

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v7i14.0208>

METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DE UN ENSAYO DE IMPACTO MEDIANTE EL MEF

METHODOLOGY FOR SIMULATING AN IMPACT TEST USING THE MEF

López-Ortiz Santiago Alejandro ¹; Abarca-Pérez Edison Patricio ²;
Sánchez-Carrión Edgar Fabián ³; Quinga-Morales Milton Israel ⁴

¹Grupo de Investigación GDP, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH. Riobamba. Ecuador.

Correo: sa_lopez@esepoch.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6314-6299>

²Grupo de Investigación GDP, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH. Riobamba. Ecuador.

Correo: edison.abarca@esepoch.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7041-4805>

³Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH. Riobamba. Ecuador. Correo: esanchez_c@esepoch.edu.ec. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8027-2799>

⁴Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH. Riobamba. Ecuador. Correo: milton.quina@esepoch.edu.ec. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7210-4608>

Resumen

Las simulaciones numéricas basadas en el Método de Elemento Finito son fundamentales para estudiar fenómenos físicos en ingeniería, proporcionando información crucial para desarrollar y mejorar diseños de máquinas, instrumentos, construcciones, vehículos, entre otros. En los últimos años, una de las aplicaciones más avanzadas ha sido el análisis de impacto de componentes y materiales de la industria automotriz, debido a la alta mortalidad y gravedad de las heridas en choques frontales. Por ello, se ha desarrollado una metodología para realizar un estudio numérico explícito no lineal, con el fin de evaluar la resistencia y el comportamiento estructural de la sección frontal de la carrocería de un autobús de fabricación nacional. Este estudio se basa en las condiciones de ensayo establecidas por la norma europea UNECE R-29, la cual se enfoca en evaluar la seguridad del conductor. Se detallan también las consideraciones necesarias para crear un modelo computacional fiable que pueda ser validado con criterios específicos. Finalmente, los resultados del ensayo simulado revelan que el modelo de carrocería no cumple con los criterios de seguridad mínimos, indicando la necesidad de revisar y mejorar su diseño actual.

Palabras clave: Simulación numérica, impacto frontal, método de elementos finitos, análisis no lineal.

Abstract

Numerical simulations based on the Finite Element Method are fundamental for studying physical phenomena in engineering, providing crucial information for developing and improving designs of machines, instruments, structures, vehicles, among others. In recent years, one of the most advanced applications has been the impact analysis of components and materials in the automotive industry, due to the high mortality and severity of injuries in frontal crashes. Therefore, a methodology has been developed to perform an explicit nonlinear numerical study, to evaluate the resistance and structural behavior of the front section of the body of a domestically manufactured bus. This study is based on the test conditions established by the European standard UNECE R-29, which focuses on assessing driver safety. The necessary considerations to create a reliable computational model that can be validated with specific criteria are also

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 15 de abril de 2024.

Fecha de aceptación: 25 de junio de 2024.

Fecha de publicación: 10 de julio de 2024.



detailed. Finally, the results of the simulated test reveal that the body model does not meet the minimum safety criteria, indicating the need to review and improve its current design.

Keywords: Numerical simulation, frontal impact, finite element method, nonlinear analysis.

1. Introducción

En Ecuador, la Agencia Nacional de Tránsito (ANT) determinó que el impacto frontal es el tercer tipo de accidente de tránsito más común. Por esta razón, es crucial realizar estudios para reducir el riesgo de lesiones o muerte en estos choques. Existen numerosas pruebas para evaluar la seguridad de vehículos, tanto automóviles como pesados, que pueden ser obligatorios según las normativas de cada país. Debido a los altos costos de estos ensayos, se han comenzado a utilizar herramientas computacionales para realizar pruebas similares a las del mundo real, usando menos recursos y obteniendo datos confiables.

Un estudio realizado en la Universidad Politécnica de Madrid UPM analizó el impacto frontal de una sección de autobús y lo comparó con un ensayo experimental previo, concluyendo que el error de ajuste del 11.61% es aceptable para los propósitos establecidos. El estudio

también destacó que las simulaciones son herramientas complementarias útiles para resolver problemas de ingeniería (Delgado, 2016).

Numerosos estudios han analizado impactos frontales utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF), comparando los resultados con ensayos experimentales y obteniendo buenos resultados, validando así el uso de herramientas computacionales para mejorar la seguridad de los vehículos (Sharma, 2013; Tejasagar et al., 2012; Mirzaamiri R, 2012). En Estados Unidos, la norma FMVSS 2018 de la agencia NHSTA analiza el impacto frontal de vehículos pequeños contra diferentes tipos de obstáculos, como barreras, paredes rígidas y vehículos con diferentes ángulos de choque. El objetivo principal de estos ensayos es evaluar la protección de los ocupantes (Julaluk et al., 2010).

En esta investigación se analizará mediante simulaciones numéricas una sección frontal de un autobús de tipo interprovincial fabricado localmente, para propósitos de simplificación se ha seleccionado una sección desde el primer pórtico de la carrocería hacia adelante, tomando en cuenta que en esta zona se absorberá el mayor porcentaje energía durante un choque. Adicionalmente el modelo incorpora las condiciones de ensayo de la norma europea (UNECE R 29, 2007) que verifica la Seguridad del Conductor mediante verificación de no invasión del Espacio de Supervivencia en equipos de transporte pesado. El motivo se aplicar esta norma es que se ha encontrado varios trabajos que la utilizan como un método opcional ante la falta de normas dedicadas al estudio de Autobuses.

Para la aplicación del reglamento europeo es necesario conocer las especificaciones principales que se mencionan a continuación;

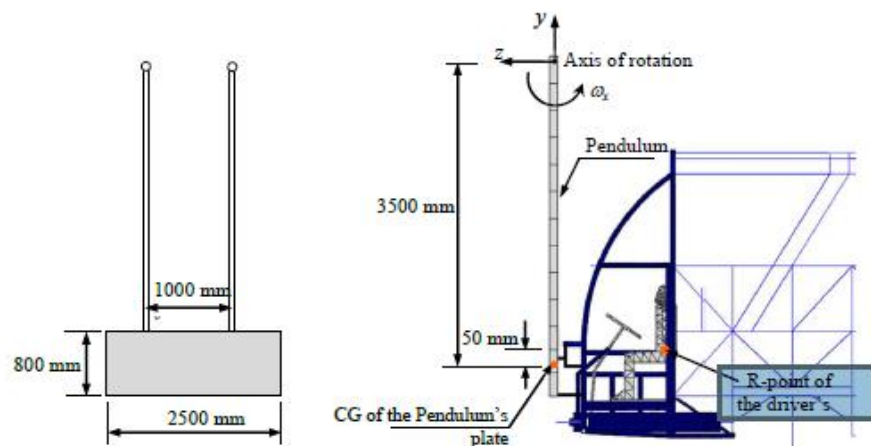
- Para los vehículos con un peso bruto mayor a 7,5 toneladas, se debe aplicarse una energía de de 55 KJ, el péndulo de impacto debe cumplir con una superficie

de golpe de 2,500 mm x 800 mm y de ser fabricada de acero con una masa de al menos 1500 Kg, además sus aristas deben ser redondeadas con una curvatura de $10\text{mm} \pm 5\text{mm}$.

- El péndulo debe estar suspendido por dos apoyos distanciados 1000 mm y a 3500 mm desde el eje hasta el centro geométrico del péndulo. El impactador debe estar en contacto con la parte sobresaliente del vehículo y la posición al CG del péndulo (punto H) será de 50 mm por debajo del punto-R del asiento del conductor. (UNECE R 29, 2007).

En la siguiente figura se observa las especificaciones geométricas del péndulo de impacto:

Figura 1. Impacto frontal de acuerdo con el reglamento R 29 de UNECE



Fuente: Autores

Finalmente, se establece una recomendación para asegurar del espacio de supervivencia del conductor, se debe verificar que ningún componente de la estructura o del vehículo posterior al impacto debe estar en contacto con el maniquí de prueba. (UNECE R 29, 2007)

2. Materiales y métodos

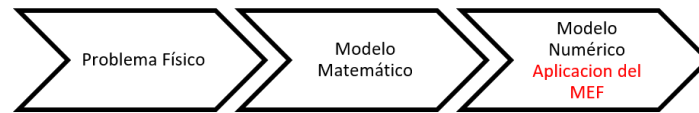
El Método de Elementos Finitos (MEF) es una técnica numérica crucial en ingeniería, empleada para calcular y optimizar el comportamiento estructural de componentes en mecánica continua y sistemas discretos. Este método convierte un cuerpo continuo en un modelo discreto mediante la discretización, utilizando elementos

geométricos simples definidos por nodos, como líneas, triángulos y cubos. Los valores dentro de este modelo se obtienen interpolando los valores conocidos en los nodos, proporcionando una aproximación de la función en base a un número finito de puntos.

El análisis con MEF sigue una lógica específica: primero, el problema complejo se divide en problemas simples (discretización); estos problemas se resuelven mediante ecuaciones matemáticas basadas en modelos conocidos; finalmente, se generan múltiples soluciones utilizando un ordenador, obteniendo una respuesta final que se muestra gráficamente. Este proceso permite resolver problemas físicos complejos de manera eficiente y precisa (Ochoa, O, et al, 2009). El proceso

de análisis numérico por el MEF para resolver el problema físico se muestra con la siguiente figura.

Figura 2. Principio del análisis numérico

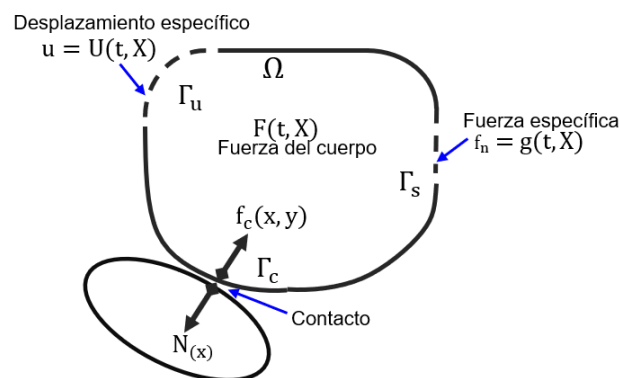


Fuente: Autores

Para desarrollar el análisis MEF mediante el uso de un software CAE de un ensayo de impacto se recomienda aplicar los procedimientos mencionados a continuación, los cuales pueden ser clasificados en las etapas de: pre-procesado, procesado y post procesado. Dentro de los diferentes tipos de análisis mediante el método MEF, se reconoce los modelos dinámico transitorio para la simulación de choques, además es necesario contemplar el comportamiento del material que

correspondo a un modelo no lineal. Para este propósito se puede usar un modelo de tipo explícito, consiste en un sistema formado por diversas cargas externas, expresadas como una fuerza F , estas se aplican a un cuerpo en intervalos cortos de tiempo, generando un desplazamiento U dentro de un dominio Ω y limitado por una frontera Γ . Los resultados también dependen del tipo de contacto entre los cuerpos impactados y de las condiciones iniciales de velocidad. El sistema se representa en la siguiente figura.

Figura 3. Sistema dinámico transitorio.



Fuente: Modificado de Autor (Wu S, Gu, L, 2012)

En el sistema mostrado se han considerado varios principios físicos como: 1) El de conservación de masas, 2) el de conservación de momento lineal y angular, 3) el de conservación de energía, 4) los principios de ecuaciones constitutivas y ecuaciones de deformación-desplazamiento (Belytschko, T, et al, 2001). Adicionalmente, al tratarse de un problema de la mecánica de sólidos se espera que aparezcan grandes deformaciones y rotaciones (no linealidades geométricas) y un comportamiento no lineal del material que deben considerarse en el modelo discretizado (Wu S, Gu, L, 2012).

2.1 Proceso de simulación aplicando MEF

En la etapa de pre-procesado principalmente se aborda la creación de un modelo geométrico del objeto de estudio que posteriormente se dividirá con elementos finitos en una malla y se asignarán las condiciones externas e internas del problema real. Luego de este paso, se pasa al procesado de las ecuaciones diferenciales para posteriormente en visualizar los resultados en la etapa de post procesado. A continuación, se puede ver en la figura 3, un diagrama de flujo con los pasos detallados para la obtención de resultados en un estudio de impacto frontal del estado a un autobús mediante la aplicación del MEF.

Figura 4. Diagrama de flujo de los pasos para crear una simulación con MEF



Fuente: Autores

Estos pasos son una propuesta de los autores, ya que según el caso específico de cada análisis algunos pasos pueden ser omitidos y otros más podrían incluirse.

2.2 Validación de la simulación

Un método conocido de validación de las simulaciones y confiar que el modelo está proporcionando resultados valederos, es el balance de energías definido por la siguiente ecuación: (LS-DYNA Theory Manual, 2006)

$$E_I + E_V + E_{FD} + E_{KE} - E_W = E_I \\ = Constante$$

(Ecuación.1)

Donde:

EI= Energía interna, es la energía de deformación elástica y plástica más la energía hourglass.

EV= Energía disipada por mecanismos viscosos.

EFD= Energía friccional.

EKE= Energía cinética.

EW= Trabajo producido por las fuerzas externas.

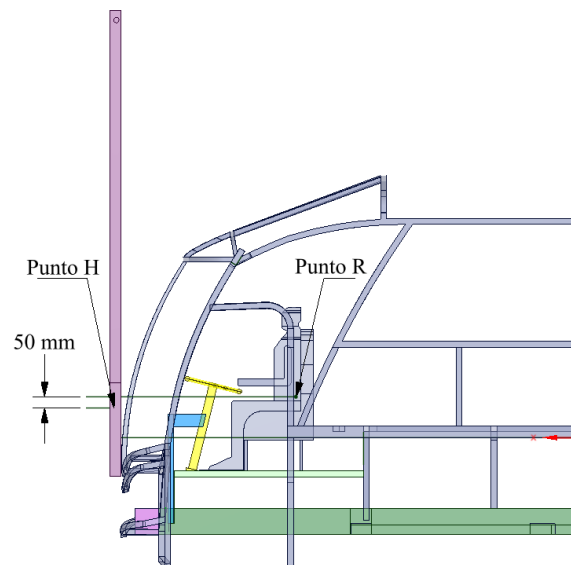
2.3 Etapa de Pre procesado

En esta etapa se configuran todas las características geométricas del modelo y de ella dependerá la calidad de resultados, por lo tanto, es importante definir con el mayor la precisión posible la geometría, el material, tipo de contacto entre componentes y las condiciones físicas iniciales en el ensayo de impacto.

a) Generación de la geometría

El modelado del autobús se realizó en un programa CAD, siguiendo las dimensiones del chasis, los paneles laterales, el piso y la parte frontal de la superestructura del autobús. Para simplificar el modelo, se eliminaron los componentes que no tienen funciones de resistencia estructural, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 5. Geometría de los componentes del modelo discreto.



Fuente: Autores

El tipo de elemento debe seleccionarse con cuidado. Los elementos tipo Shell son más eficientes computacionalmente, pero necesitan un tratamiento especial en las conexiones y limitan el análisis de esfuerzos mecánicos en ciertos componentes. Los elementos tipo

sólido proporcionan más detalles sobre el estado tensional, pero requieren más recursos y aumentan el tiempo de simulación. A continuación, se muestran los tipos de elementos asignados a cada componente.

Tabla 1: Ejemplo de tabla

N °	COMPONENTE	TIPO	ESPESOR (mm)	COMPORTAMIENTO
1	Carrocería	Cascarón (Shell)	2	Elástico-Plástico
2	Chasis	Cascarón (Shell)	7	Elástico-Plástico
3	Placas de sujeción del volante.	Cascarón (Shell)	3	Elástico-Plástico
4	Base del volante.	Cascarón (Shell)	3	Elástico-Plástico
5	Volante.	Cascarón (Shell)	3	Elástico-Plástico
6	Piso de la cabina.	Cascarón (Shell)	3	Elástico-Plástico

7	Maniquí de prueba.	Cascarón (Shell)	2	-
8	Péndulo de impacto.	Sólido (Solid)	-	Rígido
9	Sujeciones del péndulo	Sólido (Solid)	-	Rígido

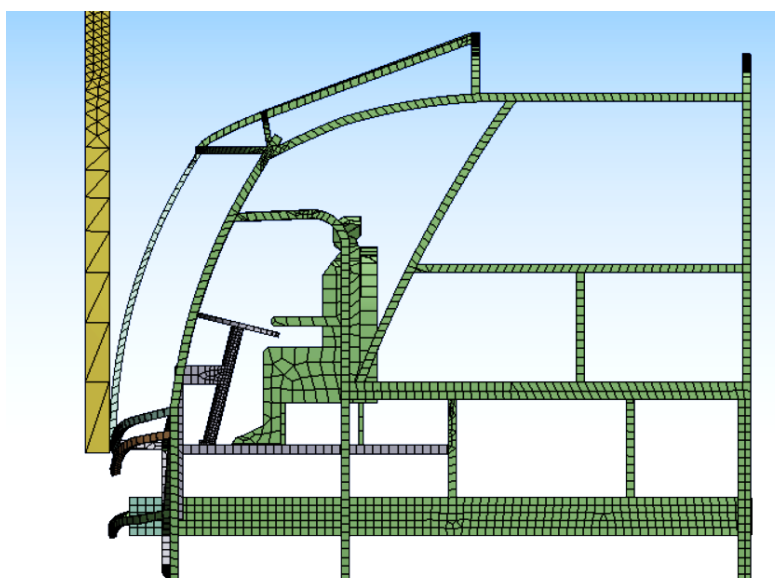
Fuente: Autores

2.3.1 Generación de la Malla

En esta investigación se usan tetraedros para los elementos sólidos y cuadriláteros para los

elementos Shell, con un tamaño máximo de 50 mm y mínimo de 16.62 mm con total de 15 530 nodos y 23 403 elementos. A continuación, vemos el modelo mallado

Figura 6. Mallado de los componentes para simulación de impacto



Fuente: Autores

Para evaluar la calidad de malla se recomienda que elementos triangulares y cuadriláteros deben tener una relación de "Aspect Ratio" o calidad de elemento entre 0.8 - 1.0. (Arroba, 2013). En el modelo se obtuvo un valor promedio de 0,847 en calidad de elemento y se verificó la unión de la malla en las conexiones fijas.

2.4 Condiciones de borde y especificaciones de la norma.

Para el ensayo de impacto frontal se fija la estructura del bus para eliminar los desplazamientos longitudinales del chasis, recomendado por la misma norma. Además, se debe conseguir reducir el desplazamiento vertical en el sistema de suspensión. En el modelo computacional se

pueden recrear estas restricciones mediante la asignación de sujeciones fijas. Un aspecto importante para obtener datos precisos es definir correctamente la

interacción de los componentes o llamados contactos, que en este modelo tienen las siguientes consideraciones.

Tabla 2. Tipo de interacción entre componentes del modelo.

Interacción entre componentes	Tipo de Contacto
Péndulo - Sujeciones de péndulo	Contacto sin fricción
Péndulo - Carrocería - Chasis - Placas de sujeción de volante - Base de Volante - Piso de la cabina	Contacto con fricción
Maniquí de prueba (7), Carrocería (1), Chasis (2), Placas de sujeción de volante (3), Base de Volante (4), Piso de la cabina (6)	No existe contacto

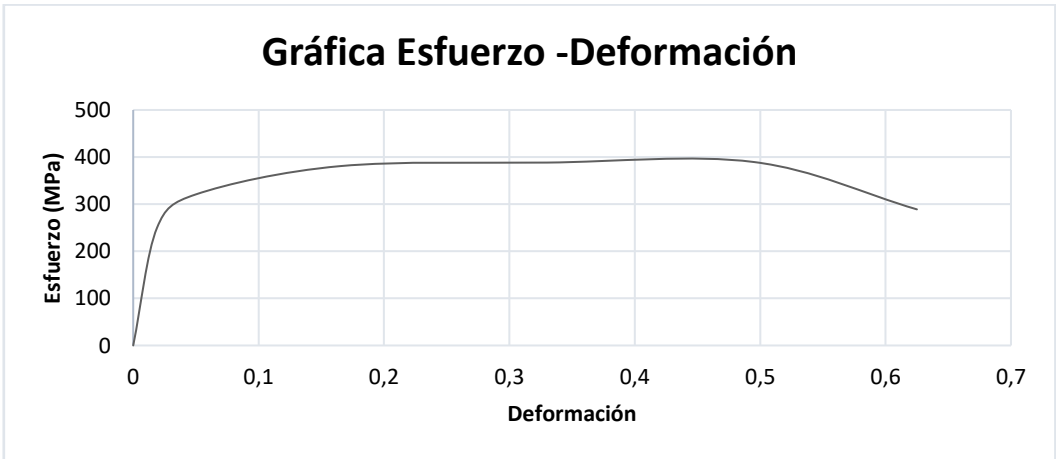
Elaborado por: Autores

2.4.1 Definición del Material

La estructura del autobús está hecha de acero ASTM A500 y ASTM A36, que tienen propiedades similares. Para las simulaciones de impacto

frontal, se usará el acero ASTM A500, cuyo comportamiento elástico y plástico ha sido validado en estudios anteriores (Arroba, 2013). La siguiente gráfica muestra el comportamiento del acero tomado de la referencia.

Figura 7. Gráfica de Esfuerzo – Deformación del material utilizado en la simulación.



Fuente: Autores

Las características del modelo del material se presentan en la siguiente tabla, estas se asignan al modelo

mediante unas tarjetas propias del software usado en la simulación.

Tabla 3. Características del modelo numérico del material.

Característica	Descripción
Definición	*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY Material elasto-plástico con una curva de esfuerzo-deformación definida por el usuario.
Densidad de Masa	7890 Kg/m ³
Módulo de Young	210 MPa
Radio de Poisson	0.3

Elaborado por: Autores

Antes de pasar a la etapa de procesado se sugiere una revisión del modelo siguiendo los siguientes pasos:

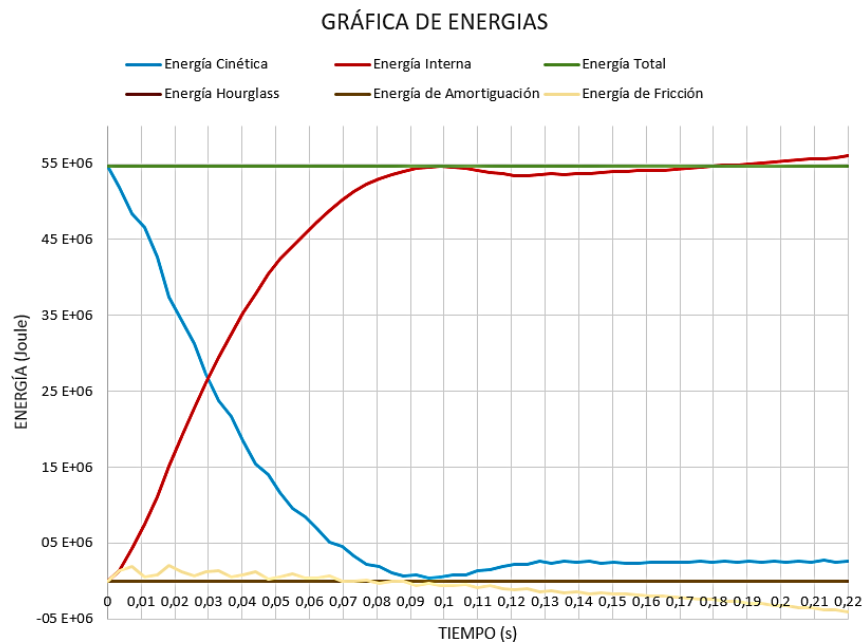
1. Revisión de calidad de malla.
2. Verificación de penetración de malla.
3. Verificación de correcto funcionamiento de soportes y restricciones
4. Verificación de que la velocidad de impacto se aplique correctamente a todo el impactador.
5. Definición del tiempo de simulación, ya que un choque se produce en el orden de las décimas de segundo.

3. Resultados y discusión

3.1 Validación de los resultados

Para validar la simulación se aplicará la Ecuación 1 que consiste en la aplicación del principio de conservación de energía, en el se debe constatar que la transformación de energía cinética en energía interna. Además, se debe cumplir una recomendación en cuanto al valor máximo de la energía de fricción y la energía hourglass sean menor al 10% de la energía total del ensayo. Una vez verificados estos valores se puede asegurar que el modelo proporciona resultados confiables y válidos para su análisis.

Figura 8. Gráfica de las energías presentes en el impacto frontal.



Fuente: Autores

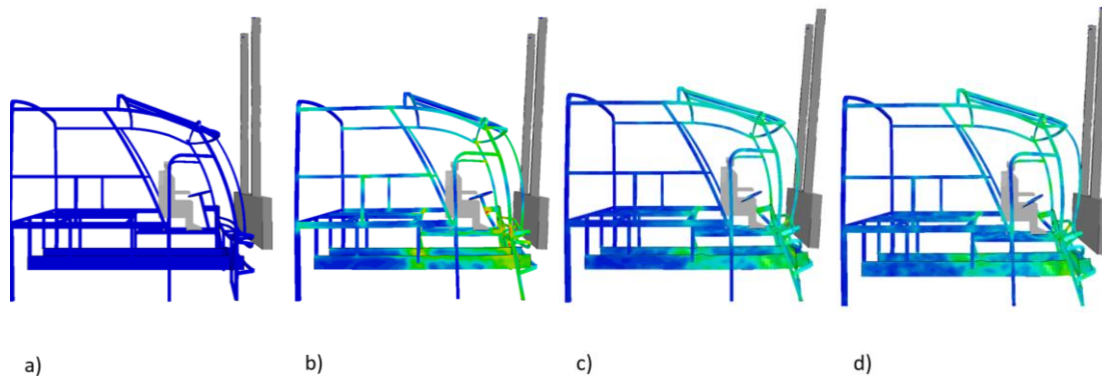
En la gráfica se puede observar la transformación de energía cinética del péndulo en energía interna de la carrocería a partir de un valor inicial de 55 kJ cumpliendo con lo recomendado en la norma. La suma de la energía de fricción y la energía interna no supera el valor mínimo de 5,5 kJ por lo que se puede validar los resultados y continuar con la etapa de análisis e interpretación.

3.2 Análisis de desplazamientos y deformaciones.

La resolución se ejecutó sin interrupciones y se requirió un tiempo una hora con 27 minutos, usando un computador de 8

procesadores de 2,5 GHz. A continuación, se analizó la deformación de la estructura frontal, producto del impacto del péndulo, las imágenes siguientes muestran la secuencia del ensayo desde un tiempo de 0.000 s hasta el tiempo máximo de 0.200 s que es el momento en que el impactador empieza a retroceder y se ha transferido toda la energía potencial a la carrocería.

Figura 9. Simulación del impacto frontal según el reglamento UNECE R 29. a) Instante de inicio del impacto, tiempo=0,000s. b) Durante el impacto, tiempo=0,029s. c) Máxima intrusión, tiempo=0,152s. d) Fin de la simulación, tiempo=0,200s.



Fuente: Autores

Al analizar el desplazamiento de los componentes del modelo, se puede apreciar claramente que el volante invade el espacio de supervivencia, porque lo que incumple la recomendación principal de la norma, este criterio es determinante para determinar la seguridad del conductor, ya que trasladado a un

escenario real se traduciría en una lesión grave o una posible causa de muerte. Mediante las herramientas de análisis de datos del software de post-procesado se puede obtener el valor de intrusión del componente invasor. A continuación, se muestra este valor.

Figura 10. Desplazamiento del volante respecto al espacio de supervivencia en la dirección en el eje Y.



Fuente: Autores

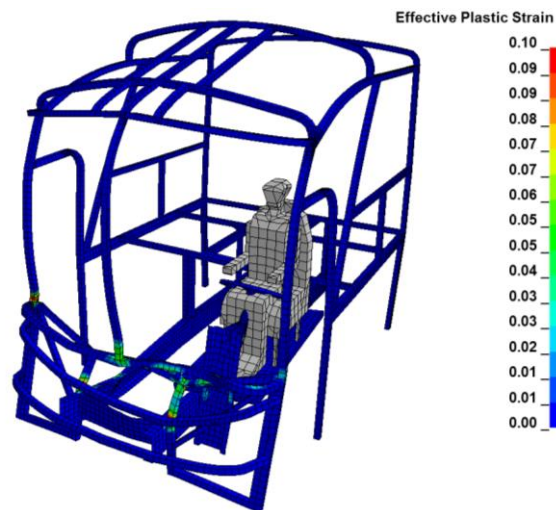
El gráfico muestra el desplazamiento nodo15743 del volante respecto al nodo 15187 del conductor en el eje Y

que es el más crítico. Se aprecia que el nodo llega a un valor máximo de 153 mm en el momento que ha

transcurrido 0,110 s. Adicionalmente se estudiaron los componentes que sufren mayores daños luego del choque, usando el criterio de falla dúctil se puede observar en la siguiente figura aquellos elementos

de la carrocería en los que el esfuerzo mecánico generado supera el límite de fluencia del material, ocasionando una deformación permanente y por lo tanto la falla estructural.

Figura 11. Falla dúctil de los componentes de la carrocería del autobús.



Fuente: Autores

Se identificó que los valores máximos de deformación se localizan en el pórtico central de la carrocería, que generalmente es donde se presta mayor énfasis en el diseño ya que es la zona donde se almacena o absorbe la mayor cantidad de energía. Estos datos pueden indicar que se requiere la mejora del diseño de los parachoques (bumpers) del modelo analizado.

4. Conclusiones

La simulación obtenida mediante el MEF resultó ser una herramienta muy útil a la hora de analizar la carrocería y los componentes de un Autobus sometido a un ensayo de impacto. Priorizando la economía y el tiempo de análisis en comparación con ensayo real. Además, el análisis puede contemplar diferentes normativas para evaluación de choques, por ejemplo se poder revisar especificaciones de las normas europeas de la UNECE de la

agencia NHTSA para crear diferentes escenarios y realizar una evaluación más completa.

La metodología presentada se puede aplicar a un sin número de problemas de ingeniería relacionados a impactos, incluso sirve para caracterizar la resistencia de ciertos materiales bajo este tipo de cargas, en el caso aplicativo se pudo obtener resultados de desplazamiento, deformaciones plásticas y esfuerzos generados en la carrocería que pueden servir de base para el desarrollo de nuevos modelos.

En el caso estudiado correspondiente a la sección frontal del autobús de fabricación local, se concluye que el modelo actual correspondiente a un bus interprovincial NO cumple las condiciones de seguridad requeridas por la normativa europea UNECE R-29 por lo que se trabajar en mejoras del diseño y volver a evaluar su resistencia.

Para la etapa de diseño resulta muy útil el uso de simulaciones ya que se pueden evaluar diferentes modelos o configuraciones bajo múltiples condiciones de choque tales como: velocidades de impacto, tipos de

impactador y ángulos de choque. De esta manera se podrían diseñar modelos más seguros que los que no han sido analizados.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias al compromiso del Instituto de Investigaciones de la ESPOCH de colaborar y apoyar a los grupos de investigación en especial al Grupo GDP de la Facultad de Mecánica, por lo que hacemos público nuestro agradecimiento.

Bibliografía

- Arroba, C. (2013). Estudio del comportamiento mecánico de una sección de la superestructura del autobus interprovincial marca miral infiniti en chasis hino ak sometida a volccadura, mediante los programas ansys ls-dyna y su incidencia en el espacio de supevivencia. s.l.: Universidad Técnica de Ambato.
- Belytschko, T, Liu, W, and Moran, B. (2001). Nonlinear finite elements for continua and structures, vol. 38, no. 07
- Delgado, B. (2016). Análisis mediante el MEF de la protección de los conductores del Autobuses. Madrid:

- Universidad Politécnica de Madrid, 2016.
- Jangpradist P, Senawat S.(s.f.). Improvement of crashworthiness of Bus Structure under Frontal Impact
- Ochoa, M. Viva, J. Santafé, E. (2009). Uso del método de elementos finitos (mef) para la determinación de esfuerzos y deformaciones en un modelo de pozo. Revista fuente. Vol7. N°1
- Muangto B. 2015. Incheon: Korea, 2015. Conference: 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics.
- Julaluk, Carmai, Sujeeprapa, C y Wachirut, k. (2010). Study of effects of vehicle front shapes and impact speeds on post-crash kinematic and injury mechanisms. s.l.: King Mongkuts University of North Bangkok, 2010.
- LS-DYNA Theory Manual. 2006. 2006.
- Mirzaamiri R, Esfahanian, M. 2012. Test simulation and structure Improvement of IKCO 2624 Truck according to ECE R29. s.l.: International Journal of Automotive Engineering, 2012.
- Protection of Occupants for Survival Space as per ECCE R29: A Study of Regulatory Requirements, New Proposals and Challenges of Implementation in Global Context. Sharma M. 2013. s.l.: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. págs. 747-768.
- Sharma, M. (2013). Protection of occupants for survival space as per ECCE R29. s.l.: Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress, 2013.
- Tejasagar, A y Srinkanth, K. (2012). Simulation of vehicular frontal crash test. s.l. : International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering, 2012. Vol. 2.
- UNECE R-29. (2007). VEHICLES WITH REGARD TO THE PROTECCION OF THE OCUPANTS OF DE CAB OF A COMMERCIAL VEHICLE.
- Wu, S, Gu, L. (2012). Introduction to the Explicit Finite Element Method for Nonlinear Transient Dynamics.