



DESARROLLO DE UN MODELO HUMANO PLANO PARA LA SIMULACIÓN DE ENSAYOS DE CHOQUE EN VEHÍCULOS

BELÉN MUÑOZ ABELLA, VICENTE DÍAZ LÓPEZ

Universidad Carlos III de Madrid
Departamento de Ingeniería Mecánica
Avda. de la Universidad, 30, 28911, Leganés, Madrid, España

(Recibido 2 de febrero de 2006, para publicación 31 de julio de 2007)

Resumen – Se presenta el desarrollo de un modelo humano plano para la simulación de ensayos de choque frontal en vehículos. Aunque ya existen modelos similares mucho más complejos y que ofrecen excelentes resultados en la simulación, el realizado pretende ser una herramienta, tanto para la docencia como para cálculos preliminares, que permita estudiar la sensibilidad del cuerpo humano ante las variaciones de parámetros en la colisión sin necesidad de tener que conocer muy profundamente el problema abordado y que sea relativamente fácil de manejar. El modelo se ha desarrollado con el programa de simulación de mecanismos planos Working Model 2DTM y se ha validado comparando los resultados obtenidos con datos procedentes de ensayos de choque reales.

Palabras clave – Ensayo de choque en vehículos, impacto frontal, modelo humano plano.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos, se han producido grandes avances en la seguridad activa y pasiva de los vehículos. En el campo de la seguridad pasiva, las mejoras en el diseño de las estructuras y de los sistemas de retención, han elevado considerablemente el nivel de protección ofrecido por el vehículo a sus ocupantes. La continua mejora de la tecnología informática ha permitido un avance muy importante en el campo de la seguridad pasiva, y más concretamente en el desarrollo de simulaciones, cada vez más realistas, de colisión de vehículos, que se utilizan tanto para el cálculo de las estructuras de los automóviles como para el estudio del daño sufrido por sus ocupantes. Los modelos de simulación del cuerpo humano son ampliamente utilizados en la investigación y desarrollo de la seguridad en colisiones y han contribuido significativamente en la reducción de la severidad de los accidentes de tráfico [1].

Por otra parte, hoy en día existen numerosos programas utilizados para realizar este tipo de simulaciones y que ofrecen excelentes resultados, tales como PAM-CRASHTM, PAM-SAFETM, MADYMOTM o LS-DYNATM. Estos códigos están basados en el método de cálculo mediante elementos finitos, en la técnica multicuerpo o en la combinación de ambos tipos de análisis. Los primeros ofrecen mayor precisión en los resultados aunque también necesitan periodos de cálculo más elevados.

Los modelos matemáticos que gobiernan las simulaciones creadas con estos códigos comerciales son muy complejos y, aunque los programas son relativamente sencillos de utilizar, es necesario conocer con profundidad el problema que se quiere abordar y el funcionamiento del software para obtener resultados válidos.

En este artículo se presenta un modelo humano simplificado para la simulación del ensayo de choque frontal en vehículos que ha sido desarrollado mediante el programa de simulación de mecanismos planos Working Model 2DTM. Se trata de un modelo en dos dimensiones, más sencillo de los que se realizan con los programas comerciales citados anteriormente y enfocado especialmente a la docencia ya que permite estudiar muy fácilmente la influencia sobre el cuerpo humano de diferentes parámetros del vehículo y del propio ensayo, ya que el programa se maneja muy fácilmente con la ventaja añadida de su bajo coste, tanto desde el punto de vista económico como desde el punto de vista de tiempos de cálculo.

1.1. Ensayos de choque

Los ensayos de choque se realizan para evaluar la seguridad pasiva del automóvil de forma global. Consisten en someter al vehículo a una serie de colisiones que simulen distintos tipos de choques con el fin de conocer como se comportan los vehículos en cada situación. Mediante estas pruebas de choque se evalúa tanto el comportamiento del vehículo en un accidente como la afectación de los ocupantes.

Este tipo de tests son realizados bien por los fabricantes de los vehículos, bien por los organismos de homologación o bien por asociaciones formadas por diferentes entidades cuyo propósito es valorar la seguridad de los nuevos vehículos que salen al mercado (consorcios NCAP – *New Car Assessment Programme*) [2]. Dependiendo del organismo que realice el ensayo, éste puede tener características diferentes, aunque globalmente se pueden dividir en dos grandes grupos:

- Frontal. Existen distintas variaciones donde el vehículo se hace colisionar contra una barrera rígida, una barrera deformable o contra otro vehículo. Además de emplearse diferentes objetos, los choques se pueden realizar con diferentes ángulos entre el vehículo y el objeto con el que choca. Otra posibilidad de choque es hacer colisionar el vehículo con el 100% del frontal o con una porción menor de éste.
- Lateral. Se pueden emplear distintos objetos con los que hacer colisionar el vehículo. Se emplean barreras deformables, postes rígidos o distintos vehículos. De la misma manera, se puede modificar tanto el ángulo, como la zona de la colisión.

1.2. *Crash test dummies*

Actualmente las simulaciones de los modelos de cuerpo humano en colisión de vehículos se desarrollan principalmente usando como base los datos que ofrecen los maniqués antropomórficos (*dummies*) que se utilizan en los ensayos reales.

Los *crash test dummies* (maniqués para ensayos de choque) son muñecos antropomórficos cuya misión es sustituir al ser humano en las pruebas de choque a las que son sometidas los vehículos. Además de sustituir a los ocupantes de los vehículos en las pruebas, deben tener un comportamiento similar al del cuerpo del ocupante, es decir, deben poseer una serie de características físicas similares a las del cuerpo humano. Propiedades tales como las dimensiones, la masa, las estructuras internas o la elasticidad de las distintas partes del cuerpo tienen que ser lo más parecidas posible a las de un cuerpo humano real, con el fin de que la correlación entre los resultados obtenidos con el *dummy* y los obtenidos con un cuerpo humano sea la mejor posible. Por otra parte, están dotados de una serie de sensores distribuidos por todo el cuerpo, con los que, midiendo diferentes parámetros, poder evaluar la gravedad del daño que se acusaría en la persona.

1.3. Parámetros de tolerancia del cuerpo humano a impactos y deceleraciones

Algunos de los parámetros que se utilizan en las pruebas de choque para estimar la seguridad pasiva de los automóviles vienen dados, directa o indirectamente, por las medidas que ofrecen los sensores que los *dummies* tienen instalados a lo largo de todo el cuerpo. Estos datos posteriormente se comparan con unos valores de referencia que marcan si las sollicitaciones que sufriría una persona en un choque similar serían suficientes para provocar una lesión o, en cualquier caso, como afectarían los impactos y deceleraciones sufridos al cuerpo del ocupante del vehículo [3]. El modelo de cuerpo humano que se presenta en el presente trabajo está basado en los criterios de tolerancia de la cabeza (criterio combinado de aceleración y duración de la sollicitación) y del pecho (aceleración y compresión).

En cuanto a la cabeza, la tolerancia de esta parte del cuerpo se ha definido en términos de una combinación de dos parámetros: la aceleración efectiva a la que se somete (expresada en g) y la duración de dicha aceleración efectiva (expresada en ms). En 1972 se definió el Criterio de Lesión sobre la Cabeza (*Head Injury Criterion*, HIC), cuya última revisión en 1986 se expresa:

$$HIC = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a \cdot dt \right]^{2.5} \cdot (t_2 - t_1) \quad (1)$$

En (1), a es la aceleración resultante sobre la cabeza, y t_2 y t_1 se eligen de forma que el HIC se haga máximo, siempre que $(t_2 - t_1)$ sea menor o igual que 36 milisegundos. Esta expresión ha permitido establecer un valor de resistencia de la cabeza a impactos y deceleraciones que se ha fijado en un $HIC \leq 1000$.

Por otra parte, el valor de tolerancia para el pecho se expresa en función de la aceleración a la que se ve sometido, que no debe superar un valor máximo de 60 g. También se establecen unos valores de tolerancia de las aceleraciones de impacto sobre la columna vertebral entre 40 y 10 g, manteniendo el mismo valor de 60 g para la caja torácica. Además, existe un segundo valor de tolerancia en función el esfuerzo máximo de compresión sobre el pecho que establece que el esfuerzo de compresión sobre el mismo, medido en el plano medio sagital no puede provocar una reducción de la distancia entre el esternón y la columna de más de 3 pulgadas.

2. METODOLOGÍA

La metodología seguida en el desarrollo del modelo humano de simulación se puede dividir en los siguientes pasos:

- Definición del ensayo.
- Diseño del maniquí.
- Diseño del asiento.
- Configuración de la simulación.

2.1. Definición del ensayo

Para realizar la simulación se ha elegido un ensayo de choque frontal en el que el vehículo es sometido a un pulso de aceleración que simula una colisión frontal a una velocidad de 54,72 km/h. En el sitio del conductor de dicho vehículo se sitúa un *dummy* sujeto mediante el cinturón de seguridad. Más concretamente, el maniquí elegido para el ensayo ha sido el *Hybrid III* de percentil 50% debido a que es el utilizado actualmente en el ensayo europeo de choques frontales de vehículos [4].

2.2. Diseño del maniquí

El *dummy Hybrid III* consta básicamente de un esqueleto de acero. Los huesos de las extremidades están constituidos con barras de acero cuyas dimensiones y formas son semejantes a las de los huesos humanos. La cabeza está formada por una carcasa hueca de aluminio. La caja torácica está formada por una serie de costillas de acero que responden como un pecho humano ante el impacto. La zona del abdomen está rellena de una espuma de poliuretano expandido que simulan los distintos órganos internos. El cuello y la espina lumbar, presentan un comportamiento similar al de los órganos humanos, gracias a la utilización de elementos elásticos intercalados con elementos metálicos, de aluminio, y todos ellos unidos por un cable metálico. La parte blanda del cuerpo, piel y músculos, está fabricada en vinilo y espuma sintética. Estos elementos están contruidos para poder ser desprendidos fácilmente del *dummy*, y facilitar las tareas de mantenimiento, reparación o calibración.

Existen varias versiones del *Hybrid III*, para realizar la simulación se ha elegido el masculino de percentil 50%. En la Fig. 1 se detallan las dimensiones en mm del *dummy* utilizado.

Como se señaló en los apartados anteriores, se ha desarrollado un modelo humano en dos dimensiones, en concreto, el plano de estudio es el lateral porque permite mayor detalle en la simulación. Para diseñar el maniquí con el programa *Working Model 2D™*, en primer lugar, se han dibujado, independientemente, con las herramientas de modelización que proporciona el programa, cada uno de los segmentos que forman el *dummy*, de acuerdo con las dimensiones mostradas en la Fig. 1.

El siguiente paso ha consistido en crear las articulaciones que unen los diferentes segmentos entre sí. En una primera aproximación al problema se utilizaron tres tipos de articulaciones de las que dispone el software: simples o de clavija, en forma de muelle rotatorio y en forma de amortiguador rotatorio, finalmente se ha optado por utilizar las articulaciones de clavija por ser las que ofrecen la mejor respuesta en la simulación. Por último, ha sido necesario limitar el movimiento de las articulaciones, como intervalo

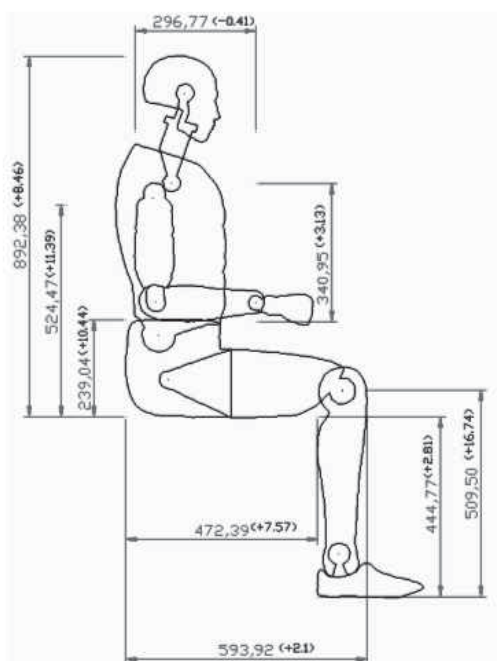


Fig. 1. Dimensiones en mm del Hybrid III percentil 50% utilizado en la simulación.

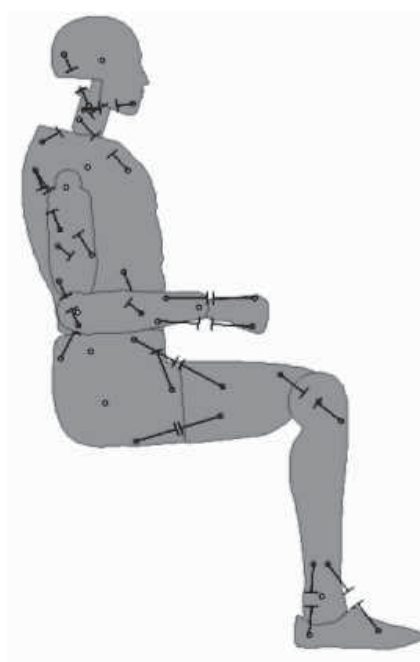


Fig. 2. Modelo de Hybrid III en el formato de Working Model 2D.

Tabla 1. Masa de cada uno de los segmentos del dummy.

SEGMENTO	MASA (kg)
Cabeza	4,5
Cuello	1,4
Torso superior	18,8
Torso inferior	22,4
Brazo superior	2
Brazos inferiores	1,7
Mano	0,6
Pierna superior	6
Pierna inferior	4,3
Pie más zapato	1,7
TOTAL	77,7

válido se ha tomado el rango admisible del movimiento humano [5] con el fin de conservar la biofidelidad del modelo desarrollado. Para limitar los movimientos Working Model 2D™ dispone de separadores o topes. En la Fig. 2 se puede ver el modelo diseñado según el formato del software utilizado, en el que se pueden apreciar los segmentos del dummy y las articulaciones que los unen entre sí.

Es necesario destacar que unas de las zonas más complicadas de reproducir han sido las zonas elásticas presentes en el cuello y espina lumbar del dummy. Estas partes están constituidas en los maniqués reales por elementos elásticos intercalados entre elementos metálicos, lo que hace que tengan unos movimientos diferentes a los de otras partes del dummy. Debido a las simplificaciones que impone la utilización de un programa de este tipo ha sido necesario prescindir de los elementos elásticos y sustituirlos por elementos rígidos, que en lugar de doblarse girarán en torno a unas articulaciones “imaginarias”.



Fig. 3. Elementos que componen el ensayo.

Para completar la definición del maniquí es necesario introducir los valores de las propiedades físicas de los diferentes segmentos que lo componen. En la Tabla 1 aparecen los valores de la masa de las distintas partes del cuerpo [6].

2.3. Diseño del asiento

El diseño del asiento sobre el que está colocado el maniquí es muy importante porque es el elemento que recibe los esfuerzos que recibiría el vehículo en un ensayo real y, posteriormente, se encarga de transmitirlos al *dummy*. Por otra parte, hay que tener en cuenta que el objetivo de la simulación desarrollada es el estudio de los efectos de la colisión sobre el cuerpo humano y no sobre la estructura del vehículo, por esta razón, el efecto que tendría el automóvil sobre el modelo humano en el ensayo real debe ser el mismo que el que tenga el asiento sobre él durante la simulación.

2.4. Configuración de la simulación

Una vez insertados el *dummy* y el asiento, se incorporan los otros dispositivos necesarios para proceder a la simulación. El primero de ellos es el encargado de mover el asiento de la forma adecuada. El resto, son elementos que restringen determinados movimientos tanto del asiento como del *dummy*. En concreto, estos elementos son los siguientes:

- Guía corredera horizontal con unión rígida. Este tipo de guía corredera permite mover el asiento horizontalmente impidiendo que tenga otra componente de la aceleración distinta a la horizontal. Al tratarse de la unión rígida, el asiento se mantiene horizontalmente en todo momento, impidiendo su giro.
- Actuador. Es el elemento que proporciona movimiento al asiento. Permite aplicar valores de fuerza, aceleración, velocidad o desplazamiento.
- Soga. Este elemento se utiliza para simular el efecto que tendría el cinturón de seguridad. Puesto que el cinturón de seguridad simulado es uno de tres puntos de anclaje, se emplean dos cuerdas. Estas cuerdas retienen al *dummy* por la cadera y por la zona alta del tronco, tal y como lo harían la banda de cadera y la banda de hombro, respectivamente, en el caso de un cinturón de seguridad real.

En la Fig. 3 se pueden ver los diferentes elementos que componen el ensayo.

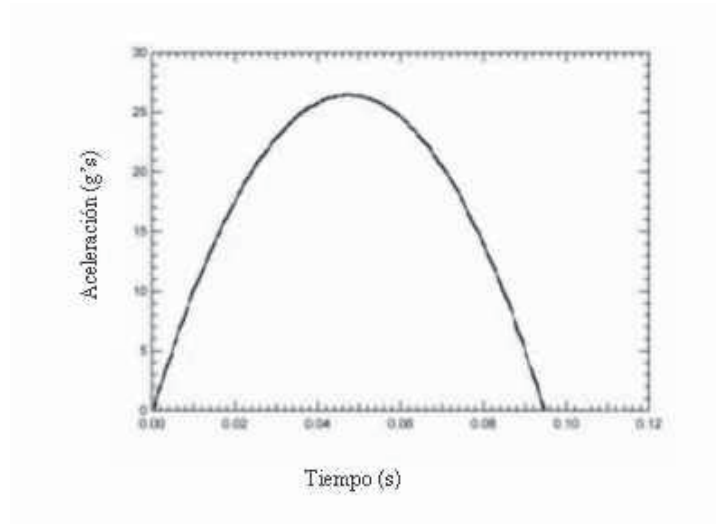


Fig. 4. Gráfica del pulso de aclaración de la simulación del ensayo.

2.4.1. Parámetros del actuador

La configuración de este elemento hay que realizarla introduciendo como parámetro la ecuación del pulso de aceleración que simula el ensayo elegido, una colisión frontal del vehículo a 54,72 km/h. Dicho pulso de aceleración se puede suponer como una parábola (2) [7] con un tiempo de simulación de 96 ms.

$$y = -116586 \cdot x^2 + 11054 \cdot x + 0,2109 \quad (2)$$

donde y es la aceleración en g y x el tiempo en s.

En la Fig. 4 se puede ver la gráfica del pulso de aceleración del ensayo.

La simulación del ensayo se ha llevado a cabo con un tiempo de integración de 0,001 s y un valor de tolerancia de 0,002 m.

3. VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación del modelo se ha realizado comparando los resultados obtenidos durante la simulación con los disponibles en la bibliografía [7]. Las variables que han servido para la comparación han sido las aceleraciones que sufren la cabeza y el pecho. En la Fig. 5 se pueden ver las variaciones de las aceleraciones en función del tiempo que sufre el maniquí en el ensayo real y las calculadas por la simulación.

A la vista de la Fig. 5 se deduce que existen diferencias muy apreciables entre la respuesta real del dummy y los valores calculados por la simulación, tanto en los valores máximos de las aceleraciones como en el tipo de respuesta obtenida, sobre todo en la gráfica correspondiente a la aceleración del pecho se observan numerosas oscilaciones que no se aprecian en el ensayo real. Para mejorar esta situación se ha recurrido a sustituir las sogas que simulaban el cinturón de seguridad por resortes. Se ha comprobado que con este tipo de elementos se reproduce mejor el cinturón de seguridad al permitir un frenado más progresivo del cuerpo. Además se han incluido una serie de amortiguadores con los que se ha mejorado la respuesta global. En la Fig. 6 se pueden apreciar todas las modificaciones realizadas sobre el modelo original.

En la Fig. 7 y Fig. 8 se muestran, respectivamente, la secuencia de movimientos de la simulación con el modelo modificado y la variación de las aceleraciones de cabeza y pecho en función del tiempo.

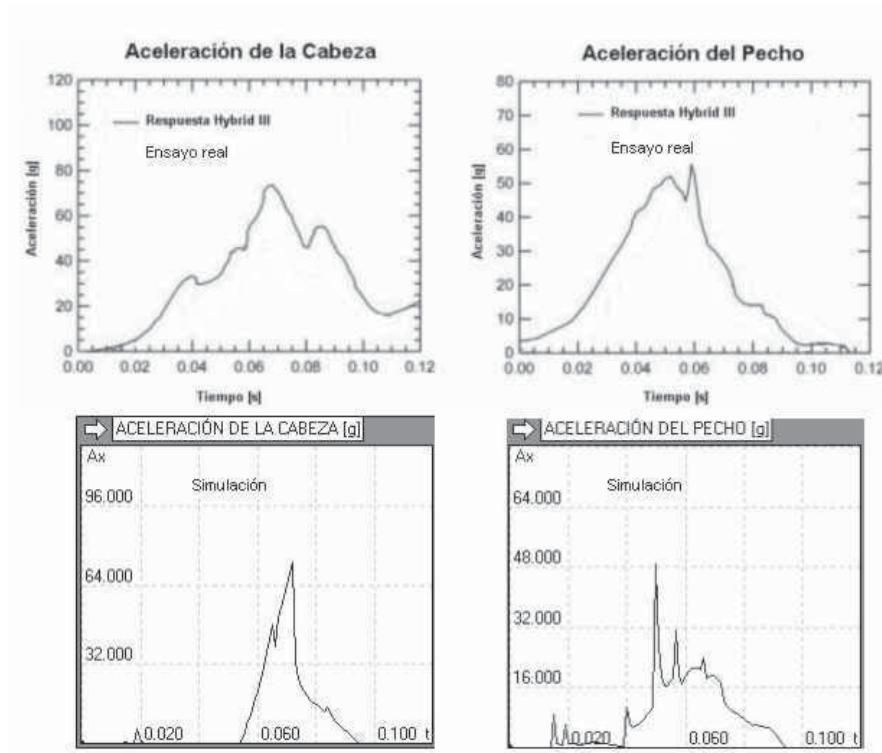


Fig. 5. Aceleraciones de cabeza y pecho en función del tiempo.



Fig. 6. Detalle de las modificaciones realizadas sobre el modelo original.

Los resultados obtenidos con el modelo modificado mejoran notablemente los del inicial, aún así todavía existe alguna diferencia con los datos ofrecidos por el ensayo real, que se pueden deber, en parte, a las propias limitaciones del programa utilizado.

En cuanto a la aceleración de la cabeza los valores máximos entre el ensayo real y la simulación se diferencian en un 15% y se encuentran ligeramente desfasados, en torno a un 12%, además hay que señalar que en la simulación la aceleración comienza a subir más tarde que en la realidad y que en el tramo final de la gráfica se observa como la aceleración disminuye más rápidamente. A pesar de esto, los valores de aceleración ofrecidos por la simulación son muy similares a los datos del ensayo real obtenidos de la bibliografía [7].

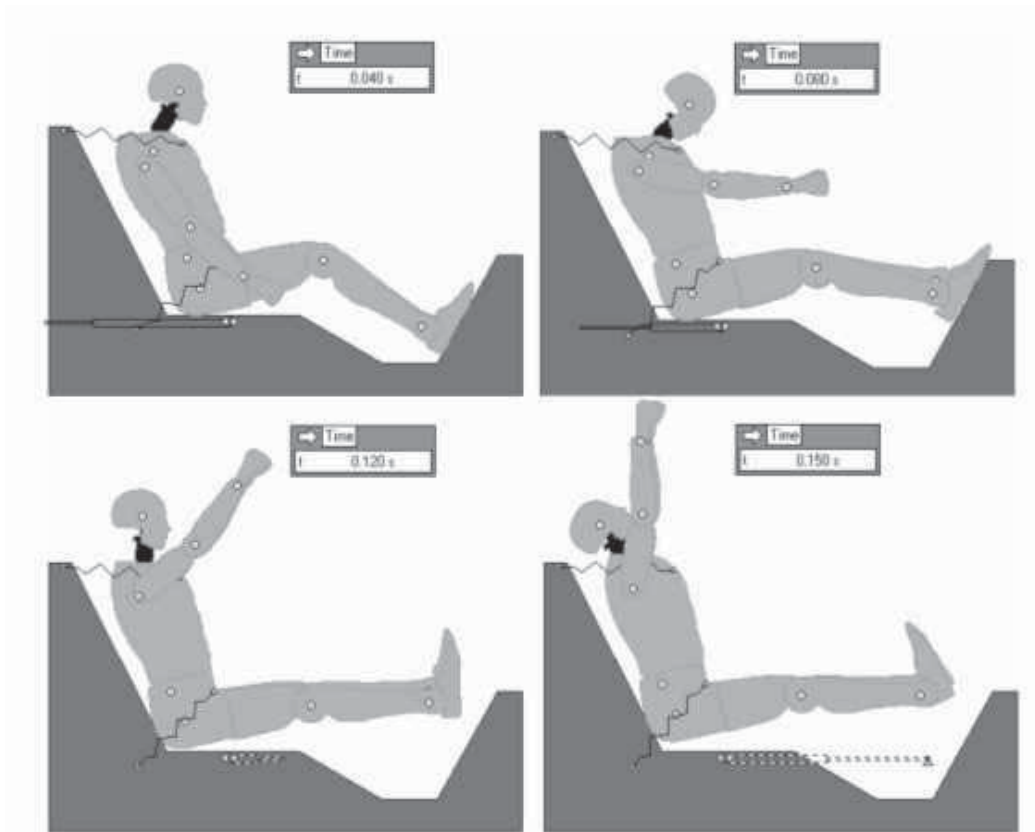


Fig. 7. Secuencia del ensayo con el modelo modificado.

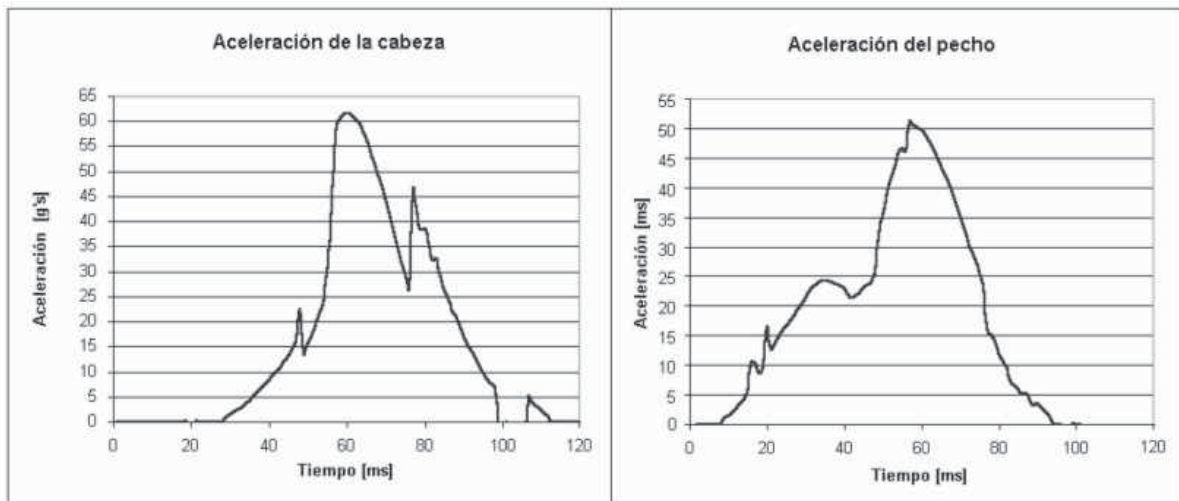


Fig. 8. Variación de las aceleraciones en función del tiempo para el modelo modificado.

En la curva de aceleración del pecho hay que destacar la gran similitud entre ambas gráficas, los valores máximos entre el ensayo real y la simulación se diferencian en un 8% y el desfase de uno respecto del otro es de alrededor del 8%.

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un modelo humano simplificado para la simulación de ensayos de colisión frontal de vehículos que ha sido realizado utilizando un programa de simulación de mecanismos planos, Working Model 2D™, muy sencillo de utilizar y de bajo coste. Aunque existen otros programas, basados en el método de elementos finitos o en la técnica multicuerpo, específicamente diseñados para este tipo de cálculos, el objetivo inicial de este modelo era dotar a los profesores de una herramienta sencilla de utilizar por parte de los alumnos, que no necesitase conocer profundamente el problema a tratar, y con el que se pudiese estudiar la sensibilidad del comportamiento del cuerpo humano ante variaciones en los parámetros del ensayo. El modelo se ha validado comparando las variaciones de la aceleración lineal de cabeza y pecho calculadas por la simulación con los datos obtenidos de ensayos reales de colisión de vehículos, de forma que el error máximo que se obtiene está en torno al 15%.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Jaime Condes Novillo su gran ayuda en la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Wismans, J., Happee, R., Van Dommelen, J.A.W., "Computational human body models", *IUTAM Symposium on impact biomechanics: from fundamental insights to applications*, **124**, 417-429, Dublín (2005)
- [2] Seeck, A., Coxon, C., Wani, K., "Global NCAP harmonisation – initial position, requirements and prospects", *International Journal of Crashworthiness*, **8**(1), 5-15 (2003)
- [3] Yoganandan, N., Pintar, F.A., *Biomechanical Systems: Techniques and Applications*, Vol. I Computer Techniques and Computational Methods in Biomechanics, Chapter 6: Biodynamic Response of the Human Body in Vehicular Frontal Impact, Editor C. Leondes (2000)
- [4] Directiva 96/79/CE del Parlamento Europeo (1996)
- [5] Kapandji, I.A., *Cuadernos de fisiología articular*, Ed. Masson (1996)
- [6] Fasanella, E.L., Jackson, K. E., "Best Practices for Crash Modeling and Simulation", NASA Langley Research Center Report Number L18223 (2002)
- [7] Kirkpatrick, S.W., MacNeill, R., Bocchieri, R.T., "Development of an LS-DYNA Occupant Model for use in Crash Analyses of Roadside Safety Features" *TRB 2003 Annual Meeting*, Washington (2003)

DEVELOPMENT OF A PLANAR HUMAN MODEL FOR USE IN VEHICLE FRONTAL CRASH TEST SIMULATION

Abstract – A planar human model for use in vehicle frontal crash test simulation is presented. It has been developed using Working Model 2D™, a software for planar mechanism simulation. The results have been compared with the ones obtained by another authors from real tests. Several of the advantages provided by this model included interactive simulations and further investigation of the effects of different parameters and their interaction in complex problem of vehicle collision.

Keywords – Vehicle Crash Test, Frontal impacts, Planar Dummy Model.