

# 21

Fecha de presentación: febrero, 2023

Fecha de aceptación: abril, 2023

Fecha de publicación: junio, 2023

## ANÁLISIS DE CONVERGENCIA

DE MALLA EN SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE PRUEBA DE CHOQUE EN ASIENTO DE AUTOBÚS

### MESH CONVERGENCE ANALYSIS IN COMPUTATIONAL SIMULATION OF BUS SEAT CRASH TEST

Giovanny Vinicio Pineda Silva<sup>1</sup>

E-mail: [ua.giovannypineda@uniandes.edu.ec](mailto:ua.giovannypineda@uniandes.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4159-2156>

Jorge Luis Cepeda Miranda<sup>1</sup>

E-mail: [ua.jorgecepeda@uniandes.edu.ec](mailto:ua.jorgecepeda@uniandes.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1076-0516>

Esteban Fernando López Espinel<sup>1</sup>

E-mail: [ua.estebanle84@uniandes.edu.ec](mailto:ua.estebanle84@uniandes.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7502-3463>

<sup>1</sup> Universidad Regional Autónoma de Los Andes Ambato. Ecuador.

#### Cita sugerida (APA, séptima edición)

Pineda Silva, G. V., Cepeda Miranda, J. L., & López Espinel, E. F. (2023). Análisis de convergencia de malla en simulación computacional de prueba de choque en asiento de autobús. *Universidad y Sociedad*, 15(S2), 185-191.

#### RESUMEN

El principal riesgo al que se enfrentan las personas que viajan en vehículos motorizados es la posibilidad de sufrir lesiones como consecuencia de accidentes de tránsito, que ocurren con frecuencia en el territorio ecuatoriano. Dado que el asiento es la primera superficie en contacto con los pasajeros, es crucial que proporcione una protección adecuada en caso de colisión. Por ello, se han establecido normas y procedimientos de prueba en laboratorios especializados que contemplan la colocación de asientos en dispositivos únicos, así como su posterior colapso y destrucción. Si bien que la industria ecuatoriana de fabricación de asientos tiene la responsabilidad y el interés de someterlos a pruebas en laboratorios internacionales, se ha manifestado una cierta resistencia en función de los altos costos y de la falta de información sobre el comportamiento estructural actual de estos elementos. En consecuencia, el objetivo de este estudio es desarrollar una metodología que permita comprender y predecir el comportamiento estructural de un asiento de automóvil fabricado en Ecuador utilizando estándares internacionales y herramientas de ingeniería asistida por computadora. Para lograr este objetivo, se crearon modelos de asiento mallado utilizando el software Altair HyperWorks, y se demostró que su comportamiento en simulaciones computacionales utilizando el método de elementos terminados es comparable a su comportamiento en simulaciones físicas utilizando técnicas malla convergente. Los resultados de las simulaciones permiten avanzar en la predicción del comportamiento de los asientos fabricados en Ecuador, lo que mejora tanto la calidad de los productos manufacturados de la región como la seguridad en las carreteras del país.

**Palabras clave:** Análisis, convergencia, simulación computacional, normativa

#### ABSTRACT

The main risk faced by people traveling in motor vehicles is the possibility of suffering injuries because of traffic accidents, which occur frequently in Ecuadorian territory. Since the seat is the first surface in contact with passengers, it is crucial that it provides adequate protection in the event of a collision. For this reason, standards and test procedures have been established in specialized laboratories that contemplate the placement of seats in unique devices, as well as their subsequent collapse and destruction. Although the Ecuadorian seat manufacturing industry has the responsibility and the interest to submit them to tests in international laboratories, there has been some resistance due to the high costs and the lack of information on the current structural behavior of these elements. Consequently, the objective of this study is to develop a methodology to understand and predict the structural behavior of a car seat manufactured in Ecuador using international standards and computer aided engineering tools. To achieve this objective, mesh seat models were created using Altair HyperWorks software,

## INTRODUCCIÓN

Es de suma importancia la protección que debe brindar un asiento de autobús, como sistema estructural, a los viajeros, en el caso en el que se produzca un accidente de tránsito. De acuerdo con estadísticas del Banco Mundial, en el Ecuador se registra una tasa de mortalidad por accidentes de tránsito del 20.7 por cada 100000 personas, constituyendo una cifra superior a la media de la región (The World Bank, 2020). En este sentido, los asientos de autobús juegan un papel fundamental debido a que es el elemento que sostiene, retiene y protege al viajero (Aparicio, 2017; Cepeda, 2020). El presente estudio se centrará en asientos de autobuses de largo recorrido.

Como proyecto de diseño para los ingenieros, los asientos presentan tres retos importantes: confort, seguridad y rendimiento (Patil, & Kumar, 2016). El presente documento se centrará en la seguridad y rendimiento de los asientos, entendiendo la seguridad como la capacidad del asiento para proteger al viajero, y el rendimiento en el comportamiento estructural del diseño. (Yüce et al., 2013).

La mayoría de los asientos que se instalan en autobuses de fabricación nacional se producen de manera local en talleres independientes: empresas de diferente tamaño, presupuesto e infraestructura. Se estima que hasta el 2016 operaban más de 16 talleres en la fabricación de asientos para autobuses (Andrade Terán, 2016). En la actualidad no se dispone de estudios formales, sin embargo, datos recientes dan cuenta de una reducción de volúmenes de producción de autobuses tras la pandemia por COVID 19 (Moreta, 2021), y esto da como consecuencia una reducción considerable del número de talleres que manufacturan asientos.

El asiento fabricado en el Ecuador debe demostrar que protege las vidas de los ocupantes. A nivel mundial se han diseñado pruebas para evaluar que los asientos que se usan en autobuses protegen a las personas. Dentro de las más usadas se encuentra la normativa europea UNECE R080r2e, que se encarga de regular la homologación de asientos de grandes vehículos de pasajeros, tomando en cuenta su resistencia, aplica a vehículos contruidos para transportar más de 16 pasajeros más el conductor y los tripulantes. Esta normativa requiere que se realice una prueba física dinámica del asiento instalado en la dirección del movimiento del vehículo, en la cual, se simula el impacto de una persona en el respaldo, y el mencionado asiento debe proteger al ocupante no deformándose más allá de 400 mm como máximo en dirección longitudinal, además de asegurar que ningún componente se desprenda del mismo en la prueba (Akrouit et

al., 2021; Yüce, 2013; Dima & Covaciu, 2019; Silva et al., 2019).

Las mencionada pruebas tienen lugar en laboratorios ubicados principalmente en Europa (Aparicio, 2017). La realización de dichas pruebas implica la erogación de recursos económicos que no se encuentran disponibles para talleres de fabricación de asientos en el Ecuador debido a crisis post pandemia.

Como alternativa, se ha tomado en cuenta las tecnologías de ingeniería asistida por computador aplicando el método de elementos finitos, las cuales ofrecen la capacidad para la realización de pruebas de choque en entornos virtuales (Raghu, 2010). Es decir, no se requiere construir prototipos físicos, sino que son los prototipos virtuales los que se impacta para determinar su resistencia, usando software de ingeniería avanzado (Niresh et al., 2018). En la actualidad, se ha demostrado que las pruebas virtuales obtienen los mismos resultados que las pruebas físicas (Dima & Covaciu, 2019; Tahera et al., 2015; Seyedi et al., 2020) lo cual las constituye en un excelente campo de pruebas.

A continuación, se describe la metodología para aplicar ingeniería asistida por computador en la simulación de asientos de autobús usando software avanzado.

## MATERIALES Y METODOS

Metodología de simulación.

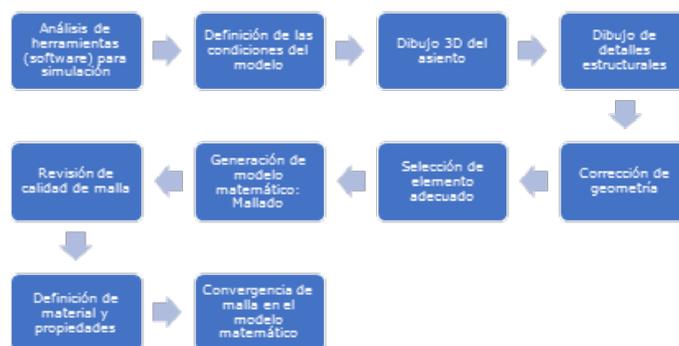


Figura 1. Metodología de simulación de asiento de autobús.

Fuente: Elaboración propia

### Convergencia de malla

El proceso de convergencia de malla es parte fundamental en la presente investigación, el cual se realiza a través del cálculo del error numérico. Dicho error es estimado entre dos componentes, con creciente refinamiento de dicha malla, y comparando los resultados entre sí. Este método se conoce como Índice de Convergencia de Malla

(Grid Convergence Index, GCI, por sus siglas en inglés) (Maurath, 2008), que se define por la ecuación 1

$$GCI = \frac{F_S |\epsilon|}{r^{P-1}} \quad (1)$$

Donde:

es un factor de seguridad, el valor es 3 cuando solamente se tienen disponibles dos soluciones, y 1.25 si se consideran más de dos densidades de malla en el estudio.

es el error relativo definido como , con como respuesta derivada de la malla refinada y como respuesta de la malla inicial. Las respuestas deben ser seleccionadas por su relevancia en la solución del problema

es la razón de refinamiento de la malla

es el orden de convergencia, con .

El valor de GCI debe ser el más bajo posible. El estudio de GCI es difícil para modelos muy grandes. Por lo tanto, en esta revisión se realiza en componentes más relevantes del asiento, como por ejemplo un miembro estructural del mismo (Chen, 2001).

Como prueba se ha escogido una viga simplemente apoyada con los Datos que se muestran en la imagen a continuación para poder realizar el cálculo teórico y comparar con los resultados del refinamiento de malla

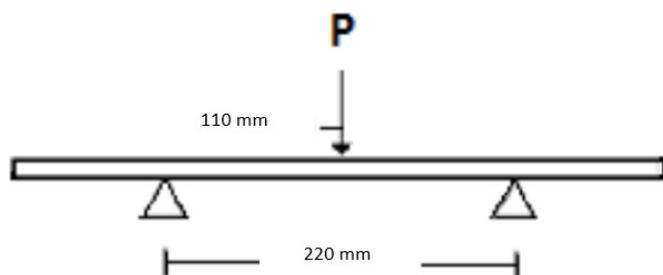


Figura 2. Prueba teórica propuesta para convergencia de malla. Una vez calculado el error numérico, se presentará el estudio de convergencia de malla.

Fuente. Elaboración propia

## RESULTADOS

Análisis de herramientas de software para simulación.

Luego del análisis de varias herramientas de simulación, se encuentra que la herramienta Altair HyperWorks cubre todos los criterios técnicos para simulación de asientos en términos de:

Validación de código, al ser un software con marca comercial.

Poder computacional, debido a que es una herramienta probada alrededor del mundo por grandes empresas de todas las industrias, tiempos cortos de ensayo. Se ha evidenciado una reducción del 75% en la realización de ensayos de volcadura de autobuses respecto a ANSYS.

Uso a nivel mundial en simulación de ensayos en asientos.

Gran acceso a capacitación.

Condiciones del modelo

Se ha trabajado con una fábrica de asientos de la ciudad de Ambato, de la cual se obtuvieron las dimensiones geométricas del asiento para simulación.

Dibujo 3D del asiento.

La herramienta computacional usada para la realización del modelo CAD en 3D del asiento es Altair Inspire Studio, parte de Altair HyperWorks. El tiempo de modelado fue de aproximadamente 16 horas.

Model Infile P:\CONAV2016\PROY\CONAV\CONFIDENCIAL\ASIENTOS\EA20162\_MODELADO\_MATEMATICO\EA001\_4.hm\*



Figura 3. Modelado geométrico de asiento en Altair Inspire Studio

Corrección de geometría previa al mallado.

Fuente Elaboración propia

El objetivo de realizar correcciones de geometría es obtener una malla continua y uniforme en las zonas de unión y soldadura de la estructura. No se toman en cuenta detalles constructivos como por ejemplo placas que no

revistan resistencia estructural. La herramienta usada fue Altair HyperMesh, el tiempo de corrección de geometría fue de 2 horas.

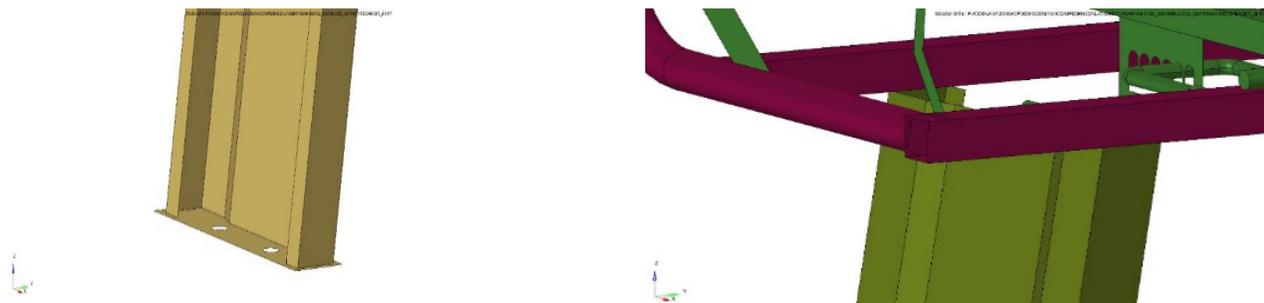


Figura 4. Correcciones de geometría previas al mallado en Altair HyperMesh

Selección del elemento adecuado

Fuente Elaboración propia

Esta selección es fundamental para obtención de resultados adecuados, y el tipo de elemento depende de la geometría a simular (Raghu, 2010). Es recomendado usar en lo posible elementos cuadrados en lugar de triangulares para generar soluciones eficientes en tiempo y resultados (Akrouf et al., 2021; Lenk & Lambert, 2015; Espinoza, 2009).

La estructura en análisis está constituida por miembros estructurales con espesores pequeños comparados con sus longitudes. Por tanto, en la presente investigación se usan elementos cáscara (shell) de forma cuadrada. Se consideran las uniones como capaces de total transmisión de esfuerzo.

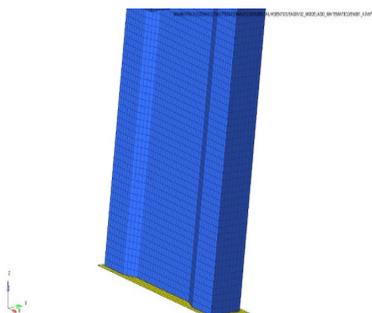


Figura 5. Selección de elemento cuadrado para mallado

Fuente: Elaboración propia

Generación del modelo matemático: mallado

El proceso de mallado se llevó a cabo en Altair HyperMesh. El tiempo de mallado fue de aproximadamente 3 horas.

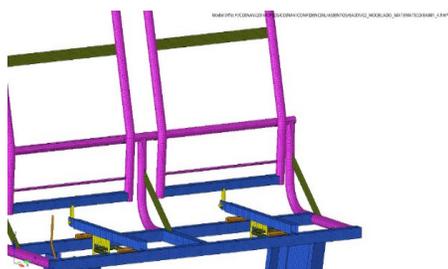


Figura 6. Asiento de autobús mallado

Fuente: Elaboración propia

### Calidad de malla.

Se ha escogido el criterio del jacobiano mínimo para determinar el nivel de calidad de la malla (Akrouf et al., 2021; Colín & Giusti, 2009). Se evidencia que los niveles de jacobiano no descienden de un valor de 0.7, lo cual indica que la malla tiene calidad adecuada. Únicamente el 0.28% de elementos podría presentar problemas. La bibliografía un rango de aceptación de elementos de hasta el 5% (Akrouf et al., 2021)



Figura 7. Calidad de malla con quality index en HyperMesh

Fuente: Elaboración propia

### Material y propiedades

El material usado en el presente estudio es del acero estructural A36, que es el material más usado para la fabricación de asientos de autobús en el Ecuador. Como se mencionó, la propiedad de los elementos es tipo cáscara (shell)

### Resultados de simulación

Se han obtenido las respuestas en deformación del asiento al aplicar la normativa, en las cuales se observa las deformaciones efectivas del asiento.

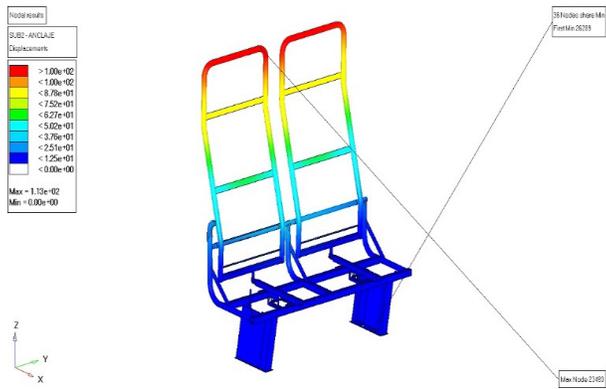


Figura 8. Deformaciones presentadas por asiento en investigación

Fuente: Elaboración propia

### Convergencia de malla en el modelo matemático

Dado que no se tiene resultados de esfuerzos ni deformaciones de asientos reales, la bibliografía recomienda la ejecución de pruebas en un componente del asiento (Maurath, 2008). El componente escogido es un parante de refuerzo cerca de la base del asiento. Se consideró que este componente trabaje con una carga y condición de funcionamiento conocida: una viga simplemente apoyada, debido a que esta configuración puede calcularse con ecuaciones desarrolladas por la teoría de la elasticidad.

Una vez generada la malla para el análisis y realizados los cálculos con ecuaciones fundamentales correspondientes, se varía el parámetro de tamaño de malla para estudiar las variaciones en los resultados presentados por el software. En las figuras y tablas a continuación se muestran los resultados. La deformación teórica en el punto medio es de 2 mm.

Tabla 1. Valores de prueba para convergencia de malla

PRUEBA	TAMAÑO (mm)	ERROR %	r	GCI
P1	2,5	41%	2,00	0,170
P2	5	2%	1,50	-0,021
P3	7,5	4%	1,33	-0,046
P4	10	7%	0,00	-0,083

Fuente: Elaboración propia

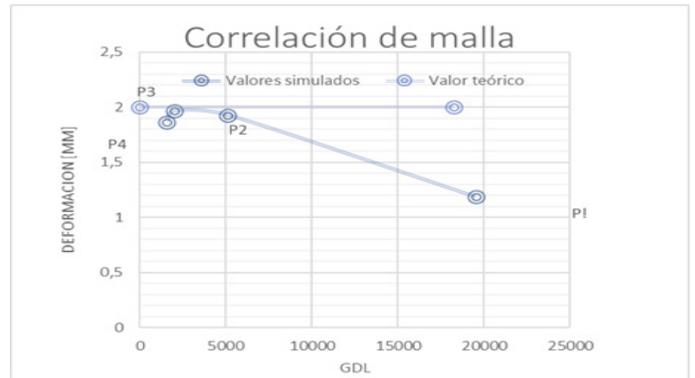


Figura 9. Resultados de pruebas de convergencia de malla

Fuente: Elaboración propia

### DISCUSIÓN.

Para el proceso de convergencia se partió de un dato calculado con ecuaciones teoría de elasticidad, en el que valor teórico máximo de la deformación de la viga en el punto central es de 2 mm. Respecto a este dato se ha

comparado los resultados dados por el método de elementos finitos aplicando exactamente la misma configuración en una viga de prueba. Es interesante notar que con un tamaño de malla de 2.5 mm genera un error de 41%, el cual es un error muy un error grande. Los mejores resultados en términos de cercanía al valor teórico se presentan cuando se malla la viga en 5 mm (2%) y en 7.5 mm (4%). Los índices de convergencia de malla también varían siendo el menor en valor absoluto el correspondiente a la malla de 5 mm. El criterio técnico es escoger realizar el estudio de la presente investigación con un tamaño de 5 mm debido a que genera el menor error respecto del resultado teórico. Usando este tamaño de elemento se asegura que el mallado propuesto es adecuado para la aplicación requerida, y los resultados obtenidos son relevantes.

Se debe notar que existe un punto en el que se tiene el mayor acercamiento entre la respuesta generada por el software y la respuesta teórica. Al analizar más a profundidad se puede inferir que con tamaños del elemento muy pequeños, el valor del resultado se aleja del valor esperado como teórico.

Usando el tamaño de malla que genera el menor error se obtiene una deformación máxima de 113 mm. Esta deformación es aceptable dentro de los parámetros de la normativa europea UNECE R080r2e, dado que se ha probado el suceso hipotético del impacto de una persona en el respaldo del asiento, teniendo un nivel de deformación menor a lo requerido en la normativa.

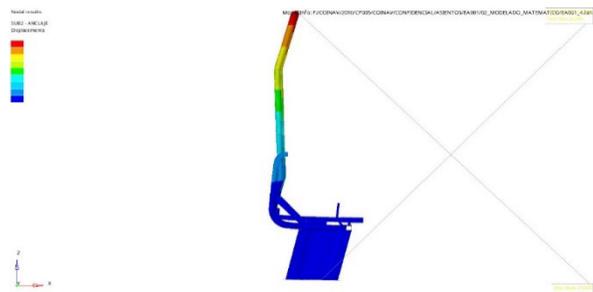


Figura 10. Deformación máxima de asiento

Fuente: Elaboración propia.

En la investigación realizada en varias fuentes de fácil acceso para ingenieros y profesionales interesados en el diseño y estudio de estructuras y de asientos, se observa una gran cantidad de trabajos en los que se utiliza el método de elementos finitos. Sin embargo, en los mencionados trabajos se observa una falencia grave: no se realiza el procedimiento de comprobación de convergencia de malla, es decir, no se comprueba que el mallado propuesto sea el correcto para la aplicación requerida.

Como consecuencia de esta grave falencia, se puede poner en entredicho la validez de esos resultados obtenidos, dado que, hay la posibilidad de que estén lejanos a lo que ocurre en el mundo físico (Lenk & Lambert, 2015).

En realidad, no comprobar las mallas de elementos finitos propuestas en tesis, proyectos e investigaciones es una práctica común dentro del mundo de la ingeniería, dado que se cree que porque se usa un software comercial (en algunos casos sin licencia), el software será el encargado de ubicar de manera correcta los parámetros de malla, realizar de manera adecuada el proceso de mallado y generar de manera automática una malla de calidad, lo cual está completamente alejado de la realidad. (Lenk, P., & Lambert, 2015).

## CONCLUSIONES

Usando ingeniería asistida por computador los ingenieros son capaces de recrear colisiones de automóviles, autobuses, aviones, asientos, entre otros, en una computadora, sin tener que construir los mencionados dispositivos, y dichas pruebas dan como resultado un comportamiento acorde al comportamiento real en el caso de un impacto en el mundo físico

El modelo en elementos finitos de la estructura de asiento puede ser usado para obtener más resultados de resistencia, con lo que se prueba la seguridad del asiento ante eventos de impacto según las normativas, antes de construir el asiento.

El modelo en elementos finitos de la estructura de asiento puede ser usado para asegurar que este asiento pase las pruebas físicas de las normativas europeas antes de enviar probetas físicas a los laboratorios, antes de construir el asiento.

El modelado geométrico es una de las claves del éxito de una simulación, dado que asegura la cercanía de los resultados obtenidos respecto de resultados reales

La calidad de la malla está directamente relacionada a la calidad de los resultados, por lo que se debe cuidar que dicha calidad sea alta en función de los parámetros de calidad mostrados en el presente documento como es del jacobiano

Es errado el concepto de que una malla más fina genera resultados más cercanos a la realidad. Se ha evidenciado que no solamente no se tiene mejores resultados, sino que la tendencia es alejarse grandemente de la realidad.

Los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas dan como resultado un error del 2% respecto de cálculos teóricos lo cual da cuenta del buen rendimiento que

pueden llegar a tener el método de elementos finitos si se tiene un correcto manejo de los parámetros del mismo.

El modelo matemático generado se ha validado con criterios de convergencia de malla, con lo que se asegura que el mallado propuesto es adecuado para la aplicación requerida, y los resultados obtenidos en las simulaciones mostradas son relevantes.

Con la metodología propuesta en la presente investigación se puede probar el comportamiento estructural y de seguridad de un asiento antes de construirlo. Con ellos se puede tener la idea clara del comportamiento estructural y el nivel de protección que puede generar un asiento y aumentan las posibilidades de que este asiento apruebe un test físico.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Akrout, S. E., Mhaiti, N., Radouani, M., & Fahime, B. E. (2021). Modeling and Simulation of a Vehicle Crash Test. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 6, 937-946.
- Andrade Terán, Á. J. (2016). Análisis de la industria metalmeccánica Carrocera de Ecuador durante el período 2006-2013 (Bachelor's thesis, PUCE). <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/11504/Disertaci%c3%b3n%20%20ALVARO%20ANDRADE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Aparicio, F. (2017). Certificaciones de Seguridad en Empresas de Autobuses y Autocares: CSEAA e ISO 39001. In II Congreso INTER-CISEV.
- Cepeda, J. (2020). Primer Laboratorio de Ensayos Estructurales Virtuales de Autobuses en Latinoamérica: Innovación y Acreditación. *Revista Técnica "energía"*, 16(2), 68-176.
- Chen, G. (2001). FE model validation for structural dynamics (Doctoral dissertation, University of London).
- Colin, A., & Giusti, M. (2009). Efficient computation of square-free Lagrange resolvents. Suzuki, Masakazu Hong, Hoon Anai, Hirokazu Yap, Chee 他.
- Dima, D. S., & Covaciu, D. (2019). Vehicles frontal impact analysis using computer simulation and crash test. *International journal of automotive technology*, 20, 655-661.
- Espinoza, J. D. J. C. (2009). A finite element simulation of a baja sae vehicle-tree impact including a rigid occupant (Doctoral dissertation, El autor).
- Lenk, P., & Lambert, H. (2015). Practical aspects of finite-element analysis in structural glass design. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 168(7), 527-538.
- Maurath, C. A. (2008). Development and validation of a finite element model of the Q3 anthropomorphic testing device (Doctoral dissertation, The George Washington University).
- Moreta, M. (2021). La industria carrocerera del país no logra reactivarse. (sitio web El Comercio). <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/industria-carrocera-reactivacion-economica-fabricacion.html>
- Nireesh, J., Kirubakaran, R., Mohana Praddeesh, M., Gokul, V., & Gokkul, T. (2018). An optimized observer for estimating torque converter characteristics for vehicles with automatic transmission. *Int. J. Eng. Technol*, 7(2), 573-577.
- Patil, P. M., & Kumar, M. S. (2016). Lightweight options for seat structure in a bus. *Journal of Advanced Engineering Research*, 3(1), 72-77.
- Raghu, S. (2010). Concepts of computational finite elements and methods of static and dynamic analyses in MSC. Nastran and LD-DYNA.
- Seyedi, M., Jung, S., & Wekezer, J. (2022). A comprehensive assessment of bus rollover crashes: Integration of multibody dynamic and finite element simulation methods. *International journal of crashworthiness*, 27(1), 273-288.
- Silva, R. D. C., Flávio, P. G. M., & Oliveira, A. B. (2019). Assessing the crashworthiness of a vehicle seat for rear and frontal impacts. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 16(01) 1-19.
- Tahera, K., Earl, C., & Claudia, E. (2014). Integrating virtual and physical testing to accelerate the engineering product development process. *International Journal of Information Technology and Management* 9, 13(2-3), 154-175.
- The World Bank. (2020). Mortality caused by road traffic injury (per 100,000 people). *World Development Indicators*, 1.
- Yüce, C., Karpat, F. A. T. İ. H., Yavuz, N., Kaynaklı, Ö., Dolaylar, E., & Şendeniz, G. (2013). Prototyping a new lightweight passenger seat. In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Vol. 56420, p. V013T14A034). American Society of Mechanical Engineers.