

First Latin American Laboratory for Virtual Structural Tests in Transport Buses: Innovation and Accreditation

Primer Laboratorio de Ensayos Estructurales Virtuales de Autobuses en Latinoamérica: Innovación y Acreditación

J.L. Cepeda¹

¹Corporación Ingeniería Avanzada COINAV del Ecuador S.A., Ambato, Ecuador
E-mail: jorge.cepeda@coinav.com

Abstract

Traffic accidents cause more than 5000 fatalities per year in Ecuador. And when talking about public transport, bus overturns cause concern with no less alarming figures, and that are increasing. Given this perspective, it is necessary for buses to be tested and to ensure that they protect the integrity of people before they go out. Does this involve destroying buses and injuring people to prove they are safe? No way. Thanks to the technology incursion of the fourth industrial revolution, it is possible to model, simulate, optimize and have a better understanding of what happens during an impact or rollover. The Finite Element Method is used to execute rollover tests, but a well-planned and implemented systematization is necessary for the method to be applied properly. The main innovation is the use of an appropriately applied technology, which manages to verify the safety of buses that circulate in Ecuador and Latin America, avoiding destroying buses, saving raw materials of already built buses, not wasting hours / man. Save lives.

Index terms— Accreditation, Laboratory, Structural Tests, Finite Elements, HyperWorks, Rollover

Resumen

Los accidentes de tránsito causan más de 5000 víctimas mortales por año en el Ecuador. Y al hablar de transporte público, las volcaduras de autobuses causan preocupación con cifras no menos alarmantes, y que van en aumento. Ante esta perspectiva, es necesario que los autobuses sean probados y se garantice que protegen la integridad de las personas antes de que salgan a circulación. ¿Implica esto destruir buses y herir personas para probar que son seguros? De ninguna manera. Gracias a la incursión de tecnologías de la cuarta revolución industrial, es posible modelar, simular, optimizar y tener un mejor entendimiento de lo que sucede durante un impacto o volcadura. El Método de elementos finitos es usado para ejecutar ensayos de volcadura, pero es necesaria una sistematización bien planificada e implementada para que el método se aplique de manera adecuada. La innovación principal lo constituye el uso de una tecnología aplicada de manera adecuada, que logra verificar la seguridad de los autobuses que circulan en Ecuador y Latinoamérica, evitando destruir autobuses, ahorrando materias primas de autobuses ya construidos, no desperdicio de horas/hombre. Logra salvar vidas.

Palabras clave— Acreditación, Laboratorio, Ensayos Estructurales, Elementos Finitos, HyperWorks, Volcadura.

Recibido: 10-12-2019, Aprobado tras revisión: 20-01-2020

Forma sugerida de citación: Cepeda, J.; (2020). "Primer Laboratorio de Ensayos Estructurales Virtuales de Autobuses en Latinoamérica: Innovación y Acreditación". Revista Técnica "energía". No. 16, Issue II, Pp. 168-176

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

© 2020 Operador Nacional de Electricidad, CENACE



1. INTRODUCCIÓN

La importancia de la seguridad que brinden los autobuses dentro del transporte terrestre de personas en el Ecuador es enorme. Solamente en Quito, se estima que 1'100.000 personas utilizan el servicio, al día [1]. Un gran porcentaje de la capital del Ecuador. Y la base de la mencionada importancia radica en que los autobuses están llamados a brindar protección a la integridad física de las personas que se transportan en ellos en caso de accidente.

Las alarmantes cifras que proporciona Justicia Vial [2] hablan de más de 5000 víctimas mortales de accidentes de tránsito por año. Los siniestros de magnitud, (cuando existen más de 15 víctimas entre muertos y heridos) tienen una periodicidad de 24 días, versus la Comunidad Europea, que es de 720 días [2].

Específicamente, dentro de los principales tipos de colisiones en los que se ven involucrados los vehículos móviles y los autobuses (como tema principal de análisis), la volcadura o volcamiento genera preocupación debido al alto índice de personas gravemente heridas que se suscitan cuando ocurre. Según el Informe Anual de Accidentes de Tránsito 2007-2016 de la Comunidad Andina [3], los accidentes por volcadura presentan un incremento promedio de 10% entre los años 2006 y 2017.

Ante esta realidad, es necesario que se demuestre de alguna forma si los autobuses que circulan por las vías protegen de manera adecuada a sus ocupantes en caso de volcadura. Y la demostración viene dada cuando el autobús es sometido a una prueba de volcadura, en la cual, se hace volcar un autobús en condiciones controladas.

Tanto autoridades nacionales como organismos internacionales se han encargado de regular las pruebas que permitan evaluar el comportamiento de los autobuses ante choques e impactos. Se plantea dos alternativas [4]:

1. Evaluación de comportamiento de autobuses ya construidos (Pruebas de choque de buses reales)
2. Otras opciones tecnológicas enmarcadas dentro de la Industria 4.0

La alternativa No. 1 presenta varias aristas complicadas desde el punto de vista personal, al poner en peligro vidas humanas, económico (situación actual del país), técnico de costos (altos costos de un autobús para destruir en pruebas), industrial (fabricantes ecuatorianos en crisis) y de gran inversión.

Con la perspectiva esbozada para la alternativa No. 1, es inevitable voltear la mirada al análisis de viabilidad de la segunda alternativa como objetivo de la presente investigación: ¿Es posible realizar Pruebas de Choque de autobuses de otra manera que no sea destruir autobuses reales?

Para iniciar a responder la pregunta planteada, el lector debe ubicarse en los albores de la Cuarta Revolución industrial, la cual, según los especialistas, está iniciando (o ha dado inicio) [5]. Con la nueva gama de tecnologías que fusionan los mundos físico, digital y biológico [5], la influencia en disciplinas clásicas como la mecánica de sólidos y el estudio de colisiones vehiculares es enorme, y constituye un cambio de paradigma respecto de lo que se conocía hasta hace algunos años [6].

En este punto es importante notar el giro de la fabricación de productos a nivel mundial, en el cual, cada vez se requiere menos pruebas físicas, dado que se ha demostrado que se obtienen los mismos resultados con pruebas virtuales, como es el caso de Boeing [7]. Y esto tiene claros motivos:

- Reducción de horas de pruebas físicas, dado que se dispone de las metodologías probadas y validadas para obtener resultados reales
- Reducción de tiempo de desarrollo de productos, con lo cual el costo total de desarrollos baja sustancialmente [8]
- Ahorro de materias primas en la ejecución de pruebas físicas que puedan ser reemplazadas por pruebas virtuales, con lo cual el medio ambiente no se ve afectado con chatarra que no se puede reciclar, como es el caso de varios componentes electrónicos [9].

En términos de la acción por el clima al aplicar de tecnologías de simulación, los ingenieros de diseño modernos tienen en su enfoque la implementación de metodologías que permitan el ahorro de materias primas y el mejoramiento de los procesos productivos [10]. En el Ecuador, el laboratorio virtual de carrocerías de autobuses recoge esta conciencia ambiental. El análisis más importante es la eliminación de chatarra de autobuses impactados, los cuales, para su construcción, consumen grandes cantidades de energía, y producen grandes cantidades de emisiones de carbono [11]. El objetivo es usar ese material en nuevos productos que tengan real utilidad [12]. El impacto ambiental mide términos de huella de carbono, consumo de energía e impactos en el aire y en el agua, la cual, según estudios, mejora de manera categórica al usar tecnología de simulación virtual para sus pruebas [10, 11, 13, 14], debido a que se ha encontrado que los componentes probados virtualmente poseen un impacto ambiental mínimo.

Se conoce de la implementación de laboratorios con alcances mayores a nivel internacional, específicamente en España, con el Laboratorio de la UPM denominado INSIA, el cual nace con la consigna de probar los autobuses fabricados en ese país con tecnología tanto virtual como física. Según los resultados del informe [12], se ha logrado bajar la cantidad de personas fallecidas en accidentes de autobuses en el período del 2000 al 2013 en un 5.7%. La existencia de un

laboratorio global llamado IDIADA [15], el cual cuenta con modernas pistas de pruebas.

La tecnología en la actualidad es capaz no solamente de recrear colisiones en computador, a través de software especializado desarrollado para el efecto, sino que puede hacerlo con total apego a la realidad. El Método de Elementos Finitos FEM (Finite Element Method, por sus siglas en inglés) y su uso aplicado a través de computadores es el principal ejemplo de la tecnología usada en la actualidad.

La bibliografía [16] reporta que los resultados obtenidos aplicando FEM son aceptables, en tanto y en cuanto se aplique dicho método con determinadas condiciones que aseguren la calidad de los resultados [17].

Es en este punto donde se hace necesaria la incursión de una sistematización en la aplicación del FEM para estudio de volcadura de autobuses, la cual, asegure que la calidad de los resultados de los ensayos sea óptima en todo momento. Y aquí es donde surge también la necesidad de la creación y desarrollo de un laboratorio virtual, el cual, reciba el reconocimiento formal de su competencia para efectuar la aplicación del FEM para la evaluación de volcaduras y colisiones en autobuses.

El análisis expuesto en el párrafo anterior despierta el interés del estudio e implementación de un Laboratorio de Autobuses en el mundo virtual. El objetivo de las siguientes líneas es describir el desarrollo de metodologías sistemáticas para el establecimiento de un Laboratorio de Evaluación de Autobuses Virtual que cubra los requisitos necesarios para ser reconocido a nivel internacional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo de la presente investigación se dividirá en dos partes:

2.1 Desarrollo de metodología para aplicación práctica del método de ensayo (basado en [18])

El Método de Elementos Finitos es una herramienta efectiva para simular el comportamiento de partes de geometría compleja ante fenómenos de impacto [19, 20], debido a que provee una manera efectiva de medir las distribuciones de esfuerzos y deformaciones unitarias, muy difíciles de obtener de otra manera [21, 22].

En los análisis dinámicos, una excitación transitoria es una carga altamente dinámica y dependiente del tiempo aplicada sobre un componente, en este caso, un impacto. La ecuación gobernante del sistema es (1) [23]:

$$KD + C\dot{D} + M\ddot{D} = F \quad (1)$$

Que se conoce como la Ecuación de Movimiento de Newton [24]. La matriz M corresponde a la matriz global de masa, la matriz K corresponde a la de rigidez

global del sistema, C es la matriz de coeficientes de amortiguamiento (determinados experimentalmente) y D es el vector de todos los desplazamientos de todos los nodos del sistema. La relación entre las variables determina el comportamiento del sistema.

En función de la aplicación práctica del principio fundamental esbozado, se desarrolló la metodología práctica para la ejecución de ensayos virtuales de volcadura, la cual incluye [18], véase Fig. 1:

- Análisis de planimetría del autobús a ser ensayado (en 2D). dicha planimetría debe ser desarrollada por el fabricante de la carrocería
- Modelado geométrico del autobús (en 3D), con el objetivo de replicar en la computadora el autobús con el mayor detalle posible.
- Modelado matemático del autobús, es decir, señalar coordenadas de puntos para posteriormente encontrar cargas y deformaciones.
- Modelado de cargas: aplicación del peso de pasajeros y demás cargas que se presentan en un autobús
- Evaluación de resultados: análisis del comportamiento estructural del autobús.

El mapa de metodologías se muestra en la fig. 1

2.2 Uso de Metodologías en la práctica

En el campo de Evaluación estructural y de vuelco de autobuses, y siendo la primera empresa de ingeniería en el Ecuador que realiza evaluaciones de autobuses, COINAV S.A. ha desarrollado sus propias metodologías y KnowHow, y con ello, ha resuelto problemas de diseño en la industria de fabricación de autobuses aplicando Ingeniería Asistida por Computador y la tecnología de HyperWorks®.

El proceso inicia con la revisión de planos 2D enviados por las empresas fabricantes o importadores de autobuses. En este paso se evalúa la calidad con la que son efectuados los planos. Seguidamente se realiza el modelado en 3D de la estructura del autobús, a pleno detalle, para representar todos los refuerzos estructurales que aportan al autobús. El modelado matemático es el proceso más importante, en el cual se realiza una discretización de la estructura del autobús usando HyperWorks. Por último, se simula las cargas críticas que soporta la estructura, se soluciona el análisis de elementos finitos y se obtiene los resultados que permiten saber el comportamiento estructural del autobús. Ver Fig. 2.

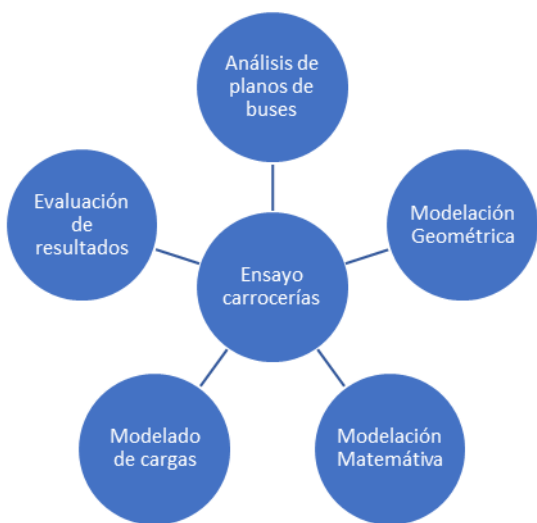


Figura 1. Metodología de ensayo estructural de autobuses



Figura 2. Metodología práctica de ensayo estructural de autobuses

Para la ejecución de las metodologías mencionadas se dispone de equipos computacionales de última generación (workstations), las cuales poseen el poder computacional suficiente para tratar gráficas de alta complejidad. El manejo gráfico es el más importante, para lo cual se dispone de tarjetas especiales calibradas para el efecto

2.3 Herramienta computacional usada.

Para la selección de HyperWorks como herramienta de simulación virtual, el Laboratorio usó varios criterios:

- Poder computacional. Con HyperWorks fue posible realizar el mallado de estructuras de autobuses muy complejas, lo cual fue muy complicado (o en ciertas ocasiones no fue posible) con otros softwares comerciales, como ANSYS [18, 20, 25-27]
- Tiempo de ensayo. HyperWorks permite que el flujo de ensayos se realice en 7 días laborables, cosa que otros software comerciales no lograron en pruebas realizadas [27].

- Uso a nivel mundial. De la investigación realizada por el laboratorio, existen más de 21 aplicaciones de HyperWorks en análisis de autobuses [27]
- Capacitación. Se tiene el apoyo de Altair México en términos de capacitación del personal y apoyo técnico
- Costo. HyperWorks tiene un costo inferior al de softwares comerciales con características similares, como ANSYS.

2.4 Desarrollo de metodología de sistematización de Ensayos de volcadura de autobuses

Para sistematizar los ensayos estructurales de autobuses se implementó la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN ISO/IEC 17025:2006, estableciendo Directrices y Procedimientos que son de obligado cumplimiento en el Laboratorio.

Dichas directrices y procedimientos son aplicadas a todas las actividades del Laboratorio de Ensayos Estructurales de Carrocerías de Autobuses de COINAV del Ecuador S.A., y a todo el personal descrito dentro del área de Laboratorio y afines en el organigrama, incluyendo áreas físicas delimitadas, equipos y documentación

El sistema de gestión diseñado para el laboratorio incluye:

- Diseño de actividades y procesos, para organizarlos de manera adecuada.
- Sistematización de metodología de simulación de volcadura, usando técnicas de recopilación y ordenamiento de información.
- Fuerte compromiso de confidencialidad en el tratamiento de información sensible de fabricantes de autobuses.
- Acciones en caso de conflictos de interés.
- Demostración de cumplimiento de competencia técnica.
- Sistemática para planificación de ensayos
- Sistemática de quejas y reclamos
- Correcta organización de puestos de trabajo en función de la estrategia del laboratorio.

En este sentido, el laboratorio realizó un análisis exhaustivo para optimizar los recursos humanos disponibles, para lo cual, diseñó un organigrama óptimo que permite que los colaboradores sean capacitados en función de las tareas y responsabilidades asignadas, de manera ordenada y en función de sus objetivos en el laboratorio. Ver Fig. 3.



Figura 3. Organigrama de COINAV S.A.

Una mención especial son los procesos y sistemáticas desarrolladas para los apartados:

- Mantenimiento dedicado de equipos especiales de cómputo
- Análisis y tratamiento de riesgos tanto internos como externos
- Manejo adecuado de quejas que puedan surgir del cliente
- Verificación y validación del método, usando metodologías recomendadas en la bibliografía [6, 16, 19, 23, 24, 28-30]
- Estimación de incertidumbre de los resultados obtenidos, en función de los parámetros del método de elementos finitos validado por el laboratorio.
- Sistemáticas de aseguramiento de la calidad, mediante los cuales, se aplique el método de elementos finitos dentro de las condiciones validadas.

2.5 Acreditación

El objetivo fundamental para la implementación de las sistemáticas mencionadas es la obtención de la Acreditación para el Laboratorio de Ensayos Estructurales. La acreditación es “la herramienta establecida a escala internacional para generar confianza en los resultados de los laboratorios de ensayo y de calibración” [31].

Cuando un laboratorio está acreditado por un organismo de acreditación reconocido, éste ha demostrado previamente su capacidad para alcanzar un nivel prescrito de competencia técnica, pudiendo emitir resultados trazables y reproducibles, es decir, la obtención de resultados analíticos fiables, y esto tiene una enorme importancia en todos los sectores de la sociedad actual, ya que gracias a ellos se garantiza en gran parte no sólo la calidad sino la seguridad de los diferentes productos a los que tiene acceso el consumidor, y se favorece la competitividad en mercados cada vez más globalizados, evitando posibles barreras comerciales [31].

Se dieron varios pasos estratégicos hacia lograr acreditar el Laboratorio:

- Capacitar a todo el personal en temas inherentes a normativas y calidad, para lograr compromiso.
- Madurar el sistema de gestión, para ganar experiencia y recopilación de datos.
- Investigar bibliografía especializada en validación de métodos y determinación de incertidumbre de resultados.

Adicionalmente fue necesaria una dosis de buenas prácticas industriales para lograr que los departamentos técnico y administrativo engranen de manera adecuada

Las acciones por el clima logradas incluyen la no utilización de registros físicos, es decir, toda la documentación técnica producto de las labores del laboratorio se guarda en la nube y no se imprime.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1 Discusión acerca de pruebas de choque físicas.

Para la implementación de Pruebas de choque de buses reales es necesario realizar un análisis económico, técnico de costos, industrial y de inversión externa (estatal o privada) para establecer las condiciones en las que se encuentra el Ecuador en la actualidad.

No se debe olvidar, sin embargo, que, en pruebas reales de autobuses, siempre estarán involucradas personas. Dicho costo siempre será el más alto de pagar, dado que una vida es irremplazable.

Desde el punto de vista económico: la realidad económica del país presenta un estado “inquietante” [32], con un descenso en la inversión del 2.3% y una tendencia a un crecimiento casi nulo de la economía al final del 2019 [32].

Desde el punto de vista técnico de costos, es interesante notar que un autobús interprovincial usado, listo para su utilización, tiene un costo que varía entre 50.000 y 90.000 dólares, y un autobús interprovincial nuevo aproximadamente cuesta un 20% más [33]. Estamos hablando de más de 100.000 dólares que quedarán inservibles luego de que el autobús sea chocado para probar si soporta el impacto. Adicionalmente se requiere instalaciones y facilidades para realizar dichas pruebas de choque, cuya inversión no sería baja.

Desde el punto de vista de la industria ecuatoriana, se registra una contracción en el mercado automotriz y especialmente en el sector metalmecánico de fabricación de autobuses, con una disminución de 25% en la producción de carrocerías nacionales en lo que va del 2019 [34]. Esto quiere decir que las empresas están produciendo menos buses, lo cual implica menores ingresos, menores compras y menor flujo

económico. Esta situación dificulta el sostenimiento de plazas de trabajo y hace más difícil que se planifique inversión en proyectos a gran escala, como es la implementación de centros de pruebas de choques de autobuses.

Una inversión externa sería necesaria, en función de las condiciones económicas y técnicas del Ecuador en las actuales condiciones. Dicha inversión sale de las manos de la industria, y no se conocen planes estatales para que se realice.

3.2 Discusión: uso de pruebas virtuales.

El entendimiento del fenómeno de volcadura de autobuses se ha potenciado debido a la incursión de tecnologías propias de la cuarta revolución industrial, mediante las cuales, se puede en la actualidad modelar dicho fenómeno, conservando todas sus características, para estudiar el comportamiento físico y mecánico del objeto del estudio, y predecir su comportamiento en el mundo real.

Usando los términos mostrados en el párrafo anterior, los modelos a ser estudiados por el laboratorio son los autobuses, y se modela todo el evento de volcadura, incluyendo velocidades, aceleraciones, fuerzas, inercias, el comportamiento de los materiales en función de las geometrías del diseño estructural de los autobuses. Todo en computadora. Dicha aplicación pone en práctica de principios científicos y técnicos de Análisis Dinámico No-lineal, rama del conocimiento que utilizan el Método de Elementos Finitos (FEM, por sus siglas en inglés) para el estudio de los fenómenos de volcadura [18].

La bibliografía [4, 6, 16-18, 20, 23-25, 28, 30, 35-40] soporta de manera amplia la aplicación a nivel mundial del Método de Elementos Finitos para la evaluación de volcaduras y colisiones en autobuses, de manera virtual.

Aplicando un análisis similar al expuesto en la introducción para la alternativa No. 1, la aplicación del FEM tiene un costo de implementación evidentemente menor al de la implementación de un centro de colisiones de autobuses, principalmente porque no se requerirá destruir buses que se encuentren terminados y listos para trabajar, y porque la infraestructura necesaria para la implementación de un laboratorio virtual se reduce considerablemente. Y evidentemente la razón más importante: costos humanos nulos, dado que no se arriesga ninguna vida en ensayos computacionales.

3.3 Discusión respecto a la metodología de ensayo desarrollada y la innovación conseguida [18]

La aplicación del método de elementos finitos, se ejecuta en el proceso de modelado matemático, en el cual se utiliza criterios de mallado [18] y recomendaciones prácticas citadas por diversos autores

y en base a la experiencia del autor, mostrados en las referencias [1, 8, 21, 22]. Ver Fig. 4.



Figura 4. Modelo matemático correspondiente a la estructura completa.

Para la solución del evento de impacto, se escogió un código especializado en la simulación de eventos no-lineales, dinámicos y que impliquen grandes deformaciones, como lo es HyperWorks® [18], lo cual representa una innovación en el campo de la ingeniería en el país, al ser un software poco conocido en nuestro medio, pero el más usado por industrias automotrices y aeronáuticas a nivel mundial para análisis dinámicos no-lineales. Dicho código ha sido probado por un gran número de trabajos de investigación, tesis y proyectos industriales a nivel mundial, y es el recomendado por diversos autores [1, 8, 22-24] por su poder computacional de mallado y aplicación de solvers como Radioss [18]. Véase Fig. 5.

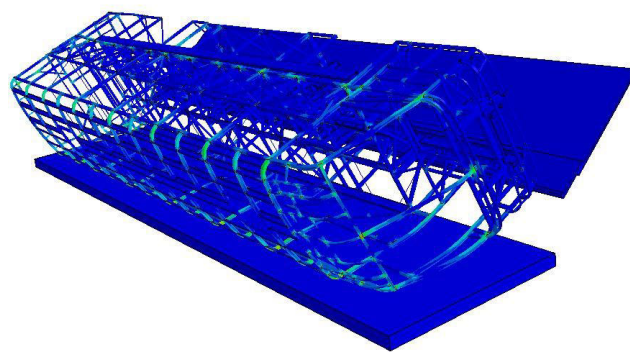


Figura 5. Post-procesamiento de la simulación del modelo matemático correspondiente a estructura completa de autobús

Debido a que el modelado del evento de volcadura se realiza con un enorme detalle, tanto en la parte técnica como matemática, se ha demostrado que la cercanía con la realidad es alta, con diferencias máximas del 4% respecto de resultados reales.

La principal debilidad encontrada en la metodología es la dificultad de realizar correcciones una vez que la malla se encuentre realizada. Dicha situación puede revertirse tomando todas las medidas detalladas en el sistema de gestión para evitar dicha condición.

(4) Argumentación respecto de metodologías de sistematización y Acreditación

Luego de un período de mucho esfuerzo y sacrificio por parte de todos los colaboradores de COINAV S.A., el reconocimiento de la Acreditación fue conseguido por el equipo.

La acreditación lograda fue otorgada por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano SAE, el cual constató la competencia técnica de los profesionales que laboran en el Laboratorio [41].

Con la obtención de la Acreditación el Laboratorio de Carrocerías de COINAV S.A. seguirá aportando a la seguridad en el Ecuador, y espera también poder aportar a que se mejoren las condiciones de seguridad de autobuses en Latinoamérica [41].

Existen muchos puntos que mejorar en el sistema de gestión del Laboratorio de Carrocerías de COINAV S.A., para lo cual, sus colaboradores hacen revisiones periódicas en búsqueda de oportunidades de mejora, con la actitud de mejorar cada día.

Argumentación respecto de las pruebas efectuadas a otros softwares comerciales.

Se evaluó la diferencia en resultados obtenidos por el software HyperWorks comparados con el software ANSYS LS-Dyna. Se ejecutó el mallado de probeta en cada software por separado, (HyperMesh para HyperWorks, ANSYS para Ls-Dyna), y en preprocesadores diferentes (HyperCrash para HyperWorks, ANSYS para Ls-Dyna). Las soluciones igualmente se harán en solvers diferentes (Radioss y Ls-Dyna). [27]

La Fig. 6 siguiente muestra curvas carga-desplazamiento que describen el comportamiento del análisis dependiendo del software y el tamaño de malla.

De la Fig. 6 se puede observar la diferencia existente entre resultados obtenidos por diferente software. Las diferencias porcentuales son en promedio de del 1.9% en la totalidad de las lecturas [27].

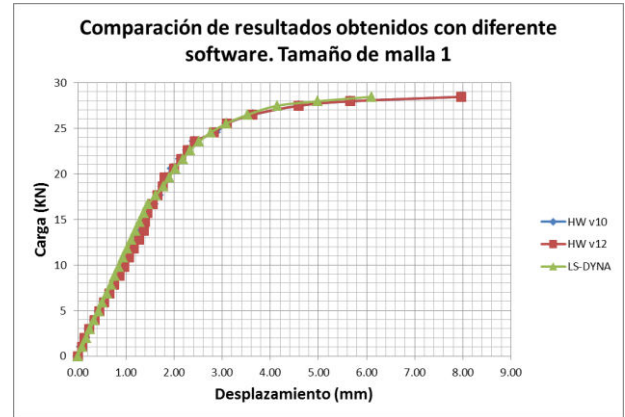


Figura 6. Resultados promedio (3 repeticiones) obtenidos para tamaño de malla 1 ejecutados en solvers diferentes

4. CONCLUSIONES

Se ha logrado implementar un Laboratorio de Carrocerías y obtener una Acreditación internacional, con la cual los resultados del laboratorio son confiables.

Es importante la acción por el clima lograda por el laboratorio, dado que la realización de pruebas virtuales ha evitado la destrucción de alrededor de 100 autobuses en dos años, cuyo costo es alto y cuyo efecto desde el punto de vista ambiental es grande porque se ha logrado:

- Reducir horas de pruebas físicas de autobuses.
- Bajar el tiempo de pruebas, por consiguiente, de desarrollo de los mismos.
- Ahorrar materias primas y material que de otra forma no se hubiese podido reciclar, como materiales plásticos especiales.
- Las pruebas virtuales realizadas tienen un impacto ambiental mínimo y ayudan a eliminar la huella de carbono que producirían pruebas físicas
- Los resultados obtenidos de las pruebas están enmarcados dentro de las sistemáticas esbozadas en 2.5, y por la acreditación internacional obtenida, tienen competencia de aseguramiento de calidad dentro del alcance de la acreditación mostrada

El uso de metodologías virtuales conduce a la ejecución de pruebas amigables con el medio ambiente.

La acreditación internacional de un laboratorio virtual ecuatoriano abre las puertas para que la ingeniería del Ecuador amplíe su visión y tome acción para la creación de las soluciones que se requieren en el país.

No solamente se beneficia la industria metalmeccánica de fabricación de autobuses y la automotriz, ramas en las cuales no se tenía la presencia

de un laboratorio acreditado para la realización de ensayos o aplicación de metodologías de diseño, sino que la industria ecuatoriana en general se ve beneficiada con la posibilidad de ejecutar pruebas virtuales en otros ámbitos que no son solamente autobuses, y beneficiarse de todos los aspectos positivos de un laboratorio virtual analizados en éste documento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Quito_Informa. 2'400.000 de viajes persona en el Sistema de Transporte al día. 2017; Available from: <http://www.quitoinforma.gob.ec/2017/08/16/2400-000-de-personas-se-movilizan-el-sistema-de-transporte-al-dia/>
- [2] Morán, S., En seguridad vial también hubo una década perdida, in Plan V. 2018: Quito.
- [3] Comunidad_Andina, Informe Anual de Accidentes de Tránsito 2007-2016 in CAN. 2017.
- [4] P, M., Multibody Analysis of M3 Bus Rollover: Structural behaviour and passenger injury risk. Politecnico di Torino. Dipartimento di Meccanica., 2001. 228.
- [5] Destino_Negocio. ¿Qué es la Cuarta Revolución Industrial? 2019; Available from: <https://destinonegocio.com/mx/gestion-mx/que-es-la-cuarta-revolucion-industrial/>.
- [6] Kohler, J., Today's challenges in crash simulation, in 7th European LS-DYNA Conference. 2009, DYNAmore GmbH: Munich.
- [7] Johnson, E.M., Exclusive: Boeing seeking to reduce scope, duration of some physical tests for new aircraft - sources, in Business News. 2019, Reuters.
- [8] K. Tahera, C.F.E.a.C.M.E., Integrating Physical and Virtual Testing to Improve Confidence in Product Design. 2015.
- [9] Springer, B., Heidelberg, The Physical Test Design, in TestGoal. 2008, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [10] Vinodh, S., Environmental conscious product design using CAD and CAE. Clean Technologies and Environmental Policy., 2010. 13(10.1007/s10098-010-0310-8.): p. 359-367.
- [11] Zhang, C.H., Haihong & Zhang, Lei & Bao, Hong & Liu, Zhi-feng. , Low-carbon design of structural components by integrating material and structural optimization. . The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. , 2018. 95. .
- [12] Aparicio, F., Certificaciones de Seguridad en Empresas de Autobuses y Autocares: CSEAA e ISO 39001. II Congreso INTER-CISEV, 2017.
- [13] Hassan, M.F.S., Muhamad & Mahmood, Salwa & Muhd Nor, Nik Hisyamudin & Abdol Rahman, Mohd Nasrull. , Sustainability assessment methodology in product design: A review and directions for future research. . Jurnal Teknologi. , 2016. 79. (10.11113/jt.v79.8697.).
- [14] Mahmood, S., Sustainability in the Product Design: A Review of Recent Development Based on LCA. International Journal of Engineering & Technology., 2018. 7. (54. 10.14419/ijet.v7i3.7.16208.).
- [15] IDIADA. Applus + IDIADA integra pruebas físicas y virtuales con 2 nuevos simuladores de conducción VI-grade. 2019; Available from: <https://www.applusidiada.com/global/es/news/Appplus-+IDIADA-integra-pruebas-f%C3%ADsicas-y-virtuales-con-2-nuevos-simuladores-de-conducci%C3%B3n-VI-grade>.
- [16] Raghu, S., Concepts of computational finite elements and methods of static and dynamic analyses in MSC.Nastran and LD-DYNA. 2010, Lexington KY: Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- [17] Chen, G., FE MODEL VALIDATION FOR STRUCTURAL DYNAMICS, in Dynamics Section; Department of Mechanical Engineering. 2001, Imperial College of Science, Technology and Medicine University of London: London, South Kensington.
- [18] Cepeda, J., Desarrollo y aplicación de metodología para ejecutar ensayo dinámico de volcadura de autobús interprovincial autoportante, utilizando HyperWorks® in III Congreso Nacional de Ingeniería Automotriz y Desagregación Tecnológica. 2019: Riobamba.
- [19] Lessard, W.B., Modal and Impact Dynamics Analysis of an Aluminum Cylinder. 2002, Langley Research Center, National Aeronautics and Space Administration: Hampton, Virginia.
- [20] Cepeda, J., MODELACIÓN, PRUEBAS DE IMPACTO Y DISEÑO ROBUSTO DE REJILLA DE PROTECCIÓN DE BOCINAS AUTOMOTRICES PARA GENERAL MOTORS DE MEXICO, in MAESTRÍA EN INGENIERÍA AUTOMOTRIZ, MIR; CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MECATRÓNICA AUTOMOTRIZ, CIMA; Director: Dr. José Carlos Miranda 2011, TECNOLÓGICO DE MONTERREY: TOLUCA, MEXICO.
- [21] Behler, H. and J. Gobel, Verification of cylindrical interference fits under impact loads with LS-Dyna, in 7th European LS-DYNA Conference. 2009, DYNAmore GmbH: Munich.
- [22] Vasant, V., Transverse impact characteristics of adhesively bonded composite single lap joint, in

- College of Engineering. 2000, Wichita State University.
- [23] Liu, G.R. and S.S. Quek, *The Finite Element Method: A Practical Course*. 2003, Burlington MA: Butterworth-Heinemann.
- [24] Timmela, M., et al., A finite element model for impact simulation with laminated glass. *International Journal of Impact Engineering*, 2007. 34: p. 1465–1478.
- [25] Cepeda, J., ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL SISTEMA ESTRUCTURAL DEL AUTOBÚS FELINE PARA LA EMPRESA CARROCERA MIRAL BUSES., in *FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA*. 2006, ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO: Quito.
- [26] Cepeda, J., Desarrollo y aplicación de metodología para prueba de vuelco de autobús interprovincial autoportante, utilizando el software CAE HyperWorks® de Altair *REVISTA INFOCIENCIA ESPE*, 2017. 11(1): p. 67-73.
- [27] Cepeda, J., PR-VAL-03 (Procedimiento e Informe de validación de software). *Sistema de Gestión de Calidad COINAV S.A.*, 2018.
- [28] Schweizerhof, K., L. Nilsson, and J. Hallquist, Crashworthiness analysis in the automotive industry. *International Journal of Computer Applications and Technology*, 2000. 5.
- [29] Maurath, C.A., DEVELOPMENT AND VALIDATION OF A FINITE ELEMENT MODEL OF THE Q3 ANTHROPOMORPHIC TESTING DEVICE, in *Department of Civil and Environmental Engineering of The School of Engineering and Applied Science*. 2007, The George Washington University.
- [30] MATOLCSY, M., Technical questions of bus safety bumpers. *Scientific Society of Mech. Eng. Hungary*, 2000(05-0161).
- [31] COINAV_SA. ACREDITACIÓN INTERNACIONAL DE LABORATORIOS: ¿QUÉ ES? 2019; Available from: <http://blog.coinav.com/acreditacion-internacional-de-laboratorios-que-es/>.
- [32] ElTelégrafo. La economía crece un 0,6% pero la inversión baja un 2,3% *Centro de Estudios Latinoamericanos* 2019; Available from: <https://www.cesla.com/detalle-noticias-de-ecuador.php?Id=8195>.
- [33] Patiotuerca. Precio de autobús usado en Ecuador. 2019; Available from: <https://ecuador.patiotuerca.com/usados/-/pesados/autobus?orderBy=published-at,DESC>.
- [34] ELHeraldo. Carroceros redujeron 25% su producción. *Diario El Heraldo* 2019; Available from: <https://www.elheraldo.com.ec/carroceros-25-redujeron-produccion/>.
- [35] Bojanowski, C., *Verification, Validation and Optimization of Finite Element Model of Bus Structure for Rollover Test*. 2011: Proquest, Umi Dissertation Publishing.
- [36] Cascajosa, M., *Ingeniería de Vehículos, Sistemas y Cálculos*, ed. E. Tébar. Vol. 3ra. Edición. 2006, Madrid, España.
- [37] Cepeda, J., Registro de patente DYSIM: Programa y metodología para simulación de eventos cuasi-estáticos, dinámicos no lineales y de impacto automotrices aplicados. *Pruebas de vuelco de autobuses*, No. QUI-039142: Corporación de Ingeniería Avanzada COINAV del Ecuador S.A.; Ecuador 2012: Ecuador.
- [38] Colín, J., A FINITE ELEMENT SIMULATION OF A BAJA SAE VEHICLE TREE IMPACT INCLUDING A RIGID OCCUPANT. 2009, INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY: Toluca.
- [39] DuBois, P., *Crashworthiness Engineering*. 2004, Livermore CA: Livermore Software Technology Corporation.
- [40] FDOT, FLORIDA STANDARD FOR CRASHWORTHINESS AND SAFETY EVALUATION OF PARATRANSIT BUSES. NTSHA, 2009. Paper Number 09-0261.
- [41] COINAV_SA. COINAV S.A. OBTIENE ACREDITACION INTERNACIONAL. 2019; Available from: <http://blog.coinav.com/coinav-s-a-obtiene-acreditacion-internacional/>.

Jorge Luis Cepeda M.- Nació en Ambato, Ecuador en 1982. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Escuela Politécnica del Ejército ESPE en 2006; de Master en Ingeniería Automotriz del Tecnológico de Monterrey, México en 2011; y su título de Magister in Business Administration Universidad de las Américas, Quito, Ecuador. Sus campos de investigación están relacionados con el Desarrollo y aplicación de ingeniería asistida por computador en la mitigación de problemas que afectan a la población que se transporta en autobuses.

