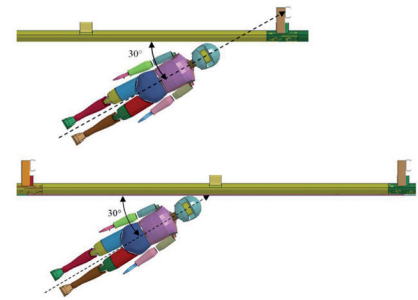


Nuevo sistema de protección de motociclistas fabricado en caucho reciclado

New motorcyclists protection system made in recycled rubber



David Abellán-López y Miguel Sánchez-Lozano

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE. Dpto. Ingeniería Mecánica y Energía. Avda. de la Universitat, s/n – 03202 Elche. Tfno: +34 965 222194. msanchez@umh.es

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7673> | Recibido: 01/06/2015 • Aceptado: 28/10/2015

ABSTRACT

- The aim of this paper is to design a safety barrier to protect motorcyclists using, as a basis, rubber from used tires. The increase in motorcyclist's protection has been a constant demand of this collective in European countries for years. The designed barrier tries to respond this demand and in turn, create a new alternative for reuse rubber from used tires, thus contributing to solve the environmental problem created by this type of waste. The standard UNE-135900 defines the test methods to assess the behavior of the safety barriers and the level of protection against impact of motorists. It has been created a finite element model of the safety barrier in LS-DYNA to reproduce the experimental tests which are necessary for the acceptance of the protection system. It has been used a model of the dummy that sets the standard, to which has been added a helmet. The model was validated and adjusted using test data from a previous prototype. After, several modifications to the original in order to meet the requirements of the standard are made. The final model of the barrier shows a lower severity than the initial prototype. In view of the results, it appears technically feasible the use of rubber for the manufacture of these motorcyclists protection systems.
- Keywords: Recycled rubber, system protection, motorcyclists, guardrail, UNE-135900, road safety, used tires.

RESUMEN

El propósito de este trabajo es el diseño de una barrera para la protección de motociclistas utilizando como base caucho procedente de neumáticos fuera de uso.

El aumento de la protección de los motociclistas es una demanda constante por parte de este colectivo en los países europeos desde hace años. La barrera diseñada pretende dar respuesta a esta demanda y a la vez, crear una nueva alternativa para la reutilización del caucho procedente de los neumáticos usados, contribuyendo así a solucionar el problema medioambiental generado por este tipo de residuo.

La norma UNE-135900 define los métodos de ensayo que permiten evaluar el comportamiento de las barreras y el nivel de protección ante impacto de los motociclistas. Se ha creado un modelo de elementos finitos de la barrera de protección en LS-DYNA para reproducir los ensayos experimentales que son necesarios para la aceptación del sistema de protección. Se ha utilizado un modelo

del maniquí de ensayo que establece la norma, al cual se ha añadido un casco integral. El modelo se ha ajustado y validado a partir de los datos de ensayo de un primer prototipo. Después, se han realizado distintas modificaciones al diseño original para cumplir con los requisitos exigidos por la norma.

El modelo final de la barrera de protección de motociclistas muestra una severidad menor que la del prototipo inicial. A la vista de los resultados, parece técnicamente factible la utilización de caucho para la fabricación de estos sistemas de protección de motociclistas.

Palabras clave: Caucho reciclado, sistema de protección, motociclistas, guardarrail, UNE-135900, seguridad vial, neumáticos usados.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. SEGURIDAD VIAL Y MOTOCICLETA

En los últimos años las administraciones públicas han realizado grandes esfuerzos con el objetivo de aumentar la seguridad vial, invirtiendo en la mejora de las vías y en campañas de concienciación de sus usuarios. Los fabricantes de automóviles también han contribuido al aumento de la seguridad vial, incluyendo en sus vehículos sistemas que aumentan la seguridad tanto de los ocupantes como del resto de usuarios de la vía pública. Gracias a estos esfuerzos, el número de víctimas mortales ha descendido un 43% en los últimos 10 años. Aun así, en Europa, cada año 250.000 personas resultan gravemente heridas en accidentes de carretera [1].

Analizando con mayor detalle estas cifras se desvela que el riesgo de perecer en la carretera difiere según el grupo de usuario. Los usuarios que circulan en motocicleta y ciclomotor solo representaban el 2% del total de usuarios que circulan por las vías europeas, sin embargo el número de motociclistas fallecidos supuso el 15% del total de accidentes mortales [2].

Tanto en las carreteras europeas [2] como en las españolas [3] los datos de siniestralidad de la última década muestran una reducción de los fallecidos en accidente de tráfico en todos los grupos de usuarios, exceptuando los motociclistas, cuyo número de fallecidos se ha mantenido prácticamente constante, Fig. (1). Si se ponderan estos datos según la distribución del parque automovilístico [3], la vulnerabilidad de los motociclistas queda todavía más patente. En 2013, las motocicletas suponían el 8.9% del parque automovilístico español, pero se produjeron 104 fallecidos por cada millón de motocicletas, una relación 3 veces superior a la de los turismos.

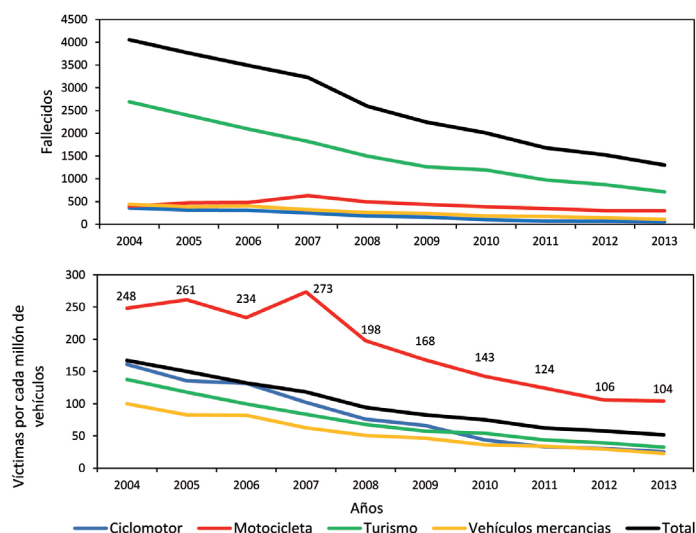


Fig. 1: Número de fallecidos según tipo de vehículos en España (arriba) y relación de fallecidos por cada millón de vehículos de cada tipo en España (abajo) [3]

En comparación con los coches, las motos y los ciclomotores son menos estables, resultan menos visibles y ofrecen una protección menor a sus ocupantes, lo que los convierte en el grupo con mayor riesgo de padecer un accidente grave. Para mejorar la seguridad de los motociclistas, una de las actuaciones principales ha sido la incorporación de *sistemas de protección de motociclistas* (SPM). Los SPM evitan que el motociclista salga de la carretera y colisione con objetos peligrosos como zanjas o muros, y minimizan los daños sufridos por el impacto con el guardarrail, diseñado para la contención de vehículos sin tener en cuenta a los usuarios de vehículos de dos ruedas. Se calcula que el 4.7% de los accidentes en los que resultan heridos los motociclistas, estas heridas se deben al impacto con el guardarrail. Sin embargo, la severidad de los daños es tal, que estos accidentes suponen el 15% de las muertes de motociclistas [4].

Los primeros avances en la reducción de la severidad de los accidentes de los motociclistas se dieron con la sustitución de los postes de soporte de guardarrail. Los tradicionales perfiles en "H" de acero resultaban muy dañinos para los motociclistas que impactaban contra ellos, produciendo amputaciones o seccionamientos. Fueron sustituidos paulatinamente por perfiles sin aristas de chapa en la zona de impacto con el motociclista.

El siguiente avance fue la instalación en la parte inferior del poste de vigas continuas, similares a las que forman el guardarrail. Este sistema ha demostrado ser un método eficaz para la reducción de la gravedad de las lesiones de los motociclistas, ya que ayudan a distribuir la energía de impacto sobre una superficie mayor y evita que el accidentado pase por debajo del guardarrail y colisione con otros elementos más agresivos.

A nivel Europeo, aparte de fomentar el desarrollo y uso de los SPM, se han desarrollado varios proyectos encaminados a mejorar la protección de los motociclistas en la carretera. Estos proyectos tratan, desde la recopilación de información sobre accidentes de vehículos de dos ruedas (proyecto *MAIDS* [5]), imprescindible para emprender cualquier otra acción, hasta el estudio de la eficacia del equipamiento de protección de motociclistas (proyectos *MOSAFIM* [6] y *COST 327* [7]), pasando por la definición de buenas prácticas, campañas de concienciación y formación (proyecto *eSUM* [8]).

1.2. MARCO NORMATIVO

Actualmente existe en Europa varios protocolos para el ensayo de los SPM en situaciones similares a las de un accidente que pue-

den ser agrupados en tres grandes grupos: los basados en la norma Española, en la norma Francesa y en la Alemana [9].

En la norma Alemana, elaborada por BAST (el Instituto federal de investigación de carreteras alemán), el motociclista montado sobre una motocicleta es lanzado contra el guardarrail a 60 km/h. Se utiliza un maniquí especialmente concebido para el ensayo, el *Motorcyclist Anthropometric Test Device Dummy* (MATD-Dummy), y se comparan datos de aceleración y fuerza registrados en el maniquí con unos límites biomecánicos admisibles [10]. Se ensaya el SPM en dos configuraciones distintas: una con la motocicleta en posición vertical y otra con la motocicleta tumbada sobre el suelo y deslizando por este hasta colisionar contra la barrera.

La norma francesa, L.I.E.R. *Test Protocol*, fue definida por L.I.E.R. (laboratorio de ensayos francés) y adoptada también por Portugal. En los ensayos se utiliza un maniquí formado por elementos de maniquíes estandarizados (tórax, extremidades y hombros del Hybrid II; cabeza y cuello instrumentalizados del Hybrid III) a los que se ha añadido una pelvis especial para permitir la posición erguida. Este maniquí, es lanzado contra la barrera a una velocidad de 60km/h haciendo que la trayectoria forme un ángulo de 30° con el sistema de contención. Se deben realizar dos ensayos distintos: uno con el maniquí alineado con la trayectoria y la cabeza por delante, de forma que esta sea lo primero que impacte contra la barrera y otro test en el que el cuerpo del maniquí está alineado con el guardarrail por lo que el primer impacto lo recibe en hombro y brazo [11].

En España se publicó en 2005 la norma UNE-135900 [12], que ha sido adoptada además por Italia y Noruega. El protocolo de ensayo definido por esta norma reproduce el caso de un motociclista que ha caído al suelo y se desliza sobre el suelo en posición decúbito supino hasta colisionar contra el SPM. Las principales diferencias entre las normas mencionadas son: las velocidades de impacto, la orientación del maniquí, el punto de impacto sobre la barrera y los valores admisibles de los parámetros biomecánicos [9,10]. Además, solo en la norma alemana el maniquí va montado sobre la motocicleta.

Estas diferencias entre normativas hacen que un SPM pueda ser aprobado en un país y no cumplir los requisitos en otro país europeo. En un futuro próximo, será aplicable una norma Europea que homogeneizará los criterios de aceptación de los SPM e incrementará el mercado internacional de estas barreras. Esta norma europea, la EN-1317-8, tiene una gran similitud a la norma utilizada en este artículo, la UNE-135900 [9].

La norma UNE-135900 hace distinción entre sistemas de protección puntuales y continuos. En este trabajo se estudia un SPM continuo que, aunque más costosos, son más eficaces que los puntuales, ya que además de proteger al motociclista del impacto contra los postes, previenen la salida de la carretera y el impacto con objetos próximos. La norma española establece que para la evaluación del comportamiento de los SPM continuos se deben realizar dos tipos de ensayo (Fig.(2)). En el primero, la trayectoria de aproximación del maniquí debe formar 30° con la barrera de seguridad, y pasar por la proyección sobre el suelo del centro de masas del elemento de anclaje de la barrera de seguridad. En la segunda configuración de ensayo, el punto de impacto teórico coincide con el centro del vano existente entre dos postes de anclaje consecutivos del guardarrail.

El maniquí utilizado es el *Hybrid III 50th Percentile Male* [13] con una serie de modificaciones: la pelvis y la espina lumbar deben sustituirse por otros modelos que permiten la posición erguida del maniquí, y la clavícula del lado del impacto debe sustituirse por otra con elementos fusibles que simulan la rotura de la clavícula

del motociclista a una determinada fuerza. El maniquí se equipa con un casco integral de policarbonato liso, traje de motociclista de cuero, camiseta de algodón de manga larga, guantes de cuero y botas. El peso total del maniquí instrumentado y equipado debe ser de $87.5 \pm 2.5\text{kg}$.

Las velocidades de impacto contempladas son de 60 km/h y 70 km/h, que determinan dos niveles diferentes de protección para los que puede ser homologada la barrera. Una vez obtenidos los resultados, deben evaluarse varios índices biomecánicos: HIC_{36} (criterio normalizado de daño en cabeza, obtenido a partir de las aceleraciones triaxiales medidas en la misma), fuerzas y momentos en cuello. En función de los resultados obtenidos para estos índices se asigna un nivel de severidad I o II. De esta forma, un SPM puede ser homologado para un nivel de protección 60 o 70, y con un nivel de severidad I o II dependiendo de los resultados del ensayo.

1.3. ¿POR QUÉ UNA BARRERA EN CAUCHO RECICLADO?

La Orden Circular 18/2004 [14], que entró en vigor en enero de 2005, estableció la obligatoriedad del cumplimiento de la norma UNE-135900 para todos los SPM que se instalen en España, y definió un catálogo de sistemas de protección autorizados. La mayoría de los SPM actualmente autorizados están fabricados en chapa de acero. Su funcionamiento se basa en redireccionar la trayectoria del motociclista para evitar que colisione con el poste o con los objetos colindantes a la carretera.

Este artículo trata del desarrollo de un SPM fabricado usando como material base el caucho procedente de neumáticos fuera de uso. Los neumáticos usados constituyen un residuo cuyo reciclado o revalorización es una exigencia establecida en el *Plan Nacional de Residuos*. Existen 38 plantas de reciclaje de neumáticos en España y en 2004 se llegaron a producir más de 305.000 toneladas de neumáticos fuera de uso, de los cuales solo se reutilizaron o valorizaron energéticamente el 50% [15]. A pesar de que en los

últimos años se han desarrollado múltiples procesos y usos para este tipo de material, el problema aún no está totalmente resuelto, y es necesario estudiar nuevos usos y formas de valorización del caucho procedente de los neumáticos usados. Su uso para la fabricación de nuevas barreras abrirá una nueva vía para la reutilización de este material, contribuyendo así a solucionar el problema medioambiental generado por este tipo de residuo. No obstante, es necesario evaluar previamente su viabilidad técnica y su posible contribución a la disminución de la severidad de las lesiones de los motociclistas en caso de accidente.

El uso de este material podría ayudar a rebajar los valores pico de aceleración en cabeza y los esfuerzos en el cuello del motociclista, gracias a la deformabilidad y capacidad de absorción de energía del material. Pero debe asegurarse que la deformación local y la fricción con la barrera no impidan que el motociclista sea redireccionado y siga deslizando para conseguir una deceleración progresiva.

En este artículo se presenta el proceso de desarrollo de la barrera, partiendo de un primer prototipo diseñado previamente por la empresa de reciclado de neumáticos MCE Mezclas Caucho. Tras un trabajo de estudio y optimización de las propiedades mecánicas del conglomerado de caucho reciclado, se diseñó y ensayó un primer prototipo consistente en una barrera de 4m de longitud fabricada con este material. En su interior se colocó como refuerzo un alma de chapa de acero, perforada para asegurar la correcta adhesión con la goma. Esta barrera, cuya geometría se puede ver en la Fig.(3) se instala debajo del guardarrail, colgada del mismo mediante unas piezas de acero.

En los primeros ensayos realizados sobre el prototipo se superaron los límites admisibles por la norma para el esfuerzo de tracción-compresión en cuello. Por otra parte, en el ensayo sobre el centro del vano entre postes, la barrera se levantó dejando que el brazo pasase por debajo y quedara atrapado por la barrera. Aunque la norma contempla que pueda haber enganches siempre que la liberación del maniquí no requiera de herramientas, este no es un comportamiento deseable, pues en un accidente real puede dar lugar a lesiones graves en los miembros y dificultar la atención del herido.

Se decidió entonces acometer la optimización del diseño recurriendo a la simulación de los ensayos mediante un modelo de elementos finitos del SPM, validado a partir de estos resultados experimentales previos, según se describe en el siguiente capítulo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Para el desarrollo del SPM se ha elaborado un modelo de elementos finitos de la barrera, el maniquí y los contactos entre estos y el suelo, utilizando el *software* de elementos finitos explícito LS-DYNA. Este modelo se ha ajustado y validado a partir de los datos experimentales disponibles, y se ha utilizado para simular los ensayos especificados en la norma UNE-135900. El uso de este modelo, ha permitido probar diversas modificaciones en el diseño de la barrera, valorar su comportamiento y optimizar el diseño del SPM para cumplir con los requisitos exigidos.

2.1. MODELO DE LA BARRERA

La geometría de la barrera ha sido generada mediante CAD a partir de los planos del prototipo original, ha sido mallada, y posteriormente exportada a *LS-PrePost*. Para simular el comportamiento del caucho se ha utilizado elementos *Solid* de 8 nodos junto con un modelo de material hiperelástico de Mooney-Rivlin. Los parámetros del modelo del material fueron ajustados iterati-

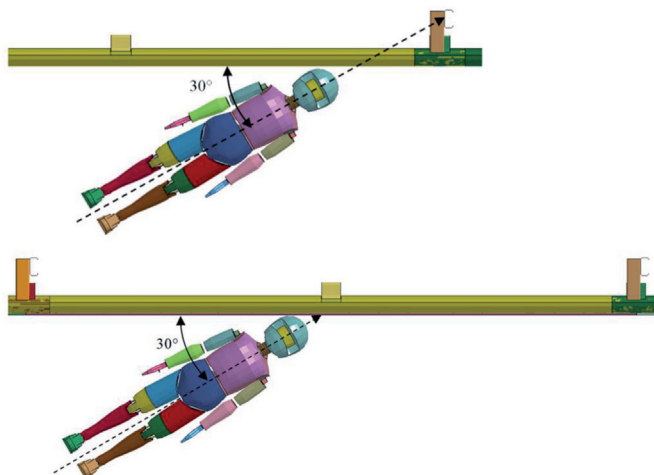


Fig. 2: Configuración de ensayo: impacto contra el poste (arriba) e impacto en centro de vano (abajo)

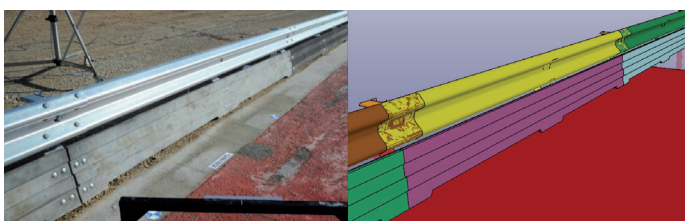


Fig. 3: Vista en perspectiva del prototipo original de SPM (izquierda) y de su modelo en LS-DYNA (derecha)

vamente tomando como referencia el comportamiento de muestras de caucho en ensayos de compresión uniaxial en laboratorio (Fig.(4)). Para la parte delantera del SPM se utilizó el compuesto 3, que aunque más rígido, posee un coeficiente de rozamiento menor. Para la parte trasera se utilizó el compuesto 2, más ligero y barato. El refuerzo interior ha sido modelado con elementos *Shell* con formulación Belytschko-Tsay y un modelo de material elastoplástico. Para la chapa de acero se ha utilizado las propiedades del acero S235, muy usual en este tipo de aplicaciones [14]. El coeficiente de rozamiento entre barrera y casco fue medido también experimentalmente, obteniéndose un valor medio de 0,8.

Las uniones atornilladas de la barrera de caucho con sus elementos de sujeción han sido modelados mediante elementos *Beam*. Las uniones atornilladas entre guardarrail, postes, separadores y demás elementos de chapa de acero han sido modeladas mediante contactos superficie-superficie. Aunque se ha contemplado la capacidad de fallo de las uniones, cabe destacar que en ninguna de las simulaciones ni de los ensayos reales con maniquí realizados con el prototipo se ha detectado la rotura de ninguna unión atornillada.

2.2. CONDICIONES DE CONTORNO Y SUELO

Solo se han modelizado tres tramos de guardarrail y barrera de 4m. Para simular la continuidad de la barrera se ha restringido el desplazamiento de los nodos de los extremos del modelo en la dirección de la marcha de los vehículos. Se han comparado pruebas con estas restricciones y con tramos adicionales de barrera a cada lado, y no se han encontrado diferencias apreciables en la deformación del SPM ni en las fuerzas medidas en el maniquí.

El suelo sobre el que desliza el maniquí fue modelizado como un material rígido al que se asignaron las propiedades típicas del cemento para el cálculo de la rigidez de contacto.

La determinación de las propiedades mecánicas de la cimentación encierra gran complejidad. Para el estudio de colisiones entre vehículos de cuatro ruedas y guardarrailes, en los que el desplazamiento de la parte del poste que está enterrado es significativo, se suele modelar introduciendo una serie de elementos *Beam* con rigidez variable en función de la profundidad [16, 17]. Otro método es crear una cimentación con elementos tipo *Solid* [18], que requiere un mayor coste computacional.

En la fase previa del proyecto se utilizó el segundo método, viendo que la deformación del terreno no era demasiado alta y el coste computacional aumentaba considerablemente. Se optó entonces por simplificar la modelización, impidiendo simplemente el desplazamiento de los nodos más profundos de los postes y los

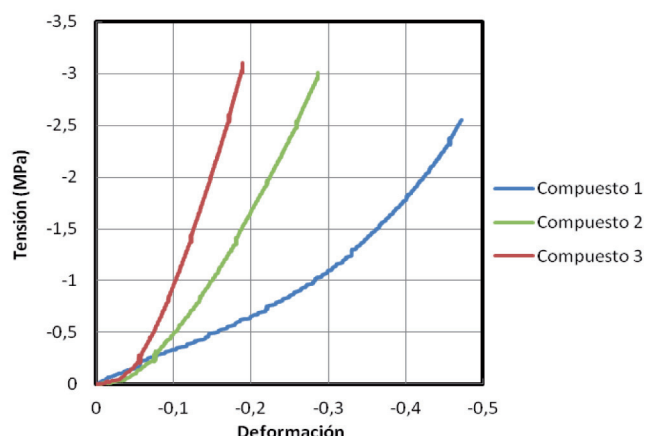


Fig. 4: Resultado de ensayos de compresión uniaxial sobre muestras de compuesto de caucho reciclado

de los nodos situados a mitad de profundidad. La energía cinética del maniquí a 60km/h es muy inferior a la de un vehículo a 100km/h y la deformación del terreno es mucho menor, con lo que las diferencias encontradas no han sido significativas, y este último método se ha considerado suficientemente exacto para esta aplicación.

2.3. MODELO NUMÉRICO DEL MANIQUÍ

Trabajos anteriores de otros autores han utilizado para la simulación un modelo en LS-DYNA del maniquí Hybrid III 50th modificándolo para poder situarlo tumbado sobre el suelo, y realizado otras variaciones en clavícula y cabeza [18, 19,20]. En este trabajo se ha partido de una versión modificada del mismo maniquí desarrollado por LSTC (versión LSTC.H3_50TH_STANDING.100630). En esta versión la cadera permite la posición extendida de las piernas.

El modelo de la clavícula no ha sido modificado para incorporar los elementos fusibles que describe la UNE-135900-1, sino que en la junta de revolución del hombro se ha incluido capacidad de fallo cuando se alcancen los niveles de fuerza que especifica la norma.

La ropa de motociclista no se ha modelado, dada la dificultad de simular el comportamiento de estos elementos y la fricción con el suelo. De todos modos, esta sólo evita la abrasión de los materiales del maniquí al rozar con el terreno y no varía significativamente su comportamiento dinámico.

Al modelo de maniquí se le ha añadido el modelo FEM de un casco con las características que indica la norma, a partir de medidas tomadas en un casco real. Todos los índices biomecánicos que se consideran para la aprobación de los SPM (aceleración en cabeza, fuerzas y momentos en cuello) están influenciados por las propiedades del casco y su capacidad de absorción de energía.

La capa exterior del casco, que suele estar fabricada en polímeros termoplásticos como el Policarbonato o el ABS con espesores entre 2 y 5 mm, ha sido modelada con elementos *Shell* con formulación *Belytschko-Tsay*, empleando un material con plasticidad lineal. La espuma interior de poliestireno, mucho más ligera, es la encargada de absorber la mayor parte de la energía de impacto (entorno al 85%) [21] y de distribuir la presión sobre la cabeza del piloto contribuyendo a reducir el pico de aceleración de la cabeza. Para la simulación del poliestireno se han utilizado elementos *Solid* y un modelo de material específico para la simulación de espumas de baja densidad. Las propiedades mecánicas de los materiales del casco se han obtenido de bibliografía [18].

2.4. VALIDACIÓN DEL MODELO

Antes de proceder al planteamiento de un nuevo diseño de barrera y de su optimización mediante el modelo de elementos finitos, se ha comparado la simulación del diseño inicial del SPM con los resultados de los ensayos reales realizados sobre el primer prototipo, con el fin de asegurar que hay un buen ajuste de los resultados. En la validación del modelo se prestó especial atención a los valores obtenidos para el esfuerzo en cuello, al ser el único parámetro para el que se obtuvieron valores desfavorables en el ensayo. Se ajustó iterativamente la rigidez del contacto y el amortiguamiento del material, estableciendo como criterio de aceptación que los valores pico calculados tanto en tracción como en compresión estuvieran en un rango -0/+10% de los valores medidos en ensayo.

En la Fig.(5) se comparan las fuerzas medidas en el cuello del maniquí en la simulación y en el ensayo contra poste a 60km/h así como los límites impuestos por la norma UNE-135900. En fuerza en dirección Z (compresión-tracción en cuello) se aprecia un pico

de compresión a los 7 ms que supera los límites establecidos por la norma. Este pico de fuerza corresponde al primer contacto del casco con la barrera de caucho. En el milisegundo 72 se vuelve a superar el límite de fuerza, esta vez a tracción en cuello, que corresponde al instante en el que el hombro alcanza la zona de unión entre los dos tramos de barrera.

En la misma gráfica se puede apreciar la buena correlación entre el resultado obtenido mediante la simulación con el modelo de elementos finitos y los datos experimentales.

En el ensayo de impacto a 60km/h en el centro de vano se produjo el mismo pico de fuerza de compresión en el cuello. No se detecta ningún otro instante en el que se superen los límites biomecánicos establecidos por la norma. Por otro lado, ninguno de los otros parámetros que contempla la UNE-135900 (HIC_{36} y momentos en cóndilo occipital) para la aceptación del SPM supera los límites máximos durante los ensayos experimentales. En la Fig. (6) puede apreciarse cómo el modelo del prototipo inicial del SPM también reproduce satisfactoriamente el atrapamiento del brazo al pasar bajo la barrera en el ensayo contra el centro del vano.

3. RESULTADOS

Se ha rediseñado el SPM atendiendo a los problemas mostrados por el prototipo de barrera inicial durante los ensayos. En concreto, se ha rediseñado la geometría de la barrera (Fig.(7)), modificando su sección transversal y las características del refuerzo interior para evitar que se superen los límites de fuerza de tracción-compresión en cuello durante el ensayo. La nueva geometría de la cara de la barrera en la que impacta el motociclista permite un contacto más progresivo entre el casco y el SPM, lo cual reduce el pico inicial de fuerza de compresión en el cuello del motociclista. Por otra parte, esta geometría reconduce la trayectoria de la cabeza en los instantes iniciales del contacto, de manera que el pico de esfuerzo se produce siempre con el área de contacto a una misma altura, lo que mejora la repetitividad del ensayo, evitando el problema estu-

diado por otros autores para otros tipos de SPM [22]. También se han estudiado posibles cambios del compuesto de caucho reciclado, analizando la influencia de distintos coeficientes de rozamiento, densidades y rigideces.

Otro de los problemas que se producía durante el ensayo del maniquí contra el poste, el exceso de fuerza de tracción en cuello (Fig.(5) superior), ha sido solucionado mediante el rediseño del refuerzo interno de la barrera y de las piezas de unión entre tramos de SPM. El nuevo SPM redirige la trayectoria del motociclista de una forma más eficaz, lo que reduce las fuerzas en el cuello cuando el maniquí alcanza la zona del poste que sujeta el guardarraíl.

Por otro lado se han replanteado las piezas de sujeción del SPM al sistema de contención de vehículos sobre el que va instalado. Se ha mantenido la condición de que el sistema de protección pueda ser instalado sobre los guardarraíles existentes en las carreteras sin necesidad de modificar estos últimos. Pero además, en este nuevo diseño, se ha incluido la posibilidad de que la barrera de caucho pueda ser instalada en tramos de 2m o 4m utilizando las mismas piezas de sujeción.

En los casos en los que la barrera de caucho se instala sobre tramos de guardarraíl de 2m entre postes, el problema de atrapamiento del brazo del motociclista no se producirá. Para los casos en los que la distancia entre postes sea de 4m, las nuevas piezas de unión al guardarraíl actúan de forma que el guardarraíl de acero es el que aporta la rigidez necesaria en el tramo central de la barrera y así se evita que la barrera se levante y el brazo quede atrapado.

Los resultados de la simulación con el nuevo modelo propuesto, en lo referente a los esfuerzos en el cuello, se han incluido en azul en la Fig.(8). A la vista de los resultados el nuevo diseño se ajusta adecuadamente a la norma, y sería posible su homologación como Sistema de Protección de Motociclistas incluso para un Nivel de severidad I en el Nivel de protección 60 (ensayo a 60km/h). Además de disminuir los niveles de fuerza en cuello, mediante la simulación se ha comprobado que la nueva geometría evita el atrapamiento del motociclista, a la vez que limita el rebote que podría hacerlo volver a la carretera donde podría ser atropellado por otro vehículo.

4. CONCLUSIONES

A pesar de los avances de las últimas décadas en seguridad vial es necesario continuar avanzando en la mejora de la seguridad en las carreteras, en especial de los usuarios más vulnerables, como los motociclistas.

Como conclusión del trabajo aquí expuesto se ha obtenido un diseño de sistema de protección de motociclistas técnicamente factible, fabricado a partir de caucho reciclado procedente de neumáticos fuera de uso. Tras la optimización de diseño realizada, y una vez resueltos los problemas encontrados con los primeros prototipos, se han obtenido por simulación unos valores muy favorables para los parámetros biomecánicos indicadores de la severidad del accidente. A falta de realizar ensayos de validación final, los resultados permiten afirmar que el uso de este tipo de materiales en las barreras puede ayudar a atenuar los daños en los accidentes de motociclistas.

Por otra parte, la viabilidad de este uso puede constituir una nueva alternativa para la reutilización del caucho procedente de los neumáticos fuera de uso, contribuyendo así a solucionar el problema medioambiental generado por este tipo de residuo.

Finalmente se ha demostrado que las herramientas de análisis por Elementos Finitos ofrecen una importante ayuda a la hora de

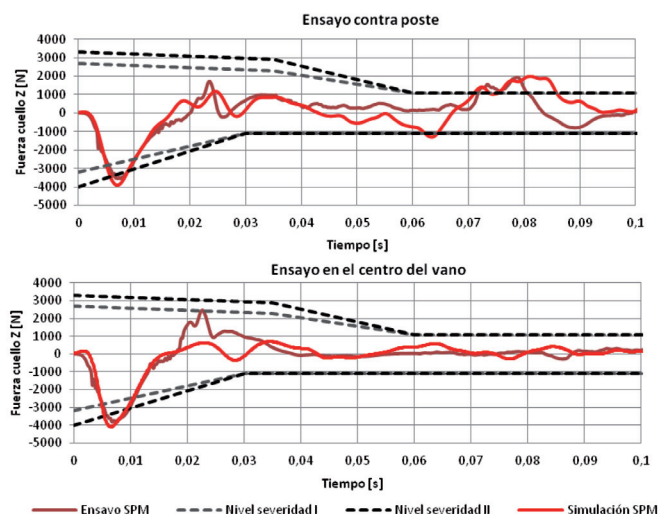


Fig. 5: Curvas de fuerza en cuello en ensayo real y simulación

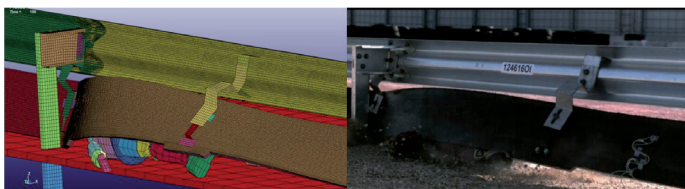


Fig. 6: Detalle del atrapamiento del brazo en el ensayo contra centro del vano

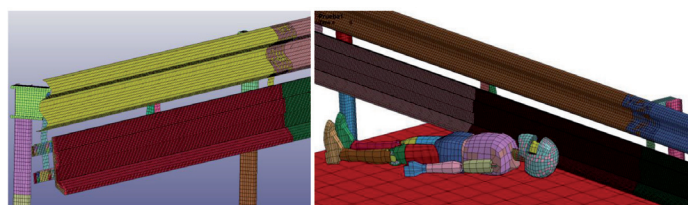


Fig. 7: Modelo en elementos finitos de la barrera de caucho rediseñada

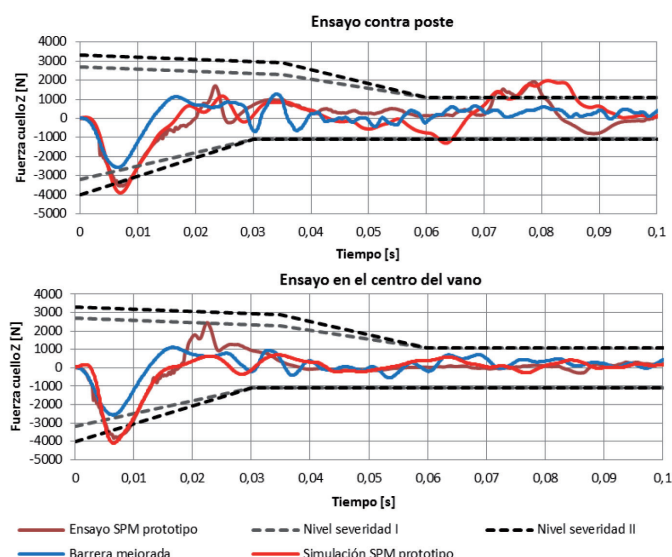


Fig. 8: Curvas de fuerza en cuello obtenidas con el nuevo diseño optimizado, comparado con el original

desarrollar este tipo de barreras. La comparación de la simulaciones a escala real de los SPM muestran una buena correlación con los datos experimentales en los casos abordados en este trabajo y los parámetros biomecánicos son estimados de forma bastante aproximada.

Además de las ventajas económicas de este método, al reducir el número de costosos ensayos a realizar, las simulaciones ofrecen más información acerca de fuerzas, deformaciones, tensiones y aceleraciones de los elementos que intervienen en la colisión, lo que resulta fundamental para entender el funcionamiento y debilidades de los sistemas y optimizar su diseño.

El siguiente paso en el desarrollo de este SPM es la realización de ensayos reales para su homologación según la normativa. La superación de los requisitos permitirá la comercialización de la barrera. Se deberá abordar la superación del ensayo para el nivel de protección 70. Será interesante el estudio comparativo con los actuales SPM metálicos, para valorar las posibles mejoras obtenidas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] European Commision, *Towards a European road safety area. Policy orientations on road safety 2011-2020*, Bruselas, 2010. Disponible en : http://ec.europa.eu/transport/road_safety/pdf/com_20072010_en.pdf.
- [2] European Commission, DG for Mobility and Transport. *Road Safety Vademecum. Road safety trends, statistics and challenges in the EU 2011-2012*. 2013. Disponible en : http://ec.europa.eu/transport/road_safety/pdf/vademecum_2013.pdf.
- [3] Dirección General de tráfico. Observatorio Nacional de Seguridad Vial, *Las principales cifras de la Siniestralidad Vial. España 2013*. Imprenta Nacional del Boletín Oficial del Estado. 2014. Disponible en http://www.dgt.es/Galerias/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/publicaciones/principales-cifras-siniestralidad/Siniestralidad_Vial_2013.pdf
- [4] Berg F. A, Rucker P, Gartner M, et al. "Motorcycle impacts into roadside barriers – real-world accidents studies, crash test, and simulations carried out in Germany and Australia", *Proceedings of the 19th International Conference on Enhanced Safety of Vehicles*, Washington DC, 2005.
- [5] Association des Constructeurs Européens de Motocycle. *In-depth*

investigations of accidents involving powered two wheelers. Final Report 1.2. Bruselas, Septiembre 2004. Disponible en : http://ec.europa.eu/transport/roadsafety_library/publications/maids_report_1_2_september_2004.pdf [Consulta: 15 de mayo de 2015]

- [6] ERTICO. *D6.1 eCall Deployment Barriers and Enablers: Preliminary Report*. 28 de octubre de 2013. Disponible en Web: http://www.heero-pilot.eu/ressource/static/files/heero2_del_d6.1_deployment_barriers_enablers_preliminary_report_v1.0_final.pdf [Consulta: 15 de mayo de 2015]
- [7] Chinn B, Canaple B, Derler S, et al. *COST 327 Motorcycle Safety Helmets Final Report of the Action*. European Commission, Directorate General for Energy and Transport. Office for Official Publications of the European Communities, Belgica. 2001. Disponible en Web: http://ec.europa.eu/transport/roadsafety_library/publications/cost327_final_report.pdf [Consulta: 15 de mayo de 2015]
- [8] Ruiz F, Medeiros C, Arna F, et al. *Action Pack – Addressing Urban PTW accidents* Observatorio Nacional de la Seguridad Vial. Dirección General de Tráfico Madrid. Disponible en Web: http://ec.europa.eu/transport/road_safety/pdf/projects/esum_action_pack_en.pdf [Consulta: 15 de mayo de 2015]
- [9] Federation of European Motorcyclists' associations. *New standards for road restraint systems for motorcyclists*. Disponible en : <http://www.fema-online.eu/guidelines/Guidelines.pdf>
- [10] Peldschus S, Schuller E, Koenig J, et al. "Technical basis for the development of a test standard for impacts of powered two-wheelers on roadside barriers". En: *Proceedings of the 20th International Technical Conference on ESV, Lyon, 2007*, Paper 07-0332.
- [11] Bloch J, Page M. "Evaluation procedures of motorcyclist roadside protection devices". *16th International Road Federation World Meeting, Lisboa, 2010*.
- [12] AENOR. *Evaluación del comportamiento de los sistemas para protección de motociclistas en las barreras de seguridad y pretilos*. UNE-135900:2008. Madrid:AENOR, 2008.
- [13] National Highway Traffic Safty Administration. *Hybrid III 50th Percentile Male [página web]*, Disponible en : <http://www.nhtsa.gov/Research/Hybrid+III+50th+Percentile+Male#instrumentation> [Consulta: 29 de abril de 2015].
- [14] España. Orden circular 18/2005 sobre "criterios de empleo de sistemas para protección de motoristas". Ministerio de fomento. Dirección General de Carreteras, 29 de diciembre de 2004.
- [15] España. Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015. Boletín Oficial del Estado, 26 de febrero de 2009. Vol. I, nº 49, p. 19893-20016.
- [16] Atahan A O, Cansiz O F. "Impact analysis of a vertical flared back bridge rail-to-guardrail transition structure using simulation", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 41, nº 4, Enero 2005, p. 371–396. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.finel.2004.07.003>)
- [17] Sennah K, Samaan M, Elmarakbi A. "Impact Performance of flexible Guardrail Systems using LS-DYNA", 4th European LS-DYNA Users Conference, Ulm, 2003.
- [18] Miralbes R. "Design of motorcycle rider protection system using numerical techniques", *Accident Analysis Et Prevention*, Octubre 2013, nº 59, p. 94–108. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2013.04.016>)
- [19] Ghajari M, Deck C, Galvanetto U, et al. "Development of numerical models for the investigation of motorcyclists accidents", 7th European LS-DYNA Conference, Stuttgart, 2009.
- [20] Vieira C M, Almeida H A, Ferreira I S, et al. "Development of an impact absorber for roadside barriers", *LS-DYNA Andenderforum*, Bamberg, 2008.
- [21] Pinnoji P K, Mahajan P, Bourdet N, et al. "Impact dynamics of metal foam shells for motorcycle helmets: Experiments Et numerical modeling", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, nº 3, Marzo 2010, p. 274–284. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.05.013>)
- [22] Mantaras D, Luque P. "Assessing Motorcyclist Protection Systems Using Finite Element Simulations", *International Journal of Simulation Modelling*, Vol. 14, nº 1, 2015, p. 110–120. (doi: [http://dx.doi.org/10.2507/IJSIMM14\(1\)10.294](http://dx.doi.org/10.2507/IJSIMM14(1)10.294)).

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido posible gracias a la empresa MCE Mezclas Caucho S.A. La idea original y el diseño tomado como base para el análisis aquí presentado pertenecen a dicha empresa.