



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**SIMULACIÓN DE UN CHOQUE FRONTAL
DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL CONTRA
DIFERENTES TIPOS DE BARRERA**

PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica

Autor:

D. DAVID ILLESCAS PÉREZ

Tutor:

Dra. D^a. BEATRIZ LÓPEZ BOADA

OCTUBRE 2009



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. OBJETIVOS	12
1.2. ESTRUCTURA DEL PROYECTO.....	13
2. EL HABITÁCULO DE SEGURIDAD	16
2.1. EL FENÓMENO DE COLISIÓN.....	18
2.2. LA ESTRUCTURA EN UNA COLISIÓN.....	20
2.3. LA DEFORMACIÓN PROGRAMADA.....	22
3. ENSAYOS DE CHOQUE	26
3.1. HISTORIA: DESDE 1974 HASTA LA ACTUALIDAD.....	28
3.2. ENTIDADES QUE LOS REALIZAN.....	32
3.3. TIPOS DE PRUEBAS DE CHOQUE.....	36
3.3.1. IMPACTO FRONTAL.....	38
3.3.2. IMPACTO LATERAL.....	41
3.3.3. EL VUELCO.....	43
3.3.4. IMPACTO TRASERO.....	44
4. EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	46
4.1. PRINCIPIOS BÁSICOS Y APLICACIONES.....	47
4.2. LS-DYNA.....	51



5. MODELOS EMPLEADOS EN LA SIMULACIÓN	55
5.1. EL VEHÍCULO.....	58
5.1.1. GEOMETRÍA.....	59
5.1.2. MATERIALES.....	60
5.1.3. VELOCIDAD INICIAL.....	62
5.1.4. GRAVEDAD.....	63
5.1.5. ACELERÓMETROS.....	64
5.2. BARRERAS DE SEGURIDAD.....	65
5.2.1. BARRERA METÁLICA.....	67
5.2.1.1. GEOMETRÍA.....	68
5.2.1.2. MATERIALES.....	69
5.2.2. LA BARRERA DE HORMIGÓN.....	71
5.2.2.1. GEOMETRÍA.....	72
5.2.2.2. MATERIALES.....	73
5.2.3. PRETILES MIXTOS.....	74
5.2.3.1. GEOMETRÍA.....	75
5.2.3.2. MATERIALES.....	76
5.3. REGIONES DE CONTACTO.....	77
5.3.1. CONTACTO: VEHÍCULO Y BARRERA.....	78
5.3.2. CONTACTO: RUEDAS Y SUELO.....	79
6. LA NORMA EUROPEA EN 1317	81
7. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES	86
7.1. CASO A: CHOQUE FRONTAL DEL VEHÍCULO CONTRA EL GUARDARRAÍL.....	87
7.2. CASO B: CHOQUE FRONTAL DEL VEHÍCULO CONTRA LA BARRERA DE HORMIGÓN.....	93



7.3. CASO C: CHOQUE FRONTAL DEL VEHÍCULO CONTRA EL PRETIL MIXTO.....	98
7.4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	103
8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	106
9. REFERENCIAS.....	109



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Ensayo de choque frontal simulado	12
Figura 2-1: Habitáculo de seguridad de un vehículo.....	17
Figura 2-2: Tipos de colisiones frontales: (1) colisión frontal; (2) colisión descentrada.....	21
Figura 2-3: Ejemplo de deformación programada.....	23
Figura 3-1: Ejemplo de un crash-test.....	28
Figura 3-2: Comparación de la seguridad ofrecida por vehículos de distintas épocas.....	31
Figura 3-3: Estadísticas de siniestros.....	37
Figura 3-4: Crash-test frontal.....	39
Figura 3-5: Crash-test lateral.....	42
Figura 3-6: Test de vuelco.....	44
Figura 3-7: Impacto posterior con una masa de 1000 Kg y una segunda de 1800 Kg.....	45
Figura 4-1: Ejemplo de choque simulado con Ls-Dyna.....	52
Figura 5-1: Sistema de coordenadas empleado en las simulaciones.....	56
Figura 5-2: Vehículo empleado en la simulación.....	58



Figura 5-3: Visión interna de las partes del vehículo.....	59
Figura 5-4: Curva tensión-deformación del material.....	61
Figura 5-5: Vista general del acelerómetro.....	64
Figura 5-6: Barrera metálica.....	66
Figura 5-7: Barrera de hormigón.....	66
Figura 5-8: Vista general del modelo de guardarraíl.....	67
Figura 5-9: Elementos que forman el modelo guardarraíl: (1) raíles; (2) postes de sujeción y separadores; (3) cable de anclaje en los extremos.....	69
Figura 5-10: Curva tensión-deformación de los raíles y postes.....	70
Figura 5-11: Vista general del modelo de barrera de hormigón.....	72
Figura 5-12: Perfil acotado de los bloques de hormigón.....	73
Figura 5-13: Pretil mixto.....	74
Figura 5-14: Vista general de la barrera mixta.....	75
Figura 5-15: Vista del perfil del bloque de hormigón.....	76
Figura 6-1: Definición del ancho de trabajo y la deflexión dinámica de una barrera de seguridad.....	83
Figura 7-1: Secuencia de imágenes, caso A.....	88
Figura 7-2: Gráfica de velocidad en dirección x.....	90



Figura 7-3: Gráfica de aceleración en dirección x.....	90
Figura 7-4: Gráfica de aceleración en dirección y.....	92
Figura 7-5: Gráfica de aceleración en dirección z.....	92
Figura 7-6: Secuencia de imágenes, caso B.....	94
Figura 7-7: Gráfica de velocidad en dirección x.....	96
Figura 7-8: Gráfica de aceleración en dirección x.....	96
Figura 7-9: Secuencia de imágenes, caso C.....	99
Figura 7-10: Gráfica de velocidad en dirección x.....	101
Figura 7-11: Gráfica de aceleración en dirección x.....	101



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Uso de método de los Elementos Finitos.....	49
Tabla 5-1: Unidades del modelo de simulación.....	57
Tabla 5-2: Medidas de interés del vehículo.....	60
Tabla 5-3: Parámetros característicos del material elasto-plástico.....	61
Tabla 5-4: Tabla de propiedades de los materiales del guardarraíl.....	71
Tabla 5-5: Parámetros del material de los bloques.....	74
Tabla 5-6: Características de los materiales de la barrera mixta.....	77
Tabla 6-1: Clasificación del choque en función del ASI.....	84
Tabla 7-1: Resumen de los resultados.....	104



1. INTRODUCCIÓN

Los altos índices de siniestralidad en nuestras carreteras han hecho despertar la conciencia de los fabricantes de automóviles que no cesan de incorporar nuevas tecnologías con el fin de hacer más confortable el vehículo, al mismo tiempo que intentan aumentar la seguridad en caso de colisión. Todo ello con el fin de garantizar, en la medida de lo posible, la máxima protección no sólo de los ocupantes del propio vehículo, sino también de que los ocupantes de otros vehículos o los posibles peatones implicados en la colisión sufran las mínimas consecuencias [1].

Tal y como se conoce hoy en día un automóvil, no sería posible sin la existencia de la informática aplicada en la industria. En todo el proceso, desde que se toma la decisión de crear un nuevo modelo de automóvil hasta que éste es vendido, la informática es imprescindible. En la actualidad, los programas de CAD (Computer Aided Design) son utilizados como



herramienta de apoyo para los ingenieros de la industria del automóvil ya que facilitan su tarea en todas las facetas del diseño.

Con el fin de estudiar el comportamiento de los vehículos en caso de colisión, desde hace algunos años se trabaja en la industria automovilística en la simulación virtual de accidentes. Esto ha llevado a conseguir un mayor y rápido avance en el campo de la seguridad, lo que le convierte en un medio esencial para su perfeccionamiento. Los programas informáticos de simulación posibilitan una gran reducción en los costes de construcción de los prototipos para los ensayos ya que son necesarios un menor número al conocerse de forma anticipada el comportamiento del automóvil. De este modo, hasta que en la simulación no se consiguen los resultados óptimos, no se procede a la construcción de un prototipo de verificación [2].

Por tanto, estas simulaciones no sustituyen a las pruebas físicas de choque, en las cuales se evalúa con más precisión el grado de deformidad de la estructura del automóvil y como afecta éste sobre la aparición de lesiones en los ocupantes, pero sí constituyen la única opción práctica para probar el gran conjunto de evaluaciones de comportamiento frente a seguridad que se necesitan.

En la actualidad, es frecuente la realización de simulaciones de pruebas de choque empleando modelos desarrollados a partir de datos recogidos de los dummies reales. Estos ensayos comúnmente conocidos como '*crash test dummies*' han permitido conocer tanto el comportamiento del propio vehículo como el de sus ocupantes, y han conseguido optimizar



los distintos sistemas de seguridad pasiva existentes en el automóvil, como son el cinturón de seguridad o el airbag, entre otros.

En este proyecto, se realiza la simulación de un choque frontal a partir de un modelo compuesto por un vehículo automóvil y una barrera fija deformable de seguridad vial.

Hay que destacar que las barreras de protección, al igual que la estructura del vehículo, deben diseñarse de tal manera que sean capaces de absorber la mayor parte de la energía del impacto a través de su deformación. Cuanto mayor sean las deflexiones, mayor será la energía que podrá disipar en un período de tiempo mayor, dando lugar a picos de deceleración más bajos y, en consecuencia, a un menor riesgo de daño para los usuarios de la vía.

Para realizar este proyecto se ha utilizado un software de cálculo avanzado de elementos finitos. El programa empleado para procesar la simulación es Ls-Dyna y como herramienta para implementar el modelo y visualizar los resultados se ha utilizado Ls-Prepost. Ambos programas están desarrollados por la compañía norteamericana Livermore Software Technology Corporation (LSTC) y son altamente usados en la industria automovística para analizar diseños de vehículos y, más concretamente, para evaluar la seguridad que éstos ofrecen ante situaciones de impacto [3].

La figura 1-1 muestra una imagen de la simulación de un ensayo frontal de choque de un vehículo contra un poste rígido utilizando un modelo de elementos finitos.

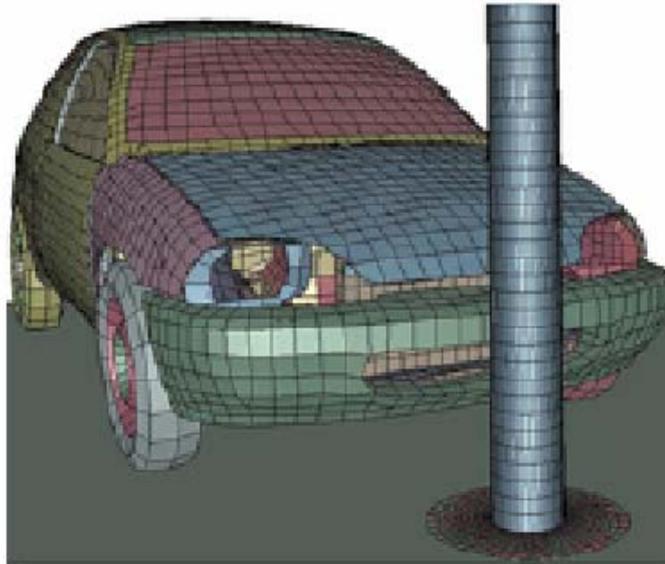


Figura 1-1: Ensayo de choque frontal simulado

1.1 OBJETIVO

El principal objetivo de este proyecto es desarrollar y analizar un modelo tridimensional de simulación del impacto de un vehículo automóvil contra diferentes barreras de protección mediante el empleo de Ls-Dyna junto con Ls-Prepost. El estudio se centra en evaluar la validez del diseño de tres modelos distintos de barreras de seguridad vial de acuerdo con la norma europea estándar EN 1317. Para ello se hace uso del parámetro ASI (Acceleration Severity Index) que da una idea de la severidad del impacto.



Hay que mencionar que los modelos empleados en la simulación han sido desarrollados por la NCAC y obtenidos a través de su página web en la cual se encuentran disponibles para todo el mundo (www.ncac.gwu.edu). *The National Crash Analysis Center* (NCAC) es el resultado de un exitoso esfuerzo de colaboración entre *the Federal Highway Administration* (FHWA), *the National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) y *the George Washington University* (GWU) [4].

Por tanto, no es objeto de este proyecto el diseño de los múltiples elementos que conforman tanto el vehículo como las barreras de seguridad, en los cuales estos organismos han invertido mucho tiempo y recursos. Sí es objeto de este proyecto el imponer las condiciones de contorno necesarias, ya sea el dotar de una velocidad al vehículo o el asignar un tipo de contacto entre los diferentes elementos, con el fin de obtener unos resultados que reflejen lo más fielmente posible una situación real y, de este modo, justificar la eficacia de estas simulaciones en el campo de la seguridad vial.

1.2 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El proyecto está estructurado en diversos capítulos que son descritos a continuación:

En este primer capítulo, se hace una introducción al tema del proyecto, justificando el uso de las simulaciones computacionales en la



industria automovilística. También se detallan los objetivos que se pretenden alcanzar en el mismo.

En los capítulos segundo y tercero, EL HABITÁCULO DE SEGURIDAD Y ENSAYOS DE CHOQUE, se hace un planteamiento del estado del arte. En el capítulo segundo se describen los principales factores que influyen en las consecuencias de una colisión centrándose en la estructura del vehículo como un elemento de seguridad pasiva de vital importancia. En el capítulo tercero se detallan los diferentes tipos de *crash-test* que se realizan en la actualidad así como los organismos encargados de ello.

En el capítulo cuarto, EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, se hace una introducción al método de los elementos finitos en el cual se basan los programas empleados en la simulación, Ls-Dyna y Ls-Prepost.

A continuación, en el capítulo quinto, MODELOS EMPLEADOS EN LA SIMULACIÓN, se muestran las características geométricas y físicas de los distintos elementos que se han empleado en las simulaciones. También se explican las condiciones de contorno que se han definido en el modelo.

El capítulo sexto, LA NORMA EUROPEA EN 1317, se ha dedicado para introducir brevemente este documento referente al nivel de protección



de los sistemas de contención de vehículos dado la importancia que tiene en el tratamiento de nuestros resultados.

En el capítulo séptimo, RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES, se plantean los tres casos a estudiar exponiendo los resultados obtenidos en cada uno de ellos y haciendo una valoración de los mismos.

En el capítulo octavo, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS, se extraen conclusiones a nivel general de lo que ha supuesto este proyecto en el tratamiento de los problemas de impacto, y se proponen posibles estudios y mejoras que se pueden desarrollar a partir del modelo de simulación empleado.



2. EL HABITÁCULO DE SEGURIDAD

El concepto Habitáculo de Seguridad no hace referencia, a diferencia de otros sistemas de seguridad pasiva (cinturón, airbag, ESP, ABS,...), a un dispositivo de seguridad electrónico o mecánico que se pueda instalar o desinstalar en un vehículo, sino que determina un espacio o zona del mismo. Se puede definir como la zona interior de la carrocería o estructura del vehículo donde viajan los ocupantes. En caso de accidente, debe dañarse y deformarse lo menos posible, puesto que de éste dependerá en gran medida la protección de los ocupantes.

Por la importancia que tiene el habitáculo de seguridad, es posible afirmar que se trata del principal sistema de seguridad pasiva que posee un vehículo. Sin embargo, hay que tener en cuenta un aspecto común que comparten todos los sistemas de seguridad pasiva, incluido éste, que es la

necesidad de funcionar en conjunto con los otros sistemas para poder ofrecer un nivel de protección adecuado. El habitáculo de seguridad debe ser complementado por los sistemas de retención, puesto que sin ellos la protección para el ocupante se limitaría a evitar ser alcanzado por un objeto exterior, pero no impediría que su cuerpo colisionase con el interior del vehículo [5].

Existe un aspecto que diferencia al habitáculo de seguridad del resto de sistemas de seguridad del automóvil. En todos los demás sistemas de seguridad, tanto activa como pasiva, el conductor o usuario puede comprobar y experimentar como funcionan estos sistemas en cualquier momento, sin que el vehículo experimente ningún tipo de perjuicio ni deterioro. Sin embargo, la comprobación de la seguridad ofrecida por el habitáculo de seguridad sólo puede realizarse durante una colisión violenta. La eficacia, a grandes rasgos, se verá reflejada si el vehículo queda destrozado pero mantiene intacta la zona destinada a los ocupantes. En la figura 2-1 se observa la estructura que forma el habitáculo de seguridad.



Figura 2-1: Habitáculo de seguridad de un vehículo



2.1 EL FENÓMENO DE COLISIÓN

En caso de accidente, la estructura del vehículo tiene una influencia decisiva sobre las fuerzas a las que se ven sometidos sus ocupantes. Se deben evaluar una serie de parámetros de diseño que representan un papel fundamental en sus prestaciones:

- Rigidez.
- Fuerzas a las que estará sometido.
- Capacidad de absorción de energía.

La estructura del vehículo debe poseer una determinada rigidez, suficiente para soportar los distintos tipos de fuerzas a los que puede verse expuesta, tanto las debidas a los pesos de la carga y ocupantes (fuerzas estáticas), como las provocadas por aceleraciones y deceleraciones (fuerzas dinámicas), así como las debidas al rozamiento con el aire en la marcha del vehículo (fuerzas aerodinámicas), entre otras.

Debido a las exigencias de seguridad en los ocupantes del vehículo, ante la eventualidad de un impacto, aparece la necesidad de absorción de la energía del choque para que los ocupantes sufran sus consecuencias en menor grado que la carrocería del vehículo, que es la que asumirá la responsabilidad de detener el golpe. Para ello, en la carrocería se constituyen dos zonas de máxima exigencia en cuanto a la absorción de energía en una colisión. Estas zonas son los vanos delantero y trasero que se encargan de amortiguar el golpe al deformarse como un acordeón. El



cuerpo central del vehículo, por el contrario, debe deformarse lo menos posible para mantener un espacio vital de supervivencia dentro del habitáculo de los pasajeros, y que las deformaciones del vehículo no afecten a los ocupantes.

La gravedad de un accidente no está determinada por la velocidad del vehículo previa a la colisión, sino por el cambio de velocidad Δv que el vehículo experimenta y por la rapidez con la que se produce este cambio, es decir, la deceleración. La deceleración viene determinada por la masa y la rigidez de los objetos que colisionan entre sí.

Antes de la colisión, el vehículo tiene una energía cinética dada por su masa (m) y su velocidad (v):

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

Para detener el vehículo por completo, el impacto debe disipar toda esta energía. Puesto que según el principio fundamental de la física “la energía ni se crea ni se destruye, sino que se transforma”, durante la colisión parte de esa energía es absorbida por el vehículo que impacta, transformándose en energía de deformación del vehículo, y parte es absorbida por el objeto golpeado. Cuando el objeto golpeado es muy rígido, como una barrera de hormigón, toda la energía debe ser absorbida por el vehículo. Durante la colisión, la deformación continúa hasta que se ha absorbido toda la energía involucrada en el accidente, es decir, hasta que la energía cinética es igual a la energía necesaria para deformar la estructura



frontal del vehículo (si es una colisión frontal), de valor $F \cdot d$, donde F es la fuerza experimentada por el vehículo durante la colisión, y d es la distancia que se deforma el coche.

El ocupante del vehículo está en peligro si toda la energía cinética no es absorbida por el frontal del mismo y el habitáculo de pasajeros comienza a deformarse, o bien si el habitáculo es muy rígido y entonces las fuerzas de la colisión provocan deceleraciones tan grandes en los ocupantes que pueden ocasionar lesiones de gravedad [6].

2.2 LA ESTRUCTURA EN UNA COLISIÓN

En función del tipo de colisión, la estructura del vehículo, y en particular el habitáculo de seguridad, debe comportarse de un modo u otro, ya que el riesgo para los ocupantes también variará.

Dentro de las colisiones frontales se pueden encontrar dos variantes: una colisión totalmente frontal, que ocurre cuando la totalidad del frontal del vehículo choca contra el objeto; y una colisión descentrada, que ocurre cuando no todo el frontal del vehículo choca contra el objeto, sino que la colisión se concentra en una porción de éste. El comportamiento del vehículo es diferente en cada caso. En la figura 2-2 se muestra una imagen de cada uno.

(1)



(2)



**Figura 2-2: Tipos de colisiones frontales: (1) colisión frontal;
(2) colisión descentrada.**

Cuando el choque es totalmente frontal, la estructura alcanza una menor deformación, puesto que la fuerza de la colisión se reparte en toda la superficie del frontal y, por tanto, actúan todos los elementos resistentes de la estructura de igual forma. En estos casos, la estructura puede aguantar mejor la colisión, consiguiendo menores deformaciones con lo que el habitáculo de seguridad tiene un menor riesgo de verse afectado. Sin embargo, aunque el habitáculo no sufra grandes daños, no significa que los ocupantes tengan menor riesgo de lesiones ya que sufren grandes deceleraciones.

Cuando el choque es descentrado, la estructura del vehículo se ve sometida a un mayor esfuerzo, puesto que toda la fuerza de la colisión se concentra en una zona más pequeña que en el caso de la colisión 100% frontal. La energía de la colisión es absorbida por menos elementos resistentes y, por tanto, sufren una mayor deformación, ya que los elementos del lado opuesto del choque no se ven afectados y no intervienen



en el proceso de absorción de energía. Para que toda la energía sea absorbida por una parte del frontal, se emplean elementos cuya función es la de transmitir parte de las fuerzas al lado opuesto de la colisión, para que los esfuerzos puedan ser repartidos entre ambos lados. No obstante, aunque se puedan repartir los esfuerzos, la mayor parte de la energía es absorbida por la zona donde se ha producido el choque. Por esto, en las colisiones descentradas la estructura se ve más afectada, aumentando la probabilidad de dañar el habitáculo de seguridad.

Se debe evitar que penetren en el habitáculo de seguridad elementos como la columna de dirección, el salpicadero, el techo, los largueros y montantes, los pedales, y los paneles de la zona de los pedales, ya que pueden dañar gravemente a los ocupantes.

Es posible apreciar a grandes rasgos si el habitáculo de seguridad se ha visto afectado tras una colisión, observando si existe desplazamiento del montante del parabrisas hacia atrás, si en el techo o en el suelo aparecen pliegues y también si las puertas se han abierto, arqueado o desencajado de sus huecos [5] [6].

2.3 LA DEFORMACIÓN PROGRAMADA

Teniendo en cuenta lo expuesto en apartados anteriores, las carrocerías se diseñan disponiendo de secciones que aporten una rigidez adecuada a la estructura para soportar las sollicitaciones mecánicas propias

de la conducción, y con unos plegamientos o disposiciones previas en la conformación de los elementos que permitan, ante una colisión, absorber la energía del impacto y desviar la deformación del vehículo hacia zonas determinadas, para que la seguridad de los ocupantes sea lo más elevada posible.

Mediante algunas medidas de diseño, se puede establecer con antelación o “programar” la forma en que ciertos componentes de la estructura del vehículo se van a deformar en caso de colisión. De este modo, se puede optimizar la energía absorbida en el accidente, para aprovechar al máximo el espacio disponible en el frontal (u otras zonas destinadas a absorber energía) del vehículo.

En la figura 2-3 se muestra un caso de vehículo bien diseñado ya que el habitáculo permanece íntegro tras la colisión.



Figura 2-3: Ejemplo de deformación programada



Las piezas que tienen prevista su deformación suelen ser los elementos estructurales que soportan la mayoría de los esfuerzos. Algunas soluciones adoptadas para conseguir la deformación programada son [6]:

- Diseños estructurales que dirijan las fuerzas experimentadas en un extremo hacia las zonas de la carrocería más resistentes, como largueros, travesaños y zonas del suelo del vehículo.
- Refuerzos y uniones adecuadas mediante largueros y travesaños auxiliares para que, en caso de colisiones frontales descentradas, la zona opuesta al golpe también participe en la absorción de energía.
- Empleo de largueros delanteros en forma de horquilla, que distribuyen las fuerzas longitudinales hacia al túnel central y suelo del vehículo.
- Largueros con sección transversal en progresivo aumento a lo largo de su eje, que adoptan una configuración piramidal o cónica que absorberá energía de forma progresiva mediante su autoembutición.
- Fabricar el cierre o tapa de los largueros en varias partes, en lugar de una única pieza, contribuye a evitar transmisiones de daños.
- Dotando a determinados elementos de puntos fusibles, fundamentalmente largueros y refuerzos de pases de rueda, se consiguen que se deformen de modo preestablecido.



- Puntos fusibles en los capós delanteros que hacen que éstos se doblen, evitando su desplazamiento hacia atrás y su incrustación en el parabrisas.
- Largueros contruidos de modo que tienden a desplazarse hacia abajo por efecto de una colisión para que los elementos rígidos de los conjuntos mecánicos del compartimento motor no penetren en el habitáculo de seguridad.



3. ENSAYOS DE **CHOQUE**

Las modernas técnicas de ingeniería asistida por ordenador han permitido grandes avances en la seguridad pasiva de la estructura del vehículo mediante el empleo de programas de elementos finitos. Con el vertiginoso aumento de la velocidad de los ordenadores y el gran desarrollo de la programación experimentados en los últimos diez años, la simulación de los choques ha progresado hasta alcanzar un alto grado de confianza en sus resultados.

Sin embargo, a la hora de la verdad no hay nada más cierto que la realidad misma para comprobar la verdadera eficacia de los avances o innovaciones de diseño implantadas en un vehículo. Desgraciadamente, no es posible ni deseable esperar a que se produzcan los accidentes en la realidad para refinar los conceptos de diseño. Por eso, lo mejor es provocar



accidentes de laboratorio que simulen lo más fielmente posible los accidentes reales, y observar lo que ocurre. Estos accidentes de laboratorio son los ensayos de choque o “*crash-test*”. Básicamente consisten en someter al vehículo a una serie de colisiones que simulan distintos tipos de choque y, de este modo, evaluar el comportamiento del vehículo en cada situación así como su efecto en los ocupantes [6].

Los ensayos de choque ya se venían realizando desde hace varias décadas, tanto por algunos fabricantes de vehículos, en las últimas etapas de la fase de diseño de nuevos modelos, como por las entidades encargadas de la homologación de los mismos, puesto que todo vehículo debía superar unos requerimientos de seguridad en caso de choque frontal. Sin embargo, no es hasta muy recientemente cuando los usuarios han comenzado a tener la posibilidad de acceder a los resultados de estos *crash-test*, gracias a la difusión que están teniendo algunas series de ensayos realizados por distintas asociaciones. Estos ensayos de choque están poniendo de manifiesto que no todos los vehículos nuevos exhiben el mismo comportamiento durante los *crash-test*, es decir, aunque todos superan unos requerimientos mínimos exigidos por la normativa de homologación, el margen de seguridad es más amplio en unos vehículos que en otros.

En la figura 3-1 se muestra la imagen un *crash-test* frontal realizado en un laboratorio.



Figura 3-1: Ejemplo de un crash-test.

3.1 HISTORIA: DESDE 1974 HASTA LA ACTUALIDAD

Hoy en día, resulta impensable que un vehículo sea introducido en el mercado sin pasar las pruebas pertinentes de *crash-test*, y aunque los fabricantes llevaban realizando pruebas de impacto desde los años 40, sólo fue desde 1974 cuando la legislación estableció la obligatoriedad de pasar unas pruebas de choque para proceder a la homologación de los vehículos. Dicha prueba consistía en lanzar el vehículo contra una pared a una velocidad de 50 km/h, y los pocos estrictos requisitos que debía pasar el vehículo nada tienen que ver con los que debe superar un vehículo en la actualidad para conseguir su homologación.

Debido a la falta de seguridad que poseían los vehículos, los clubes automovilísticos decidieron realizar sus propias pruebas de choque. Pretendían establecer unos ensayos independientes que de verdad sacaran a



la luz la seguridad de los vehículos en caso de impacto, siendo este tipo de ensayos más estrictos que los que exigía la legislación vigente. En aquellos tiempos, la única prueba de choque requerida para la homologación, según la legislación europea, era la realizada contra un bloque rígido. Esta prueba fue realizada con el fin de controlar la intrusión del centro del volante en el habitáculo. Ningún maniquí de prueba estuvo presente en el coche y no había ninguna exigencia para el impacto de lado o para la protección de peatones.

En 1971 se produjo un gran avance con la utilización de maniqués de impacto representativos de varios tamaños y edades de personas. Estos muñecos antropomórficos permitían evaluar el nivel de riesgo que la persona a que representan sufriría en las mismas condiciones de impacto.

Fue en 1987 cuando los clubes de automóviles realizaron sus primeros *crash-test* efectuados sobre minibuses. Los resultados de éstos fueron críticos ya que más de la mitad de los ocupantes sufrían lesiones graves. Un año después se realizaron ensayos sobre seis utilitarios que pasarían las pruebas. A partir de este momento, los *crash-test* son constantes y comienza la competencia de fabricantes para conseguir mejorar la seguridad de sus vehículos.

En 1995, los legisladores contando con la ayuda de los clubes de automóviles comenzaron a elaborar un tipo de choque, el lateral, y fue en 1998 cuando quedó definitivamente establecida la prueba de choque lateral



consistente en el impacto contra una barrera a una altura de 30 cm del suelo.

En 1996 se dió un gran paso: un gran número de asociaciones europeas se unen y forman euroNCAP, una asociación que tiene como objetivo realizar pruebas de choque sobre vehículos ya a la venta, informando a los usuarios sobre los resultados, creando una conciencia de seguridad, instando a los fabricantes a mejorar sus productos en cuanto a seguridad y asesorando a los legisladores para la creación de nuevas normas.

En el año 2000 se realiza una nueva prueba, el choque lateral contra un poste. Este año también está marcado por la aparición de ensayos con sillitas de retención infantil, y hasta el año 2006 se realizaron más de 168 ensayos con diferentes tipos y marcas de sillitas, mejorando la seguridad de estos sistemas.

Otra fecha clave sería el mes de octubre de 2005, mes en el que entraría en vigor una directiva relativa a la protección de los peatones en caso de atropello. Para su homologación los coches deberían pasar un tipo de colisión frontal.

Con el fin de demostrar los avances realizados a lo largo de los años, y para evaluar la seguridad de los vehículos en caso de impacto, recientemente se ha realizado una prueba consistente en el choque frontal de dos vehículos fabricados con dos décadas de diferencia. Esta prueba se

realizó con el objeto de observar los daños que sufriría el ocupante de cada vehículo para así valorar los avances técnicos conseguidos por los fabricantes en su diseño y fabricación [7]. Los resultados se muestran en la figura 3-2.

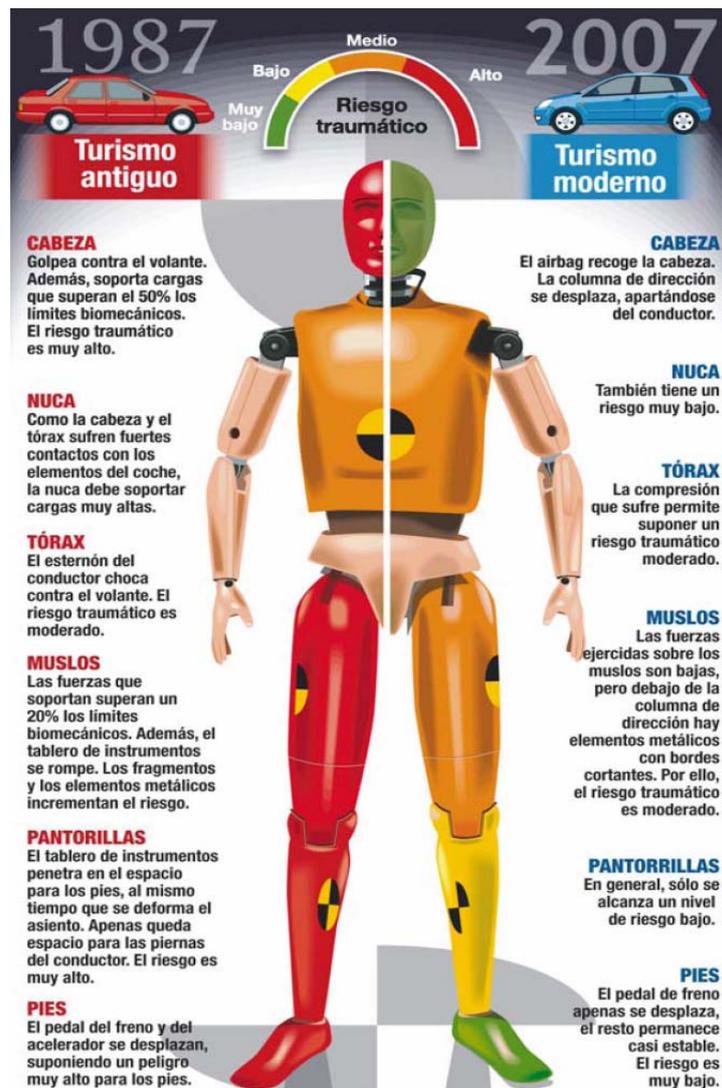


Figura 3-2: Comparación de la seguridad ofrecida por vehículos de distintas épocas.



3.2 ENTIDADES QUE LOS REALIZAN

La realización de los ensayos de choque o *crash-test* es llevada a cabo por un número limitado de organismos o entidades. Cada una de estas entidades realizan los ensayos de choque con fines distintos y, por este motivo, las pruebas suele ser diferentes, aunque todos los ensayos buscan poner a prueba la seguridad pasiva del vehículo.

Los *crash-test* son realizados principalmente por los tres siguientes colectivos [6]:

- **Fabricantes**

Todos los fabricantes someten sus vehículos a distintos ensayos de choque durante el proceso de diseño. Estas pruebas se realizan en las últimas fases del diseño de los nuevos modelos para comprobar que estos vehículos son aptos para su salida al mercado. Desde que se comienza a crear un nuevo modelo de vehículo, los fabricantes realizan el diseño para que pueda superar los requerimientos de homologación, que obligan a superar ciertas pruebas para comprobar que el vehículo alcanza el nivel de seguridad exigido.

Durante las distintas etapas del diseño de un vehículo, se emplean herramientas informáticas de simulación con las cuales se puede ver el comportamiento del vehículo ante diferentes tipos de colisiones. De este modo, pueden detectarse los elementos que no se comportan de la forma adecuada y deben ser modificados. Cuando las simulaciones realizadas por



ordenador muestran una buena respuesta del vehículo, se pasa al siguiente paso que es realizar esos mismos ensayos simulados sobre los prototipos de los vehículos reales.

- **Organismos de homologación**

Como cualquier artículo que sale al mercado, un vehículo debe ser inspeccionado para verificar que cumple con la normativa vigente. Por la complejidad que presenta un vehículo, se verifican diferentes aspectos como son las emisiones, compatibilidad electromagnética, equipamientos básicos y, sobre todo, la seguridad.

Dentro de la seguridad, se verifican aspectos tanto de seguridad activa, realizando pruebas de conducción en pistas de ensayo, como de seguridad pasiva, realizadas en laboratorio. Aunque la seguridad pasiva se puede verificar elemento por elemento mediante distintas pruebas, la mejor forma de evaluación es a través de los ensayos de choque.

Las pruebas de verificación para la homologación suelen ser realizadas por diferentes centros que se dedican especialmente a estas tareas. Los ensayos de choque se realizan siguiendo la normativa que cada país determina para la homologación de los vehículos que circularán por sus carreteras. En Europa existe una única normativa aplicable en todos los países de la Unión Europea. Países como Estados Unidos, Canadá, Japón y Australia emplean el mismo tipo de *crash-test*, aunque luego pueden existir diferencias en los parámetros a verificar o en los valores de éstos.



- **Organizaciones NCAP**

Los consorcios NCAP (New Car Assessment Programme) o Programas de Valoración de Automóviles Nuevos, son asociaciones formadas por diferentes entidades cuyo propósito es valorar la seguridad de los nuevos vehículos que salen al mercado.

La asociación NCAP más conocida en España es el consorcio europeo EuroNCAP, el cual ha servido para facilitar el acceso público a la información referente a la seguridad pasiva de los vehículos cuando se produce una colisión. Se trata de un consorcio independiente que agrupa a distintas administraciones y asociaciones europeas que representan a más de 150 millones de consumidores. Nació en 1997 respaldado por cinco gobiernos europeos, y entre sus integrantes destacan el Departamento de Transportes del Reino Unido, la Administración de Carreteras de Suecia, Holanda, Francia, Alemania, la Alianza Internacional de Turismo, la Federación Internacional de Automovilismo y la asociación Testing, que agrupa a 25 organizaciones de consumidores. En España, participan en EuroNCAP el RACE (Real Automóvil Club de España), el RACC (Real Automóvil Club de Cataluña) y la OCU (Organización de Consumidores y Usuarios).

El programa euroNCAP pretende ofrecer a los consumidores una información independiente de la ofrecida por los fabricantes del nivel de seguridad que posee el vehículo que adquieren. Las pruebas realizadas por euroNCAP se realizan una vez el vehículo se pone a la venta y sus ensayos se componen de una prueba de impacto frontal, una de impacto lateral y



otra de protección a los peatones. Estas pruebas se realizan por grupos de vehículos dentro de un mismo segmento (utilitarios, berlinas, monovolúmenes,...), siendo calificados los vehículos mediante un número de estrellas que oscila entre cero y cinco, dependiendo del grado de seguridad que ofrezca el vehículo tanto a sus ocupantes como a los posibles peatones que puedan intervenir en una colisión. Sin embargo, este programa es criticado ya que los resultados solo se pueden comparar entre vehículos del mismo peso puesto que éste influye de manera determinante en el resultado de las pruebas; en el test contra una barrera, el peso interviene de forma negativa, mientras que en un accidente real contra otro vehículo, el mayor peso actúa de forma positiva.

Los ensayos de impacto frontal difieren de los realizados por los fabricantes, siendo los realizados por euroNCAP mas exigentes. Este tipo de prueba son realizadas del mismo modo que las obligatorias para pasar los test de homologación, pero euroNCAP las realiza a una velocidad mayor, a 64 km/h. Además de los dummies sentados en los asientos delanteros, se sitúan dos maniqués infantiles en los asientos traseros, uno que representa a un niño de 18 meses, y otro que representa a uno de 3 años, ambos sentados en sillas de retención infantil recomendadas por los fabricantes [7].

La prueba de impacto lateral se realiza de la misma manera que la necesaria para obtener la homologación pertinente.



Por último, destacar la acción que realizan los colectivos NCAP en todo el mundo, los cuales están consiguiendo que los vehículos sean cada vez más seguros. La razón está en que la normativa sobre homologación de vehículos ante una colisión establece unos valores mínimos que se deben cumplir. Antes de que apareciesen los colectivos NCAP, los fabricantes no tenían ningún incentivo para mejorar la seguridad y se limitaban a cumplir con esos mínimos de seguridad. Sin embargo, el hecho de que se den a conocer los resultados de los ensayos está haciendo que los fabricantes se esfuercen en construir vehículos cada vez más seguros. Este aumento de la seguridad es conocido por los posibles compradores y probablemente hace que se incrementen las ventas. De hecho, en la actualidad, en los anuncios publicitarios de los nuevos vehículos vendidos en Europa se destaca la puntuación obtenida en los ensayos realizados por EuroNCAP [6].

3.3 TIPOS DE PRUEBAS DE CHOQUE

Para disponer de pruebas que aporten datos lo más semejantes posibles a la realidad, hay que tener en cuenta la gran variedad de accidentes reales debido a las múltiples velocidades que puede alcanzar un automóvil, a la gran variedad de objetos con los que puede colisionar (fijos, móviles y más o menos deformables) y a las características físicas de los ocupantes del vehículo. Con tal complejidad, el nivel de seguridad del automóvil solo puede establecerse mediante diferentes pruebas de choque y la repetición de las mismas. Para ello, los fabricantes recurren a la utilización de más de 40 tipos diferentes de pruebas, las cuales se repiten en

las distintas fases de desarrollo del modelo. El diseño de las pruebas se realiza en base al estudio de las estadísticas (figura 3-3) de los tipos de colisiones más frecuentes [7].

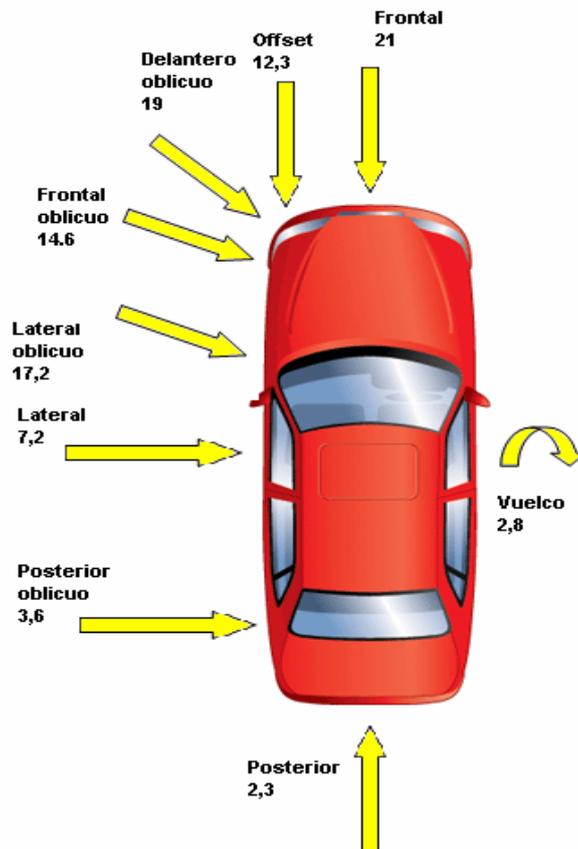


Figura 3-3: Estadísticas de siniestros

Si bien existen una gran variedad de ensayos, los homologados por la reglamentación europea vigente consisten en analizar los aspectos biomecánicos y de estructura que se desprenden de los diferentes test. En resumen, las diferentes pruebas de choque pretenden:



- En los choques frontales se busca optimizar los refuerzos de la estructura portante y de los sistemas de retención ya que los ocupantes están sometidos a deceleraciones bruscas.
- En los choques laterales se intenta evitar la intrusión en el habitáculo y se busca la mejor forma de alejar al ocupante de la zona de impacto. Esto se debe a que, en este tipo de choques, el espacio entre los ocupantes y los elementos de la estructura del vehículo es muy pequeño.
- En los choques traseros, se estudia el comportamiento del reposacabezas y del depósito de combustibles y sus canalizaciones. Se pretenden evitar las lesiones cervicales que son habituales cuando el cuello del ocupante golpea el reposacabezas.
- En el caso de vuelcos se pretende limitar o evitar las deformaciones del habitáculo por aplastamiento. La pérdida del espacio vertical encima de la cabeza debido a la intrusión del techo ocasiona con frecuencia lesiones en la columna vertebral de los ocupantes.

3.3.1 IMPACTO FRONTAL

Según las estadísticas de siniestralidad casi dos terceras partes de los accidentes de tráfico son frontales y la mitad de ellas presentan una cobertura de entre un 30 y 50 por ciento de la superficie frontal.

Este tipo de prueba está regulado por la legislación vigente, en la directiva 96/79/CE del Parlamento Europeo. En el impacto, el vehículo es lanzado contra un muro de, al menos, 70 Tn con una estructura deformable de aluminio y configuración de panel (que simula otro vehículo), a una velocidad de 56 km/h. La orientación de la barrera debe ser la adecuada para que el primer contacto del vehículo con la barrera se produzca en el lado en que está la columna de la dirección. Este tipo de colisión llamado *Offset* se realiza para intentar simular la reacción del conductor del vehículo al intentar girar el volante para evitar que el impacto sea totalmente frontal. En el interior del vehículo se encuentran dos dummies, sentados en los asientos delanteros y con los correspondientes sistemas de sujeción colocados. Dichos maniquíes están dotados de sensores con el objeto de captar las fuerzas de desaceleración por el impacto. Estos sensores se encuentran ubicados en cabeza, fémur, tórax y tibia [8].

La figura 3-4 muestra una representación de este tipo de prueba de choque y las condiciones en las que se realiza.



Figura 3-4: Crash-test frontal.



Existen distintas variaciones de este ensayo donde el vehículo se hace colisionar contra una barrera rígida, una barrera deformable o contra otro vehículo. Además, los choques se pueden realizar con diferentes ángulos entre el vehículo y el objeto con el que choca. Otra posibilidad es hacer colisionar el vehículo con el 100% de frontal o con una porción menor de éste. También se puede modificar la velocidad a la que impacta el vehículo, con lo cual se consiguen comportamientos distintos al ser ésta uno de los principales factores en el resultado final de una colisión.

Los requisitos que tienen que cumplir tanto el vehículo testado como los dummies son los siguientes:

- El desplazamiento residual del volante, medido en el centro de éste y en la parte superior de la columna de la dirección no será superior a 80 mm hacia arriba en vertical, ni a 100 mm hacia atrás en horizontal.
- Durante el ensayo no deberá abrirse puerta alguna.
- No deberán bloquearse los sistemas de bloqueo de las puertas delanteras.
- Después de la colisión será posible:
 - Abrir al menos una de las puertas por fila de asiento, si la hay, y si no la hay, mover los asientos o inclinar sus respaldos como fuera preciso para permitir la evacuación de todos los ocupantes.



- Liberar los maniqués del sistema de retención, el cual deberá poder abrirse, en caso de estar bloqueado, aplicando una fuerza máxima de 60 N sobre el centro del mando de apertura.
- Extraer los maniqués intactos del vehículo sin ajustar los asientos.
- Si se produjera una fuga continua de combustible, ésta no deberá ser superior a 5×10^{-4} Kg/s.

3.3.2 IMPACTO LATERAL

Según el análisis estadístico, los choques laterales representan el 25 por ciento de todos los accidentes que se producen. En este caso es mucho más difícil la protección de los ocupantes del vehículo. Este tipo de colisión provoca graves lesiones sobre los ocupantes debido a la baja capacidad de absorción de las piezas de la estructura y del revestimiento, y a las grandes deformaciones que de ello resultan en el habitáculo. El punto crítico son las puertas que, para proporcionar una protección eficaz, deben mantenerse sujetas a las columnas por medio de mecanismos de cierre y bisagras extremadamente robustas. Además, la rigidez de las puertas, así como la solidez de los largueros que las unen y el techo, son también factores determinantes a la hora de una colisión. En la figura 3-5 se representa una vista superior de este tipo de choque.

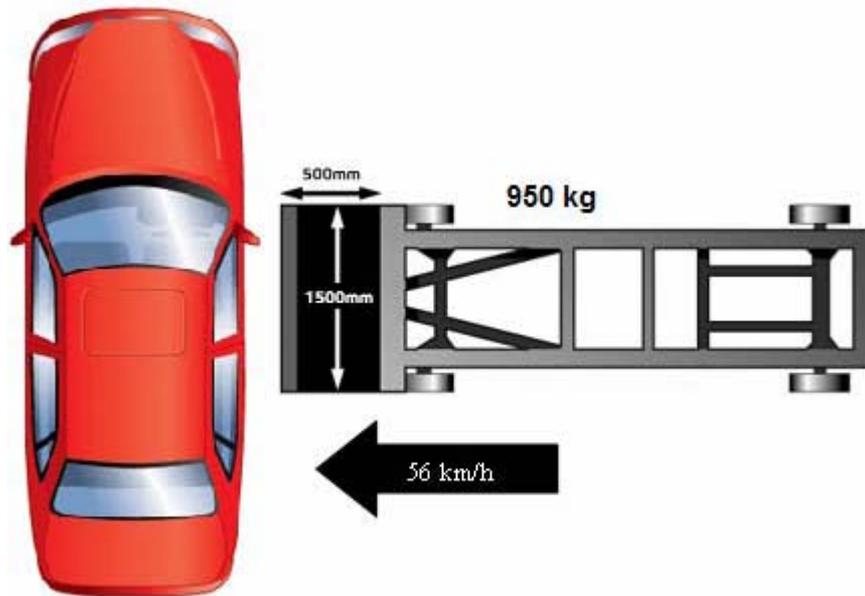


Figura 3-5: Crash-test lateral.

En relación a este tipo de colisiones, el diseño de los asientos ha demostrado revestir también una gran importancia. En la actualidad, la mayor seguridad la proporcionan los asientos con sistemas de cinturón integrado. Estos disponen de una fijación al suelo muy firme y refuerzos estudiados para aumentar la seguridad en dicha zona. El cinturón integrado en el asiento hace necesaria esta rigidez estructural, ya que todas las fuerzas que actúan sobre el cinturón influyen en la construcción del asiento y del piso.

Regulado por la legislación vigente en la directiva europea 96/27/CE, este tipo de prueba de choque es obligatoria desde 1998. Consiste en lanzar una barrera móvil deformable de 950 Kg a una velocidad de 50 km/h contra el vehículo, que se sitúa inmóvil. En esta prueba se coloca un solo dummy



en el interior del vehículo que se sitúa obligatoriamente en el lado del conductor en el cual impacta la barrera. Se pueden emplear distintos objetos con los que hacer colisionar el vehículo: barreras deformables, postes rígidos o distintos vehículos. De la misma forma, se puede modificar tanto el ángulo como la zona de colisión [8].

3.3.3 EL VUELCO

Los test de vuelco (*roll-over-test*) ponen a prueba la rigidez de la estructura del techo. Este tipo de *crash-test* suele realizarse en dos fases; en la primera, se sitúa el vehículo en un plataforma con una cierta inclinación, y en la segunda fase, la carretilla se desplaza una velocidad de 50 km/h y, posteriormente, se frena bruscamente provocando que el vehículo salga despedido y de vueltas de campana hasta que se detiene. En otras ocasiones, el vehículo se somete a una caída libre desde 50 cm de altura sobre la esquina delantera izquierda del techo. Tanto en un tipo de prueba como en la otra, el habitáculo no debe sufrir deformaciones de importancia que pongan en peligro la integridad de los ocupantes.

Para disminuir los riesgos de lesiones, es preciso que el techo y los montantes dispongan de una rigidez óptima. Con el fin de mejorar el grado de rigidez del techo, se realiza también otro tipo de prueba consistente en aplicar una serie de esfuerzos de compresión sobre los montantes y así analizar su rigidez, resistencia y grado de deformación [7].

La figura 3-6 muestra una representación de este ensayo que ilustra lo anteriormente expuesto.



Figura 3-6: Test de vuelco

3.3.4 IMPACTO TRASERO

Por lo que respecta a las pruebas estáticas de colisión trasera, éstas están reguladas por la normativa ECE/32/34, la cual establece que el vehículo será impactado por una carretilla móvil a un velocidad de entre 35 y 38 km/h. En este tipo de pruebas, los requisitos que debe cumplir el vehículo son los siguientes:

- No debe producirse una deformación del habitáculo superior a los márgenes establecidos.
- Todas las puertas deben poder abrirse.

- La tapa del maletero no debe introducirse en el habitáculo a través de la luneta trasera.
- En este caso no se permite fuga alguna de combustible.
- Los reposacabezas deben evitar la hiperextensión del cuello de los ocupantes.

En la figura 3-7 se muestra una vista superior de este tipo de prueba de choque.



Figura 3-7: Impacto posterior con una masa de 1000 Kg. y una segunda de 1800 Kg.

Como en el resto de pruebas, existe una variedad de este ensayo consistente en hacer impactar el vehículo contra un poste trasero rígido a una velocidad de entre 4 a 8 km/h, con el fin de analizar la resistencia de elementos como paragolpes, travesaño, largueros y portón trasero [7].



4. EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Muchos de los problemas más habituales planteados en las distintas ramas de la ingeniería son inabordables por métodos analíticos, por lo que es necesario recurrir a códigos informáticos basados en métodos computacionales aproximados.

A comienzos del siglo XX investigadores como Castigliano, Rayleigh y Ritz desarrollaron una metodología para predecir el desplazamiento de una estructura basándose en ecuaciones de funciones de forma de sistemas sencillos de carga, siendo estos resueltos por una minimización de la energía. El trabajo desarrollado por el matemático Richard Courant a mediados de 1950 permitió sentar las bases de la resolución de sistemas estructurales mediante la implementación de la notación matricial y su resolución algebraica.



A partir de este momento, con el desarrollo que han experimentado las computadoras en el aumento de su capacidad de cálculo, gestión de memoria, capacidad de almacenamiento en disco, unido al uso y desarrollo del Método de los Elementos Finitos aplicado al cálculo estructural lineal, no lineal, dinámico, térmico ha hecho que esta metodología se vaya extendiendo desde las universidades, pasando por las multinacionales y llegando a las pequeñas y medianas empresas.

4.1 PRINCIPIOS BÁSICOS Y APLICACIONES

Las aplicaciones prácticas de la mecánica del sólido deformable pueden agruparse en dos grandes familias: la de los problemas asociados a sistemas discretos y la de los problemas asociados a sistemas continuos. En los primeros, el sistema a analizar está dividido de forma natural en elementos claramente definidos. Es el caso, por ejemplo, del análisis de la estructura de un edificio en la que cada viga constituye una entidad aislada bien definida. En los segundos, el sistema no puede ser dividido de forma natural en unidades simples, teniendo que recurrir a la resolución analítica de ecuaciones diferenciales lo cual supone un problema al presentarse casos complejos.

El principio del M.E.F. (Método de los Elementos Finitos) consiste en la reducción del problema con infinitos grados de libertad, en un problema finito en el que intervenga un número finito de variables asociadas a ciertos puntos característicos (nodos).



En todos los modelos de elementos finitos, el dominio (el sólido en problemas de mecánica de sólidos) se divide en un número finito de formas simples denominadas elementos. Para definir el comportamiento en el interior de cada elemento, se supone que dentro del mismo todo queda perfectamente definido a partir de lo que sucede en los nodos a través de una adecuada función de interpolación.

En el M.E.F. son casi esenciales los conceptos de "discretización", o acción de transformar la realidad de la naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, y de "interpolación", o acción de aproximar los valores de una función a partir de su conocimiento en un número discreto de puntos. Por lo tanto, se trata de un método aproximado en el cual la precisión de los resultados depende de la densidad de elementos utilizada. El número de elementos requeridos para obtener una respuesta fiable depende del problema específico; sin embargo, es recomendable siempre incrementar el número de elementos en el objeto con el fin de observar la variación en los resultados.

Actualmente, el M.E.F. ha sido generalizado hasta constituir un potente método de cálculo numérico, capaz de resolver cualquier problema de la física formulable como un sistema de ecuaciones, abarcando los problemas de la mecánica de fluidos, de la transferencia de calor, del magnetismo, etc. Sin embargo, no se debe olvidar que este método es una virtualización de los problemas físicos reales, pues en un problema real existen muchos fenómenos e interacciones, procesos de fabricación, casos de carga, condiciones de contorno, propiedades mecánicas de los materiales



que en muchas ocasiones resultan imposibles de medir y/o caracterizar. En consecuencia, es responsabilidad del analista asumir las simplificaciones adecuadas para conseguir la mejor aproximación a la solución del problema, en un plazo de tiempo corto, con un uso de recursos adecuados y con una precisión acorde a los datos iniciales de partida y a los objetivos marcados del cálculo. Para ello, resulta necesario que el usuario disponga de la suficiente experiencia previa y sea capaz de interpretar los resultados arrojados por el programa, ya que de lo contrario su carácter aproximado le confiere cierto riesgo [9].

La tabla 4-1 muestra un esquema de los pasos seguidos en la ejecución de un análisis por elementos finitos.

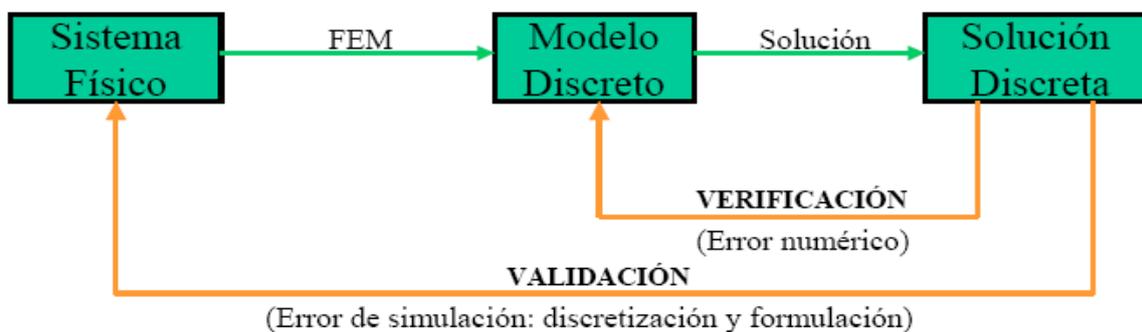


Tabla 4-1: Uso de método de los Elementos Finitos.

En esta tabla se observa que a través de un proceso de discretización se pasa de un sistema físico a un modelo discreto, que al ser solucionado permite obtener una solución discreta. La validez de la solución discreta



puede verificarse en el modelo discreto, de donde se obtiene un error numérico en la solución de las ecuaciones. El resultado total del modelo se debe verificar contrastando los resultados con soluciones obtenidas por métodos experimentales o teóricos, lo cual constituye el proceso de validación del modelo.

En definitiva, las tres principales fuentes de error en una solución típica de Elementos Finitos son los errores de discretización, de formulación y los errores numéricos.

Por último, destacar que este método permite abordar problemas altamente no lineales, en los cuales existen contactos entre componentes, grandes deformaciones de los materiales, modos de fallo de los materiales, así como efectos dinámicos. Un ejemplo son las simulaciones de choque, objeto de estudio de este proyecto, ya que en un choque frontal los materiales encargados de absorber la energía del impacto experimentan grandes deformaciones y entran en la denominada zona plástica, en la que desaparece la linealidad entre tensión y deformación.



4.2 LS-DYNA

Ls-Dyna es un código de elementos finitos de propósito general capaz de simular problemas complejos del mundo real.

El origen de Ls-Dyna tiene lugar a mitad de la década de los setenta con el desarrollo del software “Dyna3D” en el Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). Cabe destacar la figura de Juan O. Hallquist como uno de los principales investigadores en el desarrollo de Ls-Dyna, cuyo primer manual se lanzó para la distribución pública en agosto de 1976. Desde entonces, este software ha adquirido una gran especialización en el sector automovilístico para la simulación de accidentes, contribuyendo a un desarrollo y mejora más eficiente de sus diseños y de sus sistemas de seguridad [10] [11].

En la actualidad, se consiguen simulaciones de choques fieles a la realidad y las compañías automovilísticas y sus proveedores pueden probar sus diseños sin tener que construir para ello un prototipo, lo cual supone un ahorro de tiempo y dinero.

La figura 4-1 muestra un choque lateral simulado con Ls-Dyna de un vehículo contra un carro en cuyo frontal se ha fijado una barrera deformable. El impacto se produce en el lado del conductor.

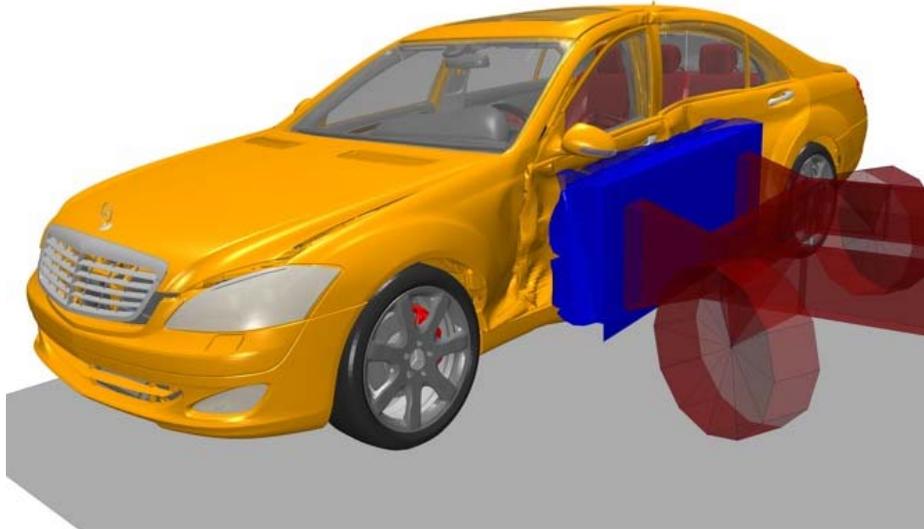


Figura 4-1: Ejemplo de choque simulado con Ls-Dyna.

Ls-Dyna permite analizar grandes deformaciones de problemas estáticos o dinámicos de estructuras incluyendo su interacción con fluidos. Además, incorpora, entre otras capacidades, elementos explícitos bi-dimensionales y tri-dimensionales, análisis automático de contactos (superficie única, superficie-superficie y nodo-superficie), decenas de modelos de materiales y ecuaciones constitutivas, y un variado abanico de posibilidades de simulación. Algunas de sus características más generales son [10]:

- La principal metodología de resolución se basa en integración explícita.



- Un algoritmo de impacto y contacto permite tratar problemas complejos de la realidad, incluyendo transferencia de calor a través de las superficies en contacto.
- La especialización del algoritmo de contacto hace que no sea necesario mallar las zonas de transición para obtener resultados fiables.
- Para elementos bi-dimensionales es capaz de refinar la malla durante el procesado en función de los resultados para obtener así mayor precisión en las zonas que la requieran.

Ls-Dyna es un software desarrollado por la empresa Livermore Software Technology Corporation (LSTC), la cual permite descargar de su página web (www.lstc.com) el pre y post-procesador diseñado expresamente para Ls-Dyna, Ls-Prepost, que es el que se ha empleado en este proyecto.

Ls-Prepost consiste en una herramienta interactiva avanzada que prepara los datos de entrada a Ls-Dyna y procesa los datos resultantes de los análisis del programa. Su interfaz de usuario es intuitiva y fácil de usar lo cual permite editar elementos sin apenas esfuerzo. Como preprocesador tiene aplicaciones específicas orientadas al sector de la automoción como son la implementación de airbags, cinturones de seguridad, modelos dummy, sensores, acelerómetros, etc. Por otra parte, como post-procesador permite la rápida y cómoda visualización de resultados que van desde



gráficas de desplazamientos de los nodos, velocidades, aceleraciones, tensiones de Von-Misses, etc, hasta el cálculo de parámetros más específicos como el HIC (Head Injury Criterion) y el CSI (Chest Severity Index) que permiten evaluar el nivel de daños en la cabeza y el tórax, respectivamente.



5. MODELOS **EMPLEADOS EN LA** **SIMULACIÓN**

Los modelos que se simulan en este proyecto representan un choque frontal de un vehículo contra diferentes barreras de protección que perfectamente se pueden encontrar en la vía pública.

La FHWA y la NHTSA a través de la NCAC han asumido los altos costes de desarrollo de estos modelos con el fin de avanzar en el estado del arte de las simulaciones de impacto. Estos análisis tienen un gran potencial para mejorar significativamente los criterios y herramientas utilizados en el diseño de las vías públicas y de los distintos elementos instalados en los bordes de las carreteras. Se espera que todo esto se traduzca en carreteras más eficientes y más seguras para todos los usuarios.

En este proyecto se estudian tres modelos distintos de elementos finitos en los cuales se emplea el mismo vehículo y únicamente se varían los modelos de barreras de seguridad vial con el fin de evaluar y validar sus diseños. Se dispone de tres modelos típicos constituidos por un guardarraíl, una barrera portátil de hormigón y una barrera mixta de hormigón con baranda metálica. En todos los casos se mantienen las mismas condiciones de fricción entre los diferentes elementos en contacto.

De igual forma, el sistema de coordenadas definido es el mismo en los tres casos, siendo el eje X el que define la dirección de la marcha del vehículo al estar situado a lo largo de su eje longitudinal. Por su parte, el eje Y es el que define la orientación de la barrera (perpendicular al vehículo al tratarse de un choque frontal), y el eje Z está situado a lo largo de la vertical con sentido positivo hacia arriba. En la figura 5-1 se muestra una vista general del caso B desde dos perspectivas diferentes con el propósito de ilustrar lo anteriormente expuesto. Este caso, que se analizará con detalle más adelante, simula el choque del vehículo contra una barrera de hormigón.



Figura 5-1: Sistema de coordenadas empleado en las simulaciones.



Otro aspecto importante a tener en cuenta es que las unidades de todas aquellas magnitudes que intervienen en el modelo deben ser coherentes entre sí. Esto es debido a que tanto Ls-Dyna como Ls-Prepost no entienden de unidades, sólo de valores, por lo que es función del usuario el establecerlas para que cuando el programa arroje sus resultados se tenga claro qué está dando.

En la tabla 5-1 se muestran las principales unidades empleadas en estos modelos.

Magnitud	Unidad de medida
Masa	Tn
Tiempo	s
Longitud	mm
Fuerza	N
Tensión	Mpa

Tabla 5-1: Unidades del modelo de simulación.

5.1 EL VEHÍCULO

El vehículo empleado en el impacto corresponde al modelo *Dodge Neon* desarrollado por la NCAC en 1996, el cual se encuentra disponible en su página web accesible para todo el público. La figura 5-2 muestra una vista general de este modelo.



Figura 5-2: Vehículo empleado en la simulación.

Se trata de un modelo de elementos finitos compuesto por 336 partes y 283859 nodos. Esto da una idea de la complejidad del modelo en el cual la NCAC ha invertido mucho tiempo y recursos.

Aunque, como ya se expuso en capítulos anteriores, no es objeto de estudio de este proyecto el entrar en detalle en el diseño del vehículo, se

comentan algunas características básicas relativas a su geometría y a los materiales empleados.

5.1.1 GEOMETRÍA

Prácticamente la totalidad del vehículo está modelado con elementos tipo SHELL de diferentes espesores. Destacar, sobre todo, las partes que conforman la estructura del vehículo como son los largueros delanteros y traseros, los largueros superiores e inferiores, el travesaño delantero, los pilares, el techo y las barras laterales, cuyo diseño es especialmente importante a la hora de minimizar los daños como consecuencia de la colisión.



Figura 5-3: Visión interna de las partes del vehículo



En la tabla 5-2 se recogen algunos datos del vehículo que son de utilidad en apartados posteriores.

	Modelo
Distancia entre ejes (mm)	2648
Distancia del C.G al eje delantero (mm)	1046
Altura del C.G (mm)	496
Tipo de neumático	P185/65 R15
Peso (Kg)	1333

Tabla 5-2: Medidas de interés del vehículo.

5.1.2 MATERIALES

La mayor parte del vehículo simulado, incluido su estructura, está constituido por materiales del tipo PICEWISE LINEAR PLASTICITY, es decir, materiales de comportamiento elasto-plástico en los que la tensión es linealmente dependiente de la deformación hasta que se supera el límite elástico. Cuando esto ocurre, el material entra en plasticidad y desaparece la linealidad entre tensión y deformación, experimentando grandes deformaciones lo cual contribuye a absorber la energía del impacto.

La figura 5-4 muestra la curva tensión-deformación (σ - ϵ) que define el comportamiento del material en su zona plástica. También se indican algunos de sus parámetros característicos en la tabla 5-3.

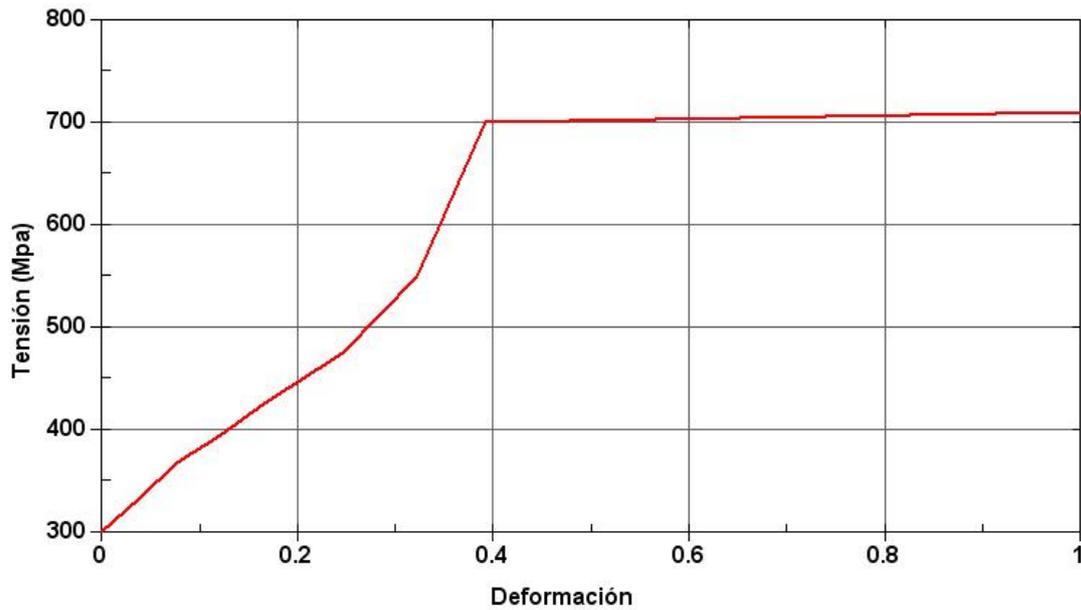


Figura 5-4: Curva tensión-deformación del material.

Módulo de elasticidad E (MPa)	$210 \cdot 10^3$
Coefficiente de Poisson ν	0.3
Densidad ρ (Kg/mm³)	$7.89 \cdot 10^{-6}$
Límite elástico σ_y (MPa)	300

Tabla 5-3: Parámetros característicos del material elasto-plástico.



5.1.3 VELOCIDAD INICIAL

Para dotar al vehículo de una velocidad inicial Ls-Dyna dispone de varios comandos como, por ejemplo, *INITIAL_VELOCITY. Sin embargo, este comando mediante el cual se le asigna a todos los nodos del vehículo una misma velocidad lineal implica un tiempo de cálculo demasiado elevado cuando se trata de modelos complejos. Por tanto, en la realización de este proyecto se ha decidido emplear el comando *INITIAL_VELOCITY_GENERATION que, para este tipo de simulaciones, es el más empleado.

El vehículo ha sido caracterizado con una velocidad inicial de 64 Km/h que es la velocidad a la que impacta contra la barrera. Este valor ha sido tomado teniendo en cuenta el criterio que utiliza la NCAP en sus ensayos, la cual considera que en el momento del impacto el conductor ha reducido su velocidad inicial ya que ha tenido un pequeño intervalo de tiempo para frenar.

Los parámetros que se ha necesitado especificar para completar este comando han sido los siguientes:

- En primer lugar, se determina una velocidad lineal de 64 km/h en el sentido de la marcha del vehículo asociada a todas las partes que forman la carrocería.

$$V_x = 1.778 \cdot 10^4 \text{ mm/s}$$



Hay que tener en cuenta que el eje X coincidía con el sentido longitudinal del vehículo, así como las unidades que se asignaron a los modelos.

- Posteriormente, se le asigna una velocidad angular a las ruedas tanto del eje delantero como trasero. El eje de rotación es el eje Y, y el valor vendrá determinado por:

$$V_x = \Omega_y \cdot R_{neumatico}$$

Sabiendo que el radio del neumático es de 296 mm, la velocidad angular es:

$$\Omega_y = 59,3 \text{ s}^{-1}$$

- Por último, es necesario especificar las coordenadas del centro de rotación del neumático.

$$XC=3689,19 \text{ mm}$$

$$ZC=300,96 \text{ mm}$$

5.1.4 GRAVEDAD

Se ha caracterizado el efecto de la gravedad en el problema imponiéndole una aceleración en dirección vertical y sentido hacia abajo a todos los nodos del vehículo mediante el comando *LOAD_BODY_Z. El valor de la aceleración se introduce como una función del tiempo, en este caso toma el valor constante de $9.81 \cdot 10^3 \text{ mm/s}^2$.

5.1.5 ACELERÓMETROS

Un acelerómetro es un dispositivo que se instala en puntos concretos de la geometría para medir las aceleraciones en distintas zonas como, por ejemplo, el frontal del vehículo o los diferentes asientos.

En el modelo de vehículo se ha colocado un acelerómetro en su centro de gravedad que en el capítulo de resultados sirve para calcular la severidad del impacto. En realidad, es una pieza en forma de cubo la que realiza la función de acelerómetro y lleva asociada un sistema de coordenadas local caracterizado por los ejes X_A , Y_A , Z_A . La información que recoge se registra y almacena para luego, en el post-procesado, obtener la aceleración experimentada por este acelerómetro virtual en cada uno de sus ejes como una función del tiempo. En la figura 5-5 se muestra una vista general del acelerómetro instalado.

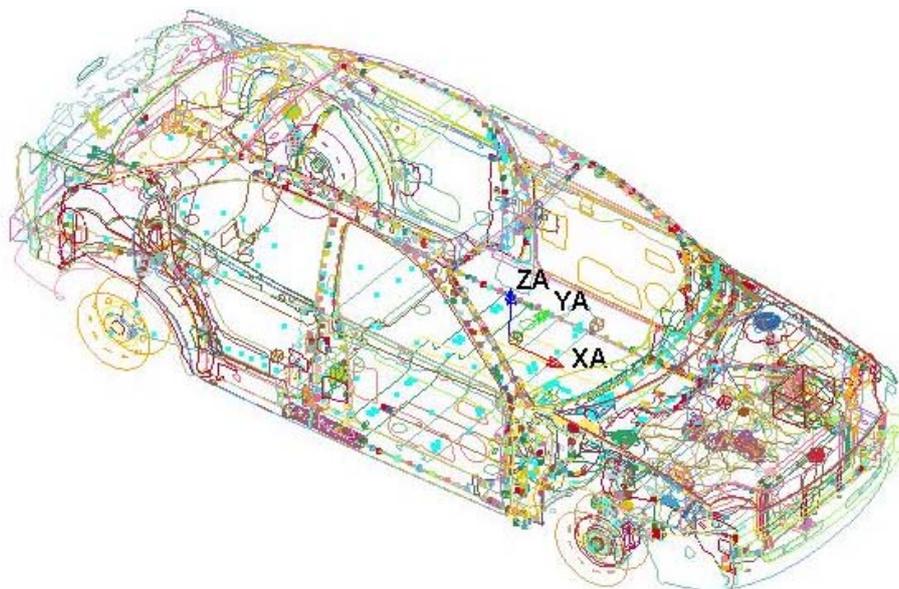


Figura 5-5: Vista general del acelerómetro.



5.2 BARRERAS DE SEGURIDAD

Se definen como barreras de seguridad los sistemas de retención de vehículos instalados en los márgenes de las carreteras cuya finalidad es proporcionar un cierto nivel de contención de un vehículo fuera de control [12].

Las barreras de seguridad se clasifican, según el material de que están formadas, en:

- Metálicas, formadas por una serie continua de elementos longitudinales (raíles), unos soportes (postes) y unos elementos intermedios (separadores) que conectan los dos anteriores. Los postes están destinados a mantener la altura de los raíles de contención, a absorber energía del choque doblándose en sentido normal a la carretera, y a soportar las tracciones inducidas por los raíles sin experimentar desplazamientos excesivos. Los separadores, por su parte, son indispensables para minimizar la severidad del accidente ya que, cuando el raíl está en contacto directo con el poste, la rueda delantera del vehículo tiende a engancharse en él provocando que gire sobre sí mismo. Los raíles se deforman transversal y horizontalmente por lo que son suficientemente rígidos para repartir la deformación longitudinal, distribuyendo la energía entre varios postes.

Para la fabricación de las vallas, separadores y elementos finales se utiliza acero S235 JR, y para los postes S253 JR, ambos con el

contenido adecuado de silicio y fósforo que permita su galvanización en caliente. En la figura 5-6 se muestra una imagen real de una barrera metálica, en concreto de un guardarraíl de doble onda.



Figura 5-6: Barrera metálica

- Hormigón, formadas por una serie continuada de piezas prismáticas de hormigón con un perfil transversal especial. Para la fabricación de los elementos de hormigón prefabricado se utiliza hormigón HA-25. La figura 5-7 muestra una imagen real de este tipo de barreras que se ven a menudo en las medianas de las autopistas.



Figura 5-7: Barrera de hormigón

5.2.1 BARRERA METÁLICA

La barrera metálica de doble onda es el elemento de protección de seguridad vial pasiva de uso más común en las carreteras, tanto de España como de la mayor parte de países del mundo. Estos elementos, más comúnmente conocidos como guardarraíles, están contruídos de material deformable para absorber el impacto del vehículo. En caso de accidente, y según el ángulo de impacto, estas barreras pueden llegar a atravesar la carrocería del automóvil, invadiendo el habitáculo de seguridad y produciendo gravísimas lesiones en los ocupantes [13].

En este estudio, el guardarraíl empleado en la simulación corresponde al modelo *W-Beam Guardrail G41s* desarrollado por la NCAC, el cual se encuentra publicado en su página web al alcance de todo el mundo. La figura 5-8 muestra una imagen del modelo.

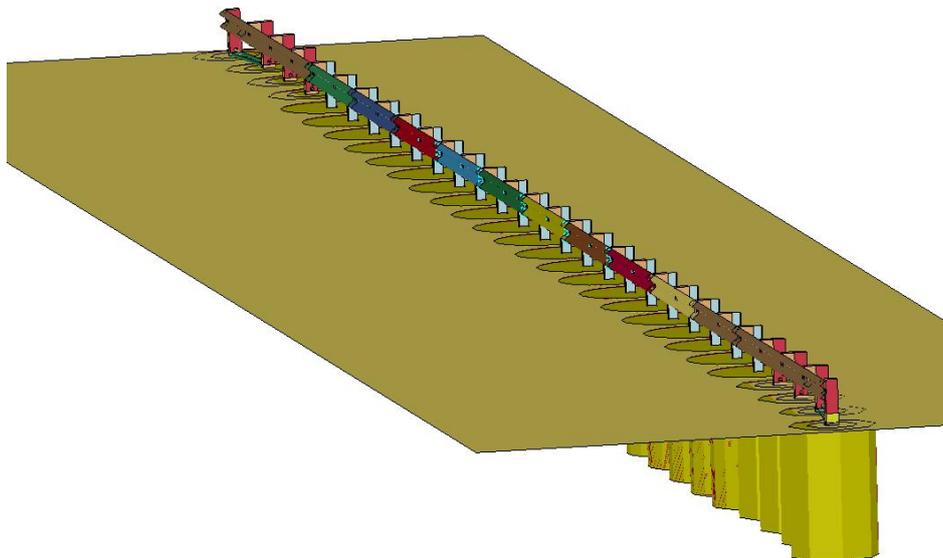


Figura 5-8: Vista general del modelo de guardarraíl.



Se trata de un modelo de elementos finitos compuesto por 133 partes y 108945 nodos. El modelo lleva incorporados todos los elementos que se pueden observar en el guardarraíl de una carretera: los raíles, los postes y los bloques de madera. También se incluye el suelo que lo sustenta, el cual tiene restringidos todos sus desplazamientos y rotaciones.

A continuación se comentan algunas características relativas a su geometría y a los materiales empleados.

5.2.1.1 GEOMETRÍA

La totalidad del guardarraíl está modelado con elementos tipo *SHELL de distintos espesores, a excepción de los bloques de madera que son del tipo *SOLID. Los raíles, cuyo espesor es de 3 mm tal y como indica la norma UNE 36-093-85 que lo regula, tienen una longitud de 3807 mm y están sujetos por postes de acero. Estos postes tienen una longitud total de 1830 mm, de los cuales 1100 mm están clavados en el suelo. Por su parte, los bloques de madera están situados entre los postes y los raíles y tienen unas dimensiones de 150 mm x 200 mm x 360 mm. El modelo se encuentra anclado en ambos extremos por un cable. El sistema completo consta de 29 postes y 14 raíles.

La figura 5-9 muestra una imagen de cada una de las partes mencionadas anteriormente.

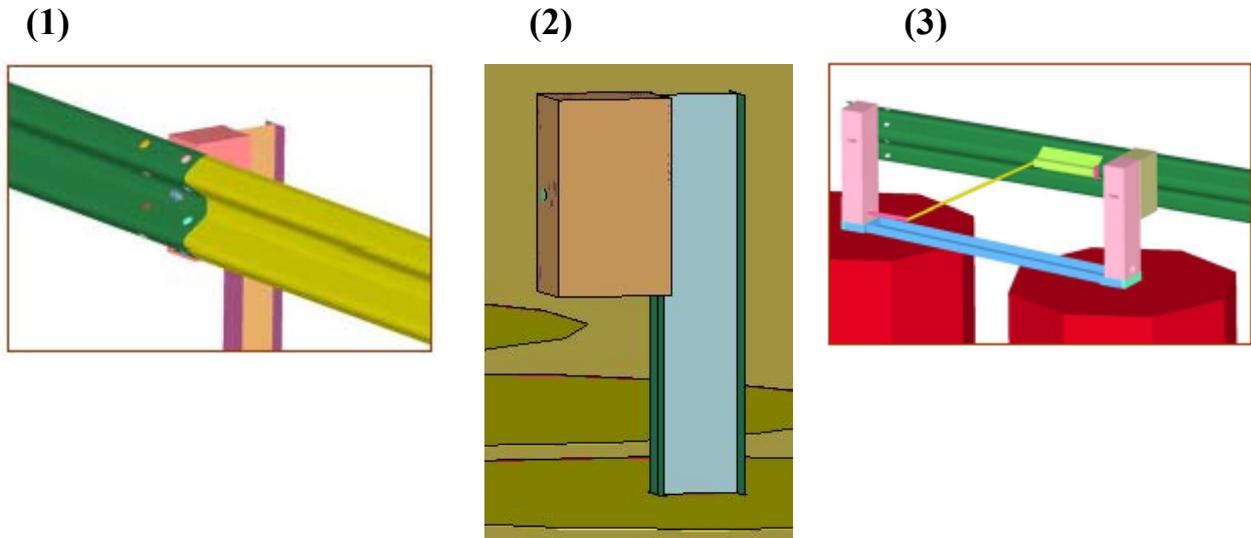


Figura 5-9: Elementos que forman el modelo guardarrail: (1) raíles; (2) postes de sujeción y separadores; (3) cable de anclaje en los extremos.

5.2.1.2 MATERIALES

Tanto los raíles como los postes de sujeción están constituidos por materiales del tipo *PICEWISE_LINEAR_PLASTICITY, materiales cuyas propiedades son de gran utilidad para minimizar los riesgos de la colisión puesto que contribuyen, junto con la estructura del vehículo, a disipar la energía del impacto.

La curva que define el comportamiento plástico de este material se muestra en la figura 5-10.

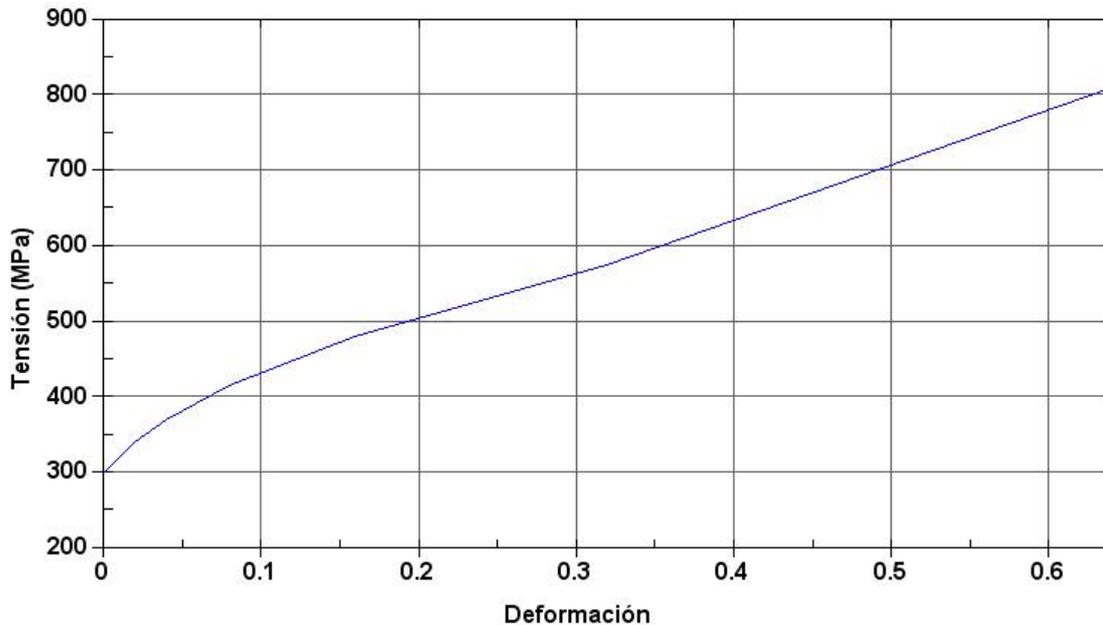


Figura 5-10: Curva tensión-deformación de los raíles y postes.

Por su parte, los separadores se han caracterizado empleando el comando de Ls-Dyna `*MAT-ELASTIC`, mientras que al suelo se le ha asignado un material tipo `*RIGID`, el cual considera al cuerpo como un sólido rígido. Para caracterizar el contacto del suelo con otras partes como, por ejemplo, los neumáticos del vehículo, es necesario dotar a este material rígido de módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.

Los parámetros que definen el material de cada parte del guardarraíl se recogen en la tabla 5-4.



Parte	Módulo de elasticidad E (Mpa)	Coefficiente de Poisson u	Densidad ρ (Kg/mm ³)
Raíles y postes	$200 \cdot 10^3$	0.3	$7.89 \cdot 10^{-6}$
Separadores	$1.25 \cdot 10^4$	0.3	$6 \cdot 10^{-7}$
Suelo	$200 \cdot 10^3$	0.3	$1.7 \cdot 10^{-6}$

Tabla 5-4: Tabla de propiedades de los materiales del guardarraíl.

5.2.2 LA BARRERA DE HORMIGÓN

La barrera de hormigón representa otra solución, en algunas ocasiones, alternativa a la barrera metálica. Es mucho más rígida y, por tanto, su capacidad para disipar energía es menor. Sin embargo, es mucho menos franqueable, característica que la convierte en la reina de las medianas. Puede ser prefabricada o “in situ” y, aunque su función es similar, su prestaciones son diferentes [13].

En este proyecto, la barrera de hormigón empleada en la simulación corresponde al modelo *Portable Concrete Barrier* desarrollado por la NCAC, el cual se encuentra en su página web al alcance de todo el mundo. Se trata de un modelo de elementos finitos compuesto por 133 partes y 108945 nodos. En la figura 5-11 se ofrece una imagen del mismo.

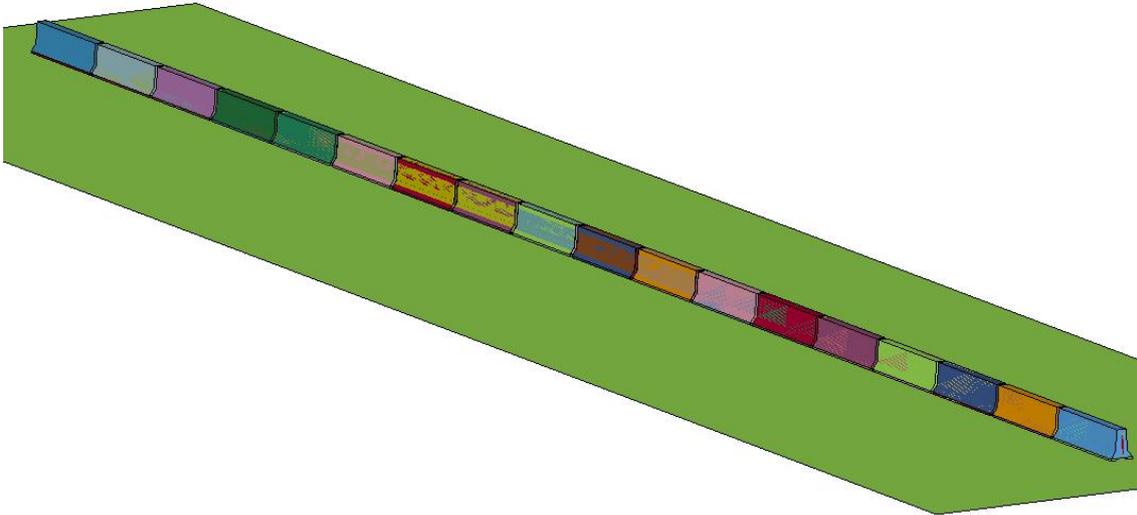


Figura 5-11: Vista general del modelo de barrera de hormigón.

A continuación se comentan algunas características relativas a su geometría y a los materiales empleados.

5.2.2.1 GEOMETRÍA

El modelo completo consta de 18 bloques de hormigón con los respectivos elementos de anclaje entre ellos. También se incluye el suelo sobre el que se apoyan, en el cual se han restringido todos sus desplazamientos y rotaciones. Los bloques de hormigón tienen una longitud de 3050 mm cada uno y todos ellos han sido modelados con elementos tipo *SOLID. Disponen de un recubrimiento para el cual se han empleado elementos tipo *SHELL.

En la figura 5-12 se muestra una imagen del perfil de los bloques de hormigón con sus correspondientes dimensiones en milímetros.

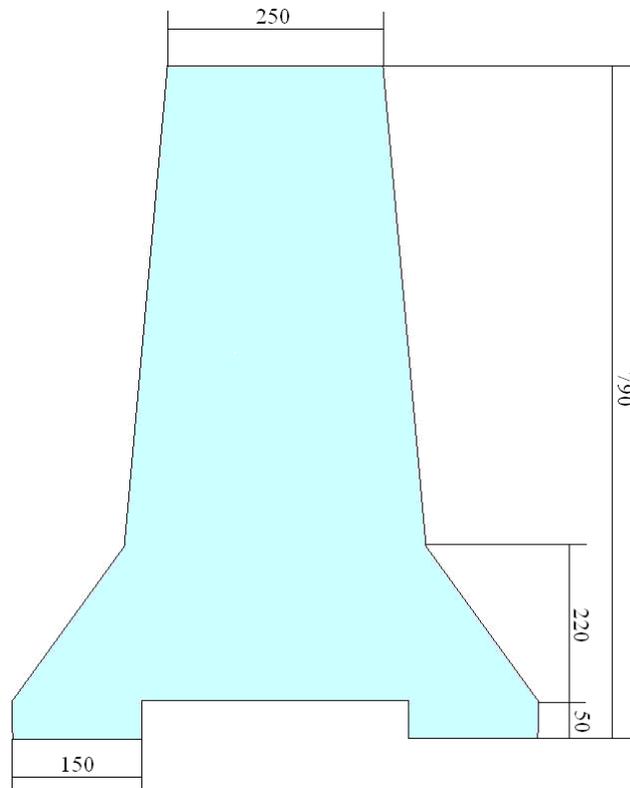


Figura 5-12: Perfil acotado de los bloques de hormigón.

5.2.2.2 MATERIALES

Los bloques de hormigón están constituidos por materiales tipo *RIGID en los cuales ha sido necesario definir, por necesidad interna del programa, un módulo de elasticidad y un coeficiente de Poisson para caracterizar el contacto de estos bloques con el vehículo en el momento de la colisión. Las propiedades características de este material aparecen recogidas en la tabla 5-5.

Módulo de elasticidad E (MPa)	$20 \cdot 10^3$
Coefficiente de Poisson ν	0.28
Densidad ρ (Kg/mm³)	$2.4 \cdot 10^{-6}$

Tabla 5-5: Parámetros del material de los bloques.

5.2.3 PRETILES MIXTOS

Este tipo de sistema de contención se compone de una estructura de hormigón prefabricado y una baranda metálica. Está diseñado específicamente para bordes de tableros de obras de paso, coronaciones de muros de sostenimiento y obras similares. El empleo de la baranda garantiza un mejor comportamiento de la barrera ante el choque de un vehículo pesado [13]. En la figura 5-13 se muestra una imagen real de este tipo de barrera.



Figura 5-13: Pretil mixto

En este proyecto, el modelo que se ha empleado para la simulación corresponde al *Bridge Rail Model Caltrans_Type 90* desarrollado por la NCAC, el cual se encuentra disponible en su página web accesible al público. Se trata de un modelo de elementos finitos compuesto por 3 partes y 11705 nodos del cual se ha extraído una imagen desde Ls-Prepost que se muestra en la figura 5-14.

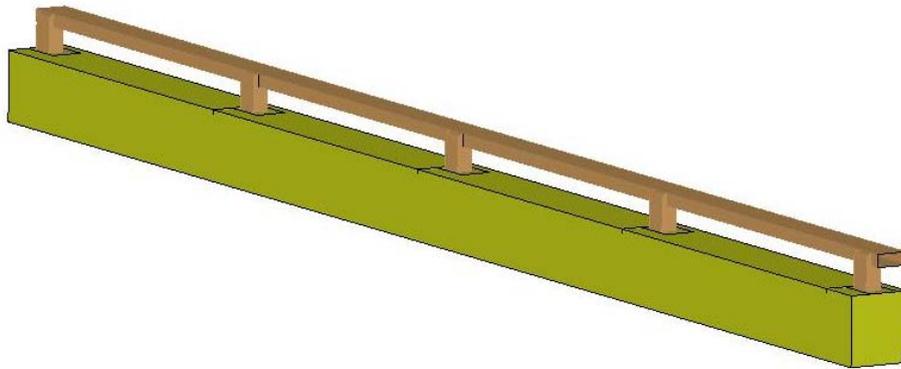


Figura 5-14: Vista general de la barrera mixta.

A continuación se comentan algunas características relativas a su geometría y a los materiales empleados.

5.2.3.1 GEOMETRÍA

El modelo completo consta de un bloque de hormigón con su correspondiente recubrimiento, sobre el cual se sujeta una baranda de acero. El bloque tiene una longitud de 12,3 m y ha sido modelado con un elemento tipo *SOLID. Tanto para la baranda como para el recubrimiento del bloque se han utilizado elementos tipo *SHELL.

En la figura 5-15 se muestra una imagen del perfil acotado de la estructura de hormigón.

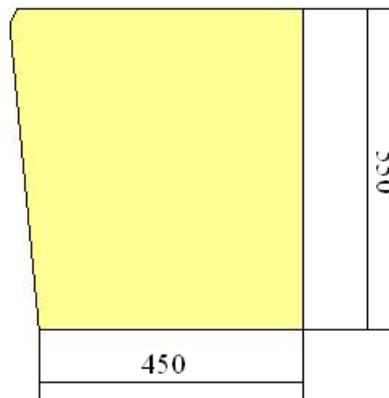


Figura 5-15: Vista del perfil del bloque de hormigón.

5.2.3.2 MATERIALES

El bloque de hormigón ha sido constituido empleando un material tipo *ELASTIC, material isotrópico y elástico disponible para vigas, placas y elementos sólidos en Ls-Dyna. Por su parte, para la baranda metálica se ha hecho uso del material *PLASTIC_KINEMATIC que resulta adecuado para modelar materiales isotrópicos bilineales con endurecimiento cinemático.

Los parámetros que definen el material de cada parte se muestran en la tabla 5-6.



Parte	Módulo de elasticidad E (Mpa)	Coefficiente de Poisson u	Densidad ρ (Kg/mm³)
Bloque	$30 \cdot 10^3$	0.35	$2.32 \cdot 10^{-6}$
Baranda	$200 \cdot 10^3$	0.3	$7.86 \cdot 10^{-6}$

Tabla 5-6: Características de los materiales de la barrera mixta.

5.3 REGIONES DE CONTACTO

El tratamiento de contacto constituye una parte integral de muchos de los problemas en los que aparecen grandes deformaciones. Una simulación exacta de puntos de contacto entre los cuerpos es imprescindible para la capacidad de predicción de las simulaciones por elementos finitos. Ls-Dyna ofrece una gran variedad de tipos de contacto, algunos de los cuales son utilizados para aplicaciones específicas y otros para un uso más general [14].

En cada uno de los modelos simulados en este estudio se han definido dos regiones de contacto que se explican a continuación.



5.3.1 CONTACTO: VEHÍCULO Y BARRERA

En un análisis de impacto como el que se realiza en este proyecto el modelo sufre cambios bruscos y las deformaciones pueden ser muy variadas, por lo que resulta casi imposible determinar dónde y cómo tiene lugar el contacto entre las distintas partes. Por este motivo, se han empleado las opciones automáticas de contacto que ofrece Ls-Dyna y que se identifican mediante la palabra “*automatic*” dentro del comando *CONTACT. Este tipo de contactos, al no estar orientados, pueden detectar una penetración próxima a cualquiera de los lados de un elemento tipo *SHELL.

En concreto, el contacto entre el vehículo y la barrera de seguridad vial empleada en cada caso se ha simulado como un contacto entre superficies sin permitir penetración a través de ellas. El comando empleado es *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE. En dirección tangencial al plano de contacto los esfuerzos resultantes son debidos al rozamiento entre partes quedando definidos los esfuerzos por los coeficientes de rozamiento estático y dinámico. A partir de estos dos coeficientes y la ecuación que se muestra a continuación se puede obtener el coeficiente de rozamiento en función de la velocidad relativa entre superficies en contacto y, de este modo, los esfuerzos tangenciales entre las partes:



$$\mu = FD + (FS - FD)e^{-DC|V_{rel}|}$$

$$FS = \mu_{estático} = 0,1$$

$$FD = \mu_{dinámico} = 0,05$$

$$DC = 0,001$$

Donde FS y FD son los coeficientes de rozamiento estático y dinámico respectivamente, que en ocasiones también se designan por la letra μ . DC es una constante definida para cada tipo de contacto y v_{rel} la velocidad relativa de una superficie sobre la otra. Como la barrera está fija al suelo y no se mueve, la velocidad relativa será la velocidad que lleva el vehículo en el momento del impacto $V_{rel} = 17,78$ m/s (64 km/h). De esta forma, el coeficiente de rozamiento $\mu = 0,1$.

En dirección normal al contacto se producen reacciones debidas a la deformación de las partes.

5.3.2 CONTACTO: RUEDAS Y SUELO

Para definir el contacto entre la ruedas del vehículo y el suelo sobre el que se levanta la barrera de protección se ha utilizado una superficie plana empleando el comando disponible en Ls-Dyna para tal efecto *RIGIDWALL_PLANAR. Esta superficie se ha caracterizado con su correspondiente vector normal cuyo origen se encuentra en uno de los nodos del elemento tipo *SHELL con el que se ha modelado el suelo. Una



vez definida esta superficie, se han asociado a ella los nodos referentes a los cuatro neumáticos del vehículo, siendo el coeficiente de fricción entre ambas partes igual a 0,8 puesto que se considera que el ensayo se realiza bajo unas condiciones de firme seco.



6. LA NORMA EUROPEA EN 1317

La norma europea UNE EN 1317 del Comité Europeo de Normalización, cuya última revisión data del año 2008, hace referencia a los sistemas viales de contención de vehículos. La norma determina los niveles de protección de cualquier barrera para garantizar la seguridad de una persona en caso de impacto con la misma. Este documento regula tanto las condiciones que han de darse en la ejecución del ensayo como los resultados que han de obtenerse a partir de él.

En concreto, en el punto 2 de esta norma se establecen los criterios de evaluación a partir de los cuales se clasifican las barreras de seguridad vial instaladas en los márgenes de las carreteras europeas [15]:



- Nivel de contención: representa la capacidad del sistema para retener al vehículo de forma controlada, sin que éste lo rebase, sin vuelcos, sin penetración en el vehículo y sin desprendimientos de partes esenciales. Se definen cuatro niveles: bajo, normal, alto, muy alto.
- Severidad del impacto: medida de las consecuencias del impacto en los ocupantes del vehículo. Se utilizan tres parámetros: el índice de severidad de la aceleración (ASI), la velocidad teórica de choque de la cabeza (THIV) y la deceleración de la cabeza tras el choque (PHD).
- Deformación de la barrera: se mide haciendo uso de dos parámetros.
 - Anchura de trabajo (W_m): máxima distancia entre la cara del sistema más próxima al tráfico antes del impacto y la posición lateral más desplazada alcanzada por cualquier parte esencial del sistema durante el impacto. Se han definido 8 niveles que van desde $W_1=0,6$ m hasta $W_8=3,5$ m.
 - Deflexión dinámica (D_m): máximo desplazamiento lateral dinámico de la cara de la barrera más próxima al tráfico durante el impacto.

En la figura 6-1 se muestra una imagen que define gráficamente estos dos conceptos.

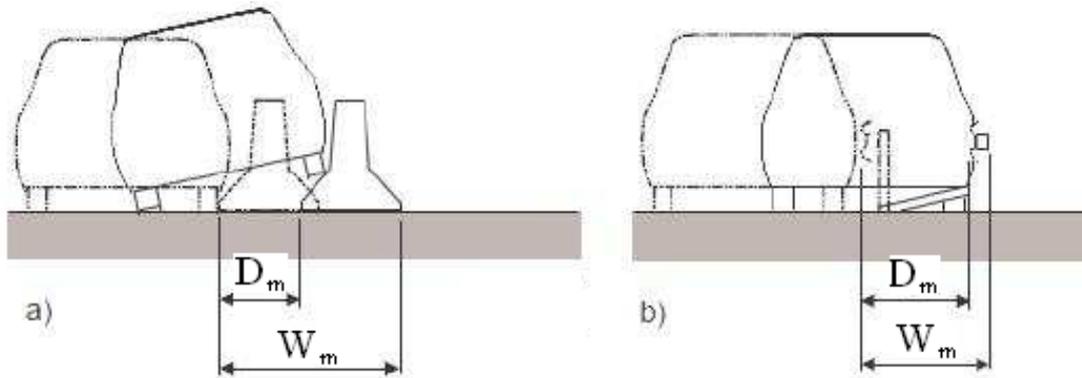


Figura 6-1: Definición del ancho de trabajo y la deflexión dinámica de una barrera de seguridad.

- Capacidad de redireccionamiento: aptitud del sistema para cambiar la trayectoria del vehículo que impacta contra él, produciéndole una salida lo más paralela posible a la dirección de circulación.

De entre todos los criterios y parámetros mencionados anteriormente, en este proyecto se ha tenido en cuenta el cálculo del ASI (Acceleration Severity Index) para medir la severidad del impacto y con ello validar o rechazar el diseño de las barreras de protección evaluadas en este estudio. Este coeficiente adimensional se obtiene a partir de las deceleraciones que experimenta el vehículo durante el impacto. Se define por la siguiente ecuación:

$$ASI(t) = \left[\left(\frac{\bar{a}_x}{\hat{a}_x} \right)^2 + \left(\frac{\bar{a}_y}{\hat{a}_y} \right)^2 + \left(\frac{\bar{a}_z}{\hat{a}_z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$



Donde \bar{a}_x , \bar{a}_y , y \bar{a}_z son las componentes de la aceleración media del vehículo medida en su centro de masas a lo largo de un intervalo $\delta=50$ ms desde que se produce el impacto; \hat{a}_x , \hat{a}_y , y \hat{a}_z corresponden a los valores límites de la aceleración en los tres ejes. Estos valores son 12 g, 9 g, y 10 g para la dirección longitudinal (x), lateral (y), y vertical (z), respectivamente.

Puesto que únicamente se utilizan aceleraciones del vehículo, para el cálculo del ASI se asume intrínsecamente que el ocupante está continuamente en contacto con el vehículo, lo cual se logra, por regla general, a través del uso del cinturón de seguridad. Por tanto, el valor del ASI aporta una medida de la severidad de la colisión que se asume proporcional al riesgo de los ocupantes.

Por lo que se refiere al nivel de gravedad del choque, actualmente se distinguen tres clases: A, B y C. Cada clase corresponde a una serie de valores ASI que, cuanto más elevados son, más devastador es el choque para el conductor y sus pasajeros (ver tabla 6-1).

Nivel de gravedad del choque	Índice ASI
Clase A	$\leq 1,0$
Clase B	$\leq 1,4$
Clase C	$\leq 1,9$

Tabla 6-1: Clasificación del choque en función del ASI.



Un índice ASI comprendido entre 0,1 y 1 ocasiona daños al vehículo pero los ocupantes sufren, a lo sumo, heridas leves. Si el índice ASI es superior a 1 pero inferior o igual a 1,4, el choque puede ocasionar fracturas y pérdidas de conocimiento de corta duración. Si es aún mayor (máximo 1,9), las consecuencias del impacto son peligrosas o incluso letales para los ocupantes del vehículo [16].

Así pues, en aquellos casos en los que el ASI es inferior o igual a 1,4 se puede considerar que las consecuencias de la colisión son leves y, por tanto, se puede certificar el diseño de la barrera de acuerdo con la norma europea EN 1317. Si, por el contrario, el valor es superior, la barrera no cumple con las condiciones de seguridad mínimas y se rechaza.



7. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Cuando se realiza el ensayo de un choque frontal de un vehículo se recogen multitud de datos que, posteriormente, se valoran de acuerdo a unos criterios para establecer el alcance de las lesiones provocadas en los ocupantes. También se analizan los daños producidos en el propio vehículo que puedan tener consecuencias negativas en el desenlace final de un choque real como, por ejemplo, la no apertura de puertas tras el impacto.

Una vez procesados los diferentes casos, Ls-Dyna genera archivos que contienen la información registrada a lo largo de la compilación. Es el usuario del programa el que establece qué datos se registran y con qué frecuencia lo hacen. Estos archivos contienen información de esfuerzos, deformaciones, velocidades, aceleraciones, presión, temperatura, etc.



Gracias a Ls-Prepost se pueden visualizar los resultados obtenidos y trabajar con ellos en un entorno gráfico.

Con el fin de analizar los resultados obtenidos en este estudio se ha utilizado como documento orientativo la norma EN 1317 instaurada por el Comité Europeo de Normalización (CEN) en la que, con carácter legal, se recogen criterios y procedimientos para evaluar la aceptabilidad de un sistema de barreras de contención. Se ha dedicado el capítulo anterior para introducir esta norma.

A continuación se plantean los tres casos analizados en este proyecto por separado y se muestran los resultados obtenidos de cada uno de ellos.

7.1 CASO A: CHOQUE FRONTAL DEL VEHÍCULO CONTRA EL GUARDARRAÍL

El primer caso simula un choque totalmente frontal de un vehículo contra una barrera metálica de acero a 64 km/h. El intervalo de tiempo adoptado para el análisis es de 350 ms, registrándose los resultados requeridos a la salida cada 10 ms. El tiempo de paso o *time step* para el análisis explícito dinámico se ha fijado en 1,4 μ s y la simulación se ha llevado a cabo haciendo uso del código Ls-Dyna versión 970. El tiempo de cálculo computacional empleado para ejecutar este modelo ha sido de 150 horas, utilizándose para ello un PENTIUM 4 con un procesador de 2000 Mhz y 2Gb de memoria RAM.

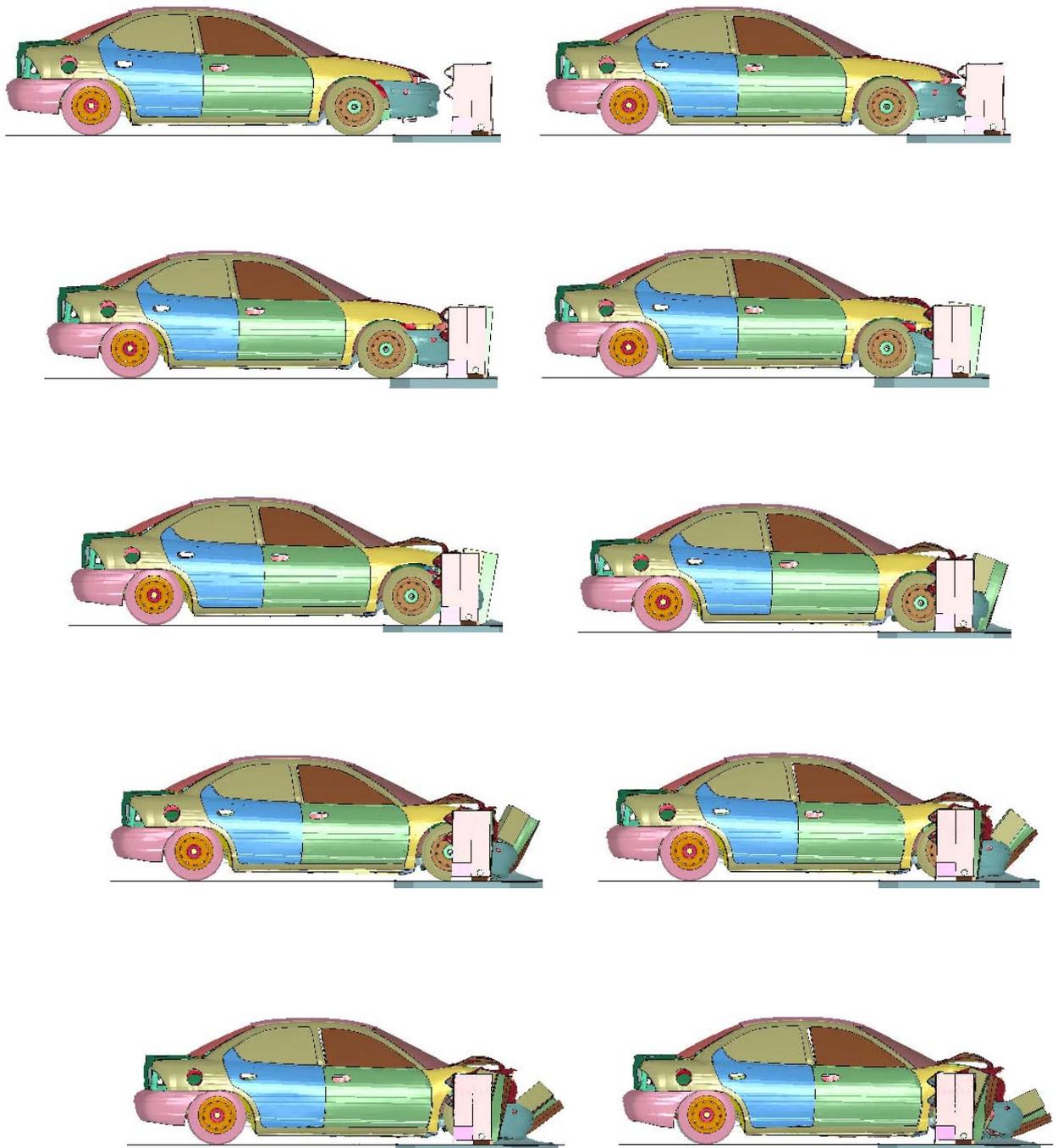


Figura 7-1: Secuencia de imágenes, caso A.



La secuencia de imágenes obtenida de la simulación (ver figura 7-1) tiene una diferencia de 10 milisegundos entre una imagen y la siguiente. En la figura 7-1 se muestran los instantes de tiempo 150 ms (instante justo antes del impacto), 160 ms (momento en el que el vehículo entra en contacto con la barrera), 170 ms, 180 ms, 190 ms, 200 ms (el vehículo golpea el poste trasero), 210 ms, 220 ms, 230 ms y 240 ms en orden cronológico de izquierda a derecha y de arriba abajo. Estos instantes de tiempo han sido seleccionados con la intención de mostrar la secuencia real del proceso.

A continuación se detallan los resultados obtenidos de la simulación y se procede al cálculo del parámetro ASI que ha sido introducido en el capítulo 6 referente a la norma europea EN 1317.

Gracias a un acelerómetro que, como se menciona en capítulos anteriores, se ha instalado en el centro de gravedad del vehículo, se recogen los valores de las distintas variables cinemáticas en este punto a lo largo de toda la simulación. Estos valores están referenciados en un sistema de coordenadas local del vehículo que coincide con el sistema de coordenadas global del modelo. Las unidades en las que se expresan son las que se definieron al principio del análisis.

Así, y gracias también a la capacidad de Ls-prepost como post-procesador para visualizar gráficas de forma sencilla, se han obtenido las siguientes gráficas (ver figura 7-2 y figura 7-3) relativas a la velocidad y a la aceleración del vehículo en la dirección de la marcha (x).

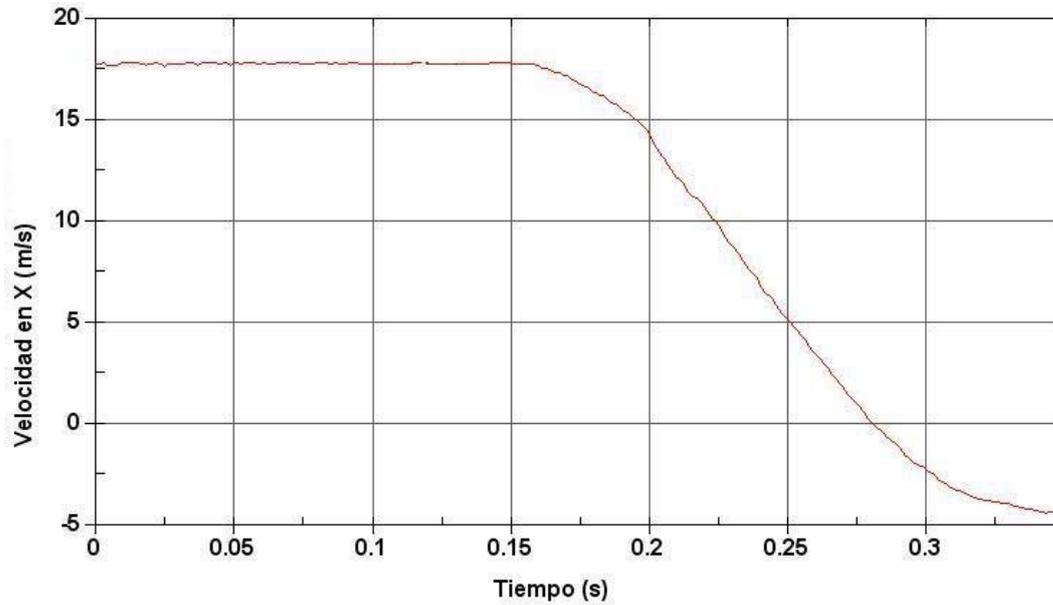


Figura 7-2: Gráfica de velocidad en dirección x.

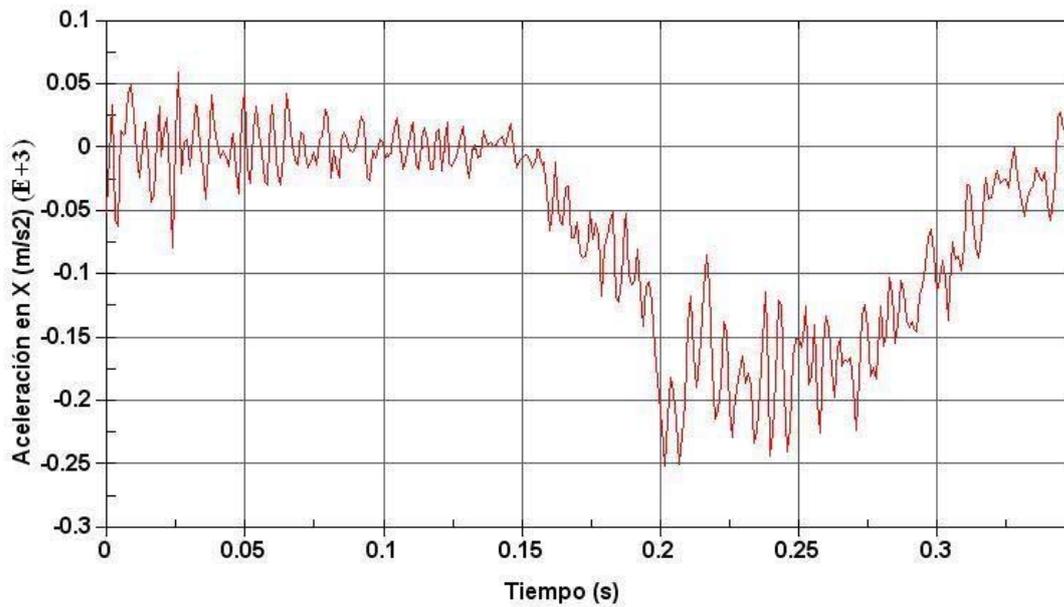


Figura 7-3: Gráfica de aceleración en dirección x.



A partir de los resultados computacionales recogidos en las gráficas anteriores se puede apreciar como en el instante en el que se produce el impacto contra el guardarraíl ($t=160$ ms) el vehículo experimenta una deceleración brusca que alcanza su valor máximo en $t=200$ ms aproximadamente, cuando las ruedas delanteras llegan a impactar con el poste trasero de sujeción de las barreras.

Para el cálculo del ASI se ha tomado un intervalo de tiempo de 50 ms tal y como indica la norma europea EN 1317. Este intervalo va desde que el vehículo colisiona con la barrera en $t_1=160$ ms, hasta el instante de tiempo $t_2=210$ ms. Por tanto, en él están comprendidos los valores extremos de deceleración que son los que interesan a la hora de calcular el índice de severidad.

Para calcular la aceleración en ese intervalo se ha utilizado la tabla de valores que proporciona Ls-Prepost a partir de la gráfica de velocidad de la figura 7-2. Con estos valores, y utilizando la ecuación del M.R.U.A (Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado) $V_o = V_f + a \cdot t$, se ha obtenido el valor de la aceleración:

$$\bar{a}_x = \frac{V_{t1} - V_{t2}}{0,05s} = \frac{(17,715 - 12,527)m/s}{0,05s} = 103,76 \frac{m}{s^2} = 10,57g$$

Al tratarse del análisis de una colisión totalmente frontal se asume que las aceleraciones en dirección lateral y vertical son insignificantes y,

por ello, se ha considerado únicamente la componente longitudinal x . Para demostrar esta simplificación que se ha tenido en cuenta para el cálculo, se adjuntan las gráficas de la aceleración en dirección y y así como en z obtenidas de la simulación (ver figura 7-4 y figura 7-5).

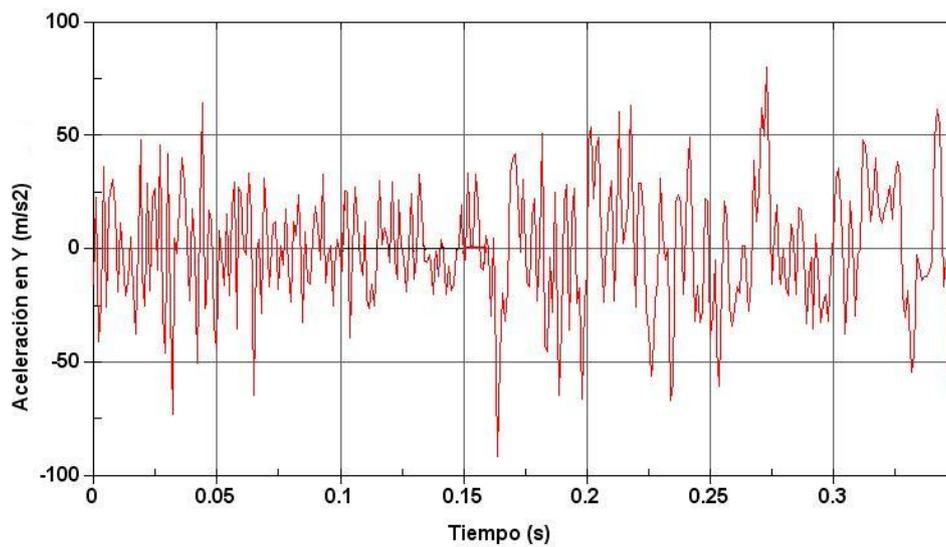


Figura 7-4: Gráfica de aceleración en dirección y .

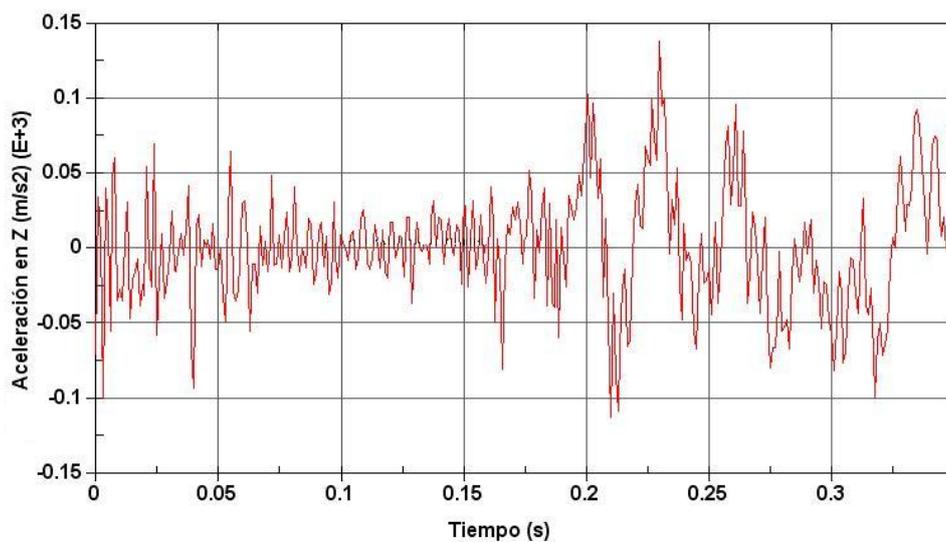


Figura 7-5: Gráfica de aceleración en dirección z .



Con el valor de la aceleración en dirección x se calcula el ASI o índice de severidad del impacto a partir de la ecuación definida en el capítulo anterior:

$$ASI = \left[\left(\frac{\bar{a}_x}{\hat{a}_x} \right)^2 + \left(\frac{\bar{a}_y}{\hat{a}_y} \right)^2 + \left(\frac{\bar{a}_z}{\hat{a}_z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\left(\frac{10,57 g}{12 g} \right)^2} = 0,88$$

Este valor no supera el máximo permitido por la norma EN 1317. Además, al ser el $ASI < 1$ el impacto puede ser clasificado en función de su gravedad como un choque de clase A. Para este tipo de choques, la norma considera que el riesgo de lesiones para los ocupantes es mínimo y que éstos sólo sufren, en el peor de los casos, heridas leves.

7.2 CASO B: CHOQUE DEL VEHÍCULO CONTRA LA BARRERA DE HORMIGÓN

En este segundo caso, se ha realizado la simulación de un choque frontal de un vehículo a 64 km/h contra una barrera de hormigón. El intervalo de tiempo adoptado para el análisis es de 350 ms, registrándose los resultados requeridos a la salida cada 10 ms. El tiempo de paso o *time step* para el análisis dinámico es de 1,4 μ s y la simulación se ha llevado a cabo haciendo uso del software Ls-Dyna versión 970. El tiempo de cálculo computacional empleado para ejecutar este modelo ha sido de 139 horas aproximadamente, utilizándose para ello un PENTIUM 4 con un procesador Intel de 2000 Mhz y 2 Gb de memoria RAM.

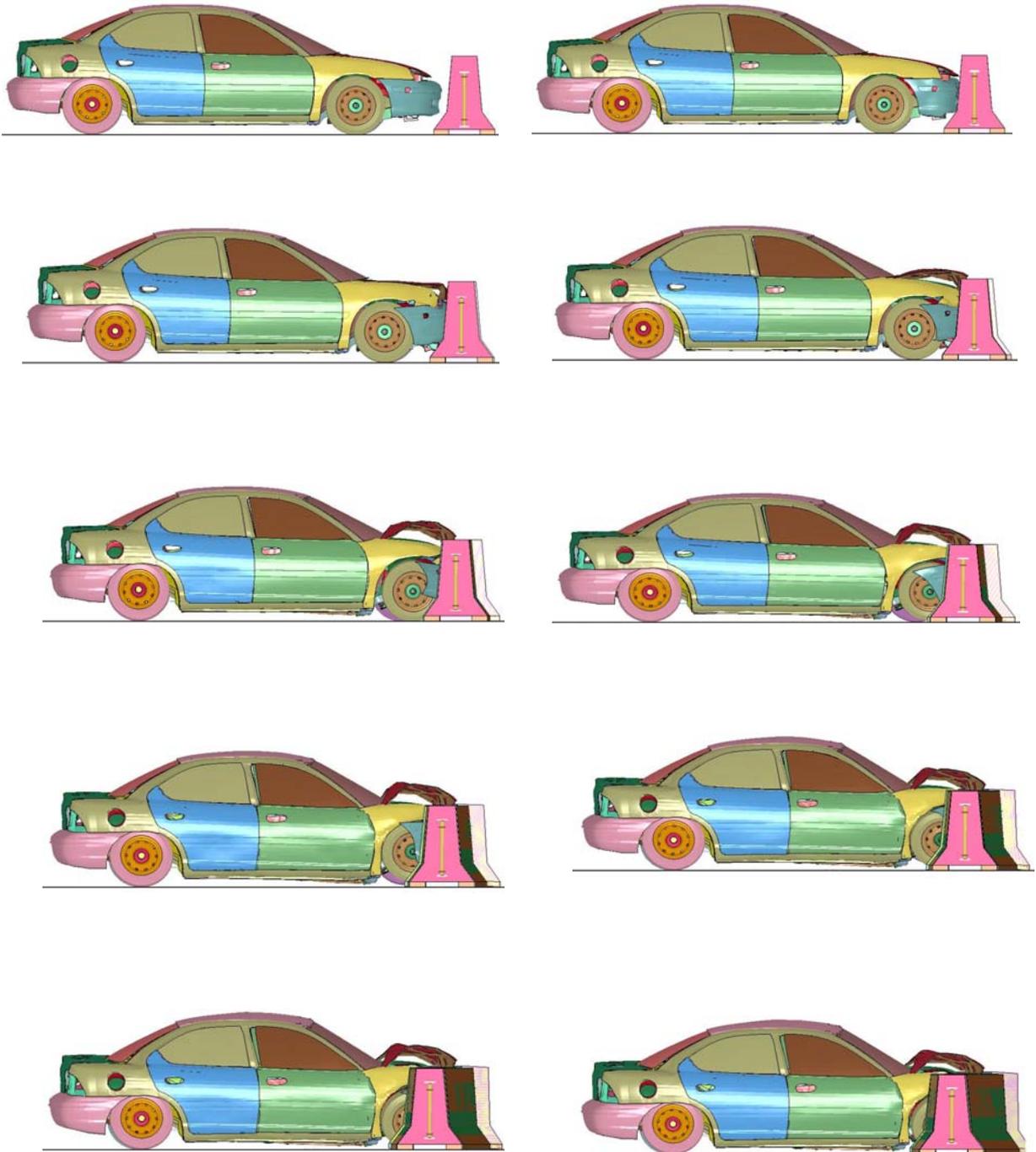


Figura 7-6: Secuencia de imágenes, caso B.



La secuencia de imágenes obtenida en este caso (véase figura 7-6) tiene una diferencia de 10 milisegundos entre una imagen y la siguiente. Los instantes de tiempo representados son 160 ms, 170 ms (momento en el que el vehículo impacta contra la barrera), 180 ms, 190 ms, 200 ms, 210 ms, 220 ms, 230 ms, 240 ms y 250 ms los cuales se muestran en orden cronológico de izquierda a derecha y de arriba abajo.

A continuación se detallan los resultados obtenidos de la simulación y se procede al cálculo del parámetro ASI.

Con la ayuda de un acelerómetro que se ha colocado en el centro de gravedad del vehículo se recogen los valores de las distintas variables cinemáticas en este punto a lo largo de toda la simulación. Estos valores están referenciados en un sistema de coordenadas local del vehículo que coincide con el sistema de coordenadas global del modelo. Las unidades en las que se expresan son las que se definieron al principio del análisis.

De esta manera, y gracias también a la capacidad de Ls-Prepost para visualizar y editar gráficas fácilmente, se han obtenido las siguientes gráficas (ver figura 7-7 y figura 7-8) relativas a la velocidad y a la aceleración del vehículo en la dirección de la marcha (x)

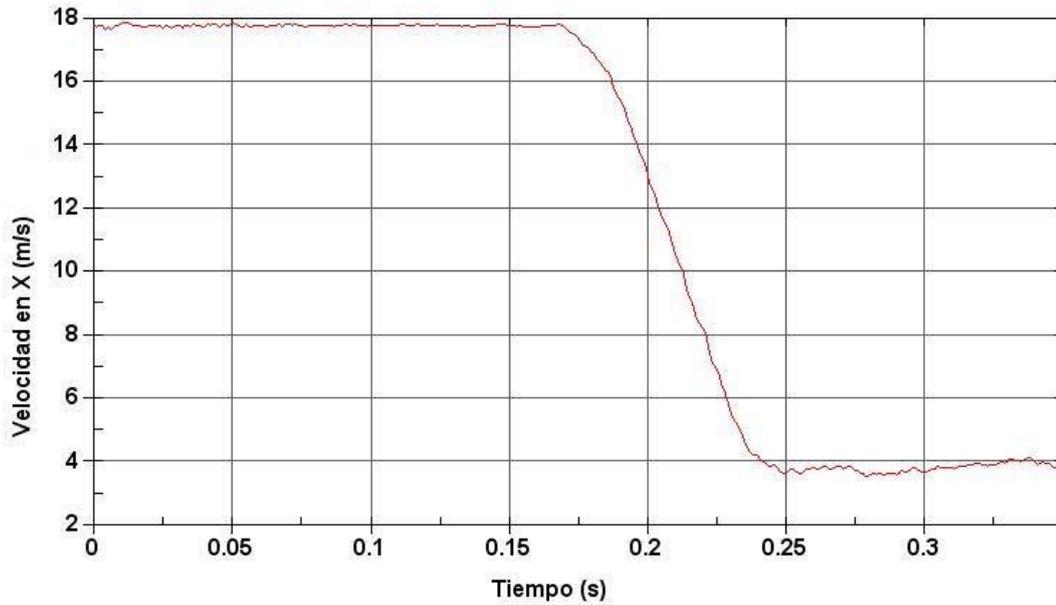


Figura 7-7: Gráfica de velocidad en dirección x.

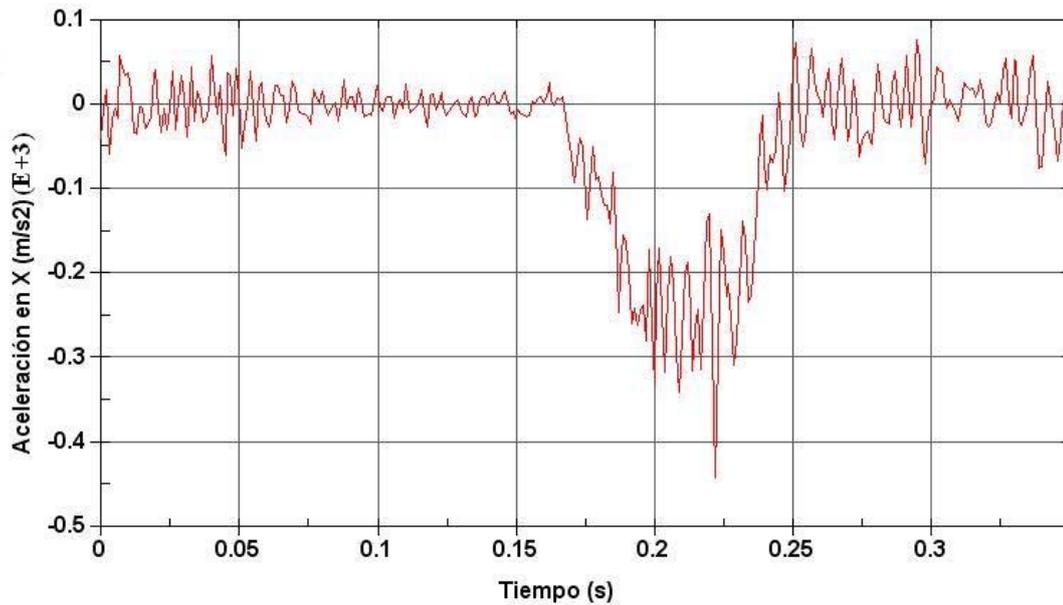


Figura 7-8: Gráfica de aceleración en dirección x.



A partir de los resultados computacionales recogidos en las gráficas anteriores se puede observar como, en el instante en el que se produce el impacto contra la barrera ($t=170$ ms), el vehículo sufre una brusca deceleración que alcanza su valor máximo en $t=220$ ms aproximadamente. En la gráfica de velocidad se aprecia como el vehículo reduce su velocidad inicial pero no llega a detenerse por completo debido a que la simulación termina antes de que este hecho se produzca.

Para el cálculo del ASI se ha tomado un intervalo de tiempo $\delta=50$ ms tal y como indica la norma europea EN 1317. Este intervalo va desde que el vehículo colisiona con la barrera en $t_1=170$ ms, hasta el instante de tiempo $t_2=220$ ms. Por tanto, en él están comprendidos los picos de deceleración que son los que interesan a la hora de calcular la severidad del impacto.

Para calcular la aceleración en ese intervalo se ha utilizado la tabla de valores que proporciona Ls-Prepost a partir de la gráfica de velocidad de la figura 7-7. Como en el caso anterior, al tratarse del análisis de una colisión totalmente frontal, se asume que las aceleraciones en dirección lateral y vertical son insignificantes. Por tanto, utilizando la ecuación del M.R.U.A $V_o = V_f + a \cdot t$, la aceleración en dirección x es:

$$\bar{a}_x = \frac{V_{t1} - V_{t2}}{0,05s} = \frac{(17,798 - 8,5038)m/s}{0,05s} = 185,88 \frac{m}{s^2} = 18,95g$$

Con este valor se calcula el ASI o índice de severidad del impacto a partir de la ecuación definida en el capítulo 6:



$$ASI = \left[\left(\frac{\bar{a}_x}{\hat{a}_x} \right)^2 + \left(\frac{\bar{a}_y}{\hat{a}_y} \right)^2 + \left(\frac{\bar{a}_z}{\hat{a}_z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{18,95 g}{12 g} = 1,58$$

Este valor supera el máximo permitido por la norma EN 1317. Como el $ASI > 1,4$ el impacto puede ser clasificado en función de su gravedad como un choque de clase C, para el cual la norma considera que los ocupantes están expuestos a sufrir lesiones de gravedad pudiendo incluso peligrar su vida. De este modo, esta barrera de seguridad vial deberá ser modificada puesto que no cumple con los requisitos mínimos definidos en la norma sobre sistemas de contención de vehículos.

7.3 CASO C: CHOQUE FRONTAL DEL VEHÍCULO CONTRA EL PRETIL MIXTO

En este caso se ha simulado un choque frontal del vehículo a 64 km/h contra una barrera mixta de hormigón con baranda metálica. El intervalo de tiempo adoptado para el análisis es de 350 ms, registrándose los resultados requeridos a la salida cada 10 ms. El tiempo de paso o *time step* para el análisis dinámico se ha fijado en 1,4 μ s y la simulación se ha llevado a cabo haciendo uso del código Ls-Dyna versión 970. El tiempo de cálculo computacional empleado para ejecutar este modelo ha sido de aproximadamente 34 horas, utilizándose para ello un PENTIUM 4 con un procesador Intel de 2000 Mhz y 2Gb de memoria RAM.

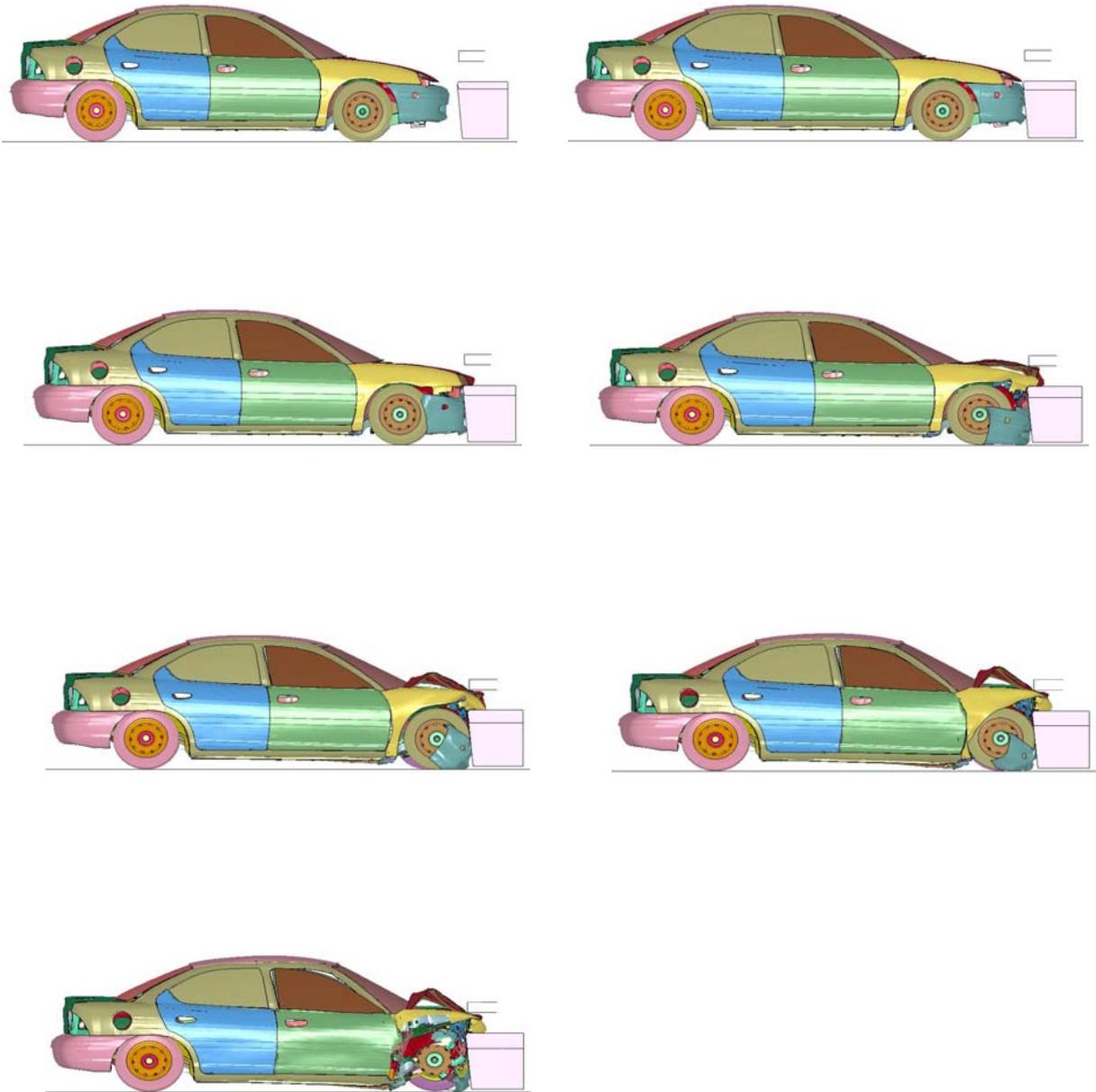


Figura 7-9: Secuencia de imágenes, caso C.



La secuencia de imágenes obtenida en este caso (véase figura 7-9) tiene una diferencia de 10 milisegundos entre una imagen y la siguiente. Los instantes de tiempo representados con el fin de mostrar la secuencia real del proceso son 120 ms, 130 ms (momento en el que el vehículo impacta contra la barrera), 140 ms, 150 ms, 160 ms, 170 ms y 180 ms los cuales aparecen en orden cronológico de izquierda a derecha y de arriba abajo. Hay que indicar que, a pesar de que el tiempo total definido para realizar la simulación es de 350 ms, el propio programa Ls-Dyna interrumpe su ejecución en el instante $t=180$ ms como consecuencia de las grandes deformaciones que se alcanzan en el vehículo que hacen que se rompan las soldaduras de unión entre las distintas partes. Por tanto, antes incluso de calcular la severidad del impacto, este hecho da una idea de la brutalidad del impacto y de la mala absorción de energía por parte de la barrera.

A continuación se detallan los resultados obtenidos y se procede al cálculo del parámetro ASI.

Como en los dos casos anteriores, el acelerómetro que se ha colocado en el centro de gravedad del vehículo es el que registra los valores de las distintas variables cinemáticas a lo largo de toda la simulación. Estos valores se expresan en un sistema de coordenadas local del vehículo que coincide con el sistema de coordenadas global del modelo. Las unidades en las que se expresan son las que se definieron al principio del análisis. Se han obtenido las siguientes gráficas (ver figura 7-10 y figura 7-11) relativas a la velocidad y a la aceleración del vehículo en la dirección de la marcha.

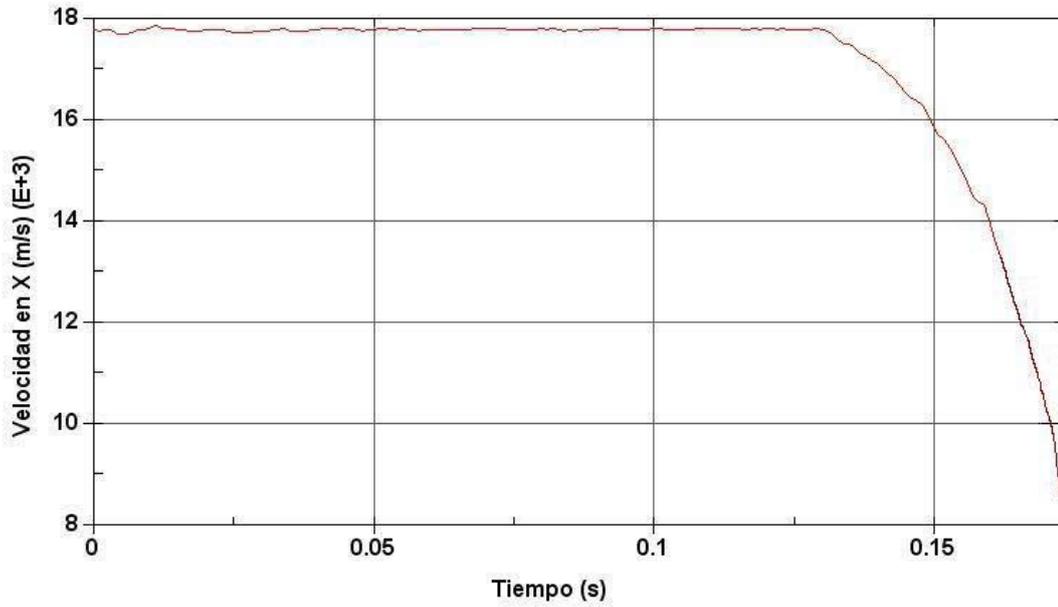


Figura 7-10: Gráfica de velocidad en dirección x.

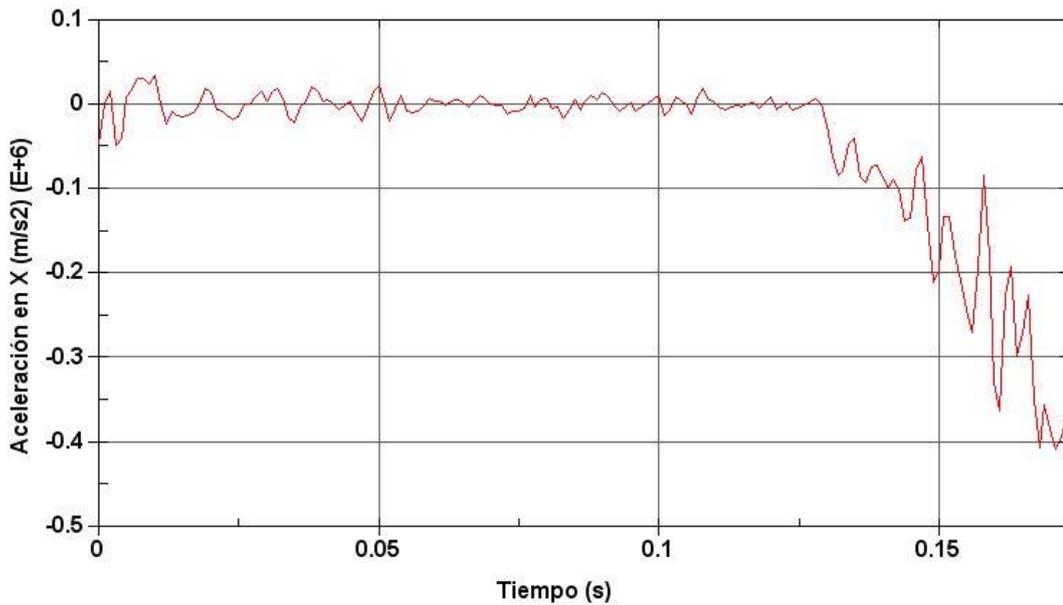


Figura 7-11: Gráfica de aceleración en dirección x.



A partir de los resultados computacionales recogidos en las gráficas anteriores se puede apreciar como en el instante en el que se produce el impacto contra la barrea ($t=130$ ms) el vehículo experimenta una deceleración brusca que alcanza su valor máximo en $t=170$ ms donde se llega a registrar una deceleración de 40 g's aproximadamente.

Para el cálculo de ASI se ha tomado un intervalo de tiempo de 50 ms tal como indica la norma europea EN 1317. Este intervalo va desde que el vehículo colisiona con la barrera en $t_1=130$ ms, hasta el instante de tiempo $t_2=180$ ms que es justo donde se interrumpe la simulación. Por tanto, en él están comprendidos los valores extremos de deceleración que son los que nos interesan para calcular la severidad del impacto.

Para calcular una aceleración media en ese período de tiempo se ha utilizado la tabla de valores que proporciona Ls-Prepost a partir de la gráfica de velocidad de la figura 7-10. Al tratarse del análisis de una colisión totalmente frontal se asume que las aceleraciones en dirección lateral y vertical son insignificantes. Por tanto, empleando la ecuación del M.R.U.A $V_o = V_f + a \cdot t$, la aceleración en dirección x es:

$$\bar{a}_x = \frac{V_{t1} - V_{t2}}{0,05s} = \frac{(17,790 - 8,233)m/s}{0,05s} = 191,14 \frac{m}{s^2} = 19,48g$$

Con este valor se calcula el ASI o índice de severidad del impacto a partir de la ecuación definida en el capítulo anterior:



$$ASI = \left[\left(\frac{\bar{a}_x}{\hat{a}_x} \right)^2 + \left(\frac{\bar{a}_y}{\hat{a}_y} \right)^2 + \left(\frac{\bar{a}_z}{\hat{a}_z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{19,48 g}{12 g} = 1,62$$

Este valor supera el máximo permitido por la norma EN 1317. Como el $ASI > 1,4$ el impacto puede ser clasificado en función de su gravedad como un choque de clase C, para el cual la norma considera que los ocupantes están expuestos a sufrir lesiones de gravedad pudiendo incluso peligrar su vida. De este modo, esta barrera de seguridad vial deberá ser modificada puesto que no cumple con los requisitos mínimos definidos en la norma sobre sistemas de contención de vehículos.

7.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez obtenidos los resultados de cada caso se procede a compararlos en este apartado y a profundizar un poco más en su análisis.

Como se ha podido observar en los apartados anteriores, el ASI o índice de severidad del impacto varía considerablemente en función del tipo de barrera de protección utilizada, siendo el modelo de vehículo el mismo en todos los casos así como los parámetros de contacto entre los distintos elementos. En la tabla 7-1 se muestra un resumen del resultado obtenido para cada caso.



Tipo de barrea	ASI
Barrera metálica	0,88
Barrera de hormigón	1,58
Pretil mixto	1,62

Tabla 7-1: Resumen de los resultados.

A partir de estos resultados se puede concluir que la barrera metálica construida mayoritariamente de acero es un dispositivo que ofrece una seguridad mucho más elevada que la de los otros dos sistemas de retención. La principal razón de este comportamiento está en las grandísimas propiedades que tiene el acero que, al mismo tiempo que proporciona un nivel de rigidez adecuado para garantizar su integridad ante una colisión, tiene una gran capacidad para absorber energía a través de su deformación. Cuando un vehículo choca contra ella, esto se traduce en una mayor disipación de la energía de la colisión por parte de la barrera evitando así que la mayor parte de la energía se transmita al vehículo. De esta forma, los picos de deceleración disminuyen y, en consecuencia, el riesgo de daño para los ocupantes es mucho menor.

Por el contrario, tanto la barrera de hormigón como el pretil mixto ensayados no cumplen con los requisitos mínimos de seguridad exigidos por la norma. Estos dispositivos disponen de una capacidad de absorción de energía tremendamente limitada y ponen peligro la vida de los usuarios de



las vías en las que se encuentran. Se trata de sistemas de alta contención (evitan ser superados o traspasados por el vehículo) y alta redireccionabilidad (redireccionan el vehículo de forma muy contundente). Es por ello que la propia norma recomienda su uso tan solo en tramos donde el daño a evitar en caso de salida de la vía del vehículo siniestrado, sea muy superior a los daños que la propia barrera puede causar en los ocupantes.



8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este proyecto ha supuesto un paso más en el tratamiento de problemas de impacto de los que ya se venían haciendo estudios en el departamento de mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid. Mencionar el proyecto titulado “Estudio del efecto del cinturón de seguridad y del airbag en el ocupante de un vehículo en caso de colisión” cuyo autor Manuel Moriche Guerrero, partiendo de modelos más simplificados, puedo extraer conclusiones importantes relacionadas con estos sistemas de seguridad pasiva.

En este caso, se ha buscado desarrollar un modelo de mayor complejidad computacional empleando un vehículo con todas sus partes modeladas acompañado de una barrera de seguridad implementada con



bastante detalle. Ambos modelos han sido proporcionados por la NCAC en lo cuales esta organización ha invertido mucho tiempo y recursos. A partir de aquí, la principal dificultad del proyecto ha estado en definir las condiciones de contorno (velocidad del vehículo, contactos entre las partes) que rodean a este tipo de problemas y que, debido a la complejidad tanto de Ls-Dyna como de Ls-Prepost no ha sido tarea fácil. Sin embargo, esto no ha impedido que el choque frontal esté representado con gran fidelidad y que los resultados obtenidos sean significativos de lo que sucede en una situación real.

De la realización de este proyecto se extraen principalmente dos conclusiones, por un lado el gran potencial que ofrecen Ls-Dyna y Ls-Prepost para simular pruebas de choque y, por otro lado, la importancia del diseño y, sobre todo, de los materiales empleados en la fabricación de las barreras de seguridad vial.

A partir de este proyecto es posible realizar multitud de trabajos futuros. Se puede llevar a cabo una mejora del contacto empleado para simular el choque del vehículo contra la barrera mediante la realización de ensayos para establecer el valor de parámetros como los coeficientes de rozamiento estático y dinámico que caracterizan el contacto entre superficies.

Otra posibilidad sería modificar las propiedades de los materiales de algunas partes del vehículo con una incidencia notable en el resultado de la colisión como, por ejemplo, los largueros delanteros. Además, se pueden



ensayar distintos modelos de vehículo ya que la NCAC dispone en su página web de una gran variedad de modelos de diferentes tamaños que no sólo incluye turismos sino también furgonetas, autobuses y camiones.

En lo que se refiere a tipos de *crash-test* que en el capítulo 4 de este proyecto se mencionan, es interesante la realización de una prueba de impacto lateral contra un poste con el objetivo de valorar la seguridad que ofrece el vehículo a la hora de evitar la intrusión en el habitáculo de seguridad.

Se puede simular también el choque entre 2 vehículos y así valorar la agresividad de cada uno, entendiendo como tal la capacidad de un coche para proteger a los ocupantes del vehículo contrario. Esto se debe a que, en función de la masa, el tamaño y la rigidez estructural de ambos, las consecuencias de la colisión pueden ser muy diferentes en cada uno.

Para terminar, otro estudio interesante puede consistir en la implementación de un modelo compuesto por un vehículo y un *dummy* con el fin de evaluar la seguridad que ofrece el vehículo a lo peatones en caso de atropello.



9. REFERENCIAS

- 1 “Introduction to Auto Safety & Crash-testing” - www.safecarguide.com
(mayo, 2009)
- 2 “Simulación de ensayos de choque en vehículos: validación de un modelo de dummy en 2 dimensiones” Jaime Condés Novillo - Proyecto fin de carrera de la Universidad Carlos III de Madrid, julio 2005.
- 3 “Livermore Software Technology Corporation” - www.lstc.com
(junio, 2009)
- 4 “National Crash Analysis Center” – www.ncac.gwu.edu (junio, 2009)
- 5 “Elementos estructurales de un vehículo” Centro de Experimentación y Seguridad Vial MAPFRE – Editorial CESVIMAP, 2004.
- 6 “El habitáculo de seguridad” Instituto de investigación sobre reparación de vehículos – Editorial centro Zaragoza, 2ª Edición, 2003.



- 7 “Los crash test” Diego Rodríguez Prado y Javier López Álvarez - Información del CTAG (Centro Tecnológico de Automoción de Galicia), julio 2009.
- 8 “European New Car Assessment Programme, EuroNCAP” - www.euroncap.com (junio, 2009)
- 9 “El método de los elementos finitos: Las bases” O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor = Editorial CIMNE, 5 Edición, 2004.
- 10 “LS-DYNA Theory Manual” Recopilado por John O. Hallquist – Editado por Livermore Software Technology Corporation, Marzo 2006
- 11 “LS-DYNA Keyword User`s Manual, version 970” Livermore Software Technology Corporation, Abril 2003
- 12 “Normas UNE. Sistemas viales de contención” - www.carreteros.org
- 13 “Prefabricats metal. Productos” - www.copremesal.com
- 14 “Contact modeling in Ls-Dyna” - www.dynasupport.com
- 15 “Computational and experimental crash analysis of the road safety barrier” Z. Ren, M. Vesenjak – Editorial Elsevier, abril 2005.