

## **Desarrollo de una metodología para el análisis de atropello de peatones utilizando modelos de elementos finitos del cuerpo humano.**

**Luis Martínez Sáez**

Profesor de Automóviles de la ETSII. Director Unidad de Biomecánica del INSIA.  
Universidad Politécnica de Madrid.

INSIA. Instituto de Investigación del Automóvil.

CAMPUS SUR UPM. Carretera de Valencia km 7. 28031. Madrid. España.

Tel. +34 91336 5327. Fax. +34 91336 5302. e-mail: [luis.martinez@upm.es](mailto:luis.martinez@upm.es).

**Antonio García Álvarez**

Investigador del INSIA, UPM, España.

**Luis Jesús Guerra Casanova**

Investigador del INSIA, UPM, España

Departamento de Impulso de la Innovación Internacional, CDTI. España.

### **Resumen**

Los peatones son los usuarios más vulnerables de las vías públicas, y su interacción con la geometría y rigidez del vehículo que les atropella es decisiva en la aparición o no de lesiones. Este artículo analiza estos accidentes mediante el análisis de dos modelos de atropello con diferentes vehículos (turismo y todoterreno) en un escenario de atropello típico utilizando una metodología combinada multibody-elementos finitos, que usa técnicas multibody en el vehículo y de elementos finitos para el peatón.

En estos modelos se analizan las cinemáticas del peatón así como las lesiones que aparecen en ambos casos mostrando las diferentes prioridades en protección de peatones que se deben tener en cuenta en el desarrollo de futuros vehículos más seguros para este colectivo.

**Palabras Clave:** Biomecánica, Peatones, Elementos Finitos, Cuerpo Humano.

## **1 Introducción.**

Los peatones son los usuarios más vulnerables de las vías públicas (European Commission 2004), y su interacción con la geometría y rigidez del vehículo que les atropella es decisiva en la aparición o no de lesiones, (Higuchi 1991 y Linder 2004). Estas lesiones suelen concentrarse, atendiendo a su frecuencia y severidad, en la piernas y en la cabeza del peatón (Carter 2005a, Martínez 2006 y Mizuno 2003). Las lesiones de piernas están causadas por el impacto directo del vehículo sobre ellas, mientras que las de la cabeza son el resultado de dónde y con qué velocidad se ve proyectada la cabeza del peatón contra el vehículo.

Este artículo analiza los atropellos de peatón utilizando una metodología combinada multibody-elementos finitos que utiliza técnicas multibody para el desarrollo del vehículo y de elementos finitos para el peatón. La técnica se aplica a dos modelos de atropello en un escenario típico de estos accidentes, con un vehículo turismo y con otro del tipo todo terreno.

En estos modelos no sólo se analiza la cinemática del peatón, sino también las lesiones que aparecen en las piernas por el impacto directo del vehículo, así como, las condiciones del impacto de la cabeza del peatón y su interacción con las estructuras del vehículo. La ventaja de utilizar esta técnica combinada reside en que el modelo de elementos finitos del cuerpo humano permite predecir con detalle las lesiones que aparecen en los peatones (roturas de ligamentos, huesos, etc..) y los puntos anatómicos en los que dichas lesiones se producen. Además el modelo de elementos finitos del cuerpo humano incorpora la funcionalidad de eliminar dinámicamente durante la simulación los tejidos que superan el límite de rotura, y por lo tanto es factible predecir con mayor precisión la cinemática de la cabeza cuando impacte con el vehículo, simulando de forma realista a un peatón que sufre lesiones durante el

atropello. Es por ello que las conclusiones obtenidas tendrán mayor validez que aquellas otras en las que no tenga en cuenta el efecto de dichas lesiones sobre la cinemática del peatón.

## 2 Metodología para desarrollar modelos de vehículo para atropello de peatones.

Los modelos de elementos finitos de vehículo son excesivamente complejos para ser utilizados extensivamente en el estudio de la protección de peatones y se pueden simplificar mediante modelos de superficies facetadas que cumplan las dos características fundamentales y que se ha demostrado que mayor influencia tienen en su interacción con los peatones que atropellan, (Martínez 2007b).

- Una geometría exterior tridimensional detallada de la parte frontal del vehículo.
- Una correcta distribución de las rigideces locales de los elementos de la parte frontal del vehículo.

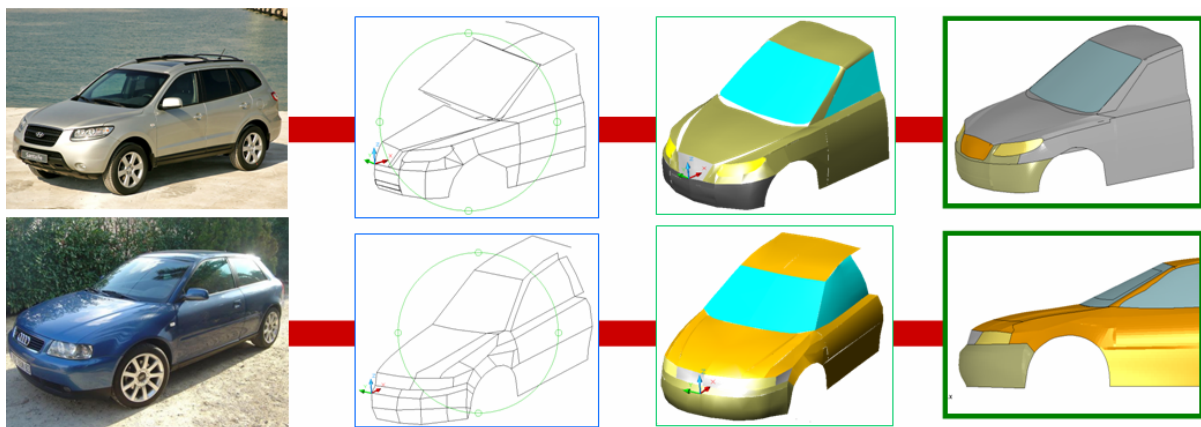
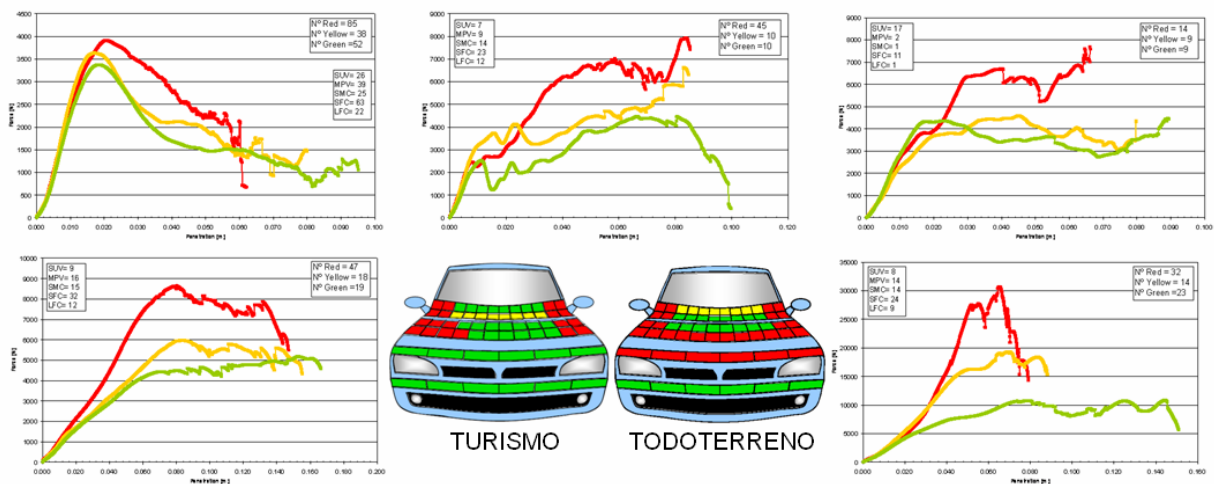


Figura 1: Construcción geométrica de los modelos.

La geometría del vehículo se modela en LS-DYNA utilizando mallas geométricas cuyas propiedades de masa, inercia y de rigidez se definen independientemente y no necesitan de la definición de los materiales constitutivos de las diferentes partes del vehículo.

Las mallas geométricas de las diferentes partes del vehículo se obtienen mediante el escaneado en 3D de los vehículos seleccionados. Este escaneado digitaliza las superficies exteriores del vehículo en formato de polilíneas tridimensionales. Tras un post procesado en CAD, se transforman en superficies, fraccionándose posteriormente en pequeñas unidades de superficie que forman la malla de la superficie y que serán incluidas mediante elementos placa en el software de elementos finitos.



**Figura 2: Disposición de la rigidez local del vehículo.**

La definición de las rigideces de las mallas geométricas se incluyen en el modelo como funciones fuerza-penetración. Los valores de dichas funciones se han obtenido de (Martínez 2007a), donde se obtienen, basados en 425 ensayos de los impactadotes de peatones utilizados por EuroNCAP, los corredores de rigidez para el parachoques, el

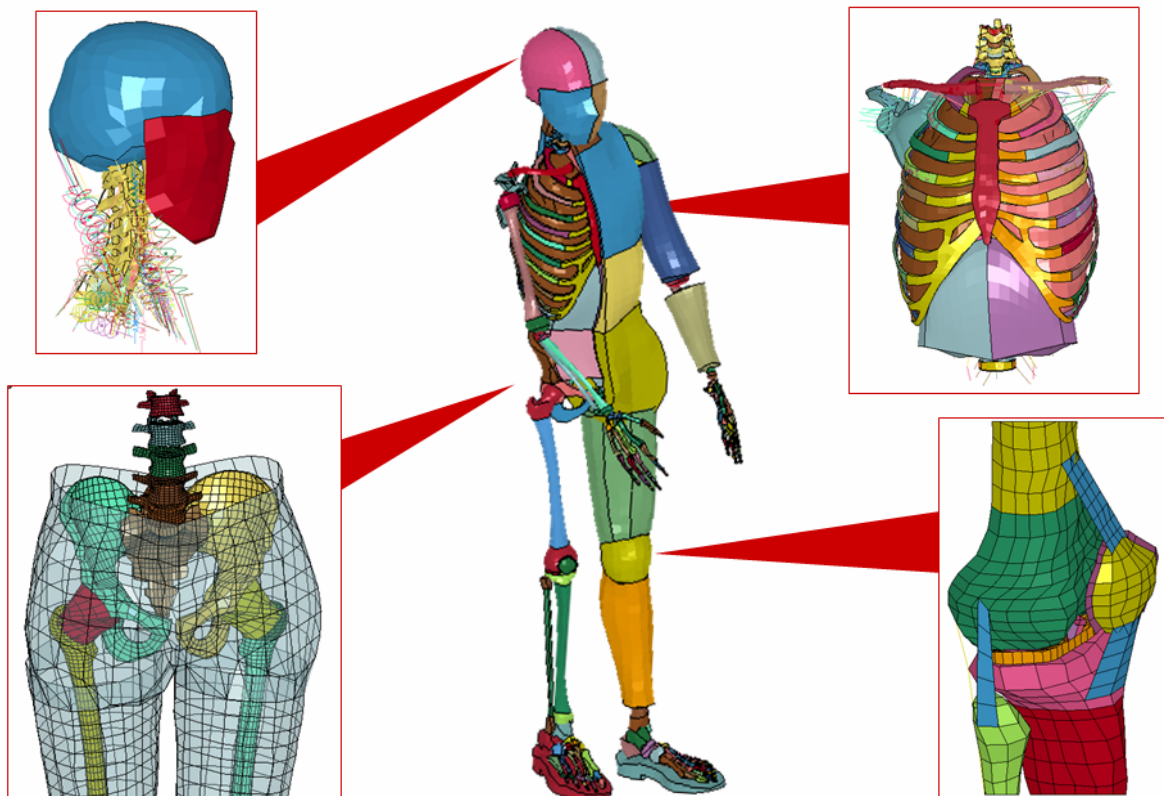
capó y la base del parabrisas para los tres niveles de puntuación que se utilizan en dichos ensayos (rojo, amarillo y verde). Estos corredores de rigidez se han desarrollado para los principales segmentos de los vehículos conforme a la clasificación utilizada por EuroNCAP y permiten definir para la misma geometría de un vehículo un comportamiento agresivo para los peatones (corredor rojo), con un nivel de protección intermedio (corredor amarillo) y vehículos con buen nivel de protección de peatones (corredor verde).

Para incorporar las rigideces en cada zona de un vehículo concreto, se han utilizado los mapas de resultados de protección de peatones que publica EuroNCAP para cada vehículo. Así, la geometría exterior de cada modelo se divide en sesenta zonas en las cuales se puede definir una rigidez representativa de su rigidez local obtenida mediante ensayos.

## **2.1 Modelos de peatón.**

Para analizar las lesiones en profundidad los modelos multibody actuales de peatón no tienen la capacidad ni el detalle suficiente para predecir estas lesiones y es necesario utilizar modelos de elementos finitos del cuerpo humano. El modelo de peatón utilizado es un modelo de elementos finitos del cuerpo humano THUMS (Total Human Model for Safety), que representa el cuerpo de un percentil 50% masculino en posición erguida. El modelo contiene una detallada descripción anatómica del cuerpo humano con 60,000 nodos y 80,000 elementos e incluye las propiedades mecánicas de los diferentes tejidos humanos así como sus límites de rotura (Maeno 2001).

El modelo describe en detalle toda la estructura ósea del cuerpo humano, diferenciando las partes trabeculares de las corticales, así como, los cartílagos, tendones y ligamentos más importantes del cuerpo humano. También modela los músculos y la piel que recubren al esqueleto. Los órganos internos y vísceras están modelados como un volumen continuo sin una descripción detallista de los distintos tejidos y oquedades que los componen, en aras de obtener un modelo de menor complejidad y número de elementos constitutivos, para reducir los tiempos de cálculo del ordenador y sin generar un menoscabo importante en la validez de los resultados. Sin embargo, las zonas del cuerpo humano en las cuales aparecen con mayor frecuencia lesiones se han modelado con el detalle necesario.



**Figura 3: Modelo de peatón.**

### **3 Desarrollo de modelos de atropello.**

Aplicando una tecnología híbrida, se han desarrollado dos modelos de atropello con un turismo y un todoterreno en un escenario típico de atropello. Este escenario representativo de los atropellos (vehículo a 40 km/h que atropella a un peatón cruzando), se ha definido de acuerdo a (Grünert 2006). Los modelos de turismo y todoterreno se han seleccionado de forma tal que sus geometrías son representativas para cada segmento según (Carter 2005b).

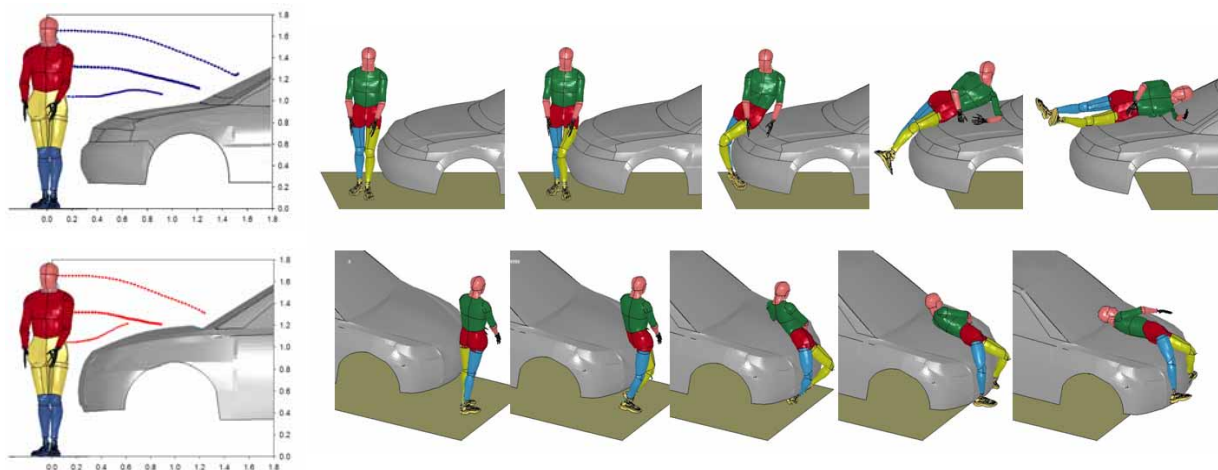
Para tener en cuenta en este estudio los avances logrados en la mejora de la protección de los peatones de los vehículos más modernos, a estos modelos geométricos representativos de cada segmento de vehículo, se les ha dotado de la distribución de rigideces más seguras para el peatón del segmento que representan, de acuerdo a las puntuaciones publicadas en EuroNCAP.

### **4 Resultados de los modelos de atropello.**

La cinemática de ambos atropellos se recoge en las Figura 4 y Figura 5. En ambas figuras se observa que las diferencias entre ambos atropellos derivan del comportamiento de la pelvis en los primeros instantes del impacto.

Mientras que en el atropello con el turismo la pelvis va cayendo sobre la parte delantera del capó para luego ir deslizando por él, focalizándose toda la flexión únicamente en las piernas, en el atropello con el todoterreno, al estar la pelvis involucrada en el primer impacto, todo el cuerpo debe acompañar la flexión y la pelvis es lanzada hacia arriba por el impacto con el vehículo.

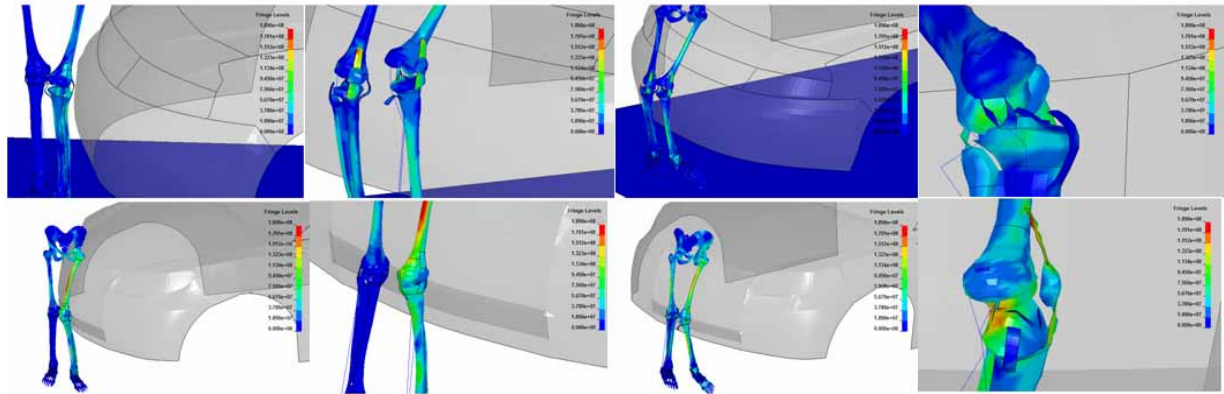
Esta cinemática tiene una relación directa con las posibles lesiones en la cabeza, ya que como la parte superior del cuerpo del peatón genera un momento respecto al punto de impacto, éste es mayor en el caso del turismo que hace que el impacto de la cabeza contra el vehículo se produzca a una velocidad mayor (9.7 m/s en el turismo frente a los 6.04 m/s del todoterreno), en una distancia (WAD) superior (2,14 m en el turismo frente a 1,90 m del todoterreno) y en un instante posterior (136 ms en el turismo frente a los 115 ms del todoterreno). Sin embargo, debido a las diferencias estructurales de los dos tipos de vehículos, la severidad del impacto de la cabeza en el turismo es menor que en el todoterreno (HIC 700 para el turismo frente a un HIC de 1450 del todoterreno) al impactar en el turismo en medio del parabrisas y en el todoterreno en el borde inferior del cristal.



**Figura 4: Trayectoria de la cabeza, tórax y pelvis en ambos casos y secuencia de los atropellos con vehículo turismo (arriba) y todoterreno (abajo).**

Se observa en la Figura 5 que la distribución de tensiones y deformaciones en el fémur y la tibia son significativamente diferentes a lo largo del atropello. En el caso del todoterreno, el fémur sufre unas cargas de flexión muy altas que provocan, en zonas localizadas de la diáfisis fracturas parciales. Sin embargo, en el caso del turismo, la flexión se distribuye entre el fémur y la tibia, por lo que las cargas que se alcanzan son menores y no existen fracturas en la diáfisis de ninguno de los dos huesos.





**Figura 5: Distribuciones de esfuerzos en las piernas en atropello con vehículo turismo (arriba) y todoterreno (abajo).**

Sin embargo, se observa que en ambos casos existen roturas de los ligamentos de la rodilla (ligamento lateral interno y ligamentos cruzados), sin embargo las distribuciones de la carga y los tiempos de rotura son diferentes en ambos casos. En el caso del turismo el ligamento lateral interno rompe en el impacto directo con el parachoques del vehículo, mientras que en el del todoterreno, falla por la carga que le llega debida a la flexión del fémur. En ambos casos, una vez roto el ligamento lateral interno, los ligamentos cruzados no son capaces de soportar las cargas posteriores y se produce su rotura en su inserción con el fémur.

## 5 Conclusiones.

En este artículo se han analizado la cinemática y las lesiones producidas por dos tipos de carrocerías, en un escenario típico de atropello, turismo y todoterreno a 40 km/h.

Los modelos de simulación se han construido utilizando una tecnología híbrida multibody elementos finitos que permite abordar la simulación de diferentes tipos de vehículos (distintas geometrías) y con diferentes características de las rigideces de deformación. Estas rigideces de los vehículos, se pueden seleccionar de entre unos corredores obtenidos a partir de datos de ensayos con vehículos reales, que permiten representar vehículos con agresividades variables para los peatones, desde los más protectores a los más severos durante los atropellos, todos ellos existentes en el mercado de vehículos actuales.

Para realizar el estudio se ha optado por utilizar las rigideces correspondientes a los vehículos que mejores resultados han obtenidos en las pruebas de EuroNCAP, es decir, se han modelado los vehículos más protectores para los atropellados.

De la cinemática de ambos atropellos se concluye que el movimiento de la pelvis es clave en las condiciones de impacto posteriores para la cabeza del peatón. Si la pelvis puede avanzar fácilmente por encima del capó, la cabeza impactará con el vehículo a una distancia y a una velocidad mayor que si la pelvis está involucrada en el impacto directo y es empujada hacia arriba por el vehículo. En este caso, el cuerpo entero es sometido a flexión y la cabeza impacta a una distancia más corta y con menor velocidad lo que no implica que la severidad del impacto sea menor ya que depende también de la rigidez local del punto de impacto.

En cuanto a las lesiones en las piernas, en ambos casos se rompe el ligamento lateral interno, que da la estabilidad lateral a la rodilla y los cruzados, que no son capaces de soportar las cargas una vez roto el lateral. En cuanto a los huesos, la distribución de carga que aparece es significativamente diferente ya que en el caso del todoterreno se concentra en el fémur, llegando a roturas parciales en su diáfisis mientras que en el caso del turismo, la carga es más distribuida y no se producen fracturas en las piernas.

De este análisis se puede concluir que la protección de la cabeza para los vehículos de tipo turismo debe ir enfocada a proteger las zonas de impacto duras en las distancias a las que impacta la cabeza, como son las zonas de los pilares A, mientras que en el caso de los todoterrenos, la protección debe centrarse en hacer menos rígido el impacto de la cabeza con la zona final del capó optimizando la rigidez en dicho impacto.

En cuanto a la protección de las piernas, las medidas en turismos deben ir encaminadas a repartir las cargas entre fémur y tibia evitando su rotación relativa, mientras que en el caso de los todoterrenos, la prioridad debe ser disminuir las cargas en la diáfisis del fémur, para evitar su riesgo de fractura, mediante sistemas o estrategias encaminadas a disminuir la rigidez de dicho impacto.

Aunque se han logrado avances significativos en la mejora de la seguridad de los peatones (los vehículos con zona verde han aumentado), todavía siguen produciéndose lesiones en los atropellos simulados (40 km/h), lo cual confirma que es necesario seguir mejorando las capacidades de protección de los vehículos durante los atropellos.

La metodología presentada, permite calcular con una precisión elevada la cinemática de los atropellados en su interacción con el frontal del vehículo, incluyéndose la simulación dinámica de la rotura de los tejidos del cuerpo humano que superan sus límites de lesión.

Mediante la metodología presentada se puede simular la dinámica de los atropellos con un grado de precisión elevado, pero con unos tiempos de cálculo razonables.

Esta metodología se puede utilizar para evaluar el impacto que el diseño de una geometría exterior de un vehículo tendrá en la protección de los peatones. No obstante esta metodología no es aplicable para el diseño estructural de los componentes de los frontales de los vehículos, para lo cual, es necesario realizar los modelos de los vehículos mediante la técnica de los elementos finitos.

## 6 Referencias.

- [1]. Carter E., Neal-Sturgess C.E, Yang J., Frank P., Martinez L., Guerra L.J., Ferichola G. (2005a) "Definition of vehicle and pedestrian/cyclist impact conditions" APROSYS Deliverable 3.1.1.
- [2]. Carter E., Neal-Sturgess C.E, Guerra L.J., Yang J., Goetz C. (2005b) "The generalised geometry corridors, generic shapes and sizes of the vehicle fleet covering cars, MPVs and SUVs". APROSYS Deliverable 3.1.2.A.
- [3]. European Commission (2004) *Panorama of transport - Statistical overview of transport in the EU(Data 1970-2001)*. ISBN: 92-894-4993-4.
- [4]. Grünert J., Hardy R., Carter E., Neal-Sturgess C., Joonekindt S., Yang J., Hermann K., Marjoux D., Guerra L.J., Martinez L. (2006) "Impact conditions for pedestrians and cyclists". APROSYS Deliverable 3.2.3.
- [5]. Higuchi, K. and A. Akiyama (1991). "The effect of vehicle structure's characteristics on pedestrian behaviour". 13<sup>th</sup> ESV Conference.
- [6]. Linder, A., A. Clark, et al. (2004). "Mathematical modelling of pedestrian crashes: Review of pedestrian models and parameter study of the influence of the sedan vehicle contour. Austral-Asian Road Safety Research", Policing and Education Conference, Perth, Australia.
- [7]. Maeno, T., and Hasegawa, J.(2001) "Development of a Finite Element Model of the Total Human Model for Safety (THUMS) and Application to Car-Pedestrian Impacts". 17th ESV, 2001.
- [8]. Martinez L., Ferichola G., García A., Guerra L.J. (2006) "Análisis estadístico de los accidentes de atropello de peatones a nivel nacional e internacional." Documento Técnico DT-1-001 Proyecto PROFIT 2005 CIT-370100-2005-22.

- [9]. L. Martinez, L.J. Guerra, G. Ferichola, A. Garcia, J. Yang, J. Yao. (2007a) "Stiffness corridors of European vehicles for pedestrian simulations". 20th ESV Conference, Lyon 2007.
- [10]. Martínez L., Guerra L.J., Ferichola G., García, A. (2007b) "Pedestrian accident simulations methodology using detailed vehicle models and age-dependent leg fracture limits on the pedestrian" 2007 International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impact. Maastrich.
- [11]. Mizuno, Y. (2003) "Summary of IHRA Pedestrian Safety WG Activities - Proposed Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Afforded by Passenger Cars". 18th Conference ESV. Paper Number 580.

## **7 Agradecimientos.**

Este trabajo se ha desarrollado en el Proyecto Integrado APROSYS, (TIP3-CT-2004-506503 VI Programa Marco UE) SP3: Peatones y ciclistas. Además, los autores también quieren agradecer la financiación parcial de este trabajo al Ministerio de Educación y Ciencia (Acción Complementaria TRA2005-25911-E) y a la Comunidad de Madrid, que mediante el programa SEGVAUTO (S- 0505/ DPI-0329), que han contribuido al desarrollo de este trabajo.