

Análisis de la seguridad pasiva de los vehículos de rally mediante ensayos de impacto virtuales



Pablo Luque-Rodríguez
Daniel Álvarez-Mántaras
Alberto Martínez-de Orueta

Dr Ingeniero Industrial
Dr Ingeniero Industrial
Ingeniero Industrial

UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Escuela Politécnica de Ingeniería. Campus de Gijón, s/n – 33203 GIJÓN.
Tfno: +34 985 182059. luque@uniovi.es

Recibido: 11/10/2012 • Aceptado: 10/12/2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5443>

PASSIVE SAFETY ASSESSMENT IN RALLY VEHICLE USING VIRTUAL CRASH TEST

ABSTRACT

- The passive safety feature that has devolved in recent years is the safety cage. Its design, i.e., the configuration of multi-tubular structure, thickness, diameter and material are determined by FIA (Fédération Internationale de l'Automobile) regulations. This paper discusses if these requirements are adequate to ensure the safety of vehicle occupants in a crash. A mathematical model is put forward in order to perform analysis using the technique of nonlinear finite elements. Dynamic vehicle response is computer simulated with different safety structures installed under different accident conditions. A series of virtual impact tests are simulated using the explicit simulation software LS-DYNA. As it was found after analysis of the results, safety structures have performed well in rollover accidents, but they present a poor behaviour in the case of side impact. It would be necessary to review the rules and regulations, especially the sections related to protection of the doors and lateral intrusions.
- **Keywords:** Finite element model, Rally vehicle, FIA regulation, Safety cage, Crash analysis.

RESUMEN

Desde los inicios de la competición automovilística se han producido grandes avances en materia de seguridad en los vehículos de rallies. El elemento de seguridad pasiva que más ha evolucionado en los últimos años es la estructura de seguridad o jaula antivuelco. Su diseño, es decir, la configuración de tubos, espesores, diámetros y materiales vienen determinados por el Código Deportivo Internacional que establece la Federación Internacional de Automovilismo (FIA). El presente trabajo plantea la comprobación de si estos requerimientos son los adecuados para garantizar la integridad física de los ocupantes del vehículo en caso de accidente. Para ello, utilizando el software de simulación explícita LS-DYNA, se somete a un vehículo, equipado con diferentes estructuras de seguridad, a una serie de ensayos de impacto virtuales. Los impactos simulan ensayos reales, representativos de los accidentes más comunes en los ra-

llyes, considerando las condiciones de competición en determinados parámetros como las velocidades de impacto. Tras el análisis de los resultados se comprueba que las estructuras de seguridad tienen un buen comportamiento en los accidentes con vuelco, pero un mal comportamiento ante el impacto lateral, por lo que sería necesaria una revisión de la normativa, en especial a los apartados que hacen referencia a la protección de las puertas.

Palabras clave: Modelo elementos finitos, vehículo de rally, Reglamentación FIA, Jaula seguridad, Análisis de colisiones.

1. INTRODUCCIÓN

Desde los comienzos de la competición automovilística, en concreto en la variante de rally, los participantes han ido en búsqueda de las máximas evoluciones que optimizasen las cualidades dinámi-

cas de los vehículos. Sin embargo, los altos niveles de desarrollo y avance experimentados en materia de suspensiones, motor, transmisión, aerodinámica, no se tradujeron en mejoras en materia de seguridad, en parte por la permisividad de los organismos reguladores de la competición. Fue necesario vivir trágicos episodios de muertes y accidentes para tomar conciencia que era necesaria una reforma de los estándares mínimos de seguridad que debían exigirse.

El elemento más importante en materia de seguridad que minimiza, en la medida de lo posible, las deformaciones inducidas en un vehículo de rally como consecuencia de un impacto es la estructura de seguridad o jaula antivuelco. Por este motivo, todo vehículo de rallies que desee tomar parte en competiciones bajo normativa FIA (Federación Internacional de Automovilismo) ha de tener instalada una estructura de seguridad fabricada según los requerimientos que marca la normativa correspondiente. Las características técnicas de las estructuras de seguridad están contenidas en el Artículo 253.8 del Anexo J del Código Deportivo internacional [6], permitiendo tres opciones para el diseño y fabricación:

1. Fabricada según los requerimientos del Anexo J. No necesita estar homologada ni ante la FIA (Federación Internacional del Automóvil), ni ante una ADN (Autoridad Deportiva Nacional), que en España es la Real Federación Española de Automovilismo.
2. Homologada o certificada por una ADN. En este caso la estructura será construida de acuerdo a los requerimientos del Reglamento de Homologación de Estructuras de Seguridad. Algunos de los requerimientos que establece dicho reglamento son similares a los establecidos en el art.253.8 del Anexo J, aunque ofrece más libertad al fabricante para llevar a cabo su propio diseño. La estructura ha de superar una serie ensayos cuasi-estáticos.
3. Homologada por la FIA (Federación Internacional de Automovilismo). La estructura se construye de acuerdo al Reglamento de Homologación de Estructuras de Seguridad [5]. Son las estructuras de seguridad más completas y cuyo proceso de homologación es más restrictivo. Son aplicables solo a determinados vehículos: Súper 1600, Súper 2000, World Rallye Car.

A pesar de ser un elemento fundamental para la seguridad, en el mundo de la competición automovilística y más en concreto en los rallies, no existen ensayos reales de impacto que evalúen el comportamiento del conjunto vehículo-estructura de seguridad ante las circunstancias reales de un accidente. Como se ha descrito, solamente en determinados tipos de estructuras de seguridad son obligatorios ensayos cuasi-estáticos, realizados de forma aislada sobre la parte superior de la misma con el objeto de analizar su comportamiento a vuelco. En ningún caso se exigen ensayos para otro tipo de impacto, ni para evaluar la interacción con el vehículo.

Esto difiere claramente de lo realizado por el resto del sector automovilístico, donde los ensayos reales de impacto [4], tanto estáticos como dinámicos, han sido empleados

para evaluar la seguridad estructural que ofrecen los vehículos, especialmente en EE.UU [30] donde existen estándares específicos como el FMVSS 208, 214 y 216. En los últimos años los estados europeos se están esforzando para alcanzar los mismos objetivos de seguridad teniendo en cuenta las diferentes condiciones de las carreteras [9,20,25].

Motivado por la ausencia de ensayos reales de impacto para la homologación de las estructuras, en el presente trabajo se analizan, mediante ensayos virtuales representativos de los accidentes más habituales en competición, el comportamiento de diferentes estructuras diseñadas siguiendo los requerimientos del Anexo J. El estudio se lleva a cabo sobre este tipo de estructuras por ser las más comunes y porque, según recoge la Reglamentación, no es necesario someterlas a ningún tipo de ensayo de esfuerzos o test de impacto para validar su diseño.

En el sector automovilístico, la simulación virtual es una herramienta de uso extendido en el diseño y la optimización de los elementos y sistemas de seguridad pasiva, tanto de los vehículos como de la infraestructura [11,13,16,18,21,29,32,33]. Sin embargo, en la competición, al nivel de las categorías de rallies, el empleo de la simulación por elementos finitos no lineales es algo marginal y relegado a trabajos de investigación. En este sentido destaca el trabajo realizado por Nassiopoulou [28] donde se analiza el comportamiento de una estructura de WRC instalada en un vehículo, mediante la simulación virtual de un impacto lateral contra un árbol. El trabajo que aquí se presenta va más allá de los estudios realizados hasta la actualidad al analizar varias estructuras, ante diferentes condiciones de impacto y teniendo en cuenta el conjunto vehículo-estructura.

2. EL VEHÍCULO Y LA ESTRUCTURA DE SEGURIDAD

2.1. MODELO DE VEHÍCULO

El trabajo desarrollado pretende explicar el análisis del comportamiento a impacto del binomio vehículo-estructura de seguridad, por lo que previamente al desarrollo completo de las estructuras fue necesario seleccionar un modelo de vehículo en el que instalarlas [11,16]. Con el fin de garantizar la fiabilidad de los resultados, se ha optado por el empleo de un vehículo del cual se disponga de un modelo de elementos finitos validado. Se ha elegido un modelo que ofrece el NCAC (*National Crash Analysis Center*) de EE.UU [29] y que surge con la colaboración entre *Federal Highway Administration* (FHWA), la *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) y la *George Washington University* (GWU).

Se trata de un vehículo denominado *GEO Metro*. Es una variante del *Suzuki Cultus* comercializado en América del Norte entre los años 1998 y 2001. Se ha seleccionado este vehículo ya que presenta unas medidas similares y características mecánicas análogas a las de vehículos empleados en rallies tales como el *Peugeot 107*, *Suzuki Swift* o *Citroën C2*.



Figura 1: Modelo virtual de vehículo Geo Metro y mallado de elementos finitos

El modelo virtual, desarrollado para su simulación en el software LS-DYNA [19], está formado por 193200 elementos y algo más de 200000 nodos. Está compuesto por elementos tipo *Shell* (un total de 191980 elementos), *Solid* (1209), *Mass* (76), *Discrete* (8) y *Beam* principalmente. En relación con los materiales, se emplean hasta 7 comportamientos diferentes [12]. La caracterización más utilizada del material es el denominado *Piecewise Linear Plasticity*, [19] empleada para definir el acero y los cristales.

2.2. LA ESTRUCTURA DE SEGURIDAD. MODELIZACIÓN

El primer paso, antes llevar a cabo el diseño de las estructuras, es la definición del volumen máximo y de los puntos de anclaje de la estructura al vehículo (figura 4). Para ello se utiliza el modelo de vehículo en elementos finitos (figura 1).

A partir de las restricciones geométricas y con el apoyo de un sistema CAD, se llevan a cabo los diseños de las estructuras de seguridad respetando las indicaciones del Anexo J, artículo 253.8 (figuras 2 y 3). En dicho artículo se recogen las configuraciones básicas permitidas:

- 1 arco principal + 1 arco delantero + 2 miembros longitudinales + 2 tirantes traseros + 6 pies de anclaje
- 2 arcos laterales + 2 miembros transversales + 2 tirantes traseros + 2 pies de anclaje
- 1 arco principal + 2 semiarcos laterales + 1 miembro transversal + 2 tirantes traseros + 6 pies de anclaje

La reglamentación solo autoriza tubos de sección circular, con los materiales y dimensiones mínimas indicados en la Tabla 1.

Teniendo en cuenta las diferentes alternativas que ofrece la reglamentación, se diseñaron 6 tipos de estructuras, cada una con una configuración de barras (topología) distinta. Con el objetivo de simplificar y clasificar los análisis de impactos virtuales a analizar, las estructuras se dividieron en dos grupos (Grupo 1 y Grupo 2), dentro de los cuales se diseñaron 3 estructuras, que se identifican de la siguiente manera:

Número de grupo _ Número de estructura dentro del grupo

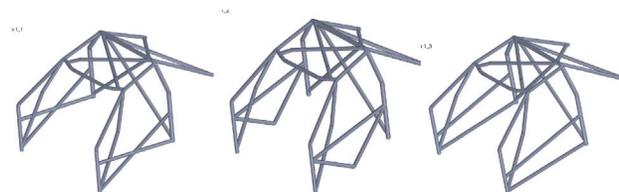


Figura 2: Estructuras del grupo 1

Así el grupo 1 (Figura 2) está formado por una estructura básica y 3 configuraciones distintas de tirantes de puertas, mientras que los tirantes del techo y refuerzo de los tirantes traseros son idénticos para las tres. En el grupo 2, (Figura 3) son los tirantes de las puertas los que permanecen invariables para las tres estructuras mientras que se diseñan tres alternativas diferentes para los tirantes del techo y los refuerzos de los tirantes traseros.

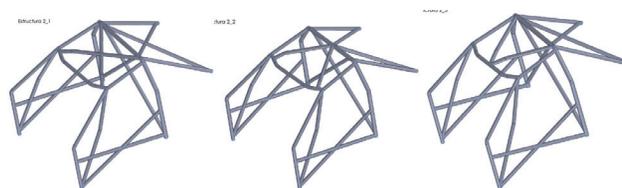


Figura 3: Estructuras del grupo 2

El mallado, a partir de la exportación de los modelos CAD, se realiza con el módulo *HyperMesh* del programa *HyperWorks*. Para el mallado se emplean elementos de malla cuadráticos tipo *Shell*, de tamaño aproximado de 5 mm. Para los elementos *Shell* se utiliza la formulación *Belytschko-Tsay*, por ser la más adecuada para este tipo de elementos y la que menores tiempos de cálculo requiere. Se empleó un material Acero 25CrMo4, por ser un tipo de acero comúnmente utilizado en la fabricación de este tipo de estructuras, con un espesor de los tubos entre los 2 y 2,5 mm.

El ensamblaje vehículo-estructura se realiza mediante la herramienta LS-PREPOST, definiendo las uniones y los contactos para que las deformaciones de las partes del vehículo se transmitan a la estructura.

La fiabilidad de los modelos de simulación de impacto de estructuras tubulares en acero esta ampliamente demostrada en la literatura científico-técnica [1, 26, 27, 34]. Respetan-

Material	Resistencia mínima a la tracción	Dimensiones mínimas (mm)	Utilización
Acero al carbono no aleado conformado en frío conteniendo un máximo de 0,3% de carbono	350 N/mm ²	45 x 2,5 o 50 x 2,0	Arcos principales o arcos laterales, según la construcción
		38 x 2,5 o 40 x 2,0	Semiarcos laterales y otras partes de la estructura de seguridad

Tabla 1: Requisitos de materiales, diámetros y espesores. Normativa FIA

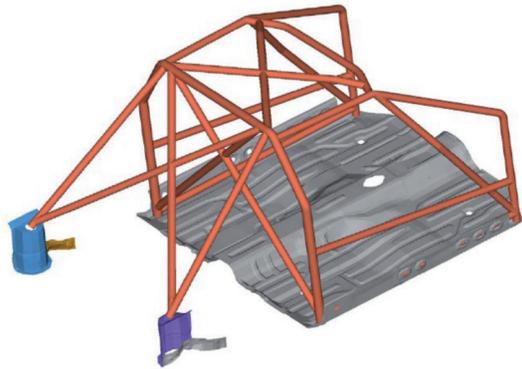


Figura 4: Estructura de seguridad 1_3 y su conexión al modelo del vehículo base

do las recomendaciones en tamaño de malla, formulación de elementos, curvas características de materiales, etc se puede considerar, a falta de una validación experimental, que los resultados que se obtengan con los modelos desarrollados en el presente trabajo son cuantitativamente y cualitativamente fiables.

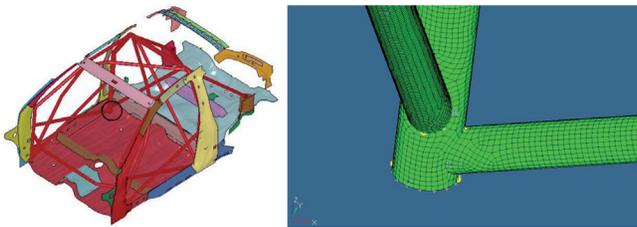


Figura 5: Detalle del pie de anclaje izquierdo del arco principal con tamaño de malla 4,5mm

3. MODELIZACIÓN DE ENSAYOS VIRTUALES DE IMPACTO

Los ensayos virtuales de impacto se definen en base a los tipos de accidente más lesivos que se producen en los rallies.

De todos los tipos de accidente posibles [23], adoptando la nomenclatura de la norma UNE 26-403-90 y de su correspondiente internacional ISO 6813:1998 [15], los más representativos [7] y que más condicionan los sistemas de seguridad pasiva de los vehículos [33] son:

- Accidente con colisión lateral contra objeto fijo. La colisión lateral contra objeto fijo es el tipo de accidente [17] que más daños produce tanto para el vehículo como para los ocupantes [10,14,17,37].
- Vuelco. El vuelco se produce al girar el vehículo alrededor de su eje longitudinal como consecuencia de un balanceo excesivo [18,22].

Con el objeto de definir un procedimiento correcto, se utilizan como referencia los ensayos empleados actualmente por el sector automovilístico. De todos ellos, los dinámicos son los que más fielmente reflejan las situaciones reales de impacto [13, 24, 35, 36], permitiendo la evaluación del

comportamiento del vehículo, la gestión de la energía a altas velocidades de deformación por parte de los elementos estructurales así como las aceleraciones y esfuerzos a los que están sometidos los ocupantes. Tras llevar a cabo un minucioso estudio de los ensayos de impacto existentes se decidió modelizar los siguientes:

- Ensayos estáticos sobre arco principal y delantero. Se realizan para comprobar el comportamiento estructural de las jaulas antivuelco. Al estar aplicada la carga en zonas del techo, se somete a este ensayo a las estructuras del grupo 2 con el objeto de evaluar el comportamiento de las distintas configuraciones de refuerzos del techo y diagonales de los tirantes traseros.
- Ensayos dinámicos de impacto laterales basados en el *Pole Side Test* de EuroNCAP sobre el conjunto vehículo estructura [3]. Este protocolo define un ensayo dinámico en el que el vehículo es propulsado lateralmente a 29 km/h contra un poste rígido de 254 mm de diámetro. Se aplica a las estructuras del grupo 1 por ser las que presentan diferentes configuraciones de tirantes de puertas.
- Ensayos dinámicos de vuelco basados en el SAE (Society of Automotive Engineers) Inverted Droop Test – J996 [2, 31, 32]. En este ensayo el vehículo se deja caer desde una altura de 30,5 cm hasta una superficie rígida horizontal con un ángulo de cabeceo de 5° y de balanceo 25°. La principal deficiencia de este ensayo es que no representa la dinámica de movimiento real de un vuelco en el que el coche gira alrededor de su eje longitudinal y a la vez se desplaza en dirección perpendicular a este eje. Se aplica a las estructuras del grupo 2 por tener configuraciones diferentes en los tirantes del techo.

3.1. MODELIZACIÓN DE ENSAYOS ESTÁTICOS

Se han sometido a ensayos estáticos virtuales solamente las estructuras de seguridad, sin considerar la interacción con el vehículo. Los ensayos estáticos que se realizaron son una variante de los que establece el Reglamento de Homologación [5]. En este caso (Figura 6), se aplica un desplazamiento a la estampa igual al valor máximo admisible por reglamentación, reduciendo el tiempo de ensayo de 15 segundos a 0,015 segundos. Por tanto, el adjetivo “estático” se refiere únicamente a que las estructuras se encuentran fijas por los puntos de unión a la carrocería durante todo el ensayo.

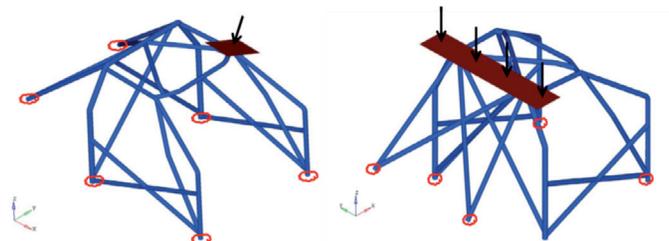


Figura 6: Configuración de la carga aplicada en los ensayos estáticos

Según establece el Reglamento de Homologación para el ensayo del arco principal, en lugar de un desplazamiento debe aplicarse una carga de valor:

$$7.5 \cdot (\text{masa del vehículo} + 150\text{kg}) [\text{daN}] = 7.5 \cdot (1000\text{kg} + 150\text{kg}) \cdot 9.8 = 8452.5 \text{ daN}$$

Con esa carga aplicada a la estampa no deben romperse elementos ni superar una determinada deformación máxima.

3.2 MODELIZACIÓN DEL ENSAYO DE IMPACTO LATERAL CONTRA POSTE

El ensayo de impacto lateral fue aplicado al modelo de elementos finitos del vehículo base sin estructura de seguridad y al vehículo equipado con las estructuras del grupo 1. Con ello se consigue evaluar el comportamiento de las diferentes configuraciones de tirantes de puertas, tomando como referencia el comportamiento sin estructura de seguridad.

Con objeto de analizar situaciones más cercanas a las condiciones de una prueba de competición del campeonato de Rally, se modifican las condiciones del ensayo tipo *EuroNCAP Pole Side* de forma que se incrementa su agresividad. Se adopta una velocidad de impacto de 35 km/h con un diámetro del poste de 250 mm.

El escenario de ensayo (Figura 7) consta de 4 partes: el suelo, el poste, el vehículo y la estructura. El suelo y el poste se comportan como partes rígidas. El tiempo de ensayo se fijó en 0,150 s de tal manera que se alcanzasen las deformaciones máximas antes de terminar el tiempo de ensayo.

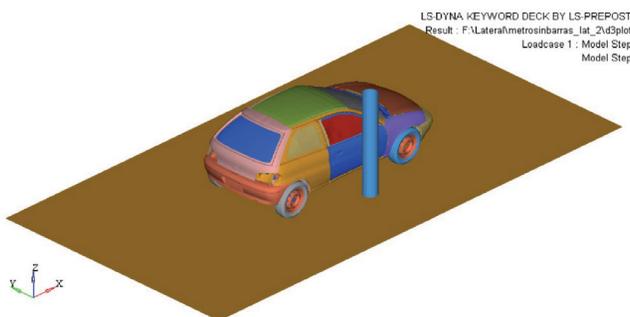


Figura 7: Posición del poste en el ensayo de impacto lateral



Figura 8: Posición del vehículo en ensayo de vuelco con distancia inicial

3.3 MODELIZACIÓN DE ENSAYO DE VUELCO

El ensayo de vuelco fue aplicado al modelo de elementos finitos del vehículo base sin estructura de seguridad y al vehículo equipado con las estructuras del grupo 2. Al ser el tipo de ensayo que se emplea para comprobar el comportamiento estructural del techo [8], se evalúan las diferentes configuraciones de refuerzos del techo y de los tirantes traseros.

El procedimiento del ensayo virtual sigue exactamente lo que recoge en el ensayo *SAE Inverted Drop Test* (Fig. 8).

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para evaluar el comportamiento de las diferentes estructuras de seguridad ante los ensayos de impacto contra poste y vuelco se consideró adecuado medir las deformaciones experimentadas por el vehículo. Se trata de una variable relacionada directamente con la seguridad, dado que uno de los mayores riesgos que corren los ocupantes de un vehículo de competición durante un accidente es el impacto contra parte interiores del mismo. Además, las estructuras de seguridad han de garantizar la existencia de una mínima zona de supervivencia en caso de grandes deformaciones, impidiendo la intrusión de objetos o partes del vehículo.

Los ensayos estáticos sobre estructura aislada se realizan con la finalidad de comprobar si los diseños superarían el ensayo de homologación. Al aplicar a la estampa un desplazamiento igual al valor máximo admisible, los resultados que se analizan y que permiten valorar su adecuación a la normativa son las tensiones (Figura 9 y 10) en los diferentes componentes y la carga máxima de la estampa.

4.1. ENSAYOS ESTÁTICOS

Tras la realización de los ensayos estáticos virtuales, se puede apreciar cómo se alcanzan niveles de tensión elevados en todas las estructuras analizadas, aunque no superan en ningún caso la tensión última del material (Figura 9). Esto es debido a que la fuerza que ejerce la estampa para cumplir con el desplazamiento impuesto es muy elevada, siendo de

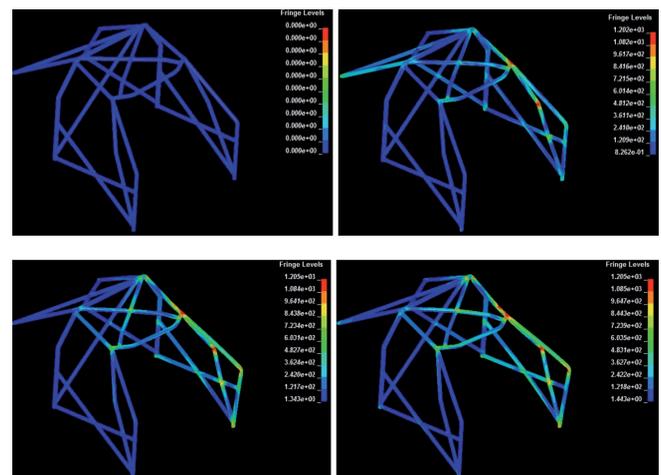


Figure 9: Secuencia del ensayo estático del ensayo de vuelco en la configuración estructural 2_1

media cuatro veces superior a la establecida por la reglamentación. Las tensiones más elevadas se concentran en zonas puntuales (Figura 10), como son los contactos de la estampa con las curvaturas superiores del arco o las uniones de los miembros diagonales del arco principal.

Al no superarse las tensiones de rotura para una carga aplicada en la estampa muy superior a la establecida por la normativa, todas las estructuras del grupo 2 superarían el ensayo del reglamento de homologación con éxito.

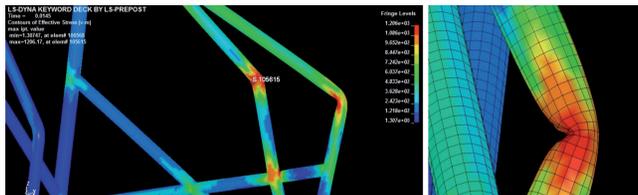


Figure 10: Detalles de la concentración de tensiones

4.2. ENSAYO DE IMPACTO LATERAL - POLE SIDE

En el ensayo lateral se establece como valor característico del impacto el grado de intrusión del poste en la zona de la puerta. Se establecieron 4 alturas (en la dirección Z) y 3 longitudes (en la dirección longitudinal X del coche) en las cuales se midió la deformación sufrida por la puerta (Figura 11). La deformación (intrusión) se calcula por la variación de la distancia entre los puntos objeto de medida en el lateral del impacto y sus simétricos en el lateral opuesto.

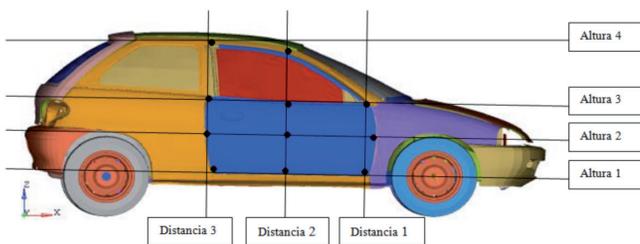


Figure 11: Puntos de medida en el ensayo de impacto lateral - Pole test

En todos los ensayos virtuales el material, mayormente acero, se deforma hasta alcanzar un valor máximo, alcanzado dicho punto el material recupera parte de la deformación

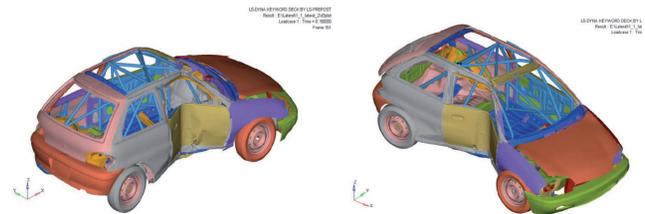


Figure 12: Deformación final (plástica) tras el ensayo virtual de impacto lateral

inducida hasta alcanzar una deformación plástica final (Figura 12). Este comportamiento de restitución, con recuperación de la deformación elástica o dinámica, es característico de los impactos reales. Por tanto, para valorar la intrusión y, con ello, la seguridad de la estructura de seguridad es necesario determinar todas las deformaciones.

En la Tabla 2 se muestran los valores de las deformaciones medidas para cada tipo de estructura. Hay que destacar que en el ensayo con el vehículo sin barras se alcanza la deformación máxima superado el tiempo de ensayo establecido (0,150 s).

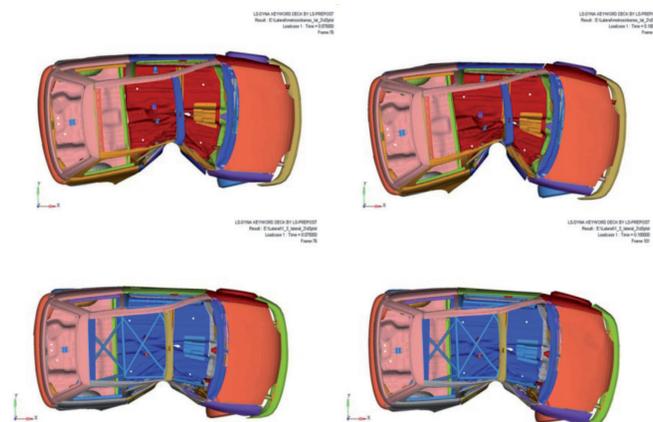


Figure 13: Vista en planta de las deformaciones a los 75 ms (izquierda) y 100 ms (derecha) del inicio impacto lateral. Comparación entre el vehículo original (dos imágenes superiores) y el dotado de la estructura de seguridad (Configuración 1_3)

Queda patente que el nivel de intrusión es mucho menor cuando el vehículo tiene instaladas las estructuras de seguridad (Figura 13 y 14). Sin barras la intrusión máxima es de

Estructura	Deformación plástica (mm)	Deformación elástica (mm)	Deformación máxima (mm)	Zona
Vehículo base, sin estructura de seguridad	635,8	-	635,8	Altura 2 - Distancia 2
1_1	344,4	30,6	375,0	Altura 3 - Distancia 2
1_2	294,0	40,0	335,0	Altura 3 - Distancia 2
1_3	276,5	49,5	326,0	Altura 2 - Distancia 2

Tabla 2: Resultados de ensayos ante impactos laterales

635,8 mm y con barras, en el peor de los casos de 375 mm. De forma general se puede indicar que el diseño que mejor comportamiento presenta ante la intrusión es el 1_3, debido a que los miembros de la protección lateral no presentan uniones en la zona del impacto como si lo hacen las estructuras 1_1 y 1_2.

La estructura 1_1 es la que peor comportamiento presenta dentro del grupo 1. Esto es debido a que la unión de los tirantes de las puertas no tiene la rigidez suficiente. Esta misma estructura presenta el mayor nivel de intrusión en la zona central de la puerta a una altura media entre el suelo y la parte inferior de la ventanilla. Por el contrario, las estructuras 1_2 y 1_3 presenta mayor intrusión en la zona central de la puerta a la altura de la parte más baja de la ventanilla.

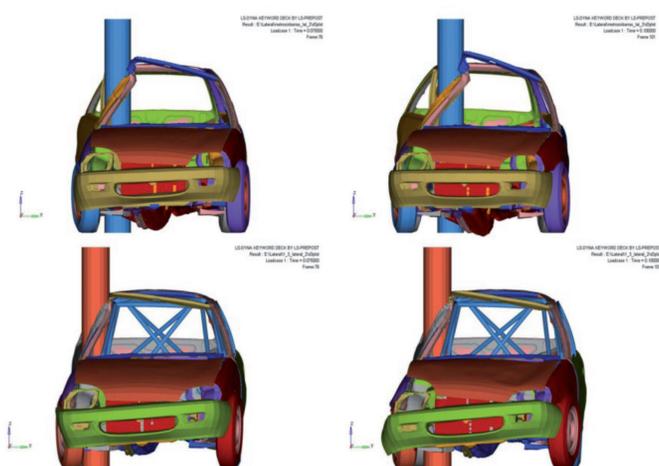


Figura 14: Deformaciones a los 75 ms (izquierda) y 100 ms (derecha) del inicio impacto lateral. Comparación entre el vehículo original (dos imágenes superiores) y el dotado de la estructura de seguridad (Configuración 1_3)

4.3. ENSAYO VUELCO SAE

Las partes del coche que mayor nivel de intrusión presentan en un vuelco son el montante A, todo el contorno superior de la puerta (*Roofrail*) y el montante B (figura 15). Por ello, se establecieron 3 puntos de medida en el montante A, 2 en el *Roofrail*, y 1 en el montante B. La deformación se cuantifica por la variación de la distancia entre los puntos situados en las zonas citadas anteriormente y puntos situados en el suelo (*floorboard*). Los puntos del suelo se seleccionan de tal

manera que el segmento medido sea perpendicular al suelo en la posición inicial de ensayo.

El primer contacto entre vehículo y suelo se produce en la curvatura superior del montante del parabrisas. Al igual que en el ensayo lateral, es característico el comportamiento elástico y la restitución del material. En la Tabla 3 se muestra un resumen de los valores más significativos.

Se comprueba como el nivel de intrusión es menor cuando el vehículo tiene las barras instaladas. Se pasa de una deformación máxima de 260 mm a 66 mm en el peor de los casos. La estructura que peor comportamiento presenta es la 2_2. Del grupo 2 la estructura 2_3 es la que mejor comportamiento presenta, tanto en el comportamiento plástico como en el elástico.

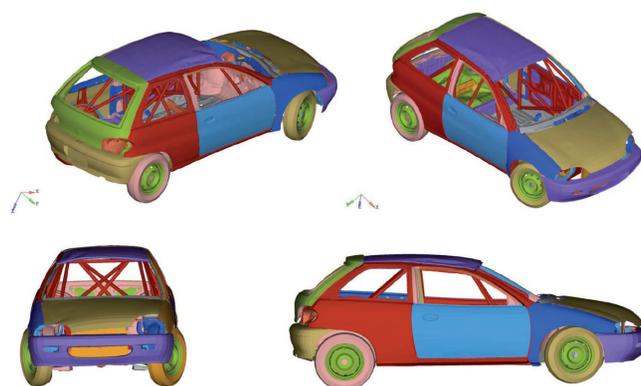


Figura 15: Deformaciones permanentes del vehículo tras el ensayo de vuelco

5. CONCLUSIONES

Analizando los niveles de intrusión que se producen durante la simulación de un ensayo dinámico de vuelco, se puede concluir que las estructuras de seguridad actuales garantizan una zona de supervivencia adecuada que reduce la probabilidad de impacto de piloto y copiloto contra elementos interiores. A pesar de ello, sería conveniente la realización de ensayos más exigentes, por ejemplo con componente de fuerza lateral.

Aunque la instalación de estructuras de seguridad reduce notablemente el nivel de intrusión con respecto a no tener instalada una estructura, el impacto lateral sigue presentando niveles de deformación muy elevados que podrían poner

Estructura	Deformación plástica (mm)	Deformación elástica (mm)	Deformación máxima (mm)	Zona
Vehículo base, sin estructura de seguridad	233,0	27,0	260,0	Roofrail – Distancia 1
2_1	42,6	21,4	64,0	Roofrail – Distancia 1
2_2	49,9	16,1	66,0	Roofrail – Distancia 1
2_3	47,3	14,7	62,0	Roofrail – Distancia 1

Tabla 3. Resultados de ensayos ante vuelco sobre el techo

en peligro la integridad física de piloto y copiloto. A pesar de esto, la normativa de homologación actual no establece ninguna prueba o ensayo sobre la protección lateral de la estructura.

El vuelco es menos traumático para el vehículo y los ocupantes ya que las estructuras de seguridad presentan baja deformación con aceleraciones menores que en el impacto lateral.

Como conclusión final cabe indicar que los autores del presente trabajo consideran necesario llevar a cabo una revisión sobre los ensayos estáticos que establece el Reglamento de Homologación de estructuras de seguridad y los requisitos mínimos de diseño que establecen dicho reglamento y el artículo 253.8 del Anexo J para asegurar un mejor comportamiento de la protección lateral de las estructuras. Se debería establecer un ensayo sobre la protección lateral teniendo en cuenta el comportamiento de plegado al que tiende el vehículo en el caso de accidentes con impacto lateral.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro del proyecto de investigación con título: “*Metodología para la optimización y ajuste de modelos matemáticos de colisión de vehículos aplicable a la investigación de accidentes de tráfico para la evaluación y mejora de los sistemas de seguridad*” financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España dentro de las Ayudas para la realización de Proyectos de Investigación del Programa Nacional de Investigación.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abedrabbo N, Mayer R, Thompson A, et al. 'Crash response of advanced high-strength steel tubes: Experiment and model'. *International Journal of Impact Engineering*. March 2009. Vol.36. p.1044–1057. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.02.006>
- [2] Batzer SA, Hooker R. 'Dynamic Roof Crush Intrusion in inverted drop testing'. 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Washington D.C. June 2005. Paper Number 05-0146.
- [3] EuroNCAP. 'Pole Side Impact. Testing Protocol – Version 5'. European New Car Assessment Programme. June 2011. Disponible en Web: <http://www.euroncap.com/files/>.
- [4] Feraboli P, Norris C, McLarty D. 'Design and certification of a composite thin-walled structure for energy absorption'. *Int. J. Vehicle Design*. 2007. Vol.44. Nos. 3/4. pp.247–267. DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJVD.2007.013642>
- [5] FIA. Homologation Regulations for Safety Cages. FIA, 2010. Disponible en Web: www.fia.com.
- [6] FIA. World Rally Championship (WRC) Sporting Regulations. Article 253 Safety Equipment. FIA, 2011. Disponible en Web: www.fia.com
- [7] FIAInSafety. Formula for Safety and Sustainability. FIA Institute. 2010. Disponible en Web: <http://www.fia institute.com/publications/Pages/home.aspx>.
- [8] Friedman D, Grzebetga R. 'Vehicle roof geometry and its effect on rollover roof performance'. 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Stuttgart. June, 2009. Paper number 09-0513.
- [9] García D, Pérez B, Peldschus S, et al. 'Overview on the development of a test standard for the evaluation of motorcyclists' impacts on road infrastructure elements'. *International Journal of Crashworthiness*. April, 2010. Vol.15:1. p.1–15. DOI <http://dx.doi.org/10.1080/13588260902956070>.
- [10] Gui L J, Zhang P, Fan A J. 'Energy absorption properties of braided glass/epoxy tubes subjected to quasi-static axial crushing'. *International Journal of Crashworthiness*. March, 2009. Vol.14:1. p.17–23. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/13588260802411416>
- [11] Gursel K T, Nane S N. 'Non-linear finite element analyses of automobiles and their elements in crashes'. *International Journal of Crashworthiness*. Diciembre, 2010. Vol.15:6. p.667–692. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/13588261003737286>
- [12] Hallquist J. 'LS-DYNA Theory Manual'. Livermore Software Technology Corporation. 2006. Livermore (Ca)
- [13] Horstemeyer M F, Ren X C, Fang H., et al. 'A comparative study of design optimisation methodologies for side-impact crashworthiness, using injury-based versus energy-based criterion'. *International Journal of Crashworthiness*. April, 2009. Vol.14:2, p.125–138. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/13588260802539489>
- [14] ISO. Road vehicles – Collision classification – Terminology. ISO/6813. International Organization for Standardization, 1998.
- [15] Kirkpatrick S W, Simons J W, Antoun T H. 'Development and Validation of High Fidelity Vehicle Crash Simulation Models'. IJCrash'98 – International Crashworthiness Conference. March, 1999. p.602–611. ISBN-10: 1855734605. ISBN-13: 978-1855734609.
- [16] Laberge-Nadeau C, Bellavance F, Messier S, et al. 'Occupant injury severity from lateral collisions: A literature review'. *Journal of Safety Research*. October, 2009. Vol.40. p.427–435. (doi:10.1016/j.jsr.2009.08.005). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsr.2009.08.005>
- [17] Lönn D, Öman M, Nilsson L, et al. 'Finite element based robustness study of a truck cab subjected to impact loading'. *International Journal of*

- Crashworthiness. April, 2009. Vol.14:2. p.111-124.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/13588260802412992>
- [18] LSTC. 'LS-DYNA, Keyword User's Manual, Version 971 - Rev 5'. Livermore Software Technology Corporation. Livermore (Ca), 2010
- [19] Luque P, Mántaras D A. Investigación de Accidentes de Tráfico. Manual de Reconstrucción. Spain: Ediciones Netbiblo, 2007. 477 p. ISBN: 978-84-9745-173-4
DOI: <http://dx.doi.org/10.4272/978-84-9745-173-4>
- [20] Mamalis G, Papapostolou D P. 'Experimental investigation of strain rate effects on the crushing characteristics of composite sandwich panels'. International Journal of Crashworthiness. December, 2010. Vol.15:6. p.581-603. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/13588265.2010.484191>
- [21] Mandell S P, Kaufman R, Christopher D M, et al. 'Mortality and injury patterns associated with roof crush in rollover crashes'. Accident Analysis and Prevention. March, 2010. Vol.42, p.1326-1331. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2010.02.013>
- [22] Mántaras D A, Luque P, González J M. Investigación de accidentes de tráfico. La toma de datos. Spain: Ediciones Thomson-Paraninfo, 2005. 484 p. ISBN 10: 849732403X. ISBN 13: 9788497324038
- [23] Mizuno K, Arai Y. 'The effectiveness of matching front rail heights in car-to-car crashes'. International Journal of Crashworthiness. December, 2010. Vol.15:6, p.571-579. <http://dx.doi.org/10.1080/13588261003771707>
- [24] Morris A, Bracea C, Reedae S, et al. 'The development of a European fatal accident database'. International Journal of Crashworthiness. July, 2010. Vol.15:2, p.201-209. <http://dx.doi.org/10.1080/13588260903102476>
- [25] Nagel G M, Thambiratnam D P. 'Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular tubes'. Thin-Walled Structures. 2005. Vol.43, p.1225-1242. doi: 10.1016/j.tws.2005.03.008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2005.03.008>
- [26] Nagel G.M, Thambiratnam D P. 'Dynamic simulation and energy absorption of tapered thin-walled tubes under oblique impact loading'. International Journal of Impact Engineering. October, 2006. Vol.32. p.1595-1620. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.01.002>
- [27] Nassiopoulos E, Njuguna J. 'Finite element dynamic simulation of whole rallying car structure: Towards better understanding of structural dynamics during side impacts'. 8th European LS-DYNA Users Conference. Strasbourg, 2011
- [28] NCAC. 'Finite Element Model Archive'. NCAC Models [on line], National Crash Analysis Center, 2011. Available at <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>
- [29] NHTSA. 'Federal Motor Vehicle Safety Standards and Regulations', U.S. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety Administration. Safety Assurance. Office of Vehicle Safety Compliance. Washington, 2011. Available at <http://www.nhtsa.gov/cars/>
- [30] SAE. 'SAE- J996 Inverted Vehicle Drop Test Procedure'. SAE, 1967
- [31] Shenoy S S. 'Energy Absorption of a car roof reinforced with a grid stiffened composite panel in the event o a rollover'. Department of Mechanical Engineering of Wichita State University, 2006. Master Thesis
- [32] Silvestri C, Ray M H. 'Development of a finite element model of the knee-thigh-hip of a 50th percentile male including ligaments and muscles'. International Journal of Crashworthiness. April, 2009. Vol.14:2, p.215-229. <http://dx.doi.org/10.1080/13588260802671399>
- [33] Tarigopula V, Langseth M, Hopperstad O S, et al. 'Axial crushing of thin-walled high-strength steel sections'. International Journal of Impact Engineering. May, 2006. Vol.32, p.847-882. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.07.010>
- [34] Xu J, Li Y. 'Crack analysis in PVB laminated windshield impacted by pedestrian head in traffic accident'. International Journal of Crashworthiness. March, 2009. Vol.14:1, p.63-71 <http://dx.doi.org/10.1080/13588260802462427>
- [35] Yang Y, Nakai A, Hamada H. 'A method to improve the energy absorption capability of fibre-reinforced composite tubes'. International Journal of Crashworthiness. July, 2009. Vol.14:4, p.315-322. <http://dx.doi.org/10.1080/13588260802674120>
- [36] Zhang B, Yang J, Zhong Z. 'Optimisation of vehicle side interior panels for occupant safety in side impact'. International Journal of Crashworthiness. December, 2010. Vol.15:6, p.617-623. <http://dx.doi.org/10.1080/13588265.2010.484193>