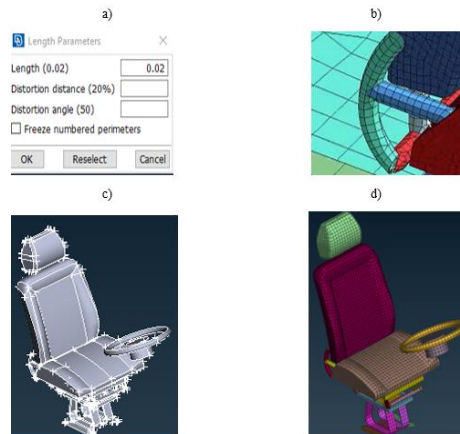
Figura 9: Mallado completo del autobús.



Realizado por: Paucar C, 2021

Para el modelo se utilizó en el volante y asiento un tamaño de malla de 0.02mm y para la estructura de la carrocería y la parte mecánica un tamaño de malla de 0.05 mm.

Figura 10: a) Tamaño de malla asiento, b) Visualización de la compartición de nodos c) Asiento sin mallar d) Asiento mallado.



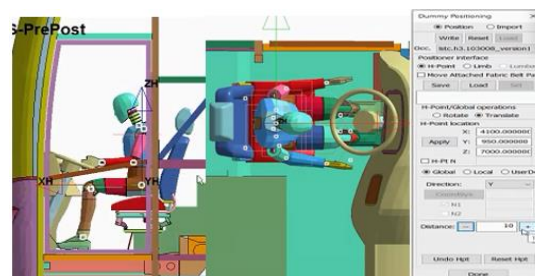
Realizado por: Paucar C, 2021

Con el criterio Jacobian se analiza que la calidad de malla sea fiable, este calcula y prueba íntegramente los componentes del autobús, si el mallado del modelo es de proporción alta nos indica que el estudio computacional es poco fiable, teniendo en cuenta el criterio Jacobian el valor mínimo debe ser de 0.3 valor recomendado por LS DYNA.

Posicionamiento del dummy

El dummy puede ser trasladado en el eje x, y o z, esto facilita el posicionamiento del mismo en el interior del autobús, las coordenadas evitan que el dummy presente interferencias con la carrocería y el asiento.

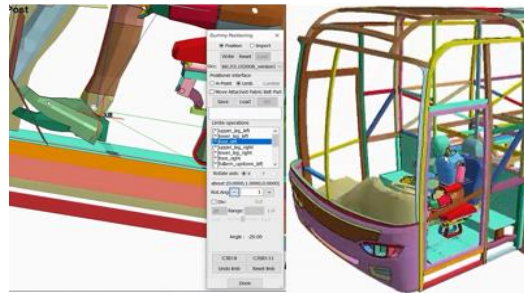
Figura 11: Posicionamiento del dummy en el autobús utilizando coordenadas.



Realizado por: Paucar C, 2021

El dummy cuenta con las características de modificar la posición y rotación de la cabeza como de sus partes superiores e inferiores ver Figura 12, esto permite que el dummy adquiera una postura natural similar o igual a la de un conductor real.

Figura 12: Dummy en postura correcta.



Realizado por: Paucar C, 2021

Ubicación del cinturón de seguridad

El cinturón proporciona seguridad pasiva a nuestro dummy evitando que en la simulación este salga expulsado por el parabrisas.

Figura 13: Dummy con cinturón.



Realizado por: Paucar C, 2021

Asignación de condiciones de borde

Material

El material que se empleó es de tipo PICEWISE LINEAR PLASTICITY, la conducta del material es de un modo elástico-plástico.

Tabla 3: Picewise linear Plasticity autobuses

Magnitud	Medida
Densidad ρ	$7.830e^{-6} \text{ Kg/mm}^2$
Módulo de Young E	200 <i>GPa</i>
Coefficiente de Poisson	0.3
Limite elástico σ_y	270 <i>GPa</i>

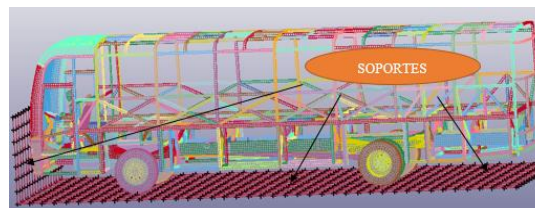
Fuente: INEN 2415, 2016

Realizado por: Paucar C, 2021

Soporte fijo

Se dispone para esta opción BOUNDARY SPC_SET. definiendo a la pared de impacto como una superficie rígida, esto permite restringir en su totalidad los grados de movilidad.

Figura 14: Pared de impacto como soporte fijo utilizando la opción BOUNDARY SPC_SET



Realizado por: Paucar C, 2021

Velocidad

Se proporciona la opción INITIAL_VELOCITY, en el cual permite asignar a todos los nodos de nuestro autobús una misma velocidad lineal. La velocidad que se asignó en las simulaciones se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Velocidades utilizadas en los modelos de la simulación.

Autobús	Velocidad	
	Km/h	m/s
Simulación 1	25	6.95
Simulación 2	50	13.88

Realizado por: Paucar C, 2021

Otras condiciones utilizadas para la simulación

El modelo CAD necesita estar bien definido para evitar errores de simulación por lo que en la siguiente Tabla 5, se detalla los comandos generados en repetidas ocasiones y otros aplicados condición específica.

Tabla 5: Condiciones utilizadas en la simulación de impacto.

Condicione s	Detalle	Aplicació n
CONSTRA INED_EXT RA NODE SET	Se utiliza para la unión de las partes	Dummy
CONSTRA INED_JOI NT	Forma juntas	Dummy
CONSTRA INED_NO DAL RIGID BODY	Se utiliza para la unión de las partes	Dummy autobús
CONSTRA INED_RIGI D BODY	Se utiliza para la unión de las partes	Dummy autobús
BULK_VIS COSYTY	Nivel permitido de viscosidad de los elementos	Por defecto: Cuadrático 1.5 Lineal 0.6

ENERGY	Activa las energías existentes	
CONTROL_HOURGLASS	Controla la expansión de energía de Hourglass	Por defecto: IHQ 1
SHELL	Control sobre los elementos Shell en la simulación.	Todo el modelo
TERMINATION	Tiempo de simulación	250 ms
TIMESTEP	Controla los pasos de tiempo y los ciclos de solución de los modelos	Todo el modelo
DEFINE_CURVE	Muestra el comportamiento de magnitudes utilizadas	Material Velocidad Gravedad
HOURGLASS	Control de expansión de la energía de los elementos	IHQ 5 10% de la energía interna.

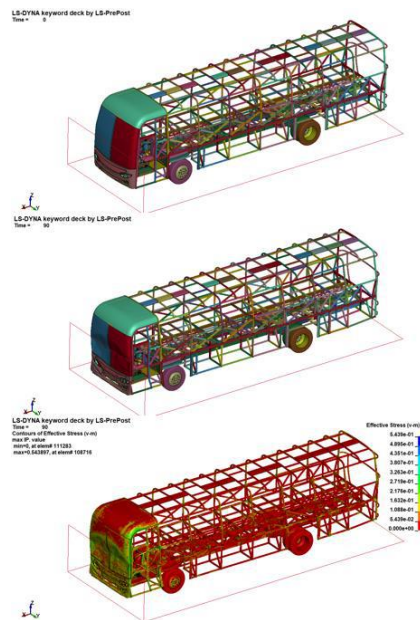
KEYWORD	Comando que inicia la simulación	Todo el modelo
NODE_NUMBER	Genera de nodos	Todo el modelo
PART_PART	Asigna partes para proporcionar propiedades	Todo el modelo
SECTION	Asigna propiedades a las partes	Condiciones de elementos y espesores en los materiales
SET	Asigna conjuntos de nodos, partes y segmentos.	Todo el modelo
TITLE	Asigna título al modelo simulado	Todo el modelo

Resultados

Resultado de impacto frontal

Los resultados son visualizados por medio del interfaz que permite controlar los intervalos de tiempo de simulación, de esta manera se puede observar la secuencia del impacto y la variación de los esfuerzos de Von Mises en función del tiempo de simulación.

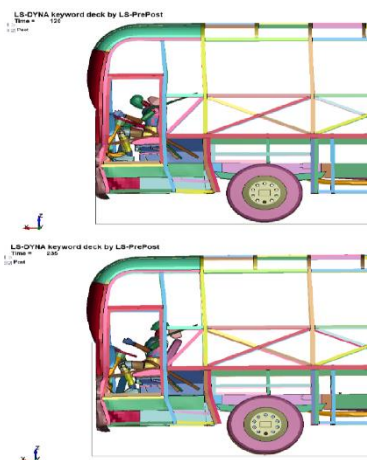
Figura 15: Simulación de impacto frontal con una velocidad de 6.95 m/s, grafico inferior esfuerzos de Von Mises 0.54 GPa en 90 ms.



Realizado por: Paucar C, 2021

Se evidencia el comportamiento del dummy durante el ensayo de impacto a 6,95 m/s.

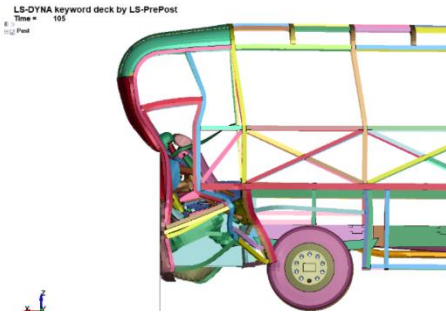
Figura 16: Secuencia de movimiento de dummy impacto a 6,95 m/s.



Realizado por: Paucar C, 2021

Se evidencia el comportamiento del dummy durante el ensayo de impacto a 13,88 m/s.

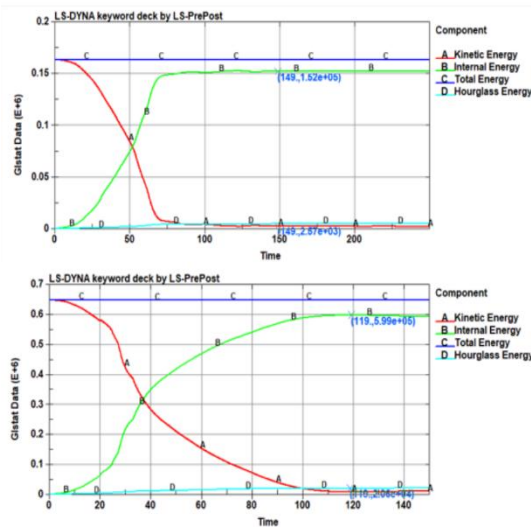
Figura 17: Secuencia de movimiento de dummy impacto 13,88 m/s.



Realizado por: Paucar C, 2021

El factor de Hourglass se encuentra dentro del rango aceptable del 10% que se maneja para simulaciones dinámicas.

Gráfico 1: Balance de energías con 6.95 m/s y 13.88 m/s respectivamente, Hourglass es inferior al 10%.



Realizado por: Paucar C, 2021

Tabla 6: Validación factor de Hourglassing.

Tipo de simulación	Velocidad	Valor de H	Validación
Simulación 1	6.9 m/s	1.7%	H<10%

Simulación 2	13.88 m/s	4.3%	H<10%
-----------------	-----------	------	-------

Realizado por: Paucar C, 2021

Desplazamiento estructural en la sección del frontal del autobús

Los desplazamientos que se generaron en el impacto para absorber la energía cinética producida en el autobús a diferente velocidad estos medidos desde la parte externa al primer parante interior, esto garantizara la seguridad del conductor para que este no quede atrapado entre la estructura y el asiento.

Tabla 7: Desplazamiento de la estructura de la parte frontal.

Tipo de simulación	Velocidad	Desplazamiento lateral de la estructura
Simulación 1	6.9 m/s	99 mm
Simulación 2	13.88 m/s	523 mm

Realizado por: Paucar C, 2021

Comportamiento del dummy en el momento de impacto

Cuando el dummy está expuesto en el momento que la energía cinética llega a su punto máximo se aprecia que en el modelo obtiene mayor cabeceo.

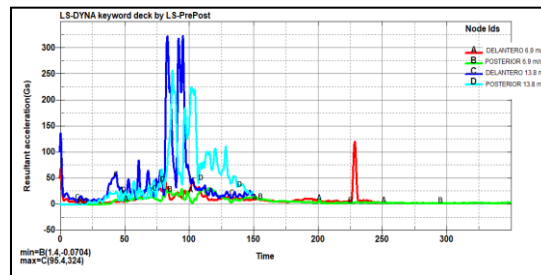
Figura 18: Comparación de maniqués, en azul maniquí en motor delantero, en verde con motor posterior, izquierda máxima energía cinética, derecha máximo cabeceo (rebote).



Realizado por: Paucar C, 2021

La fuerza G máxima es la de color azul que pertenece a la simulación con una velocidad de impacto de 13.88 m/s, como se muestra en el Gráfico 2.

Gráfico 2: Comparación de fuerzas G medidas en la Cabeza del maniquí el impacto frontal.



Realizado por: Paucar C, 2021

Evaluación de norma en el comportamiento HIC

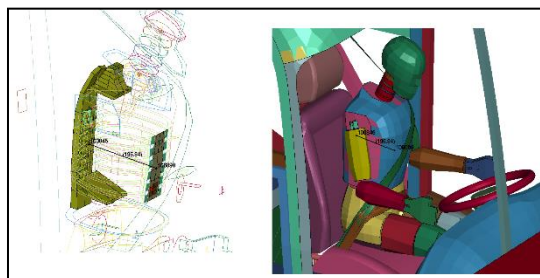
Tabla 8: Cumplimiento de norma en el comportamiento de la HIC

Tipo de simulación	Velocidad	Hic	Índice permitido por la norma	Cumplimiento
Simulación 1	6.9 m/s	352.7	1000	Cumple
Simulación 2	13.88 m/s	6834	1000	No Cumple

Realizado por: Paucar C, 2021

Evaluación de norma en el comportamiento del tórax

Figura 19: Medición del desplazamiento de costillas durante las simulaciones.



Realizado por: Paucar C, 2021

Tabla 9: Evaluación de norma en el comportamiento del tórax.

Tipo de simulación	Velocidad	Hic	Índice permitido por la norma	Cumplimiento
Simulación 1	6.9 m/s	352.7	1000	Cumple
Simulación 2	13.88 m/s	6834	1000	No Cumple

Realizado por: Paucar C, 2021

Evaluación de norma en el comportamiento del fémur

Tabla 10: Evaluación de norma en el comportamiento del fémur.

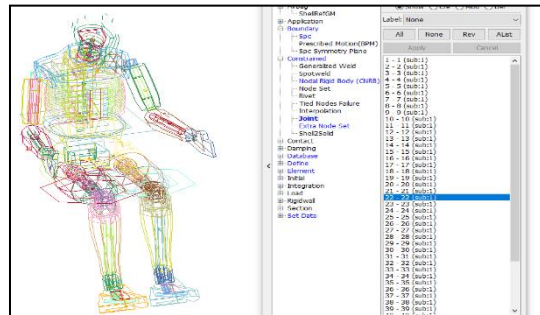
Tipo de simulación	Velocidad	Comportamiento del fémur	Índice permitido por la norma	Cumplimiento
--------------------	-----------	--------------------------	-------------------------------	--------------

Simulación 1	6.9 m/s	No hay contacto	9,07 KN	Cumple
Simulación 2	13.8 m/s	Imposible de calcular	9,07 KN	No cumple

Realizado por: Paucar C, 2021

Cumplimiento de norma en el comportamiento de la pelvis

Figura 20: Ubicación de junta 22 utilizada para verificar la fuerza producida en la sínfisis púbica del maniquí.



Realizado por: Paucar C, 2021

Tabla 6-4: Cumplimiento de norma en el comportamiento de la pelvis

Tipo de simulación	Velocidad	Fuerza máx. En sínfisis púbica	Índice permitido por la norma	Cumplimiento
Simulación 1	6.9 m/s	2.44 NK	6 KN	Cumple

Simulación 2	13.8 8 m/s	10.6 KN	6 KN	No cumple
--------------	------------------	------------	------	-----------

Realizado por: Paucar C, 2021

Conclusiones

- Se modela la carrocería con la recomendación de la normativa ecuatoriana INEN 1668 para vehículos de transporte público, para medir posteriormente las deformaciones.
- Se utiliza el reglamento N° 94 y N° 95 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas, que establece las condiciones de evaluación de los ensayos de impacto frontal.
- Con el criterio Jacobian se analiza la calidad de malla, teniendo en cuenta el el valor mínimo debe ser de 0.3 valor recomendado por LS DYNA.
- El autobús con chasis presenta una absorción de energía menor cuando está sometido a una velocidad de 25 km/h, lo suficiente para ser capaz de pasar los controles que dispone la norma. Con una deformación frontal de 9.9 cm por parte de la estructura, esto ayudo a que el conductor apruebe los criterios de comportamiento de la cabeza con 352.7, el tórax con 4.5 cm, la pelvis con 2.44 KN y en el fémur no existe contacto.
- El autobús con chasis a velocidades mayores como 50 km/h tiene el comportamiento más crítico. Una de las causas puede ser que carece de componentes que absorban mayor energía y se deformen en el impacto, ya que cuenta solo con elementos rígidos en la parte frontal esto origina una canalización de energía hacia el conductor y ocupantes, obteniendo una deformación frontal de 52.3 cm por parte de la estructura, esto evita a que el conductor apruebe los criterios de comportamiento de la cabeza con 6834, el tórax con 8.2 cm, la pelvis con 10.6 KN y en el fémur es imposible de calcular.
- Se generan simulaciones a diferente velocidad y se evalúan sus condiciones de comportamiento de deformación estructural y el desplazamiento de sensores en el dummy, con la finalidad de mejorar las condiciones de seguridad pasiva y activa en los autobuses.

Referencias

1. Albert Martí Parera. “Sistemas de seguridad y confort en vehículos automóviles”, Barcelona – España. Editorial Marcombo, 2000, pp 15- 23
2. ANSYS/LTS. Ls-Dyna. [On line] 2011. [Consulta: 07 de enero de 2021]. Disponible en: <http://www.lstc.com/products/ls-dyna>.
3. Autolider Ecuador S.A. Distribuidor general, Chasis y Buses Listos. Disponible en: <http://www.autoliderecuador.com.ec/comerciales/producto/categoria/chasis-y-buses-listos>.
4. BECERRIL NIETO, D. Daniel. Estudio del impacto de un vehículo sobre señales de tráfico mediante LS-Dyna. [On line] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España.2010 pp. 30-31 [Consulta: 2020-12-20]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/10798#preview>
5. Canales sectoriales Interempresas (2010). Autobuses: ¿Integrales, basados en chásis o mixtos? Canales Sectoriales Interempresas. [On line] [citado: 10 15,2020]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Automocion/Articulos/41701-Autobuses-integrales-basados-en-chasis-o-mixtos.html>.
6. CEDE. Carrocerías y bastidores: Tipos, características, procesos de fabricación, elementos que los componen y métodos de ensamblado y unión de éstos. [On line] [citado: 10 21,2020]. Disponible en: http://www.serina.es/empresas/cede_muestra/304/tema/%20MUESTRA.pdf.
7. CELIGÜETA, J. Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural. [On line]. Cuarta Edición. Madrid - España: UNICOPIA C.B, 2011. [Consulta: 15 de noviembre 2020]. Disponible en: <https://dadun.unav.edu/handle/10171/19069>.
8. CEPEDA MIRANDA, Jorge Luis, Análisis del comportamiento mecánico del sistema estructural del autobús Feline para la empresa carrocera Miral buses. [On line] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. 2017. pp. xix. [Consulta:2020-10-20]. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2006. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/734?locale-attribute=en>.
9. Díaz, A. Métodos de mallado y algoritmos adaptativos en dos y tres dimensiones para la resolución de problemas electromagnéticos cerrados mediante el método de los elementos

- finitos. [On line] (Trabajo de titulación) (Doctorado). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.2000 pp. 2-3 [Consulta: 2020-11-17]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/39745508_Metodo_de_mallado_y_algoritmos_adaptativos_de_dos_y_tres_dimensiones_para_la_resolucion_de_problemas_electromagneticos_cerrados_mediante_el_metodo_de_los_elementos_finitos.
10. DURÁN CAGUANA, John Jairo. Diseño y construcción de un jig de ensamble de anclajes y plataforma en el proceso de fabricación de estructuras metálicas para buses interprovinciales modelo silver plus-glass en chasis hino ak de la carrocería patricio cepeda de la ciudad de Ambato, periodo octubre 2016 – marzo 2017. [On line] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Ecuador. 2006. pp. 27-28. [Consulta: 2020-10-15]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/26543/1/Tesis%20I.%20M.%20405%20-%20Dur%c3%a1n%20Caguana%20John%20Jairo.pdf>.
 11. FRÍAS VALERO, Eduardo. Aportaciones al estudio de las maquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos. [On line] (Trabajo de titulación) (Doctorado). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.2004 pp. 120-121 [Consulta: 2020-11-20]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93606>
 12. HUMANESTICS GRUP. Dispositivos de prueba antropomórficos de impactos frontales, híbrido III. [On line] [citado: 12 21,2020]. Disponible en: <https://humanetics.humaneticsgroup.com/products/anthropomorphic-test-devices/frontal-impact/hybrid-iii-50th-male/hybrid-iii-50th-male>.
 13. ING. SANTOS CORREA, Luis Alberto. 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. [On line] (Trabajo de titulación) (Maestría). Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Ecuador. 2017. pp. 33. [Consulta: 2020-10-10]. Disponible en: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/13543/1/T-ESPE-057893.pdf>
 14. LS- DYNA. Keyword User´s Manual. (2001). [On line]. [Consulta: 28 de diciembre 2020]. Disponible en: https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna_manual_volume_i_r12.pdf. pp. (5-1)- (44-40).

15. MARTÍNEZ, L.; PELÁEZ, R.; GÓMEZ, V.; López, E.; GARCÍA, A. “Optimización de Modelos en Elementos Finitos de los Maniqués Hybrid-III Percentiles 50% y 95% para su Aplicación en Transporte Ferroviario. Asociación Española de Ingeniería Mecánica”. Asociación Española de Ingeniería Mecánica. Vol. 21. (España), pp. 804.
16. MUÑOZ, Belén Abella & LÓPEZ, Vicente Díaz. “Desarrollo de un modelo humano plano para la simulación de ensayos de choque en vehículos”. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol. 11, n.º 3 (2007), (España) pp. 63-71.
17. NTE INEN 1323. Vehículos automotores. Carrocerías de buses. Requisitos.
18. NTE INEN 1668. Vehículos de Transporte Público de Pasajeros Intrarregional, Interprovincial e Intraprovincial. Requisitos.
19. NTE INEN 2415. Tubos de acero al carbono soldados para aplicaciones estructurales y usos generales. Requisitos.
20. NTE INEN 2704. Vehículos automotores. Anclajes del cinturón de seguridad para vehículos. Requisitos.
21. Protocolo de Evaluación. EURO-NCAP. Protección de Ocupantes Adultos Nuevo Programa Europeo de Evaluación de Coches
22. Reglamento No 94 CEPE. Prescripciones uniformes sobre la homologación de los vehículos en lo relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión frontal. Reglamentos. y Anexos 3 y 4.
23. Resolución No.097-DIR-2016-ANT. Reglamento del procedimiento general de homologación vehicular y dispositivos de medición, control, seguridad y certificación de los vehículos comercializados. Requisitos.
24. SERA RUIZ, M & BLANCO DIAZ, E. Resistencia de Materiales. [On line]. Barcelona – España; © Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), 2015. [Consulta: 23 de diciembre 2020]. Disponible en: <http://cervera.rmee.upc.edu/libros/Resistencia%20de%20Materiales.pdf>
25. Universidad Politécnica de Madrid, Conceptos básicos de diseño mecánico, Madrid: UPM, 2011
26. VÁZQUEZ, M. & LÓPEZ, E. El método de los Elementos Finitos, aplicado al análisis estructural. [On line]. Madrid - España: Editorial Noelia. [Consulta: 7 de noviembre 2020]. Disponible en:

https://www.academia.edu/38827344/El_m%C3%A9todo_de_los_Elementos_Finitos_aplicado_al_an%C3%A1lisis_estructural_Manuel_V%C3%A1lquez_Elo%C3%ADsa_L%C3%B3pez.

27. VETTURAZZI, Rafael. Ventajas de la integración de LS-DYNA con las herramientas de Ansys. [blog]. [Consulta: 06 de enero de 2021]. Disponible en: <https://www.esss.co/es/blog/ventajas-de-la-integracion-de-ls-dyna-con-las-herramientas-de-ansys/>

© 2022 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).