

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL COMPUTACIONAL DE LA CARROCERÍA DE UN MINIBUS ESCOLAR EN IMPACTO LATERAL POR VOLCAMIENTO

### COMPUTATIONAL STRUCTURAL ANALYSIS OF A SCHOOL MINIBUS BODY ON ROLLOVER SIDE IMPACT

<sup>1</sup>Milton Mario Brito Palma, <sup>2</sup>Andrés Marcelo Gordón Garcés, <sup>3</sup>Patricia Nataly Constante Prócel.

<sup>1</sup>Carrocerías Varma S.A., Sector Lungua – Izamba, Ambato, Ecuador <sup>2-3</sup> Universidad de Fuerzas Armadas ESPE – Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Quijano y Ordoñez y Marques de Maenza s/n.

E-mails: <sup>1</sup>mbrito@varma.com.ec, <sup>2</sup>amgordon@espe.edu.ec, <sup>3</sup>pnconstante@espe.edu.ec

*Energía Mecánica Innovación y Futuro, IV Edición 2015, No.4 (13)*

#### RESUMEN

El presente artículo expone una propuesta de investigación para analizar el comportamiento de los componentes estructurales de un minibus escolar cuando existe impacto lateral producto de un volcamiento (prueba de vuelco), el cual ha sido analizado por el método computacional de simulación por elementos finitos, empleando la aplicación LS-DYNA en un evento dinámico no lineal de volteo de una estructura de minibus para comprobar que no se invade el espacio de supervivencia de las persona que se encuentran dentro de la misma una vez que ha finalizado el impacto; además se busca obtener esfuerzos y deformaciones máximas en el transcurso del evento dinámico con la finalidad de encontrar los puntos críticos y posibles fallas que presenta el material para luego proponer una optimización estructural.

El presente análisis se realiza en base a normativas nacionales e internacionales que permiten conocer parámetros establecidos para este tipo de ensayo.

**Palabras Clave:** Prueba de vuelco, impacto en buses, resistencia de superestructura, análisis por el método de elementos finitos.

#### ABSTRACT

The present article exposes an investigation approach to test the behavior of the structural components of a school minibus when exists a side impact because of a rollover (rollover test), which has been analyzed by a computational method of simulation by finite elements, using LS-DYNA application in a non-linear dynamic event for the rollover of a minibus structure and prove that residual space is not invaded for the people who are inside the bus when the impact occurs; also one of the most important objectives is obtain maximum stress and deformations during the event to find critical points and possible material failures and then propose a structural optimization. The present analysis is performed based on national and international regulations that allow knowing the standard parameters established for

this type of test.

**Keywords:** Rollover test, bus crash, superstructure resistance, finite element analysis method.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un elevado número de incidentes vehiculares ocurren cada año causando muertes y daños severos a los pasajeros: 3665 incidentes vehiculares en el primer trimestre del 2015 [1]; este problema puede ser reducido si se brinda la atención adecuada a la previsión de daños haciendo a los vehículos más seguros. Entre los diversos tipos de impactos vehiculares, los volcamientos son frecuentemente muy severos y amenazadores para los ocupantes del vehículo [2]. Además debido a la creciente producción y demanda de autobuses para transporte de personas de diferentes instituciones tanto públicas y privadas, las empresas fabricantes de carrocerías tienen la obligación de realizar ensayos a las estructuras y demás componentes que conforman un bus para comprobar su buen funcionamiento y evaluar la resistencia de la carrocería con el fin de salvaguardar la vida de las personas; por esta razón se deben hacer estudios avanzados de ingeniería basados en normas nacionales e internacionales, analizando el comportamiento dinámico cuando el autobús experimenta una colisión.

Los accidentes por volcamiento dependen de la estabilidad del vehículo cuando gira, la misma depende de la altura del centro de gravedad y el ancho del camino; un centro de gravedad elevado y una vía estrecha pueden dar inestabilidad al vehículo cuando toma una curva a alta velocidad dando como resultado un accidente por volcamiento. Un vehículo puede volcarse debido a algunos factores como velocidad excesiva en curvas, colisión con otro vehículo u objeto, cambios bruscos en la dirección a alta velocidad [2].

Las pruebas de simulación se han ido mejorando

con el fin de tener un análisis más rápido y barato del comportamiento de buses durante un impacto por volcamiento [3]. Con el incremento en capacidad computacional del hardware moderno, las herramientas de la Ingeniería Asistida por Computador (CAE) son usadas esencialmente para evaluar y mejorar varios aspectos del diseño del vehículo como seguridad, confort, y durabilidad [4].

El artículo ha sido estructurado de la siguiente manera: Fundamentación teórica, Análisis estructural, resultados y conclusiones

## 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Para el diseño, fabricación, montaje y análisis estructural de carrocerías se debe considerar algunas definiciones generales que se encuentran detallados en la norma técnica ecuatoriana INEN 1323:2009 [5].

**Carga Muerta (M).**- Corresponde al peso total de la carrocería incluyendo todos los elementos estructurales y no estructurales permanentes, este dato se puede obtener directamente del software empleado para modelación [5].

**Espacio de supervivencia.**- Volumen que se encuentra en el compartimento de ocupantes, comprendido entre el plano frontal y posterior, definido al mover el plano transversal vertical a través de la longitud del vehículo pasando por cada uno de los puntos SR (seat reference), el mismo que se encuentra a 500 mm por encima del piso en cada uno de los asientos (figura 1).

**Resistencia de la estructura.**- Las carrocerías de buses deben cumplir las siguientes condiciones [5] en cuanto a resistencia de su estructura:

- Debe resistir una carga estática sobre el techo, equivalente al cincuenta por ciento

(50%) del peso máximo admisible para el chasis, distribuido uniformemente a lo largo del mismo, sin experimentar deformaciones en ningún punto, que superen los setenta milímetros.

– Durante el ensayo de resistencia de la estructura o una vez finalizado el mismo, la estructura de la carrocería debe resistir para que el espacio de supervivencia no resulte invadido según el alcance del documento Regulation 66 de las Naciones Unidas [6].

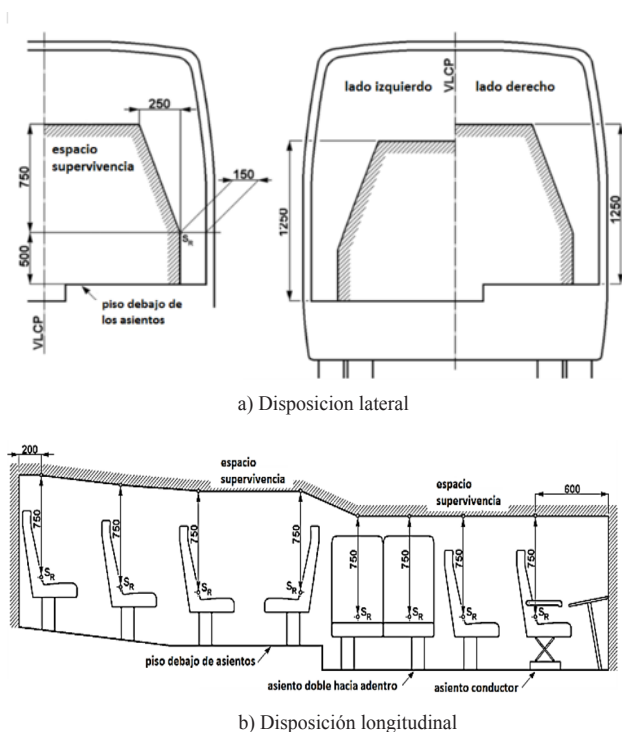


Figura 1. Espacio de supervivencia [6]

Prueba de vuelco.- Consiste en un ensayo de inclinación lateral especificado de la siguiente forma:

- El vehículo completo se posiciona sobre la plataforma inclinada con suspensión bloqueada y es lentamente girado hacia su posición de equilibrio inestable (figura 2).
- La prueba de vuelco comienza en esta posición con velocidad angular cero y el eje de rotación pasa a través del punto de contacto entre el piso y el neumático.

- El vehículo es volcado en el interior de una zanja, la misma que tiene una superficie horizontal, seca y lisa con una profundidad nominal de 800 milímetros [6] [7].

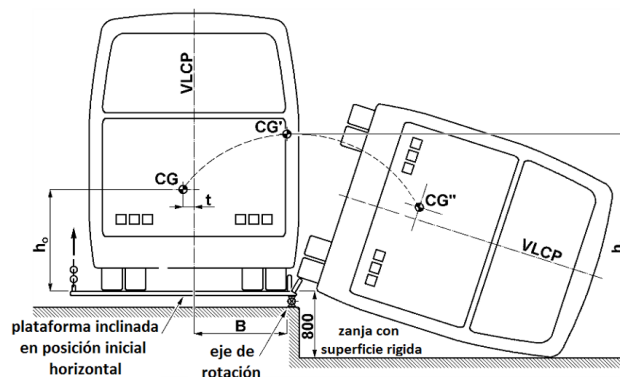


Figura 2. Diagrama del proceso de prueba de vuelco. [6]

### 3. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

El proceso inicia con la selección del chasis a carrozar para luego continuar con el modelado de la estructura tridimensional (3D) mediante el uso de un software de diseño asistido por computador (CAD); para el análisis estructural se emplea la herramienta computacional especializada que permita importar un modelo CAD previamente realizado, discretizar en elementos finitos independientes, agregar condiciones de borde, resolver el método numérico, analizar los resultados obtenidos, para por último determinar si la estructura requiere un rediseño o redimensionamiento.

El diagrama de flujo para análisis estructural de la carrocería de un minibús en volcamiento se observa en la figura 3.

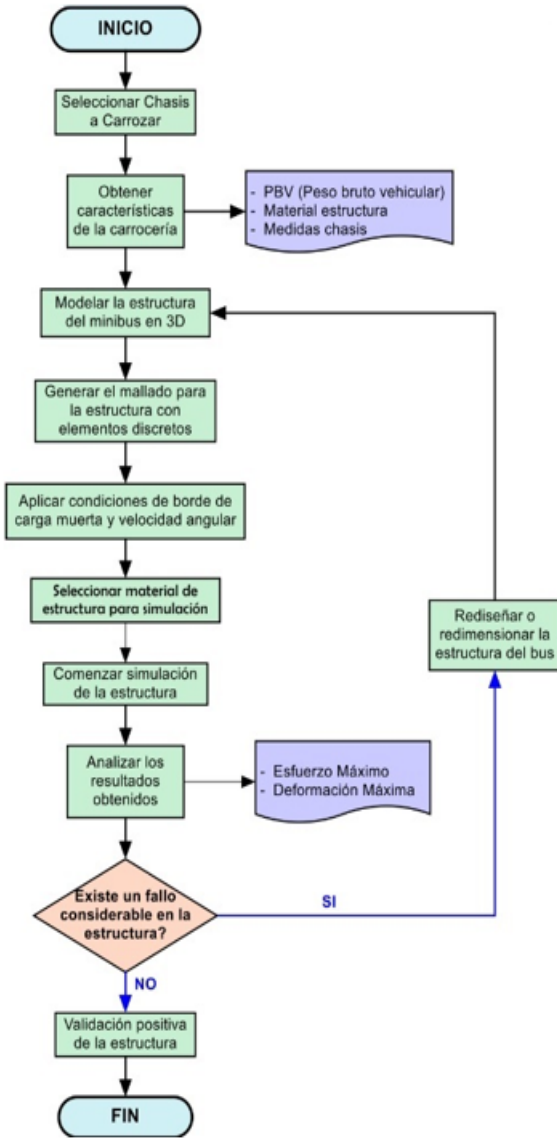


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso CAD/CAE.

La tabla 1 muestra las características generales del chasis para el minibus escolar.

Tabla 1. Características del chasis

Marca del chasis	Volkswagen 10 150
Tipo de servicio	Escolar/institucional
Peso bruto vehicular	9200 Kg
Capacidad de carga eje frontal	3200 Kg
Capacidad de carga eje trasero	6000 Kg
Peso de chasis (TARA)	2550 Kg
Relación peso/potencia	56.2

La figura 4, presenta las dimensiones del chasis objeto de estudio.

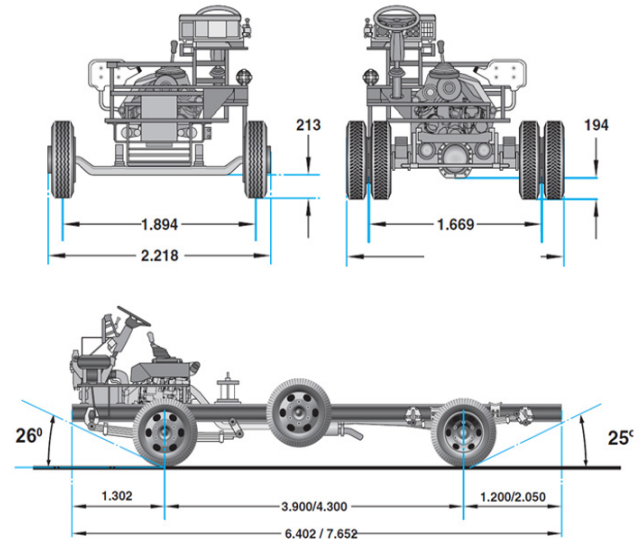


Figura 4. Dimensiones del Chasis

### 3.1 Modelado.

La estructura para el minibus se modela con el programa de diseño asistido por computador SpaceClaim, dentro del cual se utilizan geometrías de tipo Shell con la finalidad de alivianar el gasto computacional al momento de simular con LS-DYNA. La superestructura es colocada en la posición de la figura 5, lo cual simula el vehículo milisegundos antes que esté en contacto con el piso.

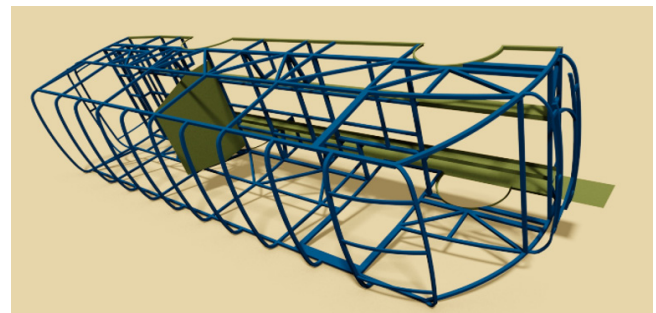


Figura 5. Modelado 3D de la estructura del minibus.

### 3.2 Mallado

El mallado generado en Ansys Workbench LS-DYNA tiene en su gran mayoría elementos discretos con geometría cuadriláteras homogéneas tipo Shell lo cual garantiza un modelo matemático eficiente para que la solución converja empleando

un gasto computacional razonable y obtener resultados precisos con poco tiempo de simulación. En la figura 6 se observa la malla de la superestructura con 98078 nodos y 97321 elementos.

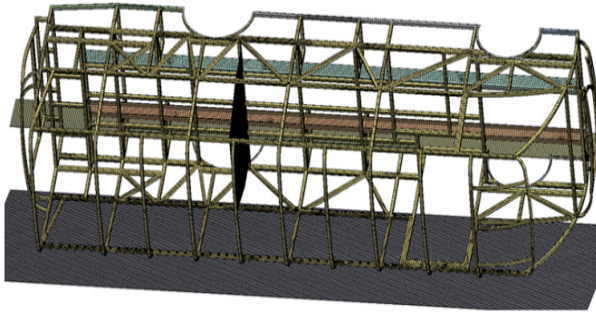


Figura 6. Mallado en Ansys Workbench LS-DYNA.

### 3.3 Condiciones de Borde

Para la simulación del volcamiento de la superestructura se consideran dos condiciones de borde; la primera consiste en la carga muerta en donde se consideran todos los componentes del autobús tanto como carrocería y chasis, la segunda condición de borde es la velocidad angular producida por el giro del autobús.

Cálculo de la carga muerta:

$$F = m_T \cdot g \quad \text{Ec. 1}$$

$$F = 9200 \text{ Kg} \cdot 9,8 \text{ m} / \text{s}^2$$

$$F = 90160 \text{ N}$$

Velocidad angular considerada:

$$W = 0,1 \text{ rad} / \text{s} \quad \text{Ec. 2}$$

### 3.4 Material

El material empleado para la simulación es acero al carbono de grado D y E con propiedades no lineales específicos en el software para este tipo de simulación dinámica no lineal, lo cual hace que se produzca una re-calculación en un período de ciclos para obtener datos reales en la simulación.

### 3.5 Hourglassing

Dentro del análisis, al emplear elementos tipo Shell y Solid se debe prestar especial atención al modelado ya que puede producir elementos discretos que produzcan modos de energía cero, lo cual resulta en estados matemáticos que no son físicamente posible; un adecuado refinamiento y calidad de malla evitan el efecto Hourglassing.

### 3.6 Simulación

Para la simulación se utilizó un procesador Intel Inside Core i7 con 32 Gb de memoria RAM; el tiempo calculado por el software para la simulación es de 22 horas aproximadamente para 150 milisegundos con las condiciones de borde anteriormente expuestas, además proporcionando sujeciones fijas al piso y a la rampa de volteo.

## 4. RESULTADOS

En la figura 7 se tiene que el esfuerzo máximo es de 341.06 MPa.

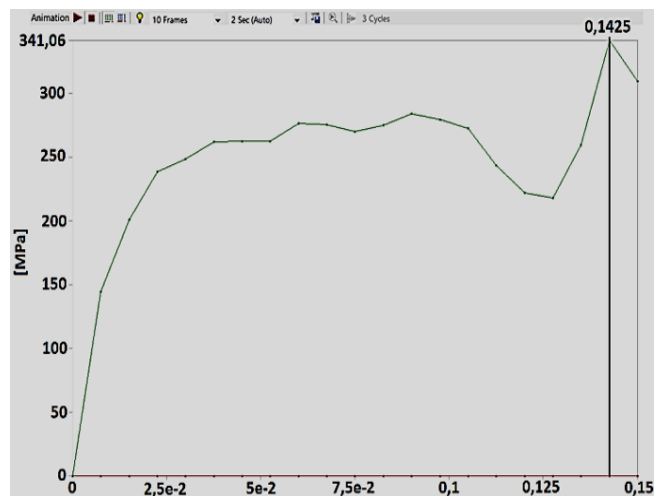
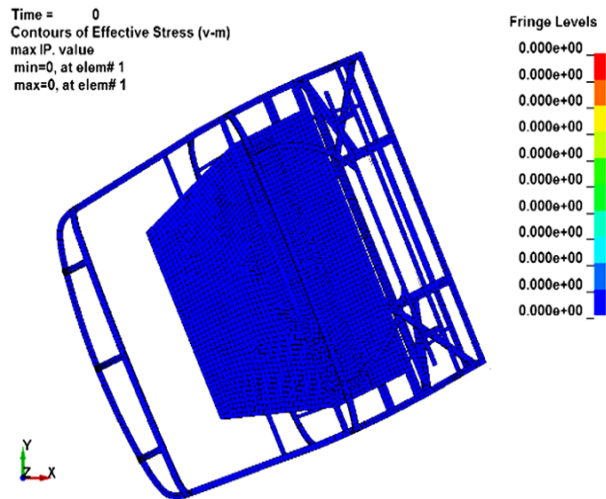
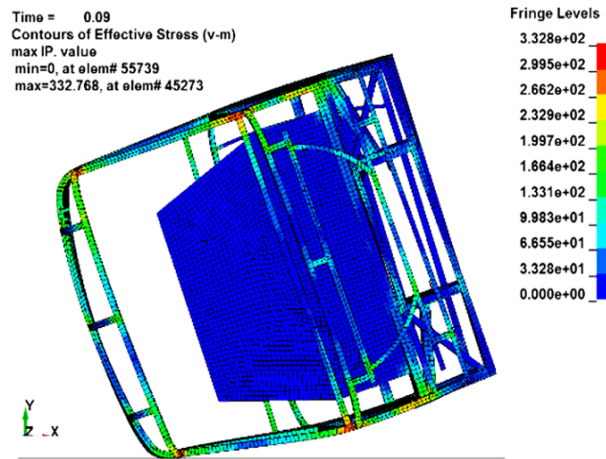


Figura 7. Gráfico Esfuerzo (MPa) vs. Tiempo de Simulación (mseg)

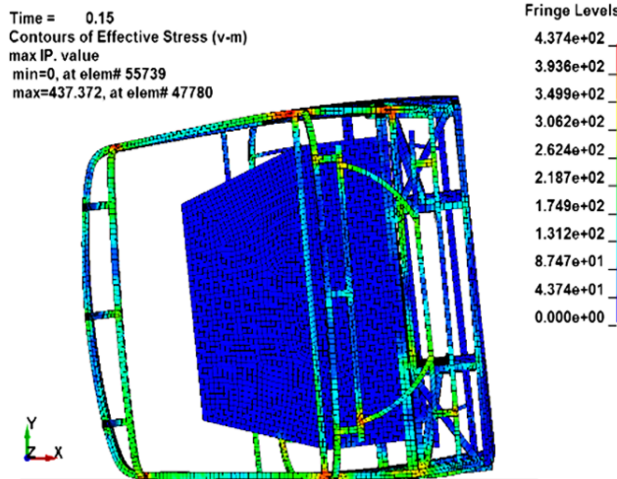
En la figura 8, se puede observar los resultados obtenidos con respecto a esfuerzos efectivos, para un tiempo de 0, 0.09 y 0.15 segundos.



a) Tiempo de 0 segundos



b) Tiempo de 0,09 segundos



c) Tiempo de 0,15 segundos

Figura 8. Resultados de esfuerzo efectivo en vista frontal

En la figura 9 se puede observar los resultados obtenidos con respecto a deformación máxima

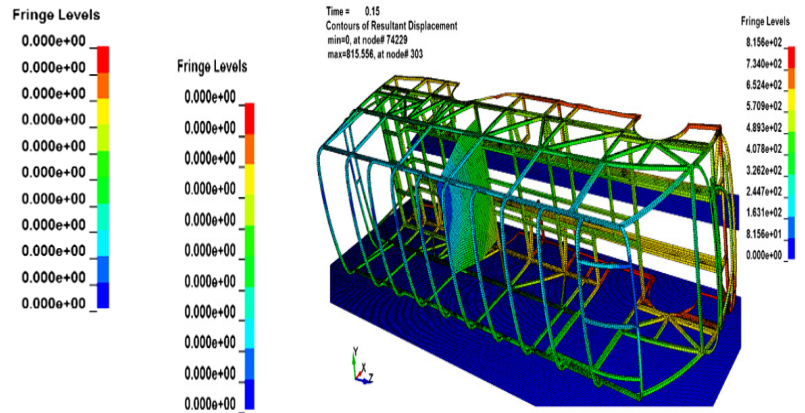


Figura 9. Resultados de deformación máxima en vista isométrica

Con los resultados anteriormente obtenidos se puede analizar el comportamiento de la estructura y saber si la deformación de la misma invade el espacio de supervivencia. La deformación que se considera para el análisis es aquella que se encuentra de color verde en la escala con un valor de 50 cm (figura 10).

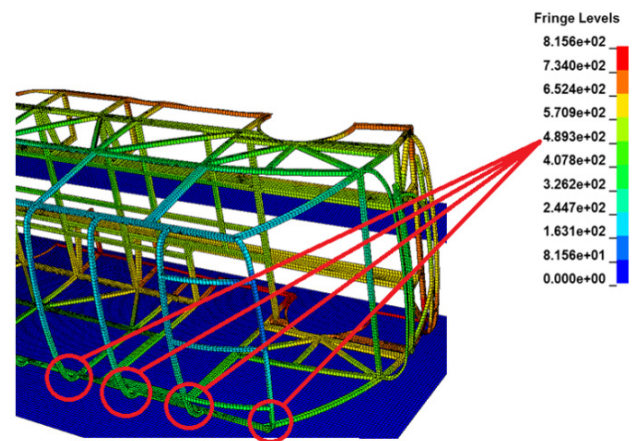


Figura 10. Deformación de 50 cm en estructura

El espacio de supervivencia tiene una altura de 1250 mm; la altura de la estructura desde el piso del bus es de 2190 mm. La diferencia de las dos medidas da como resultado 940 mm; esto implica que la deformación no debe ser mayor a este último valor.

Debido a que no se invade el espacio de supervivencia la estructura no necesita ningún tipo de optimización en su material o dimensiones.

## 5. CONCLUSIONES

Finalizado el desarrollo del presente artículo de investigación, se pone en consideración las siguientes conclusiones con el propósito de que se constituyan en un referente y fuente de consulta por parte de profesionales relacionados al área.

- La simulación del volcamiento para un minibus permite ahorrar tiempo y dinero al no realizar el ensayo físico del mismo; en esta investigación se validó positivamente el diseño de la estructura al comprobar que no se invade el espacio de supervivencia de las personas durante el impacto.
- Para el análisis de vuelco se eliminaron algunos miembros estructurales del modelo CAD (previamente analizando la importancia estructural de los mismos) con el fin de reducir el tiempo de simulación, lo cual indica que este ensayo es un estudio crítico en el cual los resultados obtenidos vendrían a ser los máximos que puede experimentar la estructura en este ensayo.
- Para el análisis se utilizaron miembros de tipo Shell los cuales son elementos teóricamente homogéneos con secciones cuadradas y rectangulares. Los espesores especificados para cada miembro son de 2 y 3 mm. En estructuras reales de carrocerías se evidencian fallas como: elementos no homogéneos con cortes, ranuras, perforaciones entre otras, que se dan inevitablemente en la construcción de carrocerías por esta razón se debe tener estas consideraciones antes de tomar cualquier decisión de optimización estructural.
- Este ensayo de prueba de vuelco es una simulación muy básica de seguridad, por esta razón es importante la investigación de impactos suscitados en la automoción para proponer nuevos reglamentos, los cuales deben ser obligatorios para todas las

empresas fabricantes de carrocerías de buses en los cuales se simule y se compruebe la resistencia de autobuses en choques frontales, laterales, posteriores, resistencia estructurales de asientos, resistencia de cinturones de seguridad, colisiones de maniquís de pruebas (biomecánica), implementación de elementos de seguridad (airbag), entre otros. Todos estos ensayos con el fin de salvaguardar las vidas de las personas.

## REFERENCIAS

- [1] El Telégrafo (14 de julio del 2015), "536 muertes por accidentes de tránsito en el primer trimestre de 2015" [En línea]. Disponible en: <http://telegrafo.com.ec/noticias/informacion-general/item/muertes-por-accidentes-de-transito-se-redujeron-un-1572-en-lo-que-va-de-2015.html>. [Último acceso: 2015 agosto 10].
- [2] Belsare V., Pathak Ch. y Kulkarni M. (Octubre del 2012), "Rollover Analysis of Passenger Bus as per AIS-031", Inda: Department of Mechanical Engineering. University of Pune. Maharashtra.
- [3] Micu A., Lozsa M. y Fratila G. (s.f.), "Experimental Test and Computer Simulation Research on Rollover Impact of a Bus Structure", Automotive Engineering Department. University POLITEHNICA of Bucharest. Romania.
- [4] Srinivasulu T., (s.f.), "Bus Rollover Simulation using Body Sections in Radioss", Chennai. India: Ashok Leyland Technical Center.
- [5] Instituto Ecuatoriano de Normalización (2009), "NTE INEN 1323:2009 Primera Revisión: Vehículos Automotores. Carrocerías de Buses.

Requisitos”, Quito – Ecuador..

[6] United Nations (Febrero 22, 2006.), “Regulation No. 66: Uniform Technical Prescriptions Concerning the Approval of Large Passenger Vehicles with Regard to the Strength of their Superstructure”.

[7] Deshmukh P. y Babasaheb A. (Diciembre del 2006), “Rollover and Roof Crush Analysis of Low – Floor Mass Transit Bus”, Department of Mechanical Engineering. Wichita State University.



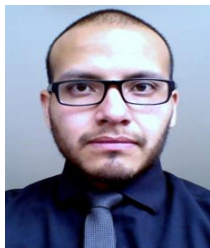
3 Patricia Constante, Maestría en Diseño Producción y Automatización Industrial, Ingeniera en Mecatrónica, Técnico Docente del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE.

Registro de publicación:	
Fecha de recepción	15 de julio 2015
Fecha aceptación	28 noviembre 2015

## BIOGRAFÍA



1 Milton Brito, Ingeniero Automotriz de la Escuela Politécnica del Ejército Sede Latacunga. Jefe de Diseño y Producción Carrocerías Varma S.A.



2 Andrés Gordón, Maestría en Diseño Producción y Automatización Industrial, Ingeniero en Mecatrónica, Técnico Docente del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE.