



Análisis de las lesiones en la cabeza del piloto para evaluar su seguridad en impactos de vuelco en autos de competición de tipo rally según el ensayo FMVSS 208, por el método computacional explícito no lineal de elementos finitos.

Yaselga Bernal, Richard Stalin

Departamento de ciencias de energía y mecánica

Carrera de ingeniería automotriz

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz

Ing. Cruz Arcos, Guillermo Mauricio

Latacunga, 3 de agosto del 2021



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, "**ANÁLISIS DE LAS LESIONES EN LA CABEZA DEL PILOTO PARA EVALUAR SU SEGURIDAD EN IMPACTOS DE VUELCO EN AUTOS DE COMPETICIÓN DE TIPO RALLY SEGÚN EL ENSAYO FMVSS 208, POR EL MÉTODO COMPUTACIONAL EXPLICITO NO LINEAL DE ELEMENTOS FINITOS.**", fue realizado por el señor **YASELGA BERNAL RICHARD STALIN** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 03 de agosto de 2021



Firmado electrónicamente por:
**GUILLERMO
MAURICIO CRUZ
ARCOS**

.....
ING. CRUZ ARCOS, GUILLERMO MAURICIO

C.C.: 0503010555

Urkund

**Document Information**

Analyzed document	ANÁLISIS DE LAS LESIONES EN LA CABEZA DEL PILOTO_VUELCO.pdf (D110939115)
Submitted	8/2/2021 4:12:00 PM
Submitted by	Cruz Arcos Guillermo Mauricio
Submitter email	gmcruz@espe.edu.ec
Similarity	4%
Analysis address	gmcruz.espe@analysis.urkund.com

**Sources included in the report**



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Autoría de responsabilidad

Yo, **Yaselga Bernal, Richard Stalin**, manifiesto que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "**ANÁLISIS DE LAS LESIONES EN LA CABEZA DEL PILOTO PARA EVALUAR SU SEGURIDAD EN IMPACTOS DE VUELCO EN AUTOS DE COMPETICIÓN DE TIPO RALLY SEGÚN EL ENSAYO FMVSS 208, POR EL MÉTODO COMPUTACIONAL EXPLÍCITO NO LINEAL DE ELEMENTOS FINITOS.**", es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas. Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 03 de agosto de 2021

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser 'Yaselga Bernal Richard Stalin', escrita sobre una línea horizontal.

Yaselga Bernal Richard Stalin

C.C.: 1724184591



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Autorización

Yo, Yaselga Bernal, Richard Stalin, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "**ANÁLISIS DE LAS LESIONES EN LA CABEZA DEL PILOTO PARA EVALUAR SU SEGURIDAD EN IMPACTOS DE VUELCO EN AUTOS DE COMPETICIÓN DE TIPO RALLY SEGÚN EL ENSAYO FMVSS 208, POR EL MÉTODO COMPUTACIONAL EXPLÍCITO NO LINEAL DE ELEMENTOS FINITOS.**", en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 03 de agosto de 2021

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'YASELGA', is written over a horizontal line.

Yaselga Bernal Richard Stalin

C.C.: 1724184591

AGRADECIMIENTO

Agradezco y como costumbre a Dios que siempre me da la salud y vida para poder esforzarme cada día más por mis sueños y metas.

A la universidad de las Fuerzas Armadas Espe-I y la gloriosa carrera de ingeniería automotriz pues me acogieron y brindaron sabiduría, conocimiento, camaradería, buenos y malos momentos que siempre estarán presentes en mi corazón.

Al ingeniero Mauricio Cruz que a pesar de todas sus actividades diarias se dio modos para poder hacer que culmine el proyecto.

A mis padres y hermanos que siempre me brindan su apoyo y me dan sus consejos de experiencias ya vividas.

Y a todas esas personas las cuales quisieron que logre mis objetivos y metas, me dan su apoyo cariño y confianza para poder seguir adelante.

STALIN

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a Dios que siempre ha estado para mí en las buenas y malas, siempre ha puesto en mi camino a personas que me apoyan, ayudan y fortalecen cada día más, me da la salud de poder enfrentarme a mis retos y poder culminar la carrera que siempre anhelé.

Le doy gracias a mis padres Martha Bernal y José Yaselga que siempre han luchado por verme triunfar, siempre me ayudan en mis proyectos que enaltezcan mi personalidad, a mis hermanos que al igual me dan su apoyo y quieren verme con mis metas concluidas y todos ellos me llenan de su cariño y bondad.

Doy un agradecimiento especial a una persona que siempre y en ningún momento de mi vida se ha apartado de mi lado ha estado en mis lágrimas, alegrías y a pesar de lo complicada de la situación y las decisiones malas tomadas nunca se ha alejado y siempre me da consejos a veces buenos, a veces malos, pero siempre los sigo sin importar la índole.

STALIN

Tabla de contenido

Carátula.....	1
Certificación.....	2
Urkund.....	3
Autoría de responsabilidad	4
Autorización.....	5
Agradecimiento	6
Dedicatoria.....	7
Tabla de contenido.....	8
Índice de tablas.....	13
Índice de figuras.....	14
Resumen	18
Abstract.....	19
Generalidades.....	19
Antecedentes	20
Planteamiento del problema	21
Descripción resumida del proyecto	22
Justificación e importancia	24
Objetivos del proyecto.....	27
<i>Objetivo general</i>	27
<i>Objetivos específicos</i>	27

Metas	28
Hipótesis.....	28
Marco teórico.....	29
Tipos de vuelco	29
Diseño automotriz.....	34
Bastidor	35
<i>Tipos de bastidores</i>	35
Sistemas automotrices	39
<i>Motor</i>	40
<i>Embrague</i>	40
<i>Sistema de transmisión</i>	40
<i>Sistema de dirección</i>	40
<i>Sistema de frenos</i>	40
<i>Sistema de enfriamiento</i>	41
<i>Sistema de suspensión</i>	41
<i>Sistema eléctrico y electrónico</i>	41
Dinámica vehicular	42
<i>Modelos de simulación dinámica de vehículos</i>	42
<i>Centro de gravedad</i>	44
<i>Inercia</i>	46
<i>Velocidad, aceleraciones, fuerzas de reacción</i>	46
FMVSS 208.....	53
<i>Generalidades</i>	53
<i>Procedimiento de ensayo</i>	54

Reglamento fia	55
<i>Generalidades</i>	55
<i>Estructuras de seguridad</i>	56
<i>Diseño de estructura</i>	58
Maniquís de pruebas de impacto	61
<i>Tipos de maniquís de pruebas de impacto</i>	61
<i>Percentiles en maniquís</i>	63
<i>Acelerómetros en maniquís en pruebas de impacto</i>	63
<i>Cinturones de seguridad</i>	63
<i>Validación de modelos computacionales de maniquís de impactos</i>	64
<i>Criterios de lesiones en ocupantes</i>	73
<i>Material de estructura de seguridad</i>	75
Introducción al programa computacional CAE.....	76
<i>Principio de elementos finitos utilizando método de análisis</i> <i>estructural explícito dinámico no lineal</i>	76
<i>Cálculo del centro de gravedad</i>	77
<i>Tipos de malla generados</i>	78
<i>Evaluación de calidad de malla</i>	81
Procedimiento de ensayos	83
Modelado CAD	83
<i>Modelado de automóvil</i>	83
<i>Etapas de moldeado</i>	84
<i>Modelado de estructura de seguridad según reglamento FIA</i>	90
Pre procesamiento de modelos FEM y CAE	93

<i>Limpieza y ajustes de modelo CAD</i>	94
<i>Generación uniones y juntas estructurales</i>	94
<i>Generación de malla de elementos finitos</i>	95
<i>Cálculo del centro de gravedad de modelos</i>	100
<i>Cálculo del peso de modelos</i>	101
<i>Velocidad del automóvil</i>	102
<i>Asignación de materiales</i>	103
<i>Asignación de contactos</i>	104
Solución.....	106
<i>Proceso de solución de modelo FEM</i>	106
Análisis de resultados	109
Análisis de resultados	11608
<i>Resultado de índice de lesión de la cabeza HIC 15 en maniquí de pruebas de impacto</i>	109
<i>Esfuerzos y deformación de estructura de seguridad</i>	110
<i>Balance de energías</i>	114
Resultados de estructura de seguridad	116
<i>Análisis de resultados de estructuras de seguridad.</i>	116
<i>Comparación de estructuras de seguridad.</i>	117
Conclusiones y recomendaciones	119
Conclusiones	119
Recomendaciones	120
Bibliografía.....	122

Anexos124

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Valores permitidos en HIC en impactos laterales según requisitos.....</i>	26
Tabla 2 <i>Tipos de vuelcos de vehículos basados en NHTSA 2001.....</i>	30
Tabla 3 <i>Coeficientes de arrastre</i>	50
Tabla 4 <i>Coeficiente de resistencia al rodamiento en kg/ton.....</i>	51
Tabla 5 <i>Configuración mínima de la estructura de seguridad definida.....</i>	60
Tabla 6 <i>Instrumentación de los modelos virtuales Hybrid-III 50% y 95%.....</i>	66
Tabla 7 <i>Comparación de masas entre el modelo virtual y el maniquí Hibrido-III 50%....</i>	68
Tabla 8 <i>Comparación de masas entre el modelo virtual y el maniquí Hybrid-III 95%....</i>	69
Tabla 9 <i>Resultados obtenidos de la simulación de los ensayos de certificación del Hibrid-III 50%.....</i>	71
Tabla 10 <i>Resultados obtenidos de la simulación de los ensayos de certificación del Hibrid-III 95%.....</i>	72
Tabla 11 <i>Escala abreviada de lesiones</i>	74
Tabla 12 <i>Propiedades del acero estructural ASTM A500</i>	75
Tabla 13 <i>Datos del automóvil.....</i>	83
Tabla 14 <i>Unidades del modelo mm ms kg</i>	102
Tabla 15 <i>Propiedades de material.....</i>	103
Tabla 16 <i>Comparación de resultados de estructuras de seguridad</i>	118

Índice de figuras

Figura 1	<i>Árbol de planteamiento de los problemas</i>	21
Figura 2	<i>Modelo de maniquí Híbrido III desarrollado por LST y validado por NHTSA,</i> .	23
Figura 3	<i>Proceso de simulación</i>	23
Figura 4	<i>Ejemplos de vuelco debido a Tropezón Trip over</i>	31
Figura 5	<i>Ejemplos de vuelco debido a un Volteo Flip over</i>	31
Figura 6	<i>Ejemplo de un vuelco debido a una Rotación Turn over</i>	32
Figura 7	<i>Ejemplo de un vuelco debido a Salto Climb over.</i>	32
Figura 8	<i>Ejemplo de una Caída Fall over,</i>	33
Figura 9	<i>Ejemplo de Rebote Bounce over</i>	33
Figura 10	<i>Varios métodos de prueba de laboratorio para simular vuelcos de vehículos</i>	34
Figura 11	<i>Conjunto de carrocería y chasis independiente</i>	36
Figura 12	<i>Bastidor en X</i>	36
Figura 13	<i>Bastidor perimétrico</i>	37
Figura 14	<i>Bastidor de plataforma</i>	38
Figura 15	<i>Carrocería autoportante o monocasco</i>	38
Figura 16	<i>Bastidor tubular</i>	39
Figura 17	<i>Sistemas automotrices</i>	42
Figura 18	<i>Centro de gravedad ideal de un automóvil</i>	45
Figura 19	<i>Centro de gravedad en un vehículo híbrido</i>	45
Figura 20	<i>Convención de signos de los sistemas de referencia ligado al vehículo según la norma SAE J670e e ISO 8855</i>	48
Figura 21	<i>Posición del vehículo en plataforma trineo para el ensayo FMVSS208</i>	

<i>dolly test/ SAE J211</i>	55
Figura 22 <i>Jaulas básicas</i>	57
Figura 23 <i>Características y tipos de estructuras de seguridad</i>	57
Figura 24 <i>Tirantes diagonales</i>	59
Figura 25 <i>Barras en las puertas</i>	59
Figura 26 <i>Refuerzos en el techo</i>	60
Figura 27 <i>Estructuras mínimas</i>	61
Figura 28 <i>Esquema de la metodología para el desarrollo de los modelos FEM de los maniquís</i>	65
Figura 29 <i>Ensayo de flexión del cuello (a) ensayo real (b)Modelo Hybrid III 50% (c) Modelo Hybrid 95%</i>	70
Figura 30 <i>División en elementos finitos</i>	77
Figura 31 <i>Mallas generadas mediante métodos algebraicos</i>	79
Figura 32 <i>Mallas bidimensionales generadas mediante la resolución de EDPs</i>	79
Figura 33 <i>Superposición de retícula y ajuste al contorno</i>	80
Figura 34 <i>Mallas hexaédricas de crecimiento estructurado</i>	80
Figura 35 <i>Triangulación de Delaunay</i>	81
Figura 36 <i>Modelo 3D de auto KIA PICANTO con estructura de seguridad</i>	84
Figura 37 <i>Blue print del modelo a generar</i>	85
Figura 38 <i>Pasos para agregar una imagen</i>	85
Figura 39 <i>Gráficas del modelo a diseñar insertadas con sus respectivas medidas</i>	86
Figura 40 <i>Operación curva para seguir el perfil del modelo</i>	87
Figura 41 <i>Proyección de curvas en 3D</i>	88
Figura 42 <i>Operación rellenar superficie utilizando dos bocetos</i>	88
Figura 43 <i>Operación simetría</i>	89
Figura 44 <i>Operaciones de superficie para dar acabados al vehículo</i>	89

Figura 45	<i>Modelo del auto acabado</i>	90
Figura 46	<i>Operación barrer para generar una estructura tubular</i>	90
Figura 47	<i>Bases para estructura de seguridad</i>	91
Figura 48	<i>Estructura de seguridad básica</i>	91
Figura 49	<i>Propuesta de jaula estructura de seguridad A</i>	92
Figura 50	<i>Propuesta de jaula estructura de seguridad B</i>	93
Figura 51	<i>Uniones y juntas estructurales</i>	94
Figura 52	<i>Selección del tipo de mallado</i>	95
Figura 53	<i>Distancia de mallado</i>	96
Figura 54	<i>Mallado y visión de conjuntos no mallados</i>	96
Figura 55	<i>Reparación de mallado por medio de corte</i>	97
Figura 56	<i>Unión de nodos</i>	98
Figura 57	<i>Arreglo de mallado por medio de Jacobiano</i>	98
Figura 58	<i>Arreglo de mallado en partes extremas</i>	99
Figura 59	<i>Mallado arreglado con Jacobiano</i>	99
Figura 60	<i>Punto exacto del centro de gravedad</i>	100
Figura 61	<i>Asignación de velocidad según normativa NTHSA</i>	103
Figura 62	<i>Asignación de material</i>	104
Figura 63	<i>Asignación de contactos</i>	105
Figura 64	<i>Asignación de esclavo y master a contactos</i>	105
Figura 65	<i>Tiempo de simulación</i>	106
Figura 66	<i>Número de análisis en un determinado tiempo</i>	107
Figura 67	<i>Secuencia de vuelco de vehículo sin sistema de protección</i>	107
Figura 68	<i>Secuencia de vuelco de vehículo con sistema de protección tipo A</i>	107
Figura 69	<i>Secuencia de vuelco de vehículo con sistema de protección tipo B</i>	108
Figura 70	<i>Hic15 vuelco sin sistema de protección</i>	109

Figura 71 <i>Hic15 Vuelco con estructura A</i>	110
Figura 72 <i>Hic15 Vuelco con estructura de seguridad B</i>	110
Figura 73 <i>Esfuerzo de Von Mises de simulación sin estructura de seguridad</i>	111
Figura 74 <i>Colisión de maniquí hybrid III con estructura</i>	111
Figura 75 <i>Esfuerzo de Von Mises de simulación con estructura de seguridad A</i>	112
Figura 76 <i>Separación de maniquí hybrid III con de estructura de seguridad "A"</i>	112
Figura 77 <i>Esfuerzo de Von Mises de simulación Estructura de seguridad B</i>	113
Figura 78 <i>Colisión de estructura de seguridad "B"</i>	113
Figura 79 <i>Balance de energías del modelo sin estructura de seguridad</i>	114
Figura 80 <i>Balance de energías del modelo con jaula A</i>	115
Figura 81 <i>Balance de energías del modelo con jaula B</i>	115

Resumen

La presente investigación, propone analizar de manera ingenieril el criterio de lesiones en la cabeza al momento de un vuelco según el ensayo FMVSS208 con un vehículo liviano de tipo hatchback, kia modelo picanto que se utiliza habitualmente para competiciones en carreras de Rally en el país, se modelará el vehículo tomando en cuenta sus dimensiones y peso para que el análisis sea efectivo, se seleccionará y se modelarán dos diseños distintos de la estructura de seguridad según anexo j artículo 253 que represente condiciones estructurales críticas, para simular a través del software cae tres condiciones de vuelco distintas con y sin estructura de seguridad con esto se pretende comprobar el comportamiento mecánico de las estructuras, se utilizará el maniquí de pruebas de impacto hombre Híbrido III de proporciones ergonómica 95 percentil, el mismo servirá para obtener datos con los que puede evaluar las lesiones del piloto en especial en la cabeza como aceleraciones G, criterio de lesión en la cabeza HIC para un lapso de tiempo de 15 milisegundos, se determinará cuál de las estructuras propuestas es la que tiene más eficiencia, es decir, la que protege la vida del piloto en base del criterio de la Comisión Económica para Europa (CEPE).

Palabras clave:

- **CRITERIO DE LESIÓN EN LA CABEZA**
- **ENSAYO FMVSS208**
- **SOFTWARE CAE**
- **MANIQUÍ HÍBRIDO III**

Abstract

Summary The present research proposes an engineering analysis of the criterion of head injuries at the time of a rollover according to the FMVSS208 test with a light hatchback-type vehicle, a Kia picanto model that is usually used for competitions in Rally races in the country, The vehicle will be modeled taking into account its dimensions and weight so that the analysis is effective, two different designs of the safety structure will be selected and modeled according to annex j article 253 that represent critical structural conditions, to simulate through the software three falls different overturning conditions with and without safety structure with this it is intended to verify the mechanical behavior of the structures, the manikin of impact tests man Hybrid III of 95 percentile ergonomic proportions will be used, it will serve to obtain data with which it can evaluate pilot injuries especially to the head such as G accelerations, injury criterion In the HIC head for a time lapse of 15 milliseconds, it will be determined which of the proposed structures is the one with the most efficiency, that is, the one that protects the life of the pilot based on the criteria of the Economic Commission for Europe (CEPE).

Keywords:

- **HEAD INJURY CRITERIA**
- **FMVSS208 TEST**
- **SOFTWARE CAE**
- **HYBRID MANNEQUIN III**

Capítulo I

1. Generalidades

1.1 Antecedentes

Las competencias automovilísticas de rally han provocado la muerte de muchos ocupantes de vehículos en las últimas dos décadas, la seguridad en los autos de rally ha mejorado significativamente debido a los esfuerzos exitosos para generar nuevos materiales innovadores y resistentes al choque, mejoras de los asientos y diseños de jaulas antivuelco, para el presente proyecto se evaluará la seguridad del piloto en impactos de vuelco producidos en competencias automovilísticas.

La producción de jaulas de protección antivuelco ha estado controlada de una manera formal a partir del 1 de enero de 1997 con la implementación del reglamento para la homologación de estructuras de seguridad según los requisitos del artículo 258 de la federación internacional de automovilismo FIA. En la actualidad las estructuras de seguridad deben cumplir los requisitos indicados en el artículo 258 anexo J. revisado y aprobado por el departamento técnicos de FIA sport, y puesto en vigencia el 14.12.2015. Estos son requisitos técnicos como disposiciones, dimensiones, geometrías, tipos de perfiles estructurales, soldadura y tipos de materiales, pero no requiere ensayo para comprobar la resistencia de las estructuras.

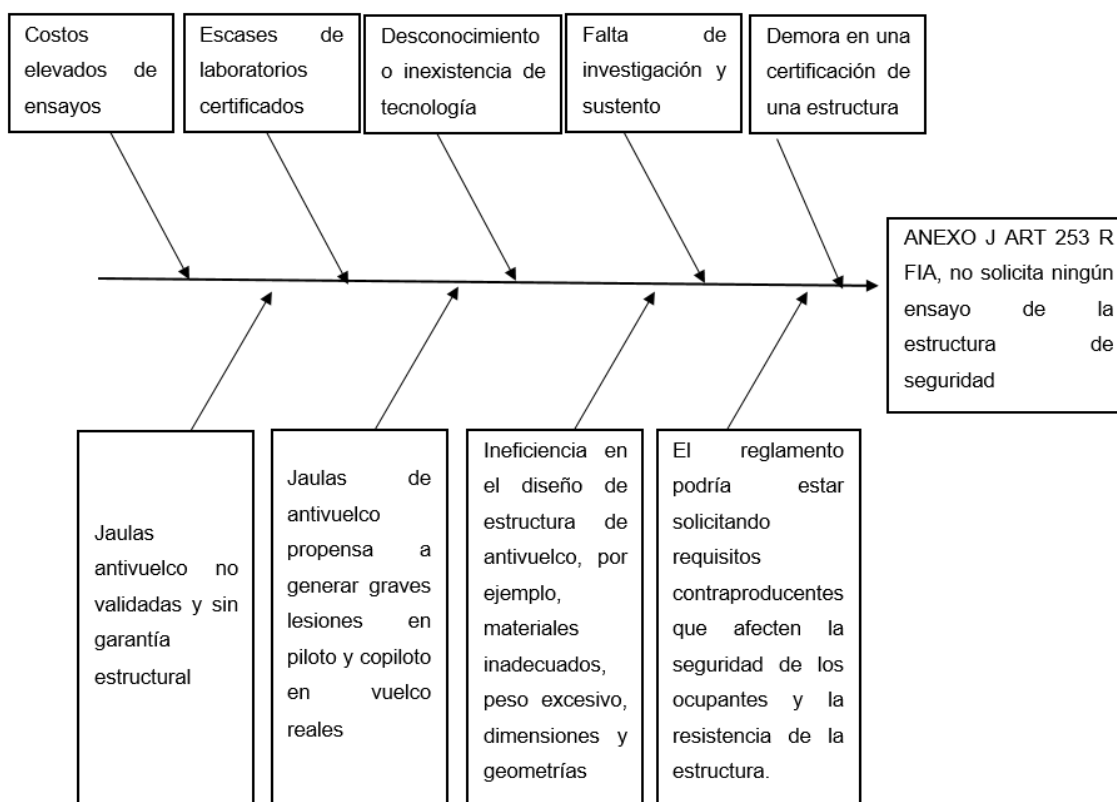
El desarrollo de la tecnología en los últimos años ha contribuido a la implementación de herramientas de ingeniería computacional enfocado a mejorar la seguridad de los ocupantes en impactos en automóviles y biomecánica, permitiendo replicar ensayos reales de colisiones por medio de ordenador con resultados aceptables y validos utilizando métodos numéricos computacionales avanzados, esto ha permitido

ahorrar recursos para verificar la calidad de bastidores y estructuras en la industria automotriz.

1.2 Planteamiento del problema

Figura 1

Árbol de planteamiento de los problemas



En general, los vuelcos son eventos de velocidad relativamente baja, pero son el tipo más peligroso de choque vehicular, como lo demuestra la alta tasa de mortalidad entre los ocupantes involucrados según estadísticas de NTHSA medidas en 2014. Una de las razones de esta alta tasa de mortalidad es que los accidentes por vuelco son violentos, complejos y de naturaleza aleatoria, implicando aceleraciones lineales y angulares multidireccionales, grandes deformaciones del vehículo y contacto directo con el suelo. La alta velocidad y las irregulares de las pistas como baches, montículos,

saltos, curvas cerradas entre otras condiciones produce que los autos de rally sean muy propensos accidentarse de distintas maneras, uno de los impactos más críticos es el de vuelco, por esta razón es necesario que las jaulas de protección sean ensayadas para garantizar la resistencia a este tipo de impactos, antes de que estas sean implementadas en competición. El reglamento para la homologación de estructuras de seguridad de la FIA no indica ningún tipo de ensayo que se debe realizar a los prototipos de estructuras, esto es altamente preocupante porque no se realizan pruebas para ver el verdadero comportamiento estructural de las jaulas de protección y su incidencia en la seguridad del piloto y copiloto del automotor antes de ser certificadas.

1.3 Descripción resumida del proyecto

Para el presente proyecto se plantea modelar un vehículo liviano de tipo hatchback que se utiliza habitualmente para competiciones en carreras de Rally en el país. Con el vehículo se tratará de representar la morfología y geometría del auto para tener un modelo que contenga las propiedades mecánicas como centro de gravedad, peso, momentos de inercia entre otras y que en su gran medida sean similares al real, cumpliendo con condiciones estáticas, dinámicas y de resistencia del vehículo.

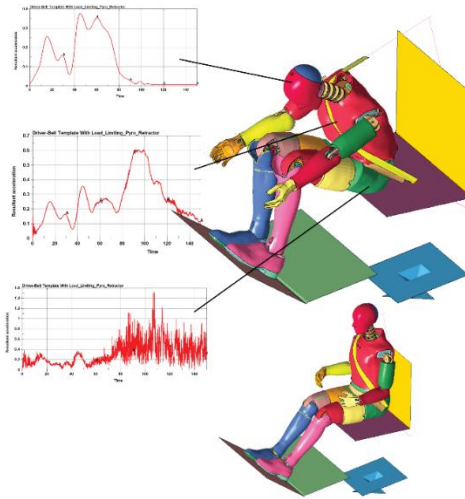
Se seleccionará y se modelarán dos diseños distintos de la estructura de seguridad según ANEXO J ART 253 R FIA (FIA, 2015) que represente condiciones estructurales críticas, para simular tres condiciones de vuelco distintas, comprobar el comportamiento mecánico de las estructuras y ver su influencia en la seguridad del piloto principalmente en el comportamiento de la cabeza.

Para el presente proyecto se utilizará el maniquí de pruebas de impacto hombre Híbrido III de proporciones ergonómica 95 percentil, el mismo servirá para obtener datos con los que puede evaluar las lesiones del piloto en especial en la cabeza como aceleraciones G, criterio de lesión en la cabeza HIC para un lapso de tiempo de 15

milisegundos y fuerzas. Se utilizará el maniquí elaborado y validado por Livermore Software Technology LST.

Figura 2

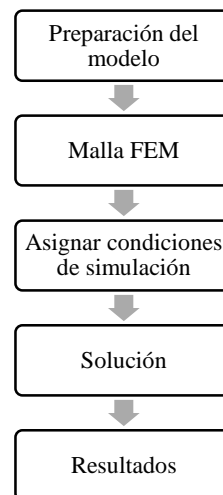
Modelo de maniquí Híbrido III desarrollado por LST y validado por NHTSA,



Con los modelos CAD terminados se inicia el proceso de simulación, este consta de 5 fases principales ver figura 3.

Figura 3

Proceso de simulación



Para empezar los modelos antes de ser discretizados como elementos FEM necesitan ser revisados y reparados, se verifica que no existan duplicados, interferencias o separaciones no deseadas en las geometrías de los modelos como también se examinan caras incorrectas y residuos del modelado. Una vez revisado los modelos se genera la malla de elementos finitos, para este estudio se trabajarán con elementos de tipo shell, solid, beam, discretos, masas, seatbelt, entre otros que cumplan con los criterios de calidad de malla, cabe recalcar que los elementos estructurales del vehículo como bastidor, mecanismos, sistemas y la estructura de seguridad será elementos de tipo Shell 2D trabajando con superficies medias, para el proceso de simulación se utilizará el software LS-PREPOST y ANSA.

Se cumplirán los requisitos para el proceso del ensayo según los reglamentos Federal Motor Vehicle Safety Standard FMVSS 208 dolly test / Society of Automotive Engineers SAE J2114.

Una vez terminado el ensayo se evaluará las lesiones del maniquí de prueba de impacto especialmente en la cabeza por medio del índice de lesión de la cabeza HIC15, también se analizará el comportamiento de la estructura de seguridad verificando parámetros como el esfuerzo máximo, deformación, desplazamiento, localización de zonas críticas.

1.4 Justificación e importancia

Es evidente que el reglamento que controla la construcción de estructuras de seguridad FIA debería solicitar un ensayo para evaluar la resistencia y así poder certificar si dicha estructura es segura o no, algunos factores como costos elevados de pruebas, los escasos laboratorios certificados existentes, desconocimiento de recursos tecnológicos, entre otros han provocado que estos requisitos no se soliciten y que se pida únicamente requisitos empíricos descritos en el reglamento vigente. En este

estudio se plantea realizar ensayos por medio del método científico de elementos finitos utilizando dinámica explícita no lineal utilizada y especializada en impactos automotrices, con esto estamos planteando una alternativa de ensayo computacional que es de bajo costo, fácil acceso y entrega de resultados rápidos, se utilizara el software CAE.

Según lo descrito con anterioridad entre todos los impactos que pueden producirse se seleccionó el impacto de vuelco porque es el más provoca mayor lesiones y muertes en accidentes automovilísticos, debido a que los accidentes por vuelco son violentos, complejos y de naturaleza aleatoria, implican aceleraciones lineales y angulares multidireccionales, una variedad de mecanismos de iniciación, deformaciones complicadas del vehículo y múltiples vehículos a tierra y ocupantes. Indudablemente una de las partes del cuerpo más afectadas y más sensibles en este tipo de impactos es la cabeza, por esta razón el presente estudio se basará en analizar las lesiones producidas en la cabeza.

Para evaluar las lesiones de la cabeza se utilizara el criterio de lesiones de la cabeza HIC que está ampliamente certificado, utilizado y publicado en requisitos de reglamentos de la organización de las naciones unidas ONU (CEPE, 2015) y sus distintas entidades a nivel mundial para la evaluación de lesiones en ocupante en impactos automovilísticos (Paver, 2008).

CRITERIO DE COMPORTAMIENTO DE LA CABEZA (CCC o HIC)

Cuando hay contacto con la cabeza, este criterio de comportamiento se calcula con respecto al lapso total entre el contacto inicial y el último instante del contacto final.

El HIC es el valor máximo de la siguiente fórmula:

$$(t_2 - t_1) \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a \, dt \right)^{2.5}$$

en la que «a» es la aceleración resultante en el centro de gravedad de la cabeza, en metros por segundo, dividida entre 9,81, medida en función del tiempo y filtrada con una clase de frecuencias del canal de 1 000 Hz; «t1» y «t2» son dos momentos cualesquiera entre el contacto inicial y el último instante del contacto final

(CEPE, 2015) “El criterio de comportamiento de la cabeza (CCC o HIC) deberá ser inferior o igual a **1 000**; cuando no haya contacto con la cabeza, el CCC no se medirá ni calculará, sino que se registrará como «sin contacto con la cabeza”

Tabla 1

Valores permitidos en HIC en impactos laterales según requisitos

		Límite inferior	Límite superior	Limite
HIC15	-	500.00	700.00	700.00
				poste
Resultado Acc				80.00
3msec excedidos	G	72.00	80.00	lateral
Resultado pico				80.00
de aceleración	G			poste

Nota: Tomado de: (EURO-NCAP, 2019)

El maniquí de pruebas de impactos HIBRIDO III es uno de los más utilizados en el área de investigación de impactos automotrices por esta razón en este proyecto se utilizará este maniquí (King, 2018).

Debido a que el impacto de vuelco tiene una dinámica muy variable, en el presente proyecto se plantea realizar el impacto según lo descrito en el ensayo FMVSS 208, de esta manera se tendrá condiciones controladas para poder replicar el ensayo

con los mismos requisitos y así evaluar el rendimiento estructural de diferentes jaulas antivuelco para verificar la afectación en las lesiones en el piloto.

1.5 **Objetivos del proyecto**

1.5.1. **Objetivo general**

- Analizar las lesiones en la cabeza del piloto para evaluar su seguridad en impactos de vuelco en autos de competición de tipo rally según el ensayo FMVSS 208, implementando diferentes tipos de jaulas antivuelco que cumplan lo descrito en anexo J – Artículo 253 del reglamento FIA, por el método computacional explícito no lineal de elementos finitos.

1.5.2. **Objetivos específicos**

- Modelar en tres dimensiones un automóvil de tipo Hatchback de marca KIA y modelo Picanto con modificaciones para un vehículo de competición de tipo Rally, utilizando el software CAD, para representar condiciones dinámicas de impacto a la volcadura.
- Simular eventos de vuelco por el método de elementos finitos de tres diseños críticos de estructuras de seguridad seleccionando del anexo j – artículo 253 del reglamento FIA, para verificar el comportamiento biomecánico de lesión en la cabeza del maniquí HIBRIDO III 95%, por medio del criterio HIC 15 ms requerido en CEPE R95.
- Proponer una jaula antivuelco segura resistente a impactos de vuelco según FMVSS 208, por medio de simulaciones computacionales, para publicar un sustento técnico que avale los métodos computacionales como alternativa de certificación de estructuras de seguridad.
- Validar resultados obtenidos del maniquí HIBRIDO III 95% verificando y comparando datos obtenidos en calibración por simulación de impacto de

péndulo de la cabeza del maniquí según el procedimiento en CEPE R94 y R95, por medio ensayos computacionales, para medir el error de los datos obtenidos.

1.6 **Metas**

- Representar un vehículo de manera computacional que tenga condiciones dinámicas similares del vehículo real como el centro de gravedad, peso, inercia.
- Conocer el índice de lesiones en la cabeza producidos en un ensayo computacional de vuelco según FMVSS 208
- Evidenciar el comportamiento de la piloto en un evento de vuelco controlado
- Evidenciar la resistencia de las estructuras de seguridad en eventos de vuelco

1.7 **Hipótesis**

¿Los diseños propuestos y sus requisitos de las estructuras de seguridad expuesto en Anexo J – Artículo 253 Del Reglamento FIA en verdad son lo suficientemente resistentes a eventos de vuelco en condiciones reales como lo indicado en FMVSS 208 para ensayos de volcadura?

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Tipos de vuelco

Aunque los modelos de automóviles más nuevos (modelos 2012 y posteriores) tienen control electrónico de estabilidad (ESC) y son prácticamente imposibles de volcar en terreno llano, todavía hay muchas otras situaciones de manejo que pueden causar un vuelco, por ejemplo, los vehículos de competición. En general, los vuelcos son eventos de velocidad relativamente baja, pero son el tipo más peligroso de choque vehicular, como lo demuestra la alta tasa de mortalidad entre los ocupantes involucrados. En 2014, solo el 2.0% de los accidentes de vehículos resultaron en vuelcos, pero el número de muertos fue de 6839 o 32.5% de todas las muertes de ocupantes (Kahane, 2014). Antes de 2012, el número de ocupantes muertos en accidentes de vuelco era mucho mayor. Por ejemplo, en 2005, 11,519 ocupantes murieron en accidentes de vuelco y 2.6% de los accidentes fueron vuelcos. Una de las razones de esta alta tasa de mortalidad es que los accidentes por vuelco son violentos, complejos y de naturaleza aleatoria, lo que implica aceleraciones lineales y angulares multidireccionales.

Una variedad de mecanismos de iniciación, deformaciones complicadas del vehículo y múltiples contactos de vehículo a tierra y de ocupante a vehículo. Además, antes de la instalación de los airbags de cortina antivuelco, similares a los de impacto lateral, y antes del uso generalizado de los cinturones de seguridad, la eyección a través de una ventana lateral es un modo común de fatalidad y/o lesiones graves.

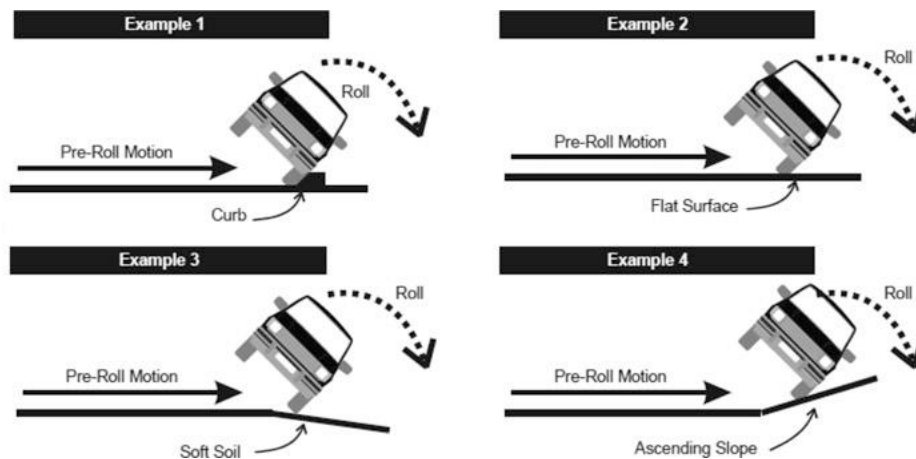
Tabla 2*Tipos de vuelcos de vehículos basados en NHTSA 2001*

	Traducción	Designación en Inglés
1	Tropezón	Trip over
2	Volteo	Flip over
3	Rotación	Turn over
4	Salto	Climb over
5	Caída	Fall over
6	Rebote	Bounce over
7	Colisión con otro vehículo	Collision with another vehicle
8	Fin sobre fin	End over end
9	Otro tipo de iniciación	Other initiation type
10	Desconocido	Unknown

Algunos de estos tipos se describen gráficamente en las Figuras. 4, 5, 6, 7, 8 y 9 que se tomaron de la sección General Vehicle (GV) de la versión 2010 del manual del Sistema Nacional de Muestreo Automotriz (NASS) para registrar datos de accidentes (NHTSA 2010). El sistema de seguridad activa que proporciona estabilidad electrónica es capaz de evitar un giro que se muestra en la figura 7. ESC no puede controlar todos los demás modos de rollover.

Figura 4

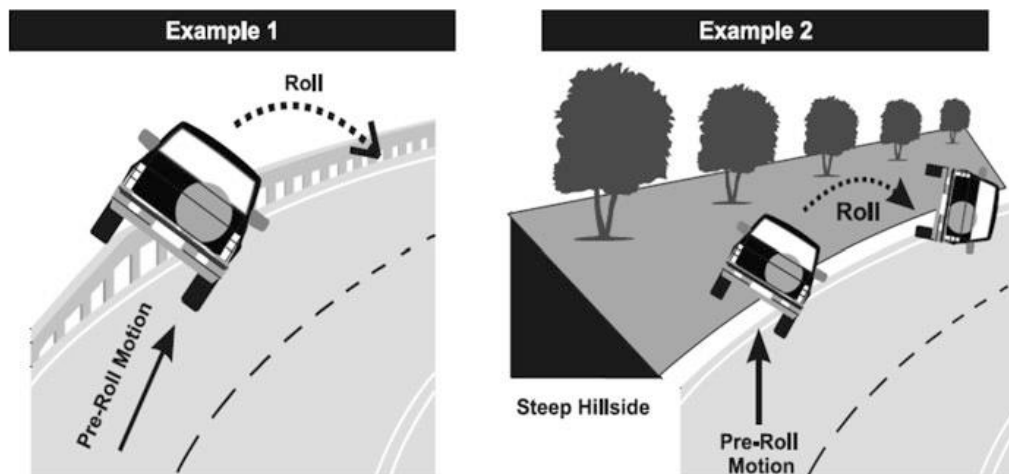
Ejemplos de vuelco debido a Tropezón Trip over



Nota: Tomado de: (NHTSA, 2010)

Figura 5

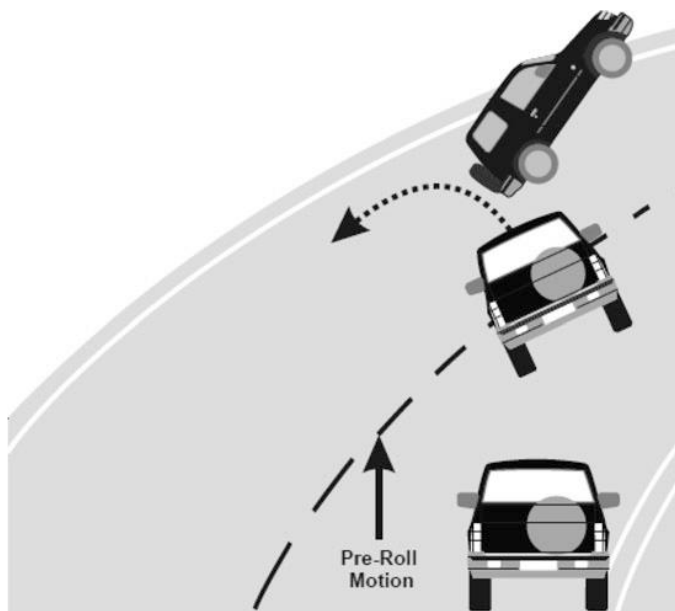
Ejemplos de vuelco debido a un Volteo Flip over



Nota: Tomado de: (NHTSA, 2010)

Figura 6

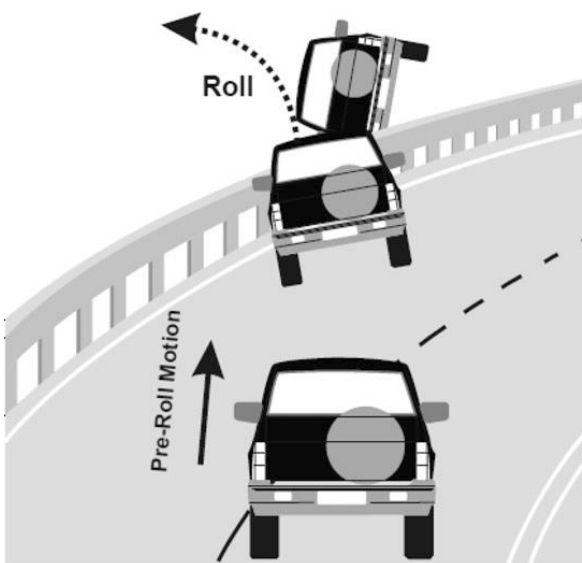
Ejemplo de un vuelco debido a una Rotación Turn over



Nota: Tomado de: (NHTSA, 2010)

Figura 7

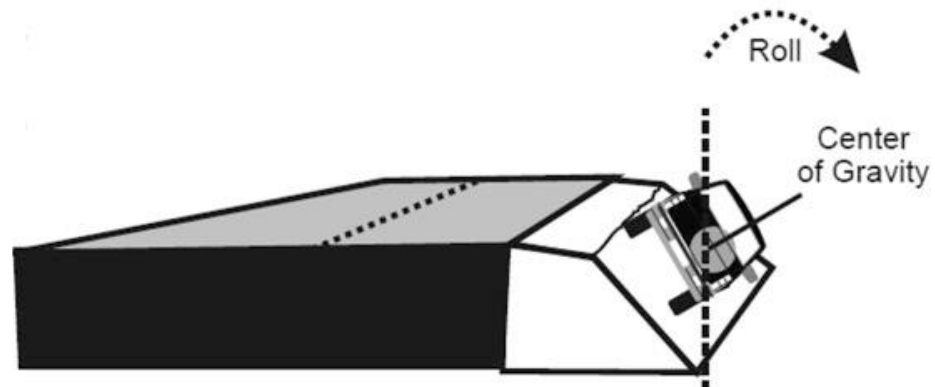
Ejemplo de un vuelco debido a Salto Climb over.



Nota: Tomado de: (NHTSA, 2010)

Figura 8

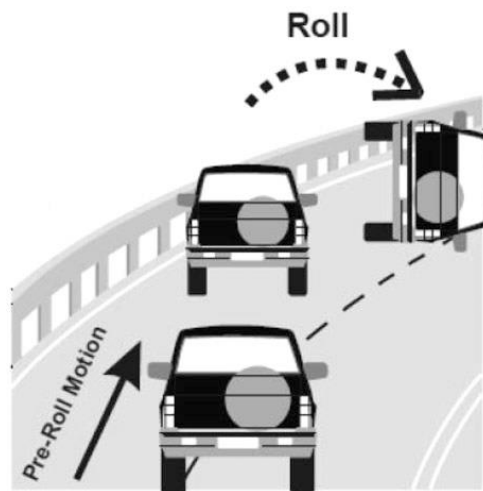
Ejemplo de una Caída Fall over,



Nota: Tomado de: (NHTSA, 2010)

Figura 9

Ejemplo de Rebote Bounce over



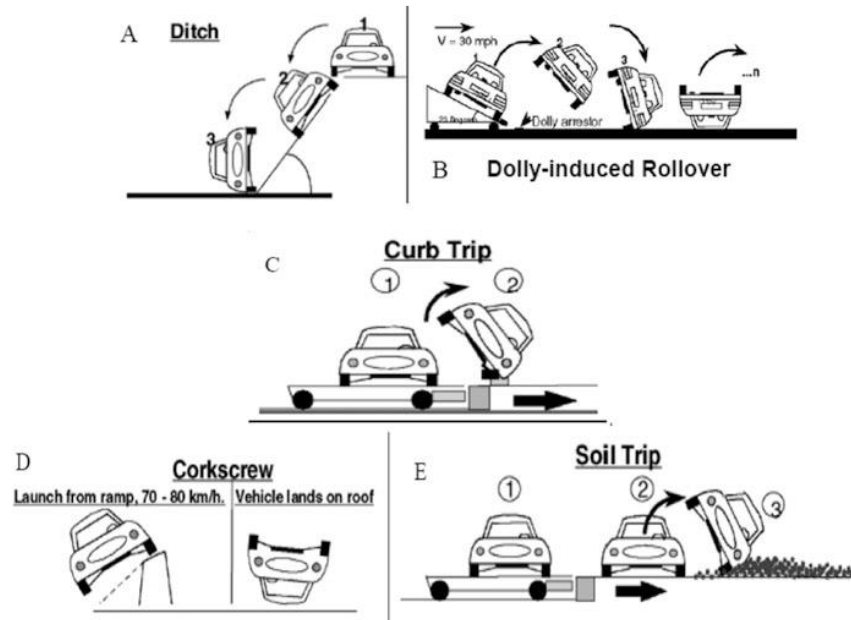
Nota: Tomado de: (NHTSA, 2010)

Hay muchos métodos para simular un rollover experimentalmente. Los métodos populares incluyen darse la vuelta en una zanja (Figura 10A), realizar la prueba de plataforma rodante [SAE J2114](#) mediante el uso de un dispositivo de detención de plataforma (Figura. 10B), usar un trineo para iniciar un viaje por la acera o vereda

(Figura. 10C), lanzar un lado de un vehículo en una rampa para iniciar un vuelco de caída (Figura. 10D) y usar un trineo para iniciar un impacto al suelo (Figura. 10E), según lo descrito por Parenteau et al. (2003)

Figura 10

Varios métodos de prueba de laboratorio para simular vuelcos de vehículos



Nota: Tomado de: (Parenteau et al. (2003)).

2.2 Diseño automotriz

El diseño automotriz es una mezcla de varias disciplinas artísticas en las que se mezcla diseño industrial para lograr el diseño estético y estructural para un futuro modelo de automóvil.

Para poder llegar a un modelo de automóvil que sea adecuado en el cual el diseñador tiene que tener una orientación en el arte, pero sobre todo un agudo sentido en el diseño industrial o de transporte. Existen tres aspectos principales a considerar: diseño exterior, diseño interior y diseño gráfico.

En el diseño exterior el responsable se encarga de desarrollar formas, proporciones y superficies del vehículo, como en cualquier proceso de diseño el diseñador tiene que realizar un boceto en el cual pueda expresar sus ideas, y poder aprobarlas.

Para el diseño de interiores el diseñador tiene que tener énfasis en la ergonomía y comodidad de sus pasajeros. En el diseño gráfico comprende en si todos los aspectos del dibujo, es decir el diseño exterior e interior, aspectos técnicos (carrocería, motor, etc.) y lo referente a logotipos y otros elementos gráficos.

2.3 Bastidor

Un bastidor automotriz es la estructura sumamente rígida donde se monta la carrocería como los distintos tipos de elementos y los componentes mecánicos (motor, sistema de transmisión, sistema de frenos, etc.). El bastidor tiene que soportar cargas a las que se las puede definir como masas suspendidas que se encuentran ligadas a carrocería del vehículo y masas no suspendidas estas se refieren a las ruedas y todos los componentes que son unidos a estas.

2.3.1. Tipos de bastidores

a. Bastidor independiente

Este tipo de diseño de fue uno de los primeros bastidores y está conformado por dos largueros longitudinales laterales, fabricados de chapas laminadas con perfil cajeado tipo "C", en el cual se monta todos los órganos mecánicos y carrocería del vehículo, presenta una gran rigidez, por lo que en los tiempos actuales todavía se encuentran en furgones ligeros, camiones de carga y en vehículos todo terreno.

Figura 11

Conjunto de carrocería y chasis independiente.



Nota: Tomado de: (ingemecanica, s.f.)

b. Bastidor en columna o en x.

Este diseño está definido por su diseño, la cual es en forma de x. Es más angosta por el centro con lo que va entregando al vehículo una estructura dura, la cual permite contrarrestar los puntos de presión elevada.

Figura 12

Bastidor en X



Nota: Tomado de: (ingemecanica, s.f.)

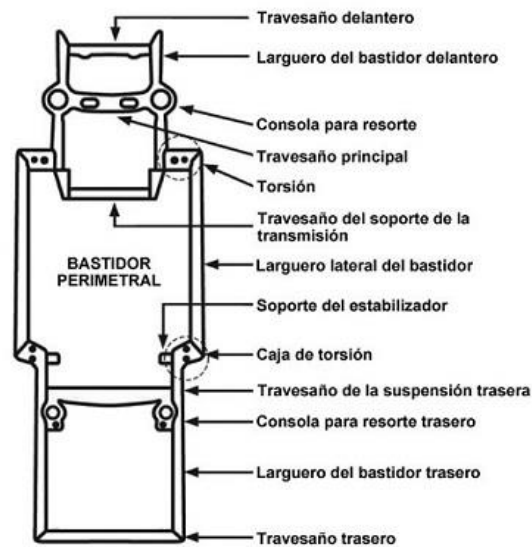
c. Bastidor perimétrico o bastidor perimetral.

Para este tipo de bastidor las extensiones (largueros) propuestos sostienen la carrocería del vehículo en su zona más ancha lo cual proporciona una mayor protección en caso de impacto lateral, es utilizado en ciertos modelos de automóviles y en algunas camionetas.

Este diseño posibilita a realizar una estructura de caja de torsión, para el cual en el caso de un impacto frontal absorbe la energía producida en este, además de ofrecer una gran estabilidad.

Figura 13

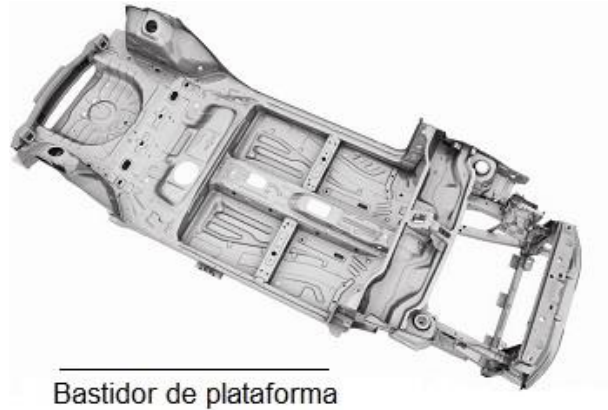
Bastidor perimétrico



Nota: Tomado de: (ingemecanica, s.f.)

d. Bastidor de plataforma

En este diseño el cual cuenta con un chasis que está formado por la unión de varias chapas soldadas, generalmente en soldadura por puntos, que forma un conjunto capaz de soportar las cargas de órganos mecánicos y carrocería.

Figura 14*Bastidor de plataforma*

Nota: Tomado de: (ingemecanica, s.f.)

e. Carrocería autoportante o monocasco

En este tipo de carrocería se encuentra la opción más utilizada actualmente por los automóviles ligeros y de turismo debido a que se obtiene una reducción importante en el peso del vehículo, le dota de mayor flexibilidad y es más barato en la producción en serie.

Figura 15*Carrocería autoportante o monocasco*

Nota: Tomado de: (ingemecanica, s.f.)

f. Bastidor tubular

Este tipo de bastidor es estructura tubular, ovalada o cuadrada en forma perimetral, con esta estructura se puede lograr obtener una ligereza mayor.

Figura 16

Bastidor tubular



Nota: Tomado de: (ingemecanica, s.f.)

2.4 Sistemas automotrices

Los sistemas automotrices son los que componen a un automotor haciendo que su manejo sea más fácil, entre ellos podemos encontrar sistemas principales y secundarios, los sistemas principales son los que son indispensables para un automóvil, es decir, sin estos sistemas no puede funcionar, tales como: el motor, transmisión, dirección, embrague, mientras que los sistemas secundarios facilitan el manejo de un automóvil como el sistema de frenos, suspensión, eléctrico y electrónico, enfriamiento, frenos, cabe recalcar que todos estos sistemas cumplen una función importante en un automotor.

2.4.1. Motor

El motor es la parte más importante del vehículo y es el encargado de convertir la energía química en energía mecánica para poder transmitir las a las ruedas, se puede subdividir en tres partes principales las cuales son cabezote o culata, block, y Carter.

2.4.2. Embrague

Es el encargado de acoplar y desacoplar las revoluciones enviadas del motor hacia la caja de transmisión.

2.4.3. Sistema de transmisión

Este sistema es el que se encarga de multiplicar o desmultiplicar las revoluciones enviadas del motor y transmitir las hacia las ruedas.

2.4.4. Sistema de dirección

Este es el sistema que se encarga de darle una dirección al vehículo dependiendo de las necesidades que requiera el conductor, entre ellos nos podemos encontrar con diferentes tipos como son los hidráulicos, mecánicos, electromecánicos y electrónicos.

2.4.5. Sistema de frenos

Con este sistema podemos reducir la velocidad de un vehículo, mediante el pedal de freno que activa un sistema de cañerías las cuales contiene fluido hidráulico o comúnmente llamados líquido de frenos, los cuales mediante cilindros presionan a unas pastillas de freno que aprisionan a un disco de frenos lo cual hace que la energía mecánica del movimiento se transforme en energía calorífica por medio de la fricción.

2.4.6. Sistema de enfriamiento

Este es un sistema compuesto de conductos que contienen fluidos y estos trabajan para controlar la temperatura del motor con el fin de obtener un desempeño óptimo.

El fluido que circula por los conductos soporta altas temperaturas, se los conoce como refrigerantes, estos son propulsados a través de una bomba la cual es impulsada por una banda, el termostato controla la temperatura del refrigerante, un radiador para enfriar al refrigerante, una tapa de radiador para asegurar la presión dentro del sistema y mangueras para que circule el radiador al motor.

2.4.7. Sistema de suspensión

Este sistema es el encargado de mantener al vehículo en contacto constante con el suelo, de manera que se pueda conseguir un mayor control y seguridad en el vehículo, por otro lado, también absorbe las irregularidades de un terreno de manera que proporciona una mayor comodidad a los ocupantes del vehículo.

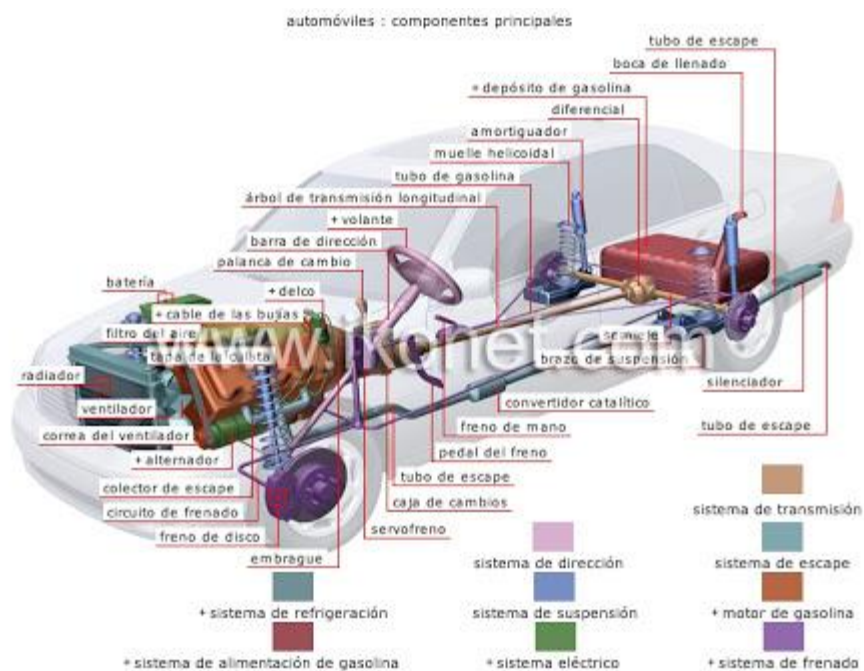
2.4.8. Sistema eléctrico y electrónico

Este sistema es el encargado de controlar todas las funciones eléctricas de un automóvil, mediante un sistema de control denominado UCE (unidad de control electrónico).

En la figura 17 se puede denotar todos los sistemas automotrices que se puede encontrar en un vehículo para que su funcionamiento sea el correcto.

Figura 17

Sistemas automotrices



Nota: Tomado de: (ingemecanica, s.f.)

2.5 Dinámica vehicular

El comportamiento de un vehículo desplazándose en una carretera define las acciones que va a tomar el conductor, debido a reacciones (fuerzas) que se aplican fuera del automóvil, estas son de dos tipos: fuerzas aerodinámicas y fuerzas de adherencia rueda-terreno. En cada una de estas fuerzas se puede distinguir varios componentes, como por ejemplo en la fuerza de adherencia rueda terreno se puede definir la componente longitudinal y la transversal al automóvil.

2.5.1. Modelos de simulación dinámica de vehículos

Durante las últimas décadas se ha optado por la modelización para poder analizar requerimientos de seguridad y estabilidad ya sea tanto en la parte mecánica como en la de los ocupantes de un vehículo, mediante el uso de ecuaciones y módulos

de análisis que se pueden ejecutar con un computador lo que abarata costos extensos que significaban pérdidas enormes en una empresa. Debido a que el modelado de cualquier tipo de sistema elimina una gran variedad de iteraciones en la fabricación y revisión de prototipos.

Es por eso que varias organizaciones y centros de investigación utilizan análisis mediante computador para poder fabricar y ensayar los vehículos como primera etapa de un proyecto, debido a ello se han iniciado desde los años 80 una serie de investigaciones dirigidas al campo de simulación.

Los siguientes tipos fundamentales para el trabajo:

1. Simulación de choques en vehículos.
2. Comportamiento de los ocupantes durante un choque.
3. Simulación del comportamiento dinámico del vehículo.

Nos podemos encontrar con modelos de cálculos que son precisos para este tipo de análisis, que abordan el problema por medio de elementos finitos como por ejemplo tenemos el PAM-CRASH, el LS/DYNA3D y el MSC/DYTRAN estos programas se caracterizan por tener un elevado tiempo computacional para ello requieren ordenadores de gran capacidad.

Se define algunos programas que pueden ayudar para el comportamiento de los ocupantes durante un choque, se pueden citar el ATB/CVS desarrollado por el departamento de defensa y departamento de transporte de EE.UU. y el MADYMO de TNO-Road Vehicles Research Institute. El cual tiene como objetivo principal analizar las velocidades y aceleraciones del cuerpo humano al momento de un impacto con la ayuda del maniquí Hibrid III o TNO10.

Estos modelos de simulación de comportamiento humano han sido aplicados en una gran variedad de simulaciones para fabricantes de vehículos, pues ayuda a diseño de interiores y características de absorción de energía del vehículo, así como también al momento de un impacto ayuda a mejorar los perfiles. Los investigadores de biomecánica se aseguran de hacerlos cercanos a la realidad utilizando técnicas de simulación para mejorar tanto la seguridad activa como la pasiva, o incluso para rediseñar posibles siniestros ya producidos.

Finalmente nos encontramos con programas matemáticos de simulación dinámica que nos ayuda a analizar el comportamiento del vehículo cuando este se encuentra desplazándose, como el CARSIM, el cual permite analizar el comportamiento del vehículo en diferentes etapas ya sea en aceleración, frenado de entrada en curva y salida de curva para vehículos dotados de sistema de suspensión independiente a las 4 ruedas y con suspensiones de eje rígido.

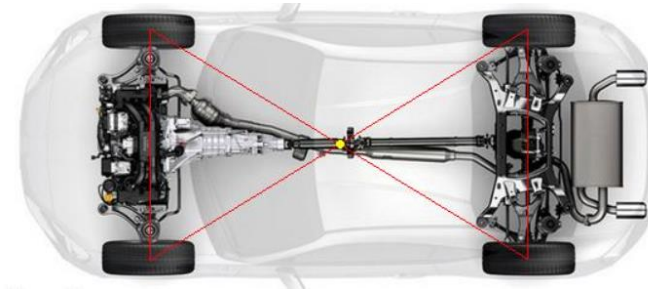
2.5.2. Centro de gravedad

“El centro de gravedad se define como un punto de equilibrio lo que implica encontrar donde la fuerza neta es igual a cero con un momento nulo. Este, no siempre coincide con el centro geométrico del vehículo” (SANCHES, 2014)

El centro de gravedad ideal en un automóvil es en medio de sus cuatro ruedas y lo más pegado al suelo posible lo que ayuda a una mejor estabilidad y control del vehículo debido a que será atraído al centro de la tierra de forma equilibrada.

Figura 18

Centro de gravedad ideal de un automóvil



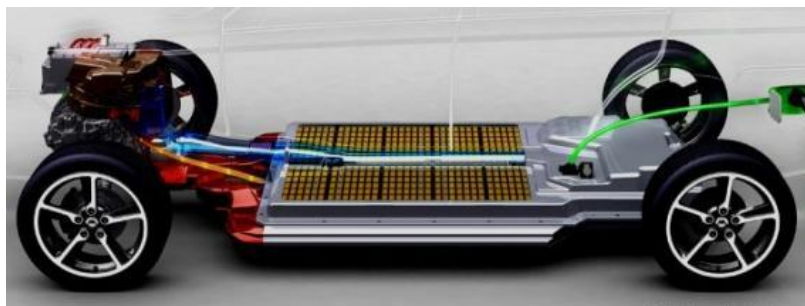
Nota: Tomado de: (MEDINA, 2015)

Lograr un centro de gravedad exactamente en el punto medio es extremadamente difícil lo más cercano en la actualidad de llegar a este punto se lo puede encontrar en los autos eléctricos, pues cuenta con pesadas baterías para que los diseñadores puedan situar el centro de gravedad en el mejor lugar posible.

En la figura 19 se denota en control del centro de gravedad pues la batería es manipulable, es decir, se la puede colocar en cualquier lugar esto dependerá del diseñador ingenieril puesto que un buen centro de gravedad hace que el vehículo sea más estable.

Figura 19

Centro de gravedad en un vehículo híbrido



Nota: Tomado de: (MEDINA, 2015)

2.5.3. **Inercia**

La inercia se la puede definir como el estado en que la materia permanece ya sea en movimiento relativo o reposo relativo, como consecuencia un cuerpo permanece en ese estado hasta que una fuerza que actué sobre él logre cambiar su movimiento o reposo.

2.5.4. **Velocidad, aceleraciones, fuerzas de reacción.**

“La velocidad puede verse como la razón de cambio de los diferentes lugares que ocupa una partícula durante su recorrido hacia un lugar.” (Díaz Solórzano & González Dias, 2010)

Se puede encontrar con varios tipos de velocidades como la velocidad instantánea, la velocidad media y la velocidad promedio.

a. **Velocidad media**

Se obtiene al integrar la aceleración $\vec{a}(t)$ adquirida por una partícula en los primeros t segundos, más la velocidad que posee esta inicialmente.

$$\vec{v}(t) = \vec{v}_0 + \int_0^t \vec{a}(t') dt'$$

b. **Velocidad instantánea**

Se obtiene al tomar el valor medio de la velocidad instantánea durante el intervalo de tiempo I , cuya duración es $\Delta t = t_2 - t_1$,

$$\langle \vec{v}(t) \rangle_I = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} \vec{v}(t) dt$$

c. Velocidad promedio

Se obtiene de la suma entre la velocidad inicial de la partícula y un medio de la integración sobre la aceleración $\vec{a}(t)$ que adquiere dicha partícula durante los primeros t segundos

$$\overrightarrow{v_{prom}}(t) = \overrightarrow{v_0} + \frac{1}{2} \int_0^t \vec{a}(t') dt'$$

d. Aceleración

La aceleración es una magnitud el cual indica la variación de velocidad en un tiempo determinado.

La aceleración y desaceleración asociadas a los cambios de velocidad (maniobras de parar, arrancar, frenar y acelerar), bajo condiciones de conducción normal, son esenciales para la estimación de los análisis de costos de operación, consumo de combustible y emisiones de gases contaminantes, así como, también para los análisis de consistencia del diseño de los caminos. (García Ramirez , 2014)

e. Fuerzas que intervienen en el desplazamiento de un vehículo

Para hablar de fuerzas de reacción que están en el vehículo primero se tendrá que enfocar en un sistema de referencia para el cual tiene su origen en aplicaciones aeronáuticas, pues la principal razón es que es fijo al mismo, es decir, se desplaza con él. Las propiedades inerciales que podemos encontrar (momentos y productos de inercia) tienen que permanecer constantes con relación al sistema de referencia del vehículo, pero estas serían variables si se analiza con respecto al sistema de referencia de la tierra.

Los ejes coordenados en el sistema de referencia vinculado al automóvil serán ortogonales, es decir, a 90° uno respecto a otros y se los denota con las letras

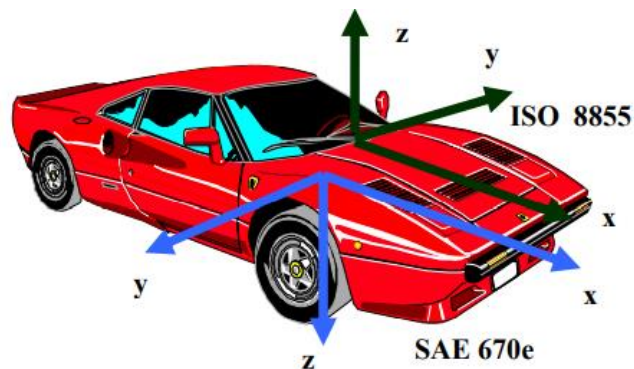
minúsculas xyz, aquí se pueden encontrar dos posibles orientaciones las que nos brinda la normativa SAE J670e y la norma ISO 8855.

Para la norma SAE J670e se encuentra que este sistema brinda un eje x positivo a la dirección del automóvil (mirando hacia adelante) mientras que el positivo del eje y es mirando hacia la derecha, el eje z es perpendicular al plano de los ejes xy, con una dirección mirando abajo.

En la norma ISO 8855 se tiene un eje x positivo mirando hacia delante, un eje y mirando hacia la izquierda y un eje z el cual tiene la dirección para arriba perpendicular al plano formado por los ejes xy.

Figura 20

Convención de signos de los sistemas de referencia ligado al vehículo según la norma SAE J670e e ISO 8855



Nota: Tomado de: (Font Mezquita & Dols Ruiz, 2006)

Una vez definido el sistema de referencia se puede enfocar en las fuerzas que se oponen al movimiento del vehículo y que el motor debe vencer las cuales son:

- Fuerza aerodinámica.
- Fuerza de resistencia al rodamiento.

- Fuerza por pendiente.
- Fuerza de inercia.

I. Fuerza aerodinámica

El movimiento del vehículo a través del aire se ve afectado por la fuerza aerodinámica este tiene un impacto enorme en terreno plano y esta se divide en dos:

- Fuerza de sustentación, se encuentra verticalmente hacia arriba.
- Fuerza de arrastre, se opone al movimiento del vehículo horizontalmente.

La primera fuerza la de sustentación es la que permite que una aeronave pueda suspenderse en el aire y a despegar, por eso con los autos de carreras el alerón les permite quedarse en el suelo a altas velocidades.

La segunda fuerza la de arrastre opone una resistencia al movimiento del vehículo y se la pueda calcular mediante la siguiente formula.

$$F_1 = 0.5C_W R_0 S v^2$$

Donde:

F_1 Fuerza de arrastre aerodinámica

C_W Coeficiente de arrastre (Tabla 3)

R_0 Densidad del aire aproximadamente 1.2 kg/m³

S Área frontal del vehículo

v Velocidad del vehículo

Tabla 3*Coefficientes de arrastre*

Vehículo	C_w
Madrinas, jaulas y bultos	0.95
Remolque doble, triple y plataformas	0.85
Vehículo normal	0.76
Con algunos aditamentos para desviar el aire	0.68
Con todos los aditamentos para desviar el aire	0.61

Nota: Tomado de: (RAFAEL MORALES & HERNÁNDES GUZMÁN, 2012)

II. Fuerza de rodamiento

La fricción que provoca el contacto de las ruedas con el piso produce una resistencia y esta varía dependiendo la deformación de la rueda, se la puede calcular de la siguiente manera:

$$F_2 = K * W \cos \alpha$$

Donde

F_2 Fuerza de rodamiento

K Coeficiente de resistencia al rodamiento (Tabla 4)

W Peso del vehículo

α Ángulo entre la pendiente y el plano horizontal

Tabla 4

Coefficiente de resistencia al rodamiento en kg/ton

Superficie	Condición	K
	Excelente	0.0100
Concreto	Bueno	0.0150
	Malo	0.0200
Asfalto	Bueno	0.0125
	Regular	0.0175
	Malo	0.0225
Macadam	Bueno	0.0150
	Regular	0.0225
Grava	Pobre	0.375
	Ordinaria	0.0550
	Pobre	0.0375
Barro	Suave	0.0250
	Arenoso	0.0375
Arena a nivel o pendiente	Suave	0.0600-0.150
	Duna	0.1600-0.300

Nota: Tomado de: (Fitch, 2007)

III. Fuerza por pendiente

Esta fuerza se aplica de acuerdo a la gravedad de la tierra cuando sube una pendiente, se la puede calcular con la siguiente formula.

$$F_3 = W \text{sen } \alpha$$

F_3 Fuerza por pendiente

W peso del vehículo

α ángulo entre la pendiente y el plano horizontal (si el ángulo es 0 la fuerza será nula)

IV. Fuerza de inercia

Esta fuerza se aplica para cambiar el estado en el que se encuentra el vehículo, y depende de la masa del vehículo se la puede calcular de la siguiente manera:

$$F_4 = ma\left(1.04 + \frac{0.06}{r_t^2}\right)$$

Donde

F_4 Fuerza de inercia

m Masa de vehículo

a Aceleración del vehículo

r_t Relación del paso de la transmisión.

Cabe recalcar que esta fuerza es importante en el ciclo urbano pues genera un alto consumo de combustible.

Para el caso de frenadas repentinas se tiene que la energía producida absorbe las balatas de los frenos y las llantas produciendo un mayor desgaste.

La inclinación hacia adelante provoca que el ángulo de dirección cambie con lo que se produce una pérdida de control del vehículo.

V. *Fuerza centrífuga*

“Un cuerpo que tiene movimiento curvilíneo, está sometido a una fuerza centrífuga que tiende a sacarlo de su trayectoria.” (RAFAEL MORALES & HERNÁNDES GUZMÁN, 2012)

La fuerza centrífuga se la puede calcular de la siguiente manera:

$$F_c = \frac{mv^2}{R}$$

Donde

F_c Fuerza centrípeta

m Masa del vehículo

v Velocidad

R Radio de la curva

Cabe recalcar que cuando el radio de una curva es demasiado cerrado puede provocar una volcadura.

2.6 **FMVSS 208**

El FMVSS 208 (Federal Motor Vehicle Safety Standard) realiza pruebas de ensayo para poder analizar la seguridad de los ocupantes de un vehículo al momento de una colisión, el informe revisa posibles procedimientos de prueba para poder evaluar la resistencia a los choques de un vehículo de pasajeros.

2.6.1. **Generalidades**

El diseño estructural para la resistencia de los choques busca mitigar los efectos adversos en una colisión: -La degradación del habitáculo de un automóvil que se mide por intrusión, y -la gravedad desaceleración se mide la amplitud y tiempo, ambos

efectos tienen potencial de producir lesiones, en primer lugar, debido a que aumenta la probabilidad de que los ocupantes tengan contacto con agentes intrusos del vehículo y segundo debido al potencial de lesiones internas a los ocupantes.

En un choque severo, a menudo la velocidad del vehículo disminuye a 0 en cien milésimas de segundo, por lo tanto, para disminuir lesiones de ocupantes es importante no tener un cambio abrupto de velocidad, pues las fuerzas del choque serán menores en el ocupante, el frente extremo de los vehículos está diseñados de tal forma que al momento de una colisión se deformen controladamente esto da a sus ocupantes el tiempo adicional necesario para su desaceleración.

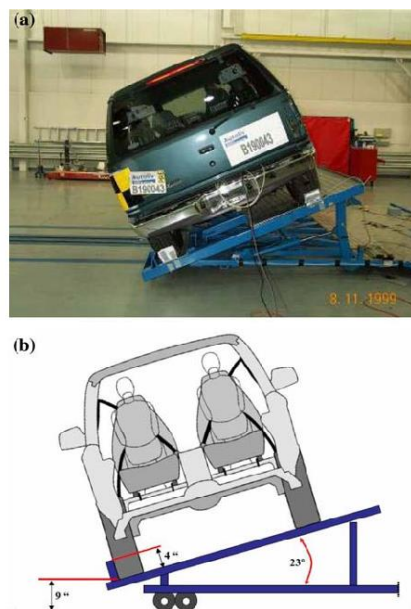
2.6.2. Procedimiento de ensayo

El ensayo consiste montar a un vehículo en una plataforma trineo que estará inclinada 23 grados ver figura 21, la plataforma consta de una ceja lateral de 4 pulgadas que soporta el vehículo, el automotor deberá estar a una altura desde el piso de 9 pulgadas medidos desde piso a la llanta base más próxima al suelo. El automóvil ubicado en la plataforma-trineo acelerara desde el reposo hasta tener una velocidad constante de 30 mph, alcanzando esta velocidad constante el trineo se detendrá inmediatamente expulsando el vehículo de la plataforma, el vehículo experimentará uno o varios impactos de vuelco el mismo puede girar algunas veces, el ensayo terminara cuando el vehículo se haya tenido por completo, el automóvil contendrá el maniquí de pruebas de impacto el mismo proporcionara los datos para evaluar las lesiones producidas en el ensayo.

En este ensayo también se define la distancia y el tiempo en el que sucede el primer impacto de la carrocería con el piso, puesto que puede suceder en esta el punto máximo del HIC15.

Figura 21

Posición del vehículo en plataforma trineo para el ensayo FMVSS 208 dolly test/ SAE J211.



2.7 REGLAMENTO FIA

El reglamento FIA se rige para competencias automovilísticas en este caso nos referiremos a una en particular para la seguridad del automóvil la cual es el ANEXO J – ARTICULO 253 en la que se menciona:

2.7.1. Generalidades

La estructura de seguridad es obligatoria puede estar de acuerdo a lo siguiente

- a. Homologada y certificada por una ADN de acuerdo a los reglamentos de homologación de estructuras de seguridad que deberá ser revisada por los comisarios de seguridad, es decir, se presentara una copia original del documento o un certificado del ADN firmado por técnicos calificados que representan al fabricante.

Toda estructura de seguridad certificada por la ADN vendida a partir del 01/01/2003, deberá estar identificada individualmente (soldada, troquelada o un adhesivo auto destructible). La placa debe contener el nombre del constructor, número de homologación de la ADN y el número de serie único, debe llevarse a bordo un certificado que muestra los mismos números identificativos y presentarse a los comisarios técnicos de la competición.

b. Homologada por la FIA de acuerdo a los reglamentos de homologación de estructuras de seguridad, las cuales especifican que en el interior del habitáculo está prohibido llevar los siguientes elementos entre los miembros laterales de la carrocería y estructura de seguridad:

- Cables eléctricos
- Conductos que lleven fluidos excepto el del limpiaparabrisas
- Conductos del sistema del sistema de extinción

Los elementos de estructura pueden ocupar espacio de los ocupantes atravesando el salpicadero y los revestimientos delanteros, así como el asiento y revestimientos traseros (FIA, 2015)

2.7.2. Estructuras de seguridad

Las estructuras de seguridad definen el nivel de supervivencia del piloto con la ayuda de estas se puede asegurar que la persona sobreviva a un impacto ya sea lateral, frontal o un vuelco.

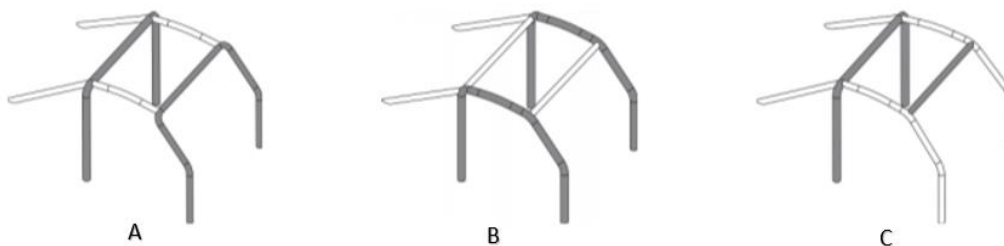
Estructura básica

En las figuras se muestra: figura 22.A: arco principal + 1 arco delantero + 2 miembros longitudinales + 2 tirantes traseros + 6 pies de anclaje; figura 22.B: 2 arcos laterales + 2 miembros transversales + 2 tirantes traseros + 6 pies de anclaje y figura

22.C: 1 arco principal + 2 semiarcos laterales + 1 miembro transversal + 2 tirantes traseros + 6 pies de anclaje. (FIA, 2015)

Figura 22

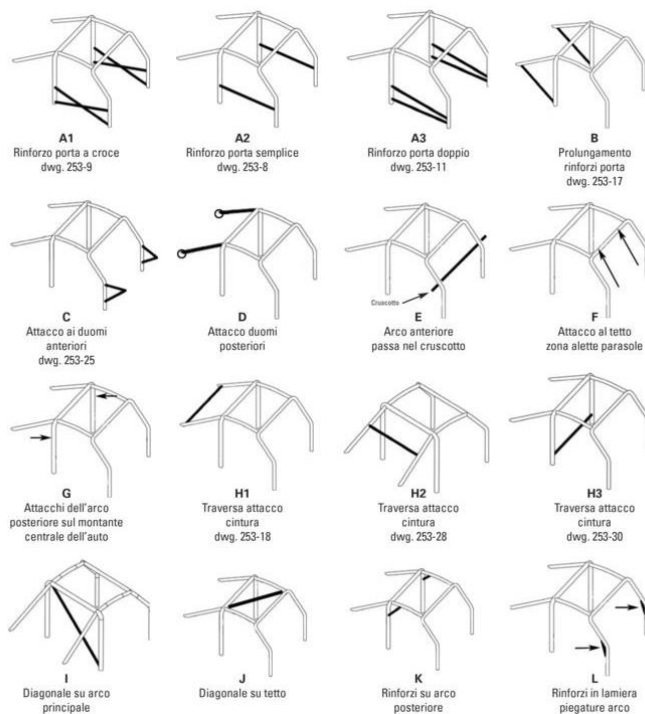
Jaulas básicas



Nota: Tomado de: (falp.com, 2015)

Figura 23

Características y tipos de estructuras de seguridad.



En la figura 23 se presenta los diferentes tipos de estructuras de seguridad que se pueden añadir a la estructura de seguridad básica.

2.7.3. **Diseño de estructura**

Una vez que se tenga la estructura básica se procede a completar con miembros y refuerzos obligatorios, a los cuales se puede añadir refuerzos opcionales.

Salvo que se encuentre permitido que usen uniones desmontables, todos los elementos y refuerzos tubulares deben ser de una sola pieza.

a. Tirantes y refuerzos obligatorios

Según menciona el anexo tenemos diferentes refuerzos obligatorios para que una estructura de seguridad sea homologada y certificada, a continuación se procede a mencionar dichos elementos tomados de (FIA, 2015)

- **Tirante diagonal**

Se trata de una estructura tubular que esta anexada al arco principal a continuación se presenta figuras de las cuales nos especifica el anexo.

Vehículos homologados antes del 01/01/2002

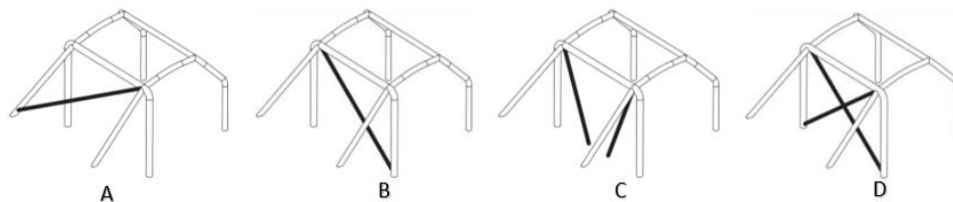
Esta estructura debe incorporar tirantes diagonales definidos por los dibujos de la figura 24.A, 24.B, 24.C. La orientación de la diagonal puede invertirse.

Vehículos homologados desde del 01/01/2002

Esta estructura debe tener dos miembros diagonales en el arco principal de acuerdo al dibujo de la figura 24.D.

Figura 24

Tirantes diagonales



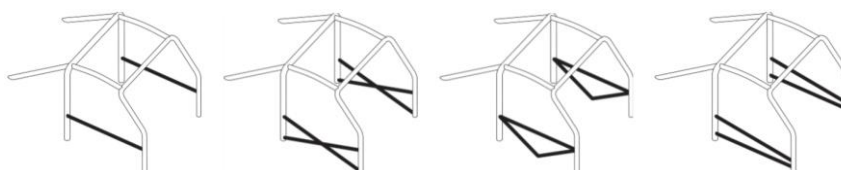
Nota: Tomado de: (*falp.com, 2015*)

- **Barras de puertas**

Se deberán montar uno o más miembros longitudinales a cada lado del vehículo de acuerdo a los dibujos de la figura 25.

Figura 25

Barras en las puertas



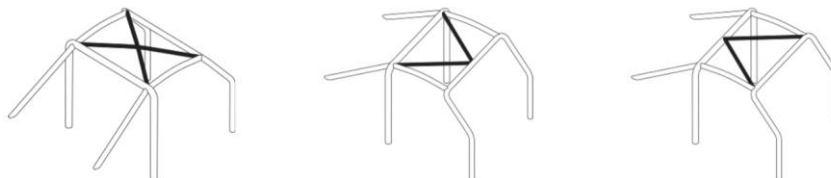
Nota: Tomado de: (*falp.com, 2015*)

- **Elementos de refuerzo de techo**

La parte superior debe cumplir con los dibujos de la figura 26, únicamente para vehículos homologados desde 01-01-2015.

Figura 26

Refuerzos en el techo



Nota: Tomado de: (falp.com, 2015)

- **Configuración mínima de la estructura de seguridad**

En la tabla 5 se menciona las figuras de las estructuras de seguridad mínimas que deben ir en un vehículo de competencia con y sin copiloto y de acuerdo a las homologaciones de los vehículos.

Tabla 5

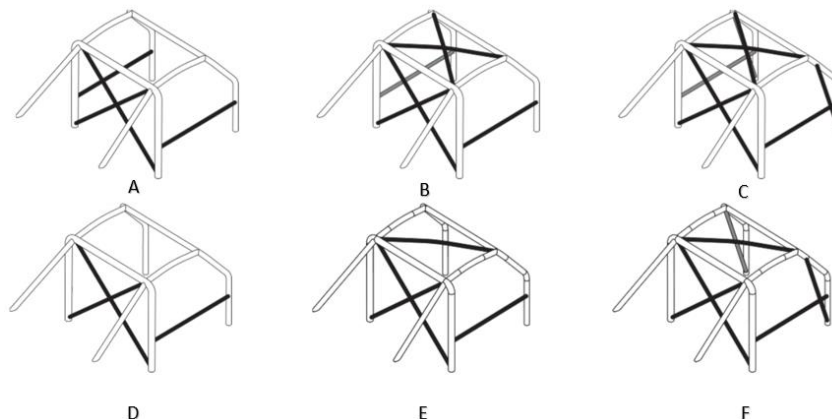
Configuración mínima de la estructura de seguridad definida.

Vehículos homologados	Con piloto	Sin piloto
Entre 01/01/2002 y 31/12/2004	Figura 27. A	Figura 27. D
Entre 01/01/2005 y 31/12/2005	Figura 27. B	Figura 27. E
A partir del 2006	Figura 27. C	Figura 27. F

En la figura 27 se puede apreciar lo mencionado en la tabla 5 de estas figuras el diseñador de las estructuras de seguridad se tiene que percatar cual es la más eficiente para que el conductor no tienda a sufrir ningún tipo de lesión grave.

Figura 27

Estructuras mínimas



Nota: Tomado de: (*falp.com*, 2015)

2.8 Maniqués de pruebas de impacto

Los maniqués de pruebas de impacto son ahora utilizados para realizar comprobaciones de estructuras de seguridad, anteriormente se realizaba con cuerpos humanos muertos, pero con el avance del tiempo se ha ido mejorando estos maniqués tanto así que ahora los podemos tener simulados computacionalmente.

2.8.1. Tipos de maniqués de pruebas de impacto

HIBRID III es el maniquí más utilizado en la industria automotriz para evaluar los sistemas de sujeción de seguridad en pruebas de choque frontales. Su diseño fue generado originalmente por general motors. Hoy en día el maniquí Hibrid III 50% se sigue utilizando y desarrollando más a profundidad por Humanetics en conjunto con los comités de biomecánica de la sociedad de ingenieros automotrices (SAE) y la administración nacional de seguridad y transporte en carreteras (NHTSA)

BioRID es un maniquí el cual se lo realizó con fines de probar impactos traseros, teniendo como objetivo principal investigar el latigazo cervical y ayudar a los

diseñadores a desarrollar sistemas de retención efectivos para cabeza y cuello, este maniquí es más sofisticado que el híbrido pues cuenta con 24 vertebras simuladas, lo que permite la postura sentada y reproducir el movimiento de cuello en colisiones desde la parte posterior.

CRABI es un maniquí que representa a niños de 18, 12 y 6 meses, el cual se usa para analizar la efectividad de los sistemas de retención infantiles (sillas infantiles y airbags).

THOR pertenece a una familia de maniqués más avanzados que representa un hombre percentil 50%. Este es el sucesor de Híbrido III pues posee una pelvis y una columna más biofiel que su antecesor, su cara posee algunos sensores adicionales para analizar los impactos en la cara. La gama de sensores del Thor es sustancialmente mayor que el híbrido III

a. Datos técnicos del maniquí HIBRIDO III (peso, dimensiones, etc.)

El dummy masculino percentil 50 Hybrid III, el cual nació en 1976 y está catalogado en una familia Hybrid presenta estas características. Su altura es de 168 cm y su masa es de 77 kg. Este maniquí ocupa el asiento del conductor en todos los ensayos de colisiones frontales que se realizan en el Instituto para Seguridad en las Autopistas. Lo acompaña su "hermano mayor", el Hybrid III percentil 95, que mide 188 cm y posee una masa de 100 kg. La señora Hybrid III es un dummy femenino percentil 5, con una pequeña talla de 152 cm y 50 kg. Los dos niños dummies Hybrid III representan a un niño pequeño de seis años de edad de 21 kg y a otro de tres años de edad de 15 kg. Estos modelos de niños son la incorporación más reciente a la familia de dummies y su diseño se basa en estimaciones y aproximaciones, y vienen a cubrir el vacío de información existente sobre los efectos de choques en los niños.

2.8.2. **Percentiles en maniquís**

Con el Hybrid –III se puede encontrar entre 50% y 95% lo que quiere decir que se ha realizado un promedio entre el 50 y 95% de toda la población varonil y se obtuvo los resultados que se muestran reflejados en el maniquí.

2.8.3. **Acelerómetros en maniquís en pruebas de impacto**

Se denomina acelerómetro a cualquier instrumento que pueda medir aceleración asociada al fenómeno de peso experimentado por una masa. El más sencillo es un mecánico y se construye uniendo una masa a un dinamómetro el cual está en la misma dirección de la aceleración a medir, su efectividad es muy determinante puesto que se realiza ensayos antes y después de cualquier simulación.

Los acelerómetros en maniquís son una variante de acelerómetros los cuales están diseñados específicamente para pruebas de impacto, principalmente en el mundo del automóvil, pueden ir colocados en cualquier parte del maniquí incluso en el vehículo en la parte frontal, lateral, etc. Dependerá el ensayo que se requiera analizar.

2.8.4. **Cinturones de seguridad**

Al hablar de cinturones de seguridad se obtiene dos tipos de seguridad, una es la seguridad activa y la otra es seguridad pasiva, en cortas definiciones la seguridad activa es la que provee al automóvil estabilidad y confiabilidad, es decir, siempre se encuentra en funcionamiento (neumáticos, suspensión, frenos, etc), mientras que la seguridad pasiva solo tendría validez al momento de un impacto (cinturones de seguridad, airbag, etc)

El cinturón de seguridad es considerado como el sistema de seguridad pasiva más efectivo jamás inventado teniendo como objetivo principal disminuir las heridas en una colisión, impidiendo que los ocupantes del vehículo se golpeen con elementos

duros que se encuentren en el interior en el mercado se puede encontrar con algunos cinturones de seguridad:

- **Cinturón de dos puntos:** Es un cinturón el cual pasa solo por las caderas del pasajero, usualmente se lo encuentra en buses y aviones.
- **Cinturón de tres puntos:** Es el que va montado en la mayoría de automóviles cuenta con una correa que sujeta la cadera y el tórax del pasajero.
- **Cinturón de cuatro puntos:** Usualmente este tipo se encuentra en los arneses, es parecido al de 5 puntos con la diferencia que no cuenta con sujeción en las piernas.
- **Cinturón de cinco puntos:** Este tipo de cinturón es más avanzado suelen ocuparse en asientos para bebés y en vehículos de competición, cuenta con dos cinturones por sobre ambos hombros y uno que va entre las piernas.

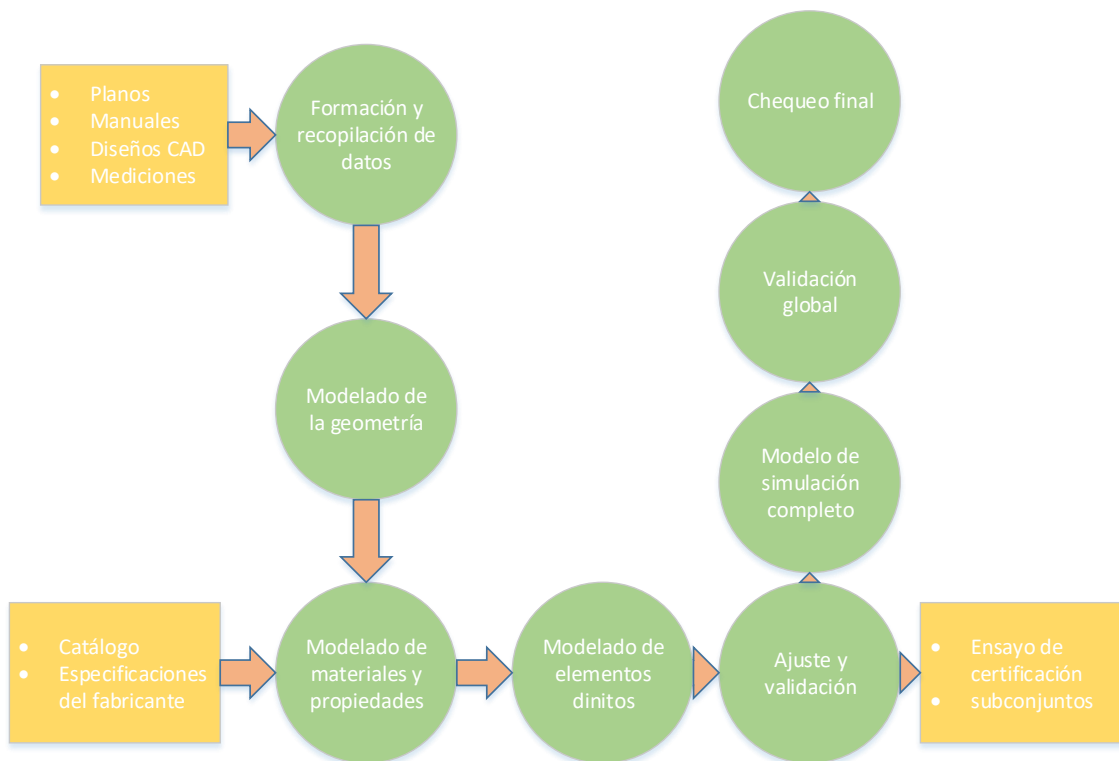
2.8.5. Validación de modelos computacionales de maniquís de impactos.

Antes de validar los modelos computacionales es necesario conocer el proceso, por el cual tiene que someterse cada prototipo, con esto se minimizan costos en la producción, pues mediante un análisis antes realizado se puede llegar a concluir si el prototipo va hacer viable, y si los resultados arrojasen datos poco favorables se detiene la producción del prototipo para lo cual se detalla este tipo de proceso mediante el siguiente diagrama expresado en la figura 28.

Este proceso se debe seguir rigurosamente pues asegura que un análisis sea fiable y viable antes de realizar una inversión fuerte en un prototipo, los diseñadores siguen este mismo proceso para todos los prototipos que ellos creen que son viables.

Figura 28

Esquema de la metodología para el desarrollo de los modelos FEM de los maniqués



A parte de modelar todos los componentes y uniones en los maniqués se opta por incorporar toda la instrumentación que pueden llevar los maniqués (en la práctica, es decir, en los maniqués se opta por colocar menor número de sensores), en la tabla 6 se presenta toda la instrumentación modelada e incorporada en los modelos virtuales de maniqués, que principalmente está formada por acelerómetros medidores de distancia y células de carga que se encuentran en las partes más importantes del cuerpo de los maniqués.

Tabla 6

Instrumentación de los modelos virtuales Hybrid-III 50% y 95%

Parte	Instrumentación	Dirección	Modelado
Cabeza	Acelerómetro triaxial en cdg	Ax, Ay, Az	Acelerómetro
Cuello	Célula de carga	Fx, Fy, Fz Mx, My, Mz	Muelle
Cabeza- Torso	Transductor angular	θ_y	Malla
Tórax	Acelerómetro triaxial en cdg potenciómetro	Ax, Ay, Az Dx	Acelerómetro
Fémur Derecho	Célula de carga	Fx, Fy, Fz Mx, My, Mz	Sección
Fémur izquierdo	Célula de carga	Fx, Fy, Fz Mx, My, Mz	Sección
Rodilla derecha	Potenciómetro	Dx	Muelle
Rodilla izquierda	Potenciómetro	Dx	Muelle
Tibia Derecha	Célula de carga Upper Tibia	Fx, Fy, Fz Mx, My, Mz	Sección
	Célula de carga Lower Tibia	Fx, Fy, Fz Mx, My, Mz	Sección
Tibia Izquierda	Célula de carga Upper Tibia	Fx, Fy, Fz Mx, My, Mz	Sección
	Célula de carga Lower Tibia	Fx, Fy, Fz Mx, My, Mz	Sección

Nota: Tomado de: (Martínez Sáez, Peláez Bravo, García Álvarez, & Gómez Lopez, 2016)

Una vez obtenido los modelos ya completos, es necesario realizar la verificación y validación de cada uno de ellos, este proceso consta de generar un grado de fidelidad en el que estos modelos de elementos finitos son capaces de representar la realidad.

Se pueden diferenciar dos partes, una es en la que se verifica y se elimina errores en el código fuente del modelo, y en la otra se verifica la cantidad de soluciones obtenidas numéricamente. También se busca una precisión exacta en los resultados y obtención de datos que físicamente no se puede conseguir, esto es necesario para comprobar y ajustar el comportamiento del modelo, pues el objetivo final es que representen exactamente a los maniqués reales.

Para conseguir la validación en estos modelos robustos y predictivos es someterlos a varios procesos en los cuales se identifica la fidelidad y exactitud de los mismos, los cuales se evaluarán cualitativa y cuantitativamente. La evaluación cualitativa consiste en comparar a los modelos con maniqués reales entre las simulaciones y ensayos obtenidas en un choque mientras que la evaluación cuantitativa se centra en las aceleraciones y cargas de impacto en las diferentes configuraciones de ensayo.

En la primera verificación la cual corresponde a la comprobación de masas. Cada uno de los componentes del maniquí debe cumplir requisitos establecidos. Para la validación másica se tiene en cuenta valores establecidos por normativa, como el pesaje de maniqués que se encuentra en LSP de INSIA. En las siguientes tablas 7-8 se puede verificar las masas de los componentes del Híbrido II 50 – 95%.

Las masas de los modelos híbridos son correspondientes a análisis realizados en cuerpos humanos por eso la eficiencia de colocar fuerzas aceleraciones en el maniquí dependerá netamente del peso en el cual el maniquí se encuentre dispuesto en ese momento.

Tabla 7

Comparación de masas entre el modelo virtual y el maniquí Híbrido-III 50%.

CONJUNTO		Requisitos por norma		Peso medio maniqués (Kg)	Peso modelo
		Min. (Kg)	Máx. (Kg)		FEM (Kg)
Cabeza	Cabeza	4,59	4,59	4,55	4,54
Cuello	Cuello	1,49	1,59	1,51	1,55
Tórax	Torso superior	17,05	17,33	17,07	17,07
Pelvis	Torso inferior	22,90	23,81	23,07	23,07
	Pierna superior	5,90	6,08	5,97	6,04
Pierna	Pierna inferior	4,22	4,36	4,40	4,35
	Pie	1,09	1,23	1,15	1,14
	Brazo superior	1,91	2,09	2,03	1,96
Brazo	Brazo inferior	1,65	1,75	1,69	1,67
	Mano	0,52	0,61	0,55	0,53
Total maniquí HIII-50th		76,52	78,88	77,76	77,81

Tabla 8

Comparación de masas entre el modelo virtual y el maniquí Hybrid-III 95%.

CONJUNTO		Requisitos por			Peso
		norma		Peso medio maniquíes (Kg)	modelo
		Min. (Kg)	Máx. (Kg)		FEM (Kg)
Cabeza	Cabeza	4,90	4,99	4,95	4,91
Cuello	Cuello	1,63	1,72	1,65	1,66
Tórax	Torso superior	21,91	22,63	22,94	21,96
Pelvis	Torso inferior	29,94	30,66	29,96	30,03
	Pierna superior	8,12	8,30	8,21	8,14
Pierna	Pierna inferior	5,66	5,84	5,73	5,75
	Pie	1,52	1,66	1,54	1,59
	Zapato	1,04	1,40	-	1,274
	Brazo superior	2,72	2,90	2,80	2,86
Brazo	Brazo inferior	2,02	2,11	2,08	2,09
	Mano	0,52	0,61	0,54	0,55
Total maniquí HIII-95th		99,61	102,87	101,84	101,85

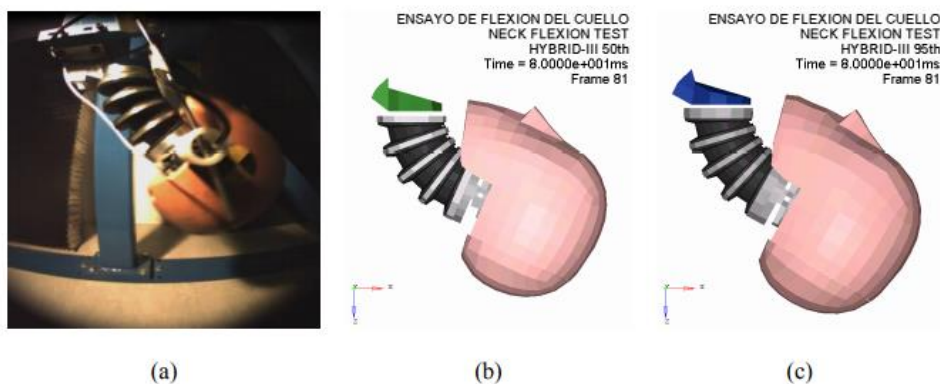
Nota: Tomado de: (Martínez Sáez, Peláez Bravo, García Álvarez, & Gómez Lopez, 2016)

Una vez realizada la validación de las masas es necesario realizar la validación del comportamiento del modelo FEM para asegurarse que la respuesta es similar a la de los maniqués.

El maniquí se somete a ensayos de certificación de los componentes, así como la verificación de todo el conjunto en sí, con ello se busca que las propiedades dinámicas del maniquí se mantengan controladas permitiendo la repetitividad y reproducibilidad en los ensayos entre los laboratorios. Si un maniquí no cumple con estos criterios es necesario reemplazar el componente que no cumple para su certificación. Los modelos de los maniqués también son sometidos a ensayos de validación para verificar cada uno de los componentes, en el caso del Hybrid III 95% el número de ensayos es inferior al de la unidad del 50%. Sin embargo, para mejorar la validación en los modelos virtuales son sometidos a todos los ensayos posibles.

Figura 29

Ensayo de flexión del cuello (a) ensayo real (b) Modelo Hybrid III 50% (c) Modelo Hybrid 95%



Nota: Tomado de: (Martínez Sáez, Peláez Bravo, García Álvarez, & Gómez Lopez, 2016)

Con el mismo procedimiento se realiza la validación de todos los componentes para cada uno de los maniqués. Para ir ajustando el modelo se realizan pruebas de acuerdo a datos reales que posee LSP INSIA. Cada uno de los ensayos debe estar normalizado con los parámetros ya obtenidos. En la

Tabla 9

Resultados obtenidos de la simulación de los ensayos de certificación del Hibrid-III 50%

Ensayo de certificación	Criterios	Norma		Modelo
		Min	Max	RADIOSS
Cabeza	Aceleración resultante (g)	225	275	247.22
Flexión del cuello	Rotación máxima plano-D (rad)	1.12	1.361	1.21
	Tiempo rot. Max. Plano-D (ms)	57	64	58.75
	Tiempo corte plano-D (ms)	113	128	116.25
	Momento occipital máximo (Nm)	88.1	108.4	94.77
	Tiempo momento Occ. Max. (ms)	47	58	48.75
	Tiempo corte mom. Occ. (ms)	97	107	98.07
Extensión del cuello	Rotación máxima plano-D (rad)	1.414	1.85	1.61
	Tiempo rot. Max. Plano-D (ms)	72	82	79.75
	Tiempo corte 0 plano-D (ms)	147	174	168.75
	Momento occipital máximo (Nm)	-80	-53	-60.87
	Tiempo momento Occ. Max. (ms)	56	79	72.4
	Tiempo corte mom. Occ. (ms)	120	148	137.85
Impacto de tórax	Desplazamiento tórax máximo (mm)	63.5	72.66	0.962
	Fuerza de impacto máxima (N)	5160	5864	5264
	Histéresis (%)	69	85	71.17
Flexión del torso	Fuerza en 0.52 rad (N)	475	550	506.3
Movimiento de la cadera	Ángulo para momento <95 Nm (rad)	0.52		0.527
	Ángulo para momento 203 Nm (rad)	0.7	0.87	0.747
Impacto de la rodilla	Fuerza de impacto máxima (N)	4715	5782	5592
Deslizamiento de la rodilla	Fuerza en desplazamiento de 10.2 mm(Kn)	1.26	1.72	1.39
	Fuerza en desplazamiento de 17.8 mm(Kn)	2.27	3.1	2.72

En la tabla 10 se especifica los resultados de certificación para el maniquí hybrid 95 percentil cabe recalcar que los acelerómetros puestos en distintas partes del maniquí son los datos que se toma a referenciar para el diseño de cualquier modelado CAD.

Tabla 10

Resultados obtenidos de la simulación de los ensayos de certificación del Hibrid-III 95%

Ensayo de certificación	Criterios	Norma		Modelo
		Min	Max	RADIOSS
Cabeza	Aceleración resultante (g)	220	865	229.5
Flexión del cuello	Rotación máxima plano-D (°)	61	75	64.2
	Momento occipital máximo (Nm)	110	130	116.58
	Tiempo momento de decaimiento de 10 Nm (ms)	77	97	89.6
Extensión del cuello	Rotación máxima plano-D (°)	81	98	1.61
	Momento occipital máximo (Nm)	-66	-84	-75.7
	Tiempo momento de decaimiento de 10 Nm (ms)	100	120	116.58
Impacto de tórax	Desplazamiento tórax máximo (mm)	66	76	68.1
	Fuerza de impacto máxima (N)	5.1	5.9	5.27
	Histéresis (%)	69	85	80.55
	Fuerza en 0.52 rad (N)	475	550	530.3
Flexión del torso Movimiento de la cadera	Ángulo para momento <95 Nm (rad)	0.52		0.528
	Ángulo para momento 203 Nm (rad)	0.7	0.87	0.715
	Fuerza de impacto máxima (kN)	4.9	7.3	6.12
Deslizamiento de la rodilla	Desplazamiento máximo	15	18.3	16.2
Impacto parte inferior del pie (con zapato)	Fuerza de compresión de la tibia (kN)	2.8	3.8	2.84
Impacto parte inferior del pie (sin zapato)	Aceleración del péndulo (g)	245	345	306.16
Impacto parte superior del pie	Momento de la tibia (Nm)	95	145	134.45

Los datos mostrados anteriormente son datos subjetivos, es decir que realiza comparaciones cualitativas entre los maniqués y los modelos FEM, es necesario que se realice un análisis objetivo para la validación y este análisis se lo realiza con el

software CORA, el cual realiza una comparación de señales mediante indicadores objetivos: verificación mediante corredores y verificación mediante cruzada. El software muestra con puntuaciones entre 0 y 1 cuando las señales sean idénticas.

2.8.6. Criterios de lesiones en ocupantes

En el diseño de vehículos se tiene que considerar cuántos g puede soportar una persona. Entonces, antes de que podamos determinar el nivel de tolerancia humana, necesitamos establecer un medio por el cual se pueda cuantificar la gravedad de la lesión. La asociación Médica para el Avance de la Automoción propuso una escala numérica de lesiones, (www.aaam.org) en 1969 en base a los aportes de investigadores de accidentes, cirujanos ortopédicos, especialistas en medicina de emergencia, ingenieros biomecánicos y epidemiólogos. Se llama la Escala Abreviada de Lesiones (AIS). Esta escala ha sido revisada varias veces y la última versión se conoce como AIS2008. Se presenta en forma de un libro de códigos que proporciona puntajes de lesiones (AIS) para cada región del cuerpo para 6 niveles de gravedad de la lesión. Es importante recordar que el puntaje AIS se basa en la amenaza a la vida y no en la discapacidad resultante de la lesión. La escala abreviada de lesiones se proporciona en la Tabla 11, donde un AIS de cero significa que no hay lesiones y un AIS de 6 es la lesión máxima (actualmente no tratable). Los ejemplos de lesiones AIS 4 incluyen fractura de cráneo deprimida, contusiones cerebrales múltiples, fractura / dislocación de la columna cervical debajo de C3, flacidez en el pecho y contusión cardíaca severa. Las lesiones AIS 5 pueden incluir pérdida del conocimiento durante 24 h, hematoma subdural bilateral, síndrome de cordón completo C4 o inferior, laceración mayor de la aorta torácica, laceración pulmonar con embolia aérea y laceración masiva del hígado. Las lesiones AIS 6 se limitan a aplastamiento masivo del cráneo, síndrome de cordón completo en C3 o superior, laceración del cordón en C3 o superior y laceración abierta

de la aorta torácica. Una vez definidos los niveles de lesión para cada región del cuerpo, ahora se convierte en tarea del ingeniero biomecánico encontrar valores de tolerancia para cualquier AIS dado de una región específica del cuerpo. De hecho, esta es una tarea desalentadora que requiere años de investigación por parte de muchas instituciones para lograr. De hecho, el trabajo no está terminado y la búsqueda continua. Una variable de confusión en la determinación de los niveles de tolerancia es la gran variación en la tolerancia entre una población dada. Esta variación ocurre entre un grupo de personas del mismo sexo y edad, pero se esperan variaciones mayores entre hombres y mujeres, entre los adultos mayores y los adultos de mediana edad, y entre el adulto y el niño. Es decir, los límites de tolerancia confiables requieren una gran cantidad de datos de lesiones en el laboratorio, preferiblemente de sujetos humanos.

Tabla 11

Escala abreviada de lesiones

AIS	Severidad de lesión
0	Sin lesión
1	Lesión media
2	Lesión moderada
3	Lesión seria
4	Lesión severa
5	Critica
6	Máxima
9	Desconocida

La puntuación de gravedad de la lesión se utiliza para cuantificar la gravedad de (y comparar) los pacientes con lesiones múltiples; seleccionar pacientes para su inclusión en los registros; y como parte de las definiciones utilizadas para describir el trauma mayor. En consecuencia, la coherencia de los conjuntos de códigos AIS utilizados es fundamental para el propósito y validez de los registros de trauma.

La puntuación de gravedad de la lesión se utiliza para cuantificar la gravedad de (y comparar) los pacientes con lesiones múltiples; seleccionar pacientes para su inclusión en los registros; y como parte de las definiciones utilizadas para describir el trauma mayor. En consecuencia, la coherencia de los conjuntos de códigos AIS utilizados es fundamental para el propósito y validez de los registros de trauma

2.8.7. **Material de estructura de seguridad**

El material para generar la estructura de seguridad o jaula como se lo quiera llamar está definido por la normativa FIA en el anexo j el cual especifica que para los arcos de seguridad deberá ser un acero al carbono estirado en frío, sin soldadura cuyo contenido máximo de carbono deberá ser 0.3%, y tener una resistencia mínima a la tracción de 350Mpa.

Actualmente la factibilidad para encontrar el tubo en el nuestro mercado es complicada por lo que se opta por otro acero que pueda asimilar las características antes mencionadas. Con el acero ASTM A500 obtenemos las siguientes propiedades:

Tabla 12

Propiedades del acero estructural ASTM A500

Densidad	7.85 g/cm ³
Esfuerzo de cedencia (σ_y)	317 MPa

Esfuerzo último de tracción (σ_u)	417 MPa
Módulo de Young	200 GPa
Coefficiente de Poisson	0.3

La fabricación de la estructura de seguridad vendrá propuesta por el Anexo J de la normativa de la FIA la cual especifica que el arco principal del chasis tendrá un diámetro de 2" el cual equivale a 50.8mm y un espesor de 2mm y los arcos secundarios vendrán propuestos por un diámetro de 1.5" equivalente a 38.1mm con espesor de 2mm.

2.9 Introducción al programa computacional CAE

El programa LS DYNA es un paquete de software de simulación multifísica el cual desarrollado por Livemore Software Technology Corporation (LTSC) sirve para cumplir funciones matemáticas que conlleven a simular y acercarlo más a resolver problemas del mundo real mediante un análisis altamente no lineal del método de elementos finitos y la integración de tiempo explícito.

2.9.1. *Principio de elementos finitos utilizando método de análisis estructural explícito dinámico no lineal*

Antes de la llegada de la computadora, los métodos aplicados de análisis solo estaban basados en dos tipos los cuales son interactivo y el manual este último se lo realizaba por el método de Cross, lo cual significaba una gran pérdida de tiempo en la resolución de sistemas continuos, con la llegada de la computadora y programas que facilitan la resolución de problemas se puede obtener un análisis más concreto.

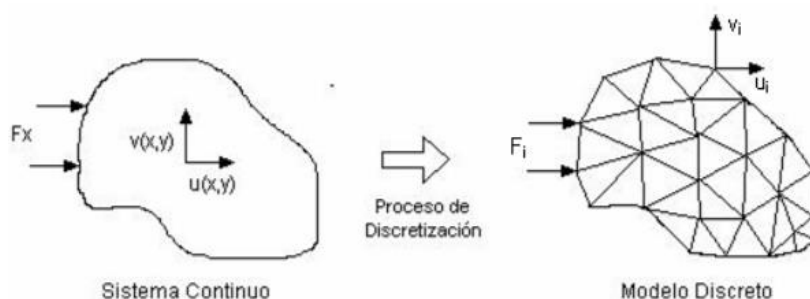
El MEF (método de elementos finitos) es un método que parte de la discretización de un sistema continuo para la resolución de ecuaciones diferenciales

parciales con la intención de obtener un resultado que no conlleve a tener que materializar el modelo, es decir este método se aproxima a la realidad.

En un cuerpo, estructura o dominio, la discretización consta en la división en un número elevado de subdominios entre si denominados “elementos finitos”, dentro de cada elemento se puede denotar una serie de puntos denominados “nodos”, dos nodos adyacentes pertenecen entre sí a un elemento finito; además se entiende que un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos, con lo cual este conjunto se denomina malla.

Figura 30

División en elementos finitos.



La simulación en el programa CAD, permite conocer el rendimiento del producto en las primeras fases de un proceso de diseño con estos se evita costosas modificaciones en el mismo, antes de llegar a un prototipo, el programa CAD ofrece diferentes herramientas para analizar la estructura, la potente visualización de los resultados permite estudiar las fuerzas que afectan al diseño.

2.9.2. **Cálculo del centro de gravedad**

El centro de gravedad en el cuerpo humano es el punto donde todas las fuerzas de todas las partes del cuerpo se equilibran, este se encuentra en el coxis en la segunda vertebra en el hombre en la mujer al tener un coxis mucho mayor este varía.

Se debe tener en cuenta que el centro de gravedad es calculable cuando el cuerpo se encuentra en reposo en un estado llamado posición anatómica según el acuerdo de la nomenclatura anatómica en París en el congreso internacional de anatomía de 1955.

El cuerpo humano se encuentra formado de segmentos articulados que pueden moverse, el centro de gravedad se lo puede determinar hallando las coordenadas de cada segmento, usando tablas o integrando los volúmenes y hallando el centro de gravedad de cada uno de los segmentos, continuamente se procede a calcular el centro global de masa al igual como se hace con masas puntuales.

2.9.3. ***Tipos de malla generados***

Se pueden generar diferentes tipos de mallas, se nombra a continuación los tipos de mallas que podemos generar:

a. Mallas estructuradas

Mallas estructuradas se entiende la desratización cuya conectividad sigue un patrón reticular, en este tipo de malla se utiliza principalmente elementos cuadriláteros 2D y hexaédricos 3D, se pueden apreciar los siguientes tipos en mallas estructuradas:

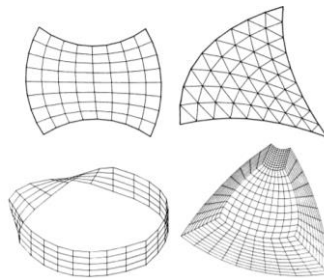
- Algebraicos

Este tipo de mallado consiste en la discretización por geometrías canónicas o usualmente conocidas como “mapping” también las definidas como la de interpolación translimita, por ejemplo, supongamos un rectángulo sobre este se coloca una retícula en la cual obtendrá sus dominios y nodos, este método se utiliza para geometrías cuadriláteras o hexaédricas, aunque se conoce que también han sido aplicadas para secciones triangulares.

Para este proceso se conocen varios errores, pero esto es analiza con la calidad de malla para lo cual se exige a dicha malla que contengan los parámetros suficientes como para evaluarlo, los parámetros que se exigen más se definen como la distancia entre nodos.

Figura 31

Mallas generadas mediante métodos algebraicos



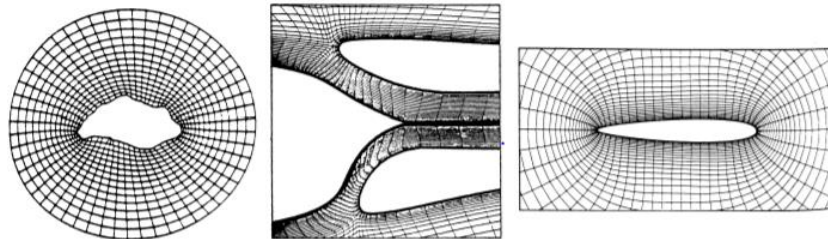
Nota: Tomado de: (Días Morcillo)

- Basados en EDPs

Puede ser interpretada como métodos algebraicos, con el fin de poder acoplarse a medidas ortogonales también llamados como EDPs, con coordenadas tanto en x y y para los nodos y obtener una discretización mediante figuras geométricas.

Figura 32

Mallas bidimensionales generadas mediante la resolución de EDPs



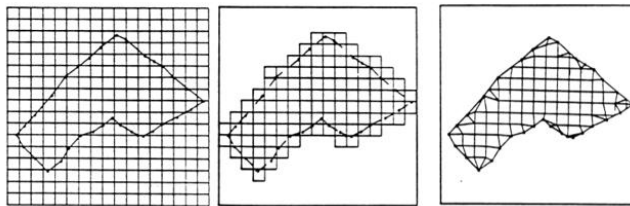
Nota: Tomado de: (Días Morcillo)

- Superposición – deformación de retícula

Como se aprecia en la figura 33 sobre el elemento se trata una retícula con las mismas dimensiones en cada dominio, esta retícula debe ser mayor al elemento con lo que después se va acoplando hacia este obteniendo así un mallado consistente.

Figura 33

Superposición de retícula y ajuste al contorno.



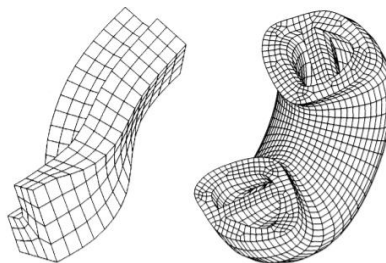
Nota: Tomado de: (Días Morcillo)

- Crecimiento estructurado

Este tipo de mallado se puede aplicar para elementos ya tridimensionales aplicando ya los métodos EDP's con lo que se adhiere a toda una estructura y para lo cual analizada en su totalidad se puede definir el tamaño a considerar de cada nodo, es decir, la distancia entre la cual ellos van a estar.

Figura 34

Mallas hexaédricas de crecimiento estructurado



Nota: Tomado de: (Días Morcillo)

- Mallas no estructuradas

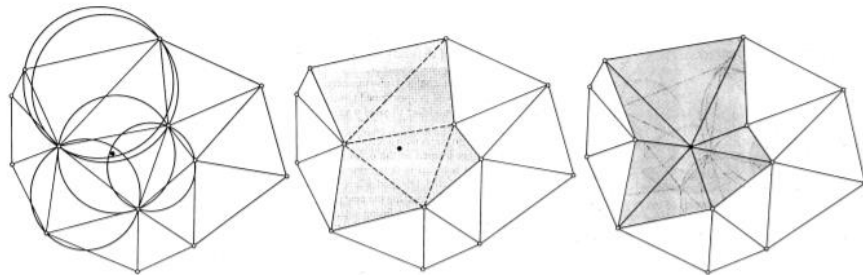
Estas no presentan un patrón predeterminado de conectividad, esta especificada por el contorno del problema

- Inserción de nodos y posterior conexión: Delaunay.

La triangulación de Delaunay es una de las pioneras disertaciones triangulares utilizadas para un mallado como se observa en la figura 35 consiste en trazar círculos superpuestos se crean los nodos y con ellos se toma formas triangulares para su dominio sobre el área a mallar

Figura 35

Triangulación de Delaunay



Nota: Tomado de: (Días Morcillo)

2.9.4. **Evaluación de calidad de malla**

Para la evaluación de la calidad de malla, se utiliza el coeficiente Jacobian, el cual evalúa la cantidad de nodos que contengan una precisión concisa, es decir, que formen figuras geométricas como las mencionadas anteriormente, en los elementos curvos no lineales trata de colocar nodos centrales en las aristas del contorno de un elemento, cuando los contornos son extremadamente distorsionados, este cociente pasa a ser negativo lo que provoca que un análisis se detenga. En un elemento

tetraédrico con los nodos centrales ubicados exactamente, el coeficiente Jacobian es de 1, y aumenta a medida que aumentan las curvaturas de las aristas.

Capítulo III

3. Procedimiento de ensayos

3.1 Modelado CAD

3.1.1. Modelado de automóvil

A continuación, se describe las características del automóvil:

Tabla 13

Datos del automóvil

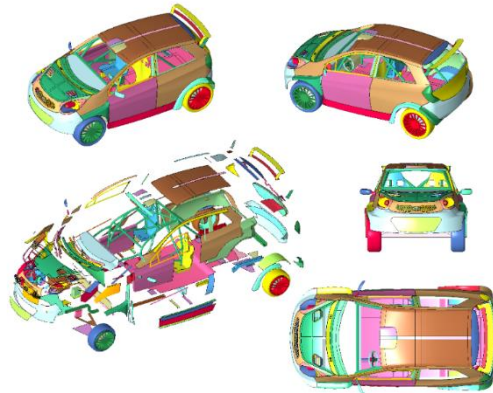
Requisito	Denominación
Marca del auto	Kia
Modelo de auto	Picanto
Largo	3595 mm
Ancho	1595 mm
Alto	1485 mm
Distancia entre ejes	2400 mm
Ubicación del motor	Delantero

Nota: Datos obtenidos del vehículo Kia Picanto

En la figura 36 se muestra el modelo del automóvil KIA PICANTO desarrollado en el programa CAD con cierto tipo de estructura de seguridad, para demostrar la realización de este automóvil se expresa en las etapas de modelado y se las muestra paso a paso para que el lector entienda como se realiza este tipo de automóvil tipo Shell es decir cascaron pues con ayuda del programa cae se especifica cómo se va obteniendo ya los grosores y se da material al automóvil.

Figura 36

Modelo 3D de auto KIA PICANTO con estructura de seguridad

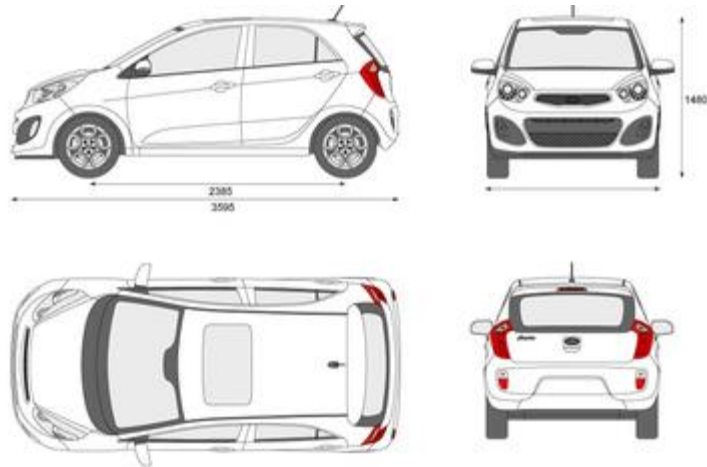
**3.1.2. Etapas de moldeado**

Se empieza a explicar de una manera simplificada y resumida el moldeado del automotor, es decir, el modelo KIA PIKANTO en el programa CAD.

- a) En primera instancia se tiene que generar un nuevo documento.
- b) Para el moldeado de un automóvil ya existente nos dirigiremos a descargar una imagen que contenga el perfil del auto lo podemos buscar en internet como blueprint Kia Pikanto, procediendo a dividir la imagen en 4 las cuales serán la vista lateral, frontal, superior y posterior, para luego ingresarlas al programa CAD. En la figura 37 se puede denotar el modelo que se va a generar, es necesario tener en cuenta la distancia entre ejes del vehículo a desarrollar pues se necesita desarrollarlo a la medida exacta de lo especificada por el fabricante, con ello tendremos un análisis más aproximado hacia la vida real, sin tener en cuenta este aspecto tendríamos un error grave al momento de realizar el prototipo, con lo que se llevaría a la muerte del conductor, lo cual no sería en ninguna manera conveniente.

Figura 37

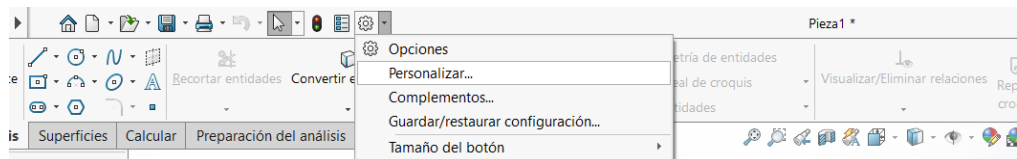
Blue print del modelo a generar

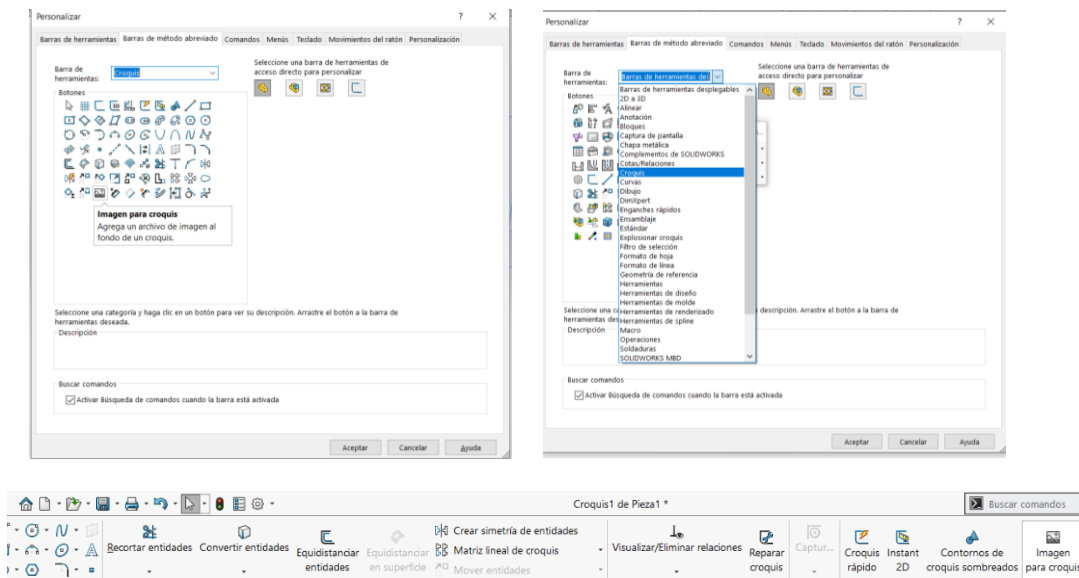


- c) Para montar la imagen en el programa se lo puede realizar de la siguiente manera, se procede a configurar nuestros controladores para que se facilite el ingreso de imágenes en el programa CAD, en la figura 38 se puede denotar los pasos a seguir para poder realizar la operación de una manera mucho más factible.

Figura 38

Pasos para agregar una imagen.

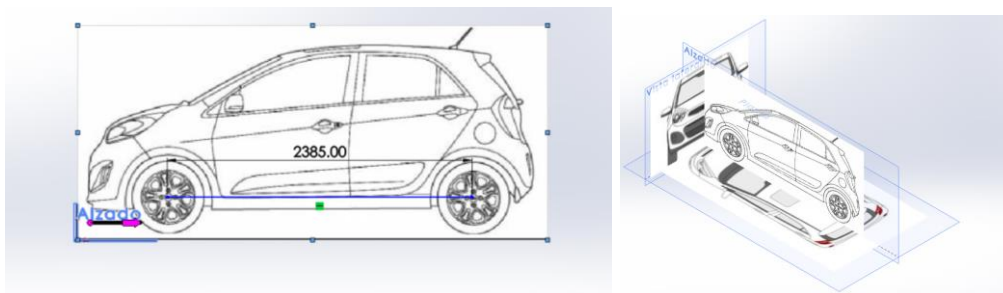




- d) Una vez realizado este proceso se selecciona el plano donde se desea trabajar se selecciona croquis y se procede a ir a la pestaña que creamos en la barra de croquis “imagen para croquis” luego se inserta la imagen, se consulta la distancia entre ejes que tiene el automóvil, el ancho y el alto se procede a configurar la imagen al tamaño real.

Figura 39

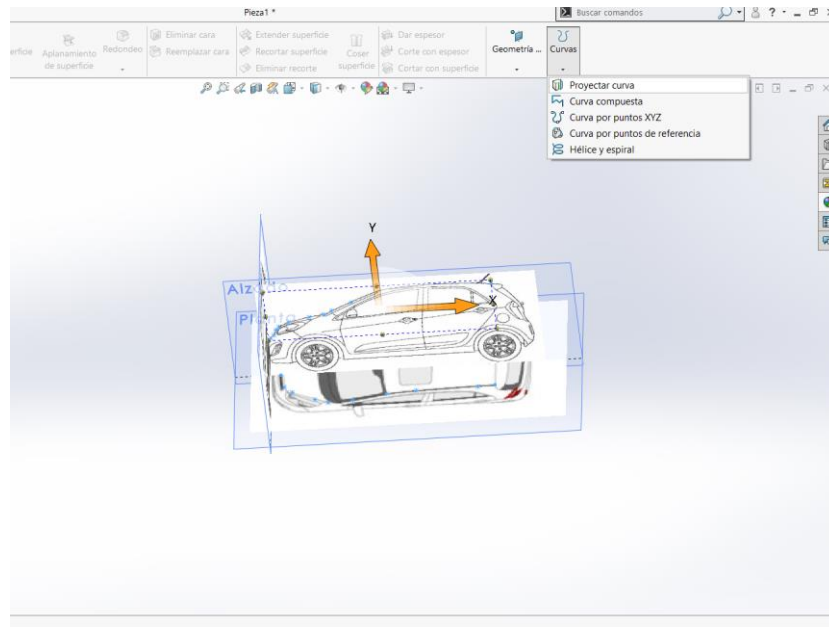
Gráficas del modelo a diseñar insertadas con sus respectivas medidas



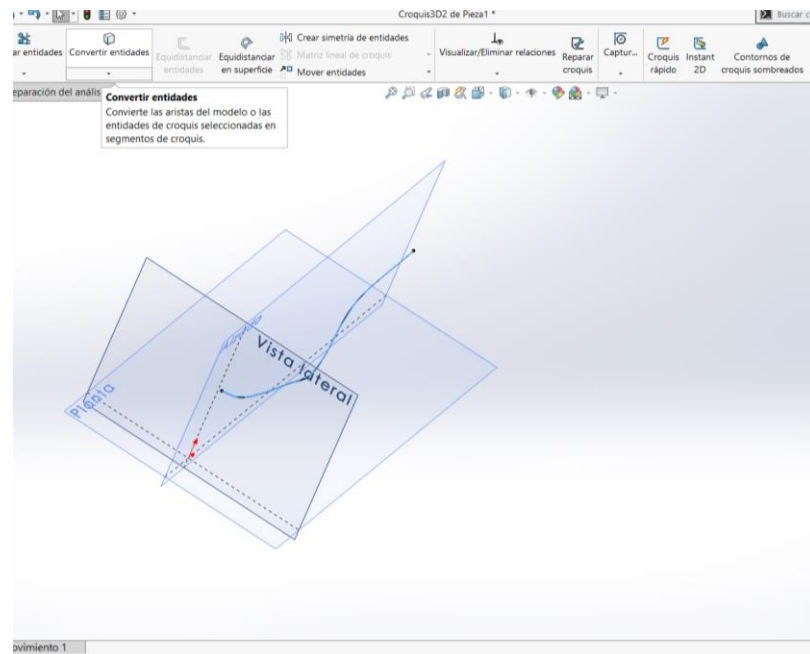
- e) Obtenido este proceso se realiza el perfil del automóvil en los planos que se requiera esto lo hacemos para proyectar la curva en 3 dimensiones y poder realizar una superficie del automóvil.

Figura 40

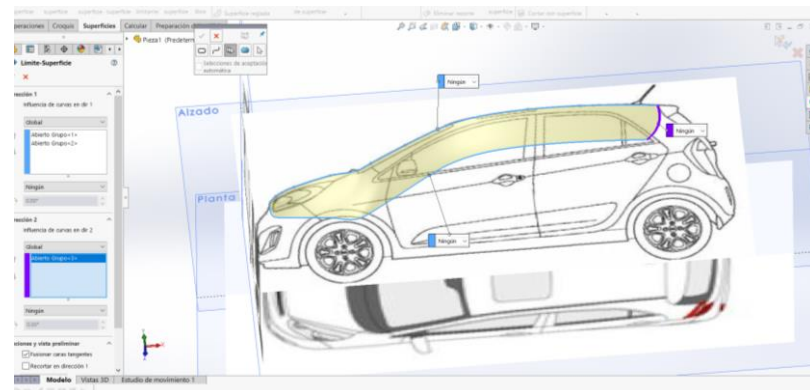
Operación curva para seguir el perfil del modelo



- f) Una vez proyectada la curva vamos a croquis 3D convertir entidades y transformamos nuestra curva a croquis 3D, esto lo hacemos con el fin de al momento de realizar la superficie esta herramienta pueda seleccionar nuestra curva, en la figura 41 se denota la curva generada ya proyectada en 3D, lo cual es muy eficiente para que en la operación superficie si se pueda seleccionar esta curva antes realizada, cabe recalcar que si no se hace este procedimiento no se podrá seleccionar la cura.

Figura 41*Proyección de curvas en 3D*

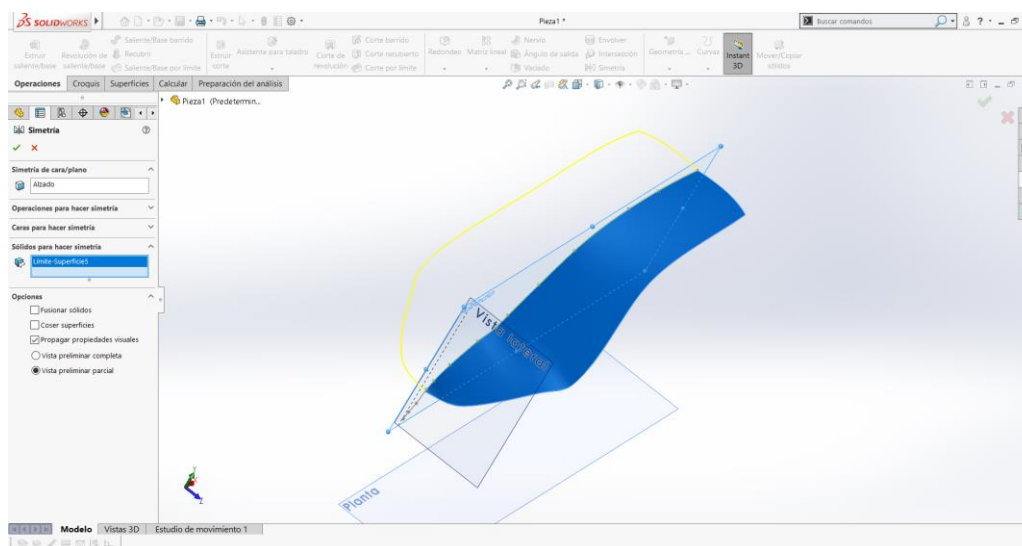
- g) Como consiguiente se procede a realizar la superficie del automóvil de tipo Shell de acuerdo a los bocetos anteriormente propuestos.

Figura 42*Operación rellenar superficie utilizando dos bocetos*

- h) Se trabajará todo en una sola mitad puesto que obtenido en el plano de la mitad solo será cuestión de crear una simetría para sólidos en operaciones.

Figura 43

Operación simetría



- i) Se continua con este proceso hasta tener ya el perfil total del automóvil, para la creación de las autopartes como llantas asientos faros se los realiza de la misma manera para poder recortar las puertas y darle los perfiles como capot letras entre otros se realiza de la siguiente manera:

Figura 44

Operaciones de superficie para dar acabados al vehículo



Obteniendo como resultado final el modelo deseado y las modificaciones que se requiera poner.

Figura 45

Modelo del auto acabado



3.1.3. **Modelado de estructura de seguridad según reglamento FIA**

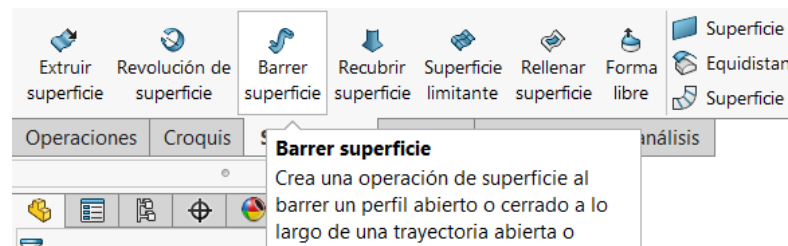
Para modelar la estructura de seguridad se va a seguir ocupando la barra de tareas de superficie y conforme al anexo j artículo 253 se ira moldeando de acuerdo a como tengamos el automóvil.

- a) Para poder realizar una estructura de seguridad de acuerdo al anexo j artículo 253 se realiza una estructura base en este caso se va a contar con 1 arco principal + 2 semiarcos laterales + 2 tirantes traseros + 6 pies de anclaje.

Se empezará realizando los arcos laterales los cuales de acuerdo a la normativa debe estar lo más cercana posible a la carrocería del vehículo.

Figura 46

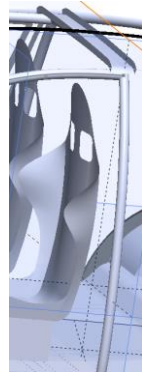
Operación barrer para generar una estructura tubular



- b) Se procede a construir el arco principal en cual dice que debe ir inmediatamente después de los asientos perpendicularmente con la horizontal teniendo una tolerancia máxima de $\pm 10^\circ$ grados.

Figura 47

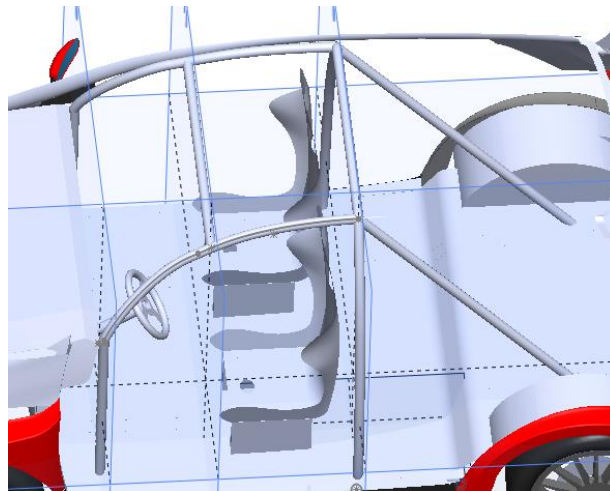
Bases para estructura de seguridad



- c) Se continúa haciendo los tirantes y el miembro transversal teniendo la estructura base de la siguiente manera.

Figura 48

Estructura de seguridad básica



- d) Se sigue insertando las tuberías para las estructuras de seguridad hasta llegar a las deseada obteniendo los resultados siguientes: en la estructura A se obtiene

aplicando todas las normativas que especifica el artículo j anexo 250 de la FIA y en la estructura B se data a las terminaciones propuestas por el autor teniendo en cuenta la estructura básica que especifica el reglamento.

En las figuras 49 y 50 se obtiene las propuestas hechas por el autor para poder llevar a un análisis y determinar cuál de las estructuras es la que más conviene al momento de realizar en un vehículo de la marca y el modelo antes mencionado.

Figura 49

Propuesta de jaula estructura de seguridad A

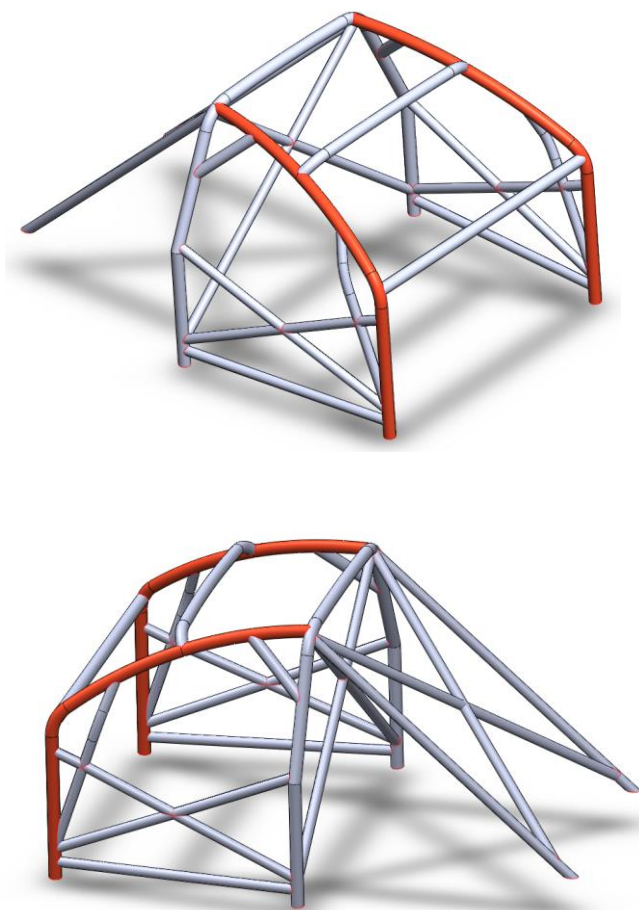
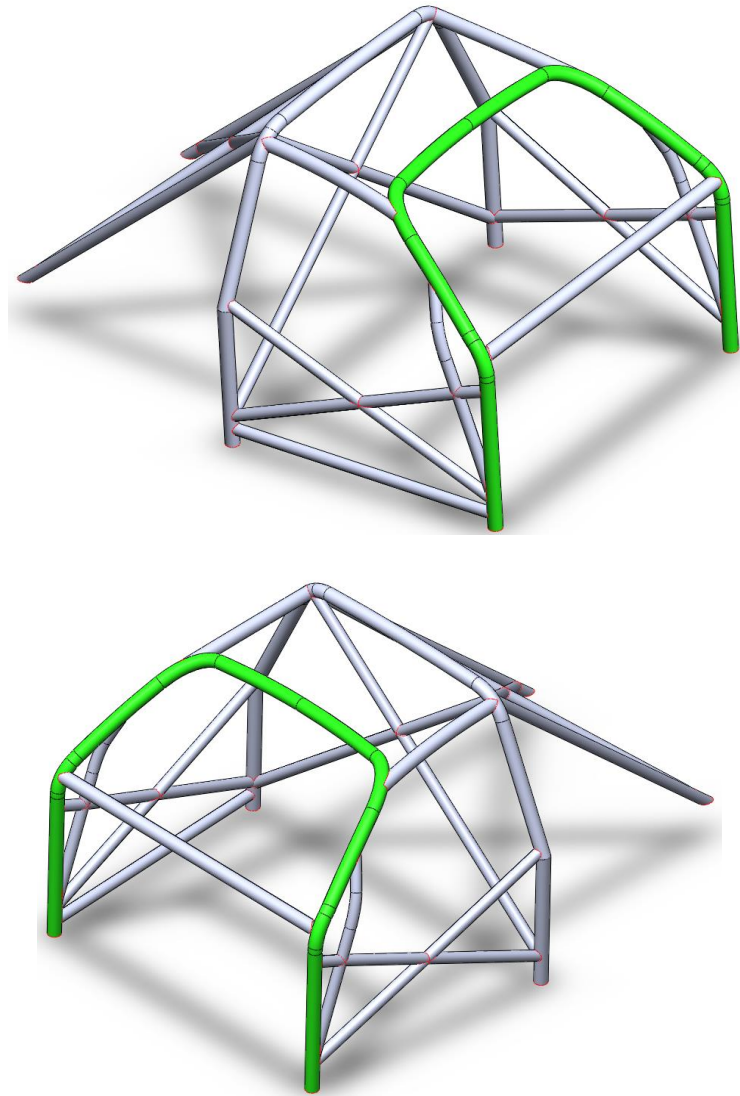


Figura 50

Propuesta de jaula estructura de seguridad B



3.2 Pre procesamiento de modelos FEM y CAE

En el pre procesamiento el cual es importante pues aquí se define entre algunos ajustes del modelo CAD, es decir, algunos parámetros minúsculos mal dibujados en este pre proceso se lo rectifica

3.2.1. Limpieza y ajustes de modelo CAD

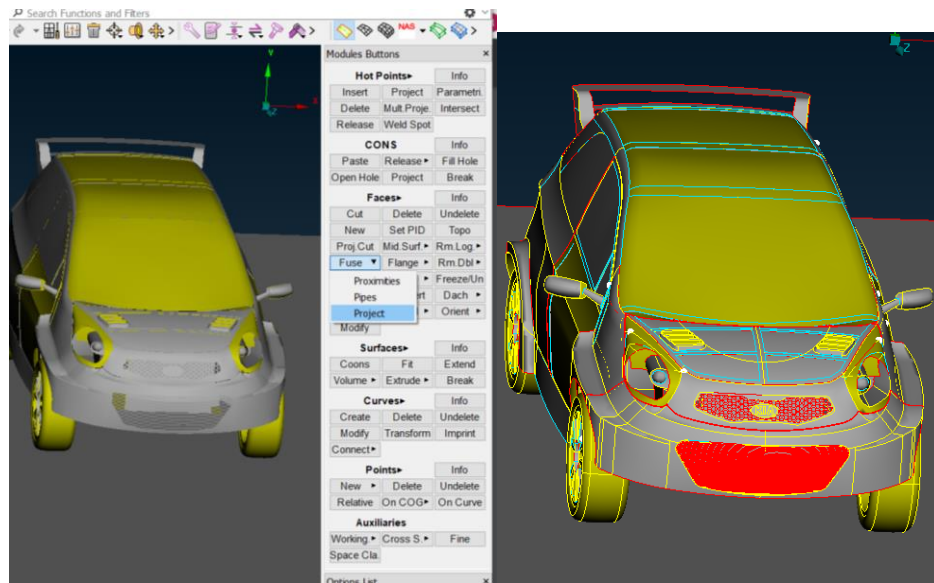
Para esta parte se realiza por medio de la comprobación de malla, es decir, cuando se genera la malla, el programa CAD arroja los elementos que no se encuentran mallados, lo cual presenta una desventaja al momento de un buen simulado, para lo cual se tiene que rediseñar las piezas que muestra con error.

3.2.2. Generación uniones y juntas estructurales

Para la generación de uniones y piezas soldadas con la ayuda del programa CAD que ayuda al mallado y generación de uniones y juntas estructurales, abrimos el modelo CAD antes realizado y realizamos los siguientes pasos en la parte derecha nos dirigimos al primer icono “topo” en el cual se selecciona “Fuse” y luego “Project”

Figura 51

Uniones y juntas estructurales



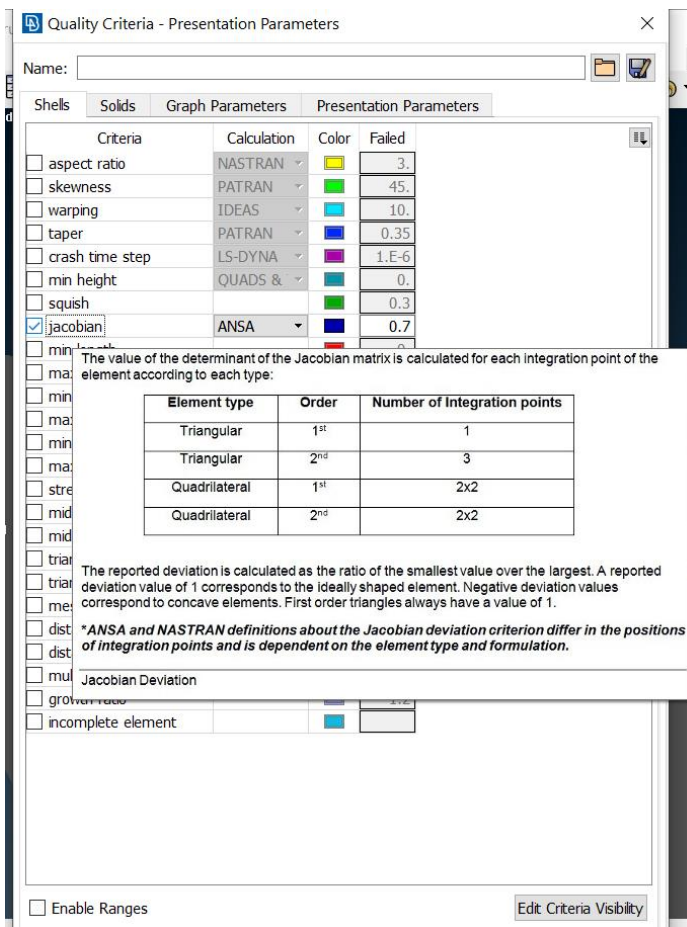
Cuando se tiene el color mostrado en la figura 53 eso quiere decir que se tendrá el modelo ya con las uniones ya especificadas y listas para mallar.

3.2.3. Generación de malla de elementos finitos

Para la generación de mallas se especifica qué con qué criterio se va a evaluar la malla, en este caso se utilizará el Jacobian.

Figura 52

Selección del tipo de mallado



Tener un buen mallado es esencial para la investigación puesto que dependerá de esto para que los resultados arrojados por el computador se asemejen a la vida real.

Luego para la generación de la malla se especifica la distancia entre nodos la cual para un mejor resultado se escoge una distancia de 0.25 mm para la parte del

automóvil, y una distancia de 20 mm para el piso puesto que para la parte del piso no se necesita analizar cargas en este. Para ello se realiza los siguientes pasos:

MESH → Legth (seleccionamos el auto y se da enter) se inserta la distancia deseada entre nodos y click en ok

Figura 53

Distancia de mallado

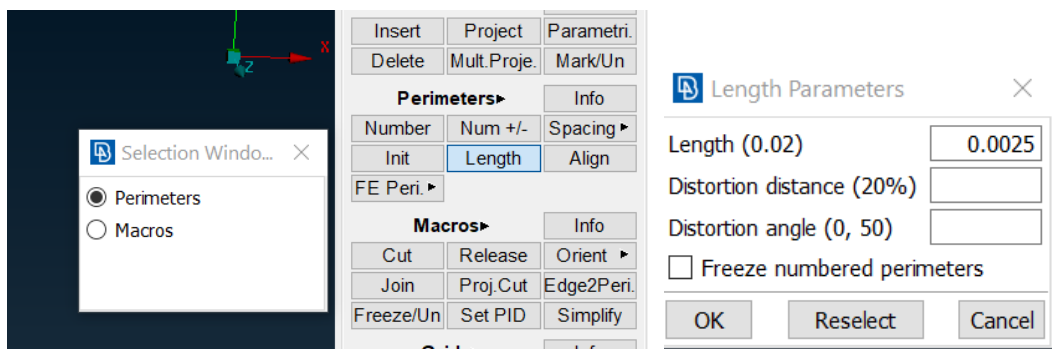
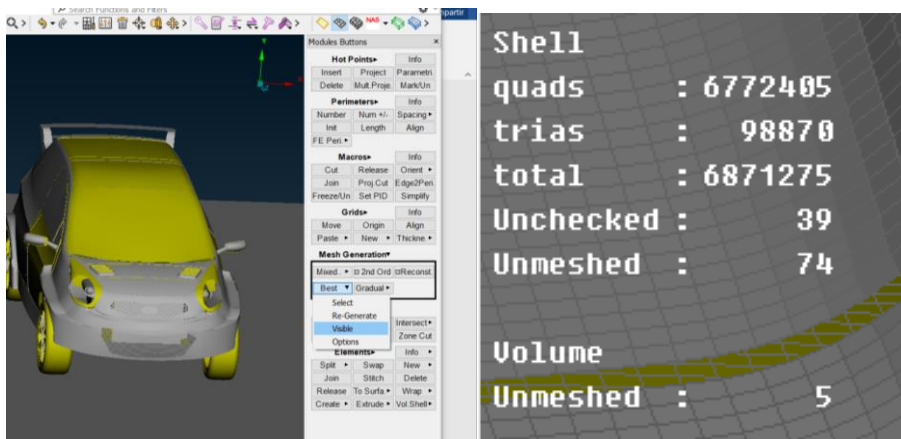


Figura 54

Mallado y visión de conjuntos no mallados



La figura 54 muestra el mallado y los que no pudo ser mallados (Unmeshed) para arreglar estos no mallados se tendrá que realizar manualmente hasta que se tenga

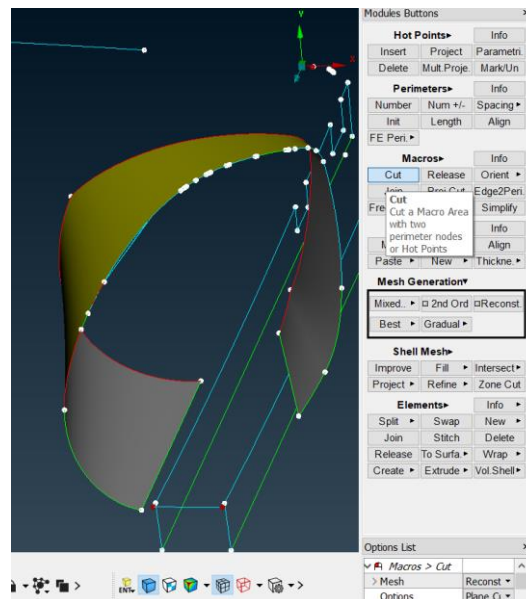
la proximidad a 0 puesto que algunos elementos que no son mallados solamente son líneas.

Para arreglar el mallado manualmente se tendrá que realizar los siguientes pasos y estos se repetirán por cada elemento que no esté mallado.

MESH → Cut (se recorta por los puntos que indica el programa y una vez recortado otra vez se genera la malla)

Figura 55

Reparación de mallado por medio de corte



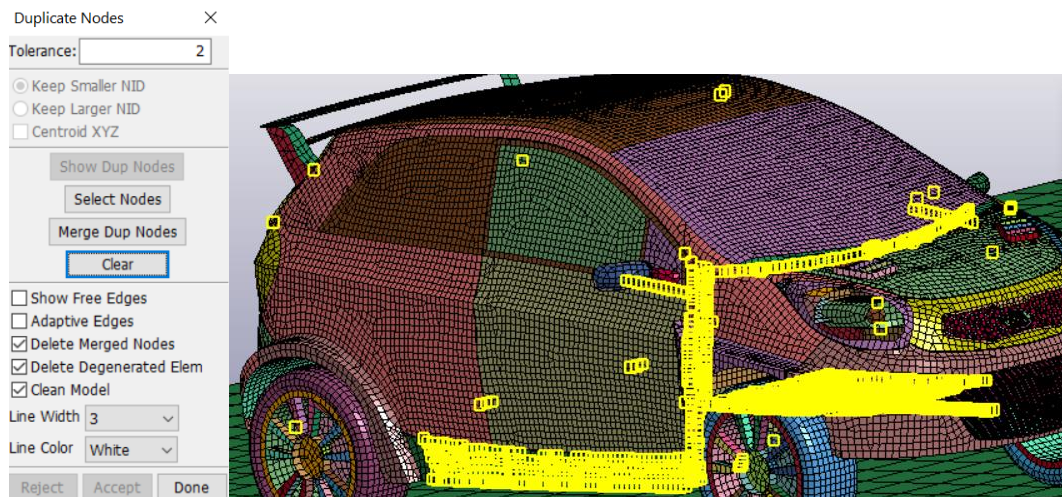
f. Validación de malla de elementos finitos

En el programa CAE como primera instancia se tiene que observar si la malla es de buena calidad, para ello nos dirigimos a observar los nodos los cuales deben estar a una tolerancia de 2 mm, es decir, existen nodos los cuales suelen estar a 3mm o más para ello se trata de unir estos nodos para una buena simulación para ello se realiza los siguientes pasos:

Element tools → Duplicate nodes → Show Dup Nodes

Figura 56

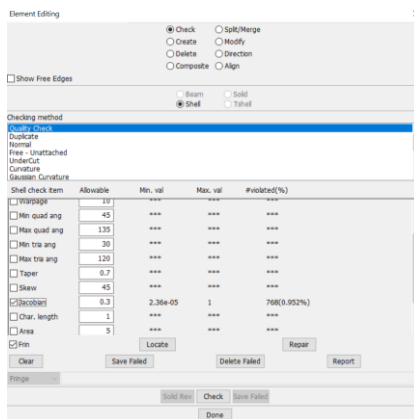
Unión de nodos



En este caso lo que nos representa en color amarillo significa los nodos que se encuentran a una distancia de 2 mm lo cual no debe existir puesto que la malla es de 25mm por lo cual se tiene que juntar los nodos en los cuales no cumplen con la restricción de 2mm para ello en la misma ventana de Duplicate Nodes se selecciona Marge duplicate nodes con ello estos nodos se unirán.

Figura 57

Arreglo de mado por medio de Jacobiano



En esta tabla en la sección de violated(%) nos indica cuantos elementos no cumplen con la restricción, es decir, los valores que están menores a 0.3mm y el peor elemento es el valor de 0.0000236mm, para arreglar este tipo de fallas tenemos que eliminar estos elementos para que no generen problemas:

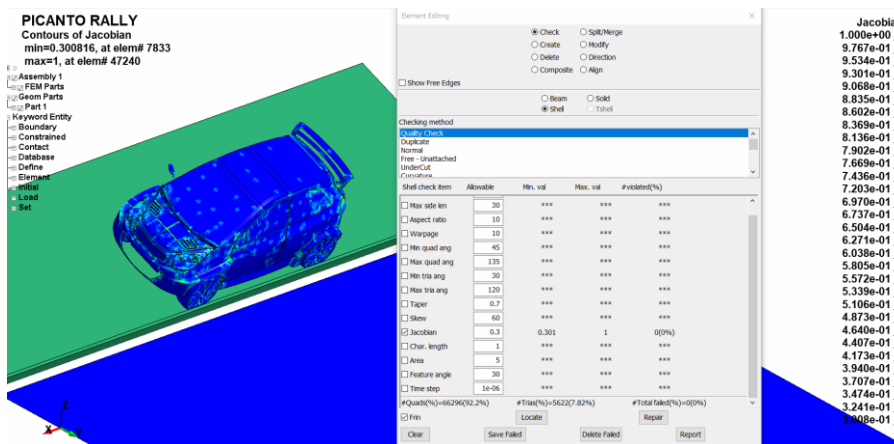
Figura 58

Arreglo de mallado en partes extremas

Allowable	Min. val	Max. val	#violated(%)
10	***	***	***
45	***	***	***
135	***	***	***
30	***	***	***
120	***	***	***
0.7	***	***	***
45	***	***	***
0.3	2.36e-05	1	768(0.952%)
1	***	***	***
5	***	***	***

Figura 59

Mallado arreglado con Jacobiano



Como puede observar la figura 59, en color azul estará especificada si la calidad de malla cumple con un buen mallado medido con el cociente jacobino y los diferentes tipos de colores muestran el déficit de la calidad de malla.

3.2.4. **Cálculo del centro de gravedad de modelos**

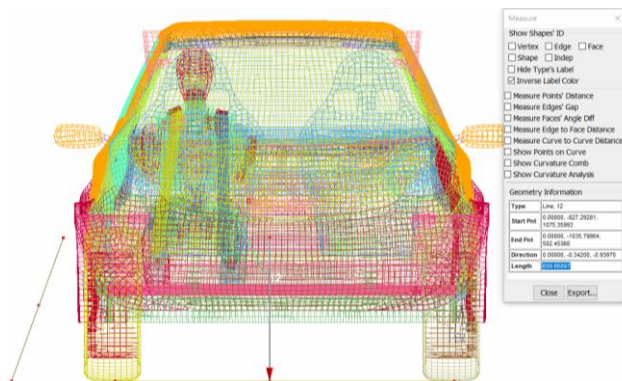
Para el cálculo de centro de gravedad de los modelos realizados anteriormente se procede con los siguientes pasos:

Element tools → Measure (en esta parte se seleccionará inertial y click en all) ahí se especificará las coordenadas exactas en donde se encuentra el punto exacto del centro de gravedad.

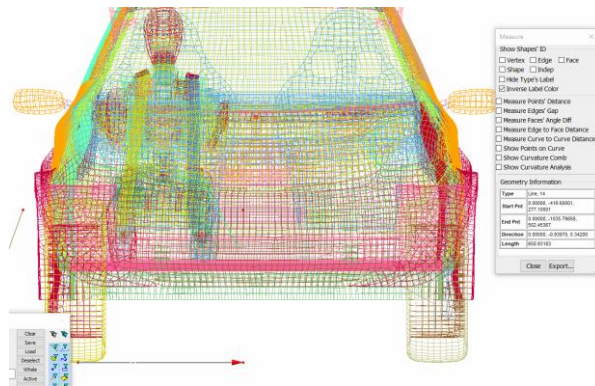
A continuación, se especifica donde se encuentra el punto, en primera instancia consta de la altura entre el piso, como siguiente instancia entre el punto medio de la rueda lateral, y finalmente entre la distancia entre ejes todos estos referenciados con el punto de centro de gravedad están especificados a continuación en el cuadro length en mm.

Figura 60

Punto exacto del centro de gravedad

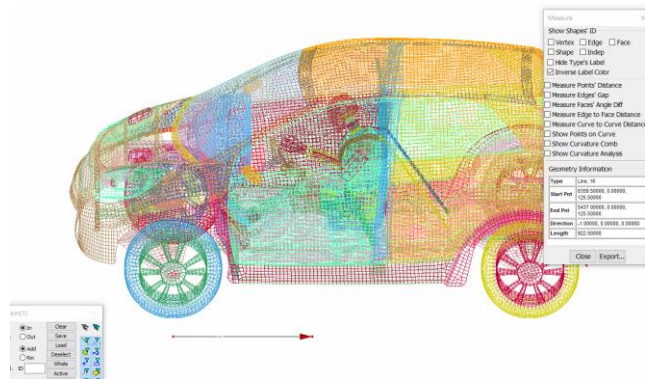


Medida del centro de gravedad al suelo 609.667 mm



Medida del centro de gravedad hacia el lateral derecho 658.93183

mm



Medida del centro de gravedad hacia un eje 922.5mm

3.2.5. **Cálculo del peso de modelos**

Para el cálculo de centro de gravedad de los modelos realizados se debe realizar los siguientes pasos:

Element tools → Measure (en esta parte se seleccionará inertial y click en all) aquí aparecerá el peso del vehículo y otras características que se mencionan a continuación en la tabla 14.

Tabla 14*Unidades del modelo mm ms kg*

Condición	Valor
Velocidad	13.41 mm/ms
Gravedad	0.0098 mm/ms ²
Contactos	Generales entres todas las partes
Maniquí	Hibrido III 95%hombre
Peso del vehículo + conductor	1364.81 Kg

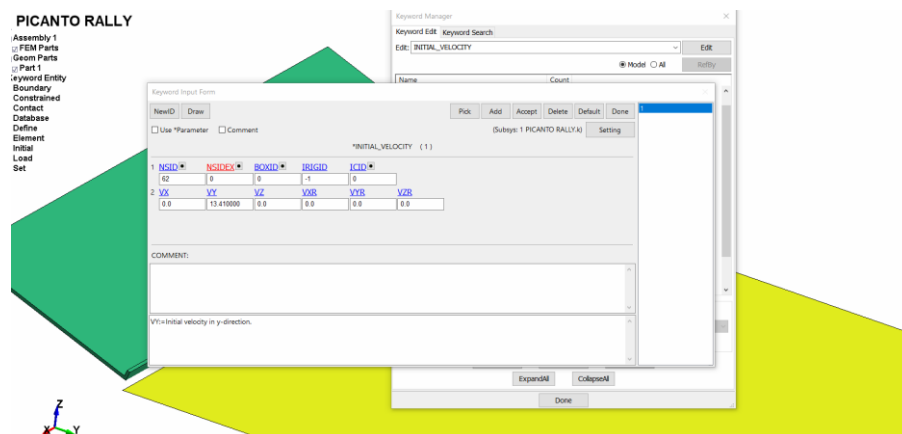
Es necesario especificar que en esta misma opción se puede medir la distancia entre la entre nodos, es decir, podemos medir la distancia entre la cabeza del piloto con la estructura de seguridad en el punto de más distorsión de la estructura, solamente cambia la selección de inertial se selecciona Dist N2N.

3.2.6. **Velocidad del automóvil**

Para la velocidad del automóvil tenemos que realizar lo siguiente:

Mosel and Part → Entity Creation → Initial → Velocity (se coloca la velocidad en y dependiendo a donde se quiera realizar la velocidad observando el sistema de coordenadas)

Figura 61
Asignación de velocidad según normativa NTHSA



3.2.7. Asignación de materiales

Para la asignación de materiales tenemos que tener las propiedades del material especificadas en la tabla “12” pero en la tabla “15” se especifica para la resolución en el programa CAE.

Tabla 15

Propiedades de material

Densidad	7.800e-06 Kg/mm3
Esfuerzo de cedencia (σ_y)	0.317GPa
Esfuerzo último de tracción (σ_u)	0.427 GPa
Módulo de Young	200 GPa
Coeficiente de Poisson	0.3
Deformación unitaria máxima	0.32mm/mm

Para colocar el material nos dirigimos al material 24 que es para materiales que trabajan en la zona plástica.

Model and part → Keyword manager → All → Mat → 024

Piecewise_Linear_Plasticity e ingresamos los datos

Figura 62

Asignación de material

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 malladyna.key) Setting

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (0)

TITLE
material acero plastico

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
1		7.8e-9	2e5	0.3		0.0	0]	0.0
2	C	P	LCSS	LCSR	VP	Enter data into text field		
2	0.0	0.0	0	0	0.0			
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

FAIL:= Failure flag:
 LT.0.0: User defined failure subroutine is called to determine failure
 EQ.0.0: Failure is not considered. Recommended if failure is not of interest.
 GT.0.0: Plastic strain to failure. When the plastic strain reaches this value, the element is deleted from the calculation.

Donde

RO: Densidad de masa kg/mm³

E: Módulo de Young (Mpa)

PR: Radio de poisson

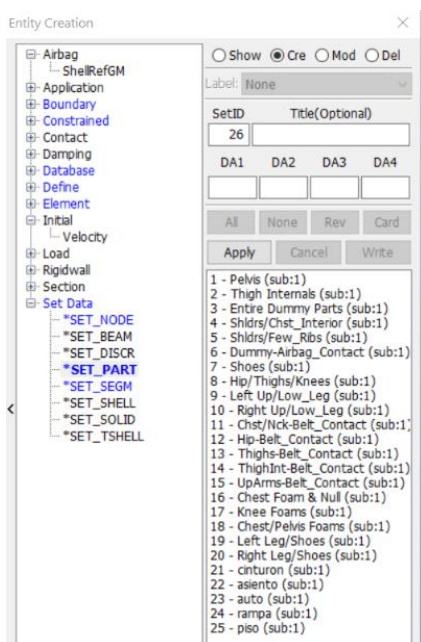
3.2.8. Asignación de contactos

Para generar un contacto realizamos los siguientes pasos:

Entity creation → Set Data → Set part → Cre → Seleccionamos todo el vehículo y ponemos aceptar posteriormente se selecciona el piso y otra vez en aceptar.

Figura 63

Asignación de contactos

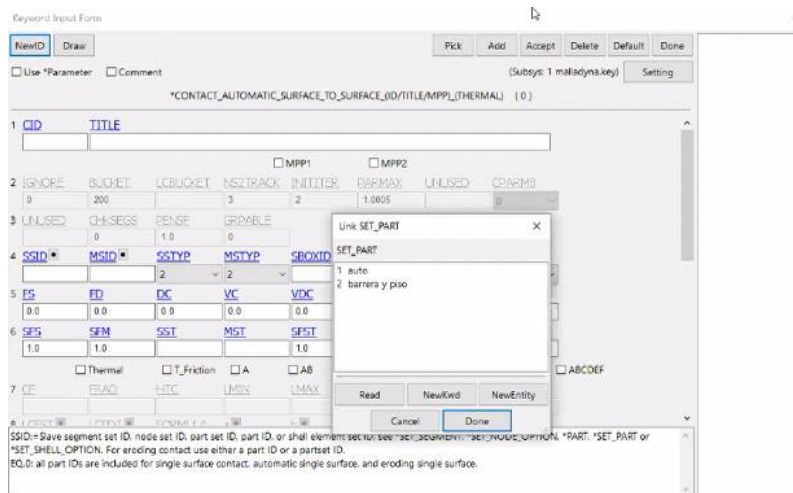


Una vez realizado este paso debemos definir cuál es el contacto master y el contacto esclavo, el master viene a ser el estático y el esclavo el dinámico, es decir, el que está en movimiento:

Model and part → Keyword manager → All → Contact → Automatic Surface to Surface

Figura 64

Asignación de esclavo y master a contactos



En SSID significa esclavo para este caso seleccionamos el set del auto que se creó y para el MSID se selecciona el maestro en este caso el piso con quien va hacer el contacto.

3.3 Solución

Para el proceso de solución de los modelos se cuenta con el tiempo en que se desea realizar la simulación y el número de veces en que se va a realizar un análisis en un determinado tiempo, es decir, que se puede realizar N análisis en un tiempo definido.

3.3.1. *Proceso de solución de modelo FEM*

Para este proceso asignamos el tiempo de simulación y el tiempo en que va a realizar un análisis el programa, es decir, si el tiempo de simulación durara 2.5s.

Model and part → Keyword manager → All → Coctact → Automatic Surface to Surface 2.5s

Figura 65

Tiempo de simulación

Keyword Input Form

Clear Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment

(Subsys: 1 malladyna.key) Setting

*CONTROL_TERMINATION (0)

1	ENDTIM	ENDCYC	DTMIN	ENDENG	ENDMAS	NOSOL
	0.16	0	0.0	0.0	100000000.0	0

COMMENT:

Current Card Id is 151

Luego seleccionamos time step lo cual significa el número de simulaciones que vamos a requerir en ese tiempo, es decir, el número de análisis por un determinado tiempo, para este caso se utilizará análisis cada 1ms.

Figura 66

Número de análisis en un determinado tiempo

Keyword Input Form

Use *Parameter Comment

(Subsys: 1 malladyna.key)

*CONTROL_TIMESTEP (0)

1	DTINIT	TSSEAC	ISDQ	ISLIMI	DT2MS	LCTM	ERODE	MS1ST
	0	0.9	0	0.0	-1e-d	0	0	0
2	DT2MSE	DT2MSLC	IMSCL	UNUSED	UNUSED	RMSCCL		
						0.0		

COMMENT:

DT2MS:=Time step size for mass scaled solutions (default: set to 0.0).

Figura 67

Secuencia de vuelco de vehículo sin sistema de protección

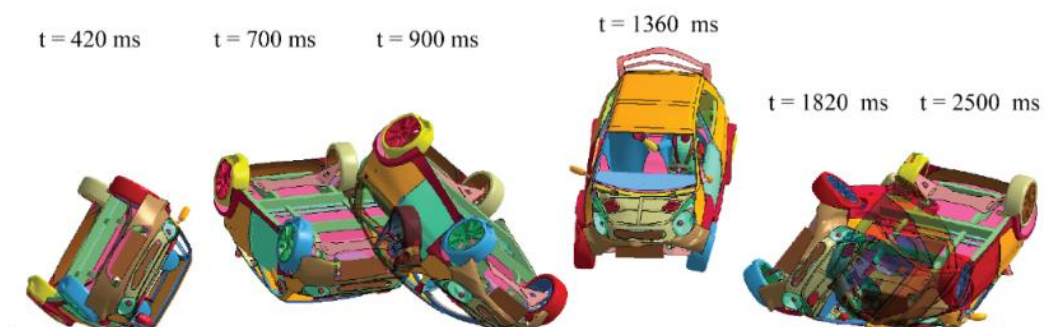
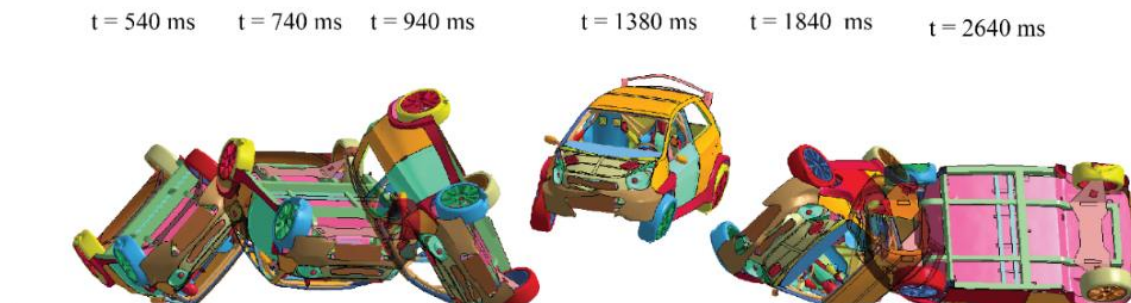


Figura 68

Secuencia de vuelco de vehículo con sistema de protección tipo A.



4. CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis de resultados

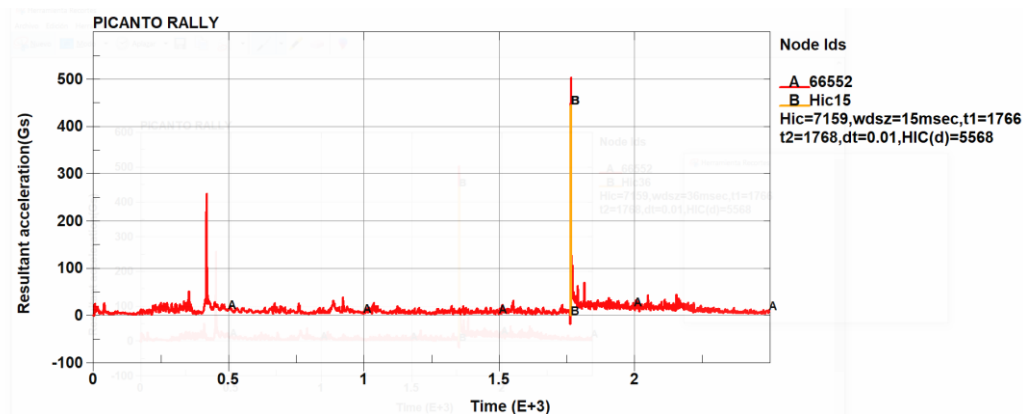
Para este capítulo ya ingresado los datos propuestos anteriormente procedemos a observar que resultados arroja las simulaciones.

4.1.1. Resultado de índice de lesión de la cabeza HIC 15 en maniquí de pruebas de impacto

Se analiza en primer lugar el Hic15 de un automóvil sin estructura de seguridad en la figura 70 el cual presenta un índice de 7159 lo que representa que no es fiable para la seguridad del pasajero pues tiende a estimar una lesión grave o la muerte del pasajero puesto que no debe exceder los 1000 de Hic15 lo cual indica CEPE

Figura 70

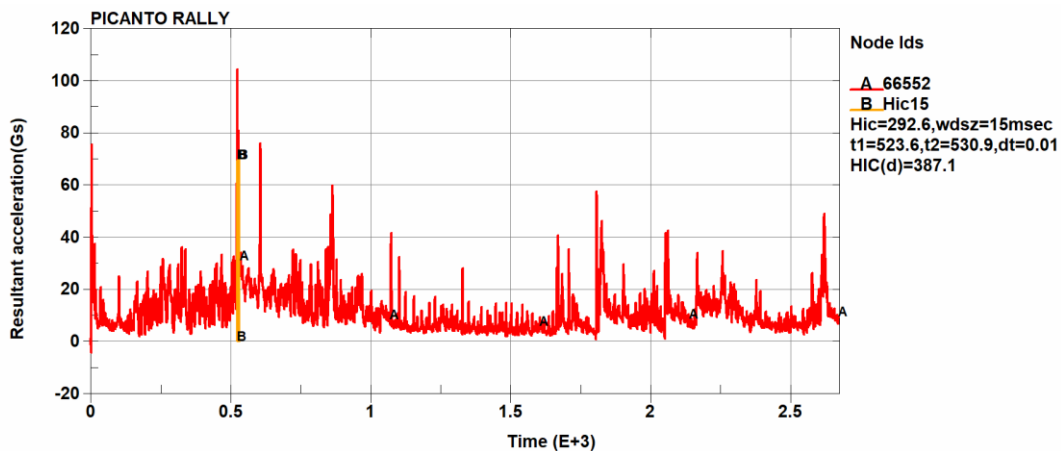
Hic15 vuelco sin sistema de protección



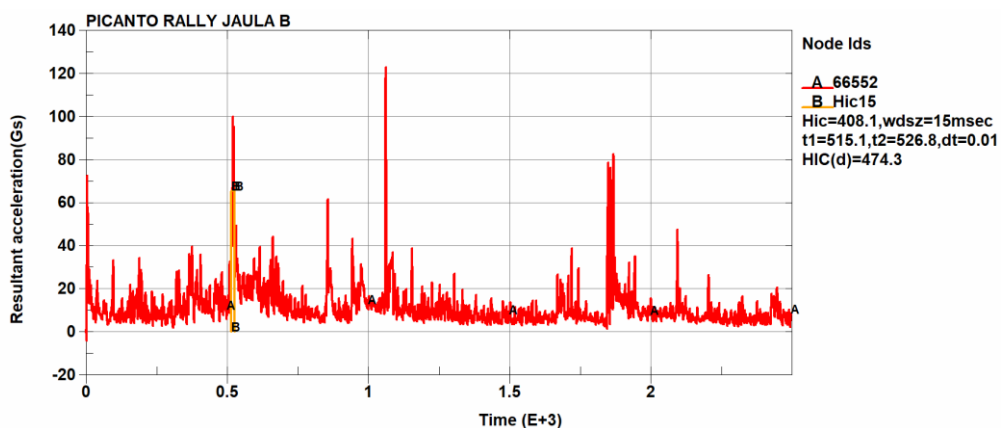
En la figura 71 se analiza la primer propuesta de jaula "A" en el cual se puede observar que el Hic15 se encuentra en un rango aceptable para la supervivencia del ocupante puesto que esta en 292.6 y esta presentado en el primer contacto del auto con el suelo.

Figura 71

Hic15 Vuelco con estructura A



En la figura 72 se analiza la segunda propuesta de estructura de seguridad jaula “B” el cual indica un Hic15 de 408.1 lo cual sigue siendo efectiva puesto que no sobrepasa a los 1000 que dice la normativa, y se determina que esta estructura también es fiable.

Figura 72*Hic15 Vuelco con estructura de seguridad B*

4.1.2. Esfuerzos y deformación de estructura de seguridad

Se analiza el esfuerzo de Von Mises en el punto más crítico de cada estructura, es decir, en el primer caso a 1766 a 1768ms en el cual la persona tiene un mayor

incremento del Hic15, en la figura 73-74 muestra que parte del techo choca con la cabeza del conductor haciendo que este aumente la probabilidad de muerte en un impacto.

Figura 73

Esfuerzo de Von Mises de simulación sin estructura de seguridad

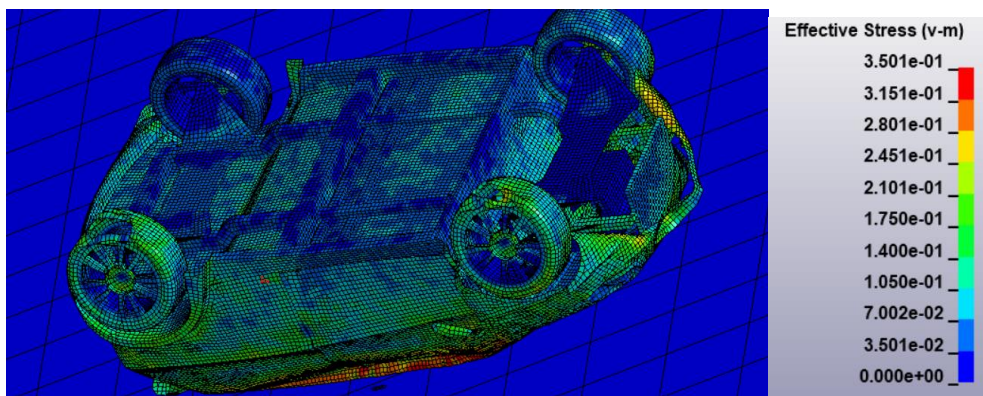
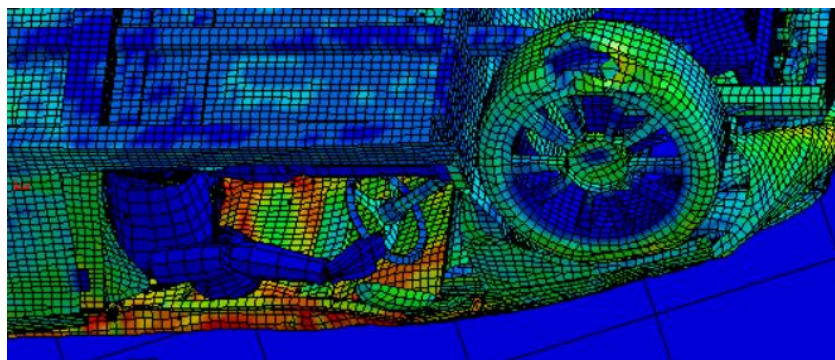


Figura 74

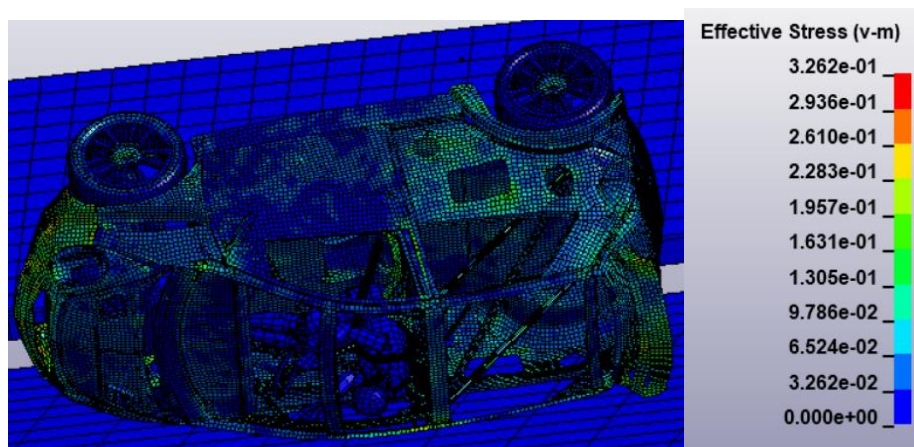
Colisión de maniquí hybrid III con estructura.



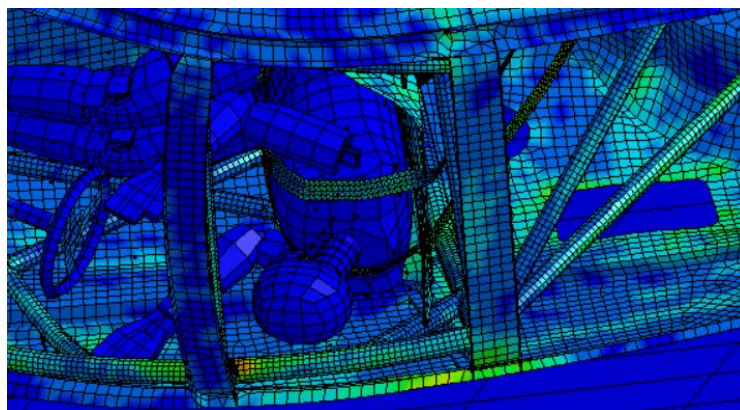
Para el segundo caso con la jaula "A" se puede denotar la figura 75-76 en la cual se puede observar que la estructura es efectiva al momento del impacto sin llegar a colisionar la cabeza con la estructura de seguridad ya deformada.

Figura 75

Esfuerzo de Von Mises de simulación con estructura de seguridad A

**Figura 76**

Separación de maniquí hybrid III con de estructura de seguridad "A"

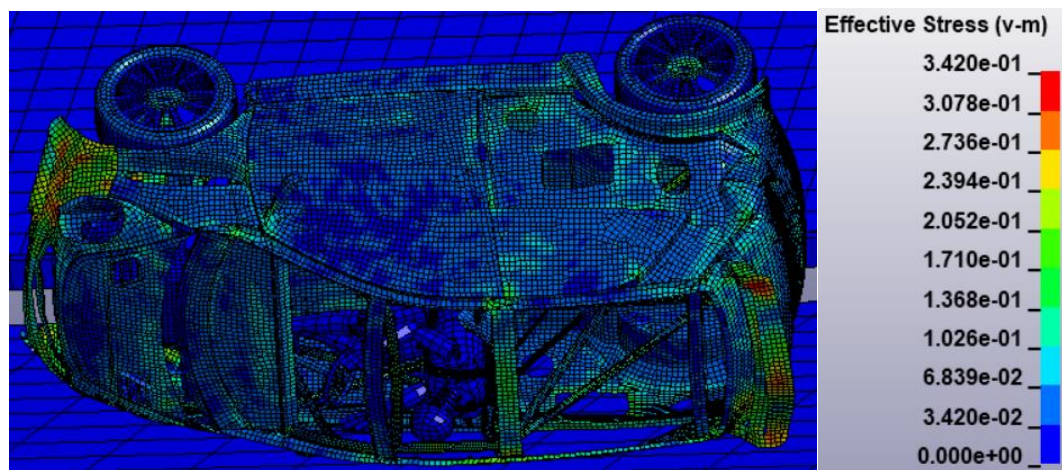


Se puede analizar que en este caso la cabeza del piloto no tiende a topar con la estructura de seguridad proponiendo así una estructura de seguridad eficaz para la supervivencia el piloto.

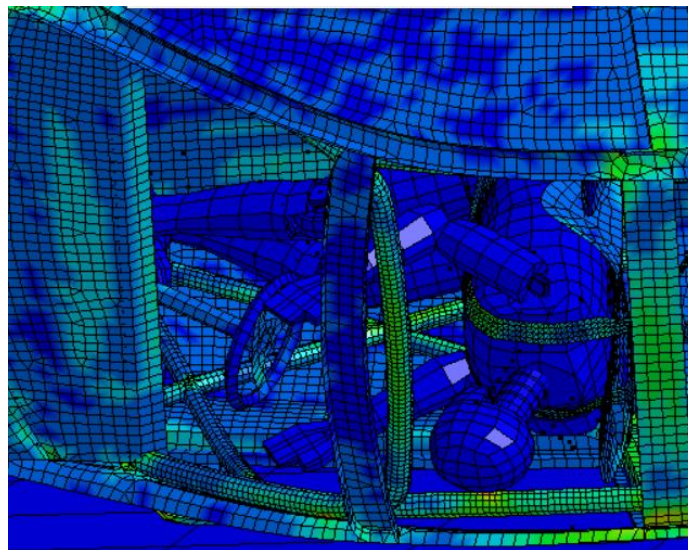
Para la última propuesta de estructura de seguridad jaula "B" en la figura 77-78 obtenemos los siguientes resultados de esfuerzo de Von Mises.

Figura 77

Esfuerzo de Von Mises de simulación Estructura de seguridad B

**Figura 78**

Colisión de estructura de seguridad "B"



En esta estructura de seguridad se puede observar claramente que el conductor tiene un contacto ligero con la estructura de seguridad lo que provoca que tenga un aumento en el Hic15, pero como se analizó anteriormente se encuentra dentro del parámetro para la supervivencia y no tener lesiones graves en la cabeza.

4.1.3. Balance de energías

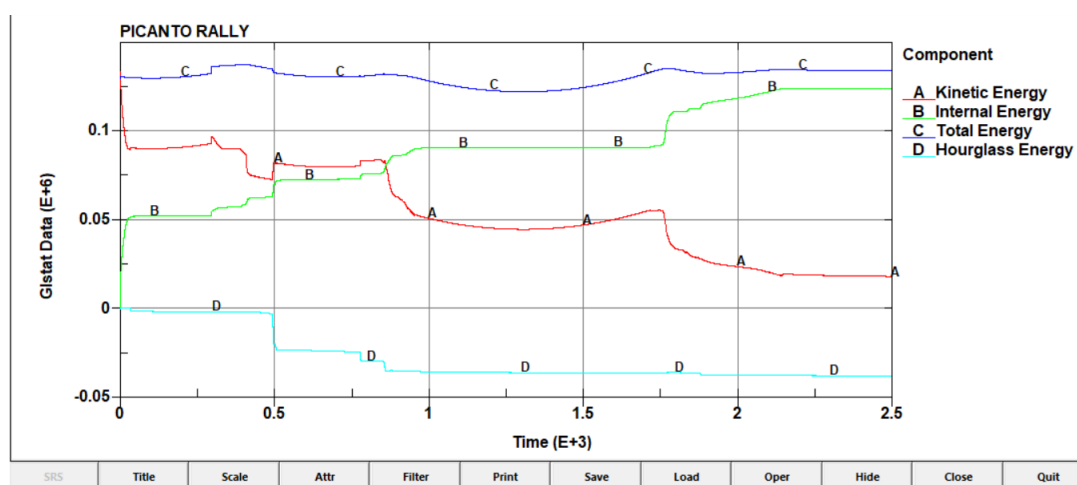
Las energías que se va a analizar en los diferentes tipos de estructuras analizadas son la energía cinética, interna, la total, esta última es la suma de las otras energías y debe permanecer en una proporción constante.

La energía interna incluye la energía de deformación elástica y el trabajo que se realiza en forma permanente, es decir, incluye el trabajo realizado por las fuerzas de presiones que se aplican al cuerpo analizado, así como el trabajo realizado por velocidad, desplazamiento y aceleración.

La energía de Hourglass el cual es un error matemático no debe ser superior al 10% de la energía interna y en el gráfico se representa de color celeste, se puede observar claramente que tiende a ir al negativo lo que quiere decir que no supera el porcentaje antes mencionado por lo cual la simulación sería la idónea para este caso.

Figura 79

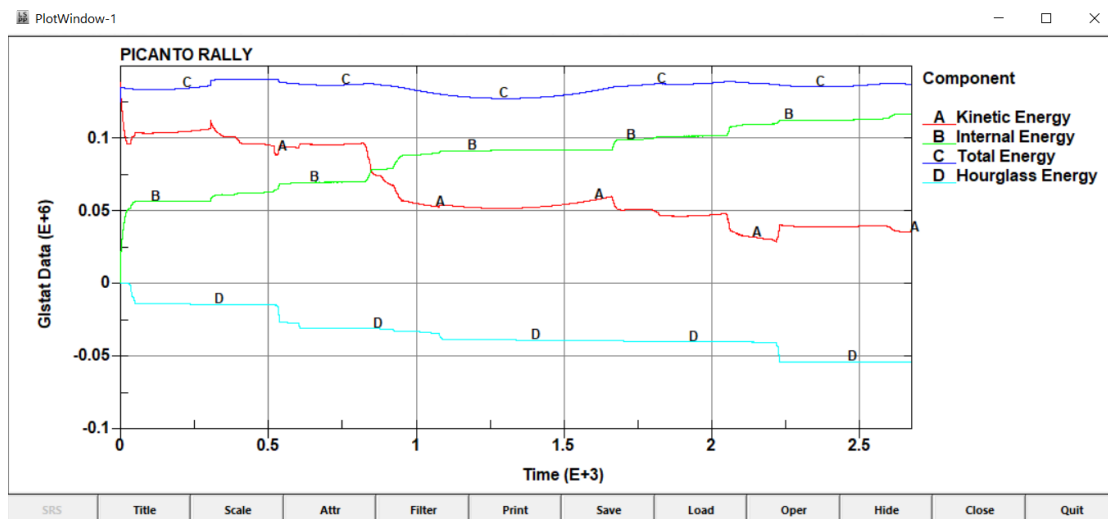
Balance de energías del modelo sin estructura de seguridad



Para el siguiente caso con la propuesta de jaula "A" nos encontramos con un balance de energías similar el análisis realizado sin la estructura se concluye que está bien realizado el análisis.

Figura 80

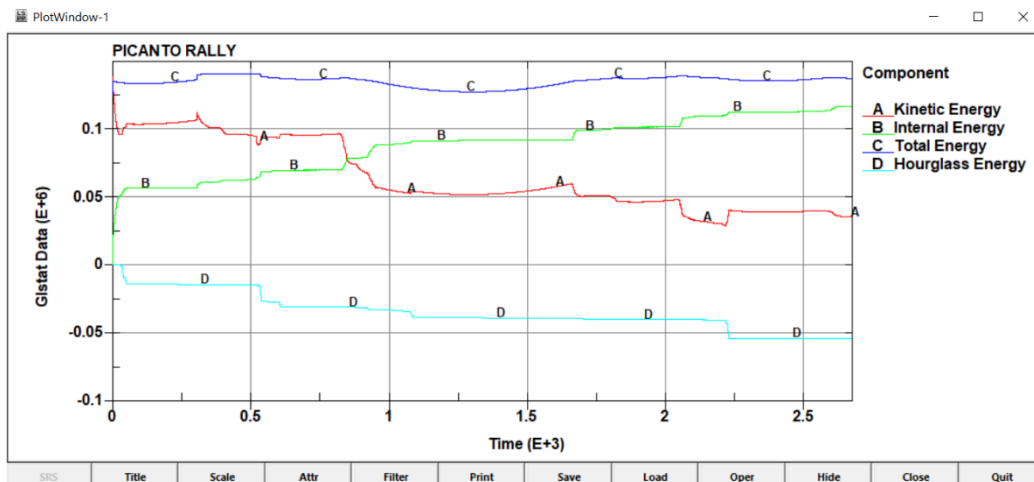
Balance de energías del modelo con jaula A



Par el último caso la propuesta jaula “B” obtenemos las siguientes gráficas se nota una similitud constante entre las tres gráficas para lo cual se entiende que las simulaciones arrojaran datos que son semejantes a lo que sucederá en la vida real.

Figura 81

Balance de energías del modelo con jaula B



4.2 Resultados de estructura de seguridad

De los resultados obtenidos anteriormente se puede definir que las estructuras de seguridad propuestas anteriormente cumplen con los requisitos de la FIA, es decir del anexo j artículo 253.

4.2.1. *Análisis de resultados de estructuras de seguridad.*

Sin estructura de seguridad.

Este caso se define 2 vuelcos en 2.5s, la distancia inicial entre la cabeza y la estructura de seguridad es de 257.505mm. La distancia entre el primer vuelco del automóvil, es decir, el primer contacto de la estructura de seguridad con el piso suscita a los 3346.41mm con un tiempo de 0.420 s. El punto crítico sucede a los 1.76 s, es decir, en el segundo vuelco en la cual el conductor sufre una lesión grave puesto que sobrepasa el HIC15 es de 7159 lo que sobrepasa en alrededor de un 700% por lo establecido por CEPE con lo que se determina que el conductor muere, teniendo una deformación de la estructura de 350.15mm medida en la parte de contacto de la cabeza debido a las cargas dinámicas que sufre la estructura al momento del contacto con el piso, con lo que la cabeza topa excesivamente a la estructura por ende el HIC15 es elevado se puede determinar que la distancia final del vuelco se presenta a los 13011.6 mm ya teniendo con la detención total del vehículo.

Con estructura de seguridad "A"

Se define dos vuelcos en 2.5s, la distancia inicial entre la cabeza y la estructura de 197.18mm lo cual es inferior a la distancia sin estructura de seguridad y se asume que tendrá contacto directo con la estructura de seguridad. Sin embargo, nunca llega a existir contacto, teniendo el punto más crítico a los 0.539s con distancia entre la cabeza y la estructura de 42.151mm y un HIC15 de 292.6 obteniendo menos del 30% de lo

establecido por CEPE lo que se determina que el conductor no sufre lesión sobreviviendo al siniestro, es recalable mencionar que el primer contacto entre el auto y el piso sucede a los 0.54s con una distancia de 4107.82 mm es decir que el punto más crítico de HIC15 sucede antes del contacto del automóvil y la superficie de contacto con lo cual se determina que se debe a la carga másica, es decir, que mientras más elevado es el peso tiende a sufrir un HIC15 antes del contacto y el tiempo y distancia de contacto de estructura con el suelo elevado a comparación del análisis del automóvil sin estructura de seguridad.

Con estructura de seguridad “B”

Se define dos vuelcos en 2.5s, la distancia entre la cabeza y la estructura es de 197.18mm el punto más crítico del HIC15 sucede a los 0.408s teniendo un valor de 408.1 lo que conlleva a un 40.8% de lo establecido por CEPE teniendo una lesión leve en la cabeza leve. El primer contacto entre el suelo y el automóvil suscita a los 0.580s con una distancia de 4257.3mm. En esta propuesta de estructura de seguridad el ocupante si tiene contacto con la estructura de seguridad, se determina que esta se deforma 48.514mm. con lo que se afirma que mientras el ocupante tenga un contacto con la estructura se eleva el HIC15.

4.2.2. Comparación de estructuras de seguridad.

En la tabla 16 se muestra de una manera resumida los datos obtenidos en la simulación, cabe recalcar que el ensayo FMVSS208 realiza este mismo tipo de análisis para sus simulaciones, obteniendo datos interesantes en cada uno de estos y logrando a determinar en casos extremos que la vida de la persona ya tiende suscitar una lesión grave antes del impacto de la estructura con el piso.

Tabla 16*Comparación de resultados de estructuras de seguridad*

Propuesta	Sin jaula	Propuesta A	Propuesta B
HI15	7159	292.6	408.1
Peso del vehículo completo (kg)	1364.81	1573.56	1621.21
Velocidad de impacto (mm/ms)	13.41	13.41	13.41
Tipo de cinturón de seguridad	6 puntos	6 puntos	6 puntos
Distancia de primer impacto DP (mm)	3346.41	4107.82	4257.3
Distancia final recorrida DF (mm)	13011.6	14482.9	13242.9
Vueltas completas V	2	2	2
Distancia de estructura de seguridad con cabeza inicial (mm)	257.505	197.18	197.18
Deformación de estructura de seguridad (mm)	350.15	42.151	48.514
Distancia de cabeza con estructura de seguridad en máxima deformación	Colisiona	42.151mm	Colisiona

CAPÍTULO V

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- El modelado de automóviles es factible realizarlo en el programa CAD, puesto que se manipulan dimensiones, trabajar por medio de tipo Shell, es decir, cascarón para que posteriormente se den dimensiones en el programa CAE y por medio de otros parámetros se pueda obtener una simulación adecuada para que se asemeje a la vida real.
- Por medio de las simulaciones realizadas en el programa CAE se obtienen resultados que se asemejan a la vida real, con esto se logra evitar una inversión fuerte en los ensayos, anteriormente para identificar si un modelo de un automóvil funcionaba, era necesario invertir una fuerte cantidad de dinero para un vehículo y realizar pruebas reales.
- Se concluye que aumenta el grado de supervivencia mientras se agregan las estructuras de seguridad que son implementadas por la FIA porque antes de agregarlas el conductor muere debido a que el HIC15 es elevado en un 715.9% de lo que recomienda CEPE y agregando estructuras de seguridad estas disminuyen considerablemente obteniendo resultados de supervivencia en el siniestro, con la estructura "A" el HIC15 es menor al 30% y la propuesta "B" mayor a un 40% pero no sobrepasa a lo establecido por CEPE.
- La propuesta de estructura "A" es la más conveniente debido a que no se contempla en ningún momento contacto entre la cabeza y la estructura de seguridad teniendo un valor máximo de aproximación de 42.151mm con lo que se determina que mientras la cabeza tenga contacto con algún

tipo de sólido el HIC15 aumenta, se llega a esta conclusión pues en la propuesta de estructura "B" la cabeza tiende a tener contacto leve y el HIC15 aumenta con un valor de 408.1 pero sobrevive debido a que se encuentra dentro de los parámetros establecidos por CEPE, sin embargo cuando existe un contacto en proporciones mayores como el análisis propuesto sin estructura de seguridad el HIC15 es mayor con un valor de 7159 y el nivel de supervivencia del conductor se ve reducido drásticamente incluso llega a perder la vida.

- Se determina que mientras más peso tenga el cuerpo más largo será el contacto de la estructura con el piso entre tiempo y distancia pues el peso del análisis sin de estructura de seguridad es de 1364.81kg y la distancia entre el primer vuelco del automóvil es de 3346.41mm a los 0.420s. Mientras que en la propuesta de estructura "A" el peso es de 1573.56kg y el contacto sucede a los 0.54s con una distancia de 4107.82mm mientras que en la propuesta de estructura "B" tiene un peso de 1621.21kg y el primer contacto suscita a los 0.580s con una distancia de 4257.3mm.

5.2 Recomendaciones

- Es recomendable realizar análisis en otras partes del cuerpo, es decir que pasa en el pecho en las piernas, etc para obtener datos más reales de lo que sucederá dentro de la cabina del piloto puesto que solo se analiza en esta investigación lo que sucede en la cabeza.
- Se recomienda para el caso del mallado tener un buen diseño del auto, si no se lo tiene el mallado suele dar errores y por ende la simulación no

funciona o arrojará datos erróneos cuyo caso sería un peligro si posterior al diseño se realizara un prototipo.

- Se recomienda utilizar el programa CAE para ensayos no lineales, pues nos da datos precisos al momento de un ensayo, este programa puede analizar lo que sucede cada milésima de segundo dando así un resultado más acorde a la vida real.
- Se recomienda implementar la estructura de seguridad "A" debido a que esta es la más factible pues al momento de realizar el análisis arroja resultados muy buenos de supervivencia del piloto, el Hi15 es inferior al 30% y nunca llega a existir contacto entre la cabeza y la estructura de seguridad.

Bibliografía

- CEPE. (10 de 07 de 2015). Comisión Económica para Europa (CEPE) de las Naciones Unidas — Prescripciones uniformes sobre la homologación de los vehículos en lo relativo a la protección de sus ocupantes en caso de colisión lateral. *Reglamento 95*. Europa .
- Días Morcillo, A. (s.f.). Métodos de mallado y algoritmos adaptivos en dos y tres dimensiones para la resolución de problemas electromagnéticos cerrados mediante el método de elementos finitos. Valencia, España.
- Díaz Solórzano, S., & González Díaz, L. (2010). Reflexiones sobre los conceptos velocidad y rapidez de una partícula en física. *REVISTA MEXICANA DE FÍSICA*, 9.
- EURO-NCAP. (11 de 2019). *ASSESSMENT PROTOCOL – ADULT OCCUPANT PROTECTION*. Europa.
- falp.com*. (14 de Diciembre de 2015). Obtenido de <http://www.falp.com/wp-content/uploads/2017/07/T%C3%A9cnicos-Anexo-J-Art253-8-Estructuras-de-Seguridad-hasta-2016.pdf> recuperado el (01 de enero del 2021)
- FIA. (14 de 12 de 2015). Estructura de seguridad. *Anexo J Artículo 253*.
- Fitch, J. (13 de Diciembre de 2007). *Motor truck engineering handbook*. Michigan: Society of automotive engineers.
- Font Mezquita, J., & Dols Ruiz, J. (2006). Tratado sobre automóviles. Tomo IV. La dinámica del automóvil. Valencia: Universitat Politècnica de València.

García Ramirez , Y. D. (05 de Noviembre de 2014). ACELERACIONES Y DESACELERACIONES DE VEHÍCULOS. San Juan , Argentina .

ingemecanica. (s.f.). Obtenido de *ingemecanica.com*:

<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn69.html> recuperado el (15 de enero del 2021)

King, A. I. (2018). *The Biomechanics of Impact Injury* . Switzerland: Springer International Publishing .

Martínez Sáez, L., Peláez Bravo, R., García Álvarez, A., & Gómez Lopez, A. (11 de Noviembre de 2016). Optimización de modelos en elementos finitos de los maniqués Hybrid-III percentiles 50% y 95% para su aplicación en transporte ferroviario. *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, pág. 8.

MEDINA, C. (17 de Septiembre de 2015). *motorydominio.com*. Obtenido de <http://www.motorydominio.com.mx/investigaciones/centro-de-gravedad-de-los-vehiculo#.X5hD94hKhPY>

Paver, J. G. (2008). Rollover Crash Neck Injury Replication and Injury Potential Assessment. *IRCOBI Conference – Bern (Switzerland)*, 4.

Peter A. Luepke, J. W. (2008). Rollover Crash Tests on Dirt: An Examination of Rollover Dynamics. *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. | Volume 1 | Issue 1*, 13.

RAFAEL MORALES, M. Y., & HERNÁNDEZ GUZMÁN, A. (2012). Manual de conducción técnica de vehículos automotores diesel: segunda edición. Secretaría de comunicaciones y transporte .

SANCHES, J. M. (2014). Aplicación de los cálculos de velocidad a la reconstrucción de accidentes el informe pericial. Club universitario.

Anexos