



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS

---

**EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LOS SISTEMAS  
DE RETENCIÓN EN VEHÍCULOS BLINDADOS  
TIPO ANTI-ASALTO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

ING. ERIK ISLAS LARA

DIRIGIDA POR:

DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA SOSA  
DR. CHRISTOPHER RENÉ TORRES SAN MIGUEL



CIUDAD DE MÉXICO. JULIO 2018

## Resumen

La infinidad de accidentes automovilísticos por colisión propician lesiones serias en los ocupantes, llegando a causar el deceso. Para disminuir estos casos la industria automotriz ha avanzado en la seguridad activa y pasiva, este último permite elevar la probabilidad de mantener a los ocupantes con vida en caso de colisión con el uso adecuado del dispositivo de mayor importancia, el cinturón de seguridad.

La industria del blindaje se encuentra en avance constante con el propósito de prestar mayor seguridad de ataques bélicos a los ocupantes del vehículo modificado. Sin embargo, el material utilizado en su mayoría es el acero, por lo que, dependiendo del nivel de protección buscada las dimensiones del material cambiarán, afectando principalmente la masa total del vehículo.

En el presente trabajo se muestra la evaluación numérica de impacto completo frontal de una *SUV (Sport Utility Vehicle) Ford Explorer 2002* blindada con un nivel III. Se realizó mediante dos pilares, el MEF para análisis dinámicos y las partes que integran el blindaje. La metodología empleada se llevó a cabo mediante actividades como la verificación del modelo virtual, el cálculo del (*Acceleration Severity Index*) *ASI* de la *SUV*, el proceso de blindaje y análisis dinámico en condiciones iguales que el vehículo original. También se obtiene el (*Head Injury Criterion*) *HIC<sub>15</sub>* para un maniquí percentil 50 de acuerdo a los datos proporcionados por la colisión del vehículo modificado estructuralmente, debido a que es el miembro del cuerpo humano que presenta mayores daños al en un choque.

Finalmente, se muestra la comparativa de los índices de lesión encefálica que existe al modificar el vehículo estudiado contra las prestaciones de un vehículo sin cambios.

***Abstract***

The vehicle's accidents by collision cause injuries in the occupants, bringing about the death. In order to reduce this problem, the automotive industry has been improving the active and passive safety fields, this last allow increase the probability to keep the passenger's life in collision with the correct use of the device with the most importance, the seat belt.

The shielding industry is in constant progress with the purpose to give more safety in war attacks to the occupants of modification vehicle. So that, the material dimension change depending to protection level required, affecting mainly the mass.

This work shows the numerical evaluation of full frontal crash a sport utility vehicle Ford Explorer 2002 armor level III. it was made over two bases, the FEM to dynamic analysis and the parts which have the armor. the methodology used was by means of activities as a virtual model verification, the ASI calculus of SUV, the shielding processes and dynamic analysis in the same condition as original model. Also the HIC was obtained to dummy 50th in accordance with the information provided by the structurally modified vehicle crash, due to the head is the member of human body which has more injuries when present a crash.

Finally, it shows the encephalic injury comparative between vehicle modified and the vehicle without structural change

---



---

**Índice general**

<b>Resumen</b> .....	<b>I</b>
<i>Abstract</i> .....	<b>II</b>
<b>Índice general</b> .....	<b>III</b>
<b>Índice figuras</b> .....	<b>VI</b>
<b>Índice tablas</b> .....	<b>IX</b>
<b>Objetivo general</b> .....	<b>X</b>
<b>Objetivos particulares</b> .....	<b>X</b>
<b>Justificación</b> .....	<b>XI</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>XII</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>XIV</b>
<b>Capítulo I.Estado del Arte</b> .....	<b>1</b>
I.1.- Generalidades .....	2
I.2.- Breve historia de la aplicación del blindaje .....	2
I.2.1.- Uso del blindaje en transporte marítimo.....	4
I.2.2.- Primeros vehículos blindados.....	5
I.2.3.- Vehículos blindados de uso civil.....	9
I.3.- Proceso de blindaje .....	12
I.4.- Breve historia de los sistemas de retención .....	12
I.5.- Breve historia de herramientas para pruebas de seguridad pasiva .....	15
I.5.1.- Algunos trabajos sobre sistemas de retención .....	16
I.6.- Planteamiento del problema.....	18
I.7.- Sumario.....	19
I.8.- Referencias .....	19
<b>Capítulo II Marco Teórico</b> .....	<b>23</b>
II.1.- Introducción.....	24
II.2.- Fenómeno de colisión .....	24
II.3.- Campo de acción .....	26
II.4.- Habitáculo .....	27

II.5.- Evaluación de daño -----	28
II.5.1.- Criterio de daño -----	28
II.6.- Sistemas de retención-----	29
II.6.1.- Correa [II.13 y II.14] -----	30
II.6.2.- Retractor [II.15 y II.16] -----	30
II.6.3.- Limitador de tensión [II.18]-----	32
II.6.4. – Pretensores [II.19 y II.20] -----	33
II.7.- Normativa-----	35
II.8.- Sumario -----	37
II.9.- Referencias -----	38
<b>Capítulo III Análisis Numérico Vehículo original -----</b>	<b>40</b>
III.1.-Introducción-----	41
III.2.- Análisis numérico dinámico-----	41
III.3.- <i>LS-DYNA</i> <sup>®</sup> -----	42
III.4.- Objeto de estudio-----	44
III.5.- Modelo -----	46
III.5.1.- Materiales-----	49
III.6.- Caso de estudio -----	49
III.7.- Sumario -----	59
III.8.- Referencias -----	59
<b>Capítulo IV Evaluación Numérica de Vehículo Modificado Estructuralmente -----</b>	<b>61</b>
IV.1.-Introducción-----	62
IV.2.- Blindaje -----	62
IV.2.1.- Materiales utilizados blindaje tipo anti-asalto-----	63
IV.3.- Piezas a blindar -----	64
IV.4.- Densidad efectiva -----	65
IV.4.1.- Cambio de masa-----	67
IV.5.- Estudio <i>Ford Explorer</i> blindada -----	69
IV.6.- Sumario -----	77
IV.7.- Referencias -----	77

---

---

<b>Capítulo V Evaluación de Maniquí percentil 50 en Vehículo Blindado</b> -----	<b>78</b>
V.1.- Introducción-----	79
V.2.- Maniqués de prueba de colisión-----	79
V.3.- Head Injury Criterion (HIC) -----	81
V.4.- Posición de manejo -----	82
V.5.- Acondicionamiento del modelo -----	83
V.6.- Análisis dinámico del maniquí -----	85
V.7.- Sumario -----	90
V.8.- Referencias -----	90
<b>Conclusiones y trabajos a futuro</b> -----	<b>92</b>
VI.1. - Conclusiones -----	93
VI.1.1. - Capítulo I -----	93
VI.1.2. - Capítulo II -----	93
VI.1.3. - Capítulo III -----	94
VI.1.4. - Capítulo IV -----	95
VI.1.5. - Capítulo V -----	97
VI.2.- Trabajos a futuro -----	101

---



---

**Índice figuras**
**Capítulo I**

Figura I.1.- Antiguos refugios -----	2
Figura I.2.- Diversas armaduras a lo largo de la humanidad-----	3
Figura I. 3.- Primeros barcos blindados-----	4
Figura I. 4.- Quilla Congreve -----	5
Figura I. 5.- Primer vehículo blindado -----	6
Figura I. 6.- Primer vehículo blindado en la Gran Guerra-----	6
Figura I. 7.- Vehículo blindado de Al Capone-----	10
Figura I. 8.- Vehículo blindado del ex-presidente Obama Cadillac One -----	10
Figura I. 9.- BMW serie 7 high security -----	11
Figura I. 10.- Mercedes Benz S-600-----	11
Figura I. 11.- Partes blindadas del automóvil -----	12
Figura I. 12.- Cinturón de seguridad de dos puntos-----	13
Figura I. 13.- Cinturón de seguridad de tres puntos -----	14
Figura I. 14.- Sistema de retención de cinco puntos-----	15
Figura I. 15.- Implementación de maniquí para pruebas -----	16

**Capítulo II**

Figura II. 2.- Etapas de la colisión -----	24
Figura II. 3.- Campo de incidencia frontal -----	26
Figura II. 4.- Habitáculo integro a pesar de las deformaciones-----	27
Figura II. 5.- Mecanismo traba pendular-----	31
Figura II. 6.- Mecanismo traba centrifuga-----	32
Figura II. 7.- Limitador de tensión -----	32
Figura II. 8.- Pretensor mecánico -----	33
Figura II. 9.- Pretensor pirotécnico con accionamiento mecánico-----	34
Figura II. 10.- Diversos pretensores. -----	34
Figura II. 11.- Gráfica curvas de desaceleración -----	37

**Capítulo III**

Figura III. 1.- Diversos modelos.....	43
Figura III. 2.- Comportamiento aceleración Pick up impactando una señal de tránsito [III.9]----	43

Figura III. 3.- Vehículo SUV Ford Explorer 2002-----	44
Figura III. 4.- SUV Ford Explorer 2002 vista frontal -----	47
Figura III. 5.- SUV Ford Explorer 2002 vista lateral-----	48
Figura III. 6.- SUV Ford Explorer 2002 vista superior -----	48
Figura III. 7.- SUV Ford Explorer 2002 vista inferior -----	48
Figura III. 8.- Simulación de colisión de 0 a 140 ms -----	54
Figura III. 9.- Aceleración del asiento de la parte superior del motor en el eje X. -----	55
Figura III. 10.- Aceleración del asiento del conductor en el eje X-----	56
Figura III. 11.- Desplazamiento de la camioneta en el eje X -----	56
Figura III. 12.-Desplazamiento de la camioneta en el eje X -----	57
Figura III. 13.- Velocidad de la camioneta en el eje X-----	58

#### **Capítulo IV**

Figura IV. 1.- Simulación de colisión de 0 a 120 ms de Explorer 2002 blindado -----	73
Figura IV. 2.- Energía cinética de la SUV Ford Explorer blindada -----	73
Figura IV. 3.- Aceleración del asiento del conductor en Explorer blindada sobre el eje X-----	74
Figura IV. 4.-Desplazamiento de la camioneta blindada en el eje X-----	75
Figura IV. 5.- Comportamiento de la velocidad de la camioneta blindada en el eje X -----	76

#### **Capítulo V**

Figura V. 1.- Posición correcta de manejo -----	83
Figura V. 2.- Modelo computacional de Dummy Hybrid III 50th-----	84
Figura V. 3.- Modelo acondicionado a la posición adecuada de manejo-----	84
Figura V. 4.- Modelo del dummy acondicionado para la colisión-----	85
Figura V. 5.- Simulación de dummy ante colisión frontal de vehículo blindado de 0 a 120 ms --	89
Figura V. 6.- Aceleración y HIC <sub>15</sub> de la cabeza del modelo de prueba-----	89

#### **Conclusiones**

Figura VI. 1.- Comparativa colisión frontal del modelo virtual vs prueba experimental-----	95
Figura VI. 2.- Comparativa aceleración en colisión frontal de camioneta original vs blindada --	96
Figura VI. 3.- Comparativa desplazamiento en colisión frontal de camioneta original vs blindada -----	97
Figura VI. 4.- Comparativa velocidad en colisión frontal de camioneta original vs blindada ----	98
Figura VI. 5.- Comparativa de maniquís en colisión frontal con velocidad de camioneta original vs blindada-----	99

---

Figura VI. 6.- Comparativa aceleración de cabeza en colisión frontal de camioneta original vs  
blindada -----100

---



---

**Índice tablas**
**Capítulo I**

Tabla I. 1.- Vehículos blindados de la Gran Guerra [I.14] -----	7
---	---

**Capítulo II**

Tabla II. 1.- Fases del accionamiento del sistema de retención -----	26
--	----

Tabla II. 2.- Índice <i>ASI</i> -----	29
---------------------------------------	----

Tabla II. 3.- Definición de diferentes curvas -----	36
---	----

**Capítulo III**

Tabla III. 1.- Dimensiones de piezas de <i>SUV Ford Explorer 2002</i> -----	44
---	----

Tabla III. 2.- Unidades de medida -----	47
---	----

**Capítulo IV**

Tabla IV. 1.- Niveles de blindaje -----	63
---	----

Tabla IV. 2.- Materiales utilizados para blindaje tipo anti-asalto -----	64
--	----

Tabla IV. 3.- Características de piezas originales metálicas de la <i>SUV</i> -----	64
---	----

Tabla IV. 4.- Características de los vidrios originales de la <i>SUV</i> -----	65
--	----

Tabla IV. 5.- Densidad efectiva de materiales metálicos <i>Ford Explorer 2002</i> -----	66
---	----

Tabla IV. 6.- Densidad efectiva de los vidrios de <i>Ford Explorer 2002</i> -----	67
---	----

Tabla IV. 7.- Cambio de masa de piezas metálicas sometidas a blindaje -----	67
---	----

Tabla IV. 8.- Cambio de masa de los vidrios sometidos a blindaje -----	68
--	----

Tabla IV. 9.- Aumento de masa de las piezas originales vs blindadas -----	69
---	----

**Capítulo V**

Tabla V. 1.- Modelos de <i>Dummy Hybrid III</i> [V.2 y V.3] -----	79
---	----

Tabla V. 2.- Valores límite de <i>HIC<sub>15</sub></i> -----	82
--	----

**Objetivo general**

Realizar el análisis numérico de un sistema de retención en un maniquí de prueba percentil 50 en colisión frontal de un vehículo comercial sometido a un proceso de blindaje. Analizando el índice de lesión en cráneo para conocer la eficiencia del sistema de seguridad en el vehículo modificado.

**Objetivos particulares**

- Conocer el avance tecnológico de los vehículos blindados y los sistemas de retención
- Entender el funcionamiento de los sistemas de retención
- Inspeccionar la normativa europea y americana para colisiones
- Entender las teorías para la evaluación de lesión
- Realizar análisis numérico de colisión frontal de vehículo de producción en serie para conocer el índice de lesión
- Desarrollar el proceso de blindaje tipo anti-asalto en un vehículo de serie
- Llevar a cabo el análisis numérico de colisión frontal del vehículo modificado y conocer el índice de lesión
- Elaborar el acondicionamiento y simulación numérica de maniquí de prueba en colisión frontal de vehículo blindado

---

**Justificación**

La seguridad pasiva se dedica al estudio y mejora de los sistemas que salvaguardan la vida de los seres humanos en accidentes automovilísticos, estos se encuentran clasificados en bolsas de aire, cinturón de seguridad, deformación del vehículo, entre otras. Sin embargo, al realizar modificaciones estructurales de un vehículo como lo es un proceso de blindaje, las condiciones para las que fue diseñado el vehículo cambian debido a su notable aumento de masa. Dado que México es uno de los productores de vehículos blindados con mayor presencia en América Latina surge el cuestionamiento de que tan confiable es la seguridad que presentan los vehículos modificados a los ocupantes al momento de presentarse una colisión. Por lo que, se busca analizar el sistema de retención de tres puntos en una *Ford Explorer 2002* que se sometió al proceso de blindaje tipo anti-asalto, con la finalidad de evaluar el *ASI* (Índice de Severidad de Aceleración) y el *HIC* (*Head Injury Criterion*). Este último ya que es el miembro de cuerpo que más sufre al momento de la colisión y así conocer el cambio de comportamiento entre el vehículo original y el modificado estructuralmente.

---

**Introducción**

La producción de vehículos blindados ha tenido auge en los últimos años en México teniendo una producción de 1,050 unidades en el primer semestre del 2017, de los cuales el 91 % son SUV, 7 % sedanes y 2 % tractocamiones [1], posicionandolo como uno de los principales productores de América Latina con exportaciones a diferentes países como lo es Afganistan, Iraq, Egipto, Israel, entre otros [2]. Debido a los resultados obtenido por esta industria en los últimos años, marcas internacionales como BMW, Mercedes- Benz y Audi trasladaron la fabricación de estos vehículos a las plantas del país mexicano [3], [4] y [5].

Hoy en día los avances tecnológicos han permitido producir vehículos con mayor seguridad a los ocupantes al sufrir alguna colisión. Para ello es necesario realizar múltiples pruebas experimentales en distintos tipos de choque (frontal, lateral, por alcance y vuelco). No obstante, esta alternativa requiere de diversos vehículos del mismo modelo, un laboratorio de grandes dimensiones, equipo de punta para obtener los datos de la simulación, maniqués, entre otras cosas. Por lo que, como complemento de este proceso experimental se genera una alternativa económica, que consiste en la simulación mediante Método de Elemento Finito (MEF), permitiendo con un modelo del vehículo realizar diversas pruebas de colisión con todas las variantes de maniqués.

A pesar del crecimiento que se tiene dentro de la industria automotriz de vehículos blindados, existen pocos registros de pruebas de colisión en vehículos modificados estructuralmente para conocer la seguridad que ofrecen momento de colisión.

Con lo anterior, se tiene como objetivo el ampliar el conocimiento de los cambios que existen al modificar estructuralmente un vehículo y la seguridad que tiene el usuario al presentarse un impacto frontal completo de un vehículo blindado nivel III.

El capítulo I relata la una breve explicación de los inicios del blindaje, desde los inicios de la humanidad, pasando por el uso en vehículos marítimos, hasta la aplicación para vehículos automóviles civiles, así como las partes del vehículo que son modificadas para convertirlo en un

---

vehículo de seguridad. Además, se presenta una breve historia de los comienzos de cinturón de seguridad, los trabajos que se han realizado para mejorar el nivel de seguridad que le ofrecen al ocupante y se presenta el planteamiento del problema.

Para el capítulo II se da a conocer la secuencia que existe al instante de una colisión, el accionamiento de los sistemas de seguridad de acuerdo a etapas establecidas en milisegundos, ecuaciones que son utilizadas para conocer el nivel de lesión que los ocupantes presentan. Se incluye los dispositivos que conforman al cinturón de seguridad y el funcionamiento de cada uno de ellos para salvaguardar la vida del usuario. Finalmente, se presenta la normativa bajo la que los dispositivos de retención se rigen.

En el capítulo III se explica los tipos de análisis dinámicos, el paquete computacional de Método de Elemento Finito que es utilizado a lo largo del presente trabajo. Se realiza la comprobación del modelo virtual de una *Ford Explorer 2002*, se calcula la energía cinética de la SUV momentos antes del impacto y se realiza la evaluación numérica de colisión frontal del modelo mencionado. Por último, se valida el modelo con el informe realizado por *Washington University* y la *NCAC (National Crash Analysis Center)* y se calcula el *ASI* para obtener la clasificación de lesión del conductor.

La protección que ofrece el nivel de blindaje anti-asalto o nivel III y los materiales utilizados para la modificación de los vehículos es presentado en el capítulo IV. Se realiza el cálculo de la densidad que deben de tener las partes del modelo a blindar de material opaco y transparente, así como el cambio de masa que existe entre el vehículo modificado y el de serie. Después simula numéricamente el modelo modificado, para conocer si el modelo tiene similitud con lo calculado se compara la energía cinética calculada analíticamente contra la que muestra el paquete computacional y se calcula el *ASI* para saber la posible lesión del ocupante.

El capítulo V muestra los modelos de maniquíes utilizados en las pruebas de colisión frontal y explica criterios necesarios para conocer los valores límite para el *HIC<sub>15</sub>*. Se presenta la posición

adecuada de manejo, bajo este parámetro el modelo virtual es acondicionado, además se le modela un cinturón de seguridad de tres puntos y se ingresa el comportamiento con el que se desplaza el vehículo blindado al momento de la colisión. Por último, se procede a la evaluación del modelo y se obtiene el  $HIC_{15}$ .

Finalmente se presentan las conclusiones debido al desarrollo de la presente investigación. Así mismo, se genera un apartado donde se proponen actividades complementarias a futuro.

## Referencias

- 1.- Grupo MP&A S. A de C. V., *Comercializa AMBA 675 Vehículos; Industria en General vende 1050*, Grupo MP&A S. A de C. V., Consultada 26 de Julio de 2017. [www.portalautomotriz.com/noticias/automotriz/comercializa-amba-675-vehiculos-industria-en-general-vende-1050](http://www.portalautomotriz.com/noticias/automotriz/comercializa-amba-675-vehiculos-industria-en-general-vende-1050)
- 2.- Informador.mx, *Industria Mexicana de Blindaje Automotriz; Líder en Latinoamérica*, Informador.mx, Consultada 3 de Marzo del 2016. [www.blindajes.com.mx/quienes\\_somos\\_blindajes\\_protecto\\_glass.html](http://www.blindajes.com.mx/quienes_somos_blindajes_protecto_glass.html)
- 3.- Durán, José A., *Blindaje de Autos un Negocio Atractivo; Mercedes Benz*, El Financiero, Consultada 11 de Junio de 2013. [www.elfinanciero.com.mx/empresas/blindaje-de-autos-un-negocio-atractivo-mercedes-benz](http://www.elfinanciero.com.mx/empresas/blindaje-de-autos-un-negocio-atractivo-mercedes-benz)
- 4.- Juárez, Pilar, *Audi Producirá Autos Blindados en Puebla*, Milenio, Consultada en 18 de Enero de 2017. [www.milenio.com/negocios/audi-producira-autos-blindados-en-puebla](http://www.milenio.com/negocios/audi-producira-autos-blindados-en-puebla)
- 5.- Arturo Vicencio Miranda, *La industria automotriz en México; Antecedentes, Situación Actual y Perspectivas, La incidencia de la calidad y la productividad en la competitividad de las organizaciones: El caso de dos empresas automotrices en México*, Tesis Doctorado, Instituto Politécnico Nacional, 2007.

# Capítulo I. Estado del Arte

### I.1.- Generalidades

El blindaje ha sido utilizado por el hombre desde los primeros tiempos en que la humanidad tuvo la necesidad de protegerse de los diferentes cambios climáticos, por ejemplo, resguardándose bajo un árbol, ocultarse dentro de una cueva (Figura I.1), cubriéndose con hojas, entre algunos ejemplos. A través de los años, el hombre evolucionó, dando inicio a la constante lucha con otras especies o entre la misma especie por territorios. Donde era posible, se podían abastecer de alimento por medio del descubriendo o/y implemento de más y mejores armas. Las cuales utilizaba para arrebatar o proteger sus propiedades. Con estos avances, la protección se vio obligada a realizar mejoras, por lo que empezaron a utilizar otros materiales que, al recibir un ataque, este lo repeliera protegiendo la integridad del cuerpo humano, primero con pieles, después con cuero [I.1]. Así hasta llegar a nuestros días con mejores y diversos materiales.



**Figura I.1.-** Antiguos refugios

### I.2.- Breve historia de la aplicación del blindaje

Probablemente el desarrollo de armamento sea la ciencia con mayores contribuciones al avance tecnológico de la humanidad. Con el descubrimiento del Hierro, se inicia el desarrollo de armas con mayor vida útil y mejor dureza. Sin embargo, al empezar a combinar materiales para generar una mejor protección para el individuo (como los escudos, desarrollados de un marco de Hierro y forro de madera, que eran capaces de soportar los ataques de espadas y/o lanzas). De igual manera se continua con la operación de utilizar el metal no sólo para la protección del cuerpo humano, sino también para la protección de animales domesticados [I.2].

En la época antigua y media, se realizaron diferentes modificaciones a las armaduras con el propósito de dar la mayor protección al usuario, claro, sin sacrificar en demasía la movilidad (Figura I.2). Así como, generando armaduras articuladas para una mayor protección a las áreas blandas del cuerpo [I.3]. Asimismo, la construcción de los castillos que fueron implementados con el propósito de protegerse de ataques bélicos [I.4]. Otro avance para esa época fue el desarrollo de torres de asedio, las cuales protegían a los guerreros al momento de asaltar un castillo en el que su gobernante se resistiera a ser sometido [I.5].

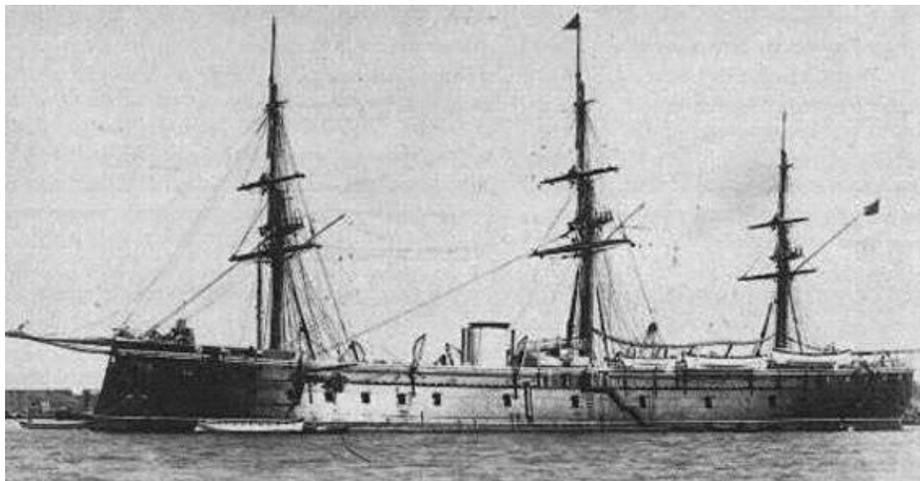


**Figura I.2.-** Diversas armaduras a lo largo de la humanidad

El blindaje creció de manera exponencial en estas edades, hasta el punto de generar caballería pesada, totalmente cubierta de Hierro, las cuales eran conocidos como *catafractos*. Esta caballería fue el mayor avance tecnológico en batallas de campo abierto, a pesar de ser lentos y poder estar en batalla por un corto plazo. Sin embargo, eran considerados como invencibles [I.6].

### I.2.1.- Uso del blindaje en transporte marítimo

El 20 de febrero de 1805 cuando el *London Times* publicó una propuesta del *Sir. William Congreve*, militar e inventor que perfeccionó la fabricación de la pólvora y los cohetes de guerra, que consistía en recubrir los cascos de un barco con placas de Hierro convencionales para protegerlo de los impactos de los cañones. Sin embargo, la propuesta no tuvo avance alguno y solo quedó documentada [I.7].



**Figura I. 3.-** Primeros barcos blindados

En 1812, *John Stevens*, ingeniero e inventor americano de la primera caldera multitubular, presentó una propuesta similar a la del *Sir. Congreve* al congreso de New York. No obstante, la propuesta fue rechazada. Posteriormente el Ingeniero *Stevens* en conjunto con su hijo, *Robert Livingston Stevens*, continuaron realizando pruebas con las que determinaron el espesor con el que debía contar la plancha de Hierro para soportar el impacto de cualquier arma conocida [I.9]. Para 1814, los americanos no eran los únicos interesados en mejorar la resistencia de sus navíos, *Paixhan* hizo hincapié sobre la necesidad de fabricar barcos blindados, sin que su petición fuese escuchada de manera seria [I.9]. Años después, el proyecto presentado inicialmente por el Ingeniero *John Stevens* fue mostrado nuevamente ante el congreso por el Coronel *Robert Livingston Stevens*, en 1842, con los resultados de las pruebas realizadas durante 30 años. Los resultados despertaron gran interés en América y Europa [I.8].

El Arquitecto Naval francés *Charles Henri Dupuy de Lôme* presentó una propuesta de una fragata blindada en 1845. Fue hasta 1854 cuando estas propuestas muestran sus frutos, los ingleses

colocaron a flote cuatro quillas blindados, una de ellas con el nombre batería *Stevens*. Los franceses de igual manera fabricaron cuatro quillas, una de ellas nombrada *Congreve* (Figura I.4) [I.10].



**Figura I. 4.-** Quilla *Congreve*

Después de la construcción de las baterías, se continuó haciendo pruebas para mejorar la protección sin éxito. La industria del blindaje se encontraba en un atraso tecnológico en comparación con su rival, los proyectiles. Debido a que eran necesarias 22 pulgadas de Hierro para poder soportar el cañón más pesado y potente de esa época [I.11]. Hasta 1876, cuando en *Spezia*, la empresa francesa *Schneider et Cie*, realizó ensayos con una placa de 22 pulgadas con la característica principal de que contenía un 0.45% de Carbón. Los resultados superaron ampliamente los obtenidos con el Hierro. Aunque el acero suave soportaba de manera aceptable los impactos de los proyectiles tenía la gran desventaja que era muy propenso a fracturarse [I.11].

### **I.2.2.- Primeros vehículos blindados**

Dentro de los registros científicos se sabe que en 1902 fue cuando surge el primer vehículo blindado (Figura I.5) que fue nombrado *Simms Motor Scout* y diseñado por el Ingeniero *Frederick Richard Simms*. El cual consistía en un cuadríciclo motorizado *De Dion-Bouton* equipado con una metralleta y un escudo para proteger al conductor de forma frontal. El automóvil era capaz de alcanzar una velocidad máxima de 4 km/hr. Sin embargo, cuando el ataque era respondido el vehículo resultaba ineficiente para una retirada [I.12].



**Figura I. 5.-** Primer vehículo blindado

Con el propósito de solucionar esta problemática, los Ingenieros ingleses utilizarón un chasis *Daimler* al cual le ensablo un motor de 16 hp (Figura I.6). Pero este vehículo fue rechazado por los británicos debido a que lo veían innecesario, sino hasta la primera guerra mundial [I.13].

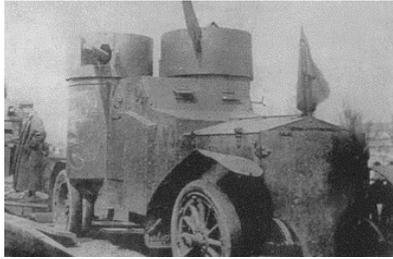


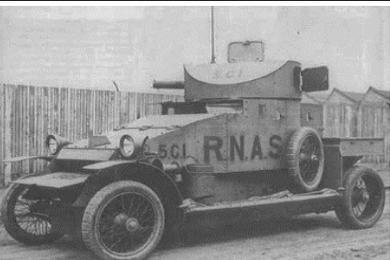
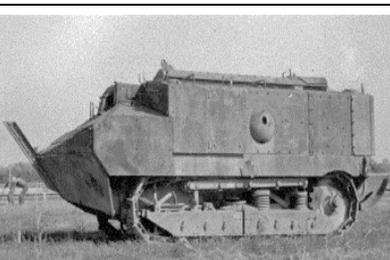
**Figura I. 6.-** Primer vehículo blindado en la *Gran Guerra*

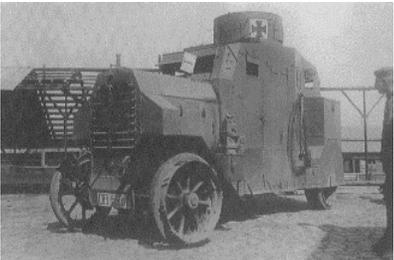
A lo largo de la *Primera Guerra Mundial* (1914-1918), se desarrolló el uso del blindaje en buques capitales como en tanques. Estos últimos mostraron un gran avance con la producción y prueba de

distintos modelos de acorazados terrestres, por parte de ambos bandos. En la Tabla I.1 se muestran algunos de los tanques blindados ocupados en la *Gran Guerra* por la triple alianza y la triple entente [I.14].

**Tabla I. 1.-** Vehículos blindados de la *Gran Guerra* [I.14]

Modelo	País	Imagen
Automóvil blindado <i>Minerva</i>	Bélgica	
Automóviles blindados <i>Austin-Putilov</i>	Gran Bretaña / Rusia	
<i>Mk1</i>	Gran Bretaña	
Carro medio <i>MkA</i>	Gran Bretaña	
Carro <i>Mk IV</i>	Gran Bretaña	

<p>Carro <i>Mk V</i></p>	<p>Gran Bretaña</p>	
<p>Automóvil blindado <i>Rolls-Royce</i></p>	<p>Gran Bretaña</p>	
<p>Automóvil blindado <i>Lanchester</i></p>	<p>Gran Bretaña</p>	
<p>Autoblindo <i>Mitragliatrice Lancia</i> <i>Ansaldo IZ</i></p>	<p>Italia</p>	
<p><i>Char d'Assaut</i> <i>Schneider</i></p>	<p>Francia</p>	
<p><i>Char d'Assaut St.</i> <i>Chamond</i></p>	<p>Francia</p>	

<p><i>Renault FT 17</i></p>	<p>Francia</p>	
<p><i>Autoblindé Peugeot</i></p>	<p>Francia</p>	
<p><i>Sturmpanzerwagen A7V</i></p>	<p>Alemania</p>	
<p><i>Panzerkrafwagen Ehrhardt</i></p>	<p>Alemania</p>	

Los tanques mostrados en la Tabla I.1 contaban con distintas características, como su masa, su velocidad de avance, el número de usuarios capaces de trasladar, entre otras. Sin embargo, los acorazados terrestres fueron ineficaces en terrenos pantanosos [I.15].

### I.2.3.- Vehículos blindados de uso civil

A partir de los sucesos de la *Primera Guerra Mundial*, el avance en el blindaje se implementó y creció, llegando a salir de la industria militar para ingresar en el mercado civil. Al ingresar a este mercado, las empresas fabricantes fueron buscando la estética de los vehículos. Uno de los autos blindados que sobresalieron en la historia fue un *Cadillac Town Sedan 431A* del año 1928 (Figura

I.7). Este automóvil fue del famoso *gangster Alphonse Gabriel Capone*, que contaba con cristales de más de 3 cm de grosor y la carrocería cubierta con un peso mayor de 1300 kg [I.16].



**Figura I. 7.-** Vehículo blindado de *Al Capone*

En 1978 el rey *Juan Carlos I* hizo uso de un automóvil blindado por primera ocasión y fue un *Mercedes Benz 450 SEL* de 2230 kg, equipado con una suspensión hidráulica y modificado en la parte del chasis para que el monarca pudiera estar de pie para saludar a sus seguidores [I.17].

El coche oficial del presidente de los Estados Unidos de América, es un híbrido de una limusina *Cadillac* con la estructura de una camioneta *GMC*, modelo 2009 con un blindaje tipo militar con materiales en Aluminio, acero y Titanio, capaz de soportar ataques de cohetes y armas químicas. Las ventanas tienen un grosor de 5 pulgadas y las puertas de casi 10 pulgadas de grosor, dando como resultado un vehículo de 7 toneladas (Figura I.8) [I.18].



**Figura I. 8.-** Vehículo blindado del ex-presidente *Obama Cadillac One*

En 2010 se lanzó el primer vehículo certificado *VR9* bajo la estricta normativa *BRV 2009*. Está diseñado para soportar proyectiles a alta velocidad, ataques químicos y explosiones, contando con placas de acero especial y cristales de 6 cm de grosor construido con varias capas de policarbonato. El auto descrito se muestra en la Figura I.9 un *BMW 750 Li High Security* o *760 Li High Security* con motor *V8* y *V12* respectivamente [I.19 y I.20].



**Figura I. 9.-** *BMW serie 7 high security*

Otro vehículo blindado desde fabrica es el *Mercedes-Benz S600 Guard 2015* (Figura I.20) que catalogan como el vehículo blindado civil más seguro del mundo, con una clasificación *VR9*. La mayor protección balística que soporta ataque de grandes proyectiles, ataques químicos, explosiones de hasta 15 kg de trinitrotolueno (*TNT*). El vehículo cuenta con un motor *V12*, vidrios inastillables, blindaje de piso, sistema de extinción de fuego con un peso mayor a las cuatro toneladas [I.21].

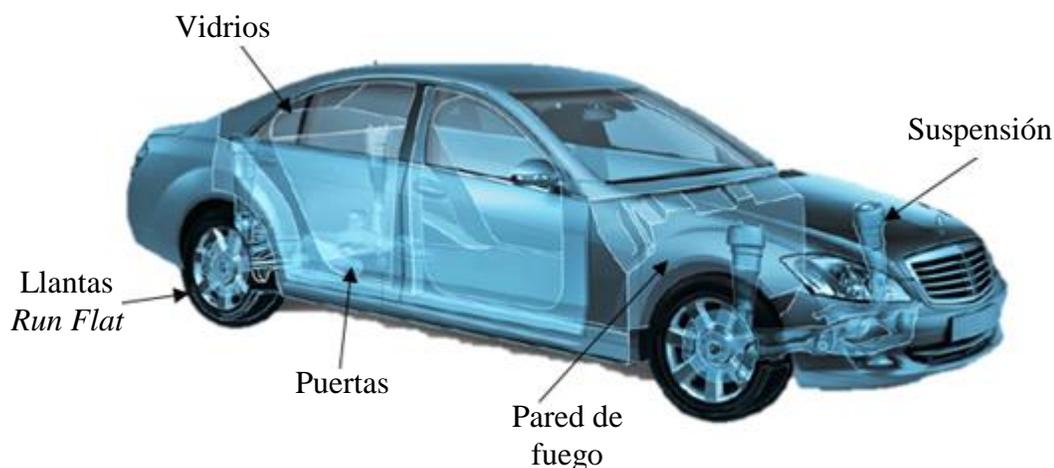


**Figura I. 10.-** *Mercedes Benz S-600*

En el presente trabajo, solo se hace mención de algunos vehículos blindados que se consideran sobresalientes, pero cabe mencionar que hay infinidad de ellos, donde se busca disminuir el peso de la unidad y aumentar su nivel de protección.

### I.3.- Proceso de blindaje

El nivel de blindaje que el usuario requiere se determina mediante el riesgo real que corre el usuario. Sin embargo, el proceso de blindaje es el mismo en todos los niveles de protección, realizando en primera instancia el desvestido interno y externo minucioso del vehículo, protegiendo cada una de las partes del vehículo. Posteriormente, se coloca acero balístico a la medida de cada parte del vehículo, acompañados o no de polietilenos en las zonas no visibles como, postes, pared de fuego, perímetro, toldo, piso y puertas generando una especie de capsula que protegerá al usuario de cualquier ataque (Figura I.11). Además, se protege el tanque de combustible con nylon balístico, se cubre la batería, la caja de fusibles y el Módulo de Control Electrónico (*ECM*) con acero balístico. Posteriormente se instala el blindaje transparente en las zonas visibles (ventanas, parabrisas, medallón). Se hacen cambios y/o modificaciones de la suspensión y al sistema de frenado para que el vehículo soporte el aumento de peso por el blindaje. Se instalan neumáticos run-flat y finalmente se instalan las piezas retiradas en el primer paso para que el vehículo luzca como recién salido de fabricación, sin ningún indicio de ser un vehículo de seguridad [I.22].



**Figura I. 11.-** Partes blindadas del automóvil

### I.4.- Breve historia de los sistemas de retención

Al realizar avances en el diseño y producción de vehículos comerciales se comenzó con la búsqueda de proporcionar seguridad a los usuarios. El sistema de retención más antiguo y con más fama es

el cinturón de seguridad. A finales del Siglo XIX donde el caballo era utilizado como transporte de diario aparecieron los primeros intentos por desarrollar un sistema que evitará la caída del usuario. Posteriormente el uso de este arnés fue utilizado en la aviación, con el propósito de retener al piloto dentro de la cabina a pesar de los movimientos bruscos que se presentaran. Este cinturón fue patentado el 10 de febrero de 1885 con el número de patente EE.UU. 312.085 publicada por *Edward J. Claghron* [I.23]. Posteriormente, en los años de 1940's el uso de automóviles fue aumentando, por consecuencia las colisiones mortales tuvieron mayores cifras. Así fue como los médicos hicieron un llamado a los fabricantes de vehículos mencionando la necesidad de integrar sistemas de retención [I.24]. Por lo que, en 1948 el empresario e inventor *Preston Thomas Tucker* incluyó en su modelo *Torpedo* un cinturón de dos puntos (Figura I.12) [I.25]. Consecutivamente en 1950 el *Nash 600* y el *Ford Fairlane Crown Victoria* de 1955 siguieron el ejemplo del inventor *Tucker* [I.26].



**Figura I. 12.-** Cinturón de seguridad de dos puntos

A pesar del gran avance que proporcionó el cinturón de dos puntos, tuvo como resultado grandes lesiones internas en la zona abdominal en colisiones a altas velocidades [I.27]. Por lo que, en 1959 el Ingeniero sueco *Nils Bohlin*, trabajando para *Volvo*, presentó el diseño de un cinturón de tres puntos (Figura I.13), tomó como base la patente US No. 2.710.649 presentada en 1950 por *Hugh De Heaven* y *Roger W. Griswold*. El diseño del Ingeniero *Bohlin* obtuvo la patente EE.UU. 3.043.625 aunque no para el diseño, sino por encontrar una aplicación apropiada para el cinturón [I.28]. Así que, el primer vehículo en ser lanzado a la venta con este dispositivo fue el *Volvo*

*Amazon* de 1959. El impacto que tuvo este diseño fue tan grande dentro de la industria automotriz que Volvo libero la patente para que sus competidores lo incorporaran a sus vehículos [I.29].



**Figura I. 13.-** Cinturón de seguridad de tres puntos

Este sistema de retención solo era instalado en el asiento del conductor, fue hasta 1967 cuando en Estados Unidos se aprobó la *Ley de Seguridad Vial* y la *Ley Nacional de Tránsito y Seguridad de Vehículos Motorizados* donde mencionan que los cinturones de seguridad deben ser estándar en los asientos traseros [I.30].

En 1984 es cuando el estado de Nueva York, EEUU, aprobó la primera ley que obliga a los usuarios de cualquier vehículo motorizado a hacer uso del sistema de retención. Poco a poco, los demás estados lo siguieron, sin embargo, hasta 2009 New Hampshire aun no tenía una ley que obligara al usuario a portar el cinturón [I.31].

En la actualidad existe un cinturón de seguridad de cinco puntos (Figura I.15), el cual es considerado un arnés. Este dispositivo presume ser más eficaz que el de tres puntos, por lo que, es utilizado en vehículos de carreras y como sistema de retención infantil. Donde la carga en caso de colisión se distribuye mejor. Si se hiciera uso del cinturón de tres puntos para los infantes, en la

colisión, las costillas se doblarían en vez de romperse como en los adultos, comprometiendo en gran medida pulmones y corazón [I.32].



**Figura I. 14.-** Sistema de retención de cinco puntos

Se ha obtenido un gran progreso reduciendo el número de muertes en conductores y pasajeros en choques en las últimas décadas. Gran parte de este progreso se debe a las leyes de conducción, avances a la resistencia de los vehículos y los sistemas de seguridad pasiva como los sistemas de retención [I.33 y I.34].

### **I.5.- Breve historia de herramientas para pruebas de seguridad pasiva**

La seguridad pasiva en los vehículos ha mostrado grandes mejoras, como lo son los distintos tipos bolsas de aire, de sistemas de pretensión, entre otros. Sin embargo, desde principios del Siglo XX se ha buscado conocer el nivel de seguridad que proporciona el automóvil, así que se realizaban choques como prueba como cadáveres humanos. Estos eran cubiertos con vendajes, inyectarle un líquido similar a la sangre, sujetarle al vehículo y realizar la prueba [I.35]. Fue hasta 1949, cuando *Samuel W. Alderson*, realizó el primer maniquí de pruebas llamado *Sierra Sam* (Figura I.16). El maniquí tenía el propósito de probar los asientos eyectores de los aviones. Sin embargo, se dio cuenta que los soldados sufrían mayor cantidad de accidentes en transporte terrestre que aéreo, por lo que decidió realizar las pruebas en vehículos [I.36]. Debido a los grandes avances, estos son sometidos a diferentes pruebas y análisis para saber hasta qué punto los dispositivos de retención garantizan la seguridad del usuario. Así como, se han realizado múltiples mejoras a los maniqués de prueba, donde existen diferentes tipos con diferentes tamaños o percentiles que simulan

diferentes características físicas del humano. Según sea hombre, mujer, niño o niña. A pesar, de los grandes avances que existen en los maniquí de pruebas existe un inconveniente, el alto costo de estos, se ha utilizado como alternativa las simulaciones por ordenador los cuales permiten diversas opciones de realizar pruebas de choque. Por esta razón, se han generado *Dummies* virtuales con un elevado grado de biofidelidad, ya que componen el cuerpo humano como lo es, la forma de los huesos, órganos, músculos, tendones, piel, los tejidos blandos alrededor de la columna vertebral. Lo que permite obtener índices de lesión con mayor detalle en casos colisión [I.37].



**Figura I. 15.-** Implementación de maniquí para pruebas

### **I.5.1.- Algunos trabajos sobre sistemas de retención**

Para verificar la eficacia de los sistemas de retención en diferentes situaciones de colisión, se han realizado infinidad de estudios que muestran la comparativa del uso de los sistemas, frente a las situaciones donde no se hace uso de ellos. En el presente trabajo se mencionarán algunos trabajos realizados que demuestran la eficacia del uso de sistemas de retención [I.38 a I.43]:

- **Riesgo de lesión asociado con el uso de sistemas de retención y bolsas de aire en colisiones de vehículos.** - El trabajo realiza una evaluación que permite conocer cuál es la ventaja que presenta el uso de los sistemas de retención y las bolsas de aire en un vehículo motorizado. Presentando cuatro posibles opciones de uso: sistemas de retención y bolsas de aire, sistemas de retención, bolsas de aire o sin ninguno de los dos dispositivos.

- **Efectos de limitadores de carga de los sistemas de retención en decesos del conductor en colisiones frontales de un vehículo de pasajeros.** - El presente opúsculo realiza un estudio sobre la eficacia de los sistemas de retención con limitadores de carga haciendo una comparativa de muertes en vehículos donde no se hayan agregado los limitadores de carga y donde se instalaron. Por lo que, propuso un cambio en el diseño de los sistemas de retención con limitadores de carga tomando en cuenta el mundo real, debido a que se presume que el sistema con limitadores no reduce la fatalidad, que incluso puede existir un aumento.
- **Seguridad del asiento trasero: Variación en la protección de los ocupantes, colisión y características del vehículo.** - En este artículo presentado en 2015 hace uso de los datos proporcionados por la *NASS-CDS* del 2007 al 2012 para demostrar que de acuerdo a las estadísticas de riesgos de lesiones y deceso por accidentes vehiculares. Se muestra un grave atraso en los sistemas de retención de las filas posteriores de los vehículos, debido a que el riesgo de óbito es considerablemente mayor que los de la fila delantera.
- **Método para evaluar el efecto del cinturón de seguridad de pasajeros de la fila trasera sobre lesiones severas de ocupantes de asientos delanteros.** - El escrito hace énfasis en el porcentaje de lesiones severas en personas ubicadas en las filas delanteras del vehículo cuando los ocupantes de la fila trasera hacen o no uso de los sistemas de retención. Para obtener el porcentaje se realiza la estimación de la magnitud de la colisión mediante la propuesta de una velocidad durante choque. Obteniendo como resultado que el uso de sistemas de retención en los pasajeros de la fila trasera del vehículo es efectivo antes las colisiones frontales y, además, existe un 28% menos de probabilidad de que los pasajeros de la fila delantera sufran heridas graves.
- **La marca del cinturón de seguridad y sus lesiones asociadas.** - Dicho opúsculo realiza una correlación de las lesiones provocadas por el cinturón de seguridad al sufrir una colisión frontal a una población de 1264 pacientes de cuentan con la mayoría de edad, dividiéndolos en cuatro niveles según su gravedad. Para de esta forma poder

---

concluir con que la marca del cinturón en el abdomen y tórax es altamente relacionada con lesiones viscerales y musculo-esqueléticas.

- **Seguridad en ocupante de vehículo en colisión frontal; Parámetro de estudio de la masa, velocidad de impacto y protección inherente del vehículo.** - El trabajo presenta un modelo que permite mejorar la estimación de las lesiones y decesos en choques frontales tomando en cuenta la masa del vehículo, la distribución de la velocidad del impacto y la protección del vehículo. Mediante la probabilidad de colisión de dos vehículos y el cálculo de la velocidad del impacto. Dando como resultado que una reducción de masa es benéfica, mientras que una reducción uniforme de masa puede incrementar el rango de fatalidad, el modelo estima tendencias en seguridad que sirven como apoyo las prioridades de seguridad activa o pasiva.

### **I.6.- Planteamiento del problema**

Se han realizado diversos estudios de la efectividad de los sistemas de retención que permiten conocer las lesiones viscerales y musculo-esqueléticas existentes en colisiones vehiculares frontales. Asimismo, incluyen estos estudios las velocidades de impacto, la estructura del vehículo, entre otros factores. Sin embargo, las investigaciones realizadas en la mayoría de los casos exhiben vehículos comerciales y no se ha presentado algún caso de estudio de un vehículo comercial que es sometido a un proceso de blindaje. Debido al mayor peso del vehículo, las condiciones en caso de accidente son completamente diferentes de las de un vehículo de producción en serie. Por lo se requiere realizar una evaluación de los sistemas de retención al momento del impacto, considerando las nuevas condiciones que se encuentran después del proceso de blindaje mediante una simulación numérica de colisión frontal para conocer la respuesta del cuerpo humano ante dicha situación, con condiciones diferentes a las preestablecidas del vehículo fabricado en serie y de esta forma tener el conocimiento de si el cambio de condiciones compromete la integridad física de los usuarios con la finalidad de realizar una propuesta de los sistemas de retención que aseguren el bienestar de los ocupantes al presentarse una situación de colisión.

## I.7.- Sumario

En el presente capítulo se muestra el inicio del blindaje, sus avances hasta llegar al uso civil y los vehículos más seguros del mundo que se encuentran en el mercado, así como las partes que del vehículo que son cubiertas para ofrecer protección a los ocupantes. De igual forma, se presenta la evolución de los sistemas de retención desde el cinturón de dos puntos hasta los sistemas de retención infantil. Por último, se enuncian algunos trabajos realizados con el propósito de mejorar los sistemas de retención para ofrecer mayor seguridad a los ocupantes de los vehículos.

## I.8.- Referencias

- 1.- Guy, J., *Historia de las Armas y Guerras*, Ed. Andrés Bello, 1999.
- 2.- Gabaldón-Martínez, M. M., *Ritos de Armas en la Edad del Hierro; Armamento y Lugares de Culto en el Antiguo Mediterráneo y el Mundo Celta*, Ed. Consejo Superior de Investigaciones Científicas; Ediciones Polifemo, pp 19-32, 2004.
- 3.- Ferrand, J., *Construcciones de Hierro y de Madera; Armaduras Mixtas de Hierro, de Fundición y de Madera, Armaduras Decorativas para Talleres, Almacenes, Mercados, Tinglados, Pabellones, Galerías, Puentecitos, Azoteas, Suelos, Puertas, etc*, Ed. J. M. Fabre, pp 1-32, 1879.
- 4.- Cairns, C., *Los Castillos Medievales*, Ed. Akal; Historia del Mundo, pp 4-12, 2010.
- 5.- Livio, T., *Historia de Roma desde su Fundación; Libros XXI a XXX*, Ed. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, pp 4-27, 1997.
- 6.- Sánchez, J. J. V., Los columbarios de La Rioja, *Antiguo Cristiano*, No. XVI, pp 9-13, 1999.
- 7.- Winter, F. H., *The First Golden Age of Rocketry; Congreve and Hale Rockets of the Nineteenth Century*, Ed. Smithsonian Institution Press, pp 21-23, 1990.
- 8.- Hendrikson III, K. E., *The Encyclopedia of the Industrial Revolution in World History*, Vol 3, Ed. Rowman & Littlefield, pp 911, 2014.
- 9.- Kinard, J., *Weapons and Warfare; Artillery, An Illustrated History of their Impact*, Ed. ABC Clio, pp 235-236, 2007.
- 10.- Walker, F. M., *Ships and Shipbuilders; Pioneers of Design and Construction*, Ed. Seaforth Publishing, pp 107-108, 2010.
- 11.- Smith, G., Period of Pax Britannica, 1815-1914; Technical development from contemporary sources introduction to the development of warship armour, *United States Navy Manual; Naval Ordnance and Gunnery*, Ed. Naval-history. Net, 2015.

- 12.- Brown, D. K., *Warrior to Dreadnought; Warship Design and Development 1860-1905*, Ed. Seaforth Publishing, pp 120, 2010.
- 13.- Crow, D., *Armoured Fighting Vehicles of the World*, Ed. Windsor:Profile publications, 1970.
- 14.- Stevenson, D., *1914-1918; The History of the First World War*, Ed. Penguin, 2012.
- 15.- Lara-Bosch, J. M., *Máquinas de Guerra; Enciclopedia de Armas del Siglo XX: Vehículos Acorazados de la I Guerra Mundial*, Ed. Planeta-Agostini, pp 1-21, 1984.
- 16.- Cadillac Motor Car Company, *New Interpretations of Motoring Luxury*, Ed. Cadillac Motor Car Company, 1930.
- 17.- Muñoz, P., *39.500 Euros por el Mercedes Blindado del Rey Juan Carlos*, Las Provincias, 2017.
- 18.- Merksamer, G. D., Take a look inside the president's new Cadillac One limo, *Popular Mechanics*, 2011.
- 19.- BMW, *The BMW 7 Series High Security; Security Redefined*, Ed. BMW Security Vehicles, 2009.
- 20.- BMW, *The New BMW 7 Series; Driving Luxury*, Ed. BMW Security Vehicles, 2016.
- 21.- Mercedes Benz, *The S-Class*, Ed. Mercedes Benz, Daimler AG, 2014.
- 22.- Texas armouring Corporation, *Armored Vehicle Manufacturing Process*, Consultada en 13 Octubre de 2016.
- 23.- Hedgbeth, L., *A History of Automotive Seatbelts, Second Chance Garage: For the Classic Car Restoration Enthusiat*, Consultada Enero 2018.
- 24.- Chiralt-Siles, V., *El Cinturón de Tres Puntos Cumple 50 Años*, El mundo Consultada el 20 de Agosto de 2009.
- 25.-Villarreal-Chérrez, V. H., *Estudio de la Eficiencia de los Cinturones de Seguridad de Vehículos Categoría M1 y N1 Según Norma RTE INEN 034*, Universidad Internacional del Ecuador, pp 26, 2016.
- 26.- Pérez, Jaime M., *Modelado de Diferentes Tipos de Cinturones de Seguridad y Estudio de su Efecto en Caso de Colisión Frontal Mediante Ls-Dyna*, Universidad Carlos III de Madrid, pp 18, 2010.
- 27.- Alfaro-Basso, D., *Lesiones por Cinturón de Seguridad*, Hospital Fuerza Aérea-Perú, 2005.
- 28.- Vargas, R., *Lesiones por Cinturón de Seguridad en Ocupantes de Automóvil*, Medicina Legal, pp. 46 y 47, 1998.

- 
- 29.- Hendeby, G. W., Automobile restraint systems and injury prevention, *Western Journal of Medicine*, pp 63 y 64, 1996.
  - 30.- *National Traffic and Motor Vehicle Safety Act. of 1966*, Public Law 89-563-Sept.9,1966.
  - 31.- Centers for Disease Control and Prevention, *Motor Vehicles Safety*, Consultada en 5 de Diciembre de 2015.
  - 32.- FIA Foundation for the Automobiles Society, *Cinturones de Seguridad y Sistemas de Retención Infantil; Un Manual de Seguridad Vial para Decisores y Profesionales*, Ed. Organización Mundial de la Salud, 2009.
  - 33.- Insurance Institute for Highway Safety, *General Statistics Fatality Facts*, Consultada en 2 de Junio de 2014.
  - 34.- National Highway Traffic Safety Administration, *New Car Assessment Program (NCAP)*, Federal Register, 2013.
  - 35.- Gobierno de España y Ministerio de Fomento, Sustituyen a los humanos en las pruebas de choque, *Revista Tráfico y Seguridad Vial*, No. 210, pp 17, 2011.
  - 36.- Fundación CIDAUT, *Maniqués de Impacto-Crash Test Dummies*, Investigación y Desarrollo en Transporte y Energía, pp 3-11, 2012.
  - 37.- Maeno, T. y Hasegawa, J., Development of a Finite Element Model of the Total Human Model for Safety (THUMS) and Application to Car-Pedestrian Impacts, *Proceedings of 17th International ESV Conference*, pp 1, 2001.
  - 38.- Cummins, J. S., Koval, K. J., Cantu, R. V. y Spratt, K. F., Risk of injury associated with the use of seat belts and air bags in motor vehicle crashes, *Bulletin of the NYU Hospital for Joint Diseases*, Vol. 66, No. 4, pp 290-296, 2008.
  - 39.- Brumbelow, M. L., Baker, B. C. y Nolan, J. M., Effects of seat belt load limiters on driver fatalities in frontal crashes of passenger cars, *Insurance Institute for Highway Safety, Vehicle Research Center*, pp 1-12, 2007.
  - 40.- Durbin, D. R., Jermakian, J. S., Kallan, M. J., McCartt, A. T., Arbogast, K. B., Zonfrillo, M. R. y Myers, R. K., Rear seat safety; Variation in protection by occupant, crash and vehicle characteristics, *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 80, 185-192, 2015.
  - 41.- Shimamura, M., Yamazaki, M. y Fujita, G., Method to evaluate the effect of safety belt use by rear seat passengers on the injury severity of front seat occupants, *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 37, No. 1, pp 5-17, 2005.

- 
- 42.- Petrone, P., Pardo, M. y Asencio, J. A., La marca del cinturón de seguridad y sus lesiones asociadas, *Revista Chilena de Cirugía*, Vol. 56, No. 1, pp 12-16, 2004.
- 43.- Buzeman, D. G., Viano, D. C. y Lövsund, P., Car occupant safety in frontal crashes; A parameter study of vehicle mass, impact speed, and inherent vehicle protection, *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 30, No. 6, pp 713-722, 1998.

# **Capítulo II Marco Teórico**

## II.1.- Introducción

Para el conocimiento y entendimiento de una colisión automotriz es necesario saber cómo está conformada. De igual manera se tiene que tomar en cuenta que deben existir dispositivos que permitan mantener la integridad del usuario. Por lo que, en el presente trabajo se realiza una breve explicación de los tipos de contacto existentes en un impacto vehicular frontal, del cinturón de seguridad y las normas vigentes que permiten tener productos homogéneos y de calidad.

## II.2.- Fenómeno de colisión

Al existir una colisión se pueden encontrar tres tipos de contactos, conocidos como colisión primaria, secundaria y terciaria, las cuales se describen a continuación (Figura II.1) [II.1]:



Etapa primaria

Etapa secundaria



Etapa terciaria

**Figura II. 1.-** Etapas de la colisión

- **Primaria.-** El vehículo realiza el contacto con el objeto y comienza la deformación del habitáculo.

- Secundaria.- Los usuarios son proyectados con el habitáculo haciendo contacto con el tablero, volante, puertas, entre otros.
- Terciaria.- Esta sucede dentro del cuerpo de los usuarios, donde los órganos impactan con las paredes internas del humano.

Debido a este fenómeno se tiene que antes de la colisión, el vehículo, el usuario y los órganos del mismo cuentan con una misma velocidad, provocando que los mencionados previamente cuenten con una energía cinética, la cual es determinada mediante la velocidad acompañado del peso del vehículo involucrado. Lo que se puede expresar mediante en la Ecuación II.1 [II.1 a II.3]:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{II. 1}$$

Donde;  $E_c$  es la energía cinética del sistema,  $m$  representa a la masa del sistema y  $v$  es la velocidad. La Ecuación II.1 permite calcular la energía que se encuentra ligada al cuerpo en movimiento [II. 1]. Donde se observa que la energía cinética de un cuerpo en movimiento depende de la velocidad en forma logarítmica (que cuadriplica la energía). Sin olvidar la masa del objeto [II.2]. Dicho esto, el vehículo al impactar requiere la disipación de la energía con la que contaba antes de la colisión, las cuales pueden ser en la deformación de la carrocería, en el objeto impactado y en los ocupantes. Sin embargo, la mayor energía que se absorbe es por el oponente de menor masa, el usuario [II.3]. Debido a múltiples casos de colisión, es importante mencionar que el más grave es aquel en donde el vehículo hace contacto con una barrera indeformable, donde, esta absorbe de forma despreciable la energía, por lo que, el vehículo tendrá que distribuir toda la energía del impacto. La energía disipada se obtiene mediante la Ecuación II.2 [II.1 a II.3].

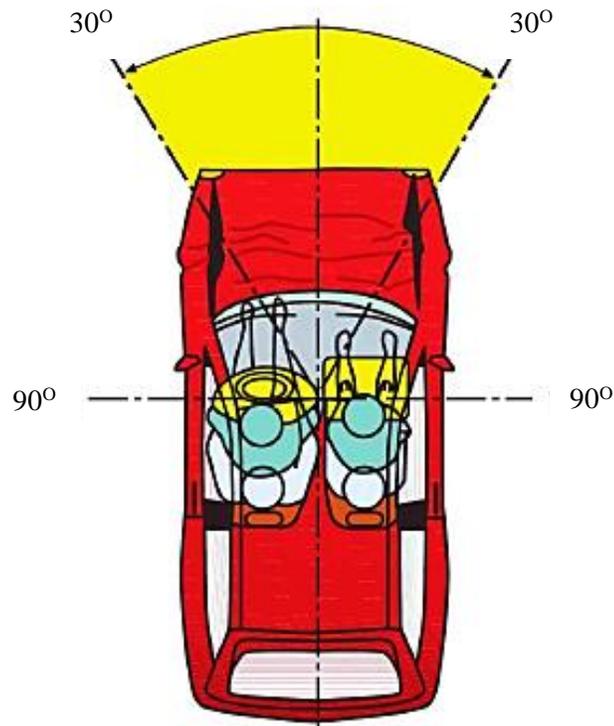
$$E_d = F * d \quad \text{II.2}$$

Donde  $E_d$  es la energía disipada,  $F$  es la fuerza que se ejerce sobre el vehículo y  $d$  es la distancia que se deforma el vehículo. Acorde con lo anterior, los sistemas de seguridad pasiva buscan en todo momento evitar los últimos dos casos, con el fin de proteger la integridad de los ocupantes. Por lo que, se tiene la necesidad de absorber la energía de la colisión. Las zonas son el vano

delantero y trasero quienes realizan la función de amortiguar el golpe mediante la deformación. Por otro lado, el habitáculo debe deformarse lo menos posible para mantener el espacio vital de los usuarios [II.4].

**II.3.- Campo de acción**

En situaciones de colisiones frontales a velocidades superiores a 28 km/h y oblicuo a 38 km/h, el impacto es suficiente para que el conductor y el acompañante hagan contacto con el volante o el tablero de instrumentos, de no utilizar algún sistema de retención. Los pretensores se activan en colisiones de incidencia frontal dentro de un campo de acción de  $\pm 30^\circ$  (Figura II.2) [II.5]. Asimismo, es importante considerar como se desarrolla el accidente dividiéndolo en 6 fases a una velocidad de 50 km/h como se muestra en la siguiente Tabla II.1 [II.5].



**Figura II. 2.-** Campo de incidencia frontal

**Tabla II. 1.-** Fases del accionamiento del sistema de retención

FASE	ACCIÓN
1	En el instante <i>zero</i> el vehículo impacta en el muro
2	20 ms más tarde, el sensor activa la combustión del generador de gas

3	Después de 20-22 ms se inicia el movimiento del émbolo que a su vez tira el cable retractor. El movimiento del cable hace girar el embrague, que se activa por efecto de la fuerza centrífuga y transmite el esfuerzo al eje retractor.
4	De 22-26 ms el eje gira retrayendo la cinta, normalmente entre 40 y 150 mm.
5	A los 30 ms se inicia el movimiento del ocupante respecto al asiento
6	A los 32 ms entra en funcionamiento el sistema de bloqueo del retractor hasta que el pasajero retrocede y queda en la posición inicial, con la retracción del cinturón se consigue una disminución considerable del movimiento del pasajero y por tanto se evitan posibles lesiones.

#### II.4.- Habitáculo

El habitáculo es la zona estructurada destinada a garantizar la seguridad de los ocupantes con ayuda de los sistemas de retención, con el fin de preservar la integridad de los mismos [II.6]. Actualmente la mayoría de los automóviles son del tipo de carrocería monocasco, debido a que soporta y sujeta todos los elementos sobre ella, además, de soportar esfuerzos de torsión, flexión, fuerzas aerodinámicas, entre otras. Lo que hace necesario una carrocería rígida que soporte todas las condiciones anteriores y que sea capaz de deformarse en caso de colisión con el propósito de disipar la mayor energía posible, manteniendo en todo momento el habitáculo integro asegurando la vida de los usuarios (Figura II.3) [II.7].



**Figura II. 3.-** Habitáculo integro a pesar de las deformaciones

## II.5.- Evaluación de daño

Durante la colisión se produce un fenómeno denominado desaceleración, que establece la gravedad del accidente. Si en una colisión hay una velocidad inicial que tiene que acabar siendo cero, la desaceleración viene a ser la rapidez con la que se produce el cambio. Sin embargo, este concepto no se evalúa de acuerdo con el tiempo, sino que la desaceleración se mide en  $g$ , que es equivalente a la aceleración con que caen los cuerpos a la tierra ( $9.81 \frac{m}{s^2}$ ). Para ello es necesario saber que el humano tiene una desaceleración limitada, los límites del cuerpo varían de acuerdo con la parte del mismo, sin embargo, la parte más sensible es la columna que a partir de 10 g comienza a sufrir lesiones y no es capaz de soportar más allá de 25g por más de 0.2 segundos y 100 g por más de 0.05 segundos [II.8]. El cuerpo es capaz de soportar 18 g sostenidas antes de que los pulmones se compriman, la respiración se dificulte y los órganos internos comiencen a desgarrarse. Sin embargo, este parámetro solo es utilizado para desaceleraciones frontales, ya que, a una aceleración de 14 g lateral puede desgarrar los órganos.

### II.5.1.- Criterio de daño

Existen diferentes criterios de daño que permite conocer las lesiones que sufre el usuario al momento de una colisión donde las partes del cuerpo que son consideradas con mayor frecuencia son la cabeza y tórax [II.9]. De forma general es posible obtener el daño de la colisión mediante el índice de severidad de la aceleración (*ASI*) lo que permite como primera lectura de datos el validar o rechazar algún modelo. El coeficiente es adimensional y se obtiene con las aceleraciones que experimenta el vehículo al momento de la colisión. Se define por la Ecuación II.3 que se muestra a continuación [II.9]:

$$ASI(t) = \left[ \left( \frac{\bar{a}_x}{\hat{a}_x} \right)^2 + \left( \frac{\bar{a}_y}{\hat{a}_y} \right)^2 + \left( \frac{\bar{a}_z}{\hat{a}_z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{II.3}$$

Donde;  $\bar{a}_{x,y,z}$  son las componentes de la desaceleración a lo largo de un intervalo de los 50 ms posteriores al impacto,  $\hat{a}_{x,y,z}$  hacen correspondencia a los valores límites de aceleración en los tres ejes X (longitudinal), Y (lateral) y Z (vertical).

Para poder hacer referencia a los niveles de gravedad y asociarlos con el riesgo a los ocupantes se asume que estos hacen uso de los sistemas de retención que el vehículo ofrece. Con ellos se determinan tres clases (Tabla II.2) [II.9].

**Tabla II. 2.- Índice ASI**

Clase	Nivel ASI	Heridas
A	$\leq 1.0$	Leves
B	$\leq 1.4$	Fracturas y pérdidas de conocimiento de corta duración
C	$\leq 1.9$	Letales

El criterio de daño a la cabeza (*HIC*) (Ecuación II.4) es empleado para la evaluación de los sistemas de retención de los pasajeros. Este criterio refleja el cambio de aceleración que sufre el miembro superior instantes después de la colisión, una vez que la onda de impacto alcanza el asiento del pasajero. El cálculo se lleva a cabo seleccionando los límites máximos de integración. La ISO (*International Standard Organization*) sugiere como valor máximo 15 milisegundos posteriores al impacto [II.10].

$$HIC = \left\{ (t_2 - t_1) \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \right\} \quad \text{II.4}$$

Para el tórax, la aceleración resultante a partir de la salida de instrumentación no debe exceder una aceleración de 60 g's, con la posibilidad de sobrepasar este valor donde su duración no exceda de 3 milisegundos. El esternón tendrá una deformación por compresión que no debe superar los 40 mm con respecto a la columna [II.11].

## II.6.- Sistemas de retención

Los sistemas de retención son los elementos del automóvil encargados de mantener a los ocupantes dentro de un espacio determinado del vehículo, a pesar de los accidentes que estos pueden sufrir durante una colisión, teniendo en cuenta que esta retención no pueda ser rígida. Es decir, debe ser progresiva, con objeto de que no se sobrepasen los límites de tolerancia del cuerpo humano.

Durante una colisión, la cadena de movimientos se realiza de forma que el vehículo es el que colisiona y después son los ocupantes los que impactan con el vehículo. En este último movimiento es donde actúa el sistema de retención, ya que no basta con el rozamiento del cuerpo de los ocupantes sobre los asientos para realizar un movimiento adecuado [II.12]. Algunas piezas que conforman el cinturón de seguridad son los siguientes [II.13 a II.20]:

- 1- Hebilla.
- 2- Lenguas.
- 3- Retractores.
- 4- Pretensores.
- 5- Desviador.
- 6- Correa.
- 7- Limitadores de tensión.

#### **II.6.1.- Correa [II.13 y II.14]**

La correa del cinturón está sujeta por dos extremos a la carrocería y gracias a una hebilla deslizante que encaja en un cierre automático, el cinturón se ajusta al cuerpo del usuario. Uno de los puntos está situado a un punto del bastidor del vehículo situado cerca del suelo y el otro extremo, retráctil, se encuentra detrás del hombro del usuario, cerca de las cabeceras del asiento anclado a la carrocería. Las normas de homologación prescriben que los cinturones de seguridad deben estar construido por dos o más cintas de tejido muy resistentes capaces de soportar una carga de 1500 kg.

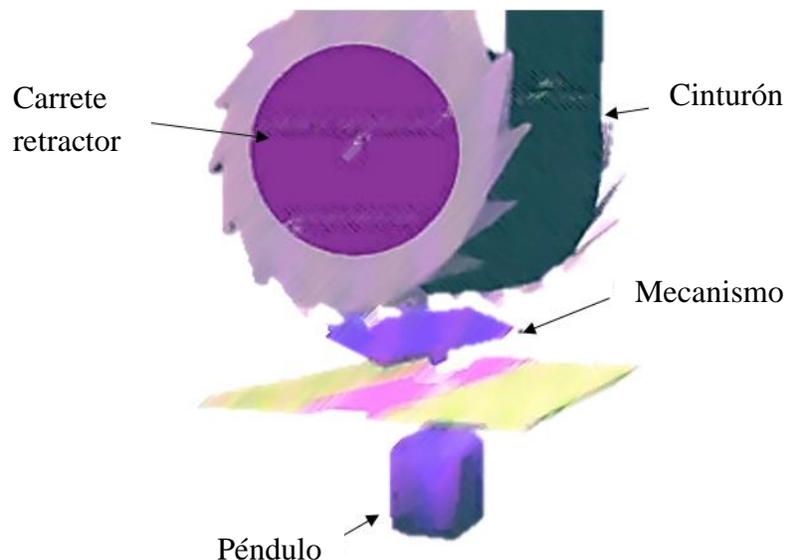
#### **II.6.2.- Retractor [II.15 y II.16]**

El mecanismo retráctil consiste en un cilindro, solidario a un muelle sobre el que se enrolla la tela del cinturón, gracias a su acción de muelle siempre se ajusta la correa al tórax del usuario ejerciendo una presión leve. Para este dispositivo existen dos sistemas, el *ALR* y *ELR*. El retractor de cierre automático (*ALR*) permite que cuando el tejido del cinturón (correa) este insertada en la hebilla se retraiga el sobrante hasta que la cinta se encuentre ajustada alrededor de las caderas y ajustadas sobre la caja torácica del usuario. Esta función también es conocida como modo de retención infantil. El retractor de cierre de emergencia (*ELR*) es el sistema que bloquea la cinta cuando existe

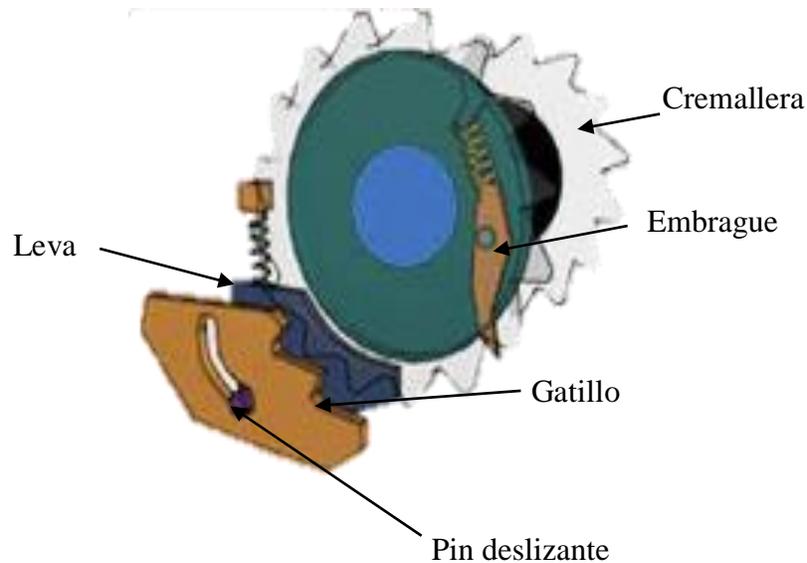
una respuesta rápida de desaceleración del vehículo existiendo dos mecanismos típicos con los que funciona este dispositivo. Una de las limitaciones de este cinturón de seguridad es que no se puede utilizar para sostener un asiento infantil en su lugar.

1. Mecanismo de traba pendular.- Este mecanismo es controlado por una barra, instalado de forma pendular colocada verticalmente, que tiene un contrapeso en el extremo bajo de su extensión que se inclinara al momento en que exista una desaceleración del vehículo provocando que el péndulo trabe el carrete del cinturón de seguridad (Figura II.4).
2. Mecanismo con traba centrifuga.- Existe una palanca que gira a la par del carrete del cinturón, cuando la palanca gira lentamente la palanca se mantiene en su sitio, sin embargo, cuando el carrete se mueve rápidamente la palanca crea una fuerza centrífuga que traba en los dientes del engrane del carrete (Figura II.5).

Los cinturones modernos están complementados por dos aparatos, uno que da más tensión al cinturón (pretensor) y otro que la quita (limitador de tensión). Además, son accionados por microprocesadores que el accionamiento se ajusta a la masa del usuario y en algunas ocasiones a su estatura [II.17].



**Figura II. 4.-** Mecanismo traba pendular



**Figura II. 5.-** Mecanismo traba centrífuga

### II.6.3.- Limitador de tensión [II.18]

La actuación del pretensor induce una fuerte presión del cinturón en pecho y abdomen, que puede provocar ciertas lesiones. Se evita o reduce mediante el apoyo elástico del cinturón en uno de sus extremos de la carrocería, de forma que, al actuar el pretensor, el limitador se va extendiendo o torciendo (Figura II.6) gradualmente reduciendo progresivamente la presión hasta más o menos un 50%. La intervención del limitador de esfuerzo suele comenzar cuando la presión de empuje es de unos 250 kg, llegando a su máxima extensión de 1650 kg. Es decir, la actuación es progresiva en función de la fuerza de colisión y peso del ocupante. La entrada en acción del limitador de esfuerzo conlleva inevitablemente un desplazamiento hacia adelante del ocupante que se ha de proteger. En realidad, es el eje torsional del rodillo del cinturón el que hace la función limitadora con más frecuencia, aunque existen otros sistemas [II.18].

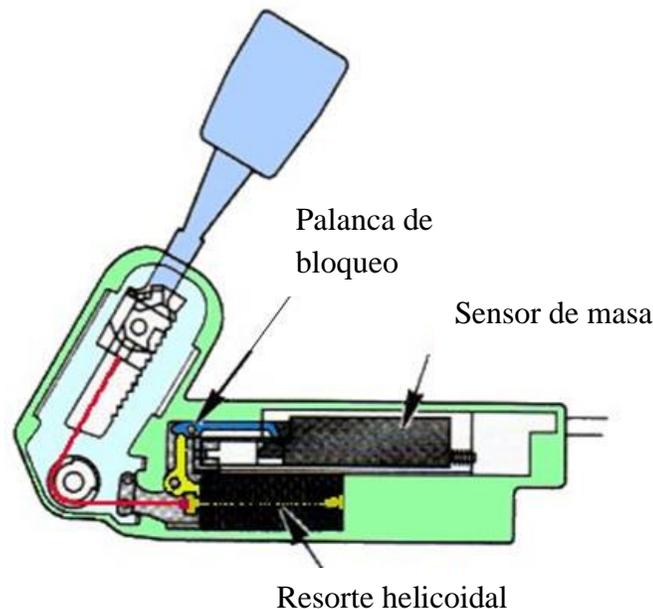


**Figura II. 6.-** Limitador de tensión

#### II.6.4. – Pretensores [II.19 y II.20]

Este dispositivo actúa sobre la cinta misma, haciéndola retraerse. Con el propósito de realizar un incremento en la tensión de la cinta eliminando las holguras. De los cuales, se dividen en dos que son colocados en el retractor o en la hebilla:

Mecánicos.- Llevan un muelle cargado, con un dispositivo mecánico, habitualmente una masa de inercia detecta el impacto por la aceleración que recibe esa masa. Presenta el inconveniente de su baja precisión y la pérdida de tensión que produce el movimiento de una masa que tira de los cinturones (Figura II.7).

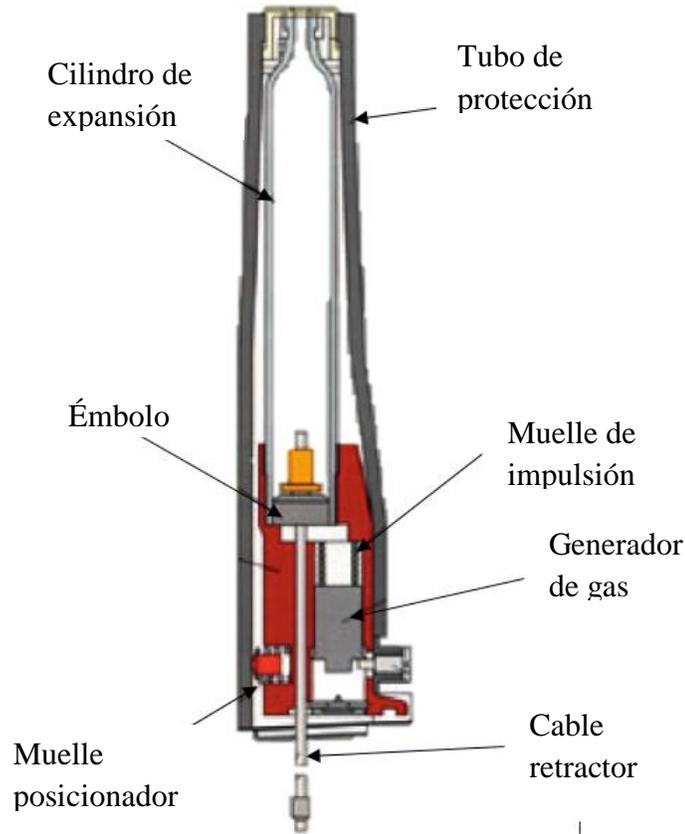


**Figura II. 7.- Pretensor mecánico**

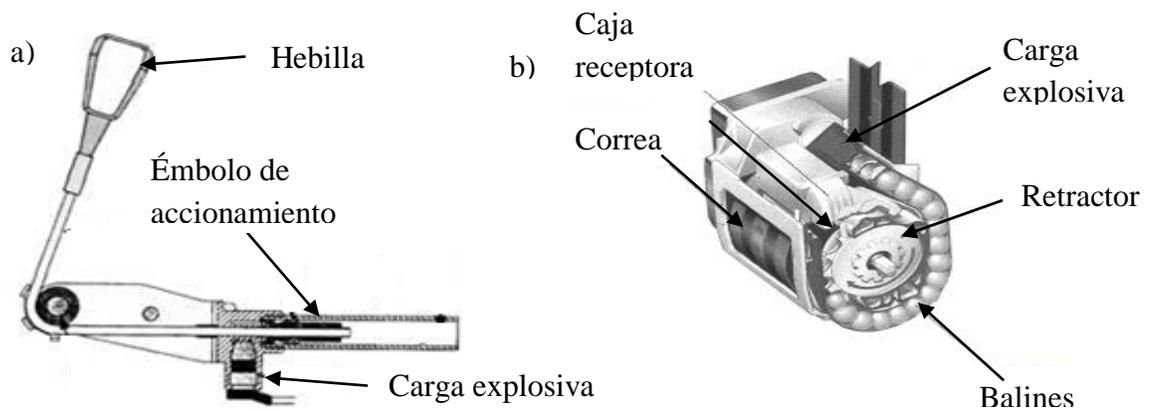
Pirotécnicos.- Funcionan mediante una carga explosiva con una pastilla de nitruro sódico que produce el movimiento de una masa que tira de los cinturones. La tendencia del disparo de estos dispositivos es mediante accionamiento electrónico [II.19]. El accionamiento se realiza mediante una unidad de mando, la cual está compuesta por un sensor de choque que comanda el encendido, una reserva de energía consistente en un condensador, dispositivo de disparo y un sistema de descarga.

Asimismo, existen pretensores pirotécnicos con accionamiento mecánico, el cual consta de un sensor mecánico que se muestra en la Figura II.8, un sistema de pretensión y uno de seguridad para

evitar disparos involuntarios. El sensor consta de un cilindro de expansión en cuyo extremo se encuentra el émbolo unido al cable retractor. Cuando se produce una desaceleración fuerte, la fuerza de inercia de la masa pendular supera la presión del muelle posicionador, vence la acción del muelle y se desplaza hacia adelante liberando al generador de gas [II.20].



**Figura II. 8.-** Pretensor pirotécnico con accionamiento mecánico



**Figura II. 9.-** Diversos pretensores.

a) Pretensor pirotécnico en hebilla. b) Pretensor pirotécnico en dispositivo retractor.

Los pretensores pueden encontrarse en la hebilla (Figura II.9a), en el barril encargado de almacenar la correa sobrante (Figura II.9b) o en ambos dispositivos que conforman el cinturón de seguridad. De igual manera, en algunos modelos de cinturón se puede regular la presión que ejercen sobre el cuerpo de la persona que sujetan. Un pequeño electroimán se opone al resorte que mantiene enrollado el cinturón dentro de su caja.

## II.7.- Normativa

Las normas de regulación vehicular son parte medular en el desarrollo de los vehículos, algunas de ellas son utilizadas para la elaboración de pruebas de colisión y algunas otras para la evaluación de regulaciones nacionales e internacionales obligatorias que establecen los requisitos de rendimiento y restricciones de diseño. En la elaboración de vehículos existen diferentes normas que se deben cumplir, algunas son la *FMVSS* y *ONU* [II.21].

Como primer paso se toma en cuenta la norma nacional, la *NOM-194-SCFI-2015* [II.21] que entró en vigor en el 2016, siendo la más actual del país, esta hace mención de los dispositivos y normas que deben incluir todos los vehículos que son comercializados en territorio mexicano. Sin embargo, no se hace mención de alguna norma procedente de este país que establezca las características con las que debe de contar el dispositivo de retención, ni algún otro dispositivo de seguridad pasiva. Por lo que, se recurre a la consulta de normas extranjeras, como lo son [II.22 a II.24]:

- Norma Federal de Seguridad para Vehículos Motorizados (FMVSS).- La entidad de regulación federal norteamericana *FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standard)* especifica la construcción, diseño y requisitos de durabilidad con los que los vehículos multipropósito deben de contar. Las normas federales son utilizadas para impacto frontal, lateral y trasero que son conformados por tres ejes temáticos que son: evitar la colisión, resistencia durante el impacto y estándares de seguridad durante el mismo (accionamiento de los sistemas de retención). En los cuales para seguridad pasiva se hace referencia a los siguientes estándares:
  - Estándar 208.- Se refiere a la protección de los ocupantes en específico, los cinturones de seguridad. Por lo que, especifica los requisitos para pruebas de

maniqués en vehículos de pasajeros, camiones y autobuses con sistemas de retención activa y pasiva.

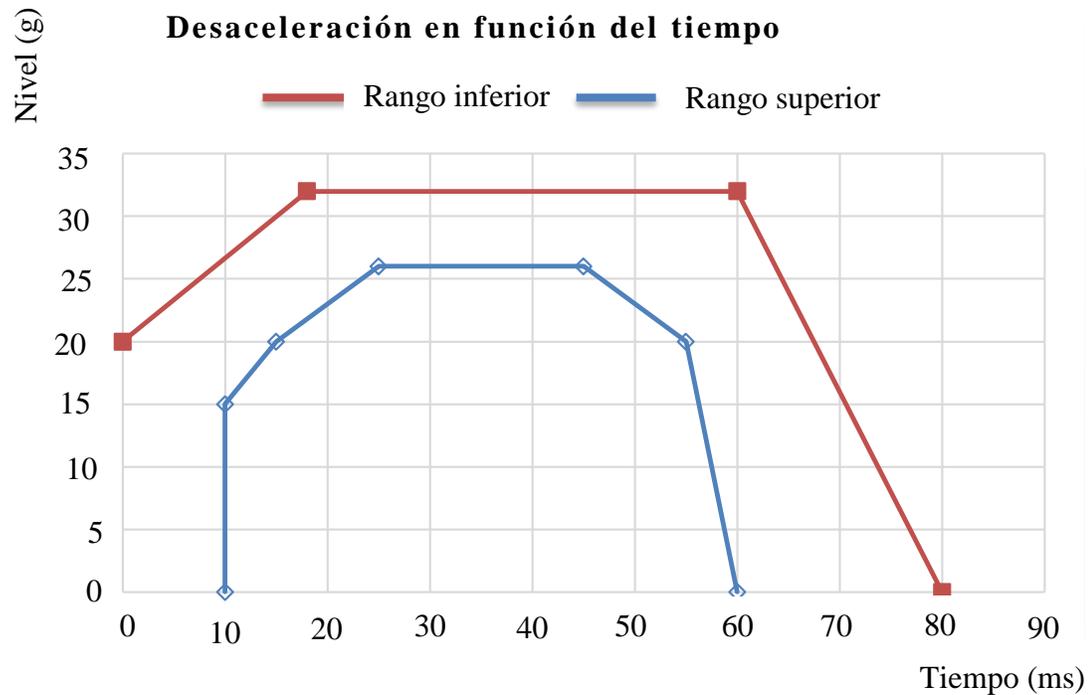
- Estándar 209.- Se encarga de especificar los requerimientos para el ensamble de los cinturones de seguridad en vehículos de pasajeros, multipropósito, camionetas y autobuses, como lo son algunos materiales y maquinaria, así como su instalación y funcionamiento.
- Estándar 210.- Establece los requisitos para el anclaje de los cinturones de seguridad, con el propósito de garantizar la ubicación adecuada de ellos y reducir la probabilidad de fallas.
- Estándares *ONU (ECE 16)*.- Es utilizada para prescripciones técnicas uniformes de equipos y piezas que son montados en vehículos sobre ruedas y las condiciones para el reconocimiento de las homologaciones sobre la base de las siguientes descripciones.
  - I. Cinturones de seguridad, sistema de retención, sistema de retención infantil para ocupantes de vehículos motorizados.
  - II. Vehículos equipados con cinturones de seguridad, recordatorio de sistema de retención, sistema de retención infantil.

Este estándar está dividido en diferentes anexos los cuales atacan diferentes puntos sobre funcionamientos de dispositivos de seguridad activa y pasiva. Para el presente trabajo se hace referencia al anexo 8 el cual presenta la descripción de curva de desaceleración o aceleración en función del tiempo de los vehículos automotores, dicha curva es presentada en la Tabla II.3 y en la Figura II.10 se muestra la curva de evaluación que es presentada por los valores de la norma.

**Tabla II. 3.-** Definición de diferentes curvas

Tiempo(ms)	Aceleración (g) Bajo	Aceleración (g) Alto
0	-	20

10	0	-
10	15	-
15	20	-
18	-	32
25	26	-
45	26	-
55	20	-
60	0	32
80	-	0



**Figura II. 10.-** Gráfica curvas de desaceleración

**II.8.- Sumario**

A lo largo de este capítulo se muestra la división del fenómeno de la colisión, como los valores que deben ser considerados para obtener la magnitud del mismo. De igual forma, se hace mención de algunos dispositivos que conforman el sistema de retención conocido como cinturón de seguridad, donde se describe su función en el proceso de salvaguardar al ocupante en caso de colisión y su campo de acción. Además, se presenta la normativa que deben de seguir estos dispositivos para su adecuado funcionamiento.

---

**II.9.- Referencias**

- 1.- Rodríguez-Jouvencel, M., *Latigazo Cervical y Colisiones a Baja Velocidad*, Ed. Díaz de Santos, pp 61-75, 2003.
- 2.- Giancoli, D. D., *Física; Principio con Aplicaciones*, 6ta. edición, Ed. Pearson, pp 143, 2006.
- 3.- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, *Gestión de Velocidad*, Ed. ECMT, pp 23-48, 2006.
- 4.- Illescas-Pérez, D., *Simulación de un Choque Frontal de un Vehículo Automóvil Contra Diferentes Tipos de Barrera*, Tesis Licenciatura, Universidad Carlos III de Madrid, pp 18-19, 2009.
- 5.- Gómez-Morales, T., Martín-Navarro, J., Águeda-Casado, E. y García-Jiménez, J. L., *Estructuras del Vehículo*, Ed. Paraninfo, pp 164, 2011.
- 6.- Bohner, M., Gerschler, H., Gobweiler, H., Leyer, S., Pichler, W., Saier, W., Schmidt, H. y Awickel, H., *Tecnología del automóvil*, Reverté, pp 425-430, 1985.
- 7.- Carrero-Muñoz, A. A., *Simulación de Choque Lateral con Dummy con Cinturón Mediante LS-DYNA*, Tesis Licenciatura, Universidad Carlos III Madrid, pp 25, 2011.
- 8.- Vital-Goenechea, R., *Análisis Biomecánico de Lesiones Causadas en Accidentes de Tráfico*, Tesis Licenciatura, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, pp. 46-52, 2016.
- 9.- Ren, Z. y Vesenjok, M., Computational and experimental crash analysis of the road safety barrier, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 12, No. 6, pp 963-973, 2005.
- 10.- Cantor-Mexquititla, V. M., *Simulación Numérica del Impacto de Butacas de un Autobús Urbano*, Tesis de Maestría, ESIME Zac. Instituto Politécnico Nacional, pp 37-39, 2016.
- 11.- Cruz-Jaramillo, I. L., *Análisis Numérico de un Sistema para Asiento Porta Infantes*, Tesis de Maestría, ESIME Zac. Instituto Politécnico Nacional, pp. 34-36, 2015.
- 12.- Luque, P., Álvarez, D. y Vera, C., *Ingeniería del Automóvil; Sistemas y Comportamiento Dinámico*, Ed. Thomson, pp 485-489, 2004.
- 13.- Martí-Parea, A., *Sistemas de Seguridad y Confort en Vehículos Automóviles*, Ed. Alfaomega Marcombo, pp 23-33, 2001.
- 14.- Mazón-Carvajal, L. P., *Estudio Técnico para la Implementación del Sistema de Revisión Técnica Vehicular en la Ciudad de Guaranda*, Tesis Licenciatura, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, pp 29-30, 2017.

- 
- 15.- GWR Safety System, *What is the Difference Between an ELR and an ALR?*, Consultada el 10 Septiembre del 2017, [http://gwrco.com/latest\\_news/difference-elr-alr/](http://gwrco.com/latest_news/difference-elr-alr/).
  - 16.- FASCHING Safety Belts, *ELR Retraktoren*, Consultada el 11 septiembre del 2017, <http://www.faschingsalzburg.com/de/sicherheitsgurte/komponenten/elr-retraktoren/>.
  - 17.- Área de Formación y Comportamiento de Conductores, *Cuestiones de Seguridad Vial, Conducción Eficiente, Medio Ambiente y Contaminación*, Ed. Dirección General del Trafico, 2011.
  - 18.- Orovio-Astudillo, M., *Tecnología del Automóvil*, Ed. Paraninfo, pp 36-40, 2010.
  - 19.- National Highway Traffic Safety Administration; U.S Department of Transportation, *Effectiveness of Pretensioners and Load Limiters for Enhancing Fatality Reduction by Seat Belts*, Ed. National Highway Traffic Safety Administration, pp 1-2, 2013.
  - 20.- Martín-Pérez, J., *Modelado de Diferentes Tipos de Cinturones de Seguridad y Estudio de su Efecto en Caso de Colisión Frontal Mediante LS-DYNA*, Tesis de Licenciatura, Universidad Carlos III de Madrid, pp 19-20, 2010.
  - 21.- SEGOB, *Dispositivo de seguridad esenciales en vehículos nuevos-especificaciones de seguridad*, Proyecto de Norma Oficial Mexicana, Norma Oficial Mexicana, 2014.
  - 22.- Hollowell, W. T., Gabler, H. C., Stucki, S. L., Summers, S. y Hackney, J., Updated review of potential test procedures for FMVSS no. 208, *NHTSA Docket*, pp 6407, 1999.
  - 23.- ECE 16-05, Status of United Nations Regulation, *E.C.E, United Nations*, 1970.
  - 24.- Molina-Cortez, J. A., *Diseño de una Plataforma Móvil y un Sistema de Desaceleración Para Pruebas de Seguridad Pasiva*, Tesis de Maestría, ESIME Zac. Instituto Politécnico Nacional, pp 31-36, 2017.

# **Capítulo III Análisis Numérico Vehículo original**

---

### III.1.-Introducción

En el presente capítulo se hace uso del análisis dinámico explícito para el conocimiento del comportamiento de un vehículo tipo *SUV Ford Explorer XLT 2002* con apoyo del programa de cómputo *LS-DYNA*<sup>®</sup> que es ampliamente aplicado para este tipo de requerimientos. Asimismo, se realiza el cálculo de la energía cinética con la que cuenta el automóvil un momento antes del impacto. Así como, el índice de severidad de aceleración del vehículo impactar frontalmente con una pared.

### III.2.- Análisis numérico dinámico

Los análisis dinámicos de elemento finito son utilizados para modelar y simular fenómenos mecánicos estructurales que se encuentran sometidos a cargas dinámicas. De igual manera, son recomendados para eventos donde su duración es menor a 1 segundo [III.1]. El uso de este análisis permite la utilización de ecuaciones diferenciales que gobiernan el movimiento de un sistema mediante condiciones iniciales como la velocidad o agentes externos. La elaboración de los análisis dinámicos es separada en dos categorías; análisis implícito y explícito [III.2].

**Análisis dinámico implícito.-** Se caracteriza porque el desplazamiento no es una función del tiempo, por lo que, las velocidades y aceleraciones que se encuentren dentro de este segmento, las cuales son derivadas temporales resultaran siendo cero. Son utilizados donde la dependencia temporal de la solución no es un factor de gran interés como lo puede ser los análisis estático-estructurales, análisis modal, entre otros [III.3 y III.4].

**Análisis dinámico explícito.-** Siendo una función del tiempo, la velocidad, aceleración la masa, el amortiguamiento, entre otros factores requieren ser considerados, de esta forma, haciendo útil para la solución de problemas de grandes deformaciones dependientes del tiempo, como lo son las colisiones vehiculares (frontales, laterales, volcadura, por alcance, etc.), aplastamiento, entre otros donde se tiene la necesidad de análisis de corta duración [III.3]. Dando paso a un algoritmo que funciona mediante incrementos de tiempo, lo que significa, que los desplazamientos se calculan según la cantidad de tiempo que transcurre. [III.4]

---

Básicamente, la diferencia entre las dos categorías de análisis es la consideración de la velocidad y/o aceleración. Para el presente capítulo se hace uso del análisis dinámico explícito donde se basa en la importancia de la masa, la velocidad y el amortiguamiento con el que cuenta el material.

### III.3.- *LS-DYNA*<sup>®</sup>

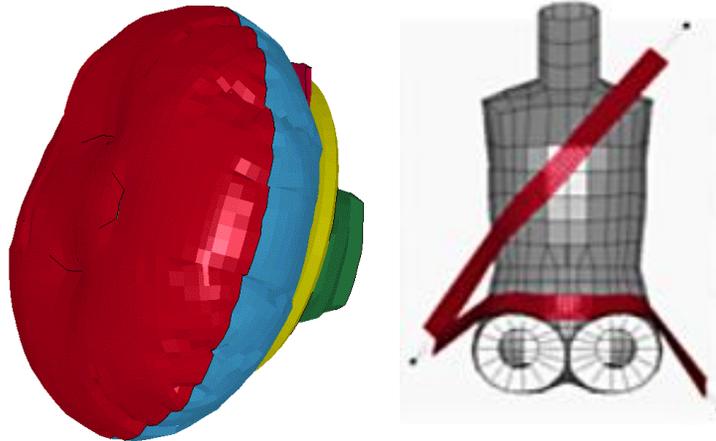
Para la configuración del modelo se utilizó el programa de cómputo *LS-DYNA*<sup>®</sup>, un paquete computacional de elemento finito de propósito general capaz de simular actividades complejas. Así como, el análisis de los modelos de forma dinámica. *LS-DYNA*<sup>®</sup> es un programa de elementos finitos de propósito general y carácter dinámico que es utilizado para analizar la respuesta no lineal de estructuras. Este programa cuenta con una alta gama de materiales para simular y resolver problemas del mundo real. Frecuentemente es usado por la industria automotriz, aeroespacial, de construcción, militar, entre otras. Los orígenes del código tienen lugar en el análisis de elementos finitos dinámicos transitorios altamente no lineales, donde se aplica la integración de tiempo en forma explícita [III.5].

Para el área automotriz esta herramienta informática es ampliamente utilizada para analizar diseños de vehículos, frente a situaciones de impacto, *LS-DYNA*<sup>®</sup> predice con precisión el comportamiento de un automóvil en una colisión y los efectos de esta última sobre los ocupantes del automóvil. Con este paquete computacional las compañías automotrices y sus proveedores pueden probar diseños de autos sin tener que utilizar herramientas o algún un prototipo, ahorrando así tiempo y dinero [III.6 y III.7].

Las características automotrices especializadas incluyen diferentes dispositivos, algunas de ellas se muestran en la Figura III.1:

- Cinturón de seguridad.
- Anillos colectores.
- Pretensores.
- Retractores.
- Sensores.
- Acelerómetros.

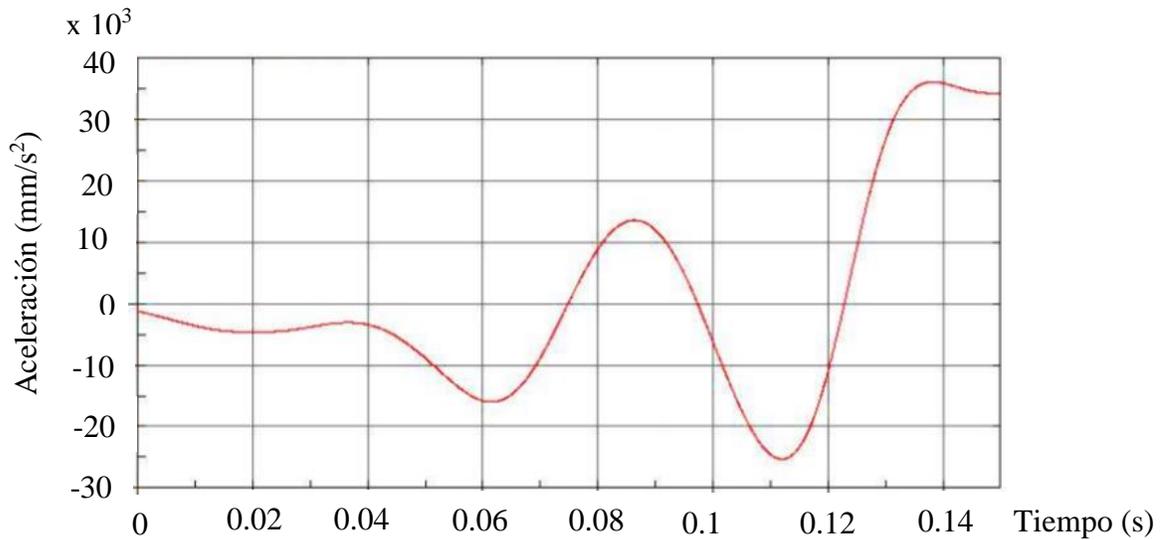
- Bolsas de aire.
- Modelos híbridos III.
- Modelos Infladores.
- Entre otros.



**Figura III. 1.-** Diversos modelos.

a) Modelos de bolsa de aire. b) Modelo de cinturón de seguridad

Una vez desarrollado el modelo a simular, este requiere ser ingresado a la unidad de solución de *LS-DYNA*<sup>®</sup>, el programa de cómputo como *post-procesador* permite obtener resultados que van desde gráficas XY (Figura III.2), gráficas de vectores o renderizados rápidos, hasta animaciones 3D. Asimismo, realiza el cálculo de parámetros como *HIC* (*Head Injury Criterion*) y *CSI* (*Chest Severity Index*) que permiten la evaluación de daños en cabeza y tórax respectivamente [III.8].



**Figura III. 2.-** Comportamiento aceleración *Pick up* impactando una señal de tránsito [III.9]

**III.4.- Objeto de estudio**

Como objeto de estudio se seleccionó una *SUV Ford Explorer 2002 XLT 4WD* (Figura III.3). El cual tiene como especificaciones una masa de 2297.245 kg, un largo de 4.81 m, ancho 1.83 m y una altura de 1.83 m [III.10].



**Figura III. 3.-** Vehículo *SUV Ford Explorer 2002*

Como primera instancia se realiza la estimación de algunas partes de la *SUV Ford Explorer 2002* que permitan su reproducción en algún programa de diseño o la rectificación de que el modelo utilizado se encuentra lo más acercado a la realidad. Por lo que, de acuerdo a la Figura III.3 se enumeran algunos elementos, a los cuales se les estimaran sus áreas (Tabla III.1).

**Tabla III. 1.-** Dimensiones de piezas de *SUV Ford Explorer 2002*

No. pieza	Descripción	Medida (mm <sup>2</sup> )
1	Salpicadera delantera	505000
2	Puerta delantera	1072000
3	Vidrio delantero	320000
4	Puerta trasera	962000
5	Vidrio trasero	274000

6	Aleta	108000
7	Salpicadera trasera	638000
8	Vidrio fijo trasero	365000

Posteriormente de la estimación de algunas medidas, se realiza la comparativa con las del modelo, observando la semejanza entre ellos. Este modelo permite realizar los análisis dinámicos antes mencionados, para esto se requiere su reproducción en un programa de cómputo que permita un análisis explícito el cual posibilite observar el comportamiento de un vehículo con una masa mayor a 2200 kg en una colisión frontal a una velocidad de 54 km/h [III.11].

Antes de realizar el análisis dinámico es necesario conocer la energía que el vehículo tiene que disipar, para ello se hace uso de la Ecuación II.1 (presentada en el Capítulo II), la cual requiere conocer la velocidad a la cual se está desplazando el automóvil y la masa del mismo, ahora que se conocen esos dos parámetros se obtiene que:

$$v = 54 \frac{km}{h} = 15 \frac{m}{s} \quad \text{III.1}$$

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

$$Ec = \frac{1}{2}(2297.245 \text{ kg})\left(15 \frac{m}{s}\right)^2$$

$$Ec = 258.44 \times 10^3 J$$

Esta es la energía cinética con la que cuenta el vehículo al mantenerse en movimiento. Sin embargo, hay que tener presente que este cálculo solo se realizó con el peso neto del automotor y es necesaria la consideración de diferentes masas externas, como lo pueden ser los usuarios, la masa del combustible y del equipaje. Sin duda alguna la energía aumentará. A continuación, se agregará una

masa promedio de 70kg por usuario y 85 litros de gasolina que es la capacidad del tanque de la SUV presentada. Con los datos anteriores se obtiene que:

$$Masa_{usuarios} = 5 \times 70kg = 350kg$$

Haciendo uso de la Ecuación III.2 (Capítulo II) se obtiene la masa del combustible.

$$\rho = \frac{masa}{Volumen} \quad \text{III.2}$$

$$Masa_{gasolina} = 700 \frac{kg}{m^3} \times 0.085m^3 = 59.5kg$$

Al realizar la sumatoria de la masa del automotor con la masa de la gasolina y los usuarios se calcula nuevamente la energía cinética, obteniendo que:

$$Ec_2 = \frac{1}{2} (2706.745 \text{ kg}) \left(15 \frac{m}{s}\right)^2$$

$$Ec_2 = 304.50 \times 10^3 J$$

La energía cinética calculada es aquella que se disipa por todos los cuerpos presentes en el acto del impacto (vehículo y ocupantes). Esto es una muestra de la importancia de considerar la energía que el automotor tiene que disipar al momento de una colisión, de igual forma se observa que al aumentar la velocidad, la energía aumenta de forma exponencial. Es importante aclarar que la energía se puede disipar haciendo uso de los sistemas de seguridad activa, sin embargo, el presente trabajo se enfoca al escenario de una colisión, por lo tanto, se refiere a que toda la energía se disipa en cuestión de 120 ms.

### III.5.- Modelo

Ya que se conoce el programa de cómputo con el que se trabajara a lo largo del presente trabajo se muestra el modelo. Con las medidas estimadas en la Tabla III.1 se realiza la comprobación de que el modelo (Figura III.4 a III.7) se encuentra en una aproximación del tamaño real, permitiendo

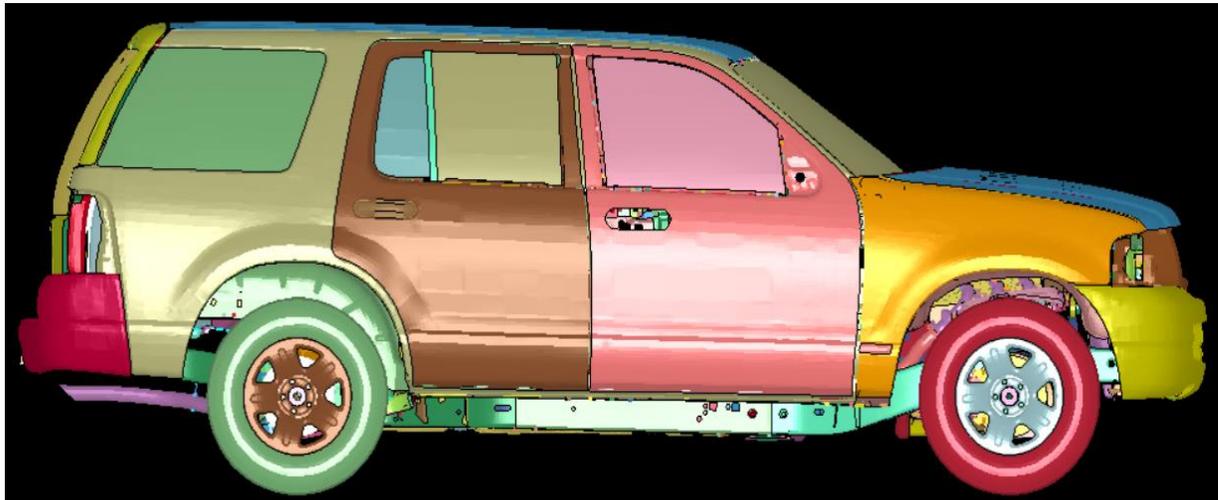
obtener resultados muy similares a los de una colisión controlada. Debido a que este programa de computo que hacen uso del *Método de Elementos Finitos (MEF)* no utiliza unidades, se realiza un ingreso coherente entre ellas. Por lo que, en la siguiente Tabla III.2 se muestran las unidades de medida que serán utilizadas en el modelo.

**Tabla III. 2.-** Unidades de medida

Magnitud	Unidad de medida
Longitud	mm
Masa	kg
Tiempo	s
Fuerza	N
Presión	MPa



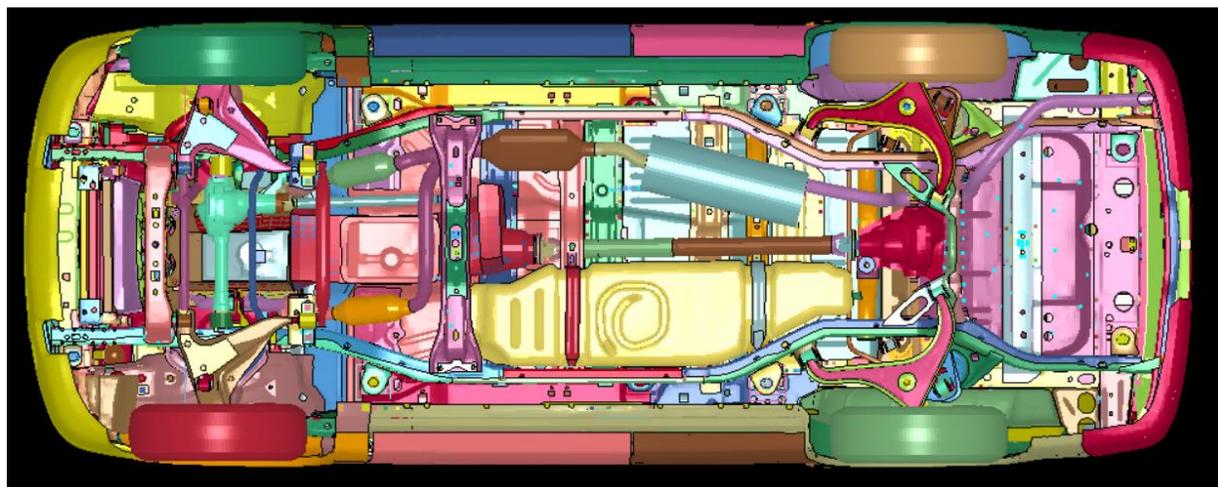
**Figura III. 4.-** SUV Ford Explorer 2002 vista frontal



**Figura III. 5.- SUV Ford Explorer 2002 vista lateral**



**Figura III. 6.- SUV Ford Explorer 2002 vista superior**



**Figura III. 7.- SUV Ford Explorer 2002 vista inferior**

### III.5.1.- Materiales

Los vehículos actuales se encuentran conformados por diversos tipos de materiales, los cuales tienen una función en específico, como pueden ser los parachoques, donde su principal característica es la de disipar una gran cantidad de energía. Así se hace mención de los dos tipos de materiales que se encuentran en mayor proporción en el modelo presentado [III.12].

- El modelo presentado se encuentra por piezas formadas con materiales de tipo *Piecewise\_linear\_plasticity*, que son piezas con comportamiento elasto-plástico, donde, la tensión es dependiente de la deformación hasta que se supera el límite elástico. Cuando es superado el límite mencionado, entra en plasticidad, de manera que, la linealidad de esfuerzo-deformación desaparece. Esta última etapa es cuando el material tiene grandes deformaciones y es cuando se absorbe mayor energía. Este tipo de material se encuentra en parachoques y carrocería principalmente.
- De igual manera se encuentran materiales tipo *Rigid*. En donde, como el tipo lo dice, se considera un sólido rígido. Las piezas que son definidas en esta categoría son los frenos, arboles de transmisión, diferencial, algunas piezas del motor, entre otras.

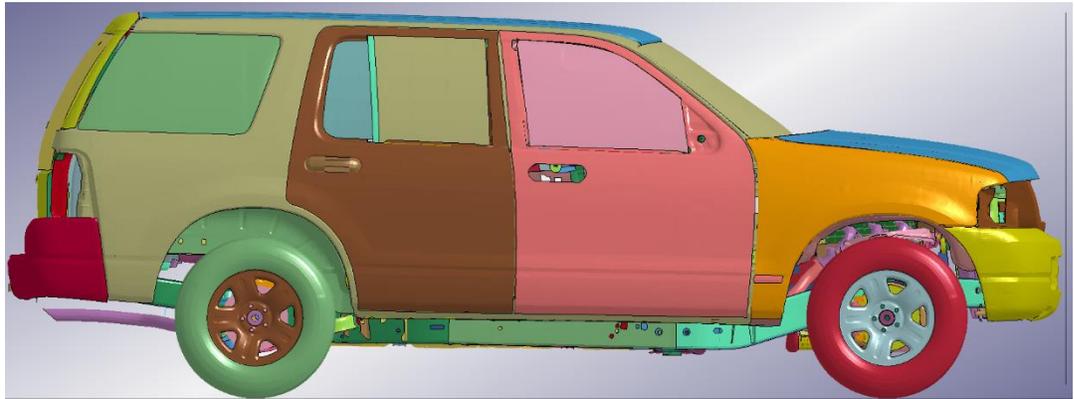
### III.6.- Caso de estudio

En las Figuras III.4 a III.7 se muestra el modelo de la *SUV Ford Explorer 2002*. Sin embargo, es necesario corroborar que cada elemento cuenta con las proporciones apropiadas para las propiedades de acuerdo con la relación propuesta en la Tabla III.2, como puede ser el módulo de *Young*. Del mismo modo, se requiere la configuración de la velocidad con la que se desplazara el vehículo hasta un momento antes de la colisión y en que artefacto se presentara el impacto (pared, poste, otro vehículo, entre otros). Para el caso particular se presenta una colisión frontal completa contra una pared considerada rígida en su totalidad, es decir que no absorbe energía al momento del impacto. En la realidad cualquier elemento que se impacte con otro existe una energía que debe disiparse y esta es distribuida entre los dos elementos involucrados. No obstante, este evento puede ser considerado como la colisión frontal entre dos vehículos de las mismas dimensiones, que son transportados a la misma velocidad y cuentan con el mismo peso, permitiendo considerar esta acción como la más drástica de los impactos debido a que la energía que tienen que disipar los

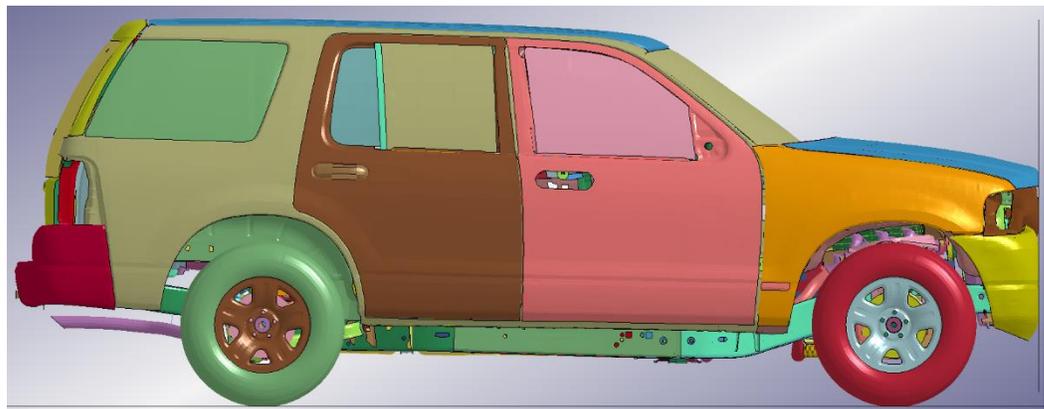
vehículos al momento de la colisión es la misma, por lo que, cada vehículo absorbe la energía con la que contaba antes del impacto.

La simulación presentada fue realizada en un intervalo de 140 ms. En la Figura III.8 se muestra la secuencia de la colisión frontal completa desde el instante inicial,  $t = 0$ , al final,  $t = 140$  ms en intervalos de 10 ms.

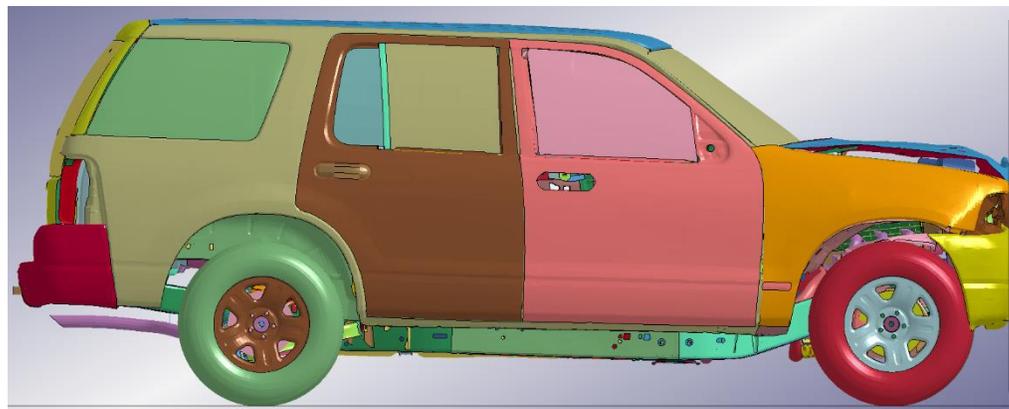
$t = 0$  ms



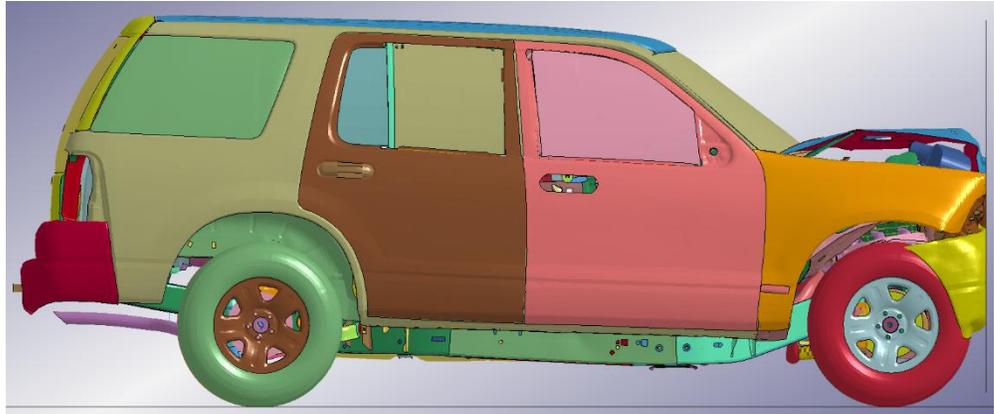
$t = 10$  ms



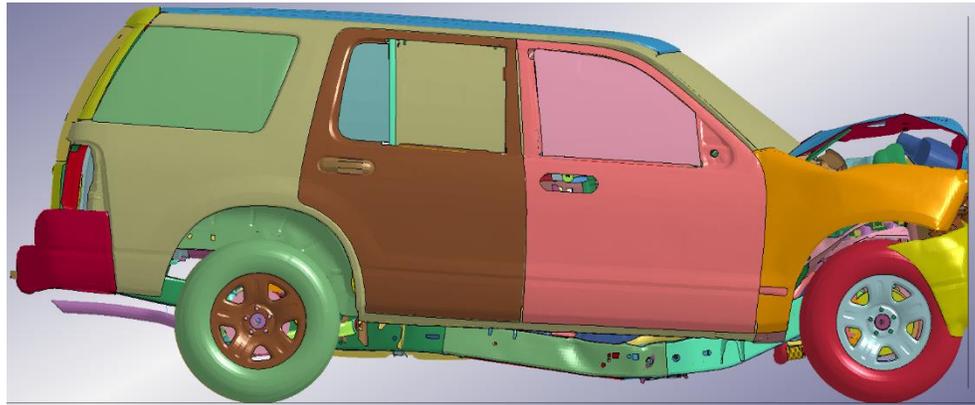
$t = 20$  ms



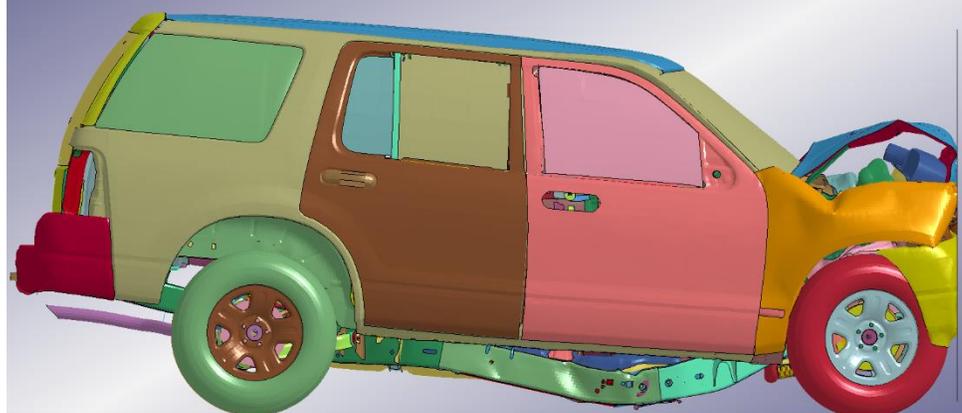
$t = 30 \text{ ms}$



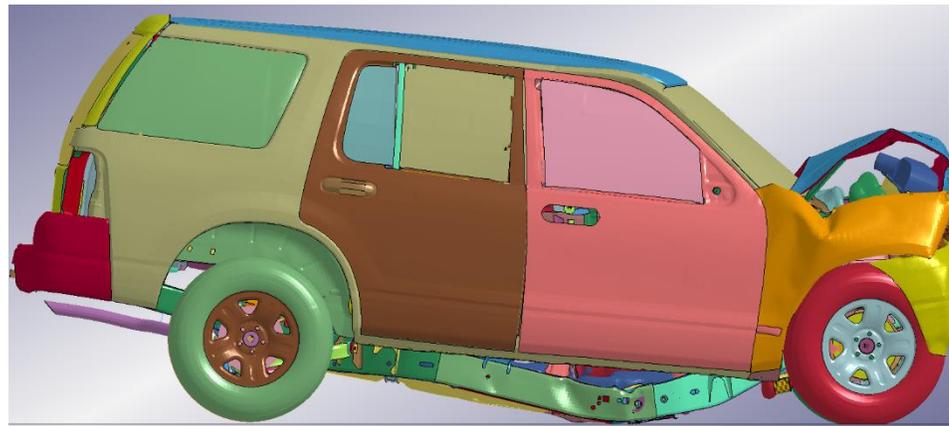
$t = 40 \text{ ms}$



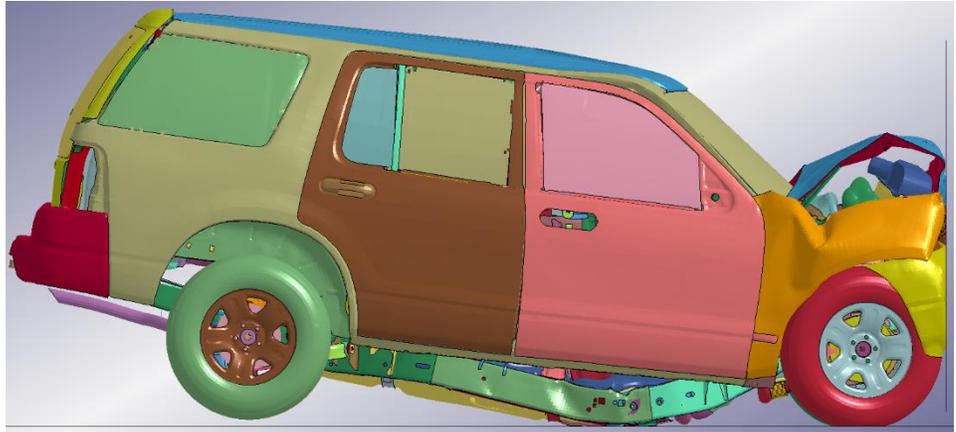
$t = 50 \text{ ms}$



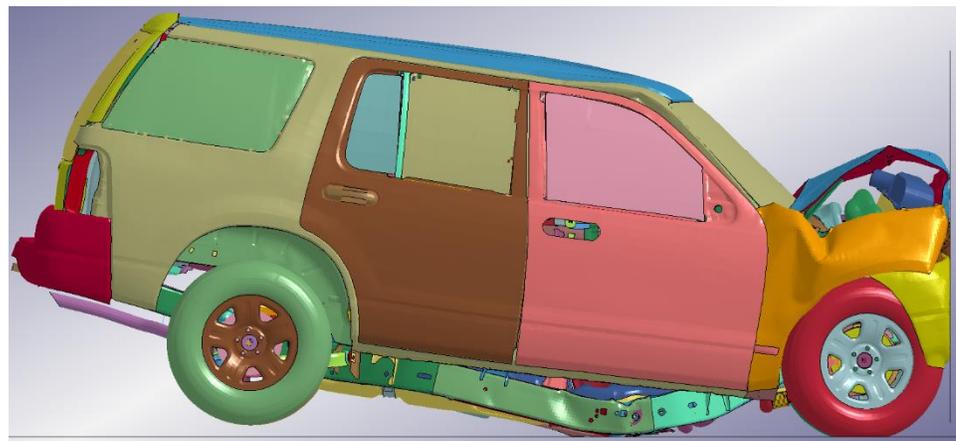
$t = 60 \text{ ms}$



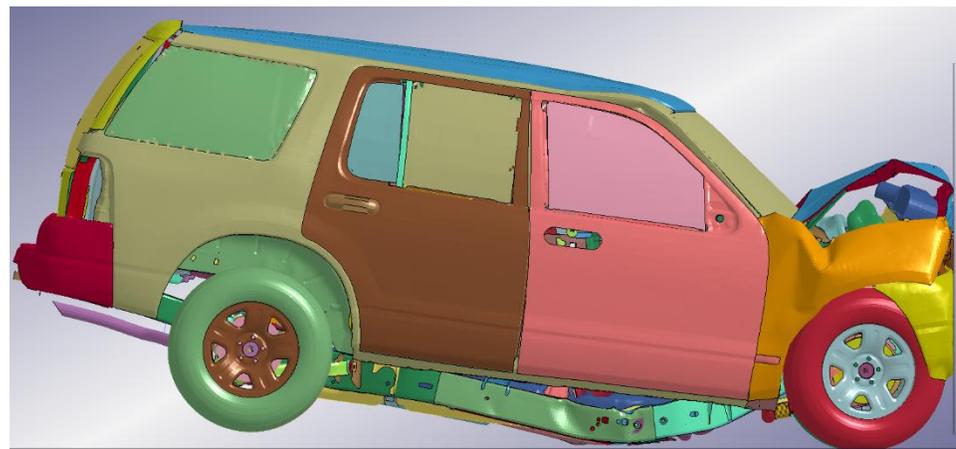
t = 70 ms



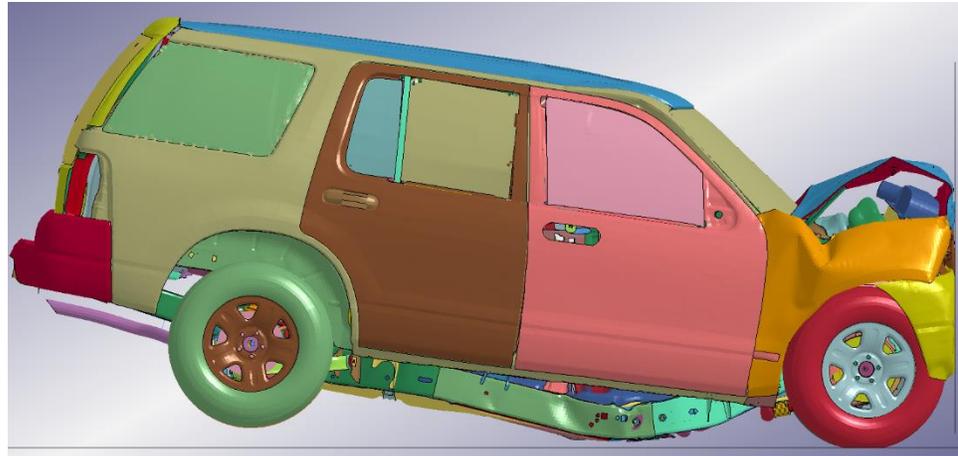
t = 80 ms



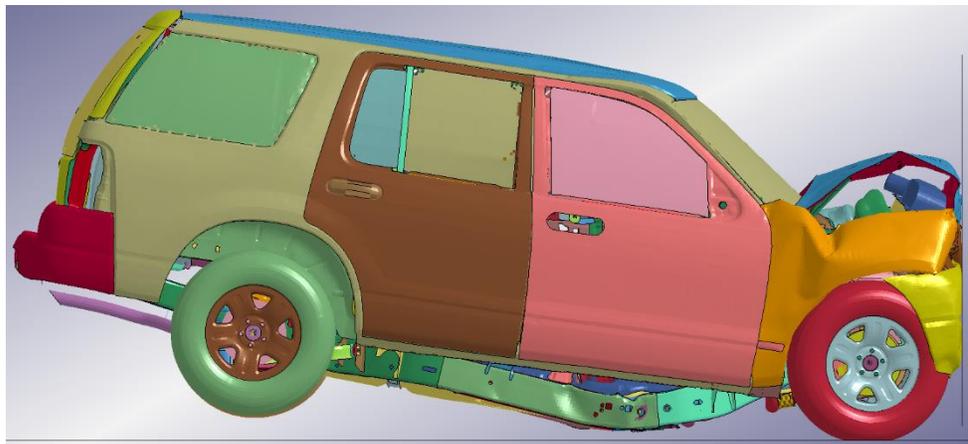
t = 90 ms



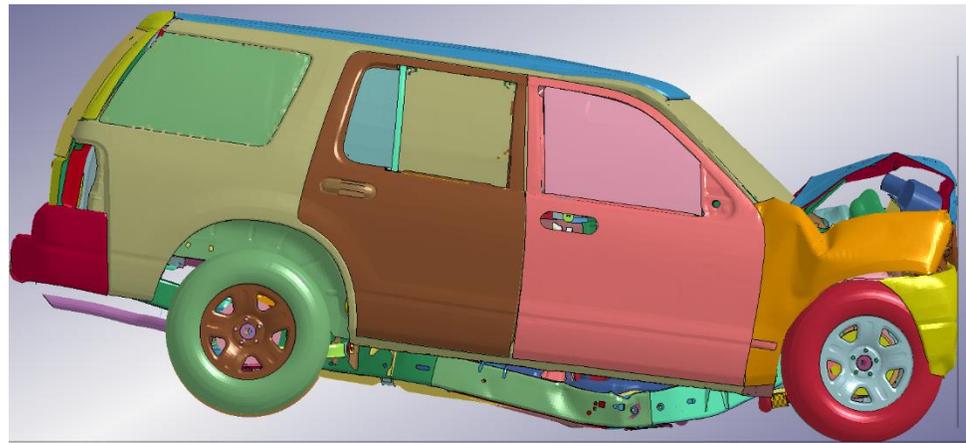
$t = 100 \text{ ms}$

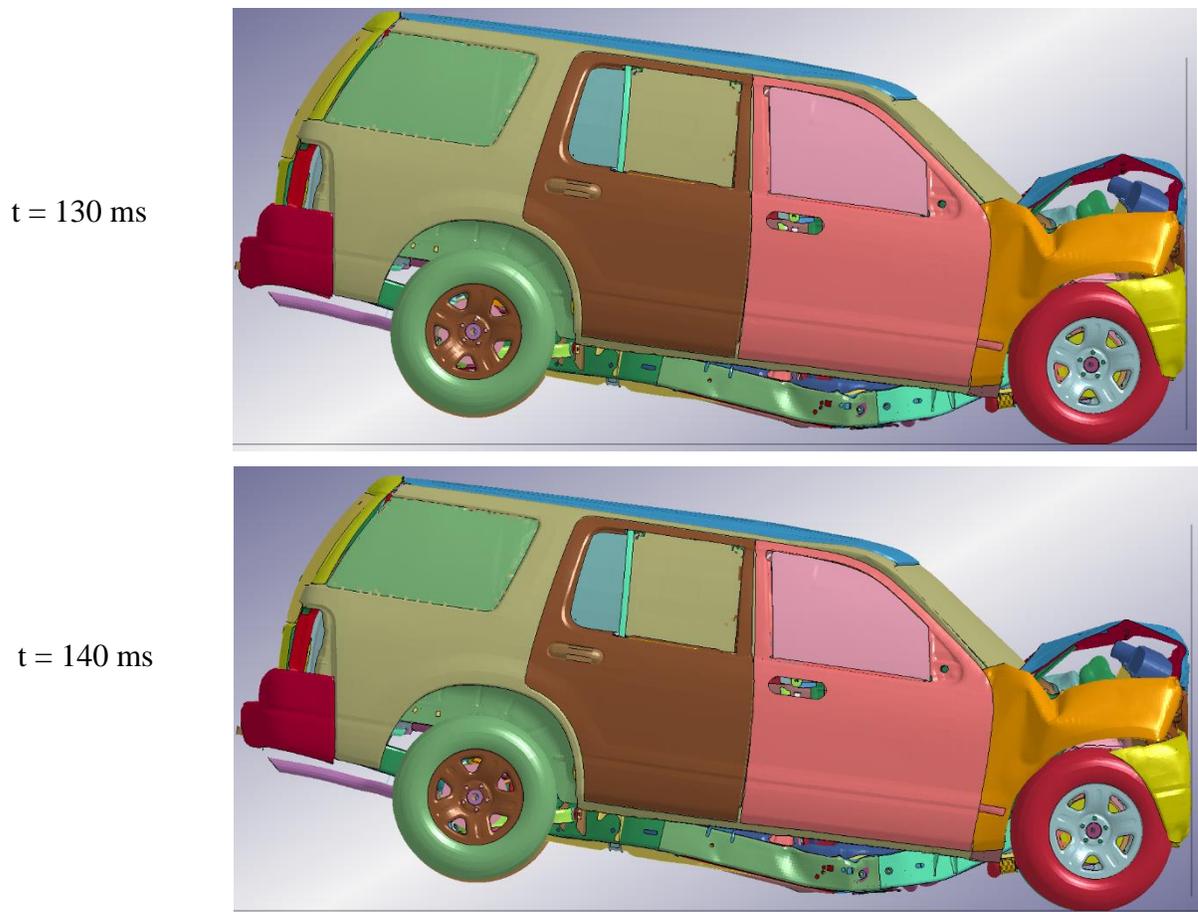


$t = 110 \text{ ms}$



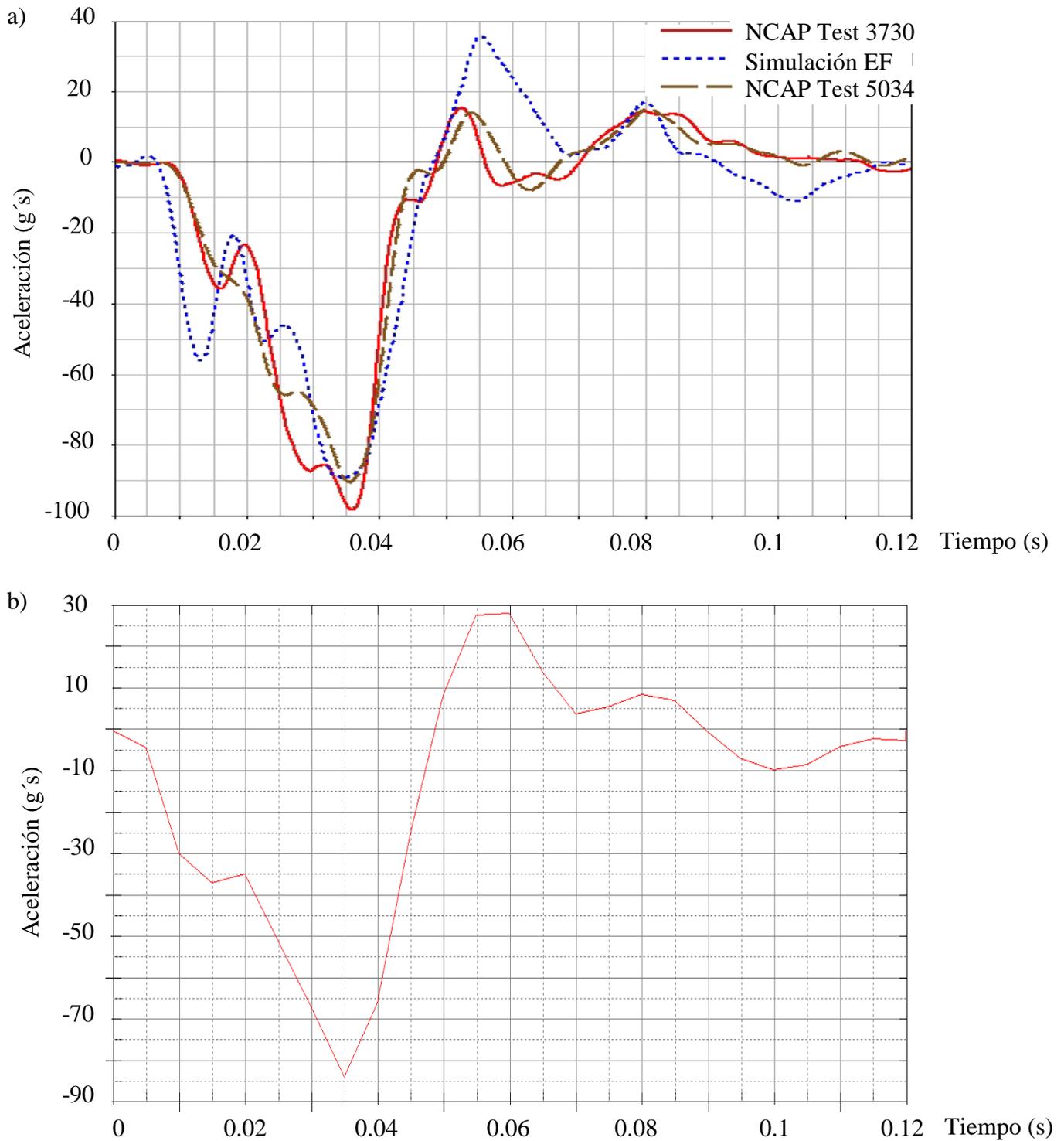
$t = 120 \text{ ms}$





**Figura III. 8.-** Simulación de colisión de 0 a 140 ms

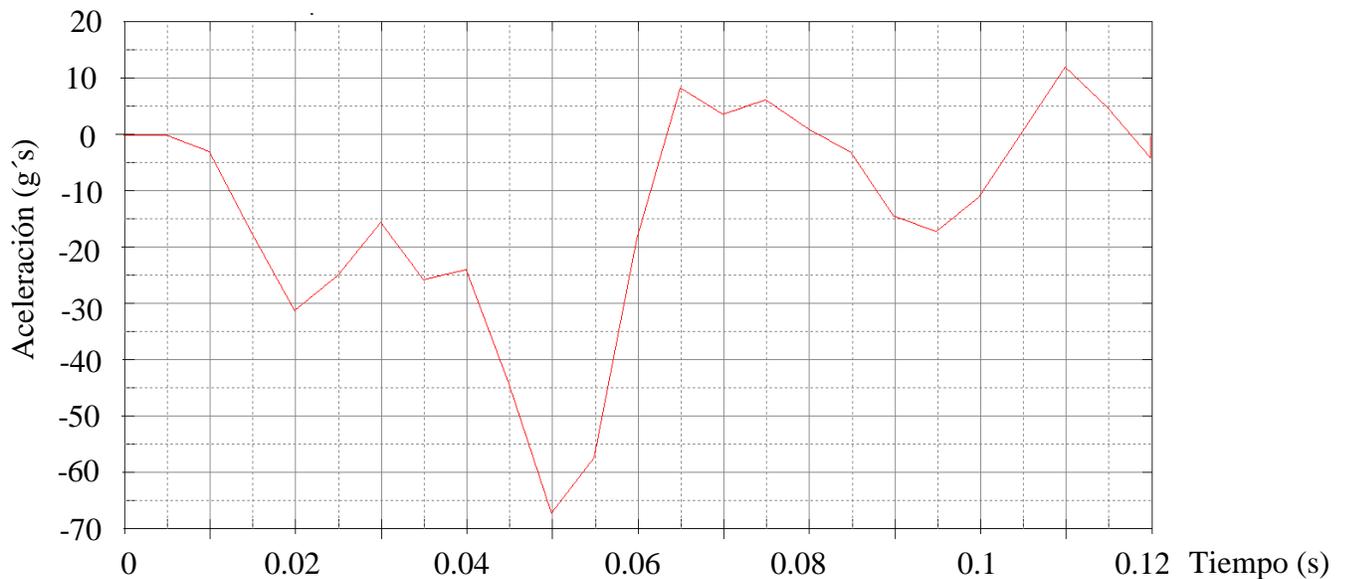
Ya que se obtuvo la simulación por medio del *Método de Elemento Finito* de forma dinámica es necesaria la validación de los resultados obtenidos, por esta razón se hace uso de un informe realizado por *The George Washington University* [III.13]. Donde se desarrolla la comparación de la gráfica obtenida en el presente modelo con la proporcionada por la universidad antes mencionada. En la Figura III.9 se muestran las aceleraciones de la parte superior del motor, donde se observa que son similares y permiten considerar al modelo como válido. Cabe mencionar que los resultados no son ni serán iguales sin importar las veces que se realice la simulación, debido a que el *MEF* da como resultado una aproximación. Cabe mencionar que los resultados mostrados son únicamente en el eje X, debido a que al presentar una colisión frontal completa hacia una pared rígida se tendrán aceleraciones despreciables en los otros dos ejes.



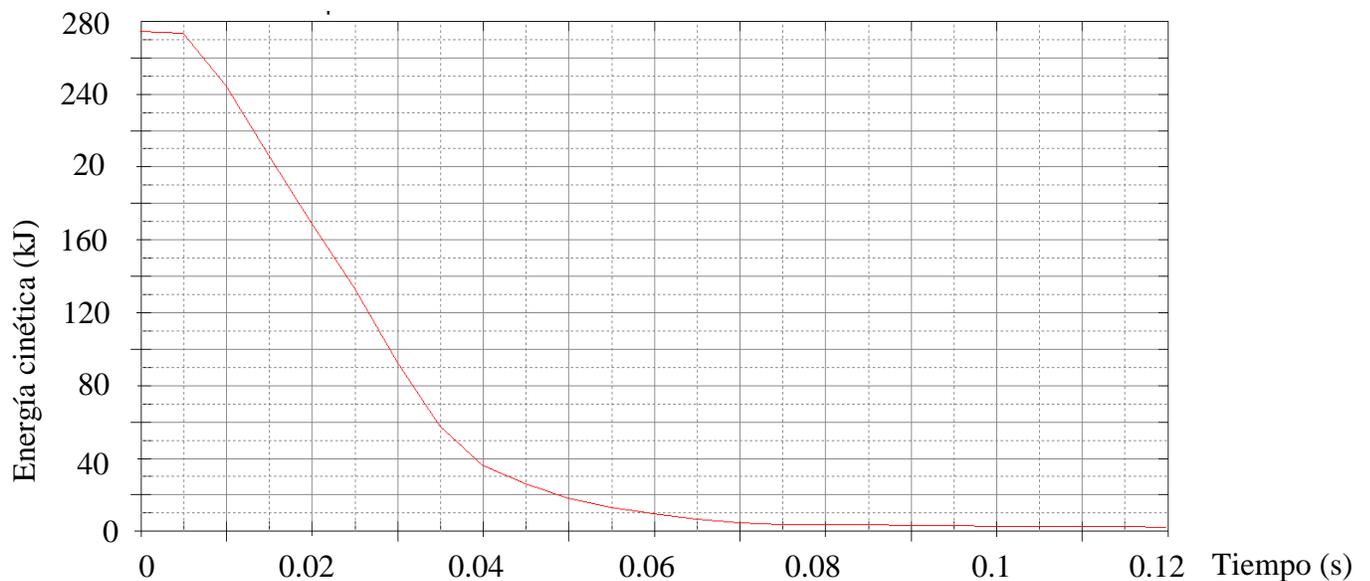
**Figura III. 9.-** Aceleración del asiento de la parte superior del motor en el eje X.

a) Universidad de Washington. b) Modelo de esta tesis.

Ya que se sabe que el modelo es validado se procede a presentar las aceleraciones que sufre el vehículo en la parte delantera del habitáculo. Se considera que el ocupante que se encuentra frente al volante cuenta con el cinturón de seguridad colocado, por lo que se da por sentado que este sufre las mismas aceleraciones que son presentadas en la Figura III.10 que será ocupada para determinar el índice de severidad de aceleración. Además, se muestra en la Figura III.11 la energía cinética de la camioneta, con lo que se comprueba que el cálculo previamente realizado es correcto.

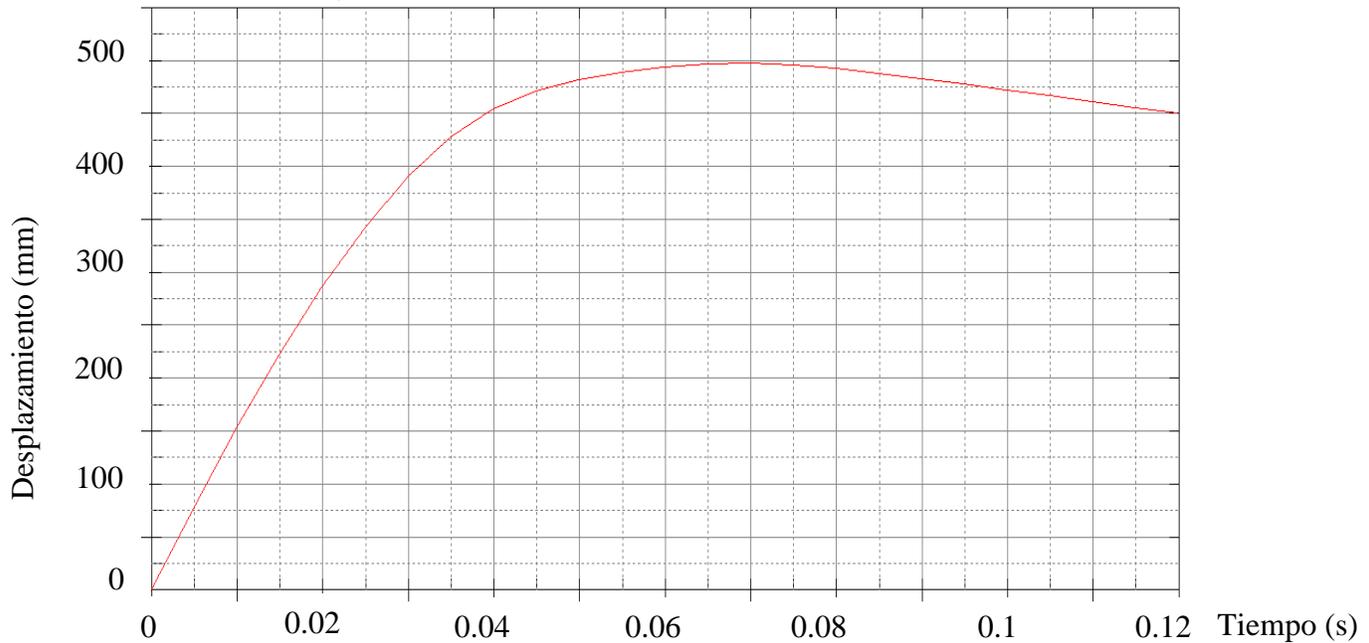


**Figura III. 10.-** Aceleración del asiento del conductor en el eje X



**Figura III. 11.-** Desplazamiento de la camioneta en el eje X

Para la obtención del índice de severidad de aceleración se hace uso de la Ecuación II.3. Sin embargo, en primera instancia se deben obtener los valores límites de aceleración, que se obtienen con ayuda de los datos proporcionados por la Figura III.12, la Ecuación II.2 y la segunda ley de Newton.



**Figura III. 12.-**Desplazamiento de la camioneta en el eje X

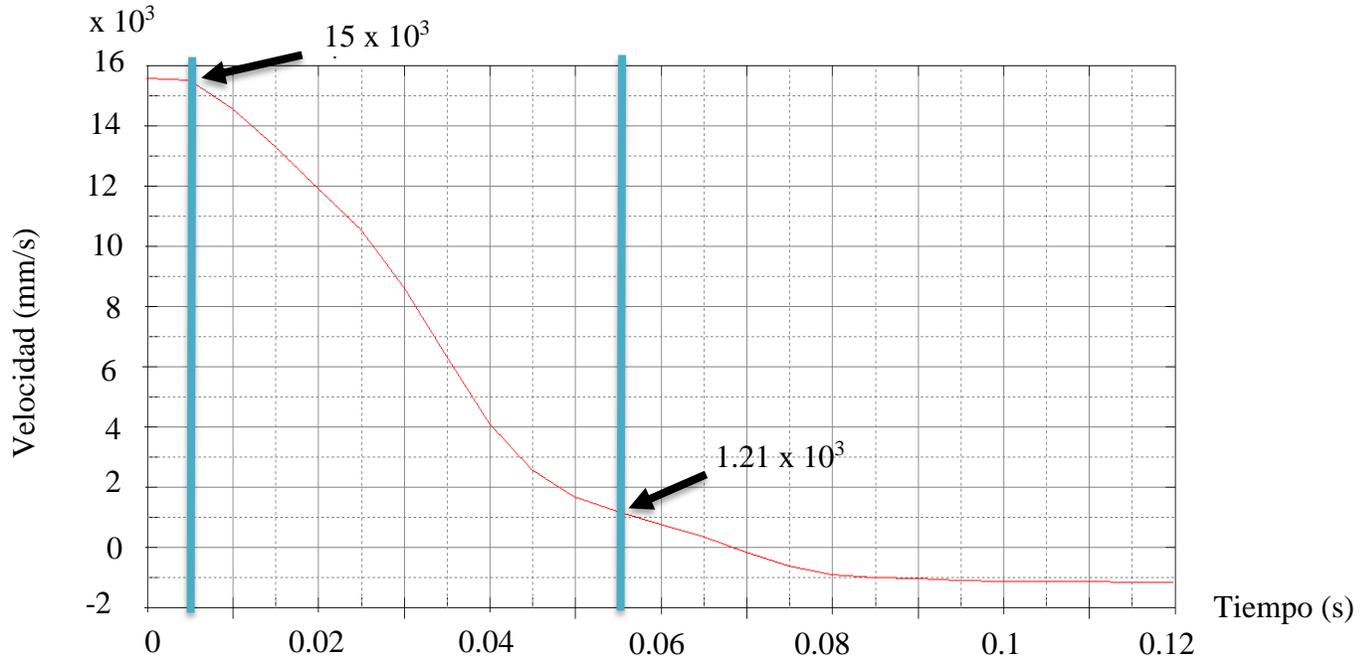
Primero se calcula la fuerza del impacto considerando que la energía disipada es la misma que la energía cinética que se obtuvo de forma analítica y gráfica, y con el dato de desplazamiento proporcionado por la Figura III.12 se calcula el siguiente resultado.

$$F = \frac{E_d}{d} = \frac{304.5 \times 10^3 \text{ J}}{0.5 \text{ m}} = 609 \times 10^3 \text{ N}$$

Teniendo conocimiento de la masa de la *SUV Ford Explorer 2002* se procede al cálculo de la aceleración límite con la Ecuación III.3.

$$\hat{a}_x = \frac{F}{m} = \frac{609 \times 10^3 \text{ N}}{2706.74 \text{ kg}} = 224.99 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 22.93 \text{ g}'s \quad \text{III.3}$$

Ya que se obtiene la aceleración límite, se procede a obtener la componente de aceleración en el intervalo de 50 ms posteriores a la colisión. Para ello se hace uso del *MRUA* (Ecuación III.4) y de la Figura III.13 de la cual se extraen los datos de la velocidad con la que cuenta el vehículo automotor en el intervalo ya mencionado.



**Figura III. 13.-** Velocidad de la camioneta en el eje X

$$\bar{a}_x = \frac{V_f - V_0}{t} = \frac{1.21 \times 10^3 \frac{mm}{s} - 15 \times 10^3 \frac{mm}{s}}{0.05s} = 287.8 \frac{m}{s} = 29.33g's \quad \text{III.4}$$

Con los datos calculados se obtiene el índice de severidad que permitirá conocer en qué clase de gravedad se encuentra el ocupante.

$$ASI(t) = \left[ \left( \frac{\bar{a}_x}{\hat{a}_x} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left[ \left( \frac{29.33g's}{22.93g's} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 1.2791$$

Con este índice se conoce que la *SUV Ford Explorer 2002* se encuentra dentro de la *clase B*, donde el ocupante puede sufrir pérdida de conocimiento de corta duración y la fractura es la lesión de mayor gravedad. Por lo tanto, este vehículo puede ser considerado como seguro.

### III.7.- Sumario

En el presente trabajo se realiza el cálculo de la energía cinética con la que cuenta la *SUV Ford Explorer 2002* momentos antes de la colisión contra una pared rígida. Posteriormente con los datos obtenidos de la simulación mediante *MEF* se realiza la validación del modelo y se obtienen datos como lo es el desplazamiento y la aceleración. Finalmente, con los datos extraídos del análisis dinámico se aplica el *ASI* permitiendo determinar la clase en la que se encuentra situada el vehículo y los posibles daños que sufre el ocupante.

### III.8.- Referencias

- 1.- Qasim H. S. y Hasan M. A., *From LS-Prepost to LS-Dyna: An Introduction*, Ed. Lambert Academic Publishing, pp 9-10, 2011.
- 2.- Hurty, W. C., Dynamic analysis of structural systems using component modes, *AIAA Journal*, Vol. 3, No. 4, pp 678-685, 1995.
- 3.- ANSYS, Explicit Dynamics, ANSYS Inc., 2011.
- 4.- Sun, J. S., Lee, K. H. y Lee, H. P., Comparison of implicit and explicit finite element methods for dynamic problems, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 105, No. 1, pp 110-116, 2000.
- 5.- Livermore Software Technology Corporation, *LS-DYNA*, LSTC LS-DYNA, 2011.
- 6.- Livermore Software Technology Corporation, *Applications: Automotive Crashworthiness & Occupant Safety*, LSTC LS-DYNA, 2011.
- 7.- Carrero-Muñoz A. A., *Simulación de un Choque Lateral con Dummy con Cinturón Mediante LS-DYNA*, Tesis Licenciatura, Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- 8.- Livermore Software Technology Corporation, *LS-DYNA Keywords User's Manual*, Version 970, 2003.
- 9.- Becerril-Nieto, D., *Estudio del Impacto de un Vehículo Sobre Señales de Tráfico Mediante LS-DYNA*, Tesis Licenciatura, Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- 10.- Ford, *02 Explorer*, Ed. Ford Outfitters, 2002.
- 11.- National Crash Analysis Center, *Finite Element Model of Ford Explorer*, *FHWA/NHTSA*, Ed. The George Washington University Virginia Campus, 2007.

- 
- 12.- Illescas-Pérez, D., *Simulación de un Choque Frontal de un Vehículo Automóvil Contra Diferentes Tipos de Barrera*, Tesis Licenciatura, Universidad Carlos III de Madrid, pp 58-64, 2009.
  - 13.- National Crash Analysis Center, *Finite Element Model of Ford Explorer*, Ed. The George Washington University, 2007.

**Capítulo IV Evaluación  
Numérica de Vehículo  
Modificado Estructuralmente**

### IV.1.-Introducción

Para conocer el comportamiento en una colisión frontal del vehículo (*SUV Ford Explorer*) propuesto en el presente trabajo cuando es sometido a un proceso de blindaje se realiza el análisis dinámico explícito. Para ello, se tuvo que realizar el cálculo de la densidad efectiva, que permite obtener el cambio de condiciones de una camioneta de serie a una blindada. Finalmente, se presentan los cálculos de la energía cinética y el índice de severidad de aceleración del vehículo al impactar con la pared de forma frontal.

### IV.2.- Blindaje

Las partes que son recubiertas con acero balístico, fibras aramidas y vidrios especiales como se mostró en el Capítulo I. Sin embargo, para la elaboración del análisis de elemento finito es necesaria la especificación del cambio de masa en el vehículo en cada parte de él, al ser sometido a un proceso de blindaje y que será sometido al estudio para determinar los daños que causa el aumento de masa.

Con el propósito de conocer el peso que debe ser agregado al vehículo se requiere el conocimiento de los niveles de blindaje y cómo se determinan. Para ello se establecen mediante cinco variables que posee el proyectil [IV.1].

1. Velocidad.- A mayor velocidad, mayor penetración.
2. Diámetro.- A menos diámetro, mayor penetración.
3. Dureza.- A mayor dureza, mayor penetración.
4. Forma.- Si la forma del proyectil es cónica, la penetración es mayor. Sin la forma del proyectil es chata, el poder de impacto es mayor.
5. Peso.- Cuanto más pesado es el proyectil, mayor penetración.

Con las variables antes mencionadas, diferentes organizaciones y/o instituciones se dieron a la tarea de dividir en categorías las armas y de esta forma generar una protección de los vehículos para cierto grupo de ellas. Con ello, en el presente trabajo se muestra la Tabla IV.1, donde se observan algunos niveles de blindaje de acuerdo a diferentes como el *National Institute of Justice* del

Gobierno de Estados Unidos de América (NIJ), *Underwriters Laboratories* (UL) y *Deutsche Industry Norm* (DIN) [IV.1].

**Tabla IV. 1.- Niveles de blindaje**

Normas Internacionales				Categoría	Arma	
NIJ	UL	DIN	Protecto glass		Tipo	Calibre
I IIA	1	1	PG3 y PG3-B33	Anti-asalto	Arma corta	9x19 mm
II						0.357
IIA II	2	2	PG3 y PG3-B33			Magnum
IIIA	3	3	PG3 y PG3-B33			0.44 Magnum
	6		PG4	Anti-secuestro	Submetralladora	9x19 mm
					Arma corta	7.62x25 mm
					AK-47	7.62x39 mm
III	4		PG5 y 5PLUS	Anti-atentado	Rifle asalto	0.30-06
	7				Rifle M-16	5.56x45 mm
	5.8	4			Rifle 0.308	7.62x51 mm

Como ya se mencionó, existen otras categorías de blindaje, sin embargo, en la tabla anterior solo se hace referencia a tres categorías del tipo de blindaje con el propósito de mostrar que el presente trabajo solo se enfocará en la categoría más baja (anti-asalto).

#### IV.2.1.- Materiales utilizados blindaje tipo anti-asalto

El método para la fabricación de un vehículo blindado es la misma para todos los niveles, así como el material, con la diferencia de grosores determinados para cada categoría. En la Tabla IV.2 se muestran las características de los materiales utilizados en un vehículo blindado tipo anti- asalto nivel III según la *UL* [IV.2].

**Tabla IV. 2.-** Materiales utilizados para blindaje tipo anti-asalto

	<b>Espesor (plg)</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Peso (kg/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Densidad (kg/mm<sup>3</sup>)</b>
<b>Acero balístico</b>	1/8	3.175	25.021 x 10 <sup>-5</sup>	7.850 x 10 <sup>-6</sup>
<b>Vidrio laminado</b>	95/64	38	9.5 x 10 <sup>-5</sup>	Compuesta por diversos materiales

**IV.3.- Piezas a blindar**

Para conocer las masas que serán agregadas, es necesario el conocimiento del área de cada una de las partes del habitáculo a blindar, por lo que, en la Tabla IV.3 y Tabla IV.4 se muestra el espesor y masa de cada una de ellas. En la primera tabla se presentan las partes a las que se le agregara acero balístico y en la segunda las de vidrio.

**Tabla IV. 3.-** Características de piezas originales metálicas de la SUV

<b>Parte</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Masa (kg)</b>	<b>Densidad (kg/mm<sup>3</sup>)</b>
Puerta delantera	2	1.36	11.75	7.89 x 10 <sup>-9</sup>
Puerta trasera	2	1.30	10.141	
Salpicadera trasera	2	0.80	3.2916	
Marco ventana trasera	2	0.94	4.4937	
Marco de las puertas	2	1.00	1.3664	
Poste delantero superior	2	1.20	1.3496	
Poste delantero inferior	2	1.30	3.1136	
Poste entre puertas	2	1.36	3.8734	
Cajuela	1	0.42	3.6157	
Toldo	1	0.90	20.289	
Pared de fuego	1	0.55	3.353	
Pared de fuego lateral	2	1.21	1.9949	
Piso delantero	1	0.96	13.603	

Piso central	1	0.81	11.755	
Piso trasero	1	0.82	8.0721	
Piso parte baja de la puerta	2	1.32	4.3112	

**Tabla IV. 4.-** Características de los vidrios originales de la SUV

Parte	Cantidad	Espesor (mm)	Masa (kg)	Densidad (kg/mm <sup>3</sup> )
Ventana puerta delantera	2	3.90	3.73	2.5 x 10 <sup>-9</sup>
Ventana puerta trasera	2	3.90	2.9669	
Aleta	2	3.90	0.9341	
Parabrisas	1	4.00	11.321	
Ventana trasera	2	3.89	3.617	
Medallón	1	4.00	9.152	

**IV.4.- Densidad efectiva**

Ya que se conocen las partes de la SUV que serán sometidas a blindaje, se requiere conocer ciertas propiedades como lo es espesor y densidad. Cabe mencionar que para realizar el proceso de blindaje del modelo de la *Ford Explorer* presentada en el presente trabajo no se realizara ningún cambio de geometría, debido a que un vehículo blindado tiene que ser lo más similar a uno de producción en serie. Por lo que, se realizará una modificación en una de las propiedades, la densidad. Para ello, se hace uso de la ecuación de la densidad efectiva (Ecuación IV.1) [IV.3].

$$\rho_{eff} = \rho_{real} + \frac{g_{ab}}{g_{real}} \rho_{ab} \tag{IV.1}$$

Donde  $\rho_{eff}$  = Densidad efectiva,  $\rho_{ab}$  = Densidad del acero blindado,  $\rho_{real}$  = Densidad del material original,  $g_{ab}$  = Espesor acero blindado y  $g_{real}$  = Espesor acero del material original.

Es indispensable mencionar que para poder hacer uso de la Ecuación IV.1 se considera que el material es isotrópico. De igual forma, se toma en cuenta que el blindaje tiene exactamente la misma geometría que la pieza que se recubre. Con ello, se procede al cálculo de la densidad que

permitirá agregar la masa que el blindaje proporciona al modelo, obteniendo los resultados de la Tabla IV.5.

**Tabla IV. 5.-** Densidad efectiva de materiales metálicos *Ford Explorer 2002*

Parte	Densidad efectiva (kg/mm <sup>3</sup> )
Puerta delantera	2.63095 x 10 <sup>-8</sup>
Puerta trasera	2.71603 x 10 <sup>-8</sup>
Salpicadera trasera	3.88171 x 10 <sup>-8</sup>
Marco ventana trasera	3.42594 x 10 <sup>-8</sup>
Marco de las puertas	3.29408 x 10 <sup>-8</sup>
Poste delantero superior	2.87522 x 10 <sup>-8</sup>
Poste delantero inferior	2.71601 x 10 <sup>-8</sup>
Poste entre puertas	2.63098 x 10 <sup>-8</sup>
Cajuela	6.72515 x 10 <sup>-8</sup>
Toldo	3.57240 x 10 <sup>-8</sup>
Pared de fuego	5.34367 x 10 <sup>-8</sup>
Pared de fuego lateral	2.85086 x 10 <sup>-8</sup>
Piso delantero	3.39301 x 10 <sup>-8</sup>
Piso central	3.15644 x 10 <sup>-8</sup>
Piso trasero	3.83294 x 10 <sup>-8</sup>
Piso parte baja de la puerta	2.68677 x 10 <sup>-8</sup>

Se obtuvieron las densidades del material metálico que permitirá agregar la masa en cada una de las partes del vehículo que se somete al proceso de blindaje. Sin embargo, hace falta la parte del vidrio laminado, el cual está conformado por diversos tipos de materiales como lo es el vidrio, películas de *PVB* (Butiral de Polivinilo), entre otros. Para el presente trabajo solo se considera un espesor total de vidrio de 36 mm y la película de *PVB* de 1.14 mm. Esta densidad efectiva se calcula mediante la Ecuación IV.2 [IV.4].

$$\rho_{efv} = \rho_{real} + \frac{g_{vb}}{g_{real}} \rho_{vb} + \frac{g_{PVB}}{g_{real}} \rho_{PVB} \quad \text{IV.2}$$

Donde es  $\rho_{efv}$  = Densidad efectiva del vidrio,  $\rho_{vb}$  = Densidad del vidrio blindado,  $\rho_{real}$  = Densidad del material original,  $\rho_{PVB}$  = Densidad del Butiral de Polivinilo,  $g_{vb}$  = Espesor vidrio blindado,  $g_{real}$  = Espesor vidrio del material original y  $g_{PVB}$  = Espesor del Butiral de Polivinilo.

A esta ecuación se le agrega una nueva operación, debido a que estas piezas están conformadas por dos tipos de materiales. En la siguiente tabla se presentan las densidades efectivas de los vidrios de 38 mm.

**Tabla IV. 6.-** Densidad efectiva de los vidrios de *Ford Explorer 2002*

Parte	Densidad efectiva (kg/mm <sup>3</sup> )
Ventana delantera	3.2154 x 10 <sup>8</sup>
Ventana trasera	3.2153 x 10 <sup>8</sup>
Aleta trasera	3.2152 x 10 <sup>8</sup>
Parabrisas	3.1349 x 10 <sup>8</sup>
Ventana cajuela	3.2155 x 10 <sup>8</sup>
Medallón	3.1350 x 10 <sup>8</sup>

#### IV.4.1.- Cambio de masa

De acuerdo con los cálculos de la densidad efectiva existe un cambio de masa, la cual es la que permitirá conocer el comportamiento del vehículo blindado. Para el conocimiento del cambio de masa se presenta la Tabla IV.7 y la Tabla IV.8.

**Tabla IV. 7.-** Cambio de masa de piezas metálicas sometidas a blindaje

Pieza	Cantidad	Masa original (kg)	Masa con blindaje (kg)
Puerta delantera	2	11.75	39.20
Puerta trasera	2	10.14	34.91
Salpicadera trasera	2	3.29	16.19
Marco ventana trasera	2	1.36	5.70

Marco de las puertas	2	4.49	19.51
Poste delantero superior	2	1.34	4.91
Poste delantero inferior	2	3.11	10.72
Poste entre puertas	2	3.87	12.92
Cajuela	1	3.61	30.82
Toldo	1	20.28	91.86
Pared de fuego	1	3.35	22.71
Pared de fuego lateral	2	1.99	7.21
Piso delantero	1	13.60	58.50
Piso central	1	11.75	47.03
Piso trasero	1	8.07	39.21
Piso parte baja de la puerta	2	4.31	14.68

**Tabla IV. 8.-** Cambio de masa de los vidrios sometidos a blindaje

<b>Pieza</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Masa original (kg)</b>	<b>Masa con blindaje (kg)</b>
Ventana delantera	2	3.73	35.73
Ventana trasera	2	2.93	28.41
Aleta trasera	2	0.93	8.94
Parabrisas	1	11.32	105.69
Ventana cajuela	2	3.61	34.63
Medallón	1	9.15	85.44

De acuerdo a los datos que se muestran en las dos tablas anteriores y respecto a la cantidad de piezas por concepto se presenta la Tabla IV.9 para conocer el aumento de masa que existe al someter a la *SUV*, presentada a lo largo del presente trabajo, al proceso de blindaje tipo anti-asalto nivel III.

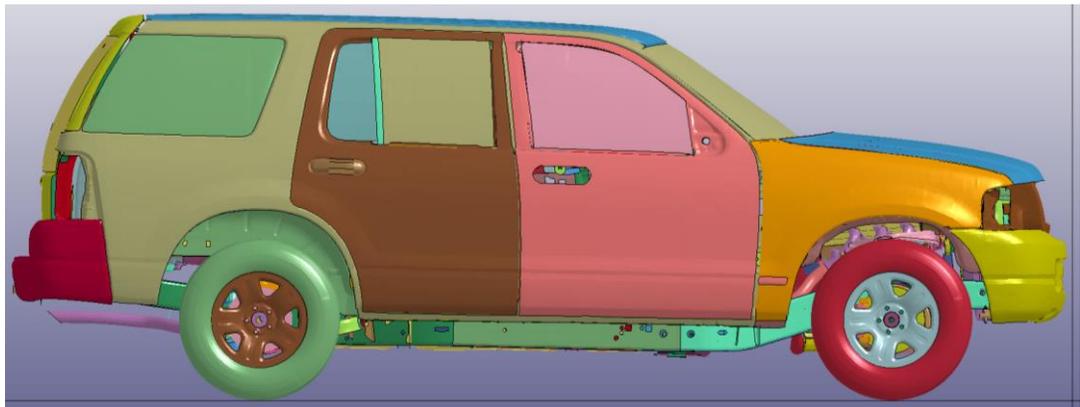
**Tabla IV. 9.-** Aumento de masa de las piezas originales vs blindadas

Concepto	Masa original (kg)	Masa con blindaje (kg)	Diferencia (kg)
	152.05	622.16	470.11
Vidrios	42.96	406.59	363.62
<b>Total</b>			<b>833.73</b>

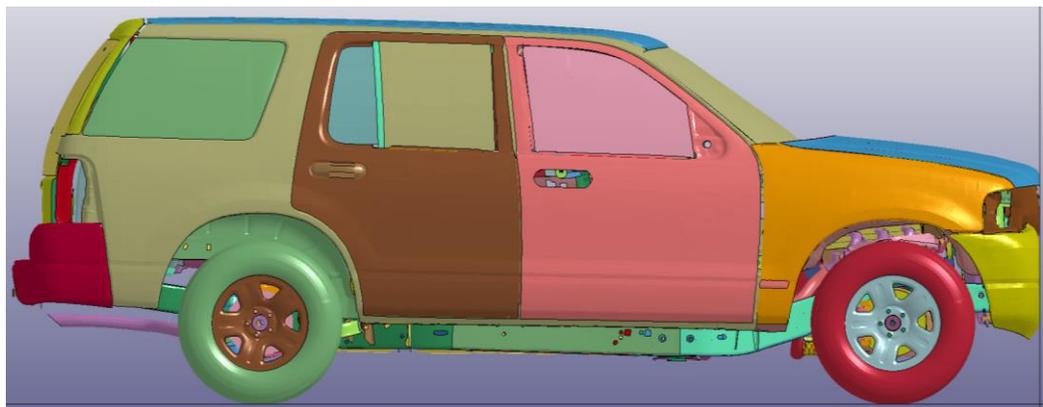
**IV.5.- Estudio Ford Explorer blindada**

Después de ingresar el cambio de densidad a las piezas que son recubiertas se procede a simular la colisión del vehículo blindado en las mismas condiciones presentadas en el Capítulo III. Obteniendo los siguientes resultados. En la Figura IV.1 se presenta la secuencia de la colisión en un parámetro de  $t = 0$  a  $t = 120$  ms con intervalos de 10 ms.

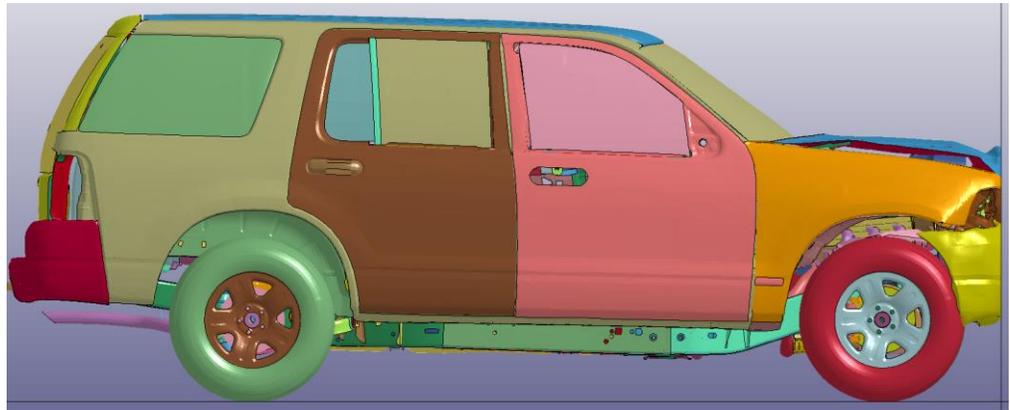
$t = 0$  ms



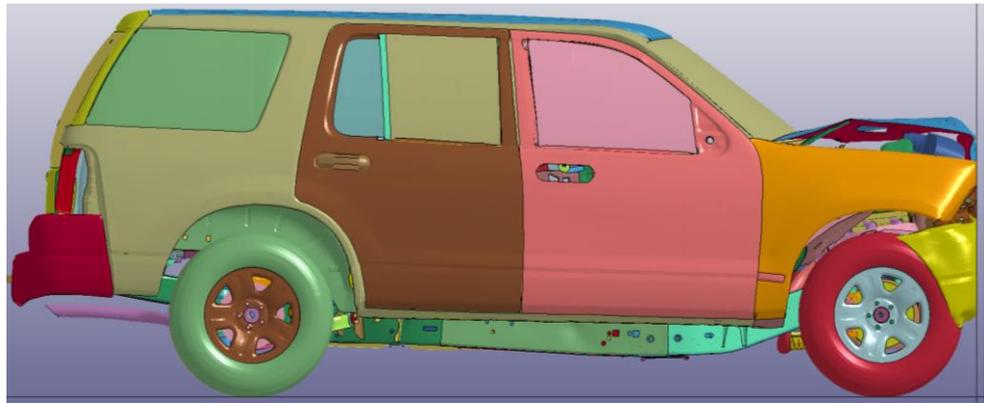
$t = 10$  ms



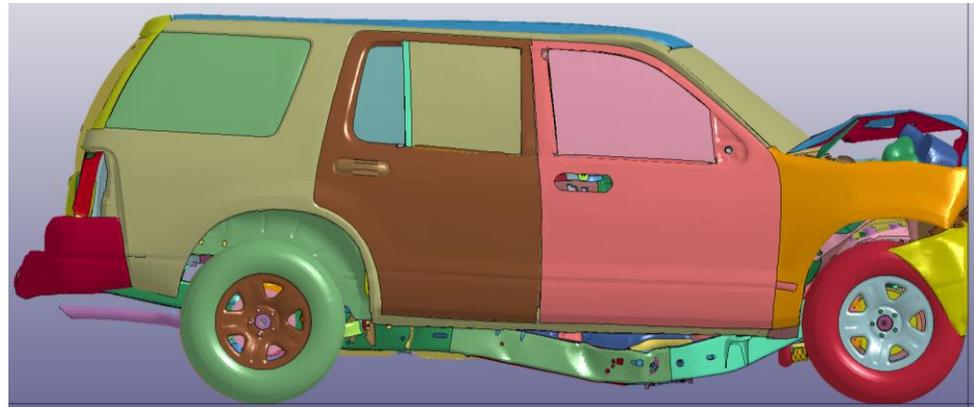
t = 20 ms



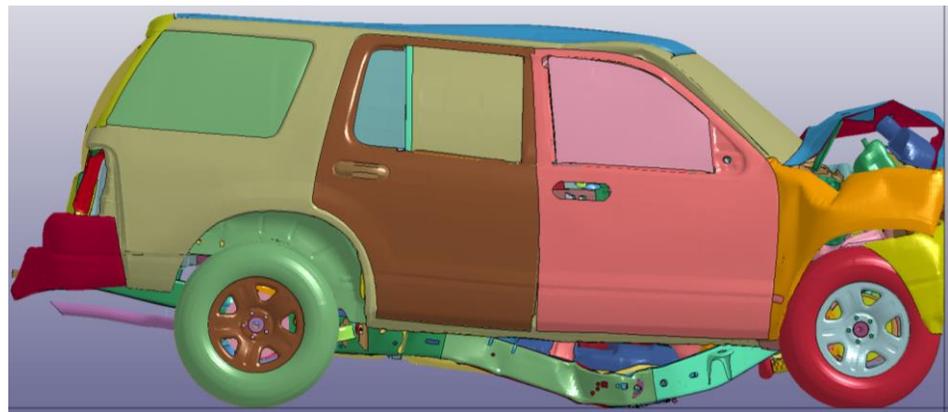
t = 30 ms



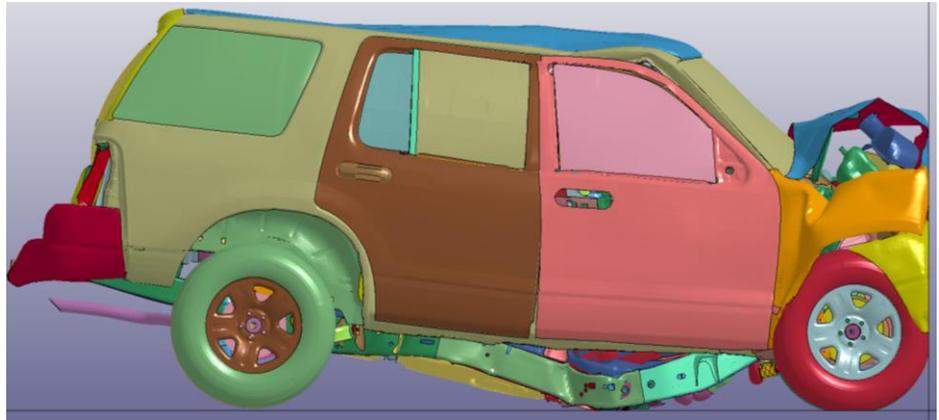
t = 40 ms



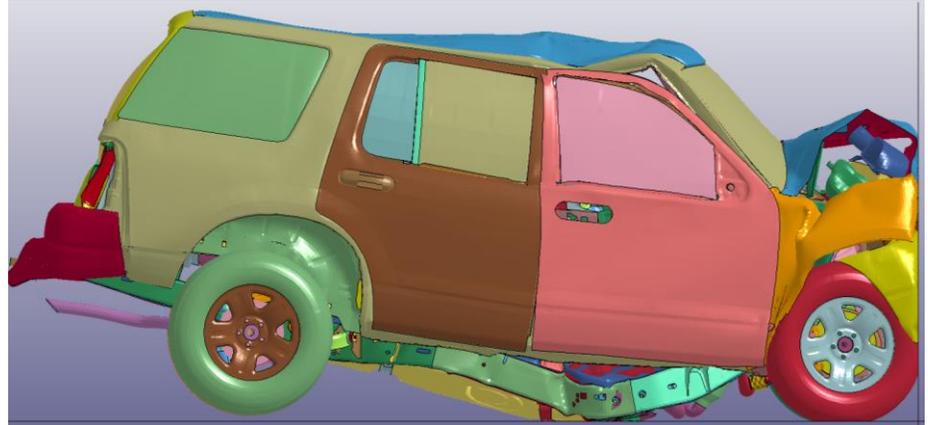
t = 50 ms



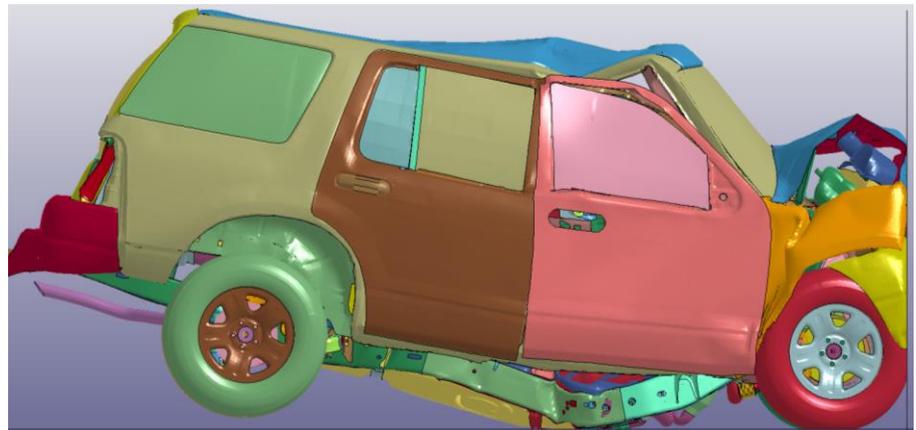
t = 60 ms



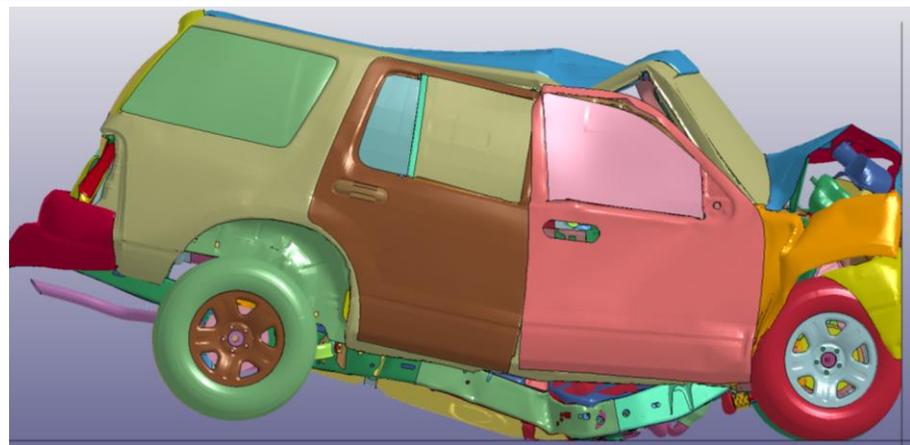
t = 70 ms



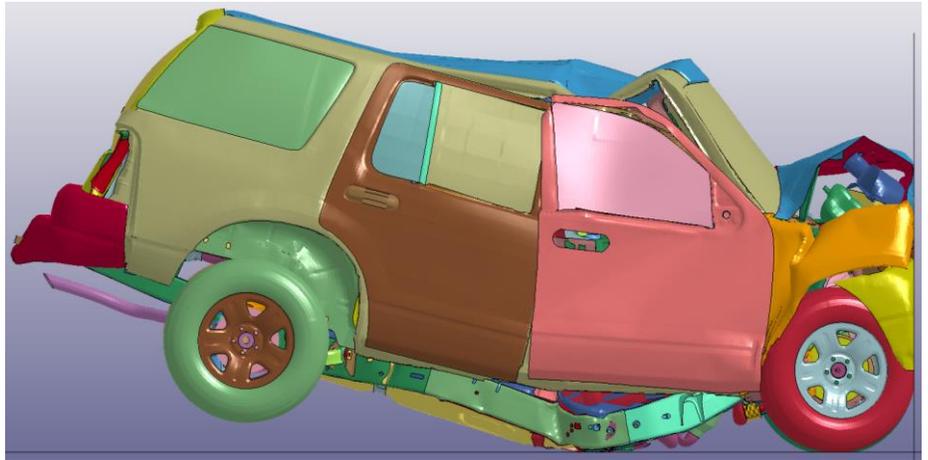
t = 80 ms



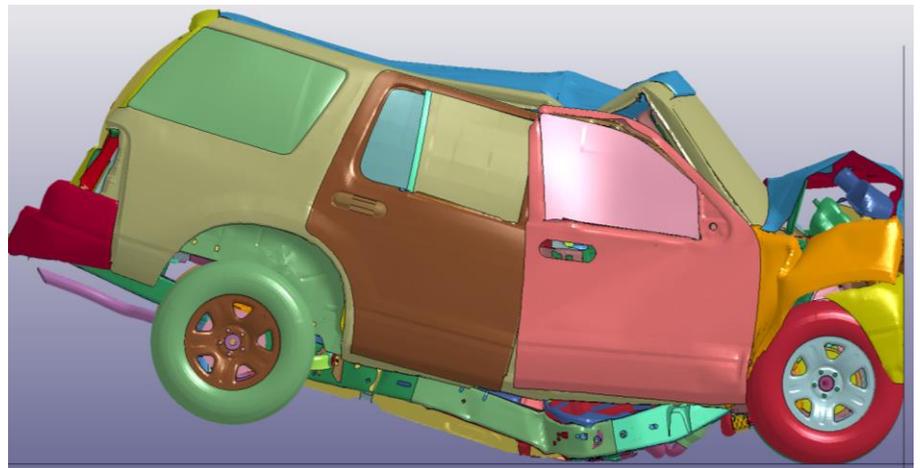
t = 90 ms



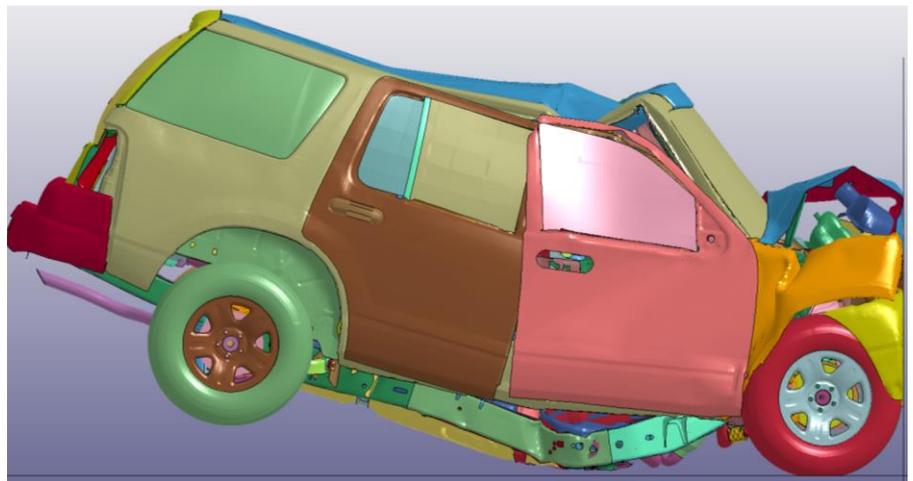
t = 100 ms



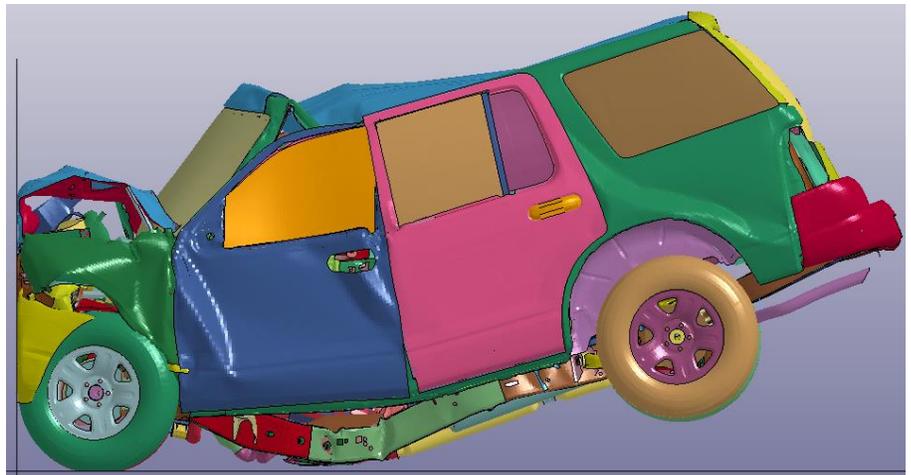
t = 110 ms



t = 120 ms

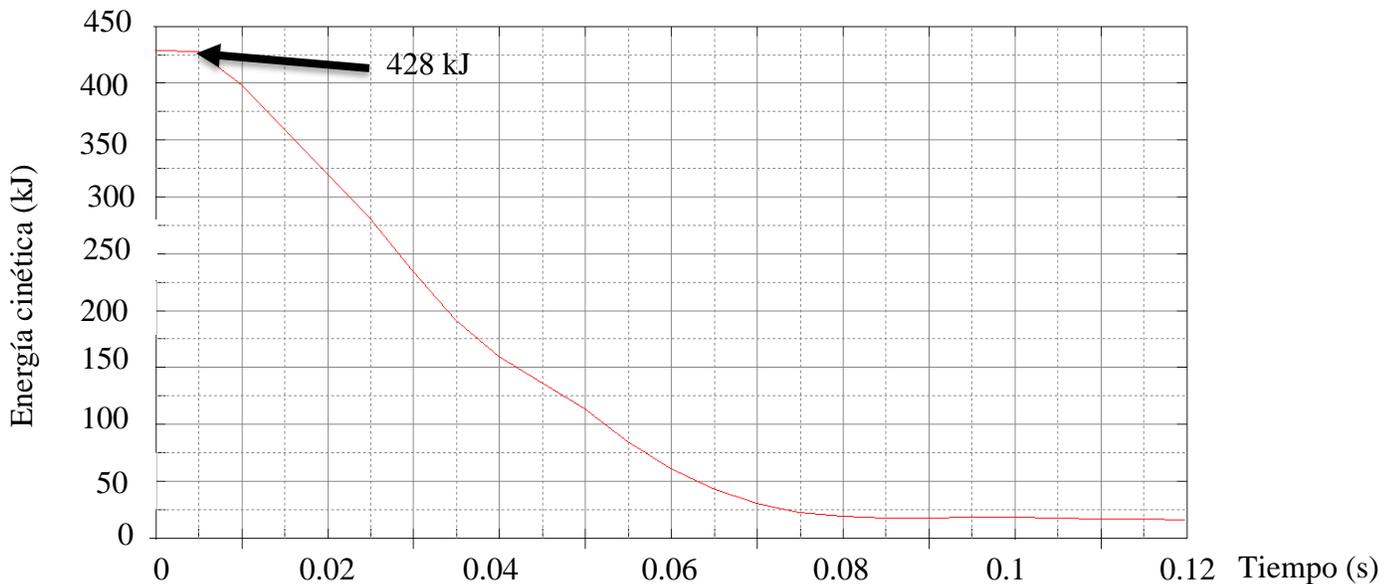


t = 120 ms



**Figura IV. 1.-** Simulación de colisión de 0 a 120 ms de *Explorer 2002* blindado

Ya que se obtuvo la secuencia de la simulación dinámica, se procede a la extracción de datos necesarios para determinar el índice de severidad y así conocer en qué clase de gravedad se encuentra el ocupante recordando que los valores mostrados son para el eje X. En primera instancia se presenta en la Figura IV.2 la energía cinética con la que el vehículo blindado cuenta instantes antes del contacto con la pared rígida y así conocer la energía que fue disipada en el impacto.



**Figura IV. 2.-** Energía cinética de la *SUV Ford Explorer* blindada

Para conocer si los datos proporcionados por el programa de computo de análisis dinámico por medio del método de elemento finito está mostrando resultados adecuados, se procede al cálculo

de la energía cinética del vehículo blindado con la finalidad de compararlos. Conociendo el aumento de masa que se obtuvo con el blindaje y la masa del vehículo sin modificación alguna para la obtención de la masa de la *SUV* blindada (Ecuación IV.1) se hace uso de la Ecuación II.1 recordando que la velocidad de 56.32 km/h, que es establecida por la *NHTSA*.

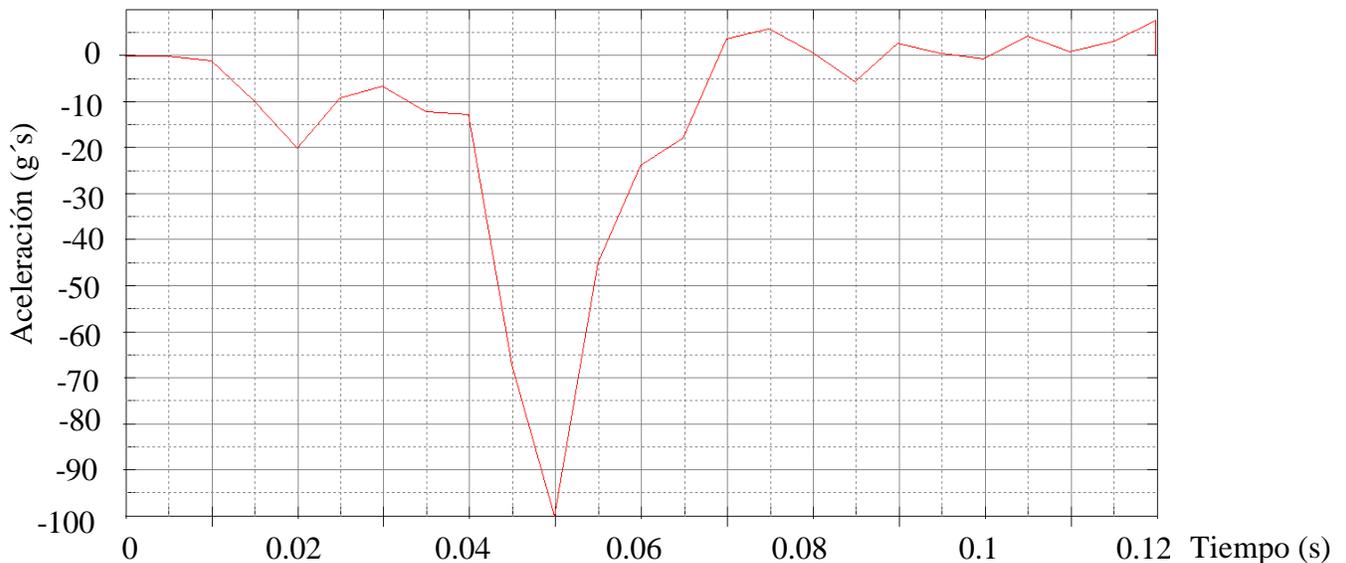
$$m_{total} = m_{original} + m_{blindaje} \quad \text{IV.1}$$

$$m_{total} = 2297.245 \text{ kg} + 883.73\text{kg} = 3180.975\text{kg}$$

$$Ec = \frac{1}{2} (3180.975 \text{ kg}) \left(15.64 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$

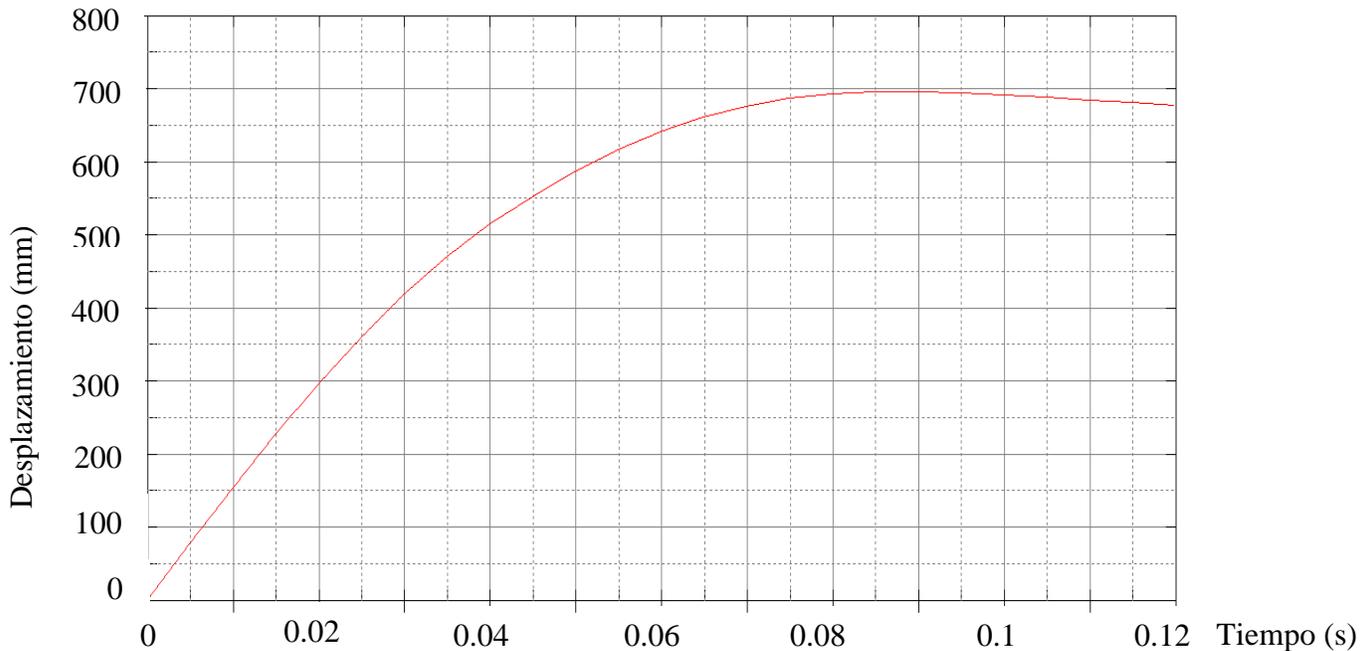
$$Ec = 389.04 \times 10^3 \text{ J}$$

Comparando los datos obtenidos de la simulación con los calculados de la energía cinética se observa que existe una diferencia menor al 10%, recordando que el método de elemento finito es una aproximación, se considera un resultado aceptable. Por lo que se procede a la extracción de información necesaria para el cálculo del *ASI*. Posteriormente, en la Figura IV.3 las aceleraciones que sufre el conductor, reiterando que, se considera que el ocupante hace uso del sistema de retención de forma adecuada.



**Figura IV. 3.-** Aceleración del asiento del conductor en *Explorer* blindada sobre el eje X

Como primera aproximación para el conocimiento de la magnitud de la colisión en la Figura IV.3 se presentan aceleraciones hasta 100 g's, existiendo una diferencia de casi 33g's la cual es una diferencia considerable. Por ello, se procede al cálculo de la fuerza con la que la SUV hace contacto con la pared haciendo uso de la Ecuación II.2. Como dato para la ecuación antes mencionada se requiere el desplazamiento del vehículo automotor, el cual se presenta en la Figura IV.4. Es indispensable recordar, que la pared se comporta como un elemento rígido, por lo que, no absorberá nada de la energía del impacto como se explicó en el capítulo anterior.



**Figura IV. 4.-**Desplazamiento de la camioneta blindada en el eje X

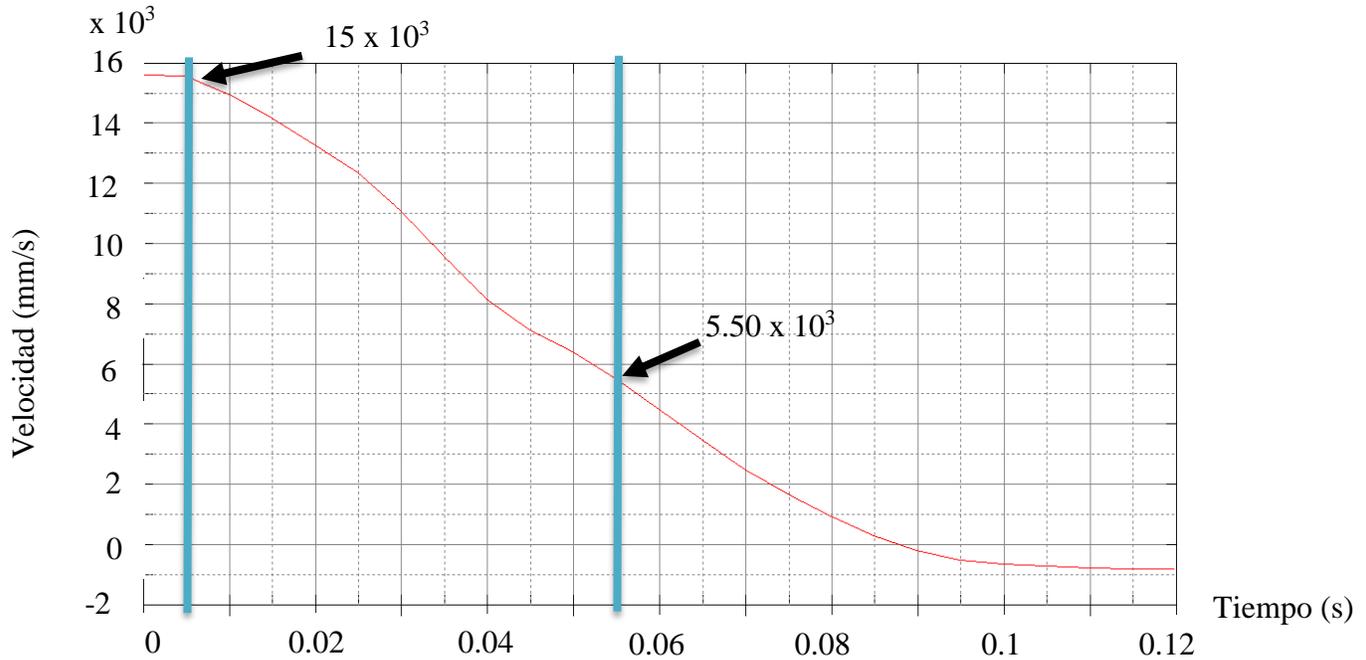
En el capítulo anterior se hace mención que la  $E_d$  será igual a la  $E_c$ . De esta forma, se tienen todos los datos necesarios para obtener la fuerza del impacto.

$$F = \frac{E_d}{d} = \frac{428 \times 10^3 \text{ J}}{0.7 \text{ m}} = 611.42 \times 10^3 \text{ N} \quad \text{II.2}$$

Teniendo conocimiento de la fuerza de impacto y de la masa de la camioneta sometida al proceso de blindaje se procede al cálculo de la aceleración límite con la Ecuación III.3.

$$\hat{a}_x = \frac{F}{m} = \frac{611.42 \times 10^3 \text{ N}}{3180.97 \text{ kg}} = 192.21 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 19.59 \text{ g}'s \quad \text{III.3}$$

Haciendo uso del *MRUA* (Ecuación III.4) se calcula la aceleración en un intervalo de 50 ms inmediatos a la colisión. Los datos para la obtención de la aceleración limite se obtiene con ayuda de la Figura IV.5.



**Figura IV. 5.-** Comportamiento de la velocidad de la camioneta blindada en el eje X

$$\bar{a}_x = \frac{V_f - V_0}{t} = \frac{5.50 \times 10^3 \frac{\text{mm}}{\text{s}} - 15.64 \times 10^3 \frac{\text{mm}}{\text{s}}}{0.05\text{s}} = 202.8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 20.67 \text{ g}'s \quad \text{III.4}$$

Se hace mención nuevamente en que se omite el signo negativo en el resultado debido a que ya se conoce que hace referencia a la desaceleración. Y finalmente con los datos requeridos para el cálculo del *ASI* (Ecuación II.3) se procede a la obtención de mismo.

$$ASI(t) = \left[ \left( \frac{\bar{a}_x}{\hat{a}_x} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left[ \left( \frac{20.67 \text{ g}'s}{19.59 \text{ g}'s} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 1.055$$

De acuerdo al índice de severidad obtenido de la *Ford Explorer 2002* que se sometió al proceso de blindaje, esta se encuentra dentro de la clase *B*, donde los ocupantes pueden sufrir desde pérdida

de conocimiento de corta duración hasta fracturas. Por esta razón, el vehículo es considerado seguro.

Es importante resaltar que el resultado es similar al del capítulo anterior a pesar del cambio de masa considerable; sin embargo, el cambio de la velocidad que presenta la *SUV* al estar impactándose con la pared rígida desciende con una pendiente menos pronunciada. Así mismo, el desplazamiento del automotor es mayor que el caso de estudio anterior. Por estos factores son los que permiten que la *Ford Explorer* se mantenga en la misma clasificación.

#### IV.6.- Sumario

A lo largo del presente capítulo se realizan los cálculos necesarios para que la *SUV Ford Explorer 2002* sea sometida al proceso de blindaje tipo anti-asalto nivel III con el propósito de simular el modelo mediante método de elemento finito con las mismas condiciones de colisión que el caso anterior. Por último, se extraen los datos que se obtuvieron de la simulación; en primera instancia, se realiza la comparativa del cálculo de energía cinética con el proporcionado con el paquete de cómputo y posteriormente se realiza la estimación de índice *ASI* para determinar el nivel de seguridad que prestaría el vehículo blindado.

#### IV.7.- Referencias

- 1.- Asociación Intercontinental de Blindajes A.C., *Comparativo de Niveles de Blindaje*, Ed. Asociación Intercontinental de Blindajes A.C. Consultada en 20 de febrero de 2018. <http://www.aib.org.mx/pdf/tabla-balistica.pdf>
- 2.- ASIS; Advancing Security Worldwide, Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, *Materiales Balísticos y Sus Aplicaciones para Áreas de Máxima Seguridad*, Blindaje007, 2009.
- 3.- Hernández-Gómez, Jorge J., *Densidad Efectiva*, Centro de Desarrollo Aeroespacial; Instituto Politécnico Nacional, 2018.
- 4.- HING WAH, *Vidrio a Prueba de Balas para Automoviles*, HIGH WAH, Consultada en 20 de febrero de 2018, <http://glass-xh.com/product-1-1-automobile-bullet-proof-glass/156281>.

# **Capítulo V Evaluación de Maniquí percentil 50 en Vehículo Blindado**

### V.1.- Introducción

De acuerdo a los resultados obtenidos en los Capítulos III y IV, donde se realizó la evaluación numérica del vehículo automotor en colisión frontal, es necesaria la evaluación dinámica de un maniquí de prueba percentil 50 que permita una valoración de la parte del cuerpo (cabeza). La cual se encuentra más afectada al momento de la colisión y conocer con mayor precisión el estado de salud del ocupante posterior al impacto.

### V.2.- Maniqués de prueba de colisión

Existen diversas pruebas de *crash test* para determinar el nivel de seguridad que prestan los vehículos. Sin embargo, es necesario estudiar a fondo el nivel de riesgo que corre el ocupante en cada parte de cuerpo. Para ello, se hace uso de los maniqués de prueba, que son diseñados para reflejar las características del cuerpo humanos y son utilizados de acuerdo al tipo de colisión a estudiar (frontal, lateral, vuelco, atropello, entre otros).

El modelo estandarizado para las pruebas es el *Hybrid III*, este *dummy* está clasificado de acuerdo al percentil y género [V.1]. En la Tabla V.1 se presentan algunos tipos de maniqués de prueba *Hybrid III*.

**Tabla V. 1.- Modelos de *Dummy Hybrid III* [V.2 y V.3]**

<b>Modelo</b>	<b>Género y percentil</b>	<b>Masa (kg)</b>	<b>Altura (m)</b>
	Masculino 50th	78.15	1.75

	<p>Masculino 95th</p>	<p>101.5</p>	<p>1.88</p>
	<p>Femenino 5th</p>	<p>49.37</p>	<p>1.52</p>
	<p>Infantil3 años</p>	<p>16.17</p>	<p>0.96</p>

	<p>Infantil 6 años</p>	<p>21</p>	<p>1.12</p>
	<p>Infantil 10 años</p>	<p>35.2</p>	<p>1.33</p>

Cada versión del modelo *Hybrid III* corresponde a un determinado percentil. Por ejemplo, el percentil 50 representa que el 50 % de la población americana supera esta constitución del *dummy*. Lo anterior también ocurre con el percentil 95. No obstante, el percentil 5 representa a un individuo de constitución débil, donde sólo el 5% de la población tiene estatura y masa menor [V.4]. Las versiones presentadas en la tabla anterior, son las actualmente utilizadas para pruebas de impacto frontal, existen más tipos de maniqués de prueba para impacto lateral y trasero, pero no se muestran debido a que no competen con el presente trabajo.

**V.3.- Head Injury Criterion (HIC)**

En el Capítulo II se presentó información sobre el índice de severidad encefálico. Así como, el parámetro que se recomienda. Sin embargo, es necesario conocer los valores a considerar para

evaluar la severidad de la lesión y conocer el estado de los ocupantes después de la colisión. En el trabajo realizado por *Rolf Eppinger* y colaboradores se presentan los valores límite del  $HIC_{15}$  para los diferentes modelos de maniquíes de prueba (Tabla V.2), tomando como base el *Hybrid III 50th male* [V.6].

**Tabla V. 2.-** Valores límite de  $HIC_{15}$

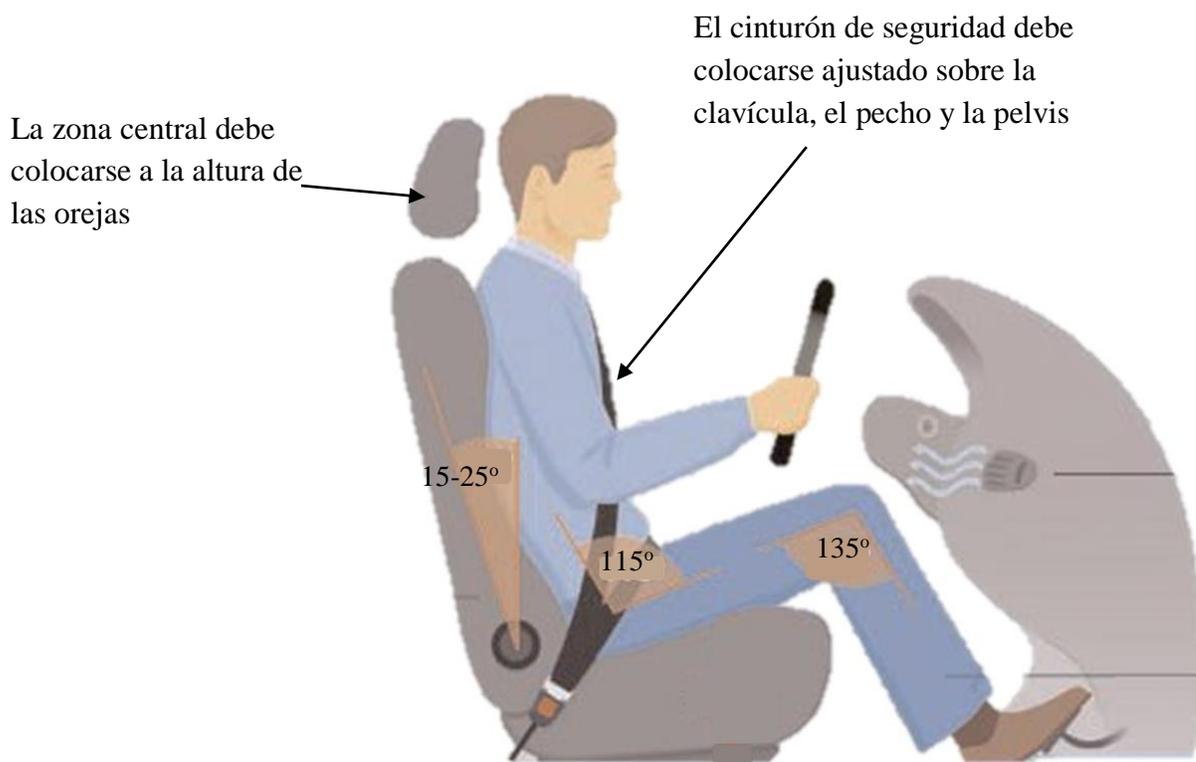
<b>Modelo</b>	<b><math>HIC_{15}</math></b>
Femenino 5th	700
Masculino 50th	700
Masculino 95th	700
Infantil 1 año	390
Infantil 3 años	570
Infantil 6 años	700

Es indispensable mencionar que existe una discrepancia en la lectura de los valores de la Tabla V.2, donde diversos autores consideran que cualquier valor menor al límite, aun siendo de 1, el ocupante sobrevive. Por otro lado, otros autores mencionan que entre más cercano sea el valor al límite, las probabilidades de deceso son mayores.

#### **V.4.- Posición de manejo**

Para llevar a cabo la simulación de colisión se requiere un asiento; por lo tanto, se utiliza un modelo simplificado, el cual es diseñado mediante dos cuerpos rígidos, uno que conforma el asiento y otro el respaldo, este último se encuentra con una inclinación de 15 a 25 grados de la vertical. Este rango de inclinación es considerado como el máximo ángulo permitido para una posición adecuada de manejo [V.5]. Es indispensable mencionar que el asiento utilizado es un modelo que sirve de referencia para posicionar el maniquí de acuerdo a los ángulos establecidos por cada extremidad del cuerpo para un buen manejo.

Al tener el modelo de referencia del asiento es necesario colocar el maniquí de prueba de forma adecuada de acuerdo a los ángulos establecidos de cada articulación para las pruebas de colisión, presentados en la Figura V.1.



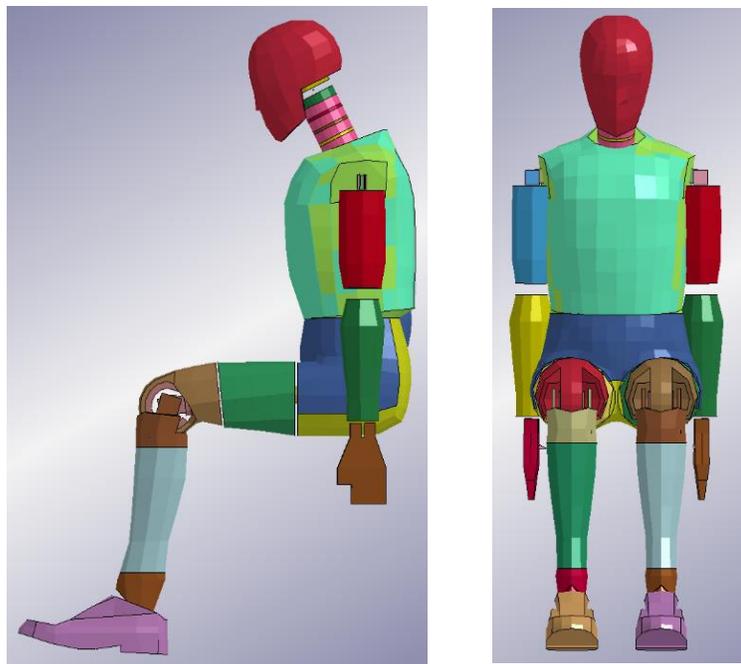
**Figura V. 1.-** Posición correcta de manejo

### V.5.- Acondicionamiento del modelo

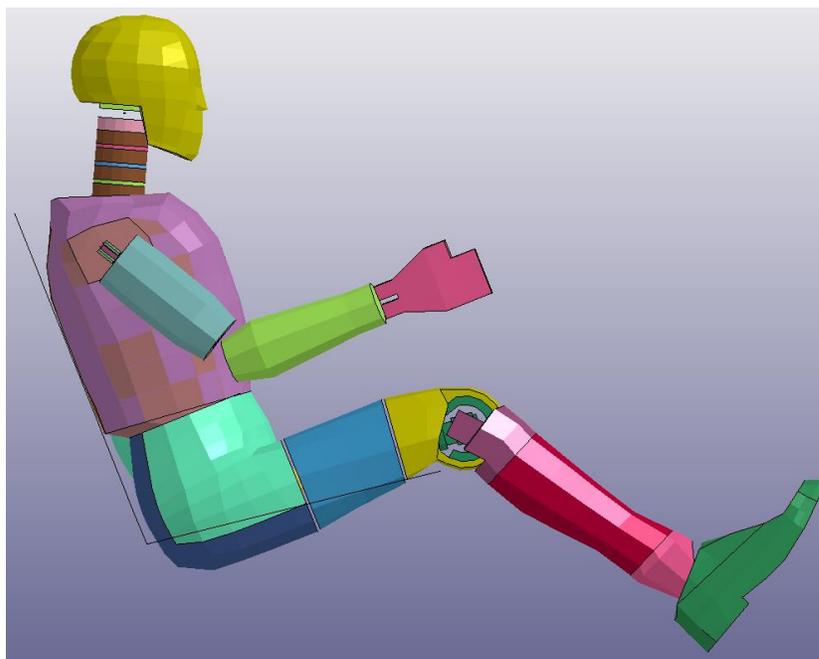
Para la evaluación de daño se hace uso de un maniquí percentil 50 masculino (Figura V.2), debido a que se cubre un mayor rango de población con los resultados a obtener. El *dummy* será sometido a una colisión frontal con los resultados obtenidos del análisis del capítulo anterior. Para ello, es necesario el acondicionamiento del modelo de acuerdo a la posición de manejo antes mencionada, así como la elaboración de los sistemas de retención, las relaciones de contacto entre las distintas partes involucradas en el análisis.

El colocar el maniquí en la posición mostrada en la Figura V.1 permite que los resultados del análisis dinámico tengan mayor fidelidad al tomar en cuenta cada detalle de las posiciones recomendadas al momento de manejar. Por esta razón en la Figura V.3 se observa el modelo del maniquí percentil 50 colocado como se muestra en la Figura V.1. Como se muestra en la Figura V.3 el maniquí ya se encuentra colocado en la posición correcta de manejo y se observa el asiento

que tiene la función de referencia. Sin embargo, es indispensable agregar el sistema de retención más antiguo, el cinturón de seguridad. Para ello, se hace uso nuevamente de la Figura V.2 para colocar el dispositivo antes mencionado de la forma indicada.

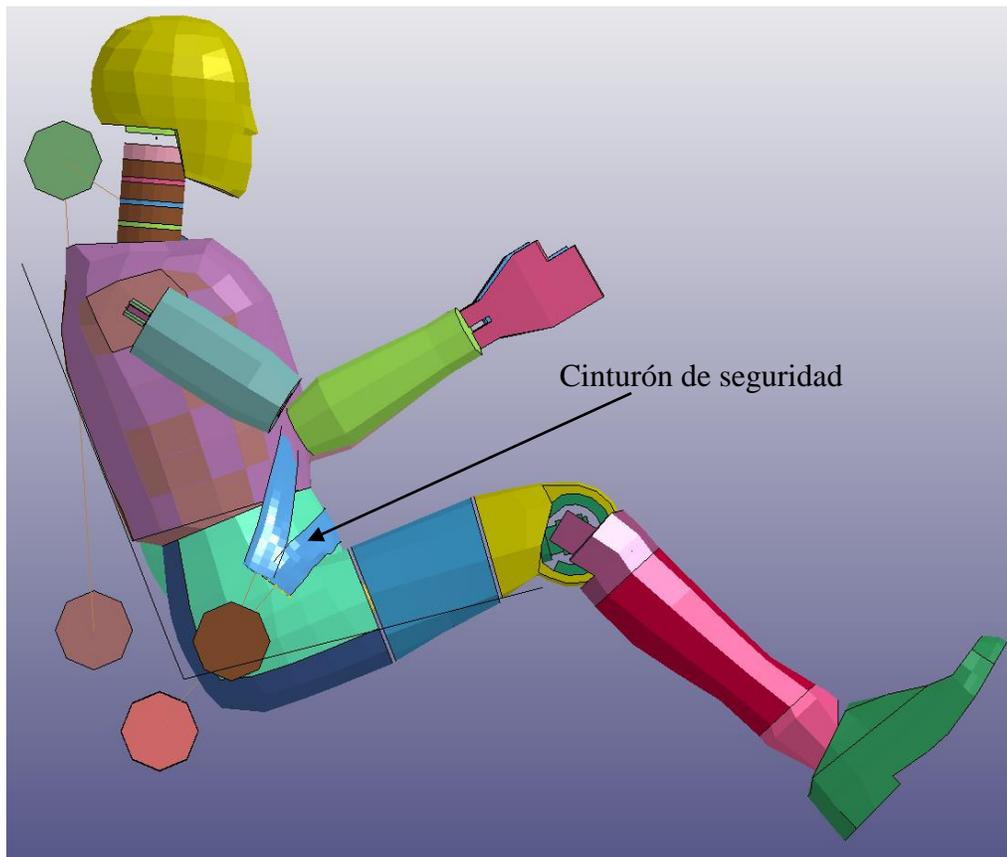


**Figura V. 2.-** Modelo computacional de *Dummy Hybrid III 50th*



**Figura V. 3.-** Modelo acondicionado a la posición adecuada de manejo

Para colocar el cinturón de seguridad adecuadamente se crean elementos rígidos que representan los puntos de sujeción del cinturón de seguridad. Posteriormente se elige la opción *Seatbelt fitting*, se seleccionan los nodos donde el cinturón hará contacto con el ocupante con la opción de mixto, haciendo posible la visualización de una cinta que hace la función de cinturón de seguridad. El procedimiento se realiza en primera instancia para la cinta que hace contacto con la pelvis y posteriormente con el tórax para finalmente obtener el cinturón de seguridad listo con sus relaciones de posición con los miembros del cuerpo humano antes mencionados, como se muestra en la Figura V.4.



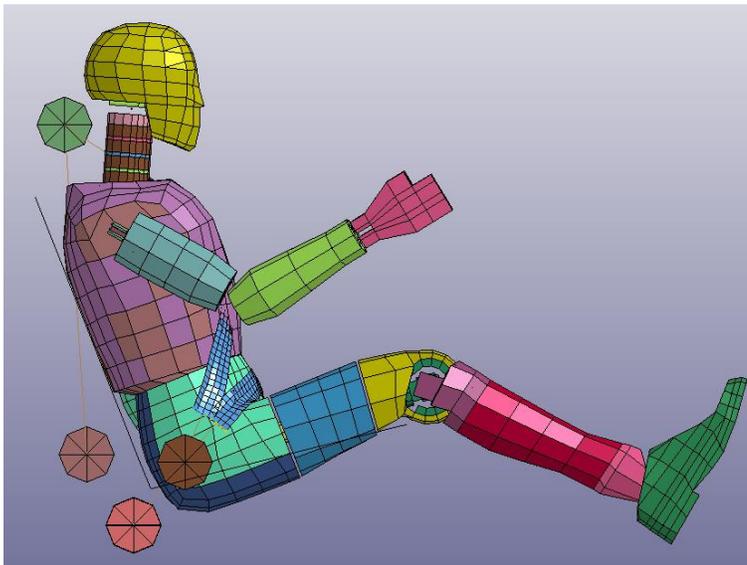
**Figura V. 4.-** Modelo del *dummy* acondicionado para la colisión

#### **V.6.- Análisis dinámico del maniquí**

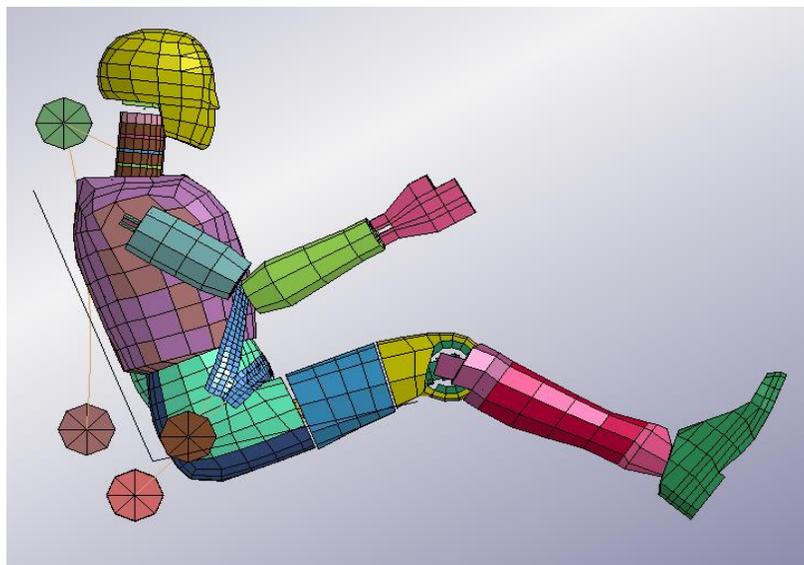
Ya que el maniquí cuenta con la posición de manejo y el cinturón de seguridad colocados adecuadamente se procede a ingresar una curva de velocidad que determine el grado de lesión del *Hybrid III male 50th*. El presente trabajo se enfoca en el grado de lesión que sufre el ocupante al momento de la colisión frontal completa en un vehículo blindado (*Ford Explorer 2002*). Por lo que

para conocer el nivel de lesión del caso particular, es necesario ingresar la curva de velocidad resultante en el capítulo anterior (Figura IV.5) con la particularidad que esta se ingresa de forma invertida. Cabe resaltar, que la curva ingresada es para que el asiento sea quien realice el movimiento, debido a que este último es quien se encuentra totalmente sujetado al vehículo automotor y por consecuencia, se mueve con la misma velocidad del vehículo automotor.

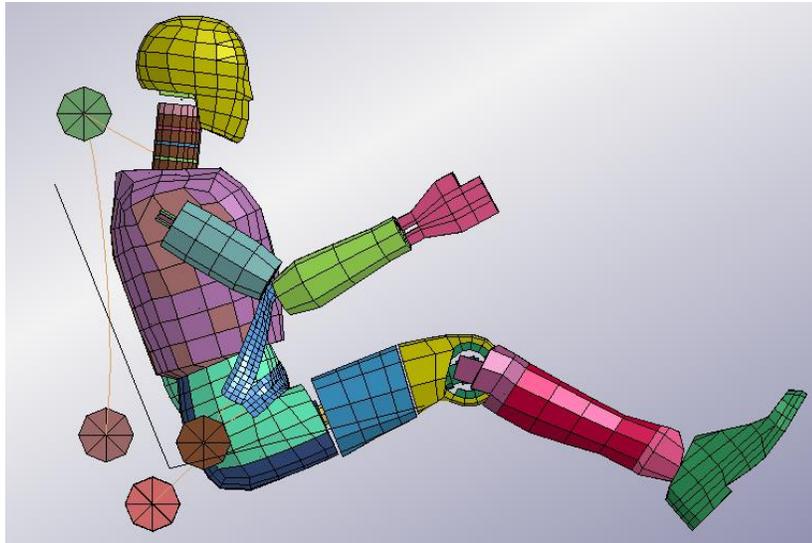
A continuación se presenta la secuencia del análisis dinámico del maniquí acondicionado (Figura V.5), mostrando una secuencia cada 10 ms hasta llegar a los 120 ms.



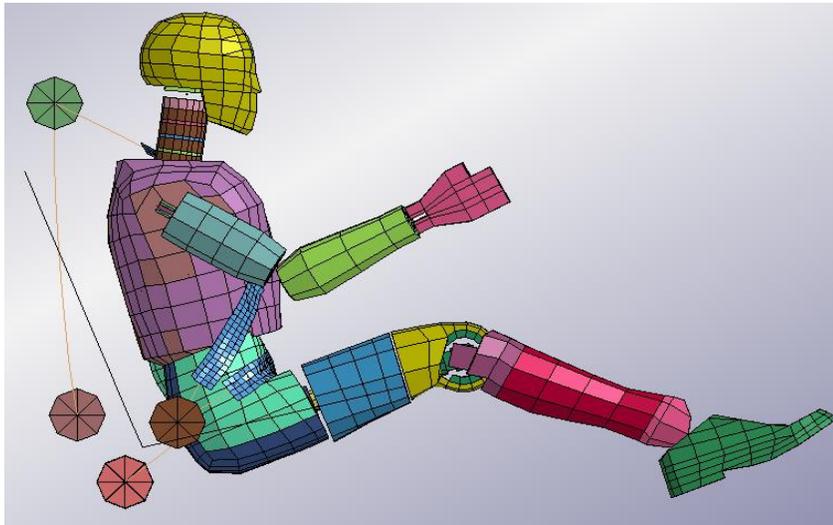
t = 0 - 40 ms



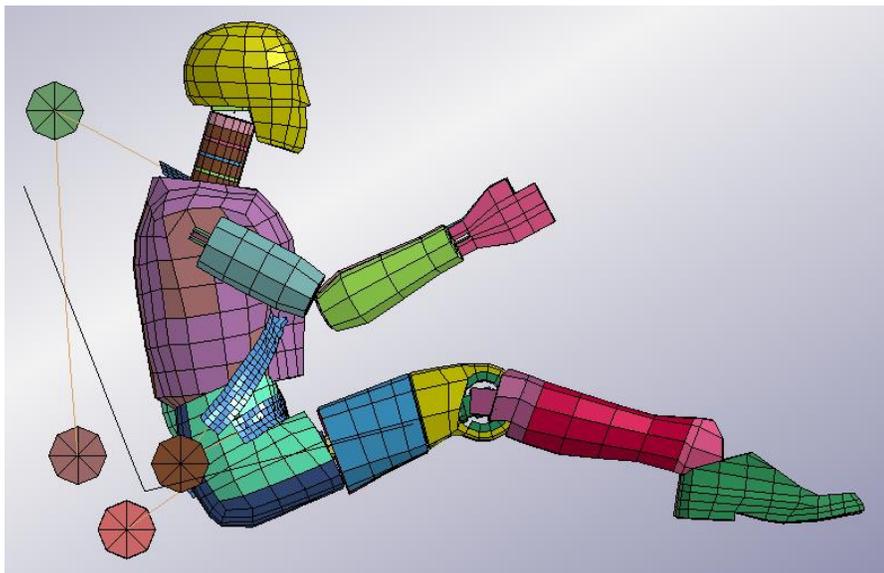
t = 50 ms



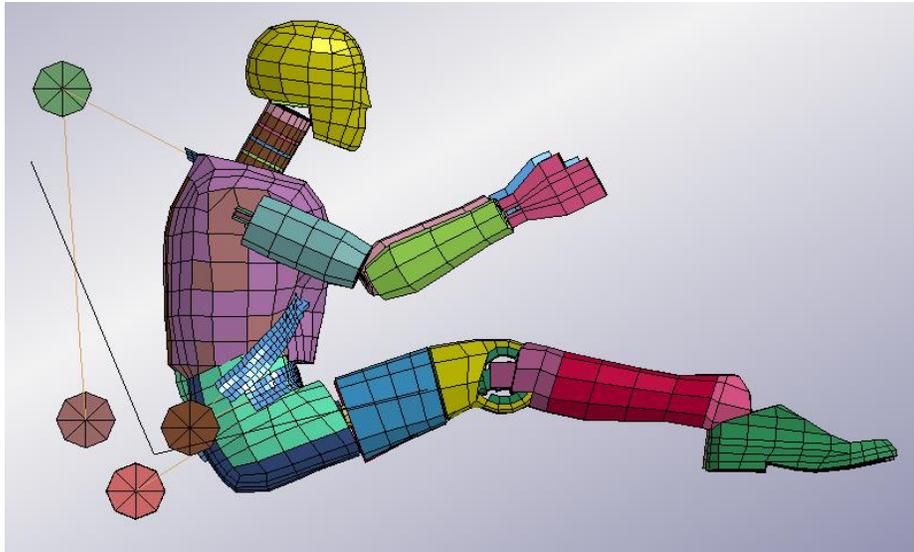
t = 60 ms



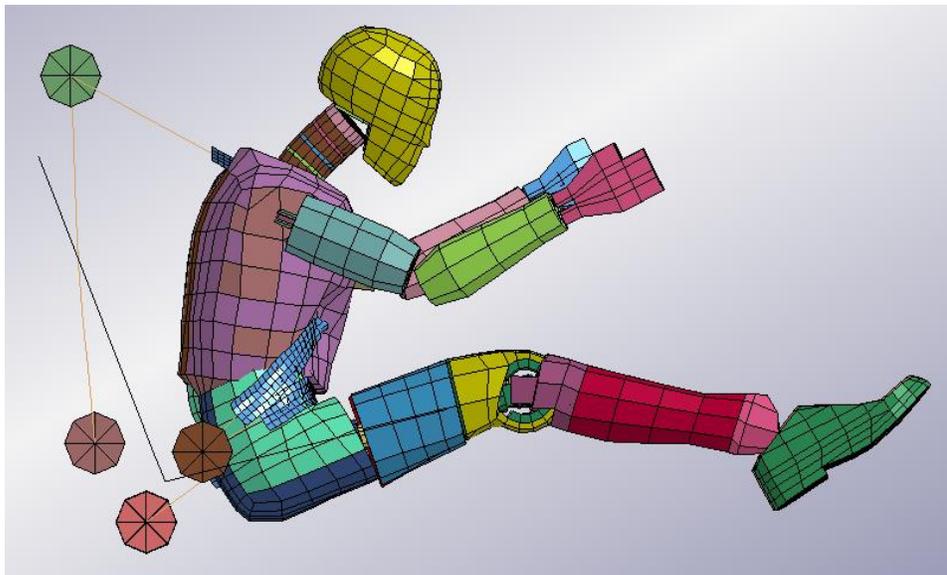
t = 70 ms



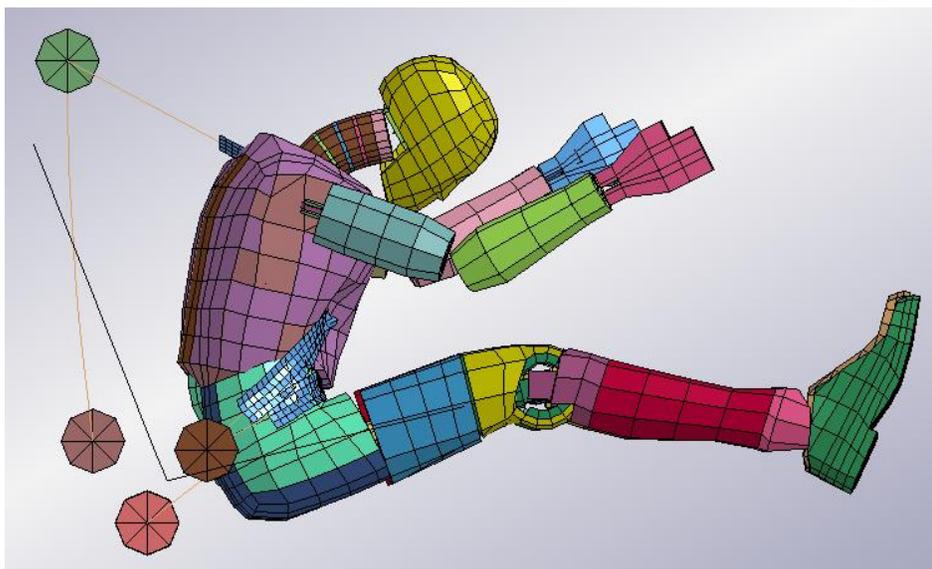
t = 80 ms



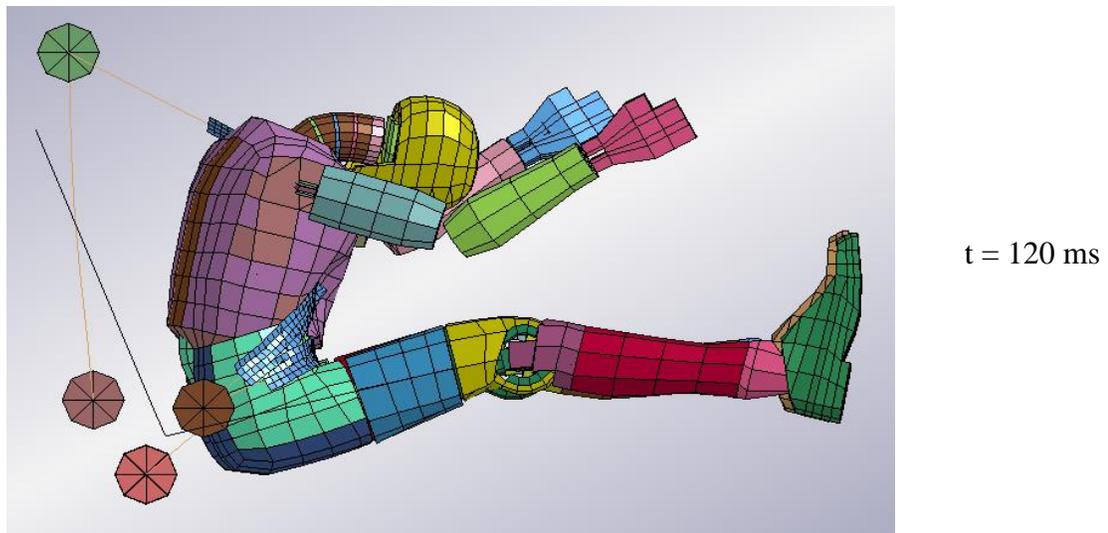
t = 90 ms



t = 100 ms

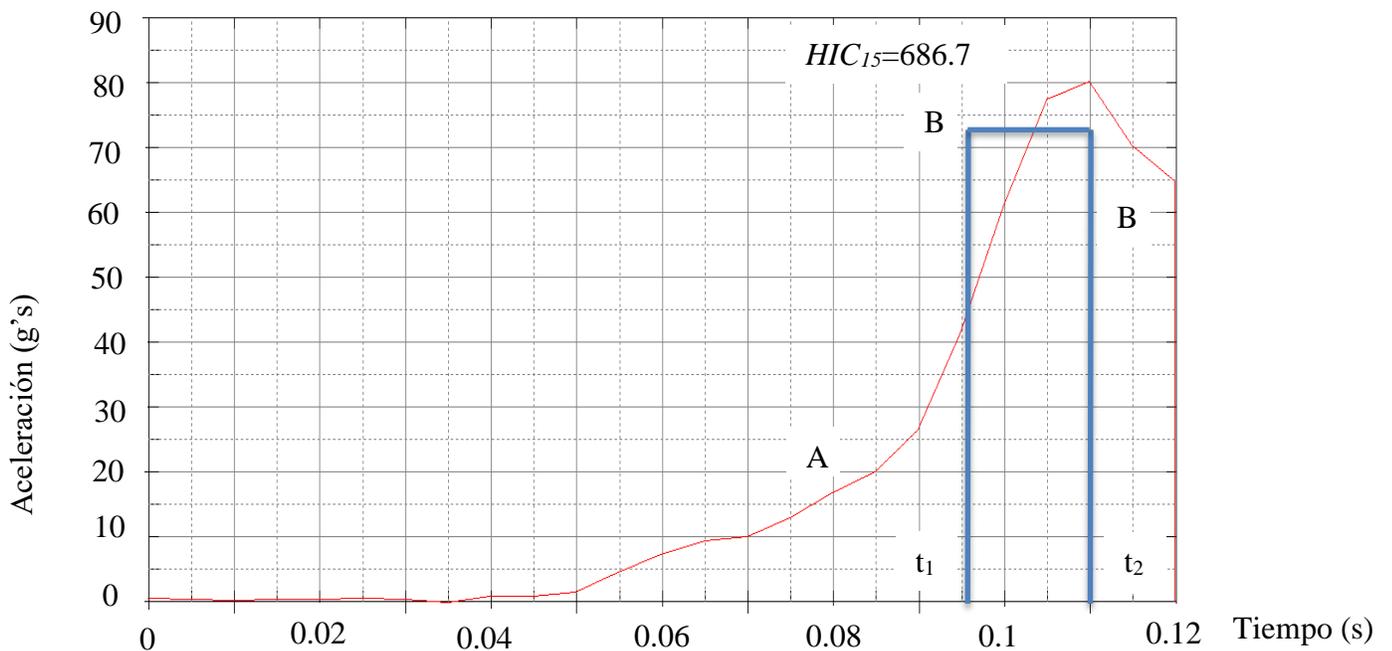


t = 110 ms



**Figura V. 5.-** Simulación de *dummy* ante colisión frontal de vehículo blindado de 0 a 120 ms

De acuerdo a la secuencia presentada en la Figura V.5 es posible notar que en el intervalo de tiempo de 0 a 40 ms no existe movimiento, debido a que la curva tiene velocidades negativas y son despreciables. Además, la posición resultante de la cabeza adquiere un movimiento muy fuerte en los últimos momentos de la simulación, por lo que en esa zona es donde se encontrará la aceleración de mayor magnitud. El análisis realizado permite la obtención del valor de lesión encefálica. Para ello, en la Figura V.6 se presenta el resultado de la desaceleración del miembro superior (cabeza) del maniquí de prueba.



**Figura V. 6.-** Aceleración y  $HIC_{15}$  de la cabeza del modelo de prueba

La línea roja (A) en la Figura V.6 representa el comportamiento de la cabeza del maniquí de prueba y la línea azul es el parámetro de  $HIC_{15}$ , el cual tiene un valor de 686.7 en el intervalo de tiempo  $t_1=91.84$  y  $t_2=110.2$ . De acuerdo a los datos presentados en la figura anterior que son comparados con la Tabla V.2 se determina que el sujeto de prueba alcanza una aceleración de hasta 80 g's, sin embargo, se encuentra con un valor menor al establecido como límite. Por lo que, se determina que el ocupante se mantiene con vida después de la colisión. No obstante, el parámetro se encuentra cerca del límite, por ello cabe la posibilidad que el usuario sufra lesiones de gravedad.

### V.7.- Sumario

En el presente capítulo se muestra la diversidad de maniqués de prueba de colisión frontal de acuerdo a conceptos de tamaño, edad y los límites tolerados de los mismos. Además, se presenta el modelo del *dummy* que es sometido a un proceso de acondicionamiento como lo es la posición adecuada de manejo, el cinturón de seguridad, la curva de velocidad, entre otros. Haciendo posible una evaluación numérica del maniquí en colisión frontal con los resultados adquiridos de la *Ford Explorer 2002* sometida al proceso de blindaje para la obtención del índice de lesión en cabeza con el objetivo de conocer el estado del ocupante en el impacto antes mencionado.

### V.8.- Referencias

- 1.- Jaskiewicz, M., Jurecki, R., Witaszek, K. y Więckowski, D., Overview and analysis of dummies used for crash test, *Scientific Journals. Maritime University of Szczecin*, pp 22-31, 2013.
- 2.- Humanetics; Innovative Solutions, *Crash Test Dummies; Frontal Impact*, Humanetics Innovative Solutions, Consultada en Diciembre de 2017. <http://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/frontal-impact>
- 3.- Humanetics; Innovative Solutions, *Crash Test Dummies; Children*, Humanetics Innovative Solutions, Consultada en Diciembre de 2017. <http://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/children>
- 4.- Condes-Novillo, J., *Simulación de Ensayos de Choque en Vehículos; Validación de un Modelo de Dummy en 2 Dimensiones*, Tesis Licenciatura, Universidad Carlos III de Madrid, pp 70-76, 2005.
- 5.- Rodríguez, J. I., *Cómo Sentarse y Regular el Asiento, El volante y los Espejos; La Mejor Postura*, Ed. Conducir Mejor, pp 8-9, 2000.

- 
- 6.- Eppinger, R., Sun, E., Bandak, F., Haffner, M., Khaewpong, N., Maltese, M., Kuppa, S., Nguyen, T., Takhounts, E., Tannous, R., Zhang, A. y Saul, S., *Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint System-II*, Ed. National Highway Traffic Safety Administration, pp 1.1-2.6 ,1999.

# **Conclusiones y trabajos a futuro**

---

**VI.1. - Conclusiones**

En este trabajo se estudió el comportamiento de un vehículo al ser modificado estructuralmente que está clasificado por la NHTSA con cuatro estrellas para el conductor y cinco estrellas para el copiloto, considerándolo un vehículo automotor seguro. La modificación estructural lleva consigo un aumento de masa y por consecuencia un aumento de la energía cinética. Así como un cambio en el desplazamiento, velocidad y aceleración en el impacto. Por lo que se ve reflejado en la evaluación numérica del maniquí. Con el propósito de conocer los alcances que se obtuvieron en cada una de las etapas a lo largo del presente trabajo se muestran las conclusiones en el mismo orden que se exhiben los capítulos que componen esta tesis.

**VI.1.1. - Capítulo I**

Se presentó la elaboración del estado del arte que favoreció el conocimiento de los avances científicos y tecnológicos que han ido transformando a la industria del blindaje desde sus inicios como vehículos de guerra, hasta los vehículos de uso civil más seguros en la actualidad. Así mismo los avances de la seguridad pasiva con la evolución de los sistemas de retención como lo es el cinturón de seguridad. De igual manera se tiene el contexto de las investigaciones y mejoras que se presentan en los sistemas de retención con la finalidad de generar dispositivos con mayor fidelidad.

**VI.1.2. - Capítulo II**

En este capítulo se detalló la base teórica de la información referente a la secuencia de colisión y el funcionamiento del cinturón de seguridad para salvaguardar a los ocupantes en caso de choque. Además, se observaron algunas consideraciones para evaluar los índices de lesión de los ocupantes como:

- El cálculo de la energía cinética se encuentra con el vehículo en movimiento, por lo que, con el aumento de velocidad se tiene un crecimiento exponencial de la energía.

- El criterio de daño que permite obtener un panorama general es mediante el índice de severidad de la aceleración (*ASI*) y así validar o rechazar modelos de vehículos para las siguientes pruebas en índices de lesión de partes específicas del cuerpo de los ocupantes.
- El índice de lesión en la cabeza se determina por el *HIC*, el cual se puede medir mediante instrumentación (acelerómetro) que es colocado en el centro de masa del miembro antes mencionado. Existen diversos parámetros para determinar el *HIC*, sin embargo, la *ISO* sugiere como valor máximo 15 ms posteriores al impacto.

### VI.1.3. - Capítulo III

Se elaboró un análisis para el vehículo comercial, para el que fue necesario el conocimiento de los siguientes puntos:

- La forma de trabajar de los paquetes computacionales de Método de Elemento Finito de forma dinámica.
- El entorno del paquete computacional *LS-DYNA* así como sus materiales, su comportamiento, los contactos, inicio de simulación y lectura de resultados.
- Medidas, partes y contactos del modelo a trabajar

En relación a lo expuesto, se llevó a cabo una evaluación numérica que sirvió para conocer si el modelo usado cuenta con el comportamiento correcto de acuerdo a los conocimientos adquiridos en el capítulo II. El modelo presentado (*Ford Explorer 2002*) es corroborado con un informe presentado por *The George Washington University; Virginia Campus* y por la *National Crash Analysis Center* permitiendo validar el comportamiento del modelo computacional con la prueba experimental (Figura VI.1). Además, se calculó la energía cinética y energía disipada del vehículo a 56 km / hr (35 mph) mostrando que el modelo de acuerdo al *ASI* se encuentra en la categoría donde cabe la posibilidad de presentar contusiones de corta duración y fracturas que no comprometan la vida del ocupante permitiendo considerar a la *SUV* como un vehículo seguro.



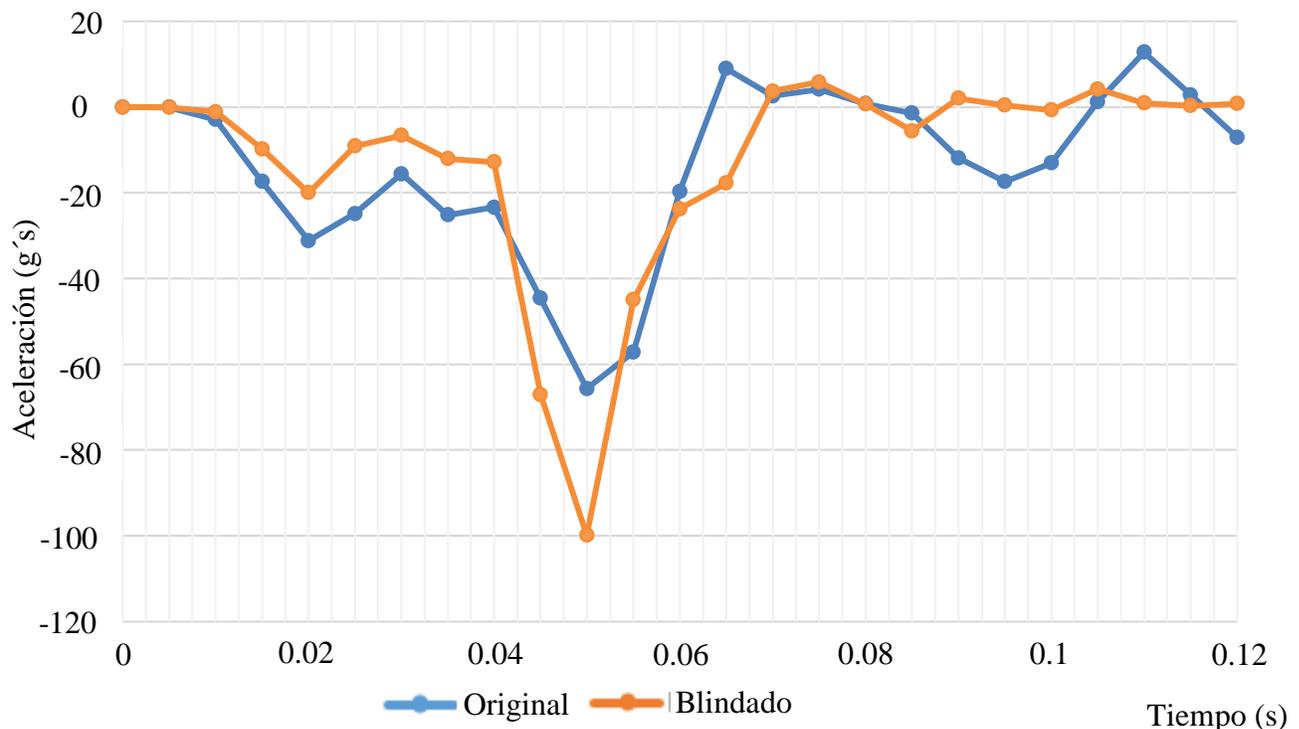
**Figura VI. 1.-** Comparativa colisión frontal del modelo virtual vs prueba experimental

Con todo lo anterior se concluye que el modelo virtual tiene un comportamiento muy similar en colisión que la prueba experimental, por lo que, se permite utilizar el modelo virtual para posteriores modificaciones y considerar que tendrán un resultado similar si se realizará de forma experimental.

#### **VI.1.4. - Capítulo IV**

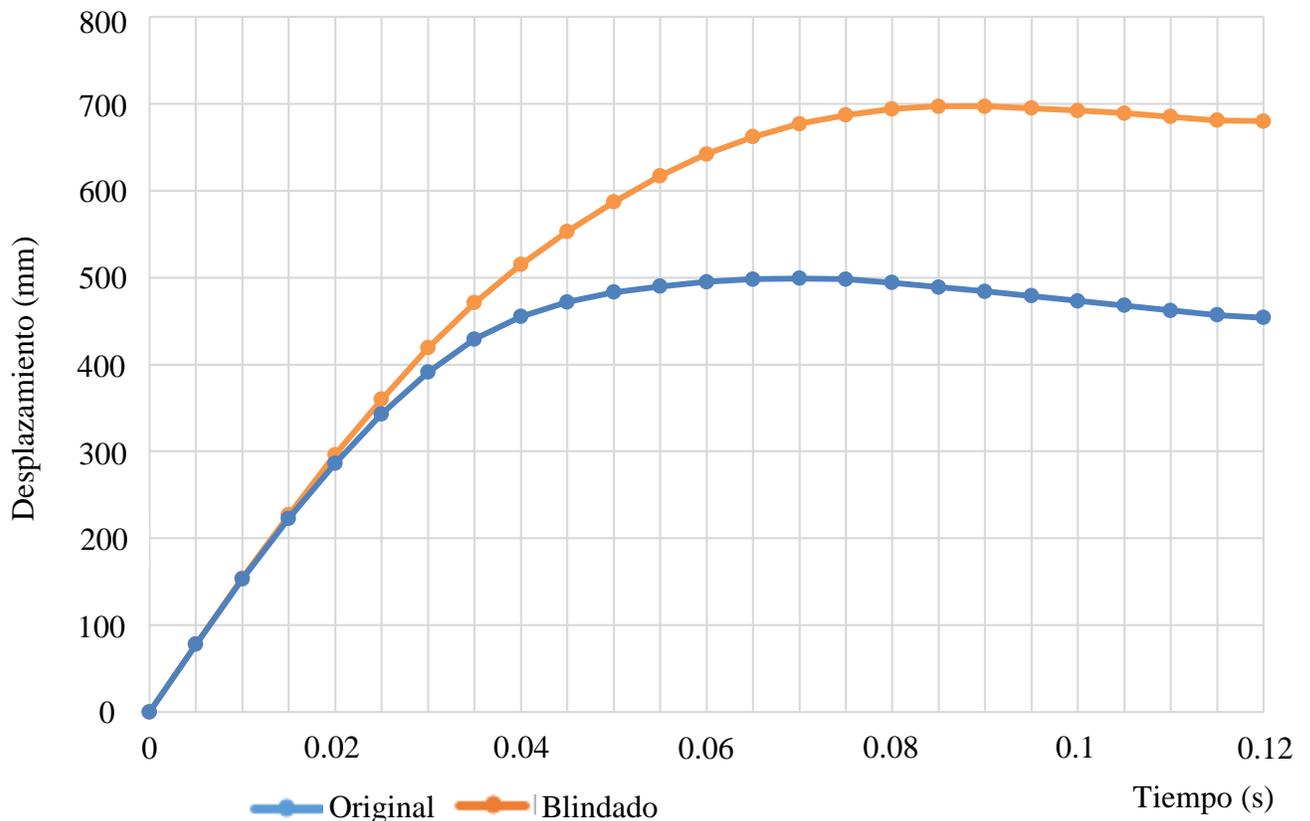
En el capítulo cuatro se conocieron los materiales que se aplican en el proceso de blindaje para tipo anti- asalto. Con apoyo del modelo virtual se obtuvieron las dimensiones de las partes vehiculares que son modificadas para conocer la masa del material que se agrega en el proceso de blindaje nivel III. Para poder modificar el modelo y someterlo al proceso de blindaje se hizo mediante la modificación de la densidad con la que cuenta el material inicialmente. Por lo que, se necesitó el cálculo de la densidad efectiva mediante la relación de tres ecuaciones considerando que el material

es lineal e isotrópico para el acero y el vidrio. Con los cambios realizados en la densidad de las partes que se modifican para el proceso de blindaje se compara la masa calculada analíticamente con la proporcionada por el modelo virtual y se realiza el cálculo de la energía cinética que permita la validación del modelo virtual. Finalmente se realiza la simulación dinámica con las mismas condiciones para obtener la respuesta del vehículo modificado obteniendo una diferencia significativa como se muestra en la Figura VI.2.



**Figura VI. 2.-** Comparativa aceleración en colisión frontal de camioneta original vs blindada

De acuerdo a los resultados mostrados en la figura anterior se puede observar que existe un comportamiento similar en ambos vehículos. Sin embargo, hay un pico de desaceleración a los 50 ms donde existe una diferencia mayor a  $20g's$ , lo que permitió comprobar que al realizar un cambio estructural en el vehículo la respuesta será diferente. Para mayor conocimiento de la diferencia del índice de severidad entre ambos vehículos se tiene una comparativa del factor desplazamiento (Figura VI.3).

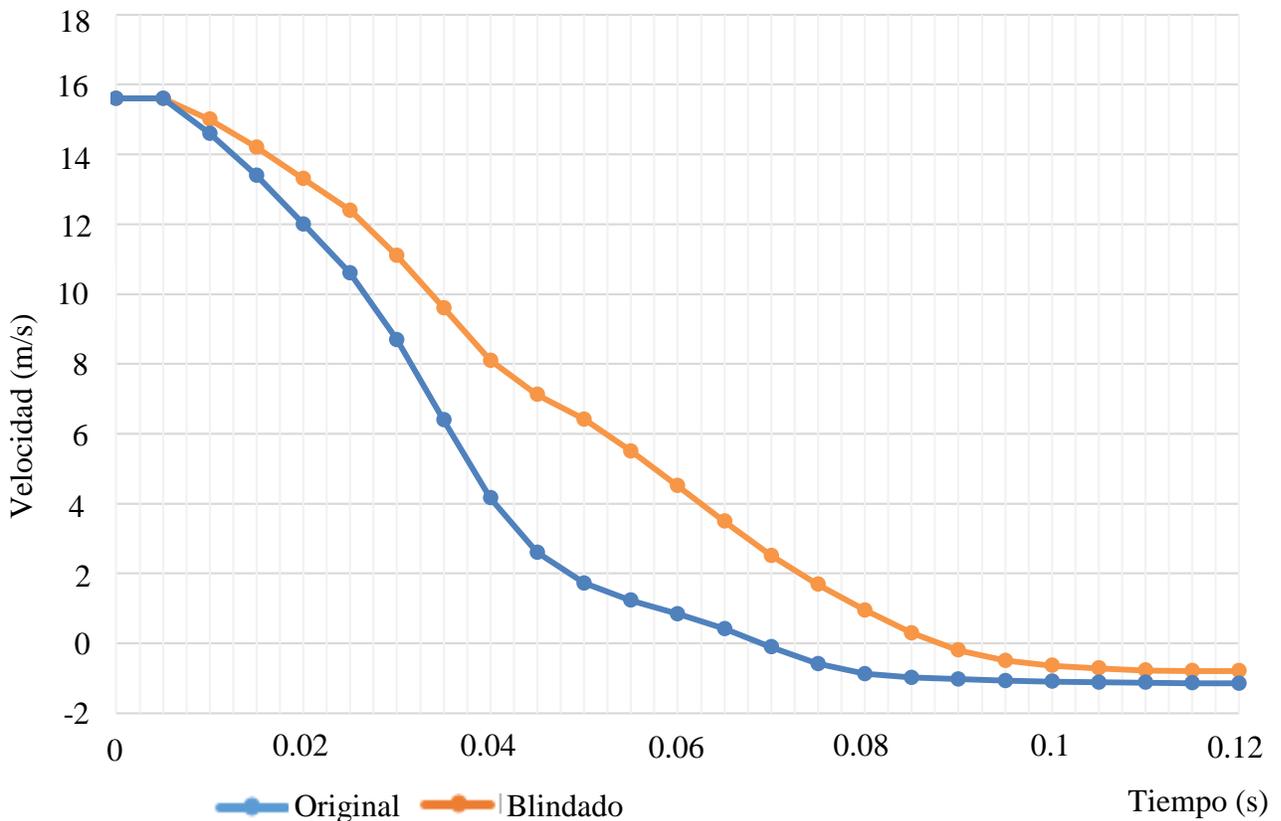


**Figura VI. 3.-** Comparativa desplazamiento en colisión frontal de camioneta original vs blindada

De la Figura VI.3 se observa que el desplazamiento entre ambas SUV es significativo, ya que la diferencia es de 200 mm aproximadamente y que el ASI tiene una variación menor a 0.2, donde la camioneta modificada estructuralmente tiene un índice menor. Concluyendo que a pesar del aumento de masa por la modificación estructural de la *Ford Explorer* nivel III resulta ser un vehículo que se mantiene considerado seguro de acuerdo al índice de severidad de aceleración, debido a la mayor deformación del chasis de la camioneta.

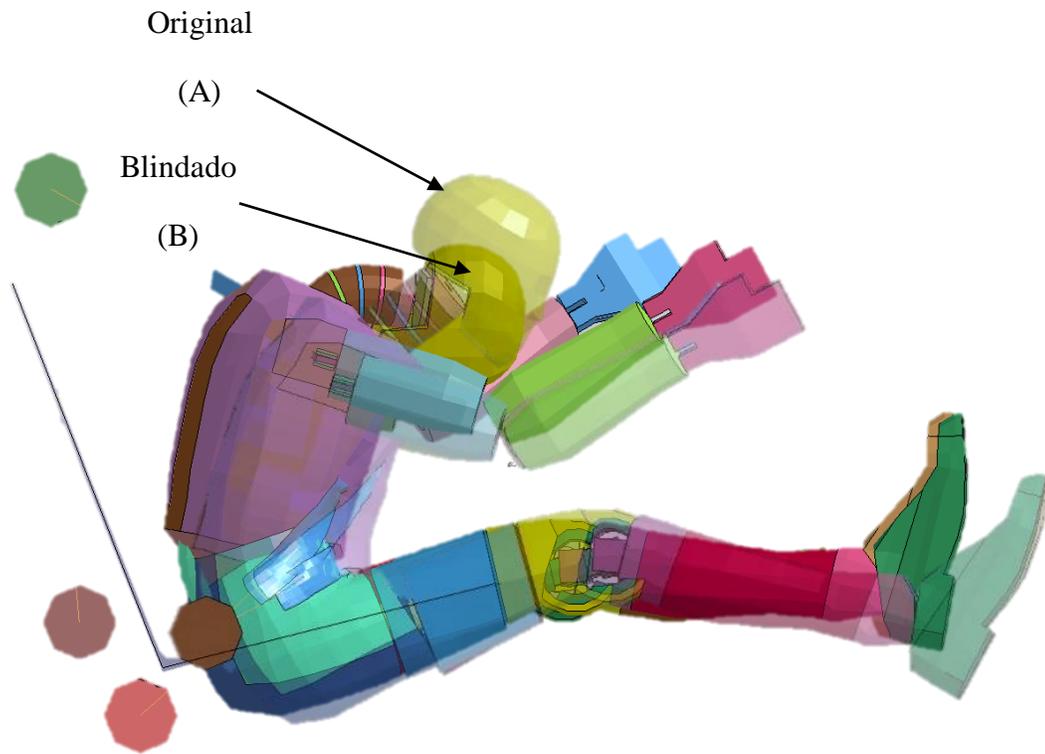
### VI.1.5. - Capítulo V

Se desarrolló un último análisis sobre el maniquí virtual percentil 50 para lo cual se requirió del conocimiento de algunas herramientas adicionales como es el modelado del cinturón de seguridad y el posicionamiento del modelo. El movimiento al que responde el maniquí es la curva de velocidad que presentan los vehículos al momento de la colisión, se muestra en la Figura VI.4.



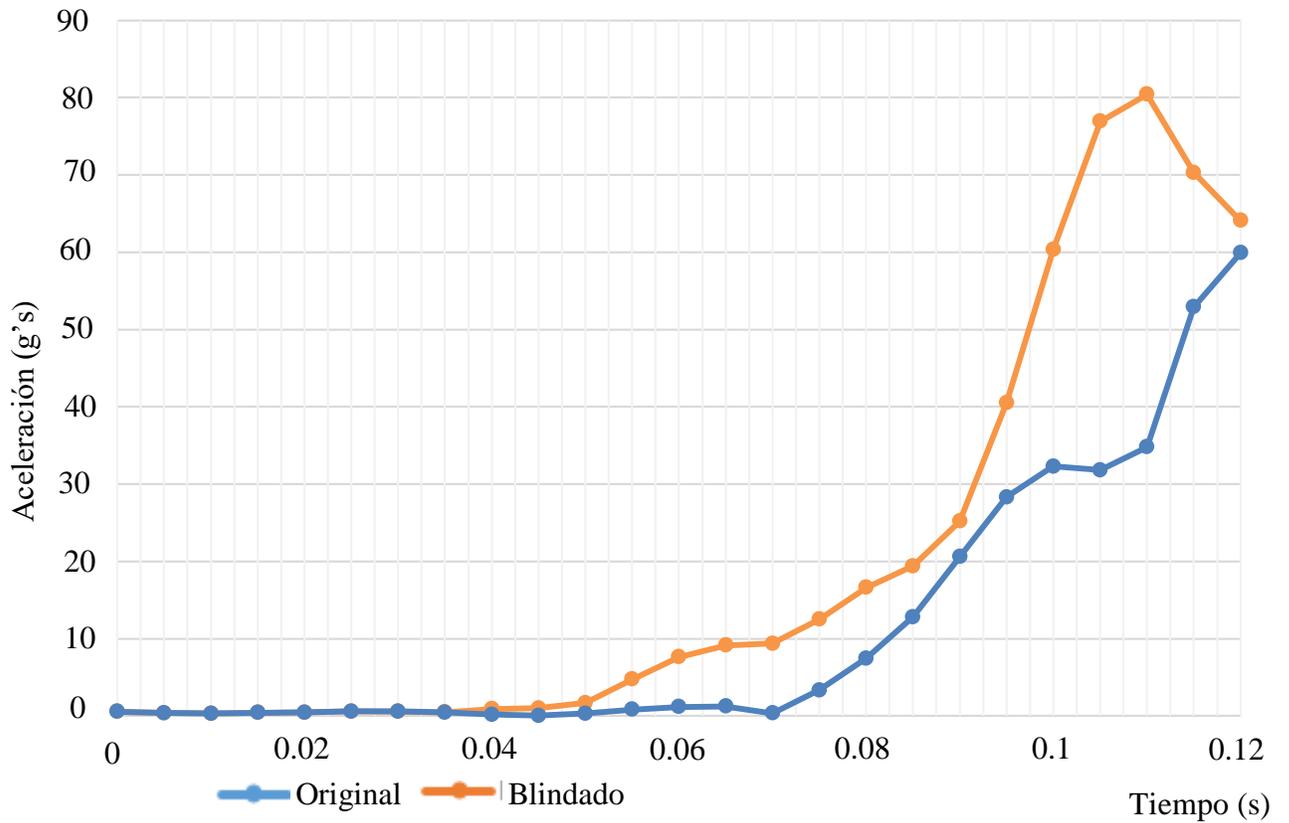
**Figura VI. 4.-** Comparativa velocidad en colisión frontal de camioneta original vs blindada

De acuerdo a la curva de velocidad de los vehículos se observa que correspondiente a la *Explorer* sin modificaciones es más pronunciada que la camioneta blindada. Debido a la diferencia de velocidad fue necesario realizar una valoración de daño encefálico mediante una evaluación numérica para conocer la influencia de los cambios estructurales realizados a la *SUV* según el  $HIC_{15}$ . En la Figura VI.5 se muestra la posición de mayor gravedad respecto al comportamiento de velocidad en la colisión.



**Figura VI. 5.-** Comparativa de maniqués en colisión frontal con velocidad de camioneta original vs blindada

Como se muestra en la figura anterior, el comportamiento del maniqué de prueba con la velocidad del vehículo blindado presenta un mayor desplazamiento, permitiendo considerar en primera instancia que el índice de daño es mayor. La posición de la cabeza del maniqué sometido a la evaluación con la velocidad del vehículo blindado se encuentra en una posición comprometida. Además, el desplazamiento de los brazos en el maniqué B no es simétrico como consecuencia del uso del cinturón de seguridad de tres puntos y del descenso de velocidad del vehículo modificado estructuralmente. Por lo que, es necesario conocer la desaceleración de la cabeza de ambos maniqués (Figura VI.6) y el  $HIC_{15}$ .



**Figura VI. 6.-** Comparativa aceleración de cabeza en colisión frontal de camioneta original vs blindada

El  $HIC_{15}$  del maniquí en la camioneta sin modificaciones es de 316.9 y del vehículo blindado de 686.7. Existiendo una diferencia de 369.8 entre ellos se permite concluir que en una colisión frontal completa el vehículo blindado nivel III presenta una mayor posibilidad de lesiones graves y/o deceso de 116%.

---

**VI.2.- Trabajos a futuro**

Con el propósito de complementar el trabajo de investigación realizado, se proponen las siguientes actividades.

- Evaluar experimentalmente la colisión completa frontal de la *Ford Explorer 2002* modificada estructuralmente con un nivel III de blindaje.
- Elaborar modelos de escalamiento con vehículos modificados estructuralmente con un mayor nivel de blindaje para conocer el cambio en la respuesta de estos en situación de colisión completa frontal y obtener los índices de lesión.
- Presentar diversos escenarios de colisión (lateral, por alcance, frontal parcial, entre otras).
- Estudio de índice de lesión en pectoral, cuello, entre otros.
- Evaluar numéricamente todos los modelos de maniqués.