

Modelo de simulación matemática para el estudio de la seguridad de los niños en autocares

Luis Martínez Sáez

Director Unidad Biomecánica, UPM-INSIA, ESPAÑA. luis.martinez@upm.es

Antonio García Álvarez

Investigador Unidad Biomecánica, UPM-INSIA, ESPAÑA. a.garcia@upm.es

RESUMEN

La reglamentación actual en vehículos fomenta la instalación y uso de cinturones de seguridad en todas las plazas. Este hecho se ha generalizado para todo tipo de vehículos desde el año 2006, y en particular para autocares, con la modificación del Reglamento General de Circulación. Anteriormente, los autocares o autobuses no tenían la obligatoriedad de instalar cinturones de seguridad y por lo tanto su uso.

El Reglamento General de Circulación establece que los autocares deberán llevar instalados cinturones homologados en todas sus plazas y que cada ocupante utilice los sistemas de seguridad instalados en el vehículo. Esta obligación también incluye a los niños (mayores de tres años de edad) y se insta a la utilización de un sistema de retención homologado adecuado a su talla y peso.

Actualmente, los dispositivos de retención infantil homologados tienen un claro enfoque a su utilización en vehículo M1 y para uso privado (no existiendo actualmente ni en un futuro próximo homologación para vehículos M2 y M3 a no ser que sean específicos para vehículo). Por lo tanto, es necesario investigar en el ámbito de la seguridad infantil en autocares y mejorar su grado de protección. El desarrollo de un modelo matemático permitirá evaluar la seguridad infantil en autocares, de forma que se puedan analizar cuáles son los elementos susceptibles de mejora y dónde se tienen que encaminar los esfuerzos para mejorar la seguridad infantil. El modelo de simulación está validado también para ocupantes adultos, puesto que una mejora en la seguridad infantil no puede ir en detrimento de la seguridad de los ocupantes adultos.

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad de los menores cuando viajan en autocares es una de las mayores preocupaciones de la sociedad para este tipo de transporte (Aparicio y otros, 2002). Para mejorar la seguridad infantil en autocares se necesita una investigación orientada y una implicación administrativa para asegurar su implantación.

La reciente modificación del Reglamento General de Circulación (en España) aprobado por el RD 965/2006 (BOE, 2006) conlleva una serie de modificaciones en el transporte colectivo de personas (autocares). El RD establece que en vehículos de más de nueve plazas incluido el

conductor (categorías M2 y M3) deben llevar cinturón de seguridad en todas sus plazas. Además, también establece que los ocupantes de más de tres años con una estatura menor de 135 cm deben utilizar un sistema de retención homologado adecuado a su talla y peso.

La aparición del RD 965/2006 introduce un vacío real, puesto la utilización de un dispositivo adecuado a la talla y peso del ocupante introduce serias dificultades en su cumplimiento. Actualmente, los dispositivos de retención infantil se homologan para M1 (no existiendo ahora ni en futuro próxima homologación en M2 y en M3 a no ser que sean específicos para vehículo).

Por lo tanto, es necesario investigar en el ámbito de la seguridad infantil en autocares y mejorar su grado de protección (García y otros 2005; Martínez y otros 2003). El objetivo del presente artículo consiste en el desarrollo de un modelo matemático que permita evaluar la seguridad infantil en autocares, podrá analizar cuáles son los elementos susceptibles de mejora y dónde se tienen que encaminar los esfuerzos para mejorar la seguridad infantil. El modelo de simulación ha de estar validado también para ocupantes adultos, puesto que una mejora en la seguridad infantil no puede ir en detrimento de la seguridad de los ocupantes adultos.

2. METODOLOGÍA

Para la creación del modelo de simulación dinámica se ha utilizado la técnica de multibody mediante el software comercial Madymo. Los aspectos que han motivado la elección de esta técnica de simulación son entre otros:

- Técnica de simulación altamente utilizada en automoción y/o *crash*. Debido en parte a su versatilidad y a una mayor rapidez de simulación que los elementos finitos.
- Dispone de una base de datos de maniqués validados (motivo por el cual se ha escogido Madymo). Entre estos maniqués validados se encuentran tanto los ocupantes adultos como varios maniqués infantiles.
- Permite el desarrollo de modelos más versátiles y, en principio, más robustos que los elementos finitos (en parte porque una modificación del modelo, no implica un nuevo mallado). Este hecho facilita no sólo el desarrollo del modelo, sino su posterior modificación para analizar de forma más robusta posibles mejoras y tendencias.

En la Figura 1 se muestra la metodología para la construcción y el desarrollo del modelo de simulación dinámica. Primero se ha realizado un estudio de mercado de diferentes butacas de autocar. Este estudio de mercado atiende fundamentalmente a parámetros geométricos (altura de la butaca, localización de cinturones, anchura, profundidad de respaldo, etc). Una vez realizado el estudio de mercado, se selecciona una butaca suficientemente representativa de la muestra, es decir, que sus dimensiones estén aproximadamente en la mediana de la muestra. De esta forma se desarrolla un modelo con una butaca representativa del mercado.



Figura 1. Metodología aplicada.

Con esta butaca seleccionada se realizará el modelo de simulación. Para ello es necesaria una caracterización de la butaca (toma de medidas más exhaustiva, caracterización estática y dinámica de la butaca mediante ensayos, etc.). Para la construcción del modelo se tomará una pareja de butacas (dos asientos) al ser la configuración más utilizada en autocares

Una vez construido el modelo de butaca, se procede a la parte más importante del desarrollo del modelo: la validación. En este caso, la validación del modelo se ha realizado mediante ensayos dinámicos de escala completa con maniqués. La comparativa del modelo con estos ensayos constituyen el mejor método para la evaluación del modelo (es posible realizar validación del modelo con ensayos a escala reducida, sin embargo el grado de certidumbre del modelo es menor que en ensayos completos). Para ello se ha utilizado un simulador de impacto (sled) de deceleración directa. La validación se ha realizado tanto con ensayos con maniqués adultos como con maniqués infantiles. Este hecho es de vital importancia puesto que las butacas de autocares serán utilizadas tanto por niños como por adultos. Una mejora de la seguridad infantil no puede afectar negativamente en la seguridad de los adultos. Por ello es necesario verificar que la seguridad ofrecida en adultos mantiene al menos los mismos valores de seguridad que antes de las modificaciones incorporadas. Además, las mayores sollicitaciones de las butacas se obtendrán con los maniqués adultos (mayores esfuerzos y mayores deformaciones, pudiendo llegar incluso a la rotura de ciertos elementos), mientras que con ocupantes infantiles se estará evaluando la rigidez de la butaca (es de esperar que no haya grandes deformaciones permanentes), factor que influye decisivamente en las fuerzas y aceleraciones que soportan los niños. Por lo tanto, cualquier modificación en el modelo de butaca (ya sea rigidez estructural de la misma o propiedades de los materiales donde se producen contacto con las diferentes zonas del maniquí) debe ser verificada tanto por ocupantes adultos como por los niños. Por lo tanto, la validación del modelo es un proceso con doble realimentación lo cual añade un mayor grado de dificultad. El proceso de validación

consistirá en una comparativa de las señales registradas en el ensayo con las obtenidas del modelo.

Los ensayos de validación se han realizado según lo estipulado en el Reglamento ECE R80 destinado a la homologación de butacas de autocar (velocidad de impacto de 30-32 km/h con una deceleración media comprendida entre 6.5 y 8.5 g). Se han realizado ensayos con maniqués adultos (Hybrid III 50% masculino) tanto con cinturón como sin cinturón y también se han realizado ensayos con maniqués infantiles (representando edades de 1.5, 3, 6 y 10 años) con distinta utilización de sistemas de retención.

3. RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos del proceso de validación del modelo de butaca, centrado en los modelos con maniqués infantiles. Para lo cual se realizará una comparativa de la cinemática del impacto registrado en los ensayos con cámaras de alta velocidad con los resultados de la simulación. Además se compararán las señales obtenidas en el modelo de simulación con las registradas en el ensayo físico real.

Las simulaciones infantiles mostradas corresponden a un maniquí que representa a un niño de tres años de edad. Además, se han realizado tres configuraciones: sin utilizar cinturón de seguridad, utilizando un cinturón de dos puntos de anclaje o utilizando un cinturón de tres puntos de anclaje.

3.1. Sin utilización de cinturón

En los ensayos reales se utilizaron maniqués de impacto que representan niños con 1.5, 3, 6 y 10 años. Como se ha mencionado anteriormente, para la comparativa de la cinemática y de las señales, se tomará como referencia al maniquí que representa al niño de tres años. En el ensayo se identifica como el maniquí en primer plano situado en la fila delantera (marcado con un círculo en rojo en la Figura 2).

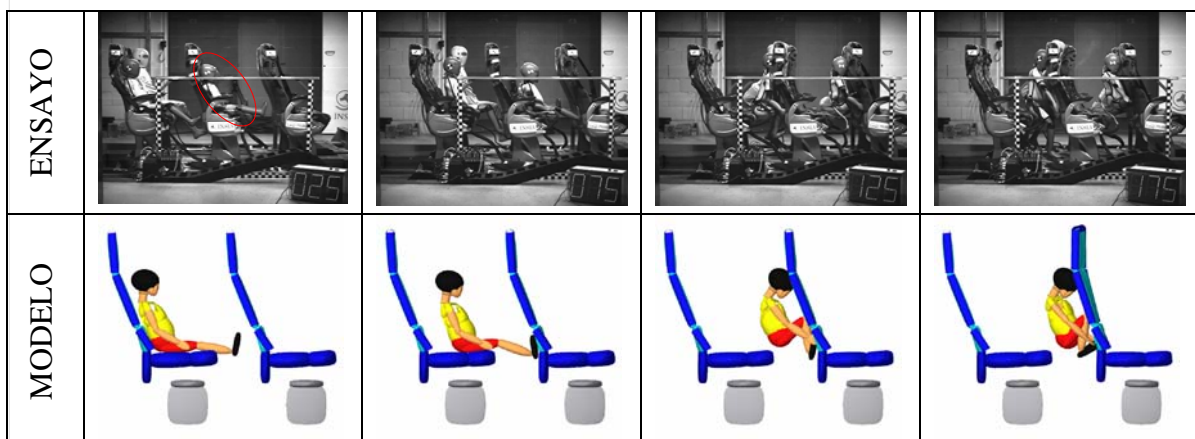


Figura 2. Cinemática del impacto (maniquí representando a niño de tres años sin cinturón).

En la figura anterior, se puede observar que al no existir ningún elemento de retención del niño, ha de ser la butaca de la fila anterior la que retiene al niño. Se observa como primeramente el niño desliza por la butaca hasta que contacta con los pies en el respaldo precedente. Flexiona las rodillas, hasta que irremediamente se produce el contacto de la cabeza contra el respaldo. En la Figura 3, se muestra una comparativa de las señales registradas por el maniquí comparado con el modelo de simulación. La comparativa de las señales se efectúa con las aceleraciones resultantes en cabeza, pecho y pelvis. Se observa una gran semejanza en los resultados obtenidos (tanto en valores máximos como en los tiempos). La aceleración resultante del pecho del modelo, presenta un proceso de “inestabilidad” (este hecho también sucede en el caso del maniquí utilizando el sistema de retención de tres puntos). Es posible que este hecho se deba a que el modelo de maniquí no esté suficientemente perfeccionado. Habitualmente, el modelo se utiliza conjuntamente con sistemas de retención infantil, de forma que no está previsto un contacto bastante severo en la zona del pecho, aún así, la respuesta del maniquí es satisfactoria en términos generales.

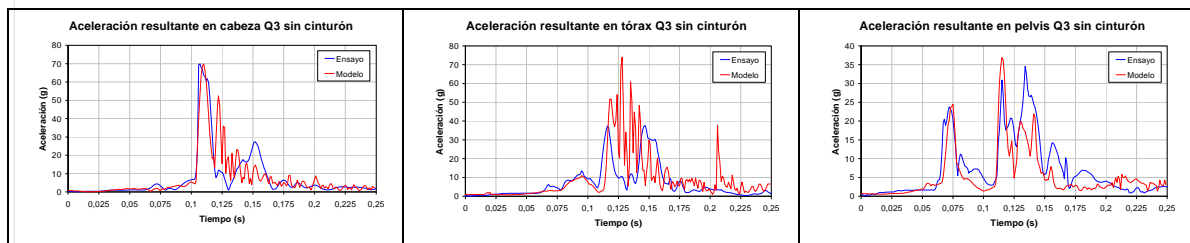


Figura 3. Gráficas del maniquí de tres años (sin cinturón).

3.2. Cinturón de 2 puntos

A continuación se muestran los resultados de la simulación cuando el maniquí utiliza un cinturón con dos puntos de anclaje. En la Figura 4 se observa la cinemática del impacto. En los primeros instantes el cinturón no es capaz de retener suficientemente al niño, llegando incluso a existir un leve contacto de los pies con el respaldo. A medida que el cinturón logra adquirir carga, se retiene la pelvis del maniquí, no dejándola avanzar. De esta forma se produce una rotación del torso y la cabeza hacia delante. Durante este proceso, se observa una hiperextensión de la rodilla (tanto en el modelo como en el ensayo real) que puede ocasionar daños en las extremidades inferiores. Finalmente, se completa el proceso de rotación del torso hasta que la cabeza golpea contra la butaca precedente.

En la figura siguiente, se muestra la comparativa de los resultados obtenidos en el ensayo y en el modelo de simulación. Nuevamente se comparan las señales del maniquí y además, la fuerza registrada en el cinturón subabdominal (al ser el único que hay). Nuevamente, se observa que el modelo de simulación tiene una gran semejanza con el ensayo, tanto en los niveles máximos como en los instantes a los que se producen. En este caso, no se produce la misma inestabilidad en la aceleración del pecho como en el caso anterior, debido a que las sollicitaciones sobre el pecho son menores (no hay impacto del pecho contra la butaca

precedente). Los esfuerzos registrados en cinturón, también presentan una gran semejanza.

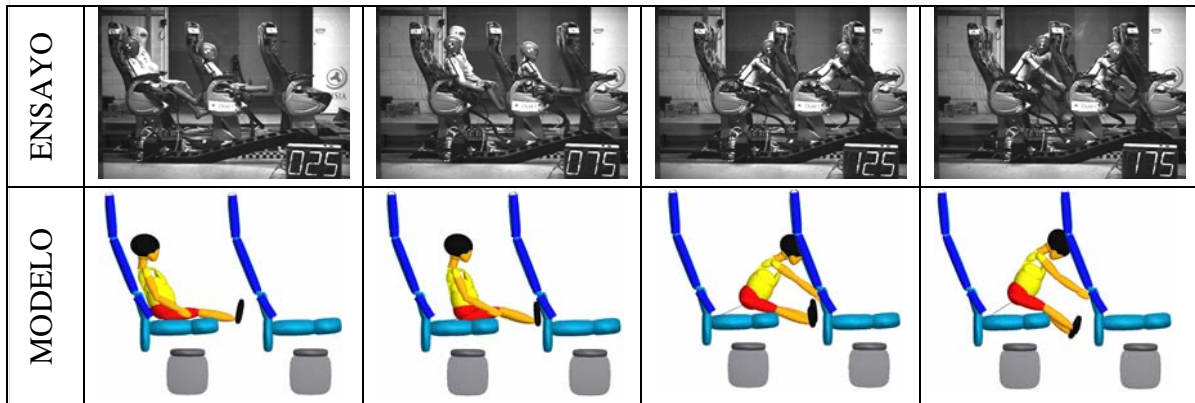


Figura 4. Cinemática del impacto (maniquí representando a niño de tres años con cinturón de dos puntos).

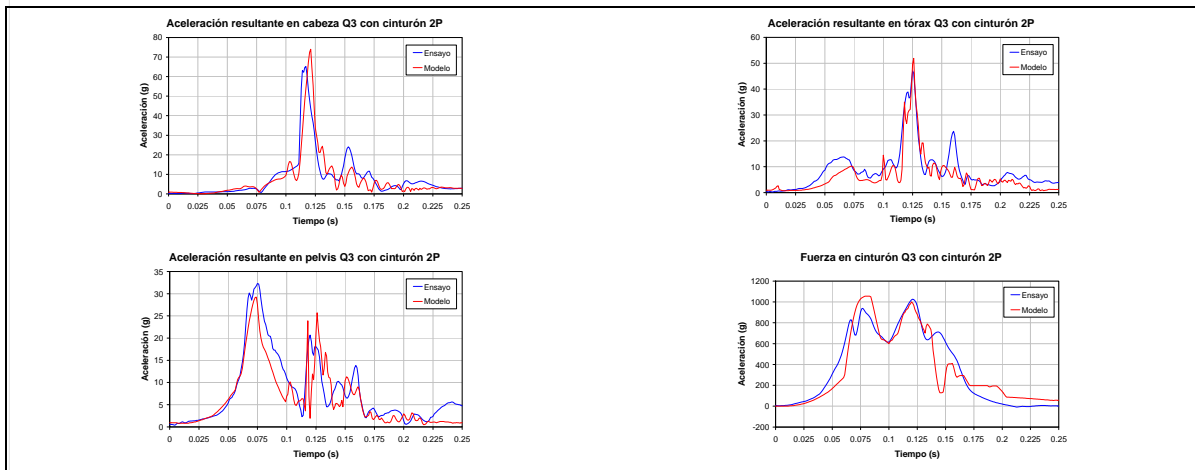


Figura 5. Gráficas del maniquí de 3 años (con cinturón de 2P).

3.3. Cinturón de 3 puntos

En la Figura 6 se muestra nuevamente la comparativa de la cinemática del impacto. Al incorporar cinturón de tres puntos, la retención ofrecida es muy superior a los casos anteriores, puesto que se retiene tanto la zona pélvica como el torso. En los momentos iniciales del impacto, se produce un ligero deslizamiento hacia delante, hasta que el cinturón comienza a retener al niño. No se produce contacto de la cabeza con la butaca precedente.

En la Figura 7, se muestra la comparativa de las aceleraciones del modelo y del ensayo. Nuevamente existe una gran correlación entre ambas. En la aceleración de la cabeza, se observa como en el ensayo existe un pico bastante elevado (a los 270 ms) que no se produce en el modelo de simulación. Este pico, se corresponde con el rebote de la cabeza sobre la propia butaca. En el modelo de simulación, este rebote se produce ligeramente más tarde. Nuevamente, se observa como la aceleración del pecho presenta grandes oscilaciones (a pesar que los niveles de aceleración son inferiores a los casos anteriores). Sin embargo, al utilizar un cinturón de tres puntos, en su interacción con el tórax obliga a deformar la caja torácica.

Analizando en profundidad dichas señales (a través de la FFT), se ha verificado que el modelo presenta grandes componentes en frecuencias desde los 250 hasta los 330 Hz. Aún así, en los primeros instantes (hasta los 90 ms), la aclaración del tórax es similar al ensayo y tanto la pelvis, la cabeza y la cinemática son muy similares.

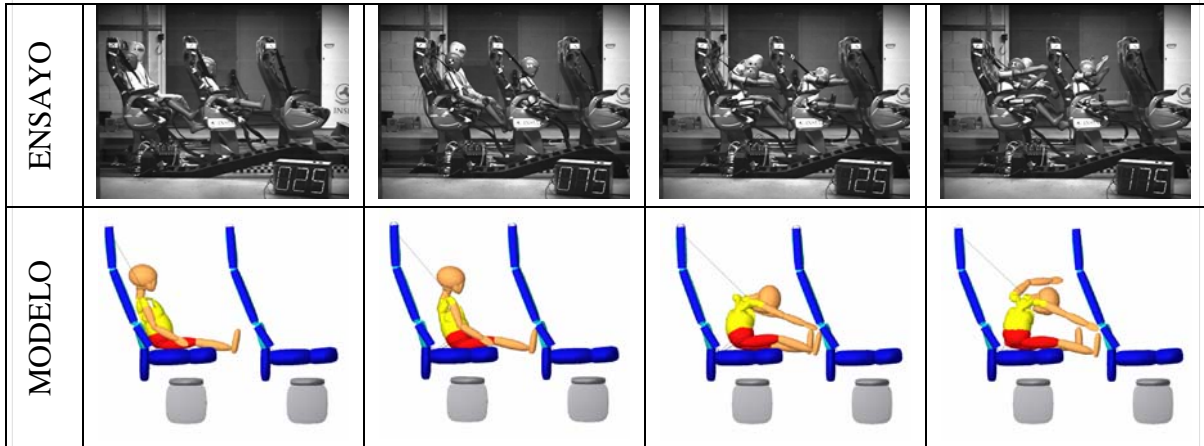


Figura 6. Cinemática del impacto (maniquí representando a niño de tres años con cinturón).

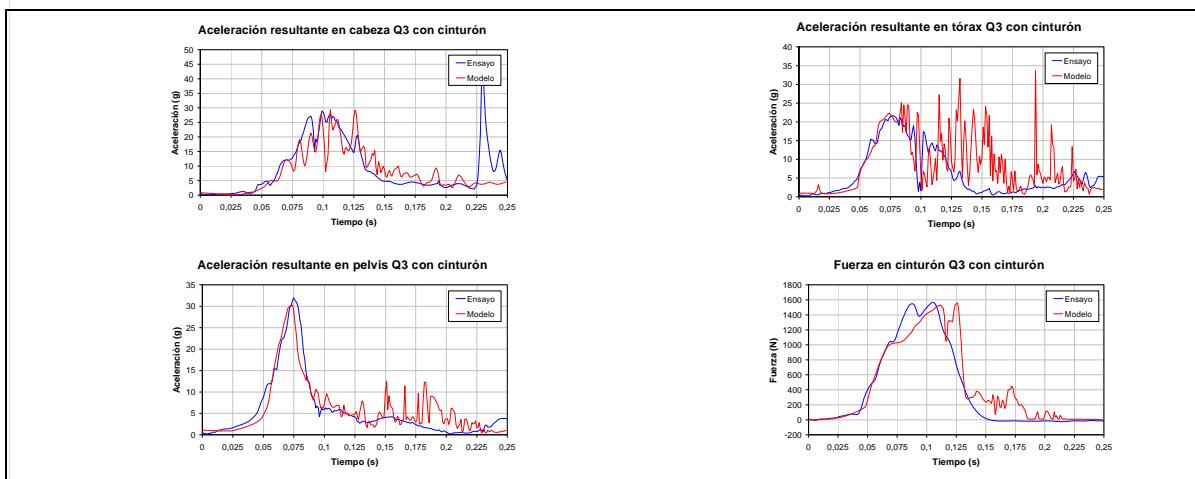


Figura 7. Gráficas del maniquí de 3 años (con cinturón de 3P).

4. CONCLUSIONES

Se han mostrado los resultados de validación de un modelo de butacas de autocar. Dicho modelo se encuentra validado para ocupantes adultos y para ocupantes infantiles (en el presente artículo se han mostrado únicamente los resultados de las simulaciones en ocupantes infantiles). Por lo tanto, una vez concluido el proceso de validación del modelo, se dispone de una herramienta válida para el análisis de la seguridad infantil actual. Este hecho constituye un punto de partida para futuras investigaciones y/o análisis con respecto a la seguridad infantil en el transporte (particularmente en autocares).

Además, mediante este modelo de simulación se pueden realizar análisis tanto cualitativos como cuantitativos de modificaciones en el diseño de la butaca (ya sean estructurales,

utilización de material absorbente, etc.), así como incorporación de nuevos elementos, como por ejemplo: nuevos diseños de cinturón, sistemas de retención infantil (actualmente utilizadas para vehículos turismo), etc. Las posibles modificaciones del diseño de la butaca no deben alterar la estructura del modelo multibody (puesto que alteraría el comportamiento de la butaca y se dejaría de tener un modelo validado). Las modificaciones propuestas consisten en variar propiedades de la butaca sobre la estructura multibody ya creada (por ejemplo, incrementando un 10% la rigidez de ciertas zonas).

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación, a través del Plan Nacional de I+D+i EMSITRAC (TRA2007-67765), por su contribución en el desarrollo de este trabajo. También se desea agradecer la participación de la Comunidad de Madrid, mediante el programa SEGVAUTO (S 2009/ DPI-1509).

REFERENCIAS

APARICIO F., GARCÍA A., MARTÍNEZ L., PÁEZ J., SÁNCHEZ M., GÓMEZ A. (2002), “*Accidentes de Tráfico: Investigación reconstrucción y costes*”. UPM – ETSII. Sección de Publicaciones.

BOE 2006 - *Real Decreto 965/2006 por el que se modifica el Reglamento General de Circulación*, BOE del 5 de septiembre de 2006

GARCÍA, A., VICENTE T., MARTÍN, A., MARTÍNEZ, V., MARTÍNEZ, L., PÁEZ, J. "Bus Safety. Research and Problems", Proc. of The International Workshop on Bus and Truck Passive Safety, Prague. Hungría. AUTÓKUT Engineering Ltd 2005, pp 357-392.

MARTÍNEZ L., APARICIO F., GARCÍA A., PÁEZ J., FERICHOLA G., 2003. “Improving occupant safety in coach rollover”. *Internacional Journal of Crashworthiness N8 Vol 2*, pags 121–132.