

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

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



***MODELADO DE DIFERENTES TIPOS DE
CINTURONES DE SEGURIDAD Y ESTUDIO DE
SU EFECTO EN CASO DE COLISIÓN
FRONTAL MEDIANTE LS-DYNA***

PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica

Autor:

D. Jaime Martín Pérez

Tutora:

Dra. D^a. Beatriz López Boada

Septiembre 2010



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO.....	3
1.2 ESTRUCTURA DEL PROYECTO.....	3
2. SEGURIDAD EN VEHÍCULOS AUTOMÓVILES.....	5
2.1 SEGURIDAD ACTIVA.....	6
2.1.1 SISTEMA DE ALUMBRADO INTELIGENTE.....	6
2.1.2 SISTEMA DE SUSPENSIÓN AUTOMÁTICA.....	6
2.1.3 SISTEMA ANTIBLOQUEO DE FRENOS.....	7
2.1.4 REPARTO ELECTRÓNICO DE FRENADA.....	8
2.1.5 CONTROL DE TRACCIÓN.....	8
2.1.6 CONTROL DE ESTABILIDAD.....	8
2.1.7 BLOQUEO ELECTRÓNICO DEL DIFERENCIAL.....	9
2.2 SEGURIDAD PASIVA.....	9
2.2.1 HABITÁCULO DE SEGURIDAD.....	10
2.2.2 CINTURÓN DE SEGURIDAD.....	11
2.2.3 ZONAS DE ABSORCIÓN DE IMPACTO.....	12
2.2.4 AIRBAG.....	13
2.2.5 ASIENTOS.....	14



2.2.6 REPOSACABEZAS.....	14
3. EL CINTURÓN DE SEGURIDAD.....	16
3.1 HISTORIA DEL CINTURÓN DE SEGURIDAD.....	18
3.2 COMPONENTES DEL CINTURÓN DE SEGURIDAD.....	19
3.2.1 PRETENSOR.....	19
3.2.2 LIMITADOR DE TENSIÓN.....	20
3.3 TIPOS DE CINTURÓN DE SEGURIDAD.....	21
3.3.1 CINTURÓN DE DOS PUNTOS.....	21
3.3.2 CINTURÓN DE TRES PUNTOS.....	21
3.3.3 CINTURÓN DE CUATRO PUNTOS.....	22
3.3.4 CINTURÓN DE CINCO PUNTOS.....	23
3.3.5 DISPOSITIVO HANS Y DISPOSITIVO HUTCHENS.....	24
3.3.6 CINTURÓN EN X (3+2).....	24
3.4 IMPORTANCIA DEL CINTURÓN DE SEGURIDAD.....	25
4. ENSAYOS DE CHOQUE.....	28
4.1 HISTORIA: DESDE 1974 HASTA LA ACTUALIDAD.....	29
4.1.1 HISTORIA DEL DUMMY.....	31
4.2 ENTIDADES QUE REALIZAN LOS ENSAYOS DE CHOQUE.....	33
4.2.1 FABRICANTES.....	33
4.2.2 ORGANISMOS DE HOMOLOGACIÓN.....	33
4.2.3 ORGANISMOS NCAP.....	34



4.2.3.1 NHTSA.....	36
4.3 TIPOS DE PRUEBAS DE CHOQUE (IMPACTO FRONTAL).....	37
5. EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	41
5.1 PRINCIPIOS BÁSICOS Y APLICACIONES.....	43
5.2 LS-DYNA.....	44
6. MODELO EMPLEADO EN LA SIMULACIÓN.....	49
6.1 EL DUMMY.....	51
6.1.1 ACELERÓMETROS.....	52
6.1.2 SENSORES DE CARGA.....	53
6.1.3 SENSORES DE MOVIMIENTO.....	54
6.2 EL VEHÍCULO.....	54
6.2.1 GEOMETRÍA.....	54
6.2.2 MATERIALES.....	56
6.3 EL CINTURÓN DE SEGURIDAD.....	57
6.3.1 GEOMETRÍA.....	57
6.3.2 MATERIALES.....	61
6.4 AIRBAG.....	63
6.5 CONDICIONES DE CONTORNO.....	63
6.5.1 VELOCIDAD INICIAL.....	64
6.5.2 GRAVEDAD.....	64
6.5.3 ACELERACIÓN IMPUESTA.....	64



6.5.4 VEHÍCULO: CONEXIÓN Y DESPLAZAMIENTO.....	65
6.5.5 CONTACTO: ASIENTO.....	65
6.5.6 CONTACTO: CINTURÓN.....	66
7. CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LESIONES.....	67
7.1 DIRECTIVA 96/79/CE.....	68
7.1.1 REQUISITOS PARA SUPERAR LAS PRUEBAS DE CHOQUE FRONTAL.....	68
7.1.2 VELOCIDAD DEL ENSAYO.....	72
7.2 NHTSA.....	72
7.3 UMBRALES BIOMECÁNICOS DEL CUERPO HUMANO.....	72
8. RESULTADOS.....	74
8.1 CASO A: CHOQUE FRONTAL CON CINTURÓN DE SEGURIDAD DE DOS PUNTOS Y SIN AIRBAG.....	75
8.1.1 NORMA DE COMPORTAMIENTO DE LA CABEZA.....	77
8.1.2 ÍNDICE DE SEVERIDAD EN EL PECHO.....	77
8.1.3 NORMA DE COMPRESIÓN DE TÓRAX.....	78
8.1.4 ACELERACIÓN EN LA PELVIS.....	79
8.1.5 NORMA DE LESIÓN DE CUELLO.....	79
8.1.6 NORMA DE FUERZA DEL FÉMUR.....	80
8.2 CASO B: CHOQUE FRONTAL CON CINTURÓN DE SEGURIDAD DE TRES PUNTOS Y SIN AIRBAG.....	82
8.2.1 NORMA DE COMPORTAMIENTO DE LA CABEZA.....	84
8.2.2 ÍNDICE DE SEVERIDAD EN EL PECHO.....	84



8.2.3 NORMA DE COMPRESIÓN DE TÓRAX.....	85
8.2.4 ACELERACIÓN EN LA PELVIS.....	86
8.2.5 NORMA DE LESIÓN DE CUELLO.....	86
8.2.6 NORMA DE FUERZA DEL FÉMUR.....	87
8.3 CASO C: CHOQUE FRONTAL CON CINTURÓN DE SEGURIDAD DE CUATRO PUNTOS Y SIN AIRBAG.....	89
8.3.1 NORMA DE COMPORTAMIENTO DE LA CABEZA.....	91
8.3.2 ÍNDICE DE SEVERIDAD EN EL PECHO.....	91
8.3.3 NORMA DE COMPRESIÓN DE TÓRAX.....	92
8.3.4 ACELERACIÓN EN LA PELVIS.....	93
8.3.5 NORMA DE LESIÓN DE CUELLO.....	93
8.3.6 NORMA DE FUERZA DEL FÉMUR.....	94
8.4 CASO D: CHOQUE FRONTAL CON CINTURÓN DE SEGURIDAD DE TRES PUNTOS Y CON AIRBAG.....	96
8.4.1 NORMA DE COMPORTAMIENTO DE LA CABEZA.....	98
8.4.2 ÍNDICE DE SEVERIDAD EN EL PECHO.....	98
8.4.3 NORMA DE COMPRESIÓN DE TÓRAX.....	99
8.4.4 ACELERACIÓN EN LA PELVIS.....	100
8.4.5 NORMA DE LESIÓN DE CUELLO.....	101
8.4.6 NORMA DE FUERZA DEL FÉMUR.....	102
8.5 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	103
9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	108
9.1 CONCLUSIONES.....	109



9.2 TRABAJOS FUTUROS.....	109
10. REFERENCIAS.....	111



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Ensayo de choque frontal, real y simulado.....	2
Figura 2-1: Imagen de un habitáculo de seguridad.....	10
Figura 2-2: Esquema de un habitáculo de seguridad.....	11
Figura 2-3: Esquema de un cinturón de seguridad de tres puntos.....	12
Figura 2-4: Funcionamiento airbag frontal.....	13
Figura 2-5: Habitáculo de un vehículo con airbags.....	14
Figura 2-6: Reposacabezas inteligentes.....	15
Figura 3-1: Cinturón de seguridad.....	18
Figura 3-2: Carrete inercial.....	19
Figura 3-3: Pretensor pirotécnico.....	19
Figura 3-4: Pretensor pirotécnico y mecánico.....	20
Figura 3-5: Esquema de diferentes tipos de cinturones de seguridad.....	21
Figura 3-6: Hebilla de un cinturón de seguridad de tres puntos colgando de un pilar de un automóvil.....	22
Figura 3-7: Arnés de cuatro puntos sin montar.....	22
Figura 3-8: Imagen de un cinturón de cuatro puntos.....	23
Figura 3-9: Arnés de cinco puntos.....	23
Figura 3-10: Dispositivo HANS.....	24
Figura 3-11: Imagen del cinturón en X (3+2).....	24
Figura 3-12: Imagen del cinturón 3+2 y de una prueba de vuelco con un cinturón 3+2 y otro con un cinturón de tres puntos convencional.....	25



Figura 3-13: Diagramas que muestran la efectividad del cinturón de seguridad.....	26
Figura 4-1: Estado del vehículo después de la colisión.....	29
Figura 4-2: Tipos de pruebas de impacto.....	34
Figura 4-3: Crash Test frontal.....	38
Figura 4-4: Crash Test con sus aparatos de medida.....	39
Figura 4-5: Imagen por ordenador similar al modelo simulado.....	40
Figura 5-1: Ejemplo de simulación con LS-DYNA.....	46
Figura 5-2: Ejemplo del entorno de LS-PrePost.....	47
Figura 5-3: Ejemplo de choque simulado con LS-DYNA.....	47
Figura 5-4: Pliegue de chapa simulado con LS-DYNA.....	48
Figura 5-5: Gráfica de fuerza frente a tiempo de LS-PrePost.....	48
Figura 6-1: Sistema de coordenadas del modelo de simulación.....	50
Figura 6-2: Dummy híbrido tipo III, real y modelo.....	51
Figura 6-3: Vista general de los acelerómetros.....	52
Figura 6-4: Acelerómetro de la cabeza.....	53
Figura 6-5: Vista general del vehículo.....	55
Figura 6-6: Asiento y anclajes acotados.....	55
Figura 6-7: Vista general del vehículo, caso D.....	56
Figura 6-8: Modelo del cinturón de seguridad de dos puntos.....	58
Figura 6-9: Modelo del cinturón de seguridad de tres puntos.....	58
Figura 6-10: Modelo del cinturón de seguridad de cuatro puntos.....	58



Figura 6-11: Modelo del cinturón de seguridad de tres puntos y airbag.....	59
Figura 6-12: Cinturón de seguridad de dos puntos acotado.....	59
Figura 6-13: Cinturón de seguridad de tres puntos acotado.....	60
Figura 6-14: Cinturón de seguridad de cuatro puntos acotado.....	61
Figura 6-15: Función de carga del cinturón de seguridad.....	62
Figura 6-16: Función de descarga del cinturón de seguridad.....	62
Figura 6-17: Función de aceleración impuesta.....	65
Figura 6-18: Función de fuerza frente a distancia.....	66
Figura 7-1: Norma de referencia para la tracción del cuello.....	69
Figura 7-2: Norma de referencia para la cisión del cuello.....	70
Figura 7-3: Norma de referencia para la fuerza del fémur.....	71
Figura 8-1: Vista general, caso A.....	75
Figura 8-2: HIC-36, caso A.....	77
Figura 8-3: CSI, caso A.....	78
Figura 8-4: Compresión del tórax, caso A.....	78
Figura 8-5: Aceleración en la pelvis, caso A.....	79
Figura 8-6: Cisión en el cuello, caso A.....	80
Figura 8-7: Tracción en el cuello, caso A.....	80
Figura 8-8: Esfuerzo en el fémur derecho, caso A.....	81
Figura 8-9: Esfuerzo en el fémur izquierdo, caso A.....	81
Figura 8-10: Vista general, caso B.....	82
Figura 8-11: HIC-36, caso B.....	84



Figura 8-12: CSI, caso B.....	85
Figura 8-13: Compresión del tórax, caso B.....	85
Figura 8-14: Aceleración en la pelvis, caso B.....	86
Figura 8-15: Cisión en el cuello, caso B.....	87
Figura 8-16: Tracción en el cuello, caso B.....	87
Figura 8-17: Esfuerzo en el fémur derecho, caso B.....	88
Figura 8-18: Esfuerzo en el fémur izquierdo, caso B.....	88
Figura 8-19: Vista general, caso C.....	89
Figura 8-20: HIC-36, caso C.....	91
Figura 8-21: CSI, caso C.....	92
Figura 8-22: Compresión del tórax, caso C.....	92
Figura 8-23: Aceleración en la pelvis, caso C.....	93
Figura 8-24: Cisión en el cuello, caso C.....	94
Figura 8-25: Tracción en el cuello, caso C.....	94
Figura 8-26: Esfuerzo en el fémur derecho, caso C.....	95
Figura 8-27: Esfuerzo en el fémur izquierdo, caso C.....	95
Figura 8-28: Vista general, caso D.....	96
Figura 8-29: HIC-36, caso D.....	98
Figura 8-30: CSI, caso D.....	99
Figura 8-31: Compresión del tórax, caso D.....	99
Figura 8-32: Aceleración en la pelvis, caso D.....	100



Figura 8-33: Cisión en el cuello, caso D.....	101
Figura 8-34: Tracción en el cuello caso D.....	101
Figura 8-35: Esfuerzos en el fémur derecho, caso D.....	102
Figura 8-36: Esfuerzos en el fémur izquierdo, caso D.....	102



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Eficacia del cinturón de seguridad.....	27
Tabla 3-2: Nivel de protección del cinturón de seguridad.....	27
Tabla 5-1: Consolidación del Método de los Elementos Finitos.....	42
Tabla 5-2: Uso del Método de los Elementos Finitos.....	44
Tabla 6-1: Unidades del modelo de simulación.....	51
Tabla 6-2: Tabla de materiales.....	57
Tabla 6-3: Parámetros del material del cinturón de seguridad.....	63
Tabla 7-1: Umbrales biomecánicos del cuerpo humano.....	73
Tabla 8-1: Secuencia de imágenes, caso A.....	76
Tabla 8-2: Secuencia de imágenes, caso B.....	83
Tabla 8-3: Secuencia de imágenes, caso C.....	90
Tabla 8-4: Secuencia de imágenes, caso D.....	97
Tabla 8-5: Tabla de resultados.....	105
Tabla 8-6: Tabla de mejora.....	106



1 INTRODUCCIÓN

Todos los años, más de 1,2 millones de personas mueren como consecuencia de accidentes en las vías de circulación y otros 50 millones sufren traumatismos [1].

El cinturón de seguridad es un elemento de seguridad pasiva de uso obligatorio en cualquier automóvil; por eso su presencia se ha hecho común, hasta el punto de que tal vez no se valore lo suficiente lo importante que es su uso. Se estima que en caso de impacto el cinturón de seguridad puede reducir el riesgo de muerte para los ocupantes de los asientos delanteros en un 40%-50% y puede disminuir el número de muertes entre los ocupantes de los asientos traseros entre un 25% y un 75% [2].

En este proyecto se estudia el efecto del cinturón de seguridad en caso de una colisión frontal, mediante un programa informático. El avance de las tecnologías informáticas, tanto de software como de hardware, permite el estudio cada vez más preciso de situaciones reales mediante herramientas de simulación. El correcto uso de las herramientas disponibles permite predecir los resultados de un acontecimiento real. Las consecuencias de este avance tecnológico son evidentes: una gran capacidad de adelantarse a situaciones no

deseables y una gran reducción en costes de pruebas y ensayos. Hay que insistir en el uso correcto de estas aplicaciones, ya que no hay que olvidarse de que no dejan de ser herramientas de simulación cuyos resultados deben confirmarse mediante pruebas y ensayos. El correcto uso de las herramientas depende del trabajo que realice el técnico responsable. Hay que insistir en que por muy desarrollada que esté la herramienta y mucha experiencia que tenga el técnico, son necesarias pruebas y ensayos que confirmen los resultados obtenidos en la simulación. El método de los elementos finitos es hoy en día el procedimiento más potente para el análisis de estructuras de carácter uni, bi o tridimensional sometidas a las acciones exteriores más diversas. La característica más atractiva, y quizás también la más peligrosa, es que es un método aproximado. El método de los elementos finitos puede aportar información muy útil sobre el comportamiento de estructuras complejas para las cuales no existen soluciones analíticas disponibles, pero, si no se tiene la suficiente experiencia previa en su utilización, su carácter aproximado le confiere cierto riesgo [3].

En este proyecto se simula un choque frontal de un conductor que se encuentra en un vehículo automóvil con un programa 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 Livermore Software Technology Corporation [4]. LS-DYNA y LS-PrePost tienen gran especialización en el sector automovilístico, más en concreto, en términos de seguridad ante situaciones de impacto. LS-PrePost como pre-procesador tiene aplicaciones específicas para la implementación de airbags y cinturones de seguridad y como post-procesador permite la cómoda y rápida visualización de resultados, pudiendo obtener directamente parámetros específicos de la evaluación de daños en ocupantes de vehículos, como por ejemplo, la norma de comportamiento de la cabeza, que en capítulos posteriores se explica en qué consiste. La figura 1-1 muestra una imagen de un ensayo de choque frontal de un vehículo real y de uno realizado con LS-DYNA, perteneciente a este proyecto.

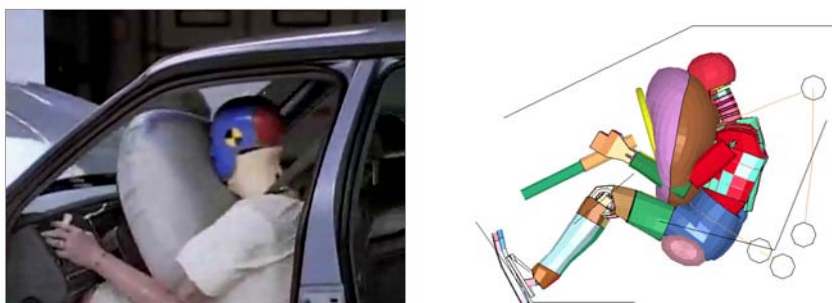


Figura 1-1: Ensayo de choque frontal, real y simulado



1.1 OBJETIVO

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar, a partir de un modelo de simulación de choque frontal formado por un conductor y un asiento, varios casos con diferentes tipos de cinturones de seguridad, mediante el procesador de elementos finitos LS-DYNA. También es objetivo de este proyecto demostrar la diferencia de efectividad de diferentes tipos de cinturones de seguridad, dependiendo de su anclaje en dos, tres o cuatro puntos. Por último, se evalúa el aumento de efectividad combinando el cinturón de seguridad de tres puntos con el airbag. Todos los resultados se obtienen con la aplicación de LS-DYNA, LS-PrePost.

Debido a la complejidad de LS-DYNA y LS-PrePost el modelo de simulación que se desarrolla en este proyecto es sencillo, en el cuál se pretende representar las características más generales del suceso. LS-DYNA tiene en cuenta una gran cantidad de fenómenos para las simulaciones: comportamiento no lineal, algoritmos de contacto, fricción, transferencia de calor entre partes, y un largo etc....

No es objeto de este proyecto entrar en detalle de ninguno de los procesos que participan en la simulación, como por ejemplo, el llenado del airbag. Los valores asignados a los distintos parámetros que participan en los distintos procesos son valores típicos que se han encontrado en la literatura consultada. Sí es objeto de este proyecto modificar arbitrariamente alguno de estos parámetros para ver su repercusión en los resultados, por lo que se estudian tres casos distintos a partir del mismo modelo de simulación, y un modelo de simulación más complejo para la combinación del cinturón de seguridad más el airbag.

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, SEGURIDAD EN VEHÍCULOS AUTOMÓVILES y EL CINTURÓN DE SEGURIDAD, se hace un planteamiento del estado del arte y una introducción a los sistemas de seguridad de los vehículos automóviles. En estos capítulos se muestran conceptos generales



sobre la seguridad vial. En el capítulo segundo se clasifican los elementos de seguridad como elementos de seguridad activa o pasiva, mientras que el capítulo tercero se centra en uno de los últimos, el cinturón de seguridad, dado que es el objeto de estudio en este proyecto.

En el capítulo cuarto, ENSAYOS DE COLISIÓN, se describe la importancia vital que tiene hoy en día la realización de ensayos en los que probar los vehículos y diferentes tipos de elementos de seguridad, tanto activa como pasiva, que se transmite en la existencia de vehículos cada vez más seguros, tanto para pasajeros como para peatones. Se habla de los diferentes organismos que realizan dichas pruebas, y se entra en detalle en la prueba de impacto frontal, ya que en este proyecto se simula dicho impacto.

En el capítulo quinto, 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.

En el capítulo sexto, MODELO EMPLEADO EN LA SIMULACIÓN, se muestra las características geométricas y físicas de las distintas partes que forman el modelo de simulación, así como las simplificaciones llevadas a cabo y las condiciones de contorno.

En el capítulo séptimo, CRITERIO DE EVALUACIÓN DE LESIONES, se introducen los criterios que luego se utilizan en los resultados, como la Directiva 96/79/CE, vigente en la Unión Europea, y los usados por la NHTSA, vigente en EEUU. Se realiza una descripción de la norma que rige este tipo de simulaciones reales, entrando en los parámetros que hay que cumplir para superar las pruebas de choque y que van a ser objeto de estudio en este proyecto, y por último se muestra una tabla con los umbrales biomecánicos del cuerpo humano, para comprobar los límites a los que puede ser sometido el cuerpo antes de sufrir daños y lesiones.

En el capítulo octavo, RESULTADOS, se explican los cuatro casos a estudiar, las simplificaciones llevadas a cabo, y los resultados obtenidos en cada uno de los casos haciendo una valoración de los mismos.

En el capítulo noveno, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS, se exponen las conclusiones extraídas a partir de los resultados de la simulación y se proponen posibles estudios que tengan como punto de partida el modelo de simulación desarrollado en este proyecto.



2 SEGURIDAD EN **VEHÍCULOS** **AUTOMÓVILES**

La cantidad de víctimas mortales debidas a los accidentes de tráfico hace que cada día se dé más importancia a los sistemas de seguridad de los vehículos automóviles. Todas estas medidas de seguridad intentan evitar los accidentes o minimizar sus daños, pero nunca se debe olvidar que tan importantes como el desarrollo de estos sistemas de seguridad, son la educación al volante y las campañas de concienciación.

Debido a la importancia de la seguridad vial existen instituciones dedicadas exclusivamente a este campo, por ejemplo, el Insurance Institute for Highway Safety [5]. Sus investigadores se dedican a crear protocolos de ensayos que verifican el correcto funcionamiento de los sistemas de seguridad, hacen pruebas de choques frontales, laterales, elementos de seguridad aislados, etc.... publicando posteriormente una relación de los vehículos ensayados ordenados en función de los resultados obtenidos.



Para mejorar la seguridad del automóvil, cada día se introducen más elementos con ese único objetivo. Los elementos de seguridad de un vehículo se clasifican en elementos de seguridad activa o pasiva. Los elementos de seguridad activa son aquellos que intentan evitar un accidente y los de seguridad pasiva son aquellos que pretenden minimizar los daños de los ocupantes una vez que el accidente ya ha sucedido [6] [7].

2.1 SEGURIDAD ACTIVA

La seguridad activa hace referencia al conjunto de mecanismos o dispositivos destinados a disminuir el riesgo de que se produzca un accidente. Entre ellos se encuentran el sistema de alumbrado inteligente, el sistema de suspensión automática, el sistema antibloqueo de frenos (ABS), el reparto electrónico de frenada, el control de tracción, el control de estabilidad y el bloqueo electrónico del diferencial. Son unidades de control que actúan en base a continua recogida de datos por sensores. A continuación, se describen algunos de ellos.

2.1.1 SISTEMA DE ALUMBRADO INTELIGENTE

La función del sistema de alumbrado es sencilla, facilitar la visión del conductor así como el ser visto por otros conductores o peatones. En la actualidad existen sistemas de alumbrado inteligente para mejorar dicha función sin la intervención del conductor.

Algunos fabricantes incorporan a sus modelos un sistema de luces de cruce autoadaptables, el cual dirige el haz de luz para iluminar las curvas en su totalidad desde el inicio del viraje, en función del giro del volante, lo que incrementa notablemente la seguridad. Otras funciones de sistemas inteligentes de alumbrado, son las luces que se encienden automáticamente cuando disminuye la luz ambiental (túnel, garaje, atardecer...), o regulan su altura para evitar deslumbramientos [12].

2.1.2 SISTEMA DE SUSPENSIÓN AUTOMÁTICA

El sistema de suspensión de un automóvil funciona disminuyendo la transmisión de irregularidades del terreno al habitáculo y favoreciendo el agarre del coche al suelo y, por tanto, su estabilidad.

Los diferentes fabricantes han desarrollado múltiples sistemas electrónicos que regulan el sistema de suspensión automáticamente y que cumplen el mismo cometido de mejorar la seguridad activa del vehículo. Algunos sistemas son el ABC (Control Activo de la Carrocería), el ADS (Sistema de Suspensión Adaptativa), el ECS (Suspensión Controlada



Electrónicamente) y el EDC (Control Electrónico de la Suspensión), cuyas funciones se pueden resumir en:

- Compensar las oscilaciones de la carrocería en salidas, frenadas y trazado de curvas.
- Adaptar la dureza de la suspensión de forma automática, en función del tipo de conducción, del tipo de terreno y de la carga del vehículo.
- Nivelar la altura de la carrocería.

2.1.3 SISTEMA DE ANTIBLOQUEO DE FRENOS

El ABS (sistema de antibloqueo) es un dispositivo utilizado en aviones y en automóviles, para evitar que los neumáticos pierdan la adherencia con el suelo durante un proceso de frenado.

El sistema fue desarrollado inicialmente para los aviones, los cuales acostumbran a tener que frenar fuertemente una vez han tomado tierra.

El ABS funciona en conjunto con el sistema de frenado tradicional. Consiste en una bomba que se incorpora a los circuitos del líquido de freno y en unos detectores que controlan las revoluciones de las ruedas. Si en una frenada brusca una o varias ruedas reducen repentinamente sus revoluciones, el ABS lo detecta e interpreta que las ruedas están a punto de quedar bloqueadas sin que el vehículo se haya detenido. Esto quiere decir que el vehículo comenzará a patinar, y por lo tanto, a deslizarse sobre el suelo sin control. Para que esto no ocurra, los sensores envían una señal a la central del sistema ABS, que reduce la presión realizada sobre los frenos, sin que intervenga en ello el conductor. Cuando la situación se ha normalizado y las ruedas giran de nuevo correctamente, el sistema permite que la presión sobre los frenos vuelva a actuar con toda la intensidad. El ABS controla nuevamente el giro de las ruedas y actúa otra vez si éstas están a punto de bloquearse por la fuerza del freno. En el caso de que este sistema intervenga, el procedimiento se repite de forma muy rápida, unas 50 a 100 veces por segundo, lo que se traduce en que el conductor percibe una vibración en el pedal del freno.

Permite que el conductor siga teniendo el control sobre la trayectoria del vehículo, con la consiguiente posibilidad de poder esquivar el obstáculo causante de la situación de riesgo. Con este sistema, la disminución de la longitud necesaria para el frenado es considerable.



2.1.4 REPARTO ELECTRÓNICO DE FRENADA

Es un sistema electrónico que determina cuánta fuerza aplicar a cada rueda para detener al vehículo en un distancia mínima y sin que se des controle.

El sistema calcula si el reparto es adecuado a partir de los mismos sensores que el ABS. Ambos sistemas en conjunto actúan mejor que el ABS en solitario, ya que éste último regula la fuerza de frenado de cada rueda según si ésta se está bloqueando, mientras que el reparto electrónico reparte la fuerza de frenado entre los ejes, ayudando a que el freno de una rueda no se sobrecargue (esté continuamente bloqueando y desbloqueando) y el de otra quede infrutilizado [8].

2.1.5 CONTROL DE TRACCIÓN

Es un sistema de seguridad automovilística diseñado para prevenir la pérdida de adherencia cuando el conductor se excede en la aceleración del vehículo o cuando realiza un cambio brusco en la dirección. En general se trata de sistemas electrohidráulicos.

Funciona de tal manera que, mediante el uso de los mismos sensores y accionamientos que emplea el sistema antibloqueo de frenos, se controla si en la aceleración una de las ruedas del eje motriz del automóvil patina y en tal caso, el sistema actúa con el fin de reducir el par de giro y así recuperar la adherencia entre neumático y firme, realizando una (o más de una a la vez) de las siguientes acciones:

- Retardar o suprimir la chispa a uno o más cilindros.
- Reducir la inyección de combustible a uno o más cilindros.

2.1.6 CONTROL DE ESTABILIDAD

El control de estabilidad (ESP) es el que en caso de pérdida de control del vehículo lo devuelve a su trayectoria original. El vehículo describe una trayectoria que capta la unidad de control y la compara con la trayectoria teórica que debería llevar el vehículo. En el momento que éstas no coinciden el sistema se activa. Las causas de que esas trayectorias no coincidan son:

- Subviraje: La trayectoria real es una curva más abierta que la teórica.
- Sobreviraje: La trayectoria real es una curva más cerrada que la teórica.



El control de estabilidad centraliza las funciones de los sistemas ABS, EBD (reparto electrónico de frenada) y de control de tracción.

El sistema consta de una unidad de control electrónico, una unidad de control hidráulico, una bomba hidráulica controlada eléctricamente y un conjunto de sensores:

- sensor del volante; y otros sensores de dirección;
- sensor de velocidad para cada rueda;
- un sensor de movimientos laterales del morro del vehículo respecto de un eje vertical;
- y un sensor de aceleración lateral.

Estos sensores ofrecen información acerca del estado del desplazamiento del vehículo, de tal forma que al detectar un inicio de subviraje o sobreviraje se activan los frenos en una o más ruedas. Si hubiera algún conflicto de actuación entre éste y otros sistemas de seguridad que actúen sobre los frenos, el control de estabilidad predomina sobre los demás sistemas [7].

2.1.7 BLOQUEO ELECTRÓNICO DEL DIFERENCIAL

El bloqueo electrónico del diferencial es un sistema que fuerza a las dos ruedas de un mismo eje a girar a la misma velocidad. El que las ruedas giren a distinta velocidad puede estar provocado porque:

- Al acelerar, una de las ruedas esté menos cargada que la otra, gire más rápido y pierda tracción y potencia. Este sistema minimiza estas pérdidas y devuelve el control a la rueda.
- En una curva, la rueda interior describe una circunferencia menor que la exterior por lo que recorrerá menos distancia. Esta diferencia se ve compensada por el diferencial [6].

2.2 SEGURIDAD PASIVA

Los elementos de seguridad pasiva son aquellos que se activan cuando, incluso con la acción de los elementos de seguridad activa, el vehículo ha perdido el control. Como esta situación es posible y más frecuente de lo deseable, se desarrollan estos sistemas cuyo fin es el de reducir las consecuencias que sobre los ocupantes de un coche tiene un accidente.

Estos elementos van desde el diseño de la carrocería hasta el cinturón de seguridad, pasando por el habitáculo de seguridad, el reposacabezas, los airbags o los dispositivos de seguridad para niños. Además de un capítulo que en la actualidad centra numerosas investigaciones: el de la protección del peatón en caso de atropello. A continuación, se detallan algunos de estos elementos.

2.2.1 HABITÁCULO DE SEGURIDAD

El concepto habitáculo de seguridad no hace referencia, a diferencia de otros sistemas de seguridad pasiva (cinturón, airbag,...), 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 depende en gran medida la protección de los ocupantes. En la figura 2-2 vemos la imagen de un habitáculo de seguridad.

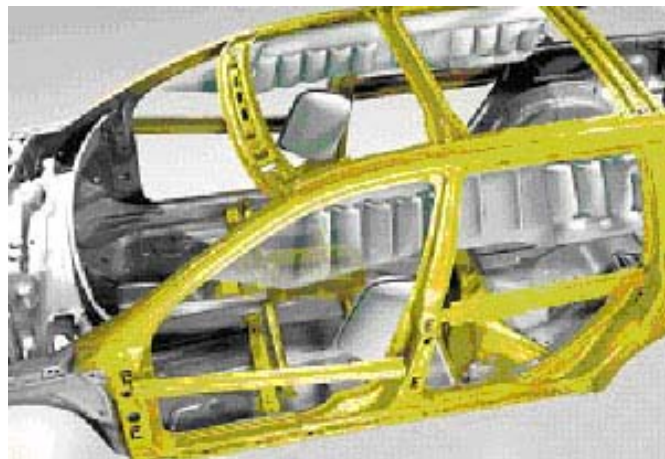


Figura 2-1: Imagen de un habitáculo de seguridad

Por la importancia que tiene el habitáculo de seguridad, puede considerarse, junto al cinturón de seguridad, como los principales sistemas 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 [11].

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 2-3 se observa la estructura que forma el habitáculo de seguridad.

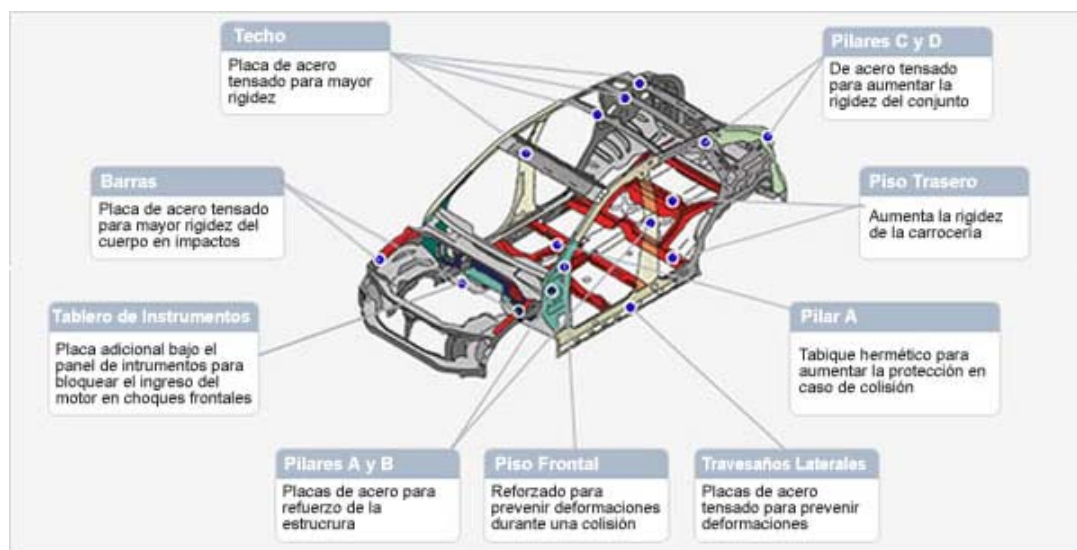


Figura 2-2: Esquema de un habitáculo de seguridad

2.2.2 CINTURÓN DE SEGURIDAD

El cinturón de seguridad es un arnés que mantiene al ocupante en su sitio en caso de deceleración brusca provocada por una colisión frontal. Las estadísticas demuestran que éste es el sistema de seguridad pasiva más efectivo. El cinturón de seguridad evita el llamado *segundo impacto*, que es el que sucede cuando el ocupante colisiona con partes duras del automóvil.

El cinturón de seguridad reduce un 45% las muertes por accidente y su misión es retener al individuo evitando que se golpee contra el parabrisas, el tablero de instrumentos o salga despedido del coche. Para valorar su importancia, basta decir que, debido a la inercia que provoca una colisión, una persona multiplica por 56 su peso en un choque a 60 km/h, lo que da idea de las graves lesiones que se puede producir al golpearse o salir despedido durante el mismo [12].

En este proyecto se estudia el comportamiento de diferentes tipos de cinturones de seguridad, por lo que el capítulo tercero está dedicado en exclusiva a su historia y a la descripción de tipos. En la figura 2-4 vemos un sencillo esquema de un cinturón de seguridad de tres puntos de anclaje.



Figura 2-3: Esquema de cinturón de seguridad de tres puntos

2.2.3 ZONAS DE ABSORCIÓN DE IMPACTO

Es una equivocación muy propagada pensar que un automóvil seguro debe estar construido lo más tenaz e inflexiblemente posible, sin embargo, existe el concepto de deformación controlada, en el cual se absorbe energía del impacto y, por tanto, la energía que llega a los ocupantes es menor que la que se transmitiría con un vehículo excesivamente rígido. Con este concepto de deformación se desarrollan las carrocerías de los vehículos actuales [14].

Cuando se produce un accidente y el vehículo impacta un objeto rígido, su estructura se somete a una violenta desaceleración, la cual es finalmente transmitida a sus ocupantes. En estos casos, la estrategia considerada en el diseño de los vehículos actuales para proteger a sus pasajeros es dotarlos de zonas de deformación programada en sus extremos, y de un habitáculo rígido que asegure la integridad de la cabina.

Las zonas de deformación programada se ubican en el sector delantero y trasero del vehículo, y están diseñadas para absorber la mayor cantidad de energía posible en caso de impacto. La absorción de energía se realiza principalmente a través de las deformaciones de piezas específicamente diseñadas para cumplir esta función, junto con la dispersión de las cargas hacia los demás sectores del vehículo.

La absorción de parte de la energía del impacto efectuada por las zonas de deformación programada, permite reducir la cantidad de energía que deberá absorber el compartimento de pasajeros, y finalmente los ocupantes. Esto se traduce en pasajeros expuestos a aceleraciones de menores magnitudes, lo cual reduce la gravedad del impacto que “sienten” los pasajeros del vehículo.

2.2.4 AIRBAG

El airbag es una bolsa de aire que sirve como colchón para los ocupantes ante una colisión. Es un sistema de seguridad complementario al cinturón de seguridad. Dentro del sistema airbag se pueden encontrar varios tipos que pueden ser clasificados según el lugar del vehículo en el que están instalados o la parte del cuerpo que están destinados a proteger [6]. A continuación se da una relación de los airbags más comunes y su función:

- El airbag de conductor es el que se encuentra en el volante y está destinado a protegerle en caso de choque frontal.
- El airbag de pasajero se encuentra en el salpicadero y está destinado a protegerle en caso de choque frontal.
- El airbag lateral se encuentra en puertas o en la estructura del techo y su función es actuar como barrera entre los ocupantes, tanto traseros como delanteros, ante un choque lateral.

En la figura 2-5 se puede ver un esquema sencillo donde explica el funcionamiento del airbag, todo en ello ocurre en milisegundos.

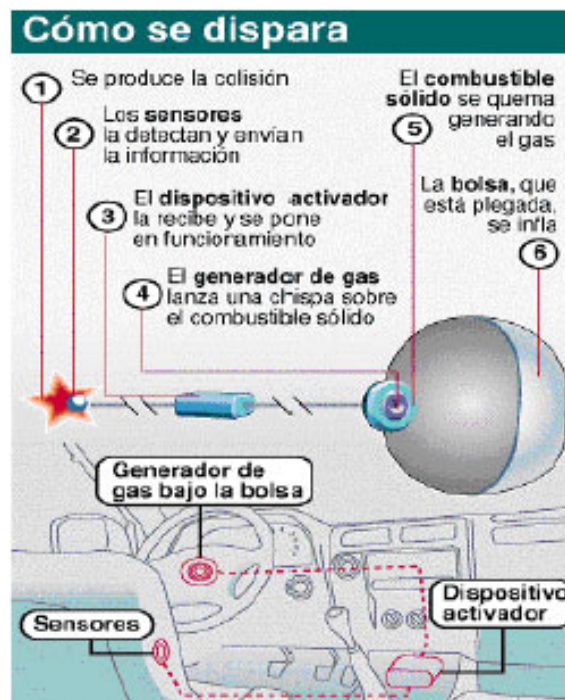


Figura 2-4: Funcionamiento airbag frontal

La figura 2-6 muestra una imagen de dos dummies en un vehículo donde se puede diferenciar el airbag frontal, el lateral, y uno debajo del volante, para proteger los miembros inferiores del conductor.



Figura 2-5: Habitáculo de un vehículo con airbags

2.2.5 ASIENTOS

Los asientos modernos confieren seguridad al ocupante de varias maneras. Su geometría está específicamente diseñada para que, en caso de accidente no se produzca deslizamiento del ocupante, algunos, además tienen sistemas que permiten su movimiento hacia atrás en caso de colisión trasera, disminuyendo así el *latigazo* producido en el cuello [9].

2.2.6 REPOSACABEZAS

El reposacabezas evita el *latigazo* o movimiento brusco hacia atrás que tiene lugar por una colisión trasera o como reacción de una colisión frontal. Como todos los sistemas de seguridad, han de ajustarse a su usuario, siendo peligroso un mal funcionamiento, por ejemplo, que esté demasiado bajo aumenta el riesgo de lesiones, ya que la cabeza tiende a trepar por él [9].

Las aportaciones más recientes han venido de la mano de Volvo, con el sistema denominado *Whips*, que combina la acción del reposacabezas y el asiento –ambos se *mueven* conjuntamente–, y más recientemente con el reposacabezas inteligente de Saab –ahora extendido entre muchos fabricantes–, que, en caso de colisión, acompaña a la cabeza del ocupante en su trayectoria para evitar el temido efecto *latigazo*: un brusco movimiento de zig-zag del cuello que puede producir lesiones irremediables [10].

La figura 2-6 muestra un esquema de un reposacabezas inteligente, que se activa ante una colisión para reducir los posibles daños en el ocupante.



Figura 2-6: Reposacabezas inteligentes



3 EL CINTURÓN DE SEGURIDAD

El objetivo de un cinturón de seguridad es sencillo: evita que los ocupantes salgan disparados por el parabrisas en caso de que el automóvil sufra una parada repentina como resultado de una colisión, de un frenazo brusco, etc.

Si, por desgracia, el coche se sale de la carretera y choca contra un árbol, el automóvil sufre una parada repentina. Sin cinturón de seguridad, el cuerpo del ocupante mantiene la misma velocidad que antes del choque; es decir, continúa su marcha a 100 km/h hasta que el parabrisas, el salpicadero, o el propio asfalto le frenen bruscamente ejerciendo una fuerza tremenda sobre su cuerpo. Si el coche es frenado bruscamente por cualquier motivo, algo debe de ejercer una fuerza sobre sus ocupantes con el fin de pararlos. Dependiendo de dónde y cómo se aplique dicha fuerza, los efectos van desde una muerte instantánea a la posibilidad de salir andando sanos y salvos [2].



Cuanto más bruscamente se produzca la parada de los ocupantes, mayor es la fuerza que tendrán que soportar y el riesgo de lesiones. Si es posible frenar más lentamente el movimiento de los ocupantes, también es menor la fuerza que tienen que soportar sus cuerpos. Si, además, se aplica dicha fuerza no en un punto, sino distribuida a lo largo de las zonas más resistentes del cuerpo, menor es la presión y menor el riesgo de lesiones. Éste es, precisamente, el objetivo del cinturón de seguridad.

Cuando el cinturón de seguridad es llevado correctamente, la mayor parte de la fuerza de retención es aplicada sobre dos zonas del cuerpo resistentes, como son el pecho y la pelvis. Como el cinturón se extiende a lo largo de un área amplia del cuerpo, la fuerza de retención se distribuye, dando lugar a una menor presión y, por tanto, reduciendo la posibilidad de daños. De modo adicional, el cinturón es ligeramente flexible, de forma que en caso de impacto se extiende un poco; esto permite que la parada no sea brusca, sino progresiva, lo cual se traduce en una menor fuerza de retención [1].

Los cinturones de seguridad comenzaron a utilizarse en aeronaves en la década de 1930 y, tras años de polémica, su uso en automóviles es actualmente obligatorio en muchos países. El cinturón de seguridad está considerado como el sistema de seguridad pasiva más efectivo jamás inventado, incluido el airbag, la carrocería deformable o cualquier adelanto técnico de hoy en día.

Actualmente los cinturones de seguridad poseen tensores que aseguran el cuerpo en el momento del impacto mediante un resorte o un disparo (*tensor pirotécnico*). El cinturón se debe colocar lo más pegado posible al cuerpo, plano y sin nudos o dobleces. Los pilotos de competición llevan los arneses bastante apretados, pero no se considera necesario en un coche de calle.

El cinturón de las caderas debe estar situado por delante de las crestas ilíacas, los huesos que sobresalen en las caderas. Esto es para que sujete al cuerpo contra un hueso duro y no contra el abdomen blando. En el caso de las embarazadas, se vende un accesorio para asegurarse que el cinturón queda debajo del abdomen. Se engancha entre las piernas a la banda de la cintura y por debajo del asiento.

En la actualidad, muchos de los vehículos nuevos que salen al mercado disponen de un sensor para saber si los ocupantes del vehículo llevan abrochado el cinturón de seguridad, y se lo indican al conductor de forma visual e incluso sonora. La figura 3-1 muestra un cinturón de seguridad abrochado.



Figura 3-1: Cinturón de seguridad

3.1 HISTORIA DEL CINTURÓN DE SEGURIDAD

Los primeros cinturones montados en fábrica se ofrecieron como opción en algunos Ford de 1956, dentro del paquete de seguridad *SafeGuard*.

El primer cinturón de seguridad montado de serie como equipamiento estándar en vehículos de producción masiva se montó en el Volvo Amazon de 1959. Este vehículo ya montaba un cinturón de tres puntos.

Fue el ingeniero de Volvo **Nils Bohlin** quien inventó el cinturón de tres puntos, que se convertiría en la norma prácticamente universal para automóviles de calle. Volvo liberó la patente, para que todos los demás fabricantes pudiesen copiar el diseño.

Otras mejoras posteriores:

- Introducción del carrete inercial, que permite desenrollar el cinturón en el caso de movimientos lentos, pero lo bloquea en el caso de movimientos bruscos, como en el caso de colisión. La figura 3-2 muestra una imagen de un carrete inercial.

- Introducción de los pretensores pirotécnicos, que ajustan el cinturón en caso de colisión mediante la energía liberada por una pequeña carga explosiva. También ha habido pretensores mecánicos (sistema Procon-ten) [12]. En la figura 3-3 se puede ver un esquema de un pretensor pirotécnico.



Figura 3-2: Carrete inercial

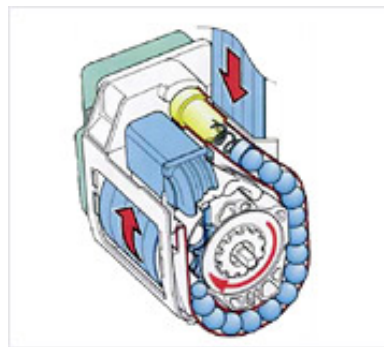


Figura 3-3: Pretensor pirotécnico

3.2 COMPONENTES DEL CINTURÓN DE SEGURIDAD

3.2.1 PRETENSOR

Ya se ha comentado la importancia de utilizar el cinturón de seguridad por su aporte en la reducción de lesiones en caso de accidente. Los pretensores en los cinturones de seguridad mejoran la eficacia de éstos en impactos de cierta consideración. En caso de impacto, estos elementos permiten que el cinturón de seguridad no sólo impida el desplazamiento de los ocupantes del vehículo, sino que también intervenga activamente para aferrarlo contra el asiento.

El pretensor cuando se activa tensa el cinturón de seguridad, manteniendo a los ocupantes pegados al asiento durante el impacto. Esto

permite el correcto funcionamiento de los demás sistemas de seguridad pasiva del vehículo, como pueden ser los airbags o los apoyacabezas activos, al evitar desplazamientos de los ocupantes del vehículo.

Existen pretensores de accionamiento mecánico o pirotécnico, y pueden actuar en el carrete del cinturón, en el cierre o en ambos puntos. El accionamiento de mayor efectividad por su precisión y confiabilidad es el pirotécnico, que activa el pretensor a través de una explosión controlada de forma similar a un airbag. El pretensor se dispara a través de sensores mecánicos de inercia o bien haciendo uso de los sensores del airbag. En este último caso se obtiene una óptima complementación entre el pretensor y el airbag frontal, con lo que la combinación de estos sistemas resulta tremendamente eficaz para reducir lesiones en impactos frontales. En la figura 3-4 se muestra un ejemplo de cada tipo de pretensor, de accionamiento pirotécnico, y de accionamiento mecánico.

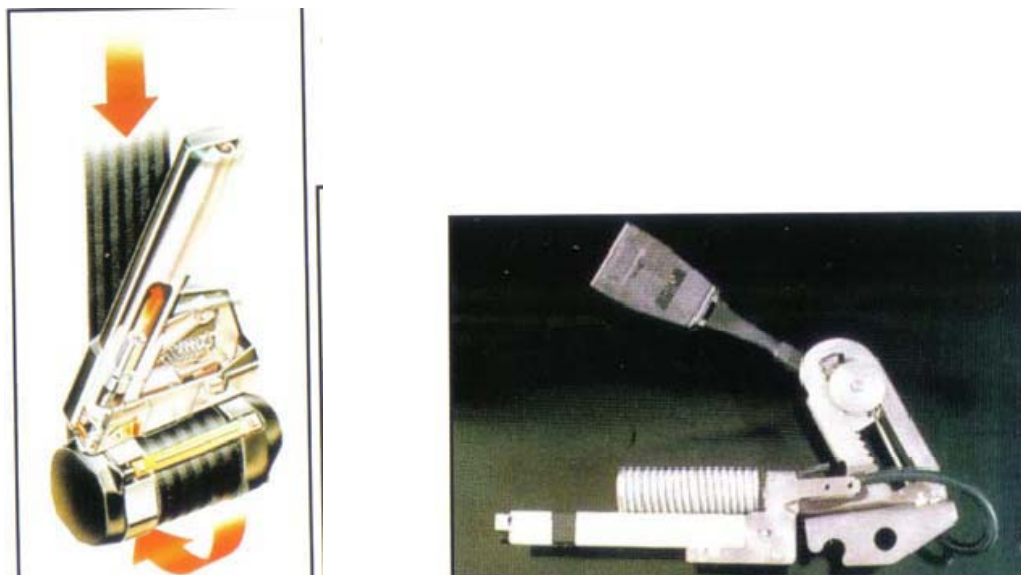


Figura 3-4: Pretensor pirotécnico (izquierda) y mecánico (derecha)

3.2.2 LIMITADOR DE TENSIÓN

En caso de accidente el cinturón de seguridad, si bien protege de una gran cantidad de lesiones graves, también puede causar algunas heridas en la región del tórax. Estas heridas se producen por la acción del cinturón de seguridad al retener el cuerpo del ocupante bajo impactos violentos.

El limitador de tensión permite el estiramiento controlado del punto de fijación del cinturón de seguridad, reduciendo de esta forma la tensión de este sobre el tórax del ocupante. Esto permite reducir drásticamente el riesgo de fracturas en las costillas, por ejemplo.

Para maximizar la eficacia del cinturón de seguridad es necesario que éste se mantenga siempre sin holguras y ajustado al cuerpo del ocupante. Si existen holguras, mayor será la probabilidad que el cinturón de seguridad provoque heridas en caso de impacto. Este problema es solucionado con el pretensor para el cinturón de seguridad, el cual es un excelente complemento al limitador de tensión, ya que mejora su eficacia [13].

3.3 TIPOS DE CINTURONES DE SEGURIDAD

Existen diferentes tipos de cinturones de seguridad, aunque el más conocido es el de tres puntos. Antes de entrar en detalle en cada uno de ellos, en la figura 3-5 se observa un esquema muy sencillo donde muestra los diferentes tipos estudiados en este proyecto: el de dos puntos, el de tres puntos y el de cuatro puntos de anclaje.



Figura 3-5: Esquema de diferentes tipos de cinturones de seguridad

3.3.1 CINTURÓN DE DOS PUNTOS

El cinturón de dos puntos es el que se coloca sobre las caderas del pasajero. Se sigue utilizando principalmente en los aviones y en los autobuses. Se le critica por causar la separación de la espina lumbar, causando a veces parálisis (conocida como *síndrome del cinturón de seguridad*).

3.3.2 CINTURÓN DE TRES PUNTOS

La aportación más importante de Volvo a la seguridad del automóvil es el cinturón de tres puntos de anclaje. Desde su creación en 1959, no se ha inventado ningún otro mecanismo que pueda igualarlo en efectividad.

El cinturón de seguridad de tres puntos incluye un cinturón en la falda, que debe sujetar la pelvis, situado por debajo del estómago, y otro que va de un punto de anclaje en el primero a otro punto sobre el hombro del pasajero, de

manera que pase por el pecho, nunca debe pasar por el cuello. En la figura 3-6 se ve una hebilla de un cinturón de tres puntos, en modo inactivo, colgando del punto de anclaje sobre el hombro del pasajero.



Figura 3-6: Hebilla de cinturón de seguridad de tres puntos colgando del pilar de un automóvil

3.3.3 CINTURÓN DE CUATRO PUNTOS

El cinturón de hebilla central o de cuatro puntos es similar a los arneses que se usan actualmente en los coches de competición y en las sillas de retención infantil. Este cinturón consta de 3 partes, una primera tira de sujeción tiene forma de V con dos puntos de anclaje al asiento que se encuentran a la altura de los hombros del usuario. Esta V es retráctil y dispone de una hebilla en su parte central que permite el anclaje de dos tiras de cinturón mediante lengüetas, estas dos últimas tiras se anclan de forma independiente a los costados del conductor. La figura 3-7 muestra un cinturón de este tipo sin montar, con sus cuatro puntos de anclaje, y en la figura 3-8 se puede ver en una simulación por ordenador instalado en el asiento del conductor.



Figura 3-7: Arnés de cuatro puntos sin montar

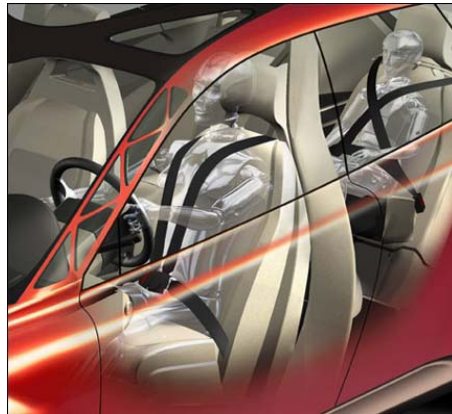


Figura 3-8: Imagen de un cinturón de cuatro puntos

3.3.4 CINTURÓN DE CINCO PUNTOS

El cinturón de cinco puntos de anclaje es como el de cuatro puntos, pero se añade una sujeción entre las piernas. Más seguros, pero más restrictivos, se suelen utilizar en sillas para niños y en automóviles de competición. La porción de la falda, que sujeta la pelvis, se conecta a un cinturón entre las piernas. Además hay dos cinturones por sobre ambos hombros, haciendo un total de cinco puntos de anclaje. En la figura 3-9 se observa uno de estos cinturones colocado en un vehículo en el cual, por su propia carrocería y posible uso en todo tipo de terrenos, es aconsejable mejorar la sujeción que pueda proporcionar un cinturón convencional, por lo cual los cinco puntos de anclaje le dotan de más retención, y por lo tanto, de más seguridad.



Figura 3-9: Arnés de cinco puntos

3.3.5 DISPOSITIVO HANS Y DISPOSITIVO HUTCHENS

Los dispositivos *HANS* y *Hutchens* son accesorios que limitan el movimiento de la cabeza del conductor de competición en carreras tales como las NASCAR y la Fórmula 1. Reduce la probabilidad de lesiones en cabeza y cuello, como una fractura de la base del cráneo, en el caso de un accidente. El dispositivo *HANS* fue desarrollado por la categoría CART en los 90's [12].



Figura 3-10: Dispositivo HANS

3.3.6 CINTURÓN EN X (3+2)

Algunos fabricantes han experimentado con añadir un segundo cinturón adicional de dos puntos de apoyo que se cruza formando una "X" con el cinturón convencional de tres puntos de apoyo.

Este cinturón se encuentra en fase de estudio y desarrollo. Los puntos inferiores de los cinturones se encuentran situados muy cerca. El sistema no permite abrocharse el cinturón adicional de dos puntos si antes no ha sido abrochado el de tres. En la figura 3-11 se ve un dummy con este tipo de cinturón en el asiento trasero de un vehículo [14].



Figura 3-11: Imagen del cinturón en X (3+2)

Este sistema tiene ventajas más que destacables en cualquier tipo de accidente, pero sobre todo en caso de accidentes de tipo vuelco supone un nivel de retención muy superior al actual. En la figura 3-12, mostrada más abajo, se puede apreciar que el ocupante con el sistema 3+2 no eyecta de su plaza si el vehículo se encuentra boca abajo en caso de vuelco, al contrario que aquel que lleva el cinturón de tres puntos habitual. Sin embargo se cree que muchos usuarios no usarían el cinturón adicional por ser incomodo o complicado de abrochar [15].



Figura 3-12: Imagen del cinturón 3+2 y de una prueba de vuelco con un cinturón 3+2 y otro con un cinturón de tres puntos convencional

3.4 IMPORTANCIA DEL CINTURÓN DE SEGURIDAD

En anteriores apartados se han comentado algunos datos acerca de la importancia del uso del cinturón, así que llegados a este apartado, se muestran datos objetivos sacados de distintas publicaciones de organizaciones que velan por la seguridad en carreteras, como por ejemplo la DGT (Dirección General de Tráfico), la Guardia Civil, el RACE (Real Automóvil Club de España), el RACC (Real Automóvil Club de Cataluña), etc.

Como introducción, se empieza comentando que la Comisión Europea, con sede en Bruselas, señala que no llevar puesto el cinturón de seguridad es la segunda causa de mortalidad en caso de accidente en carretera. El primer motivo de mortalidad en la carretera es el exceso de velocidad y el tercero, la conducción bajo los efectos del alcohol.

Desde 2006, el uso del cinturón de seguridad es obligatorio en todos los vehículos. La legislación de la UE obliga tanto a conductores como a pasajeros a ponerse el cinturón de seguridad en todos los asientos que dispongan del mismo.

Según las conclusiones de un estudio llevado a cabo por la Comisión Europea en 2006, las iniciativas encaminadas a fomentar el uso del cinturón de seguridad podrían salvar hasta 7.300 vidas al año en la UE. En concreto,



Bruselas mostró su deseo de que las nuevas normas para la utilización del cinturón de seguridad que entraron en vigor en 2006 sean capaces de evitar la muerte de unas 5.500 vidas al año. Estos objetivos se enmarcan en el objetivo que se fijó la UE de reducir el número de muertes en carretera a la mitad en 2010. En dicho estudio, la Comisión señala que ha habido *progresos considerables*, puesto que en 2005 se registraron 41.000 personas muertas en accidentes de tráfico en comparación con los 50.000 de 2001. Sin embargo, Bruselas admite que es necesario *intensificar los esfuerzos* para llegar al objetivo fijado para 2010 [16].

A continuación, la figura 3-13 muestra unos diagramas de sectores en los que se puede observar, en caso de accidente, la diferencia entre llevar o no llevar puesto el cinturón de seguridad. A primera vista, se puede extrapolar como significativo el dato de muertos y heridos graves, que con cinturón suma un 10% (2% y 8%, respectivamente), que es casi lo mismo que el porcentaje de muertos en caso de no llevarlo, un 8%, al que si se le suma los heridos graves, llega a un 24%, esto quiere decir, una de cuatro personas que tiene un accidente sin llevar el cinturón de seguridad abrochado, bien muere o tiene heridas de consideración grave. El dato de ilesos disminuye del 52% en caso de llevarlo hasta un 39% que no lo llevan, lo que implica que de cada 100 personas envueltas en un accidente, 13 más de ellas pueden salir ilesas con el correcto uso del cinturón de seguridad [17].



Figura 3-13: Diagramas que muestran la efectividad del cinturón de seguridad

Según informe mundial elaborado por la OMS sobre traumatismos causados por accidentes de tráfico, el cinturón de seguridad tiene un efecto preventivo de hasta un 65 % en el caso de las colisiones mortales. Ver tabla 3-1 [18].



Intervalos de eficacia	
Colisiones mortales	Lesiones moderadas y graves
40-65 %	43-65 %

Tabla 3-1: Eficacia del cinturón de seguridad

En la tabla 3-2 se muestran más datos en forma de porcentajes, esta vez se trata de los porcentajes de reducción de lesiones por accidente gracias al correcto uso del cinturón de seguridad [19].

Nivel de protección

Porcentajes de reducción de lesiones por accidente gracias al uso del cinturón de seguridad.

TIPO DE LESIÓN	CONDUCTOR	PASAJERO
Lesiones cerebrales	33%	56%
Fracturas craneales	18%	18%
Heridas faciales	45%	64%
Lesiones oculares	38%	40%
Fracturas faciales	6%	6%
Lesiones pulmonares	33%	58%

Fuente: Report by Department of Transport. UK

Tabla 3-2: Nivel de protección del cinturón de seguridad



4 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. Son necesarios para la homologación de cualquier vehículo que salga al mercado [20].

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 4-1 se muestra la imagen después de un *crash-test* frontal realizado en un laboratorio.



Figura 4-1: Estado del vehículo después de la colisión

4.1 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 [21].

4.1.1 HISTORIA DEL DUMMY

Con los *crash-test* se obtiene mucha información acerca del comportamiento del coche en caso de colisión, pero sin el *dummy* o maniquí de prueba no se puede estudiar el riesgo de lesiones que tienen los ocupantes del vehículo.

La información obtenida a partir de investigaciones con cadáveres y estudios con animales ya había sido utilizada en la construcción de algunos simuladores humanos hacia 1949, cuando "*Sierra Sam*" fue creado en el Laboratorio de Investigación Alderson conjuntamente con la compañía de ingeniería Sierra con el fin de probar el asiento eyectable y el arnés de seguridad para piloto de avión. Hacia principios de la década de 1950, Alderson y Grumman construyeron un dummy que fue utilizado para realizar pruebas de choque en automóviles y en aviones.

Alderson luego produjo la serie VIP-50, que fue especialmente construida para General Motors y Ford, y que fuera también adoptada por el National Bureau of Standards (actual National Institute of Standards and Technology). Sierra respondió diseñando un nuevo dummy, el modelo se llamó "*Sierra Stan*," pero GM decidió que ninguno de estos dummy satisfacía sus necesidades. Por lo que los ingenieros de GM decidieron desarrollar un dummy confiable y duradero, para ello combinaron las mejores características de los modelos de la serie VIP y Sierra Stan, y así es que en 1971 nace el *Hybrid I*. *Hybrid I* era lo que se conoce como un dummy masculino de percentil 50. Lo que significa, que tenía las características de un ser humano de sexo masculino promedio en cuanto a su altura, masa y proporciones. El "*Sierra Sam*" original en cambio era un dummy masculino de percentil 95 (o sea más pesado y más alto que el 95% de los hombres). GM en cooperación con la Sociedad de Ingenieros de Automóviles compartió su diseño con sus competidores, como también el del nuevo dummy femenino percentil 5.



Desde entonces, se ha dedicado un esfuerzo importante a la creación de dummies cada vez más sofisticados. El *Hybrid II* creado en 1972, estaba mejor documentado y tenía rodillas, hombros y columna vertebral con una respuesta más real. *Hybrid II* fue el primer dummy que cumplió con el estándar norteamericano (American Federal Motor Vehicle Safety Standard -FMVSS) para ensayos de cinturones de seguridad de pecho y falda. En 1973, fue creado el dummy masculino percentil 50 y la "National Highway Transportation Safety Administration" (NHTSA) firmó un acuerdo con General Motors para crear un modelo que mejorara al *Hybrid II*.

A pesar de que *Hybrid I* y *Hybrid II* representaban un avance significativo sobre las pruebas con cadáveres, aun así los mismos eran muy simples, y su uso quedaba limitado al desarrollo y prueba de diseños de cinturones de seguridad. Era necesario contar con un dummy que permitiera a los investigadores explorar estrategias de reducción de daños. Fue esta necesidad la que impulsó a los investigadores de GM a desarrollar la nueva serie de dummies *Hybrid III*.

El dummy masculino percentil 50 *Hybrid III*, fue creado en 1976 y tiene una altura de 168 cm y una masa de 77 kg. El *Hybrid III* percentil 95 mide 188 cm y posee una masa de 100 kg. También existen un dummy femenino percentil 5, con una pequeña talla de 152 cm y 50 kg, y dos niños dummies *Hybrid III*, que representan a un niño pequeño de seis años de edad de 21 kg y a otro de tres años de edad de 15 kg. Estos últimos son de última creación, y su diseño se basa en estimaciones y aproximaciones, y vienen a cubrir el vacío de información existente sobre los efectos de choques en los niños.

Los materiales de estos dummies son muy variados, incluyen goma, espuma, plástico, acero y aluminio para simular el comportamiento mecánico del cuerpo humano y poder medir el alcance de los daños ante una colisión. Una vez que se evalúa que el dummy está listo para ser utilizado en un ensayo, se lo viste con ropas amarillas, se le aplica pintura para marcas en la cabeza y las rodillas, y se le adhieren marcas calibradas a los costados de la cabeza para ayudar a los investigadores en el análisis de las películas en cámara lenta. A continuación se coloca el dummy dentro del vehículo de pruebas. El *Hybrid III* posee cuarenta y cuatro canales de lectura de datos, los cuales están distribuidos en todo su cuerpo desde la cabeza hasta los tobillos, y estos sensores permiten registrar entre 30 000 y 35 000 datos durante un choque típico que dura entre 100 - 150 milisegundos. Durante el ensayo esta información se almacena de forma temporal en un registrador ubicado en el tronco del dummy, para después del ensayo transferir los datos a una computadora para su estudio [21].



4.2 ENTIDADES QUE REALIZAN LOS ENSAYOS DE CHOQUE

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 fabricantes, organismos de homologación y los organismos NCAP [20].

4.2.1 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.

4.2.2 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.

4.2.3 ORGANISMOS 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). En la figura 4-2 se pueden ver los esquemas de algunas pruebas realizadas por estos organismos.



Colisión frontal.

Impacto lateral.

Impacto contra un poste.

Figura 4-2: Tipos de pruebas de impacto

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 más 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.

La prueba complementaria de impacto lateral contra un poste para medir la protección de la cabeza del conductor se realiza a 29 km/h (18 mph) moviendo la plataforma sobre la que se sitúa el automóvil contra una bola metálica. Las pruebas de protección de peatones se realizan a 40 km/h (25 mph). El EuroNCAP no realiza pruebas de vuelco ante un accidente [21].

A partir de febrero de 2009 se comenzó a poner en práctica una reformulación completa del sistema de evaluación. Como complemento de las ya existentes pruebas de protección a pasajeros adultos y niños en choques y de protección a peatones en atropellos, se añadieron dos pruebas adicionales. La prueba de choque por detrás evaluará principalmente los daños a los pasajeros en el cuello y la espalda. Asimismo, se verificará el funcionamiento de diversos elementos de seguridad activa, tales como el control de estabilidad y el limitador de velocidad.

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 [20].

4.2.3.1 NHTSA

Dentro de los organismos NCAP vamos a destacar a la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), que es una agencia dependiente del gobierno de los Estados Unidos, y forma parte del Departamento de Transporte. La incluimos porque vamos a usar alguno de sus parámetros de medida en los ensayos, como el Chest Severity Index y el CLIP3M, ambos para el cálculo de los daños en el pecho, como se verá en el apartado de RESULTADOS.

La NHTSA fue fundada el año 1970 y es heredera de varias agencias predecesoras que fueron fusionadas, tales como Traffic Safety Agency, la National Highway Safety Agency, y la National Highway Safety Bureau.

El impacto de la NHTSA ha sido positivo al promover la fabricación de automóviles más seguros para sus ocupantes.

Algunas investigaciones de esta agencia han tenido un alto impacto como el realizado al Ford Explorer de primera generación y su tendencia a volcar. Sin embargo, varias investigaciones y proyectos han sido polémicos dado que han entrado en conflicto con fabricantes y legisladores por considerarlos algunos ineficientes y excesivamente regulatorios, y otros en cambio poco beneficiosos para los consumidores.

El nombre de la NHTSA cobró realce en enero del 2010 cuando el proceso de investigación que dirigió durante años llevó a los ejecutivos de Toyota a reconocer que ciertos modelos fabricados entre el 2007 y el 2010 tenían problemas en el acelerador, problemas que habrían causado el menos 12 muerto en los EEUU. Toyota llamó a revisión 2,3 millones de vehículos y se vio obligado a detener las ventas de los modelos implicados.

La NHTSA realiza pruebas de seguridad pasiva en automóviles nuevos entregando una clasificación en estrellas basada en el comportamiento del vehículo en pruebas de impacto frontal y lateral. En los últimos años se ha incorporado una prueba de vuelco ante un accidente la que también se mide en estrellas.



La prueba de impacto frontal tipo estándar se realiza a 56km/h (35 mph) contra una barrera fija. Hasta el año 2006 la NHTSA no se realiza esta pruebas en la modalidad de impacto frontal tipo off set la que es más exigente. La prueba de impacto lateral tipo estándar se realiza a 62km/h (38.5 mph) contra una barrera móvil. Hasta el año 2006 la NHTSA no se realiza pruebas complementarias de impacto lateral tipo poste de luz. La NHTSA no realiza pruebas orientadas a medir la seguridad de niños a bordo ni de peatones en caso de atropello.

Los resultados de la NHTSA habitualmente son sustancialmente menos exigentes que las mediciones de otras organizaciones de seguridad vial [22].

4.3 TIPOS DE PRUEBAS DE CHOQUE (IMPACTO FRONTAL)

Hay dos tipos de prueba estándar que suelen usarse para probar accidentes de automóvil:

- Impacto frontal a 56 kilómetros por hora. Esto se hace estrellando el coche contra una barrera sólida. Sería equivalente a un choque frontal contra otro coche a la misma velocidad y de peso similar.
- Impacto lateral a 56 kilómetros por hora. Una pieza móvil de 1400 kilos golpea un lateral del vehículo. Esto simula el golpe que otro coche puede dar por un lado en una intersección. El ariete va a una velocidad de 56 k/h como en la anterior prueba.

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.

La prueba de impacto frontal está regulada en Europa por la legislación vigente, 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 panal (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 maniqués 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 [20].

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



Figura 4-3: 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.

En los impactos frontales los dummies son colocados representando a los ocupantes normales que podrían ir en el vehículo. Se intenta siempre hacer que la situación sea lo más real posible. Un sensor de velocidad es montado en el coche y posicionado de tal manera que dará a un resorte nada más golpear contra la barrera.

Se instalan unas 15 cámaras de alta velocidad, incluso por debajo del vehículo. Dichas cámaras pueden capturar unas mil tramas por segundo para no perder detalle de la colisión. El paso siguiente es alejar el coche de la barrera, arrancarlo, y estrellarlo a 56 k/h. Lleva menos de un segundo entre el choque contra la barrera y la detención del coche. La figura 4-4 muestra un crash-test frontal y algunos de los aparatos de medida comentados anteriormente.

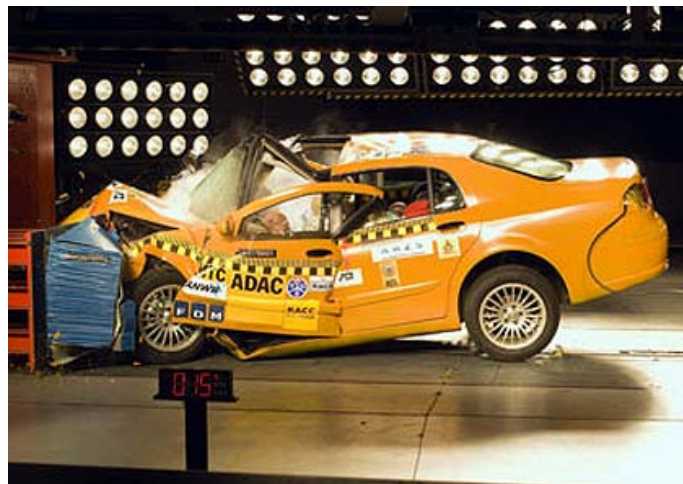


Figura 4-4: Crash-test con sus aparatos de medida

Sobrevivir a un accidente tiene que ver mucho con la energía cinética. Cuando tu cuerpo se mueva a 56 k/h, tiene una cierta cantidad de energía cinética. Después del choque, cuando quedas completamente parado, tienes una energía cinética de cero. Para evitar el riesgo de quedar herido, lo que interesa es remover la energía cinética lo más lentamente posible. Los sistemas de seguridad se encargan de eso.

El coche tiene cinturones de seguridad, sensores de choque que inmovilizan a los pasajeros incluso antes de que salte el airbag. El cinturón puede absorber algo de la energía en caso de accidente. El propio airbag absorbe otra importante cantidad de energía haciendo que la persona no se golpee hasta que el vehículo se pare del todo.

La figura 4-5 muestra a dos dummies sentados en un asiento con el cinturón de seguridad abrochado, lo que refleja una idea más real del modelo de colisión frontal simulado en este proyecto [21].



Figura 4-5: Imagen por ordenador similar al modelo simulado



5 EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Debido a la complejidad del mundo que le rodea, el ser humano es incapaz de captar la realidad directamente, por lo que, ingenieros, matemáticos, científicos e incluso economistas, dividen un sistema en sus componentes individuales o “*elementos*”, cuyo comportamiento puede ser analizado fácilmente, para, con los resultados obtenidos de cada elemento, reconstruir el sistema original y obtener el comportamiento global. Al hacer esta división, se puede llegar a un modelo con un número finito de componentes bien definido o la subdivisión puede proseguir indefinidamente y conducir a ecuaciones diferenciales o expresiones equivalentes con un número infinito de elementos implicados. A los primeros sistemas se les conoce como discretos y a los segundos como continuos.

Gracias al uso de los ordenadores, los problemas discretos son fácilmente resolubles, pero debido a su capacidad limitada, los problemas continuos sólo se pueden resolver de forma exacta mediante operaciones matemáticas. Las técnicas matemáticas disponibles actualmente suelen limitar el análisis de sistemas continuos a casos extremadamente simplificados.



Debido a la constante necesidad de analizar problemas continuos reales, ingenieros y matemáticos han ido proponiendo a través de los años diversos métodos de discretización. Para ello, han de efectuarse aproximaciones, que, como es evidente, no han sido abordadas de la misma forma por matemáticos que por ingenieros. Los matemáticos han desarrollado técnicas generales para la resolución de ecuaciones diferenciales mientras que los ingenieros, se han enfrentado a los problemas creando analogías entre un dominio continuo y elementos discretos reales, siendo a estos a los que se les atribuye el nacimiento de la expresión “elemento finito”. Pero es mérito de ambas ciencias, las matemáticas y la ingeniería, la consolidación del método de los elementos finitos como un procedimiento general de discretización de problemas continuos reales.

En la tabla 5-1 se muestra la consolidación del método de los elementos finitos como la integración de distintas técnicas de análisis haciendo referencia a los principales protagonistas de cada técnica y al año en el que la desarrollaron.

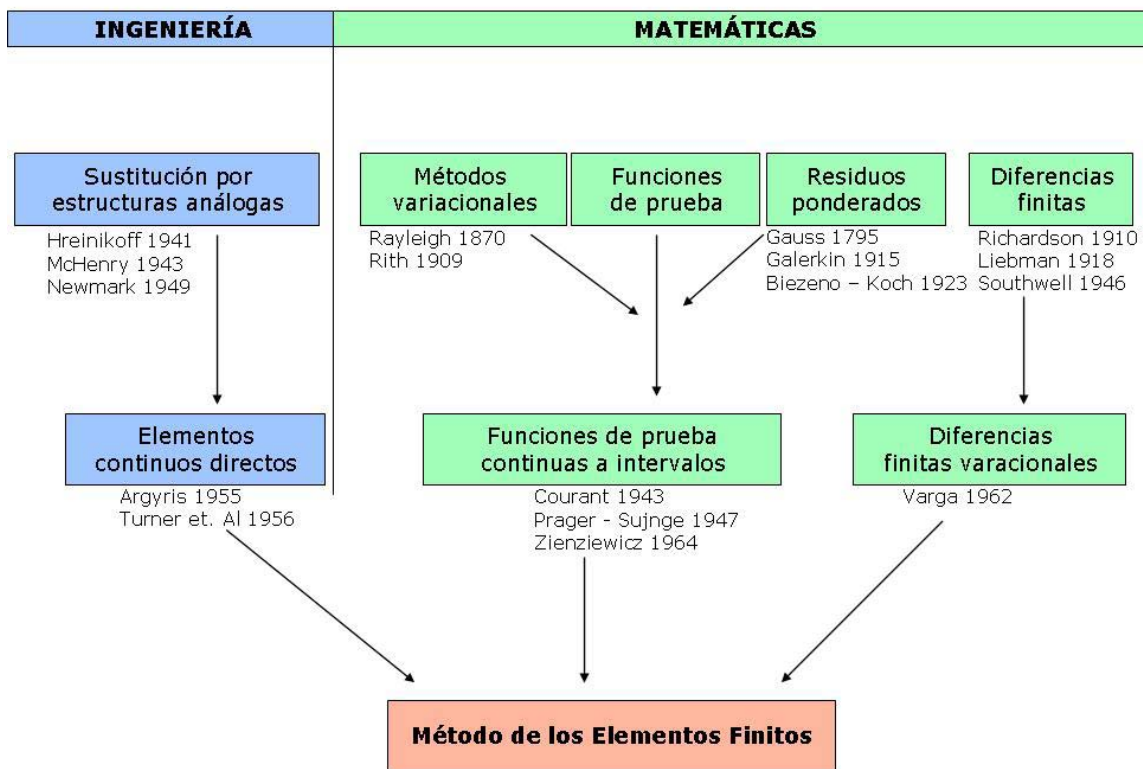


Tabla 5-1: Consolidación del Método de los Elementos Finitos

La principal aplicación de este método, y objeto de este proyecto, ha sido el cálculo de estructuras, pero cabe señalar que se emplea también para



redes de componentes eléctricos, conducciones hidráulicas y campos electromagnéticos [23].

5.1 PRINCIPIOS BÁSICOS Y APLICACIONES

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 [23].



La tabla 5-2 muestra un esquema de los pasos seguidos en la ejecución de un análisis por elementos finitos. En ella 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.

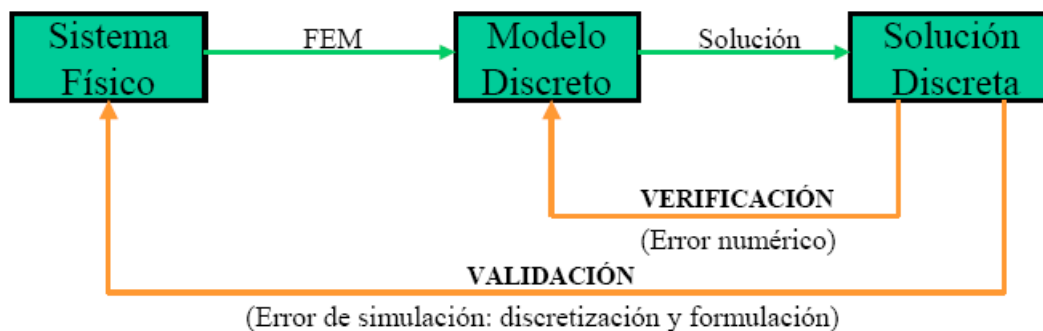


Tabla 5-2: Uso del Método de los Elementos Finitos

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.

5.2 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 [24] [25].

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.

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 [24]:

- 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. La figura 5-1 muestra un ejemplo sacado de este proyecto del trabajo computacional realizado por el software LS-DYNA. La imagen de la izquierda muestra el inicio de la simulación, donde se introduce en el software en nombre del archivo que previamente se ha tratado en LS-PrePost, usado como pre-procesador, y la imagen de la derecha muestra el final de la simulación, tras los cálculos realizados por el programa. En este caso, el mensaje “*Normal termination*” indica que se ha realizado con éxito la simulación, y proporciona los archivos necesarios para trabajar con LS-PrePost, usado como post-procesador, donde se estudian los resultados obtenidos.



```

Date: 05/02/2010      Time: 17:22:30

Livermore Software Technology Corporation
7374 Las Positas Road
Livermore, CA 94551
Tel: (925) 449-2500 Fax: (925) 449-2507
www.lstc.com

LS-DYNA, A Program for Nonlinear Dynamic
Analysis of Structures in Three Dimensions
Version: 970      Date: 05/13/2003
Revision: 3858      Time: 00:02:126

Features enabled in this version:
ANSYS Database Format
Shared Memory Parallel

Licensed to:
Platform :
OS Level : WINDOWS XP
Hostname : Sobremesa
Precision : Single precision (I4R4)
Unauthorized use infringes LSTC copyrights

Input file: dummy_position.k
expanding memory to 8500000

***** notice ***** notice ***** notice *****
* This is the LS-DYNA Explicit Finite Element code.
* Neither LSTC nor the authors assume any responsibility for
* the validity, accuracy, or applicability of any results
* obtained from this system. The user must verify his own
* results.
* LSTC endeavors to make the LS-DYNA code as complete,
* accurate and easy to use as possible.
* Suggestions and comments are welcomed. Please report any
* errors encountered in either the documentation or results
* immediately to LSTC through your site focus.
* Copyright (C) 1990-2003
* by Livermore Software Technology Corp. (LSTC)
* All rights reserved.
***** notice ***** notice ***** notice *****
contracting memory to 43520
expanding memory to 67040
expanding memory to 116732
expanding memory to 205940
expanding memory to 231015
expanding memory to 320103
expanding memory to 386158
expanding memory to 416658
expanding memory to 452158
expanding memory to 484756
expanding memory to 568499
expanding memory to 595193
expanding memory to 646673

70000 t 8.6674E+01 dt 1.24E-03 flush i/o buffers
70000 t 8.6675E+01 dt 1.24E-03 write d3dump07 file
70000 t 8.6675E+01 dt 1.24E-03 write runrst file
72681 t 9.0000E+01 dt 1.24E-03 write d3plot file
75000 t 9.2876E+01 dt 1.24E-03 flush i/o buffers
75000 t 9.2877E+01 dt 1.24E-03 write runrst file
76712 t 9.4999E+01 dt 1.24E-03 write d3plot file
80000 t 9.9077E+01 dt 1.24E-03 flush i/o buffers
80000 t 9.9078E+01 dt 1.24E-03 write d3dump08 file
80000 t 9.9078E+01 dt 1.24E-03 write runrst file
80744 t 1.0000E+02 dt 1.24E-03 write d3plot file
84776 t 1.0500E+02 dt 1.24E-03 write d3plot file
85000 t 1.0528E+02 dt 1.24E-03 flush i/o buffers
85000 t 1.0528E+02 dt 1.24E-03 write runrst file
88808 t 1.1000E+02 dt 1.24E-03 write d3plot file
90000 t 1.1148E+02 dt 1.24E-03 flush i/o buffers
90000 t 1.1148E+02 dt 1.24E-03 write d3dump09 file
90000 t 1.1148E+02 dt 1.24E-03 write runrst file
92840 t 1.1500E+02 dt 1.24E-03 write d3plot file
95000 t 1.1768E+02 dt 1.24E-03 flush i/o buffers
95000 t 1.1768E+02 dt 1.24E-03 write runrst file
96872 t 1.2000E+02 dt 1.24E-03 write d3plot file
96872 t 1.2000E+02 dt 1.24E-03 write d3dump10 file

***** termination time reached *****
96872 t 1.2000E+02 dt 1.24E-03 write d3plot file
Normal termination

Memory required for explicit solution : 861419
Additional dynamically allocated memory: 41634
Total: 903113

Timing information
-----
CPU(seconds) %CPU Clock(seconds) %Clock
Initialization ..... 2.0000E+00 0.20 1.8750E+00 0.18
Element processing ... 7.3300E+02 71.51 7.3239E+02 71.46
Binary databases ... 0.0000E+00 0.00 5.0100E-01 0.05
ASCII database ..... 8.0000E+00 0.78 6.2460E+00 0.61
Contact algorithm ... 2.2900E+02 22.34 2.3656E+02 23.08
Interface ID 1 1.7000E+01 1.66 2.2195E+01 2.26
Interface ID 2 9.8000E+01 9.56 9.3505E+01 9.12
Interface ID 3 2.4000E+01 2.34 2.5540E+01 2.49
Interface ID 4 6.0000E+00 0.59 6.9780E+00 0.68
Interface ID 5 7.0000E+00 0.68 6.9500E+00 0.67
Interface ID 6 7.7000E+01 7.51 7.8717E+01 7.68
Contact entities .... 0.0000E+00 0.00 0.0000E+00 0.00
Rigid bodies ..... 5.3000E+01 5.17 4.7259E+01 4.61
Implicit Nonlinear ... 0.0000E+00 0.00 0.0000E+00 0.00
Implicit Lin. Alg. ... 0.0000E+00 0.00 0.0000E+00 0.00
-----
Totals 1.0250E+03 100.00 1.0248E+03 100.00

Problem time = 1.2000E+02
Problem cycle = 96872
Total CPU time = 1025 seconds ( 0 hours 17 minutes 5 seconds)
CPU time per zone cycle = 2102 nanoseconds
Clock time per zone cycle= 2102 nanoseconds

Number of CPU's 1
Start time 05/02/2010 17:22:40
End time 05/02/2010 17:39:44
Elapsed time 1024 seconds ( 0 hours 17 minutes 4 seconds)

Normal termination
    
```

Figura 5-1: Ejemplo de simulación en LS-DYNA

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. La figura 5-2 muestra una vista general del entorno del programa LS-PrePost, del modelo de cinturón de dos puntos utilizado de este proyecto.

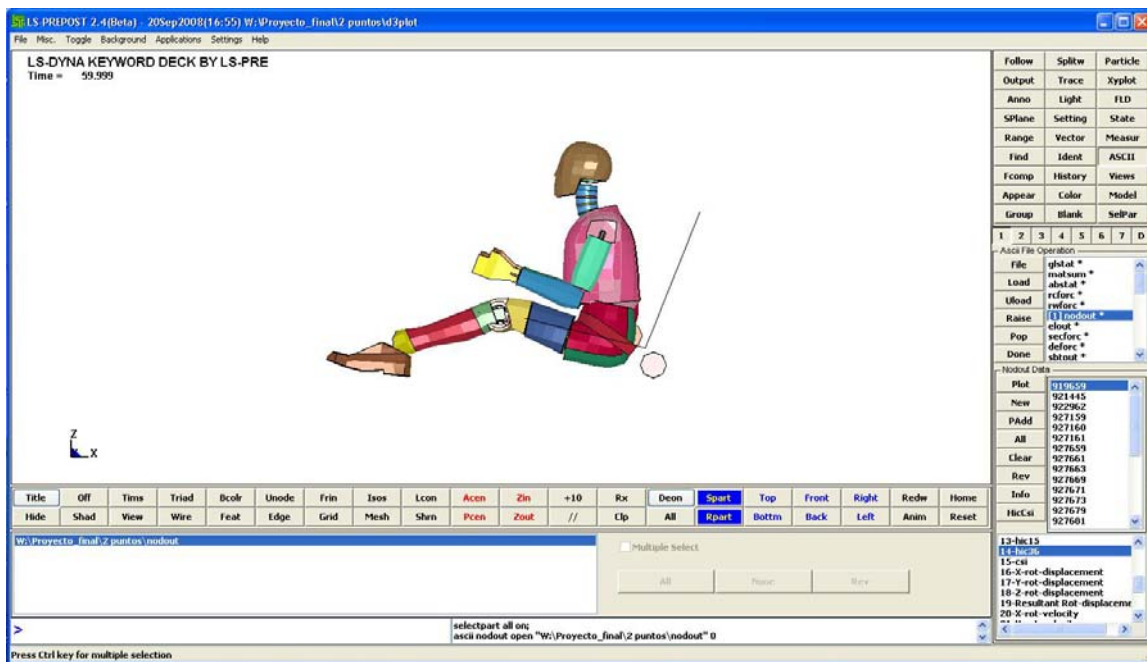


Figura 5-2: Ejemplo del entorno de LS-PrePost

Las figuras 5-3 y 5-4 muestran ejemplos de otras aplicaciones del software LS-DYNA, obtenidas de la página de Livermore Software Technology Corporation [26], y que simulan un choque lateral en un vehículo, y un pliegue de chapa.

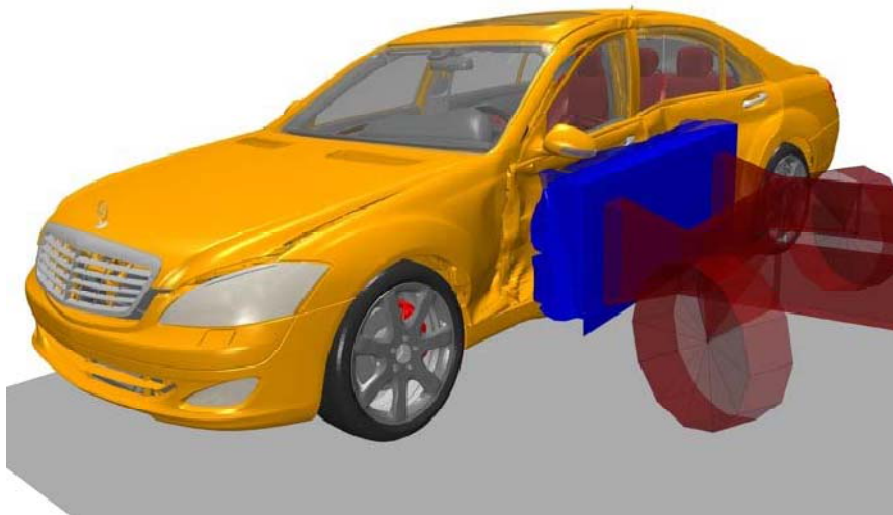


Figura 5-3: Ejemplo de choque simulado con LS-DYNA

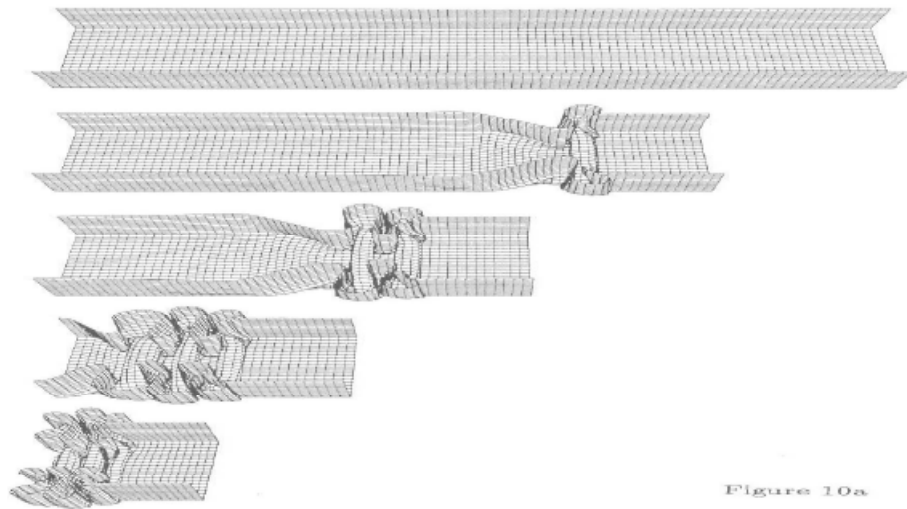


Figura 5-4: Pliegue de chapa simulado con LS-DYNA

La figura 5-5 muestra un ejemplo de gráfica de fuerza frente a tiempo obtenida con LS-PrePost, en un ejemplo de post-procesador analizando los resultados una vez LS-DYNA ha realizado la simulación correctamente. En el capítulo RESULTADOS se pueden ver gráficas obtenidas con LS-PrePost de los casos estudiados.

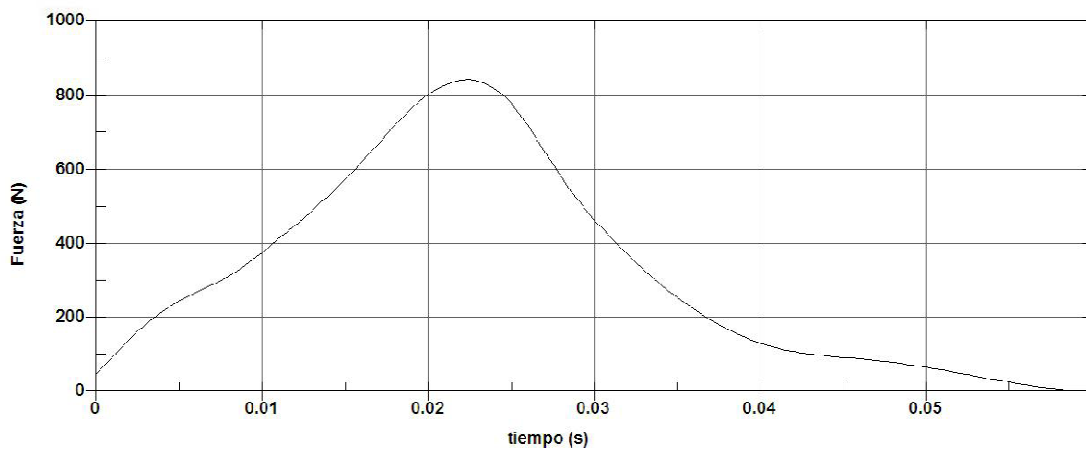


Figura 5-5: Gráfica de fuerza frente a tiempo de LS-PrePost



6 MODELO EMPLEADO **EN LA SIMULACIÓN**

Este proyecto pretende simular un ensayo de choque frontal definido por EuroNCAP, mediante un modelo de simulación formado por un dummy y un asiento. La simulación llevada a cabo es una mera simplificación de lo que en realidad ocurre cuando un vehículo colisiona frontalmente contra un muro, poste, otro vehículo o cualquier objeto que provoque su detención. Las partes que forman el modelo son el dummy, el vehículo y el cinturón de seguridad, y en el último caso, se añade un airbag y diferentes elementos, tales como volante, barra de dirección y reposapiés. Para ello se estudian tres casos distintos, A, B y C, sobre el mismo modelo en los que se varía siempre un único elemento, que es el cinturón de seguridad, como elemento principal en la seguridad pasiva de un vehículo, y siempre manteniendo la condición de choque frontal. El último caso, el D, sumando el airbag, lo incluiremos para dar apoyo de cara a la comparación de lesiones en el ocupante del vehículo. A continuación se explican las principales características de cada caso.

En el caso A el dummy está sujeto al vehículo mediante un cinturón de seguridad de dos puntos de anclaje, lo que le mantiene en contacto de la pelvis con el asiento.

En el caso B se mantienen las mismas propiedades que en el caso A, pero esta vez el dummy está retenido mediante un sistema de tres puntos, lo que permite sujetar el tronco al respaldo a la vez que la pelvis al asiento.

En el caso C, mismas propiedades que en los anteriores, pero ahora se trata de un arnés de cuatro puntos, dos puntos para retener la pelvis, y a su vez, aproximadamente por encima de cada hombro del dummy, provenientes de anclajes del asiento, dos uniones más que se van a abrochar al cinturón de dos puntos, sujetando el tronco simétricamente.

El caso D es similar al caso B, cinturón de seguridad de tres puntos, y además tiene un airbag para estudiar el efecto de la combinación de ambos elementos de seguridad pasiva.

La figura 6-1 muestra una vista general del caso B con la intención de definir el sistema de coordenadas del modelo, que es el mismo para los tres casos. La dirección de la marcha está definida por el eje X con el sentido positivo hacia detrás y la vertical está definida por el eje Z con el sentido positivo hacia arriba.

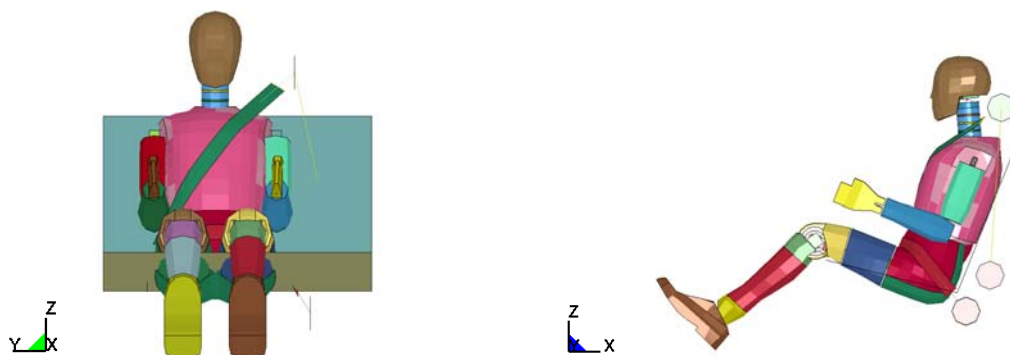


Figura 6-1: Sistema de coordenadas del modelo de simulación

Como ya se introduce en capítulos anteriores, para procesar la información y obtener los resultados se ha utilizado el procesador LS-DYNA y, tanto para introducir los datos en LS-DYNA como para interpretar los resultados obtenidos, se ha empleado el pre y post-procesador LS-PrePost, concebido específicamente para trabajar con LS-DYNA. Una característica de ambos programas y bastante común en los programas de elementos finitos es que no entienden de unidades, sólo de valores, por lo que el usuario ha de establecer las unidades para cada magnitud y que estas sean coherentes entre sí. La tabla 6-1 muestra las unidades empleadas en este modelo.

MAGNITUD	UNIDAD DE MEDIDA
<i>Masa</i>	<i>kg</i>
<i>Tiempo</i>	<i>ms</i>
<i>Longitud</i>	<i>mm</i>
<i>Fuerza</i>	<i>kN</i>

Tabla 6-1: Unidades del modelo de simulación

6.1 EL DUMMY

El modelo del dummy ha sido obtenido de la página oficial de LS-PrePost [26]. Este modelo simula un dummy híbrido tipo III de percentil 50 que representa a un varón de 1,78 metros de altura y 77 kilogramos de peso. Los dummies híbridos tipo III son los más comunes en la evaluación de daños en ensayos de choques frontales.

La geometría de un dummy es muy compleja y no es objeto de estudio de este proyecto por lo que no se entra en detalle de sus partes, simplemente se hace una comparación entre la imagen de uno real y el empleado en la simulación para apreciar su similitud. La figura 6-2 muestra la geometría de un dummy híbrido tipo III real y del modelo de simulación.

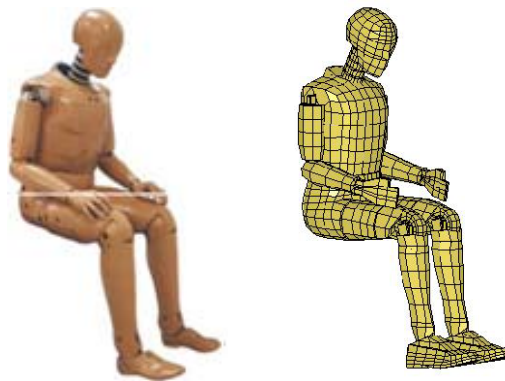


Figura 6-2: Dummy híbrido tipo III, real y modelo

El dummy híbrido tipo III empleado en la simulación es un modelo de elementos finitos que representa al dummy real lo más fielmente posible. Está desarrollado expresamente para LS-DYNA y con él se pretende obtener precisión, eficiencia computacional, fiabilidad y facilidad de uso. Los principales aspectos tenidos en cuenta en su desarrollo son [27]:

- Tamaño de malla uniforme para todos los componentes deformables del dummy. Este tamaño ha sido optimizado para obtener tanto precisión en

los resultados como velocidad computacional. La uniformidad en el tamaño hace que el modelo sea más fiable ya que el comando de contacto empleado para todos los componentes del dummy *AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_CONTACT está optimizado para mallados uniformes.

- Dotar de las verdaderas propiedades físicas al modelo sin bastas estimaciones y suposiciones. Esto no solo asegura una respuesta precisa, sino que incrementa la funcionalidad, ya que no se imponen limitaciones derivadas de estas estimaciones y suposiciones.

Los maniqués de prueba contienen tres tipos de instrumentación:

- Acelerómetros
- Sensores de carga
- Sensores de movimiento

6.1.1 ACELERÓMETROS

Un dummy real tiene instalados acelerómetros en puntos concretos de su geometría para medir las aceleraciones de distintas partes como la cabeza, el cuello, el pecho, la cadera, etc..... En el modelo son ciertas piezas las que cumplen la función de acelerómetros. En cada una de estas piezas hay que definir un sistema de coordenadas local caracterizado por los ejes X_A , Y_A , Z_A y su origen. La información que recogen se registra y almacena para luego, en el post-procesado, obtener la aceleración experimentada por estos acelerómetros virtuales en cada uno de sus ejes como una función del tiempo. En la figura 6-3 se muestra una vista general de los acelerómetros existentes en el dummy.

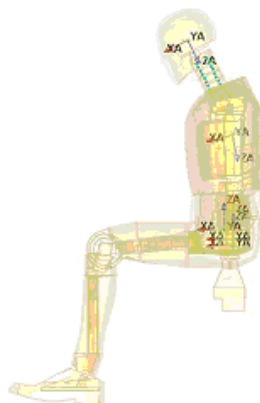


Figura 6-3: Vista general de los acelerómetros

Dentro de la cabeza del muñeco, hay un acelerómetro que mide la aceleración en tres direcciones. Al hacer la prueba de choque, se realizan unos gráficos que muestran la aceleración y posterior parada del cuerpo de una forma muy precisa.

En este proyecto el acelerómetro situado en la cabeza, más concretamente en el interior del cráneo, es objeto de estudio. Los datos obtenidos de este acelerómetro se analizan en el capítulo de RESULTADOS (capítulo 8). La aceleración que experimenta la cabeza es el parámetro que determina los daños en la masa cerebral. Con los valores registrados por este acelerómetro se establecen criterios que combinan el valor de aceleración alcanzado y su duración, ya que, como se explica a continuación, la duración de un valor determinado de aceleración es un dato muy importante. El cerebro es capaz de soportar valores grandes de aceleración en intervalos cortos de tiempo y no sufrir lesiones irreparables, por ejemplo 200 g's durante 2 milisegundos, pero no puede soportar valores que, aunque son más pequeños, perduran el suficiente tiempo como para provocar lesiones irreparables, por ejemplo, 80 g's durante 200 milisegundos [29]. En la figura 6-4 se muestra claramente la posición y la orientación de los ejes del acelerómetro situado en la cabeza.

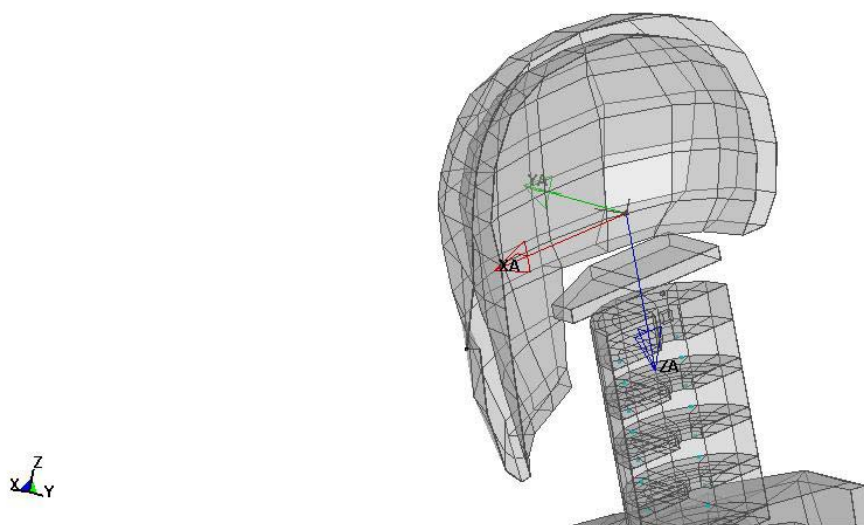


Figura 6-4: Acelerómetro de la cabeza

6.1.2 SENSORES DE CARGA

Dentro de los maniqués de prueba hay localizados sensores de carga, que miden la cantidad de fuerza en las diferentes partes del cuerpo durante un choque. Esto también se analiza mediante gráficos.



6.1.3 SENSORES DE MOVIMIENTO

Estos sensores se usan en el pecho del dummy. Miden cuanto se resiente el pecho en un accidente.

6.2 EL VEHÍCULO

El modelo del vehículo está sacado de la página web de Livermore Software Technology Corporation [26], y se compone de un asiento, y dependiendo del caso a estudiar, un cinturón de seguridad de dos, tres, o cuatro puntos de anclaje. Las partes que forman el vehículo no están unidas físicamente sino que se unen virtualmente con un comando propio del programa. Este comando une las distintas partes haciendo que se comporten como un único sólido rígido, evitándose el tener que crear la geometría completa, los contactos, etc....

El vehículo usado en el caso D, está sacado de la página de LS-PrePost [26], y es más complejo que el usado en los otros tres, ya que posee asiento, volante con airbag, reposapiés y barra de dirección. Al tratarse de un modelo sacado directamente simulado de la documentación de Ls-PrePost, no se entra en detalle, como si se hace para el modelo usado en los caso A, B y C, únicamente se utiliza en LS-PrePost para obtener resultados directamente, para después compararlos con los resultados obtenidos en las otras tres simulaciones. No es objeto de este proyecto definir o crear un modelo, sino a partir de un modelo sencillo, ajustando algún parámetro, crear otros similares para su estudio.

6.2.1 GEOMETRÍA

La geometría de las distintas partes del vehículo se puede apreciar en la figura 6-5. El asiento posee respaldo pero no reposacabezas y no se le ha conferido ningún tipo de forma ergonómica, el plano del respaldo forma 22° en el sentido de las agujas del reloj con el plano YZ, y el plano del asiento forma 14° en el sentido de las agujas del reloj con el plano XY, formando entre ellos 98° , según los ejes definidos al principio de este capítulo. Las cuatro partes que lo forman están modeladas con elementos tipo placa por lo que hay que especificar su espesor. Los anclajes tienen un espesor de 4 milímetros y el asiento de 0,8 milímetros. La figura 6-6 muestra las partes que forman el vehículo acotadas en milímetros, midiendo el respaldo 800x565 mm, y 800x479 mm la parte inferior.

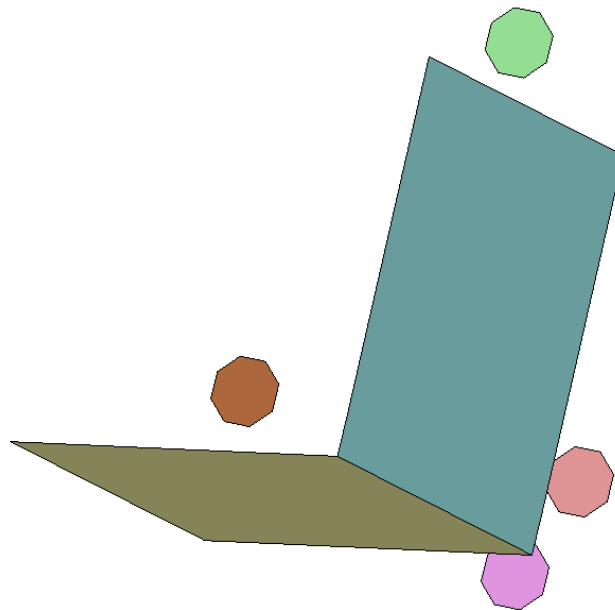


Figura 6-5: Vista general del vehículo

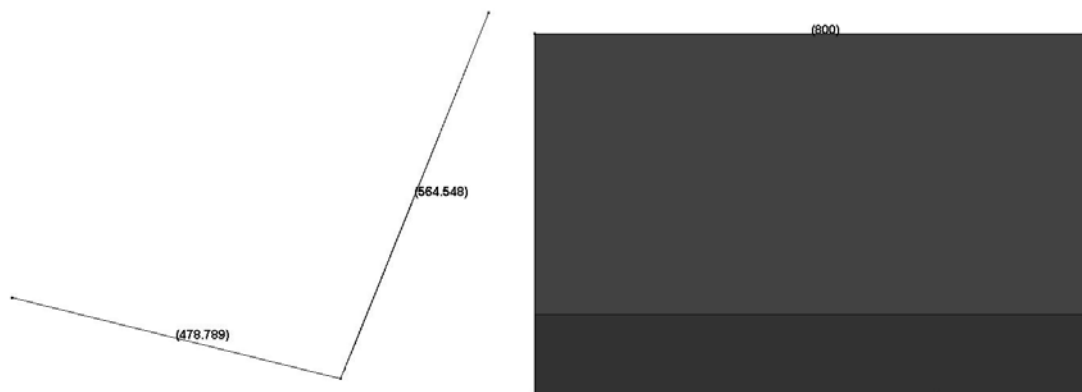


Figura 6-6: Asiento y anclajes acotados

En la figura 6-7 se puede ver la geometría del modelo del caso D, sin entrar en detalles de medidas.

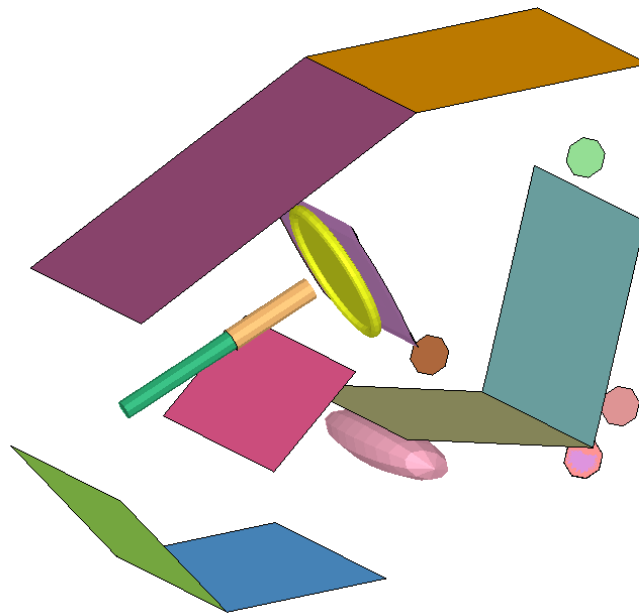


Figura 6-7: Vista general del vehículo, caso D

6.2.2 MATERIALES

La única función del vehículo simulado es la de soporte del dummy y del cinturón de seguridad, por lo que se ha supuesto un comportamiento de sólido rígido. El comando empleado en LS-DYNA para caracterizar el material, *MAT_RIGID, considera al cuerpo al que se le asigna como un sólido rígido pero, para caracterizar el contacto con otras partes se dota al material de módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson. El uso de este material supone un gran ahorro computacional y por tanto menor tiempo de procesado [24] [25]. El asiento es una parte definida como rígida en el problema que sí entra en contacto con otra, el dummy, pero que en vez de calcular las propiedades del contacto a partir del módulo de elasticidad y del coeficiente de Poisson, las calcula con un comando específico para definir contactos entre sólidos rígidos, por lo que el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson son datos que no se utilizan pero que han de ser proporcionados coherentemente por necesidad interna del programa. Lo mismo ocurre con los anclajes del cinturón de seguridad, no entran en contacto con ninguna parte del dummy o asiento, pero hay que definir su módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson. La tabla 6-2 muestra los valores de cada parámetro asignados a las distintas partes que forman el vehículo. La referencia para definir la posición de los anclajes del cinturón de seguridad es el dummy.



Parte	Módulo de elasticidad E (GPa)	Coefficiente de Poisson ν	Densidad ρ (kg/mm ³)
Asiento	200	0.3	$7.84 \cdot 10^{-6}$
Anclaje 1 (izquierda-abajo)	200	0.3	$7.84 \cdot 10^{-6}$
Anclaje 2 (izquierda-arriba)	200	0.3	$7.84 \cdot 10^{-6}$
Anclaje 3 (derecha-abajo)	200	0.3	$7.84 \cdot 10^{-6}$
Anclaje 4 (izquierda-detrás)	200	0.3	$7.84 \cdot 10^{-6}$

Tabla 6-2: Tabla de materiales

6.3 EL CINTURÓN DE SEGURIDAD

Este es el punto clave del proyecto, donde se puede apreciar el trabajo realizado en la elaboración de este proyecto, al margen de la obtención de resultados y su posterior interpretación. Partiendo de un modelo sacado de la página web de Livermore Software Technology Corporation [26], formado por un asiento y un dummy, se han elaborado tres modelos, uno con un cinturón de dos puntos de anclaje, sujetando la cintura del dummy, otro con un cinturón de seguridad de tres puntos y un último con un cinturón de seguridad de cuatro puntos de sujeción.

El modelo de simulación del cinturón de seguridad consta de dos partes bien diferenciadas, por un lado se encuentra la parte del cinturón que está en contacto con el dummy, y por otro, la parte del cinturón que se une a los anclajes. LS-DYNA y LS-PrePost tienen aplicaciones específicas para modelar cinturones de seguridad. La ventaja de las aplicaciones específicas, en este caso de LS-PrePost, es la facilidad con la que se puede crear la geometría y ajustar su posición al igual que se ajusta al cuerpo un cinturón de seguridad real. Sin esta aplicación, definir la geometría correcta de un cinturón de seguridad y ajustarlo a la forma del dummy sería un proceso muy complicado y laborioso.

6.3.1 GEOMETRÍA

Las zonas que van conectadas a los anclajes están modeladas con elementos unidimensionales, en cambio las zonas que están en contacto con el dummy están modeladas mediante elementos bidimensionales. En las figura 6-

8, 6-9, 6-10 y 6-11 se pueden apreciar en rojo los elementos unidimensionales y en verde los elementos bidimensionales, de los respectivos modelos.

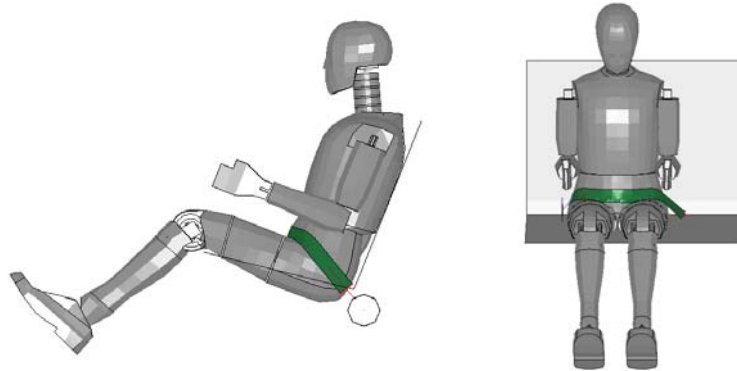


Figura 6-8: Modelo del cinturón de seguridad de dos puntos

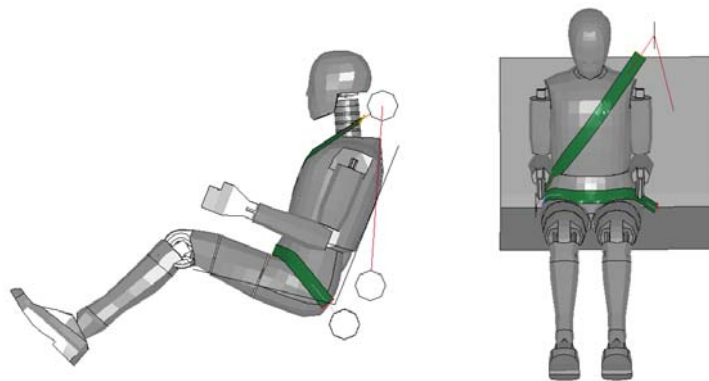


Figura 6-9: Modelo del cinturón de seguridad de tres puntos

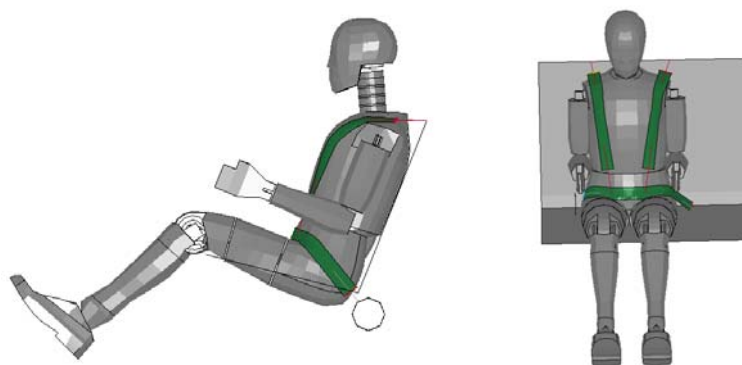


Figura 6-10: Modelo del cinturón de seguridad de cuatro puntos

En la figura 6-11 se observa que este modelo no cuenta con elementos bidimensionales en el cinturón de seguridad. En este caso el cinturón de seguridad está modelado únicamente con elementos unidimensionales. En el capítulo RESULTADOS se comprueba si afecta o no el hecho de tener un cinturón con elementos unidimensionales.

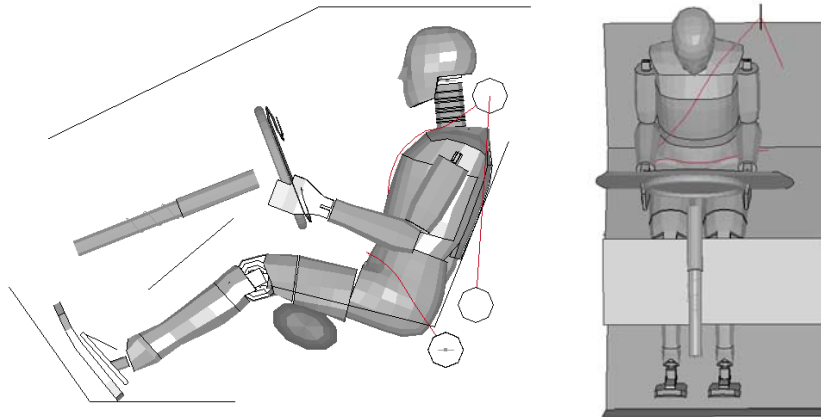


Figura 6-11: Modelo de cinturón de seguridad de tres puntos y airbag

La figura 6-12 muestra la geometría del cinturón de dos puntos de anclaje acotados en milímetros.

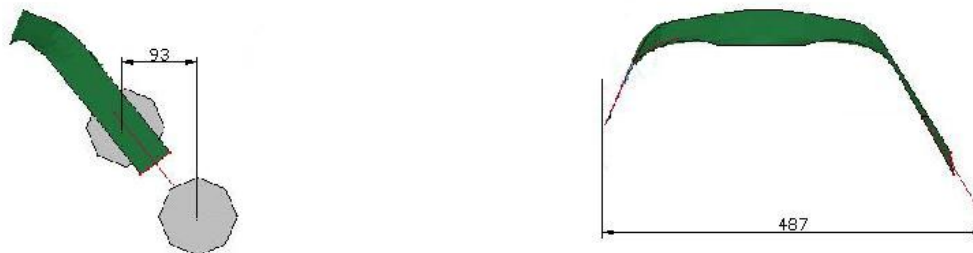


Figura 6-12: Cinturón de seguridad de dos puntos acotado

La figura 6-13 muestra la geometría del cinturón de tres puntos de anclaje acotados en milímetros.

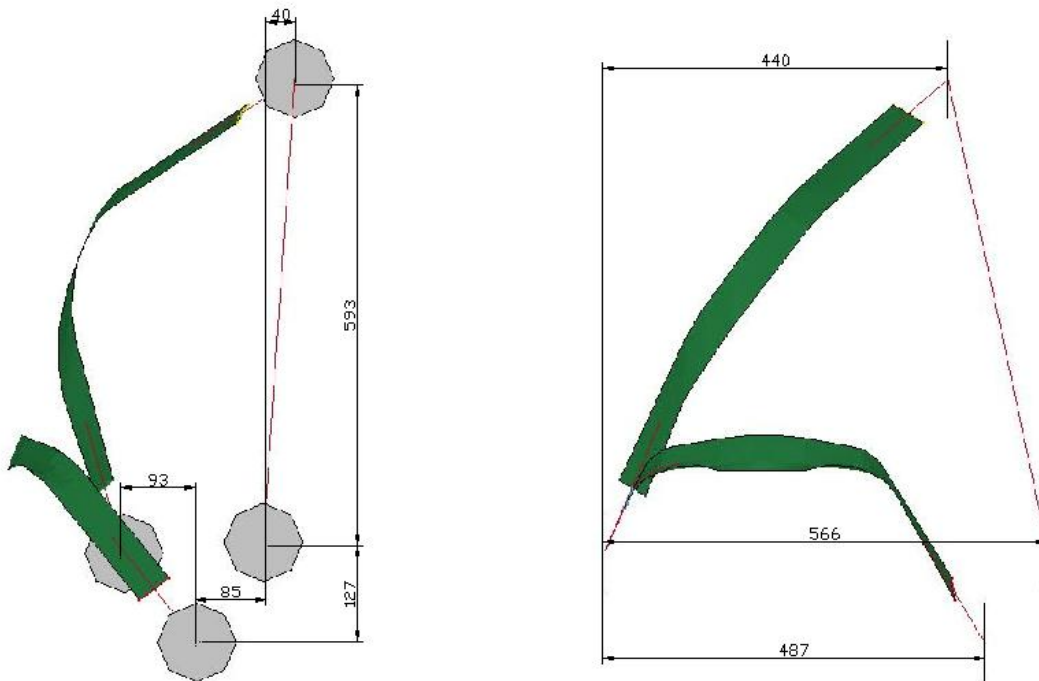


Figura 6-13: Cinturón de seguridad de tres puntos acotado

En la figura 6-14 muestra la geometría del cinturón con sus cuatro puntos de anclaje, acotados en milímetros.

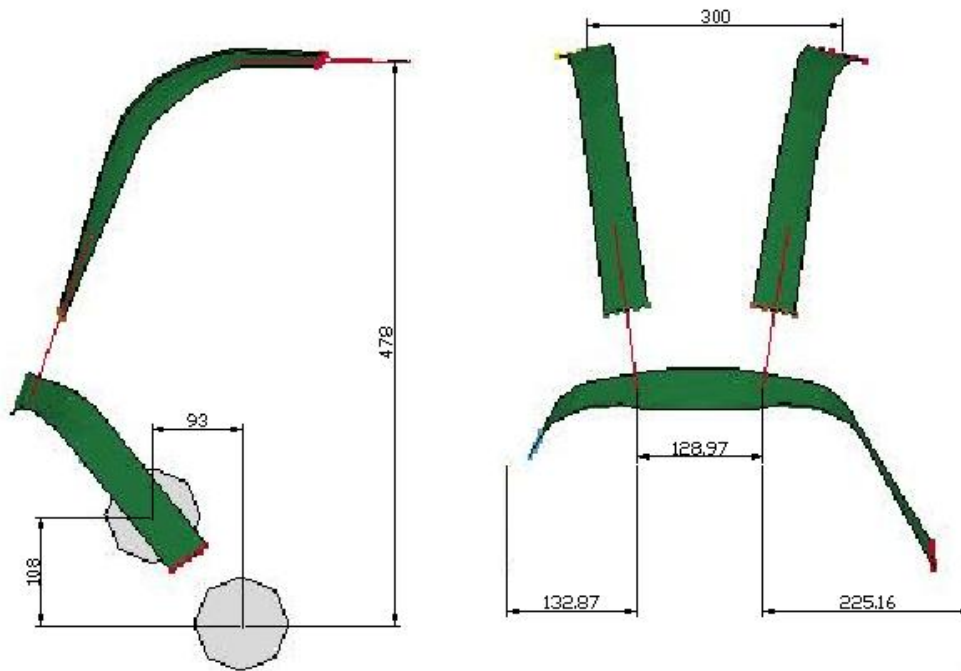


Figura 6-14: Cinturón de seguridad de cuatro puntos acotado

La espesor de los elementos bidimensionales es de 2 milímetros. Los elementos unidimensionales empleados son elementos específicos para simular el comportamiento de un cinturón de seguridad denominados en el programa *ELEMENT_SEATBELT. No es necesario definir la geometría de estos elementos para caracterizar su comportamiento, simplemente hay que aportar sus funciones de carga y descarga que relacionan la fuerza axial resultante en el cinturón con la deformación ingenieril [24] [25].

6.3.2 MATERIALES

El material empleado en los elementos unidimensionales queda caracterizado por los siguientes parámetros:

- Densidad lineal, que se representa por la letra λ .
- Funciones de carga y descarga, que representan la fuerza axial en función de la deformación ingenieril.

En el modelo del proyecto la densidad lineal del cinturón de seguridad es de $\lambda=5.97 \cdot 10^{-4}$ kg/mm. La figura 6-15 muestra la función de carga del cinturón y la figura 6-16 la de descarga.

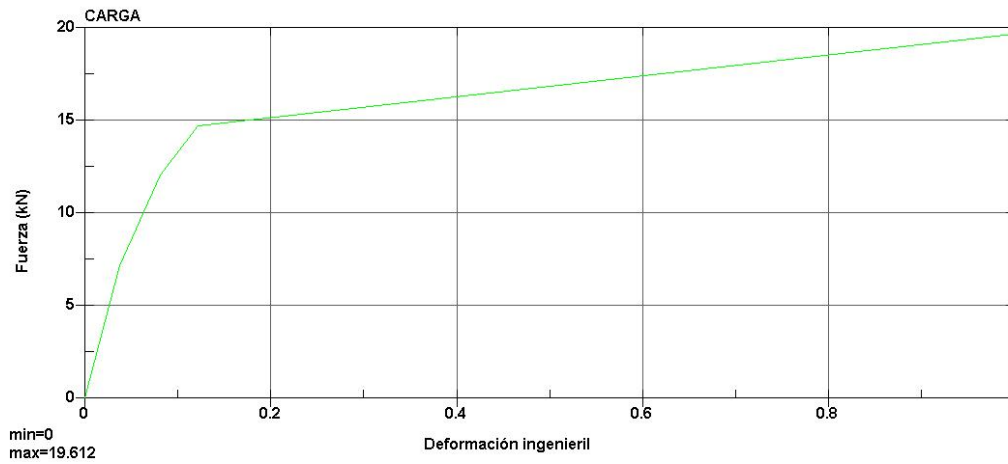


Figura 6-15: Función de carga del cinturón de seguridad

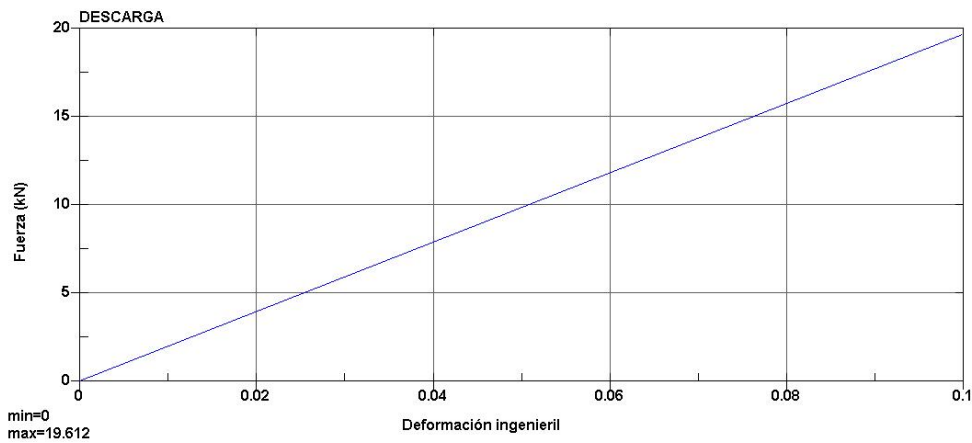


Figura 6-16: Función de descarga del cinturón de seguridad

El material de los elementos bidimensionales es de comportamiento elasto-plástico, es decir, que la tensión es linealmente dependiente de la deformación hasta que ésta supera el límite elástico y por tanto el material entra en plasticidad. Cuando esto ocurre la tensión y la deformación dejan de ser linealmente proporcionales. Los parámetros que definen el comportamiento del material empleado en el modelo se encuentran en la tabla 6-3.



Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Módulo de elasticidad	E	200	GPa
Coefficiente de Poisson	ν	0.3	No tiene unidades
Densidad	ρ	$7.83 \cdot 10^{-6}$	Kg/mm ³
Límite elástico	σ_y	0.15	GPa
Módulo de cortadura	G	2	GPa

Tabla 6-3: Parámetros del material del cinturón de seguridad

6.4 EL AIRBAG

El programa utilizado LS-PrePost, al igual que para el cinturón de seguridad, posee comandos específicos para los airbag, siendo sencillo el modelado de los mismos. El modelo de simulación del airbag consiste en la bolsa de aire, el recipiente metálico y las ecuaciones termodinámicas que caracterizan el llenado. Gracias a aplicaciones específicas de LS-DYNA y LS-PrePost se puede simular el comportamiento de este sistema con gran eficiencia computacional y precisión en los resultados mediante un proceso sencillo, siendo en la realidad un problema complejo [6].

Este apartado no entra en más detalle respecto al airbag ya que en el modelo principal no aparece, y al explicar la simulación de llenado y los materiales hay que comentar las condiciones termodinámicas, algo que no es objeto de estudio en este proyecto.

6.5 CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno son las relaciones que se establecen entre las partes que forman el problema para su posible resolución. Están incluidos dentro de las condiciones de contorno los contactos, la velocidad inicial y los desplazamientos, velocidades y aceleraciones impuestas.

Un choque frontal supone una fuerte aceleración en sentido contrario a la marcha que provoca pasar de ir a una determinada velocidad a detenerse, todo ello en un intervalo de tiempo que no alcanza ni un segundo de duración. Con el fin de simplificar la implementación se van a impedir los desplazamientos del vehículo y se va a imponer una aceleración al dummy semejante a la que tendría lugar en un choque frontal. Los efectos son



semejantes, ya que las velocidades inicial y final no son las que producen los daños sino que es la aceleración que sufren los cuerpos la que provoca las lesiones. A continuación se detalla cada una de las condiciones de contorno que se establecen en el caso estudiado en el proyecto.

6.5.1 VELOCIDAD INICIAL

La velocidad inicial de todas las partes es cero y como LS-DYNA toma este valor por defecto, no hay que especificarla.

6.5.2 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 dummy mediante el comando *LOAD_BODY_GENERALIZED. El valor de la aceleración se introduce como una función del tiempo, en este caso toma el valor constante de 0.00981 mm/ms^2 .

6.5.3 ACELERACIÓN IMPUESTA

La aceleración impuesta que simula la condición de choque frontal se aplica a los nodos que forman el asiento. La aceleración tiene dirección longitudinal y sentido hacia atrás (sentido positivo del eje X según los ejes definidos en el problema). Para delimitar la aceleración, se emplea el comando *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID, en el que se define una curva para caracterizar la aceleración frente al tiempo.

La figura 6-17 muestra la gráfica, que se ha elegido siguiendo los criterios de un tutorial de LS-PrePost y de la documentación utilizada, y que rige según los criterios de ensayos de choque de la directiva 96/79/CE. Esta gráfica está definida de modo que se supone una velocidad inicial de 54 km/h y un proceso de detención llevado a cabo en 120 milisegundos.

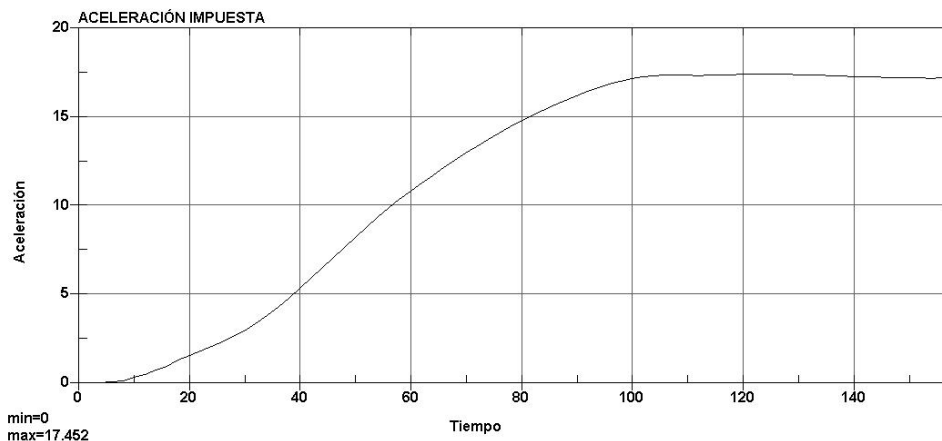


Figura 6-17: Función de aceleración impuesta

6.5.4 VEHÍCULO: CONEXIÓN Y DESPLAZAMIENTO

Para mantener los componentes del vehículo rígidamente unidos se ha hecho uso del comando `*CONSTRAINED_RIGID_BODIES`, el cual une partes distintas aunque no sean continuas como si fueran un único sólido rígido. Al estar unidas todas las partes del vehículo, y al aplicarle las adecuadas condiciones de contorno al dummy, para que se mantenga unido también al asiento y a los cinturones de seguridad, el desplazamiento del vehículo simula el choque.

6.5.5 CONTACTO: ASIENTO

El contacto entre el asiento y las partes del dummy es ligeramente distinto a los contactos definidos anteriormente. El comando empleado esta vez es `*RIGID_BODY_ONE_WAY_TO_RIGID_BODY`. Este comando calcula los esfuerzos tangenciales al plano del contacto a partir del rozamiento producido entre superficies y los esfuerzos normales gracias a una función aportada por el usuario que relaciona fuerza normal resultante (variable dependiente) con distancia penetrada (variable independiente). La fuerza definida en la función aportada para definir el contacto es la resultante total aplicada en la superficie que ha atravesado cada uno de los cuerpos y en dirección normal a la misma y la distancia es la máxima penetración de cualquiera de los nodos. La función se muestra en la figura 6-18.

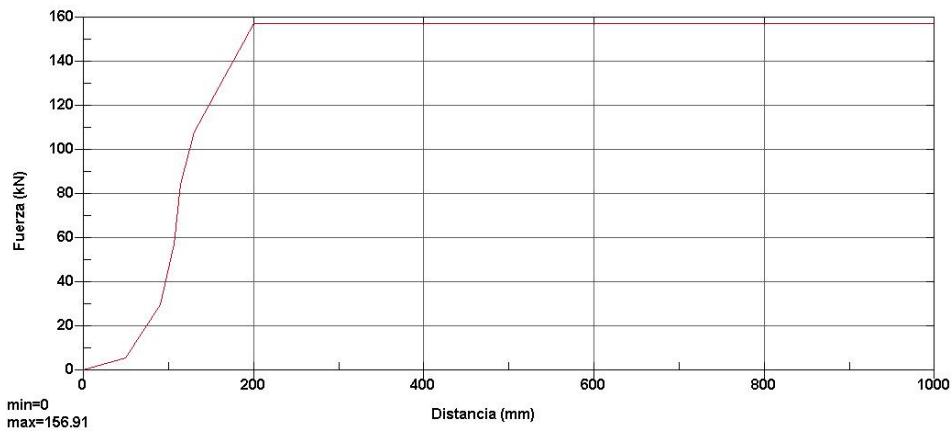


Figura 6-18: Función de fuerza frente a distancia

6.5.6 CONTACTO: CINTURÓN

El contacto entre el dummy con los diferentes sistemas de seguridad, airbag y cinturón de seguridad, está 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 mostrada a continuación se puede obtener el coeficiente de rozamiento en función de la velocidad relativa entre superficies en contacto y así, los esfuerzos tangenciales entre las partes [24] [25]:

$$\mu = \mu_d + (\mu_e - \mu_d)^{-c \cdot v_{rel}}$$

$$\mu_e = 0.5 \qquad \mu_d = 0.5 \qquad \rightarrow \mu = 0.5$$

Donde μ_e es el coeficiente de rozamiento estático, μ_d es el coeficiente de rozamiento dinámico, c es una constante definida para cada tipo de contacto y v_{rel} es la velocidad relativa de una superficie sobre la otra, es decir, la velocidad de cualquiera de las dos superficies que participan en el contacto considerando como observador la otra superficie. Al ser iguales el coeficiente de rozamiento estático y el dinámico el segundo término de la parte derecha de la ecuación es siempre cero, sea cual sea el valor de c y de v_{rel} .

En dirección normal al contacto se producen reacciones debidas a la deformación de las partes. En las partes pertenecientes al dummy, como se menciona anteriormente al hablar del tipo de material *MAT_RIGID, la fuerza resultante se calcula a partir del módulo de elasticidad y el coeficiente de poisson introducidos en el material.



7 CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LESIONES

Los ensayos de choque o *crash-test* no sirven para nada si no se recogen los suficientes datos para evaluar los daños en los ocupantes. Ya en algún capítulo anterior se comenta algún criterio que usan los diferentes organismos para evaluar los daños que sufren los dummies en los ensayos de choque frontal. Este capítulo entra más en detalle y muestra los principales requisitos en materia de seguridad del ocupante que tienen que superar los vehículos para su homologación antes de salir al mercado, y que se utilizan en el capítulo RESULTADOS para comprobar la validez de los distintos casos en estudio.

En primer lugar, se empieza con los criterios que están vigentes en Europa, por la Directiva 96/79/CE [28], aprobada por el Parlamento Europeo, y que rige la norma para la homologación en Europa, y por supuesto en España.



En segundo lugar, se añade información procedente de la NHTSA [22], dado que LS-PrePost posee algún criterio usado por esta agencia, y permite calcularlo de manera sencilla, y así ayudar a conocer los parámetros.

Por último, se expone una tabla que muestra los umbrales biomecánicos del cuerpo humano, que se van a utilizar para sacar algún resultado y poder compararlo.

7.1 DIRECTIVA 96/79/CE

En Europa, la realización de ensayos de choque frontal está normalizada por la Directiva 96/79/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 1996. Dicha directiva es relativa a la protección de los ocupantes de los vehículos de motor en caso de colisión frontal y modifica a la antigua Directiva 70/156/CEE. A continuación se resume los principales requisitos que recoge.

7.1.1 REQUISITOS PARA SUPERAR LAS PRUEBAS DE CHOQUE FRONTAL

Los criterios de comportamiento registrados en los maniqués situados en los asientos delanteros laterales deberán ajustarse a los siguientes valores:

- La norma de referencia en el ensayo de comportamiento de la cabeza (NCC) no será superior a 1 000, y la aceleración resultante de la cabeza no superará los 80 g a lo largo de más de 3 ms. Esta última corresponde a un cálculo acumulativo que excluye el movimiento de retroceso de la cabeza.
 - Se considerará que se ha cumplido esta norma cuando, durante el ensayo, no haya contacto entre la cabeza y cualquier componente del vehículo.
 - Si tal no fuera el caso, se calculará el valor de la NCC basándose en la aceleración (a), medida de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$NCC = (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^{2,5}$$

Donde “ a ” es la aceleración resultante medida en unidades de gravedad: g ($1 \text{ g} = 9,81 \text{ m/s}^2$). Si el comienzo del contacto de la cabeza puede ser determinado satisfactoriamente, t_1 y t_2 son los dos instantes, expresados en segundos, que limitan el intervalo entre el



principio del contacto de la cabeza y el final del registro cuyo valor de NCC es máximo.

Si el comienzo del contacto de la cabeza no puede determinarse, t_1 y t_2 son los dos instantes, expresados en segundos, que limitan el intervalo entre el principio y el final del registro cuyo valor de NCC es máximo.

Los valores de la NCC cuyo intervalo de tiempo (t_1-t_2) sea superior a 36 ms no se tendrán en cuenta en el cálculo del valor máximo.

- Las normas de referencia en el ensayo de lesión del cuello (NLC) no superarán los valores que figuran en las figuras 7-1 y 7-2.

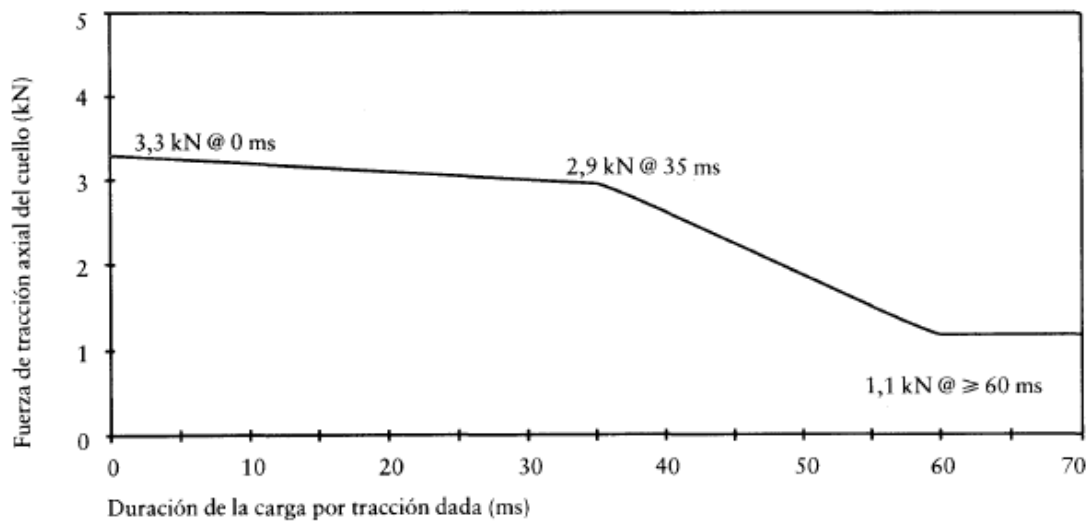


Figura 7-1: Norma de referencia para la tracción del cuello

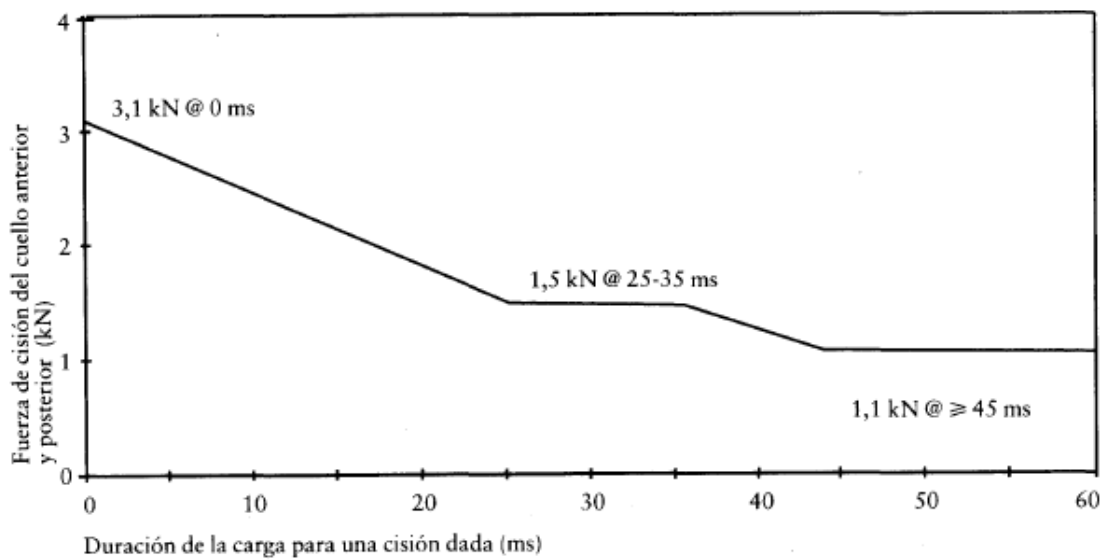


Figura 7-2: Norma de referencia para la cisión del cuello

- El movimiento de flexión del cuello alrededor del eje «y» no superará los 57 Nm en extensión.
- La norma de referencia en el ensayo de compresión del tórax (NCT) no será superior a 50 mm.
- La norma de referencia en el ensayo de fuerza del fémur (NFF) no será superior a la norma de referencia en el ensayo de fuerza-tiempo que aparece en la figura 7-3.

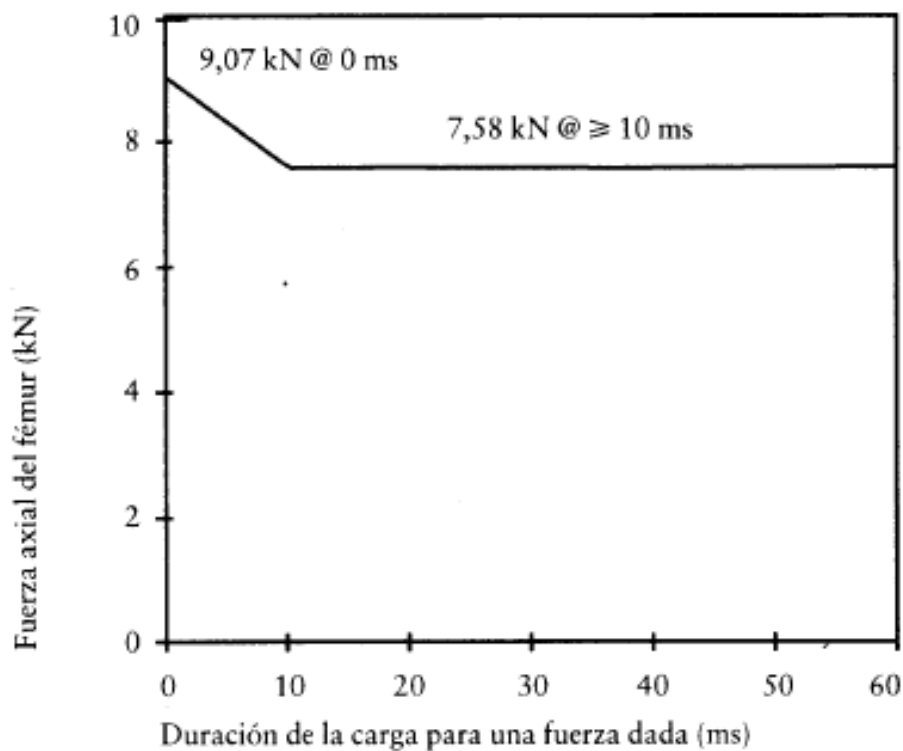


Figura 7-3: Norma de referencia para la fuerza del fémur

- La norma de referencia en el ensayo de fuerza de compresión de la tibia (NFCT) no superará los 8 kN.
- El índice de la tibia (IT), medido en la parte superior e inferior de cada tibia, no será superior a 1,3 en cada una de las posiciones.
- El movimiento de las articulaciones de la rodilla no será superior a 15 mm.
- 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.
- Extraer los maniqués intactos del vehículo sin ajustar los asientos.



7.1.2 VELOCIDAD DE ENSAYO

La velocidad del vehículo en el momento del impacto es de 56 -0 +1 km/h. Sin embargo, si el ensayo se efectúa a mayor velocidad y el vehículo cumple los requisitos, se considera que los resultados son satisfactorios.

7.2 NHTSA

La NHTSA es el organismo que regula los ensayos de colisión en EEUU, por lo que usa diferentes parámetros y exige otros requisitos para superar las pruebas de colisión frontal que la directiva europea expuesta en el apartado anterior. Este proyecto se basa en los requisitos de la directiva europea 96/79CE para analizar los resultados de la simulación de choque frontal, pero dado que en la información recogida sobre LS-DYNA, se han encontrado otros parámetros que se pueden obtener directamente en LS-PrePost, se introducen para utilizarlos como un complemento a la hora de estudiar los diferentes casos.

La norma que utiliza la NHTSA para calcular los daños en la cabeza, por ejemplo, son similares a los utilizados por la directiva 96/79/CE, pero en el caso de los daños en el pecho del ocupante, además de calcular la compresión del tórax, añade dos índices que no son utilizados por la directiva europea. Éstos índices son el CSI (Chest Severity Index) o Índice de Severidad en el Pecho, y el CLIP3M. El CLIP3M mide la aceleración resultante máxima en un intervalo de 3 ms, y no debe exceder de 60 g's [22]. El CSI es un índice parecido al NCC usado para los daños en la cabeza, y según la documentación encontrada, para considerar que el maniquí no sufre daños, no puede superar un valor de 700. El CSI se basa en la aceleración, y se calcula con la siguiente fórmula:

$$CSI = \left[\int_{t_1}^{t_2} a_c(\tau)^{2.5} d\tau \right]$$

Donde a_c es la aceleración del pecho en g's., y t_1 y t_2 son el tiempo inicial y final de la colisión, respectivamente.

7.3 UMBRALES BIOMECÁNICOS DEL CUERPO HUMANO

El cuerpo humano tiene unos límites, y superando dichos límites se corre un serio riesgo de lesión. Estos datos se utilizan en los RESULTADOS, ya que se usan para comparar la aceleración en la pelvis de los modelos simulados, con el valor de 50-80 g's, que es la tolerancia que tiene esta zona del cuerpo humano a la aceleración. La tabla 7-1 muestra éste, y otros valores del cuerpo



humano en los que se puede observar que, tanto los datos que usan para definir las normas de lesión en las diferentes partes del cuerpo la directiva 96/79/CE como los que usa la NHTSA, están basados en los umbrales biomecánicos del cuerpo humano [29].

Parte del cuerpo	Magnitud medida	Tolerancia
Todo el cuerpo	$a_x máx$ $a_x medida$	40-80g 40-45g, 160-220 ms
Cerebro	$a_x máx, a_y máx$	100-300 g Curva WSU con 60 g $t > 45$ ms 1800 750 rad/s ²
Cráneo	$a_x máx, a_y máx$	80-300g para la superficie de impacto de mayor tamaño
Frente	$a_x máx$ $F_x máx$	120-200g 4000-6000 N
Columna vertebral	$a_x máx$ Tórax $a_y máx$ Tórax F_x $\alpha máx$ hacia delante $\alpha máx$ hacia atrás Deformación	30-40 g 15-18 g 1200-2600 N Esfuerzo cortante 80°-100° 80°-90° 45 mm
Pecho	$a_x máx$ F_x S_x	40-60 g, $t > 3$ ms 60 g, $t < 3$ ms 4000-8000 N 5-6 cm
Pelvis y muslo	F_x a_x	6400-12500 N Esfuerzo sobre la rodilla 50-80 g (pelvis)
Tibia	F_x E_x M_x	2500-5000 N 150-210 N 120-170 N

Tabla 7-1: Umbrales biomecánicos del cuerpo humano

Los términos referenciados en la tabla 7-1 son: a , la aceleración medida en la parte del cuerpo indicada, F_x es la fuerza axial ejercida en zona indicada, α son los grados de inclinación respecto a la vertical, S_x es la deformación en el pecho es la compresión, y en la tibia, E y M son fuerzas ejercidas en otra dirección diferente a la axial.



8 RESULTADOS

En 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 valoran 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. En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de cada uno de los casos de ensayo de choque frontal planteados en el capítulo 6.

Tras procesar los casos planteados, 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 y un largo etc.... Gracias a LS-PrePost se pueden visualizar los resultados obtenidos y trabajar con ellos en un entorno gráfico. En los apartados 8.1, 8.2, 8.3 y 8.4 se muestran las secuencias de imágenes, las gráficas de esfuerzos y deformaciones y algún criterio específico para la evaluación de lesiones en ocupantes de vehículos obtenidos de los casos A, B, C y D respectivamente. Para la obtención de resultados se ha utilizado como documento orientativo la directiva europea 96/79/CE [19] en la que, con carácter legal, se recogen criterios de evaluación

de los datos obtenidos tras un ensayo de choque frontal de un vehículo motor. En esta directiva se apoyan los resultados mostrados de la norma de comportamiento de la cabeza, la norma de compresión del tórax, la norma de lesión del cuello y la norma de fuerza del fémur. El Índice de Severidad del Pecho (CSI) y la aceleración resultante máxima del pecho (CLIP3M), obtenidos también, se basan en la norma de la NHTSA, y por último, la aceleración en la pelvis se ha comparado con el criterio del umbral biomecánico del cuerpo humano.

8.1 CASO A: CHOQUE FRONTAL CON CINTURÓN DE SEGURIDAD DE DOS PUNTOS Y SIN AIRBAG

El caso A, como se menciona anteriormente, estudia una simulación de colisión frontal, en la que el dummy, como objeto de estudio, sólo está sujeto al asiento mediante un cinturón de dos puntos, el cuál sujeta la pelvis, pero deja mucha libertad a la parte superior del tronco. En este caso, al igual que en los dos siguientes, no hay ningún objeto delante, véase airbag o salpicadero, así que el dummy se inclina un ángulo bastante superior a si estuviese sujeto en la parte superior. La figura 8.1 muestra una vista general del caso A.

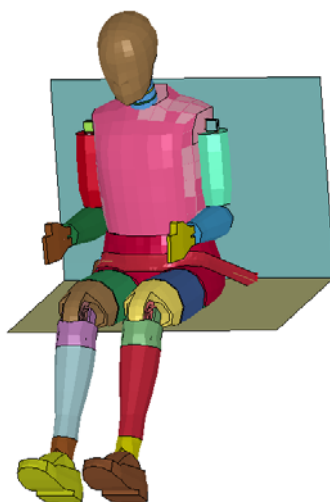


Figura 8-1: Vista general, caso A

En la tabla 8-1, se puede ver unas capturas que sirven a modo de secuencia, para observar lo ocurrido durante la simulación. El tiempo total estudiado es de 120 milisegundos, y se muestran imágenes desde el instante inicial, $t = 0$ ms, al final, $t = 120$ ms, en intervalos de 15 ms.










t = 0 ms	t = 15 ms	t = 30 ms
		
t = 45 ms	t = 60 ms	t = 75 ms
		
t = 90 ms	t = 105 ms	t = 120 ms
		

Tabla 8-1: Secuencia de imágenes, caso A

En las imágenes se observa que el movimiento descrito por el dummy no es el adecuado, ya que no existe sujeción del tronco, y la posición final que adopta el maniquí indica que no supera las pruebas de choque. A continuación, se comprueba por separado los requisitos expuestos en la directiva 96/79/CE para superar la prueba de impacto frontal, los basados en la norma de la NHTSA, y el umbral biomecánico del cuerpo humano en la pelvis.

8.1.1 NORMA DE COMPORTAMIENTO DE LA CABEZA (NCC ó HIC)

Como establece la directiva 96/79/CE para saber los daños producidos en la cabeza tras un impacto frontal, se recoge el valor de la aceleración registrada en la cabeza a lo largo del suceso y posteriormente se calcula el HIC. La gráfica del HIC-36 superpuesta con la aceleración de la cabeza, obtenida del programa LS-PrePost, se muestra en la figura 8-2. El valor del HIC alcanza 2014, y la aceleración máxima es de 116.56 g's. No se considera válido el resultado porque si bien la cara no impacta con ninguna parte dura del vehículo, la aceleración de la cabeza está por encima de 80 g's durante más de 3 ms, y el valor del HIC es superior a 1000, valor máximo que establece la norma, por lo que se producen daños en el ocupante del vehículo.

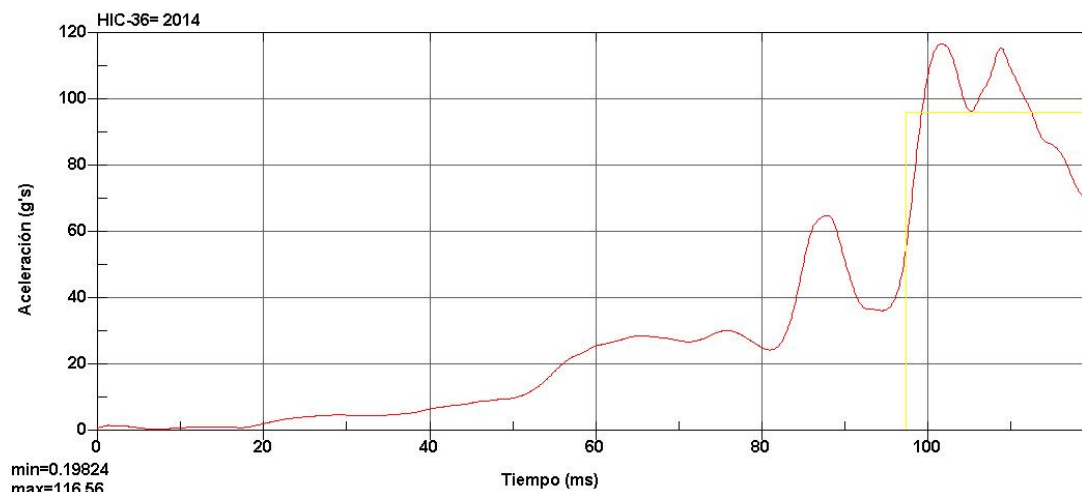


Figura 8-2: HIC-36, caso A

8.1.2 ÍNDICE DE SEVERIDAD EN EL PECHO (CSI)

La NHTSA establece que para comprobar el daño causado en el pecho, hay que obtener el valor del CLIP3M (aceleración resultante máxima en 3 ms), y del CSI (Índice de Severidad en el Pecho) a lo largo del suceso. La gráfica de la aceleración del pecho obtenida con LS-PrePost se muestra en la figura 8-3. Se aprecia como el valor de la aceleración alcanza su máximo, 57.01 g's, poco después de 100 ms después del impacto, y el valor del CSI es de 240.6. En este caso, con estos parámetros, sí supera las pruebas, pero como se sabe por los resultados anteriores, no lo hace. El hecho de no tener cinturón diagonal en la zona del pecho hace que no se tomen estos índices como algo representativo.

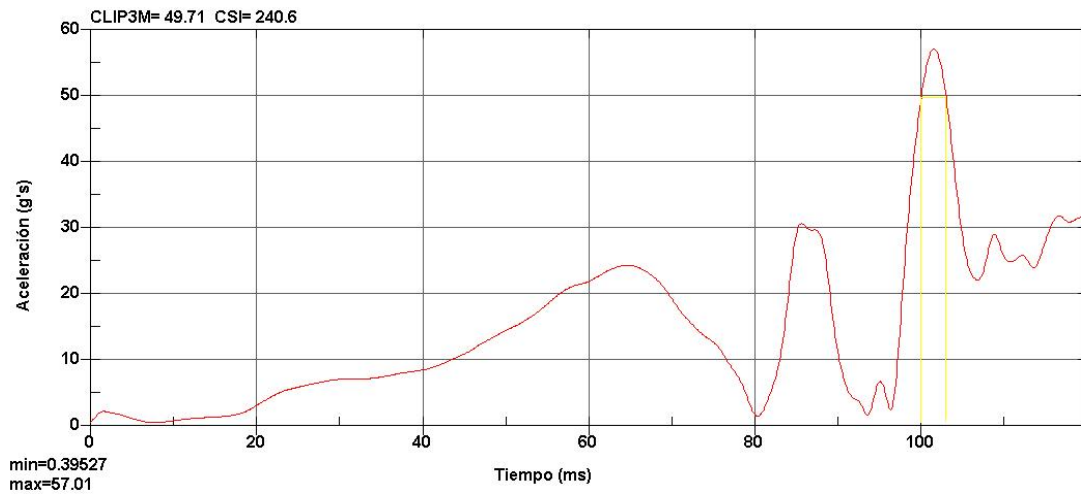


Figura 8-3: CSI, caso A

8.1.3 NORMA DE COMPRESIÓN DEL TÓRAX

La directiva 96/79/CE establece que para comprobar los daños en el pecho, o tórax, hay que obtener el valor de la compresión en el mismo a lo largo del suceso. La gráfica de la compresión en el tórax obtenida del programa LS-PrePost se muestra en la figura 8-4. La compresión máxima es de 1.16 mm, inferior a los 50 mm que marca dicha directiva como valor límite. En este caso, al no tener cinturón diagonal, no hay nada que ejerza presión sobre el tórax, por lo que esta gráfica no sirve para sacar conclusiones.

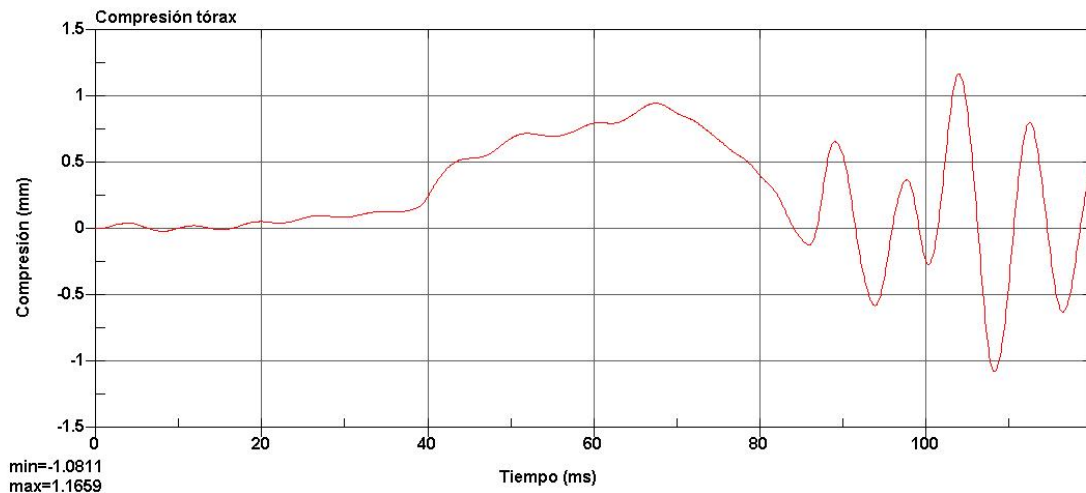


Figura 8-4: Compresión del tórax, caso A



8.1.4 ACELERACIÓN EN LA PELVIS

El programa LS-PrePost, nos permite obtener la aceleración en la pelvis de una manera sencilla, por lo que, aunque ningún criterio definido lo especifique para sus pruebas, se incluye en RESULTADOS, y se usa como referencia los umbrales biomecánicos del cuerpo humano, que especifica para la pelvis, un valor de entre 50-80 g's como umbral de tolerancia. En este caso, el valor máximo recogido, 47.18 g's, no supera dicho umbral, como se observa en la figura 8-5, obtenida con LS-PrePost.

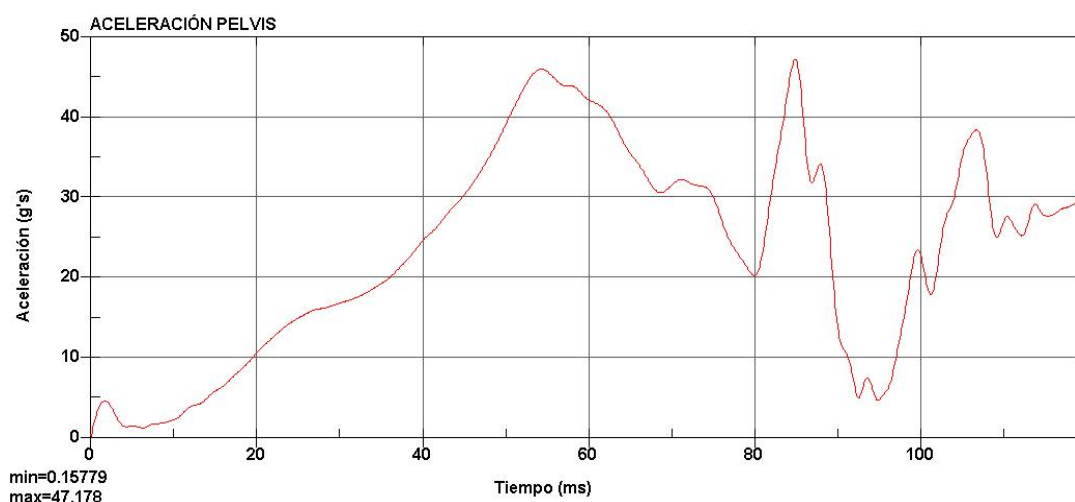


Figura 8-5: Aceleración en la pelvis, caso A

8.1.5 NORMA DE LESIÓN DE CUELLO

La directiva 96/79/CE establece para comprobar la lesión del cuello el cálculo de dos esfuerzos a lo largo del suceso, los esfuerzos de cisión y de tracción. Las gráficas de estos esfuerzos obtenidas con LS-PrePost se muestran en la figura 8-6 y figura 8-7 respectivamente. El valor máximo de esfuerzo de cisión en el cuello es de 5.57 kN, superior al de 3.1 kN que marca la directiva, mientras que el valor máximo de esfuerzo de tracción es de 3.22 kN, no llega al límite de 3.3 kN marcado por la directiva. No se puede afirmar que cumple este requisito, porque se observa que la gráfica se corta en los 120 ms, y según la directiva no puede superar el valor de 2.9 kN durante 35 ms, cosa que hace durante los últimos 10 ms de la gráfica, y no sabemos el comportamiento que tiene en los ms posteriores.

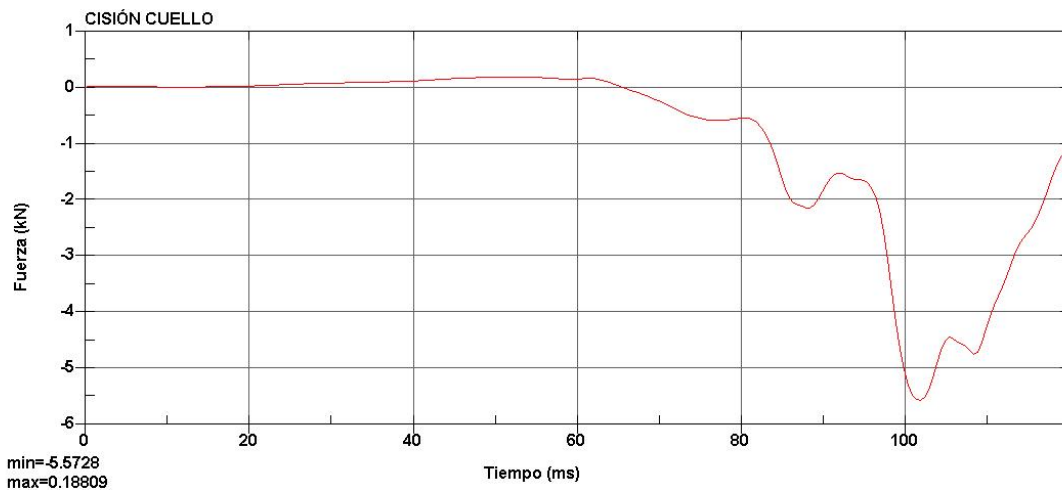


Figura 8-6: Cisión del cuello, caso A

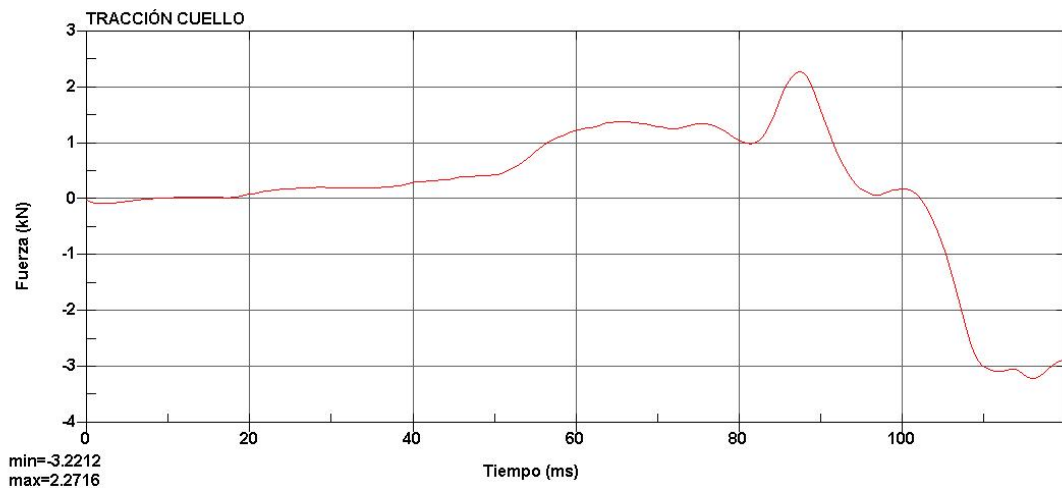


Figura 8-7: Tracción en el cuello, caso A

8.1.6 NORMA DE FUERZA DEL FÉMUR

La directiva 96/79/CE establece que para ver los daños producidos en los fémures del ocupante tras el choque, hay que calcular la fuerza axial sufrida a lo largo del suceso. Al tener cada ocupante dos fémures, se muestran dos gráficas, la figura 8-8 corresponde al fémur de la pierna derecha y la figura 8-9 al fémur de la pierna izquierda, ambas obtenidas con la aplicación LS-PrePost. Debido a la sencillez del modelo y la ausencia de elementos propios de un vehículo como la barra de la dirección o cualquier elemento que esté a la altura de las piernas del ocupante, no hay colisión entre los miembros inferiores y ninguna parte del vehículo, pero aún así los valores en ambos fémures superan los permitidos por la directiva 96/79/CE, que fija el valor máximo en 9.07 kN. El valor máximo en el fémur derecho es de 15.02 kN, y de 17.42 en el fémur



izquierdo, si bien el máximo en este último caso se produce en el instante $t=120$ ms, por lo que puede ser superior en instantes posterior al estudiado.

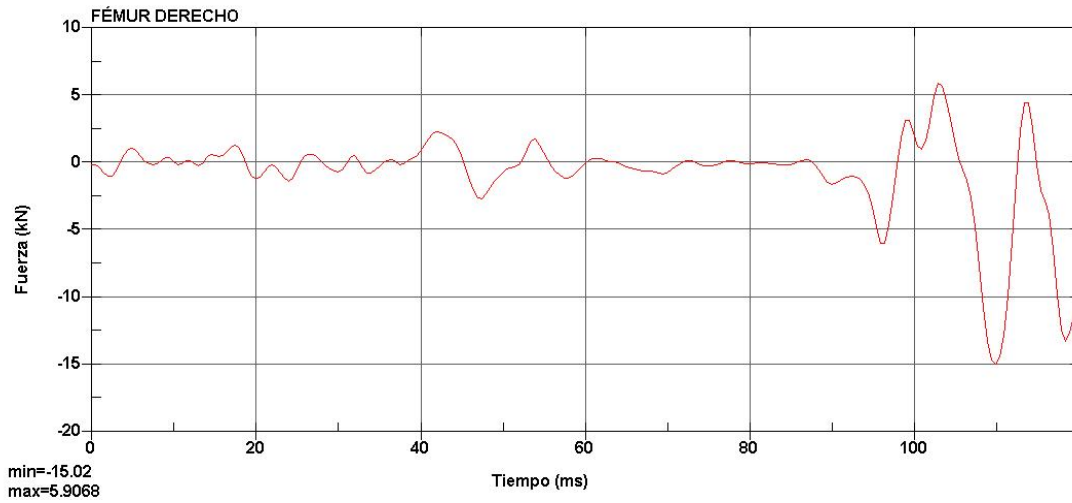


Figura 8-8: Esfuerzo en el fémur derecho, caso A

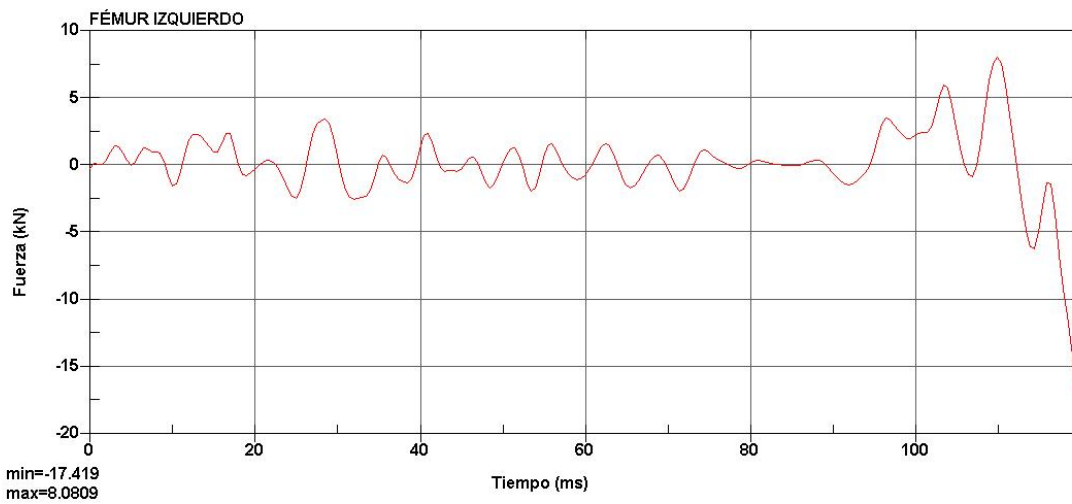


Figura 8-9: Esfuerzo en el fémur izquierdo, caso A

8.2 CASO B: CHOQUE FRONTAL CON CINTURÓN DE SEGURIDAD DE TRES PUNTOS Y SIN AIRBAG

El caso B estudia el caso de cinturón más común hoy en día, el de tres puntos, que sujeta la pelvis y mantiene el torso del ocupante del vehículo lo más pegado posible al asiento. A continuación se muestra una vista general de este caso en la figura 8-10.

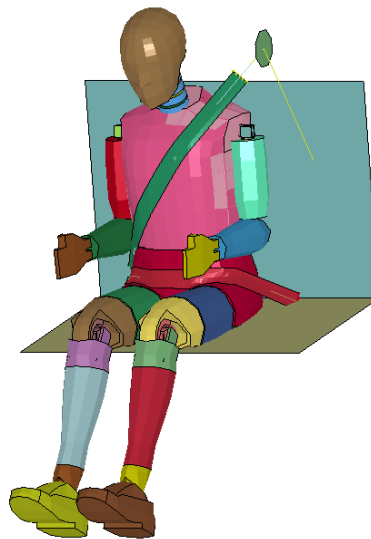


Figura 8-10: Vista general, caso B

Al igual que en caso anterior, en la tabla 8-2 se muestra la secuencia del caso B a estudio, con capturas obtenidas con LS-PrePost. En dicha secuencia se aprecia el efecto de la aceleración sufrida por una colisión frontal en intervalos de 15 milisegundos, desde un tiempo inicial $t=0$ ms, hasta un tiempo final $t=120$ ms.


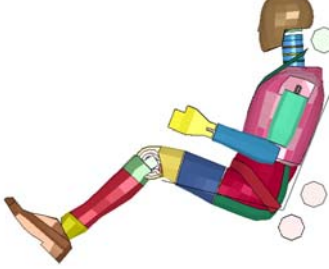





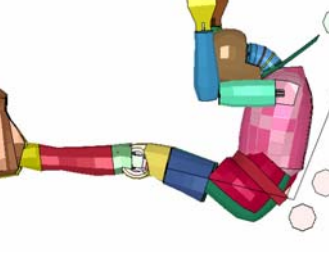
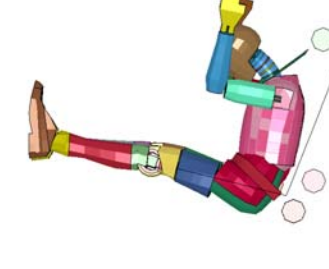
t = 0 ms	t = 15 ms	t = 30 ms
		
t = 45 ms	t = 60 ms	t = 75 ms
		
t = 90 ms	t = 105 ms	t = 120 ms
		

Tabla 8-2: Secuencia de imágenes, caso B

En estas imágenes se observa un movimiento menos brusco por parte del dummy, comparado con el caso A, el cuál sólo dispone de cinturón en la zona pélvica. A continuación, se comprueba por separado los requisitos expuestos en la directiva 96/79/CE para superar la prueba de impacto frontal, los basados en la norma de la NHTSA, y el umbral biomecánico del cuerpo humano en la pelvis.

8.2.1 NORMA DE COMPORTAMIENTO DE LA CABEZA (NCC ó HIC)

Al igual que en el caso anterior y según establece la directiva 96/79/CE para comprobar los daños sufridos en la cabeza, se recoge el valor de la aceleración registrada en la cabeza a lo largo del suceso y posteriormente se calcula el valor del HIC. La gráfica del HIC-36 superpuesta con la aceleración de la cabeza obtenida con LS-PrePost se muestra en la figura 8-11. El valor del HIC alcanza 935.4, y la aceleración máxima es de 78.63 g's, estando por debajo de los valores marcados por la directiva como límite, 1000 en el caso del HIC, y 80 g's para la aceleración máxima. A la vista de estos resultados, este modelo cumple con los requisitos de la directiva 96/79/CE para pasar las pruebas de impacto frontal.

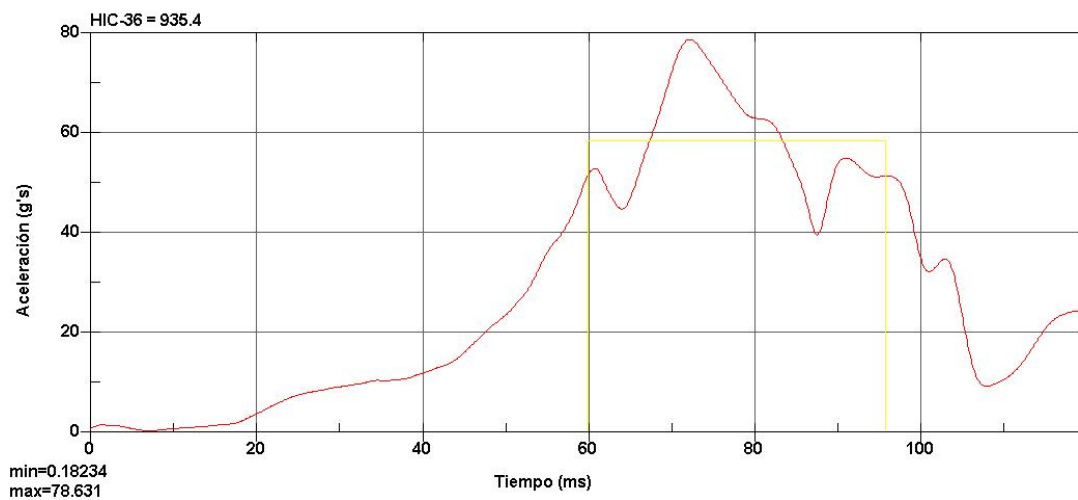


Figura 8-11: HIC-36, caso B

8.2.2 ÍNDICE DE SEVERIDAD EN EL PECHO (CSI)

Basado en cómo establece la NHTSA los daños en el pecho del ocupante de un vehículo en los ensayos de colisión, se obtiene el valor del CLIP3M (aceleración resultante máxima en 3 ms), y del CSI (Índice de Severidad en el Pecho) a lo largo del suceso. La gráfica de la aceleración del pecho, obtenida con LS-PrePost, se muestra en la figura 8-12. Se observa como el valor de la aceleración alcanza su máximo, 49.82 g's, cerca de 60 ms después del impacto. El valor del CSI es de 338.4, debajo del valor de 700 marcado como límite por la NHTSA. En este caso, conforme estos parámetros, supera las pruebas.

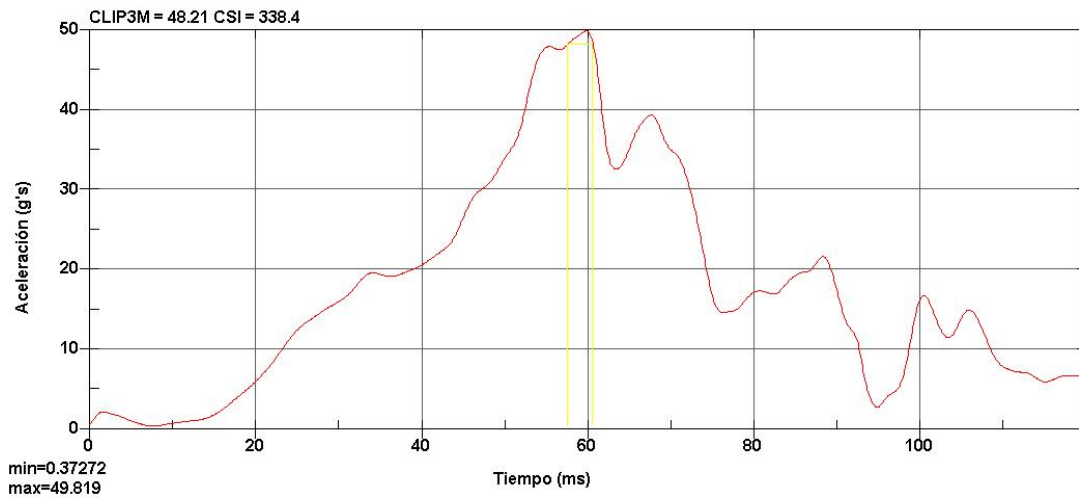


Figura 8-12: CSI, caso B

8.2.3 NORMA DE COMPRESIÓN DEL TÓRAX

Como establece la directiva 96/79/CE para el cálculo de daños en la zona del pecho, se obtiene el valor de la compresión en el tórax a lo largo del suceso. La gráfica de la compresión en el tórax obtenida con LS-PrePost se muestra en la figura 8-13. Se aprecia como el valor de la compresión aumenta hasta que alcanza su máximo, 42.36 mm en $t=70$ ms. El motivo es que el cinturón de seguridad ejerce una presión localizada contraria a los efectos inerciales que se experimentan como consecuencia de un choque frontal. El valor máximo registrado está por debajo del permitido por la directiva 96/79/CE, que son 50 mm.

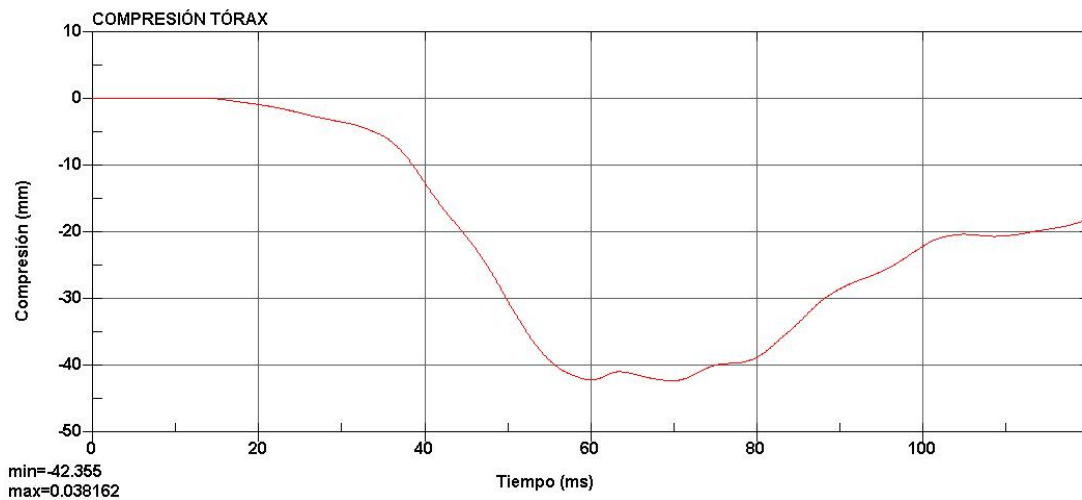


Figura 8-13: Compresión del tórax, caso B

8.2.4 ACELERACIÓN EN LA PELVIS

La figura 8-14 muestra la gráfica de la aceleración de la pelvis durante los 120 ms posteriores al impacto, obtenida con LS-PrePost. En este caso, el valor de 40.34 g's no supera el umbral biomecánico del cuerpo humano, que se establece en 50-80 g's.

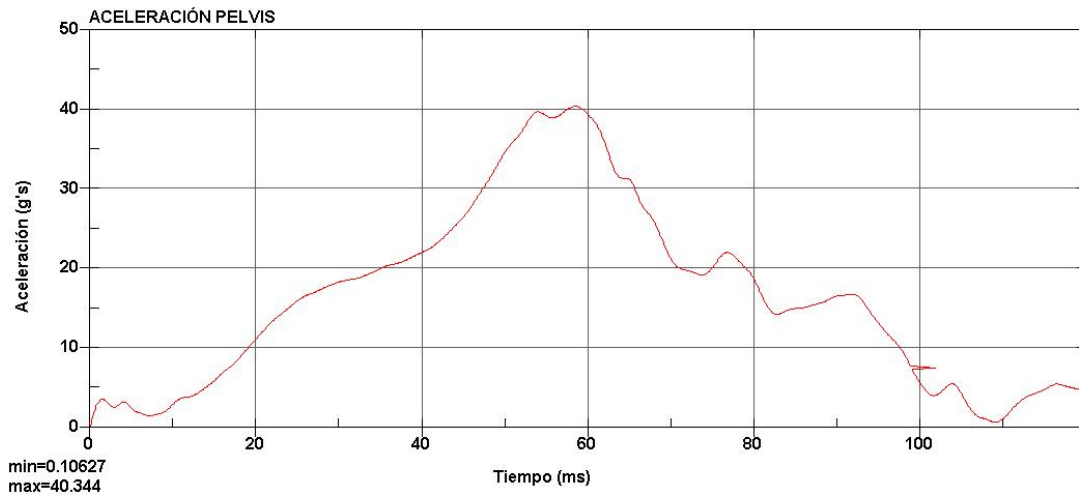


Figura 8-14: Aceleración en la pelvis, caso B

8.2.5 NORMA DE LESIÓN DE CUELLO

Como establece la directiva 96/79/CE para el estudio de daños en el cuello del ocupante del vehículo tras un impacto frontal, se obtienen los esfuerzos de cisión y de tracción en el cuello a lo largo del suceso. Las gráficas de estos esfuerzos, obtenidas con LS-PrePost, se muestran en la figura 8-15 y figura 8-16 respectivamente. El esfuerzo de tracción es máximo alrededor de 90 ms después del choque, con un valor de 2.55 kN, por debajo del valor de 3.3 kN marcado como máximo permitido por la directiva 96/79/CE, pero el de cisión alcanza los 3.81 kN, por encima de los 3.1 kN que marca la directiva. Siguiendo estos parámetros, el caso B no supera las pruebas.

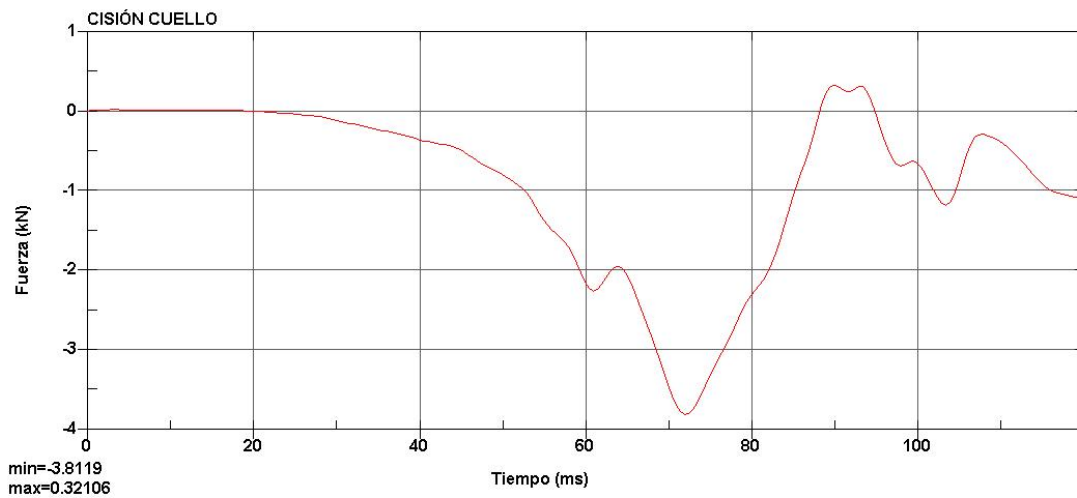


Figura 8-15: Cisión en el cuello, caso B

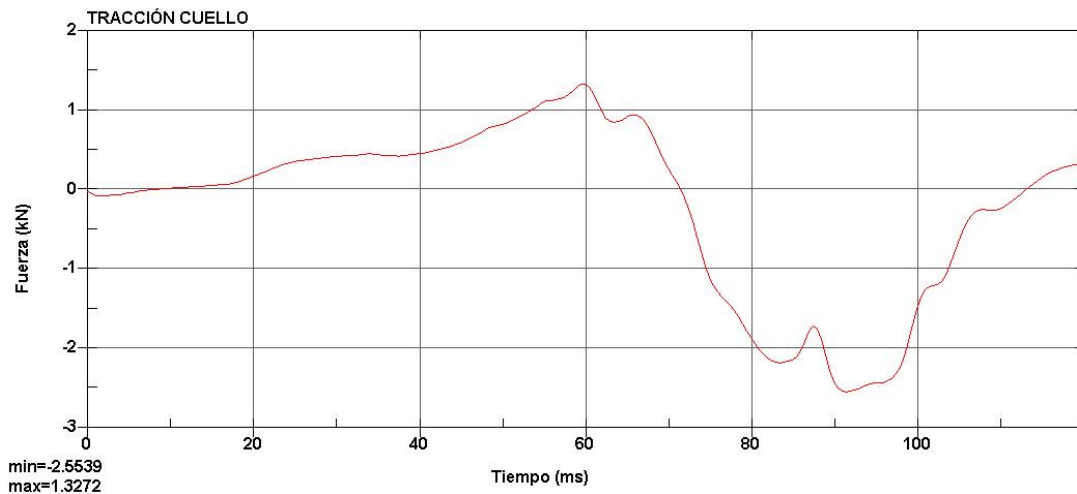


Figura 8-16: Tracción en el cuello, caso B

8.2.6 NORMA DE FUERZA DEL FÉMUR

A continuación se muestran dos gráficas obtenidas de LS-PrePost, que reflejan la fuerza axial producida en los fémures durante los 120 ms después del impacto. La figura 8-17 corresponde al fémur de la pierna derecha y la figura 8-18 al fémur de la pierna izquierda. Se trata del requisito de la directiva 96/79/CE para evaluar los daños en los fémures del ocupante del vehículo en caso de colisión frontal. Al igual que el modelo anterior, debido a su sencillez, no hay colisión entre los miembros inferiores y ninguna parte del vehículo, pero a diferencia del caso A, los valores no superan los permitidos por la directiva 96/79/CE. La fuerza máxima permitido es de 9.07 kN, y en este caso los valores máximos son de 2.60 kN en el fémur derecho, y de 3.65 kN en el fémur izquierdo.

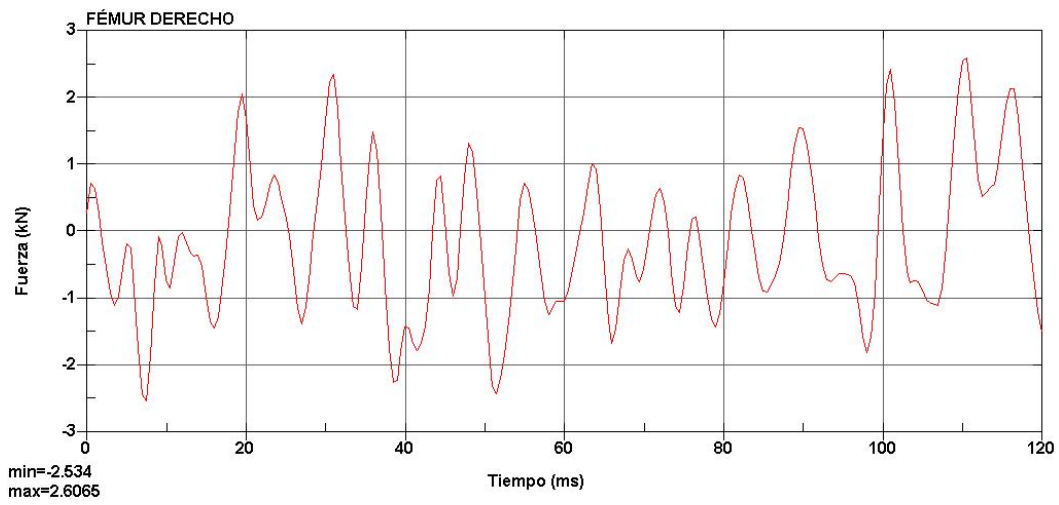


Figura 8-17: Esfuerzo en el fémur derecho, caso B

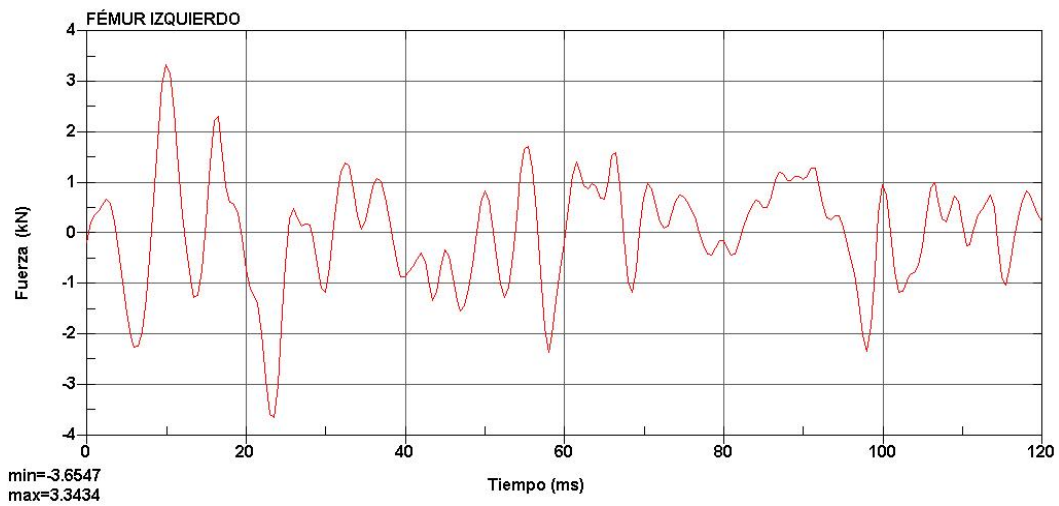


Figura 8-18: Esfuerzo en el fémur izquierdo, caso B

8.3 CASO C: CHOQUE FRONTAL CON CINTURÓN DE SEGURIDAD DE CUATRO PUNTOS Y SIN AIRBAG

El caso C estudia el caso de un cinturón de cuatro puntos, usado en coches de competición, que sujeta la pelvis con un cinturón de falda, y para el torso utiliza dos anclajes por encima de los hombros, para unirse ambos con el de falda. Con este modelo se consigue repartir más la presión de la zona del tórax, y lograr una sujeción más simétrica que con el cinturón de tres puntos. A continuación se muestra una vista general de este caso en la figura 8-19.

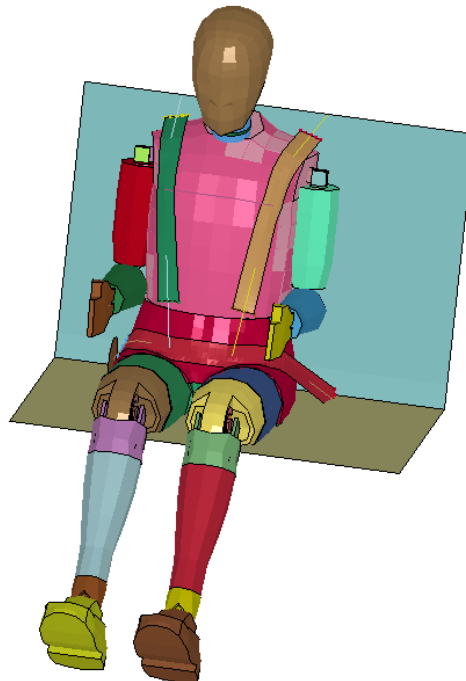


Figura 8-19: Vista general, caso C

Al igual que en los casos A y B, en la tabla 8-3, se muestra la secuencia de la simulación del caso C, con capturas obtenidas con LS-PrePost cada 15 ms, desde el instante inicial de 0 ms, al final de 120 ms.









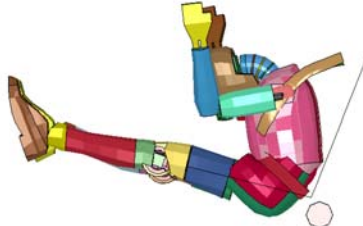
t = 0 ms	t = 15 ms	t = 30 ms
		
t = 45 ms	t = 60 ms	t = 75 ms
		
t = 90 ms	t = 105 ms	t = 120 ms
		

Tabla 8-3: Secuencia de imágenes, caso C

A continuación, se comprueba por separado los requisitos expuestos en la directiva 96/79/CE para superar la prueba de impacto frontal, los basados en la norma de la NHTSA, y el umbral biomecánico del cuerpo humano en la pelvis.

8.3.1 NORMA DE COMPORTAMIENTO DE LA CABEZA (NCC ó HIC)

La gráfica del HIC-36 superpuesta con la aceleración de la cabeza se muestra en la figura 8-20, que se ha obtenido con LS-PrePost. El valor del HIC alcanza 684.5, y la aceleración máxima es de 70.24 g's. El resultado obtenido es válido según la Directiva 96/79/CE, dado que la aceleración de la cabeza está por debajo de 80 g's, y el valor del HIC es inferior a 1000, por lo que no se producen daños en la cabeza del ocupante del vehículo.

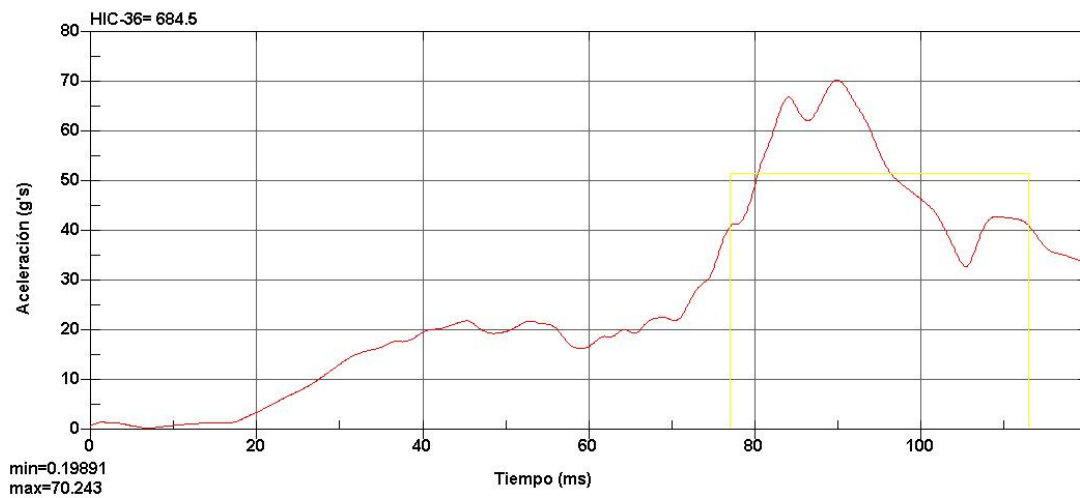


Figura 8-20: HIC-36, caso C

8.3.2 ÍNDICE DE SEVERIDAD EN EL PECHO (CSI)

La gráfica de la aceleración del pecho se muestra en la figura 8-21, obtenida con LS-PrePost. Se aprecia como el valor de la aceleración alcanza su máximo, 33.71 g's, alrededor de 90 ms después del impacto, y el valor del CLIP3M es de 32.96 g's, por debajo de los 60 g's que marca la NHTSA como límite, y con un valor de CSI igual a 272.5, por debajo también del valor de 700 fijado como límite. Según estos parámetros, supera las pruebas de choque frontal.

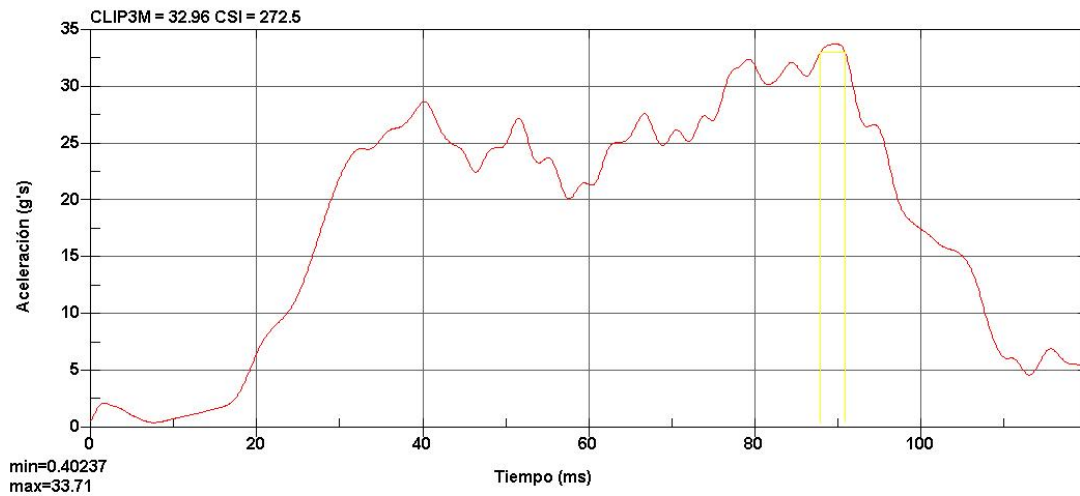


Figura 8-21: CSI, caso C

8.3.3 NORMA DE COMPRESIÓN DE TÓRAX

La directiva 96/79/CE establece para la zona del tórax el cálculo de la compresión a lo largo del suceso en dicha zona. La gráfica de la compresión en el tórax se muestra en la figura 8-22, obtenida a través de LS-PrePost. Se aprecia como el valor de la compresión es mínimo comparado con otros modelos, gracias a la sujeción proporcionada por el cinturón de cuatro puntos, que reparte la presión en más puntos que el de tres puntos, logrando estos valores. El valor máximo registrado es de 4.3 mm, y está por debajo del permitido por la directiva 96/79/CE, que son 50 mm.

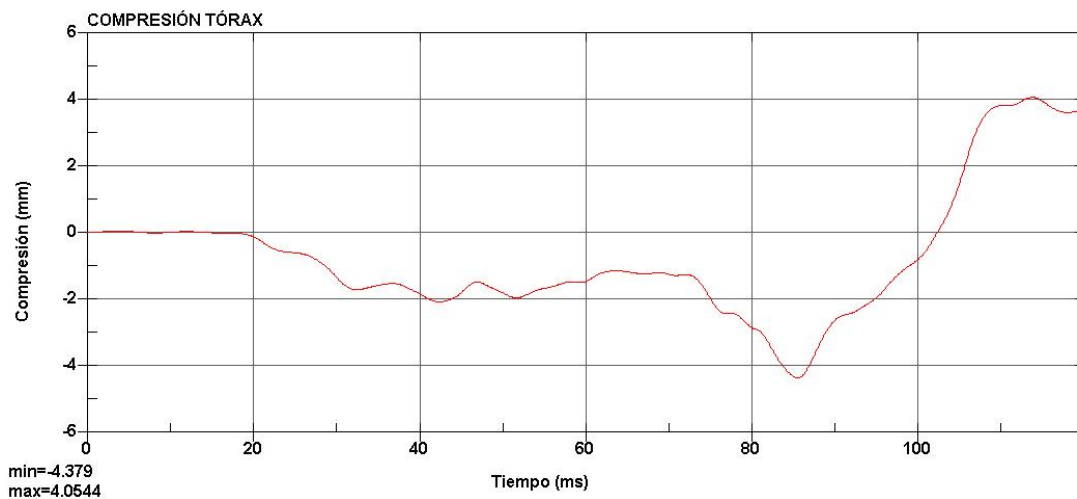


Figura 8-22: Compresión del tórax, caso C

8.3.4 ACELERACIÓN EN LA PELVIS

La figura 8-23, obtenida con LS-Prepost, muestra la aceleración de la pelvis a lo largo de los 120 ms posteriores al impacto. El valor máximo registrado es de 32.45 g's, por lo que en ningún momento se llega a un valor de entre 50-80 g's, que es donde está fijado el umbral de tolerancia biomecánica del cuerpo humano en la zona pélvica.

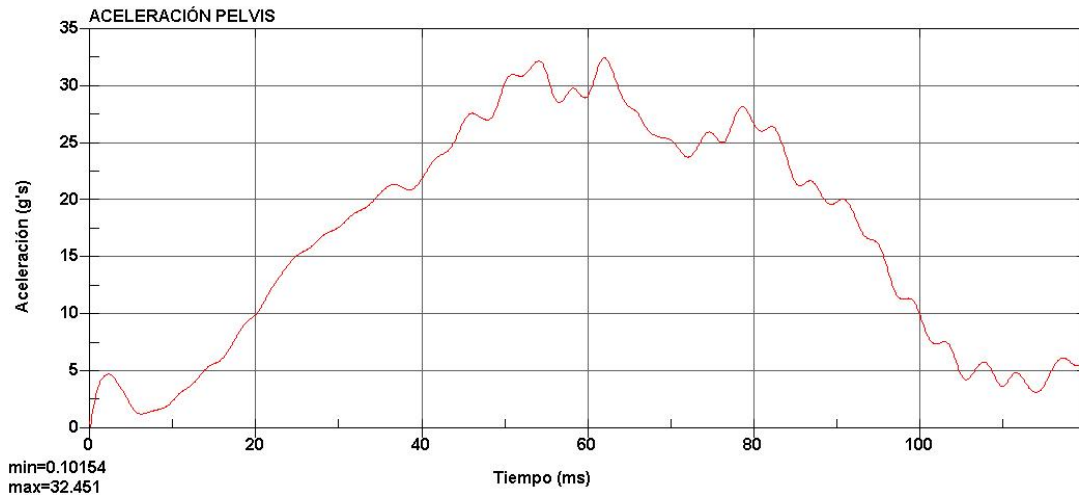


Figura 8-23: Aceleración en la pelvis, caso C

8.3.5 NORMA DE LESIÓN DE CUELLO

La Directiva 96/79/CE establece el cálculo de los esfuerzos de cisión y de tracción en el cuello a lo largo del suceso, para el estudio de los daños en el cuello del ocupante del vehículo. Las gráficas de estos esfuerzos, obtenidas con LS-PrePost, se muestran en la figura 8-24 y figura 8-25 respectivamente. Se observa que el valor del esfuerzo de cisión máximo, 3.22 kN, supera el valor de 3.1 kN que marca la directiva, mientras que el esfuerzo de tracción máximo, 2.04 kN, no supera el valor de 3.3 kN, fijado por la directiva.

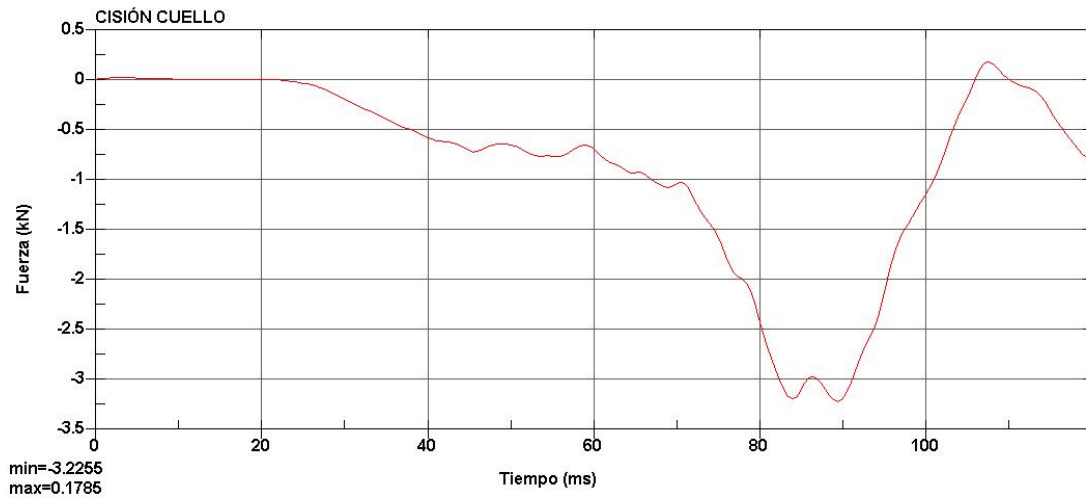


Figura 8-24: Cisión en el cuello, caso C

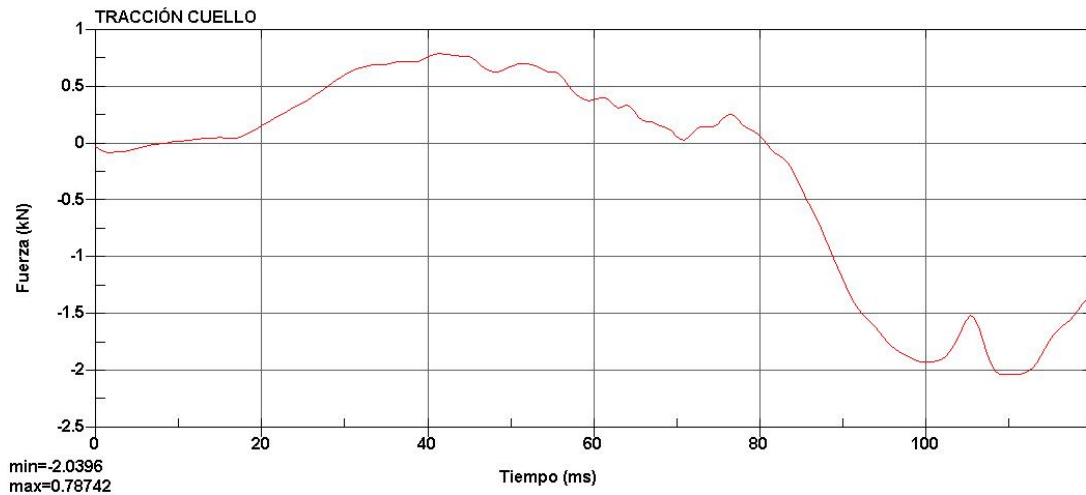


Figura 8-25: Tracción en el cuello, caso C

8.3.6 NORMA DE FUERZA DEL FÉMUR

Se muestran dos gráficas de esfuerzos, la figura 8-26 corresponde al fémur de la pierna derecha y la figura 8-27 al fémur de la pierna izquierda, ambas obtenidas con LS-PrePost. En este caso, la fuerza axial máxima ejercida sobre el fémur derecho es de 3.50 kN, y en el fémur izquierdo es de 3.52 kN. Se comprueba que ambas están por debajo del valor de 9.07 kN establecido por la directiva 96/79/CE.

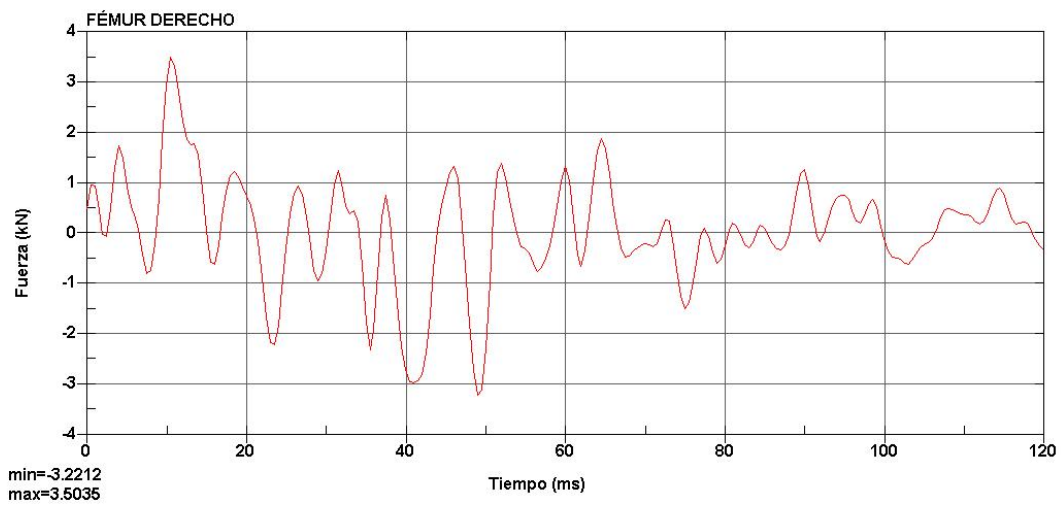


Figura 8-26: Esfuerzo en el fémur derecho, caso C

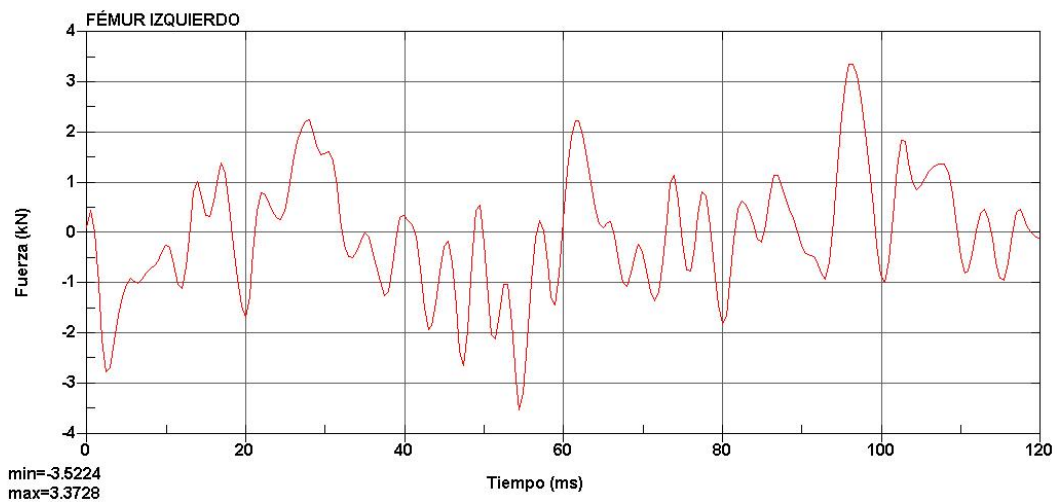


Figura 8-27: Esfuerzo en el fémur izquierdo, caso C

8.4 CASO D: CHOQUE FRONTAL CON CINTURÓN DE SEGURIDAD DE TRES PUNTOS Y CON AIRBAG

El caso D, como se introduce en el capítulo 6, estudia el caso de cinturón más común hoy en día, el de tres puntos, pero a diferencia del caso B, el cinturón está modelado con elementos unidimensionales, y el modelo está provisto de airbag, como elemento de seguridad pasiva complementario del cinturón, y de otros elementos, como el volante, la barra de dirección, reposapiés, techo y parabrisas. A continuación vemos una vista general del caso D en la figura 8-28.

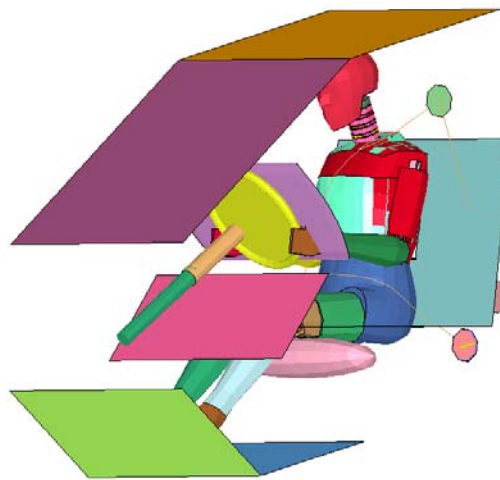


Figura 8-28: Vista general, caso D

A continuación, en la tabla 8-4 se muestra la secuencia de capturas obtenidas con el programa LS-PrePost del caso D. En este caso las capturas son cada 10 ms desde el instante inicial $t=0$ ms. A diferencia de los casos anteriores, el tiempo final es de 80 ms.


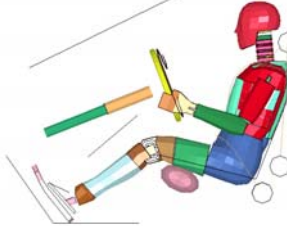


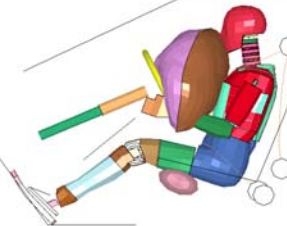
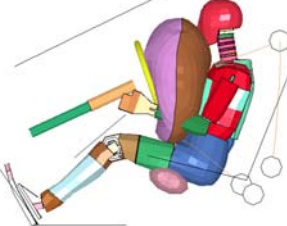
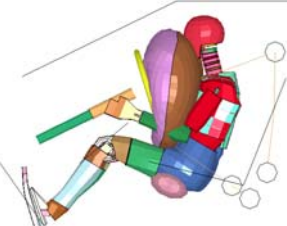
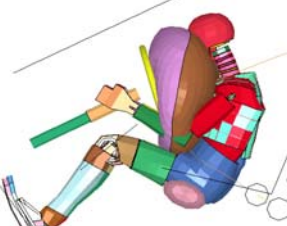
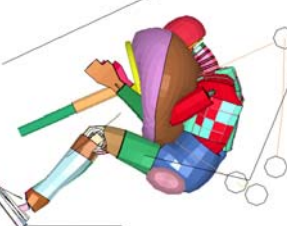
t = 0 ms	t = 10 ms	t = 20 ms
		
t = 30 ms	t = 40 ms	t = 50 ms
		
t = 60 ms	t = 70 ms	t = 80 ms
		

Tabla 8-4: Secuencia de imágenes, caso D

En estas imágenes se observa un movimiento menos brusco por parte del dummy, comparado con el caso A, el cual sólo dispone de cinturón en la zona pélvica. A continuación, se comprueba por separado los requisitos expuestos en la directiva 96/79/CE para superar la prueba de impacto frontal, los basados en la norma de la NHTSA, y el umbral biomecánico del cuerpo humano en la pelvis.

8.4.1 NORMA DE COMPORTAMIENTO DE LA CABEZA (NCC ó HIC)

Como establece la Directiva 96/79/CE para el cálculo de lesión en la cabeza, se recoge el valor de la aceleración registrada en la cabeza a lo largo del suceso y se calcula el HIC. La gráfica de la aceleración de la cabeza se muestra en la figura 8-29, obtenida con LS-PrePost. El valor del HIC alcanza 417.7, y la aceleración máxima es de 64.21 g's. Se considera válido el resultado porque habiendo impactado la cara con el airbag, la aceleración de la cabeza está por debajo de 80 g's durante todo momento, y el valor del HIC es inferior a 1000, como establece la directiva para superar las pruebas de impacto frontal.

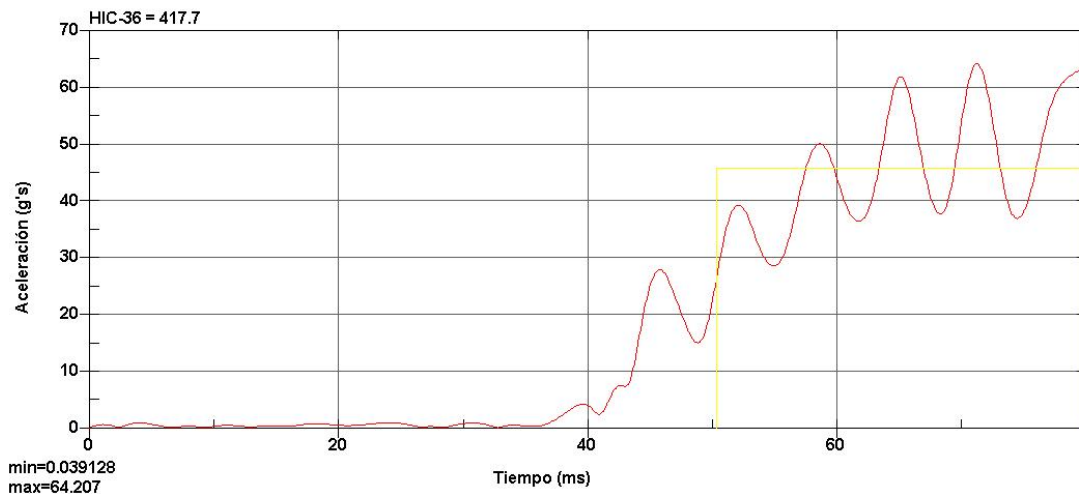


Figura 8-29: HIC-36, caso D

8.4.2 ÍNDICE DE SEVERIDAD EN EL PECHO (CSI)

La NHTSA utiliza para medir el riesgo de lesión en el pecho la aceleración en este punto. La gráfica de la aceleración del pecho se muestra en la figura 8-30, obtenida con LS-PrePost. Se observa, que el CLIP3M tiene un valor de 61.44 g's, por lo que supera el valor máximo permitido de 60 g's. Sin embargo, el valor del CSI es de 581.1, por debajo del valor de 700, marcado como máximo por la NHTSA.

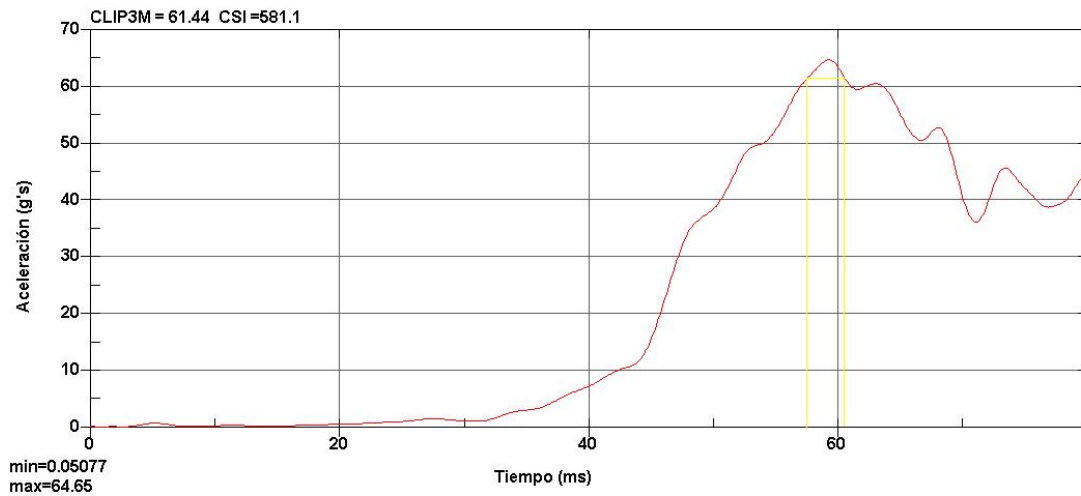


Figura 8-30: CSI, caso D

8.4.3 NORMA DE COMPRESIÓN DE TÓRAX

En la gráfica obtenida con LS-PrePost de la figura 8-31, se observa el valor de la compresión en el tórax a lo largo del suceso, utilizado por la Directiva 96/79/CE para calcular el riesgo de lesión en la zona torácica. Se aprecia como el valor máximo de la compresiones 41.94 mm, por debajo de 50 mm, valor fijado por la directiva como límite para superar las pruebas de impacto frontal.

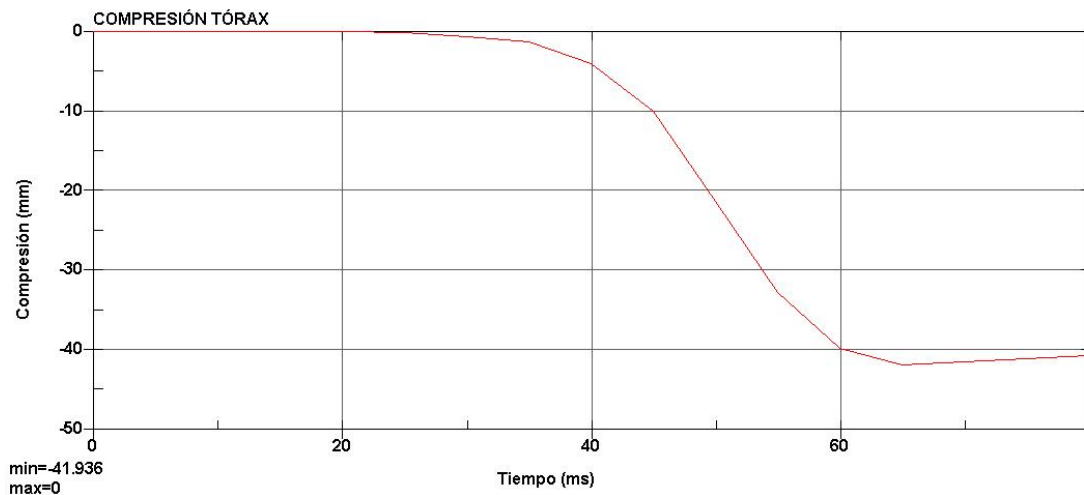


Figura 8-31: Compresión del tórax, caso D

8.4.4 ACELERACIÓN EN LA PELVIS

En este caso, la aceleración máxima en la pelvis alcanza un valor de 63.76 g's, que está dentro de los valores considerados como peligrosos en base a los umbrales biomecánicos del cuerpo humano, fijados entre 50-80 g's. Este resultado se debe a que el cinturón de seguridad está modelado por elementos unidimensionales, y no por bidimensionales, a diferencia de los casos anteriores, y este elemento ejerce menos sujeción en el dummy que los utilizados en los casos anteriores.

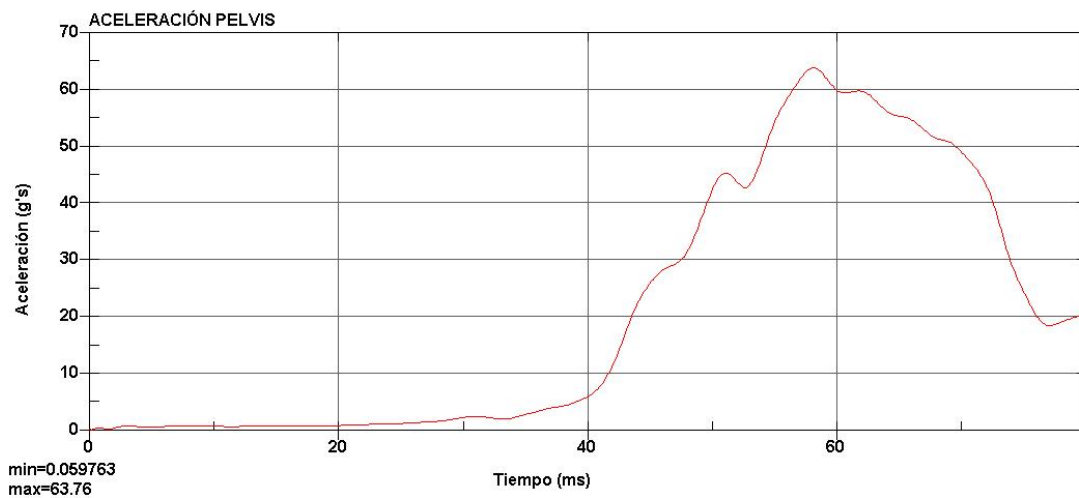


Figura 8-32: Aceleración en la pelvis, caso D

8.4.5 NORMA DE LESIÓN DE CUELLO

Se obtienen los esfuerzos de cisión y de tracción en el cuello a lo largo del suceso, como establece la Directiva 96/79/CE para el estudio del riesgo de lesión en el cuello tras el impacto frontal. Las gráficas de estos esfuerzos de cisión y tracción, obtenidos con LS-PrePost, se muestran en la figura 8-33 y figura 8-34 respectivamente. El esfuerzo de cisión máximo es de 1.56 kN, por debajo del valor de 3.1 kN que marca la directiva, mientras que el esfuerzo de tracción máximo es de 3.12 kN, también por debajo de los 3.3 kN fijados en dicha directiva.

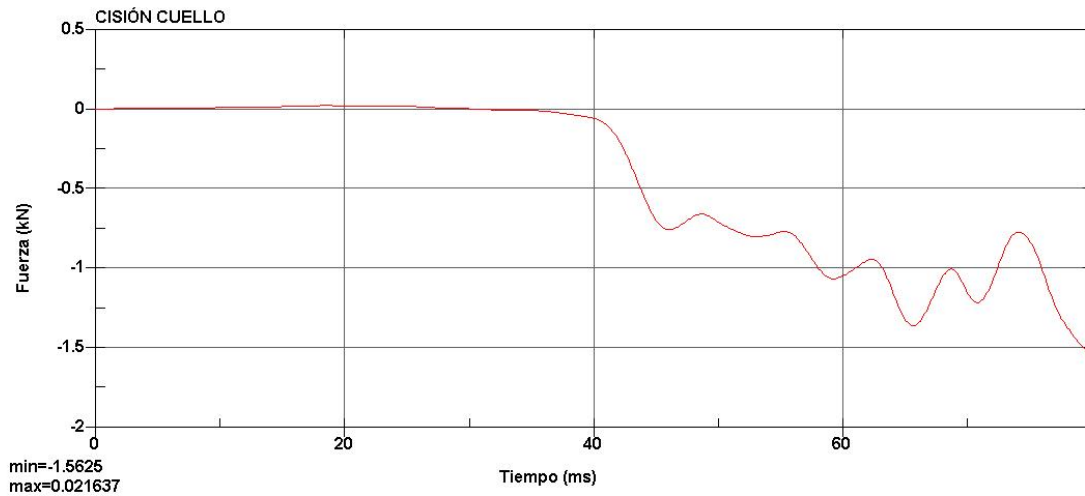


Figura 8-33: Cisión en el cuello, caso D

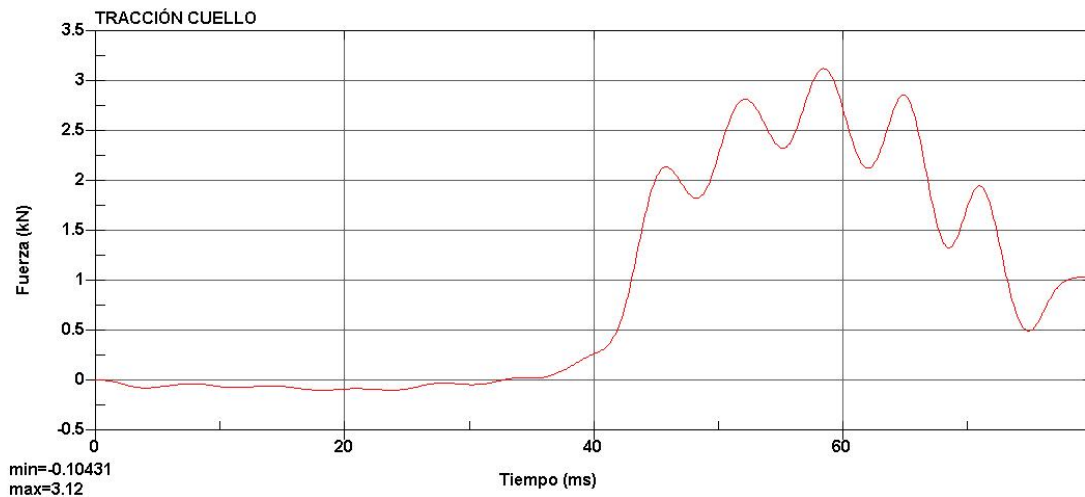


Figura 8-34: Tracción en el cuello, caso D

8.4.6 NORMA DE FUERZA DEL FÉMUR

Se muestran dos gráficas obtenidas con LS-PrePost para el estudio de la fuerza axial que soportan ambos fémures tras el impacto. La figura 8-35 corresponde al fémur de la pierna derecha y la figura 8-36 al fémur de la pierna izquierda. No se puede considerar válido el resultado, al comprobar en las imágenes que las piernas del dummy colisionan con una parte rígida del vehículo colocada debajo del volante. Probablemente no están los contactos del modelo de simulación bien definidos, por lo que las gráficas que se muestran a continuación no se utilizan en el apartado posterior, dónde se procede a la comparación de los resultados obtenidos en todos los casos estudiados.

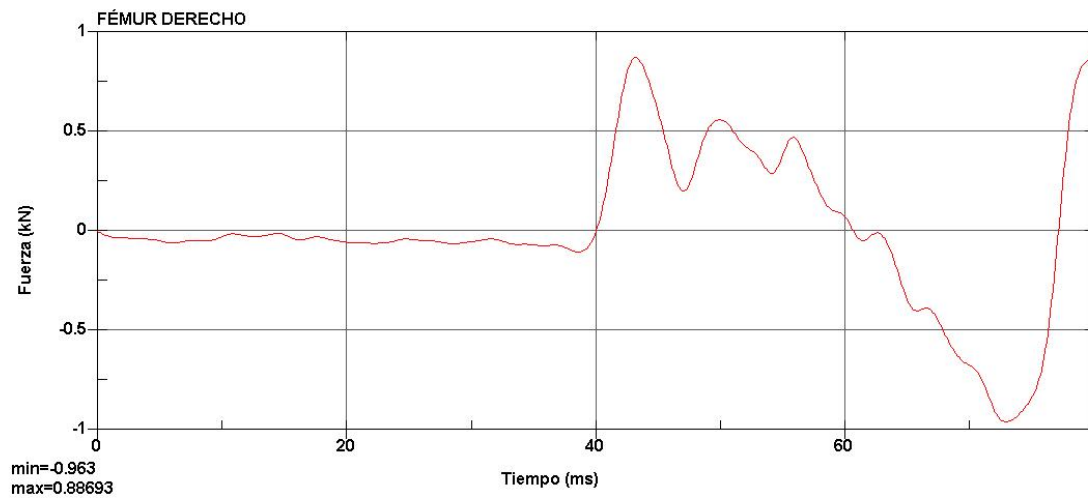


Figura 8-35: Esfuerzo en el fémur derecho, caso D

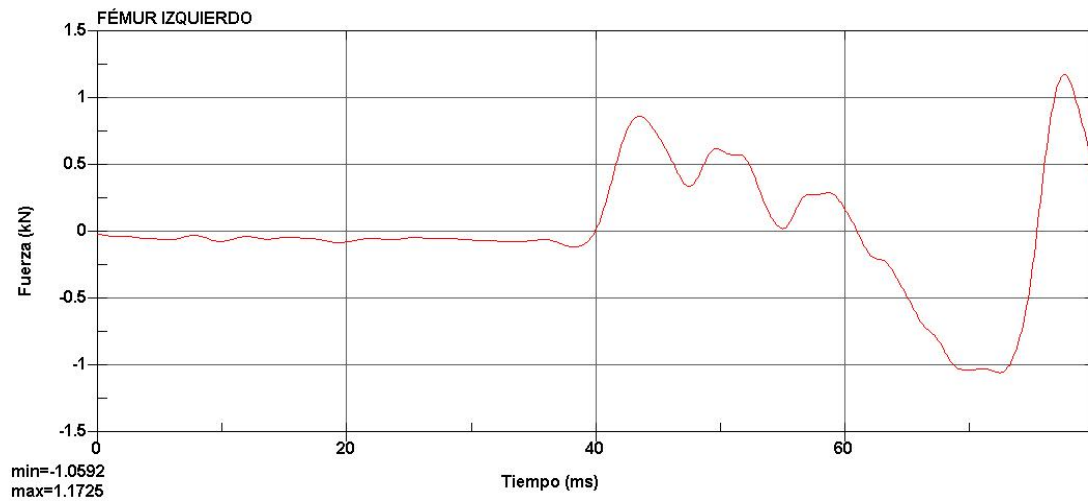


Figura 8-36: Esfuerzo en el fémur izquierdo, caso D



8.5 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado se hace un resumen de los resultados obtenidos en los diferentes casos, y se muestran en tablas para compararlos.

En general, se observa que los resultados en el ensayo frontal del caso A, el cinturón de seguridad de dos puntos, son los peores y no obtiene un resultado positivo en casi ningún criterio de riesgo de lesión estudiado. Se observa también que los resultados mejoran en el resto, por lo general, y que según añadimos algún elemento más de seguridad, como un punto de anclaje adicional o un airbag, mejoran los resultados estudiados.

El estudio de los resultados en la cabeza del ocupante es el más claro. En caso de impacto frontal, con un cinturón de seguridad de dos puntos, la aceleración en la cabeza provoca gran riesgo de lesión, que se reduce empleando un cinturón de seguridad de tres puntos o de cuatro puntos de anclaje. Si además de un cinturón de seguridad, el vehículo dispone de un airbag frontal como complemento, el riesgo de lesión en la cabeza se reduce notablemente.

Si se observa los datos obtenidos respecto al riesgo de lesión en el tórax, los resultados dejan más dudas que los obtenidos en la cabeza, ya que hay que hacer una lectura adecuada de los mismos. En el caso A, los resultados no muestran ningún valor por encima de los permitidos para superar las pruebas de choque frontal, pero el hecho de no llevar el pecho sujeto al respaldo puede provocar el impacto con algún objeto, tales como volante o salpicadero, según la altura del ocupante y de los objetos, así que los resultados en este caso no son valorables. En los casos B y D, ambos con un cinturón de tres puntos, se observa que el pecho se comprime pero sin llegar al valor de 50 mm fijado como límite por la Directiva 96/79/CE. El caso C, con un cinturón de cuatro puntos, refleja un resultado muy satisfactorio, pero también una duda, porque si el sensor de desplazamiento del dummy está en una situación centrada en el pecho, y los cinturones no pasan por el centro, como este caso, no se sabe como refleja la compresión de puntos cercanos a este punto.

El estudio de la zona pélvica, muestra resultados positivos en todos los casos, menos en el caso D, y el motivo de esto se explica en la opción elegida a la hora de crear el cinturón, ya que este modelo utiliza un cinturón de seguridad con elementos unidimensionales. Además de este motivo, las imágenes de la secuencia del choque frontal sugieren que los contactos entre asiento y pelvis no están bien definidos.



Los datos obtenidos en el cuello reflejan conclusiones diferentes según el esfuerzo estudiado. Los datos del esfuerzo de cisión tras el choque frontal indican que los casos A, B y C, sin airbag, no cumplen los requisitos de la Directiva 96/79/CE, si bien los datos del cinturón de tres puntos y cuatro puntos se encuentran cerca del límite, a diferencia del cinturón de dos puntos. Pero con la suma del airbag al cinturón de seguridad se observa como el valor disminuye a la mitad. Estudiando el esfuerzo de tracción en el cuello se comprueba como todos los casos cumplen con la directiva, si bien destaca el valor obtenido en el cinturón de tres puntos con airbag, donde aumenta respecto al modelo sin airbag. Esto se debe al impacto brusco que el dummy con el airbag, transmitiendo esa fuerza de choque al cuello, y aumentando el esfuerzo de tracción.

Por último, se estudia la fuerza axial producida en los fémures del ocupante tras el impacto frontal. En los casos A, B y C, el modelo de vehículo simulado es sencillo, y no existen objetos que puedan provocar colisión con las piernas del ocupante. A pesar de esto, en el caso A, modelo del cinturón de dos puntos, el hecho de no llevar sujeto el tronco del ocupante, propicia que los esfuerzos tras el choque superen los permitidos por la Directiva 96/79/CE. Los resultados obtenidos en el caso D en el fémur no son comparables con el resto, ya que en este modelo sí que existe impacto entre los miembros inferiores y partes del vehículo, pero debido a una errónea definición de los contactos en esa zona, no se ve reflejado en las gráficas.



	Parámetro (unidades)	CASO A	CASO B	CASO C	CASO D	REQUISITOS
CABEZA	HIC-36	2014	935.4	684.5	417.7	<1000
	Aceleración max. cabeza (g's)	116.56	78.63	70.24	64.20	<80
TÓRAX	CLIP3M (g's)	49.71	48.21	32.96	61.44	<60
	CSI	240.6	338.4	272.5	581.1	<700
	Compresión tórax (mm)	1.16	42.35	4.37	41.94	<50
PELVIS	Aceleración max. pelvis (g's)	47.18	40.34	32.45	63.76	<50-80
CUELLO	Cisión cuello (kN)	5.57	3.81	3.22	1.56	<3.1
	Tracción cuello (kN)	3.22	2.55	2.04	3.12	<3.3
FÉMUR	Fuerza fémur derecho (kN)	15.02	2.61	3.50	0.96	<9.07
	Fuerza fémur izquierdo (kN)	17.42	3.65	3.52	1.17	<9.07

Tabla 8-5: Tabla de resultados



La tabla 8-6 muestra el porcentaje de mejora con respecto al caso A (modelo de cinturón de dos puntos de anclaje), el considerado peor, del resto de casos, caso B (modelo de cinturón con tres puntos de anclaje), caso C (modelo de cinturón con cuatro puntos de anclaje) y caso D (modelo de cinturón con tres puntos de anclaje y airbag). El cálculo de la mejora se ha efectuado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\%mejora = \frac{\text{máximo caso A} - \text{máximo caso B, C ó D}}{\text{máximo caso A}} \times 100$$

	Parámetro (unidades)	MEJORA, CASO B	MEJORA, CASO C	MEJORA, CASO D
CABEZA	HIC-36	53.5 %	66 %	79.3 %
	Aceleración cabeza (g's)	32.5 %	39.7 %	44.9 %
TÓRAX	CLIP3M (g's)	3 %	33.7 %	-23.6%
	CSI	-40.7 %	-13.3 %	-141.52 %
	Compresión tórax (mm)	-	89.7 %	0.97 %
PELVIS	Aceleración pelvis (g's)	14.5 %	31.2 %	-35.1 %
CUELLO	Cisión cuello (kN)	31.6 %	42.2 %	72 %
	Tracción cuello (kN)	20.8 %	36.6 %	3.11 %
FÉMUR	Fuerza fémur derecho (kN)	82.6 %	76.7 %	-
	Fuerza fémur izquierdo (kN)	79.4 %	79.8 %	-

Tabla 8-6: Tabla de mejora



Hay que comentar algunos aspectos de tabla 8-6. En la compresión del tórax, el cálculo de la mejora se ha realizado respecto al caso B, debido a que el caso A, al disponer de un cinturón de seguridad de dos puntos, no hay ningún elemento que comprima el pecho, por lo que los datos obtenidos no son representativos.

Los datos del caso D en los apartados de pelvis y fémur, no se analizan en profundidad, debido a que se cree que los contactos en esas zonas no están bien definidos en el modelo. El principal objetivo del caso D es obtener un resultado del uso del airbag en la cabeza, que es la zona principal afectada tras un impacto frontal, y en este caso, el estudio ha demostrado la disminución de riesgo de lesión de un 18 % en esta zona con la combinación de un cinturón de seguridad y un airbag.

Por último, con los datos de la tabla 8-6 se puede observar, que el cinturón de seguridad de cuatro puntos mejora las prestaciones del de tres puntos a efectos de riesgo de lesiones entre un 5 y un 10 %. Esto explica su uso en competición deportiva, con el objetivo de aumentar la seguridad de los ocupantes, que circulan con vehículos a una velocidad superior a la de los límites permitidos en las carreteras, y por lo tanto, tienen más riesgo de colisión.



9 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este proyecto ha supuesto otro 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 simplificados, pudo extraer conclusiones importantes relacionadas con estos sistemas de seguridad pasiva, y el titulado “Simulación de un choque frontal de un vehículo automóvil contra diferentes tipos de barrera”, de David Illescas Pérez, en el que utilizaba el modelo de coche completo para realizar un choque frontal, y también puso sacar conclusiones acerca de la seguridad en los vehículos.



9.1 CONCLUSIONES

La principal dificultad del proyecto ha sido conseguir definir las adecuadas condiciones de contorno, una vez sacado el modelo de simulación de la página LS-PrePost, y modificado el elemento principal, debido a la complejidad de ambos programas, por lo que el modelo desarrollado es sencillo. La sencillez del modelo de simulación no ha impedido que el proceso global de un choque frontal esté representado con gran fidelidad. La creación de los distintos modelos de cinturón de seguridad también ha supuesto constancia y trabajo, si bien el programa LS-PrePost cuenta con comandos específicos, no es fácil llegar a dominar dicho programa.

Principalmente se extraen tres conclusiones, por un lado la gran capacidad de simulación que ofrecen LS-DYNA y LS-PrePost, por otro lado la efectividad del sistema de seguridad pasiva principal dentro de un vehículo, el cinturón de seguridad, que es sobre lo que ha centrado este proyecto, y por último, la importancia de definir correctamente todos los parámetros de las condiciones de contorno, como los contactos, los materiales, y las velocidades y aceleraciones impuestas.

Otra característica importante de LS-DYNA es que para caracterizar un parámetro frecuentemente permite definir su valor por una cifra concreta o por funciones definidas por el usuario. Obtener las funciones que caracterizan los distintos sucesos que participan en la simulación abre las puertas a trabajos futuros basados en ensayos.

En el capítulo de RESULTADOS se demuestra la reducción del alcance de las lesiones provocadas en el ocupante de un vehículo en caso de choque frontal. Tomando como referencia los resultados del caso de cinturón con dos puntos, la incorporación del un tercer punto de anclaje supone mejoras de hasta un 32 % en los valores máximos registrados de aceleración en la cabeza, y de casi un 45 % con la combinación cinturón+airbag. No cabe duda de la eficacia del airbag, siempre que trabaje conjuntamente con el cinturón de seguridad.

9.2 TRABAJOS FUTUROS

A partir de este proyecto es posible realizar multitud de trabajos futuros. Se pueden llevar a cabo mejoras del modelo entrando en detalle en cualquiera de los procesos que participan en la simulación como la tensión del cinturón de seguridad, la colocación de los puntos de anclaje, etc.... Se pueden desarrollar componentes más complejos como asientos ergonómicos con reposacabezas, intentar la simulación con estos modelos de un *impacto lateral* para comprobar la sujeción del cinturón, o intentar realizar la simulación de impacto frontal o



lateral, modelando el dummy dentro de un vehículo automóvil, con todas las condiciones de contorno que ello conlleva y la carga computacional que provocaría al programa.

En la modelización de los cinturones de seguridad es posible añadir pretensores que se activan por sensores, de nuevo igual que en los vehículos reales.

Se pueden estudiar los diferentes efectos de cada sistema de seguridad cuando se emplean dummies distintos, por ejemplo, entre adultos y niños o entre adultos de diferente estatura o peso.



10 REFERENCIAS

- [1] “¿Por qué es tan importante el cinturón de seguridad?” – www.inta.es (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) (junio 2010)
- [2] “Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial” - www.who.int (Organización Mundial de la Salud, 2009).
- [3] “Cálculo de estructuras por el método de los elementos finitos: análisis estático lineal” Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra – Editorial centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 1991.
- [4] “Livermore Software Technology Corporation” – www.lstc.com (mayo 2010)
- [5] “Insurance Institute for Highway Safety” – www.iihs.org (julio 2010)
- [6] “Estudio del cinturón de seguridad y del airbag en el ocupante de un vehículo en caso de colisión” Manuel Moriche Guerrero – Proyecto Fin de Carrera de la Universidad Carlos III de Madrid, julio 2008



- [7] "Safety, comfort and convenience systems" Mattes B – Editorial Robert Bosch, 1999.
- [8] "Sistemas de transmisión y frenado" Julián Ferrer Ruiz – Editex, 2008.
- [9] "Seguridad pasiva" – www.dgt.es (agosto 2010)
- [10] "Seguridad pasiva. Elementos básicos" – www.todomecanica.com (mayo 2010)
- [11] "El habitáculo de seguridad" Instituto de investigación sobre reparación de vehículos – Editorial centro Zaragoza, 2ª Edición, 2003.
- [12] "Sistemas de seguridad y confort en vehículos automóviles" Albert Martí Parera – Boixareu Editores, 2000.
- [13] "Seguridad vial: El cinturón de seguridad" Instituto de investigación sobre reparación de vehículos – Editorial centro Zaragoza, 2ª Edición, 2003.
- [14] "Informe Volvo de seguridad vial 2008" – www.volvo.com (abril 2010)
- [15] "Beneficios del cinturón 3+2 en caso de impacto frontal, lateral y vuelco" - www.autoliv.com (junio 2010)
- [16] "El cinturón de seguridad en todos los asientos de cualquier tipo de vehículo será obligatorio en la UE desde mañana" (Artículo de mayo de 2006) – www.lukor.com (mayo 2010)
- [17] "Uso del cinturón de seguridad en vehículos" – www.guardiacivil.org (mayo 2010)
- [18] "Informe uso cinturón de seguridad, abril 2009" - Real Automóvil Club de España – www.race.es (junio 2010)
- [19] "Real Automóvil Club de Cataluña" – www.racc.es (junio 2010)
- [20] "Los crash test" Diego Rodríguez Prado y Javier López Álvarez - Información del CTAG (Centro Tecnológico de Automoción de Galicia), julio 2009.
- [21] "Crash Test Dummy" Frederic P Miller, Agnes F Vandome, John McBrewster - VDM Publishing House Ltd., 2009
- [22] "Test Reference Guide, Volume I: Vehicle Tests, 2006" - National Highway Traffic Safety Administration – www.nhtsa.gov (agosto 2010)



[23] “El método de los elementos finitos: Las bases” O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor – Editorial CIMNE, 5ª Edición, 2004

[24] “LS-DYNA Theory Manual” Recopilado por John O. Hallquist – Editado por Livermore Software Technology Corporation, Marzo 2006.

[25] “LS-DYNA Keyword User’s Manual, version 970” Livermore Software Technology Corporation, Abril 2003.

[26] “LS-PrePost Online Documentation, Tutorials”
www.lstc.com/lsp/content/tutorials.shtm (abril 2010)

[27] “Development of a 50th Percentile Hybrid III Dummy Model” Cing Dao (Steve) Kan, Dhafer Marzougui y Nabih E. Bedewi - 4th European LS-DYNA User’s Conference – Ulm, Alemania, 22 y 23 de mayo de 2003.

[28] DIRECTIVA 96/79/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 16 de diciembre de 1996 relativa a la protección de los ocupantes de los vehículos de motor en caso de colisión frontal y por la que se modifica la Directiva 70/156/CEE

[29] “Investigación de accidentes de tráfico: Manual De Reconstrucción” Pablo Luque Rodríguez, Daniel Álvarez Mántaras - Netbiblo, 2007

[30] “LSTC Hybrid III Dummies – Positioning and Post-Processing” Sarba Guha, Dilip Bhalsod y Jacob Krebs, LSTC Michigan – Edición LSTC.H3.103008_v1.0, Octubre 2008.