



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

TEMA:

SIMULACIÓN NUMÉRICA Y ANÁLISIS DE LAS LESIONES EN LA EXTREMIDAD INFERIOR DE UN PEATÓN EN UNA COLISIÓN POR ATROPELLAMIENTO

AUTOR: EDWIN SAMUEL PINANJOTA CONEJO

DIRECTOR: ING. FERNANDO RENATO RAMÍREZ PAREDES PHD.

IBARRA – ECUADOR

2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

En mi calidad de director del plan de trabajo de grado, previo a la obtención del título de Ingeniería Automotriz, nombrado por el Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas.

CERTIFICACIÓN

Que una vez analizado el plan de grado cuyo título es "SIMULACIÓN NUMÉRICA Y ANÁLISIS DE LAS LESIONES EN LA EXTREMIDAD INFERIOR DE UN PEATÓN EN UNA COLISIÓN POR ATROPELLAMIENTO" presentado por el señor: Edwin Samuel Pinanjota Conejo con cédula de identidad 1755612353, doy fe que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte de los señores integrantes del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Ibarra, a los 12 días de julio del 2023.
Atentamente

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Fernando", is written over a horizontal line.

Ing. Fernando Renato Ramírez Paredes. PhD.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1755612353		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Pinanjota Conejo Edwin Samuel		
DIRECCIÓN:	Cayambe – Otón – Kactus y Sucre		
EMAIL:	espinanjotac@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	341-1870	TELÉFONO MÓVIL:	0979171905

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	SIMULACIÓN NUMÉRICA Y ANÁLISIS DE LAS LESIONES EN LA EXTREMIDAD INFERIOR DE UN PEATÓN EN UNA COLISIÓN POR ATROPELLAMIENTO
AUTOR (ES):	PINANJOTA CONEJO EDWIN SAMUEL
FECHA: DD/MM/AAAA	12/07/2023
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERÍA AUTOMOTRIZ
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. FERNANDO RAMÍREZ. PhD

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 12 días de julio del 2023.

AUTOR:

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized initial 'E' followed by a surname, written over a horizontal line.

Firma

Edwin Samuel Pinanjota Conejo

C.I.: 175561235-3

Dedicatoria

Mamá, papá y ñaño por su legado lleno de valores, amor y sabiduría.
Con todo mi amor y gratitud.

Pinanjota Samuel

Agradecimiento

A Dios por permitirme disfrutar esta vida junto a mi familia con amor y salud. Por forjarme día a día para cumplir las metas que me proponga y superar mis desafíos.

A mi familia por ser mi pilar fundamental en mi formación ética, profesional y personal.

A mi director PhD. Fernando Ramírez y asesor MSc. Ramiro Rosero, que enaltecen el presente trabajo con su guía y conocimiento. Así como a la Universidad Técnica del Norte por permitirme evolucionar profesionalmente a lo largo de estos años.

Pinanjota Samuel

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvii
INTRODUCCIÓN	xix
CAPÍTULO I	1
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 OBJETIVOS	1
1.1.1 OBJETIVO GENERAL	1
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	1
1.3 ALCANCE	2
1.4 ANTECEDENTES	3
1.5 SITUACIÓN ACTUAL	4
1.6 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
1.7 VARIABLES	6
1.8 HIPÓTESIS	6
1.9 PARTICIPACIÓN DE ATROPELLOS EN SINIESTROS DE TRÁNSITO DEL ECUADOR 2021	6
1.10 ANTROPOMETRÍA DE LA POBLACIÓN ECONÓMICAMENTE ACTIVA	9
1.11 ÍNDICES DE ATROPELLAMIENTOS 2021	11
1.12 PARQUE AUTOMOTOR ECUATORIANO	13
1.13 ZONA DE IMPACTO	16
1.14 IMPACTADOR TLR	17
1.14.1 GEOMETRÍA DESCRIPTIVA	18
1.14.2 FIABILIDAD MODELO TRL	21
1.15 GLOBAL NCAP	22

1.16 CARROCERÍA: SECCIÓN DELANTERA	24
CAPITULO II	27
2. METODOLOGÍA	27
2.1 SELECCIÓN DE LOS MODELOS DE VEHÍCULOS PARA ENSAYO DE PARACHOQUES	27
2.1.1 AUTOMÓVILES	28
2.1.2 CAMIONETAS	29
2.1.3 SUV'S	30
2.2 MODELADO CAD AUTOMOTRIZ	30
2.2.1 TÉCNICA DE MODELADO EN 3D DE AUTOS	31
2.3 CRITERIOS PARA EL MALLADO FEM	40
2.3.1 MODELOS DE MATERIALES AUTOMOTRICES	42
2.4 MODELOS Y PROPIEDADES DE MATERIALES DEL IMPACTADOR TRL	46
2.4.1 MODELOS DE MATERIALES *Mat DEL IMPACTADOR TRL	53
2.4.2 INTERFACES DE CONTACTO	57
CAPITULO III	61
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
3.1 MODELOS Y PLANOS CAD AUTOMOTRICES	61
3.2 SIMULACIÓN: CERTIFICACIÓN DINÁMICA DEL IMPACTADOR TRL SEGÚN EEVC	61
3.2.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS: SIMULACION DE CERTIFICACIÓN DINÁMICA	65
3.3 MALLA FEM	67
3.3.1 PROPIEDADES FEM DEL IMPACTADOR TRL	67
3.3.2 PROPIEDADES FEM DE LOS MODELOS AUTOMOTRICES	68
3.3.3 MODELOS AUTOMOTRICES MALLADOS	69

3.4 SIMULACIÓN Y SOLUCIÓN	71
3.4.1 SIMULACIÓN CHEVROLET CAPTIVA	72
3.4.2 SIMULACIÓN CHEVROLET D-MAX	73
3.4.3 SIMULACIÓN CHEVROLET SAIL	74
3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	76
3.5.1 ACELERACIÓN DEL TERCIO SUPERIOR DE LA TIBIA	76
3.5.2 ÁNGULO DE FLEXIÓN LATERAL DE LA RODILLA	80
3.5.3 DESPLAZAMIENTO DE CORTE MÁXIMO DE LA RODILLA	85
3.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS	88
3.7 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS VARIABLES RESPECTO A PACKAGE DE OTROS VEHÍCULOS	92
CONCLUSIONES	96
RECOMENDACIONES	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXOS	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Mortalidad según edad del peatón	8
Tabla 1.2 Medidas antropométricas	10
Tabla 1.3 Siniestros y de atropellamiento durante el 2021	11
Tabla 1.4 Lesionados y por atropellamiento durante el 2021	12
Tabla 1.5 Fallecidos y por atropellamiento durante el 2021	12
Tabla 1.6 Vehículos nuevos vendidos durante el 2021	14
Tabla 1.7 Participación de vehículos en siniestros, lesionados y fallecidos según su segmento	14
Tabla 1.8 Congruencia de resultados prácticos vs simulación	22
Tabla 1.9 Valores límites de las variables según organismos de seguridad peatonal	23
Tabla 2.1 Automóviles nuevos más vendidos durante el 2021	28
Tabla 2.2 Camionetas nuevas más vendidas durante el 2021	29
Tabla 2.3 SUV's nuevos más vendidos durante el 2021	30
Tabla 2.4 Calidad de malla acorde a los rangos de oblicuidad	40
Tabla 2.5 Propiedades mecánicas de los materiales	43
Tabla 2.6 Partes constitutivas del impactador TRL según normativa europea	46
Tabla 2.7 Identificación de partes del TRL y sus materiales	47
Tabla 3.1 Límites permisibles del EEVC/WC17 para la certificación del modelo TRL	62
Tabla 3.2 Resultados obtenidos de la prueba de certificación dinámica	66
Tabla 3.3 Características FE del impactador TRL	67
Tabla 3.4 Especificaciones del mallado de los modelos automotrices	69
Tabla 3.5 Secuencia de la simulación: Atropellamiento Chevrolet Captiva vs TRL Legform	72
Tabla 3.6 Secuencia de la simulación: Atropellamiento Chevrolet Dmax vs TRL Legform	73
Tabla 3.7 Secuencia de la simulación: Atropellamiento Chevrolet Sail vs TRL Legform	75
Tabla 3.8 Aceleraciones máximas de la rodilla producto del impacto vehicular y el tiempo de registro	79
Tabla 3.9 Ángulos de flexión máxima de la rodilla producto del impacto vehicular y el tiempo de registro	84
Tabla 3.10 Desplazamiento de corte máximo de la rodilla producto del impacto vehicular y el tiempo de registro	88

Tabla 3.11 Aceleraciones máximas de la rodilla producto del impacto vehicular	89
Tabla 3.12 Ángulos de flexión máxima de la rodilla producto del impacto vehicular	90
Tabla 3.13 Desplazamiento de corte máximo de la rodilla producto del impacto vehicular	91
Tabla 3.14 Influencia del package sobre la pierna del peatón	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Víctimas mortales en accidentes de tránsito según su participación	7
Figura 1.2 Peatones fallecidos según rango de edad	7
Figura 1.3 Regiones del cuerpo de los peatones con mayor lesividad en accidentes automovilísticos	8
Figura 1.4 Códigos antropométricos	9
Figura 1.5 Longitud: Miembro Inferior vs TRL	10
Figura 1.6 Segmentos de vehículos involucrados en siniestros, lesionados y fallecidos: entre enero y diciembre 2021	16
Figura 1.7 Definición de zonas de contacto	17
Figura 1.8 Distribución de zonas de contacto vehículo – peatón	17
Figura 1.9 Modelo FE TRL	19
Figura 1.10 Acelerómetro X200-4	20
Figura 1.11 Sección longitudinal TRL	21
Figura 1.12 Modelo FE de estructuras frontales	24
Figura 1.13 Sistemas de parachoques	25
Figura 1.14 Carrocerías inteligentes - deformación programada	26
Figura 2.1 Marco metodológico	27
Figura 2.2 Imágenes de guía en los planos tridimensionales	31
Figura 2.3 Reconocimiento de la estructura alámbrica	32
Figura 2.4 Wire frame en los planos Y-Z, X-Z y curva 3D	32
Figura 2.5 Curvas características 3D	33
Figura 2.6 Plano frontal para croquis	33
Figura 2.7 Croquis del perfil desde una vista frontal	34
Figura 2.8 Superficies limitantes	35
Figura 2.9 Superficies complejas con Splines	35
Figura 2.10 Croquis de líneas de partición	36
Figura 2.11 Líneas de partición excedentes (1), segmentación (2) y eliminación de caras (3).	37
Figura 2.12 Geometrías complejas	38

Figura 2.13 Modelo automotriz de superficies	38
Figura 2.14 Modelado del chasis, bastidor y carrocería interna	39
Figura 2.15 Validación de elementos bajo el criterio Jacobiano	41
Figura 2.16 Curva plástica de esfuerzo vs deformación del material acero del auto	45
Figura 2.17 Códigos de identificación de las piezas	52
Figura 2.18 Modelo del material *MAT_ELASTIC: Piel de neopreno	54
Figura 2.19 Modelo del material *MAT_ELASTIC: Ballestas (PID 3) y muelle parte media del muslo (PID23)	54
Figura 2.20 Modelo numérico *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY	55
Figura 2.21 Modelo del material *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY: Ligamento de la rodilla (PID 8)	55
Figura 2.22 Ensayo de compresión: Espuma Fu Chang	56
Figura 2.23 Modelo numérico: Espuma Fu Chang	57
Figura 2.24 Modelo del material *MAT_FU_CHANG_FOAM: Espuma muslo (PID 45) y espuma de la pierna (PID 44)	57
Figura 2.25 Fémur: Contactos de tipo *CONSTRAINED_RIGID_BODIES	58
Figura 2.26 Tibia: Contactos de tipo *CONSTRAINED_RIGID_BODIES	58
Figura 2.27 Contacto de tipo *CONSTRAINED_EXTRA_NODES_SET: extremo inferior del fémur (PID 28) y las ballestas del fémur (PID 3)	59
Figura 2.28 Contacto de tipo *CONSTRAINED_EXTRA_NODES_SET: ligamento de la rodilla (PID 8) con sus dos soportes rígidos (PID 4 y PID 28).	59
Figura 2.29 Contacto del tipo *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE: Rodilla – extremo inferior del fémur (PID 28) y tubo del femur (PID 1)	60
Figura 3.1 Modelos CAD automotrices	61
Figura 3.2 Deformación del impactador TRL en la simulación de la certificación dinámica	62
Figura 3.3 Onda de la aceleración máxima del tercio superior de la tibia durante la simulación de certificación dinámica	63
Figura 3.4 Onda del ángulo de flexión de la rodilla durante la simulación de certificación dinámica	64
Figura 3.5 Onda del desplazamiento de corte durante la simulación de certificación dinámica	65

Figura 3.6 Espesor del larguero vs guardachoques - Chevrolet Captiva	68
Figura 3.7 Mallado FE modelo Captiva	70
Figura 3.8 Mallado FE de modelo Sail	70
Figura 3.9 Mallado FE de modelo D MAX	71
Figura 3.10 Aceleración máxima del tercio superior de la tibia – Captiva	77
Figura 3.11 Aceleración máxima del tercio superior de la tibia – Dmax	78
Figura 3.12 Aceleración máxima del tercio superior de la tibia – Sail	79
Figura 3.13 Ángulo de flexión lateral de la rodilla	80
Figura 3.14 Lesiones en las extremidades inferiores de los peatones	81
Figura 3.15 Ejes de rodilla: Normal vs Flexión valgo	82
Figura 3.16 Ángulo de flexión máximo – Captiva	83
Figura 3.17 Ángulo de flexión máximo – Dmax	83
Figura 3.18 Ángulo de flexión máximo – Sail	84
Figura 3.19 Desplazamiento de corte máximo – Captiva	85
Figura 3.20 Desplazamiento de corte máximo – Dmax	86
Figura 3.21 Desplazamiento de corte máximo – Sail	87
Figura 3.22 Curva de probabilidad de riesgo de fractura de la tibia según las fuerzas [g] aplicadas a la rodilla	89
Figura 3.23 Curva de probabilidad del riesgo de lesión del ligamento colateral según el ángulo de flexión [°] provocado en la rodilla	90
Figura 3.24 Curva de probabilidad de riesgo de lesión del ligamento cruzado según el desplazamiento cortante [mm]	91
Figura 3.25 Cotas del Package	92

ÍNDICE DE ANEXOS

Figura AI.1 Modelo CAD: Chevorlet Captiva	104
Figura AI.2 Modelo CAD: Chevrolet Dmax	104
Figura AI.3 Modelo CAD: Chevrolet Sail	105
Figura AII.1 Planos CAD: Chevrolet Captiva	106
Figura AII.2 Planos CAD: Chevrolet Dmax	107
Figura AII.3 Planos CAD: Chevrolet Sail	108

RESUMEN

El Ecuador reporta un total de 21,352 siniestros de tránsito, de los cuales 2,474 son eventos de atropello que han dejado como consecuencia 2,379 lesionados y 398 víctimas fatales. La desproporción en lesiones y muertes se correlaciona con la infraestructura vial y, principalmente, con las conductas del conductor y del peatón. No obstante, la seguridad pasiva para los peatones juega un papel fundamental en las estadísticas de siniestrabilidad como el diseño del vehículo y sus sistemas de absorción de energía ante una colisión. La innovación en este ámbito va desde la utilización de nuevos materiales hasta la implementación de carrocerías inteligentes.

Para evaluar la eficiencia de estos sistemas atenuadores, se realizan pruebas experimentales que evalúan tanto la protección de los ocupantes dentro del habitáculo como la agresividad hacia los peatones. El impactador TRL es un claro ejemplo de dispositivo utilizado y desarrollado por uno de los primeros grupos del Comité Europeo de Vehículos Experimentales (EEVC) enfocados en la protección peatonal. Este impactador simula la pierna de un varón estadounidense en el percentil cincuenta, que también representa la antropometría P50 de la población económicamente activa, en un rango de edad de 20 a 69 años. Se consideró a la población económicamente activa de Quito como una muestra representativa debido a su migración laboral.

El criterio para la selección de los vehículos a poner a prueba son aquellos segmentos vehiculares con mayor participación en accidentes de tránsito, según lo destacado por la Agencia Nacional de Tránsito (ANT): sedanes, camionetas y SUV. Dentro de estos segmentos, se seleccionaron los vehículos más comercializados durante 2021, registrados por el Servicio de Rentas Internas (SRI), los cuales son el Chevrolet Captiva con 24,564 unidades vendidas, el Sail con 24,211 unidades vendidas y la Dmax con 38,289 unidades vendidas.

La zona con mayor impacto con los peatones corresponde a la zona media del frente vehicular, según la base de datos japonesa ITARDA, y la velocidad de impacto suele ser de 40 km/h en la mayoría de los casos reportados. Los modelos automotrices simplificados fueron desarrollados en software CAD mediante técnicas de modelamiento de superficies limitantes. La sistemática de la simulación se basa en lo establecido en el Reglamento (CE) n.º 78/2009, donde los modelos

se restringen a los seis grados de libertad y se proyecta el TRL a 40 km/h, suspendido a 25 mm del nivel del suelo. Las propiedades mecánicas asignadas a los materiales provienen de la NHTSA, líder en investigación de seguridad vehicular.

A través del TRL se evaluarán indicadores de lesiones a nivel óseo y articular producto de los atropellos, como las fuerzas g, el ángulo de flexión y el desplazamiento cortante sobre la rodilla. Mediante los valores máximos de estas variables, se puede evidenciar si el vehículo en cuestión aprueba los valores permisibles según lo establecido por los entes reguladores. Además, se proyectar en curvas de tendencia, en las cuales se puede resaltar la probabilidad de lesión o fractura. Permitiendo emitir consideraciones de diseño previo un análisis comparativo con el package de vehículos experimentales.

ABSTRACT

Ecuador reports a total of 21,352 traffic accidents, of which 2,474 are pedestrian-related incidents resulting in 2,379 injuries and 398 fatalities. The disproportion in injuries and deaths correlates with the road infrastructure and, primarily, the behaviors of both drivers and pedestrians. However, passive safety measures for pedestrians play a crucial role in reducing the accident statistics, such as vehicle design and energy-absorbing systems in the event of a collision. Innovations in this field range from the use of new materials to the implementation of intelligent body structures.

To evaluate the effectiveness of these attenuating systems, experimental tests are conducted that assess both occupant protection within the vehicle cabin and the aggressiveness towards pedestrians. The TRL (Test Reference Year) impactor is a clear example of a device used and developed by one of the early groups of the European Experimental Vehicles Committee (EEVC) focused on pedestrian protection. This impactor simulates the leg of a male individual at the fiftieth percentile, which also represents the P50 anthropometry of the economically active population aged 20 to 69 years. The economically active population of Quito was considered a representative sample due to their labor migration.

The criteria for selecting the vehicles to be tested are those vehicle segments with the highest involvement in traffic accidents, as highlighted by the National Transit Agency (ANT): sedans, vans, and SUVs. Within these segments, the most popular vehicles sold in 2021 were selected, as registered by the Internal Revenue Service (SRI), namely the Chevrolet Captiva with 24,564 units sold, the Sail with 24,211 units sold, and the Dmax with 38,289 units sold.

The zone with the highest impact on pedestrians corresponds to the middle area of the vehicle front, according to the Japanese ITARDA database, and the impact speed is usually 40 km/h in the majority of reported cases. Simplified automotive models were developed using CAD software and limited surface modeling techniques. The simulation methodology is based on the provisions of Regulation (EC) No. 78/2009, where the models are constrained to six degrees of freedom, and the TRL is projected at 40 km/h, suspended 25 mm above ground level. The mechanical properties assigned to the materials are derived from NHTSA, a leader in vehicle safety research.

Through the TRL, indicators of bone and joint injuries resulting from pedestrian collisions, such as g-forces, flexion angle, and shear displacement on the knee, will be evaluated. By comparing the maximum values of these variables, it can be determined if the vehicle in question meets the permissible values as established by regulatory bodies. Additionally, trend curves will be projected, highlighting the probability of injury or fracture. This allows for issuing design considerations prior to a comparative analysis with the experimental vehicle package.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la presente investigación aborda contenidos acerca de seguridad vial peatonal, analizando el comportamiento biomecánico en situaciones de atropellamiento, con principal enfoque en la nocividad sobre la integridad del miembro inferior del peatón producto de las geometrías y materiales que constituyen la carrocería. A través, de la simulación se pretende recolectar datos para un análisis comparativo con pruebas de radiografías, permitiendo predecir consecuencias a la salud de peatones como instrumento de diagnóstico de salud pública y reproducir siniestros de tránsito como herramienta pericial.

Además, cabe recalcar que los datos obtenidos experimentalmente con sustitutos humanos post muerte son congruentes con los que se obtienen mediante análisis CAE, dando como resultado un proceso versátil capaz de reproducir siniestros de una manera más ética, rápida y menos costosa.

Aunque, informes determinan los valores de fracturas de huesos humanos a determinadas cargas, estos valores no se pueden considerar como una estandarización de daños durante accidentes de tránsito reales para la anatomía, histología y morfología humana. Ningún estudio previo ha logrado generar un modelo que demuestre las afecciones a la integridad del peatón. Por qué las variables inherentes de la víctima es un factor importante incluyendo la constitución del vehículo, el objetivo del presente estudio fue utilizar el análisis de elementos finitos para generar una sistemática de simulación de eventos de atropellamiento de vehículo de interés en circulación o previos a su manufactura y venta.

Los peatones son considerados los usuarios de la vía más vulnerables porque carecen de una protección sólida contra los choques. El peligro de colisiones para los peatones aumenta en los cruces peatonales de las intersecciones debido al comportamiento de incumplimiento de los peatones en dichos lugares de tráfico multidireccional. Para adquirir una mayor comprensión, es imperativo comprender el comportamiento de los peatones en dichos sitios. Por lo tanto, esta revisión sistemática.

CAPÍTULO I

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar por medio de simulación computacional las lesiones que pueden presentarse en miembro inferior de peatones al producirse atropellamiento, en función de variables biomecánicas.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar la tipología de lesiones características en miembro inferior por atropellamiento y seleccionar las variables de investigación con base en un estudio diagnóstico sobre los vehículos del segmento turismo en el Ecuador y su accidentalidad por atropellamiento.
- Generar mediante software CAD los modelos de vehículos con mayor accidentalidad y lesiones en peatones por atropellamiento, y los modelos de material de los vehículos para simular el comportamiento lesivo sobre la extremidad inferior.
- Simular eventos dinámicos de atropellamiento según Reglamento la Comunidad Europea (CE) n.º 78/2009 para analizar las lesiones en la tibia, ligamentos de la rodilla y fémur, por medio de software de ingeniería asistida por computadora CAE.
- Validar los resultados obtenidos de la investigación por medio de simulación del ensayo de calibración del impactado indicado en el Reglamento (CE) n.º 631/2009 para evidenciar la precisión de los resultados.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La Agencia Nacional de Transito (ANT, 2022), señaló que durante el 2021 se tuvo un registro de 2474 siniestros de tránsito del tipo atropellamiento de los cuales un 14% y 19% responden a lesionados y víctimas mortales respectivamente.

Si bien las investigaciones sobre la protección de peatones han estado en curso desde aproximadamente la década de 1960, Han y Lee (2002) mencionan que no se ha de comparar su desarrollo con la conseguida en la seguridad de los ocupantes pues este ha escalado su nivel de

seguridad con sistemas como: la deformación controlada, sistemas auxiliares y de sujeción, proyección de elementos aplastante al inferior del vehículo, etc. Factores como la geometría y materiales que constituyen la carrocería no han sido parte de la innovación, lo cual no ha variado su índice nocivo contra la integridad del peatón.

Por otra parte, el creciente parque automotor con clara dirección a la propulsión eléctrica involucra ya un problema de seguridad peatonal debido a su insonoridad. Con la simulación dinámica como normativa no solo para el ensayo de prototipos de chasis previo a su construcción, sino, como método preventivo para los peatones. Por ende, es importante que se exija la implementación de materiales o sistemas con mejoras en las propiedades atenuadoras de los automotores que se comercialicen o se pretenden comercializar. Además, cabe destacar que no todo proceso de simulación CAE tendrá una validez científica, pues cada uno de estos ensayos desarrollados en el presente documento se rige y cumple con lo estipulado en el Reglamento (CE) n.º 78/2009 de la Unión Europea para la calibración del dispositivo y sus componentes.

Asimismo, es primordial recalcar que la naturaleza de las simulaciones asistidas por computadoras se consideran un proceso investigativo de alta calidad para la educación, a la vez que es una tecnología respetuosa con el medio ambiente, esta metodología analítica ha sustituido metodologías obsoletas comprendidas desde la fabricación, destrucción hasta el desecho. Mediante este estudio se pretende tener una acción por el clima conjugada con una educación de calidad respondiendo a los objetivos 4 y 13 de desarrollo sostenible (ODS) impulsado por la ONU.

1.3 ALCANCE

Este estudio abarca la descripción detallada de los distintos tipos de lesiones que se tiene en atropellamiento. El ámbito de la accidentalidad está enfocado en los vehículos que muestran estadísticamente una mayor significancia en los atropellamientos a nivel país. Para la evaluación de la gravedad del accidente se han utilizado las variables: aceleración, ángulo de flexión y cizalladura en rodilla. Estas mismas variables son utilizadas en los procesos de evaluación llevados a cabo por Global NCAP.

Se usan modelos automotrices creados a través del diseño asistido por computadora CAD, manteniendo sus proporciones y geometría característica tomada de blueprints. Para la asignación de los materiales de cada una de sus partes metálicas y poliméricas, se toma de bases de datos FEM de la NHTSA, de donde se toma el modelo matemático que rige el material y se extrae las propiedades mecánicas del mismo.

La evaluación de las lesiones por atropellamiento, en el presente trabajo se han realizado con base en modelos numéricos dinámicos desarrollados mediante el Método de Elementos Finitos (MEF/FEM). Las simulaciones se han llevado a cabo bajo parámetros expuestos en normativa internacional vigente (CE N 631/2099 CEPE).

Los resultados de la simulación son coherentes y de un alto valor científico, no solo porque la calibración del impactador TRL se encuentra dentro de los límites permisibles según lo dicta la normativa. Sino también, por que los valores permiten emitir un criterio de la lesividad a la pierna, según curvas de probabilidad elaboradas mediante la recolección de datos de múltiples accidentes suscitados anteriormente.

1.4 ANTECEDENTES

En el artículo denominado *Clinical studies on leg injuries in car pedestrian accidents*. Bunketorp y Romanus (1980) se experimento de manera explícita con humanos post mortem (PHMS) cargas aplicadas sobre la parte inferior de la pierna para concluir con las fracturas y daños a velocidades menores, iguales y mayores a 30 km/h.

Con el fin de proporcionar datos experimentales los más cercanos a la realidad, para eso se desarrollaron pruebas en las cuales sometieron a esfuerzos flexión, tensión, compresión tanto axiales como cortante, además de tolerancias de cizallamiento y aplastamiento a huesos de extremidades inferiores de diferentes pacientes post muerte (Hayes y Gerhart, 1985, pág. 272). Además, es importante destacar que los datos han servido como base para un análisis comparativo y entre resultados obtenidos con sustitutos PMHS y resultados de análisis dinámicos no lineales utilizados en softwares con esquema de integración temporal explícita como LS DYNA (Rust y Schweizerhof, 2003).

Otte y Haasper (2007) reconstruyeron la dinámica de accidentes registrados desde 1995 hasta 2004 del Estudio Alemán en Profundidad de Accidentes de Alemania GIDAS. En donde se

concluyó que la altura de la fractura de algún hueso de la extremidad inferior será idéntica con la altura del parachoques en solo 17.5% de los casos.

También, es fundamental señalar que la simulación de automóviles se empezó aplicar desde principios de los años 80, suplantando a prototipos y ensayos resistivos que se impulsaron a partir 1950 por la aviación militar de Estados Unidos, esto se debe a que el siniestro tiene un periodo muy corto de duración y no permite monitorizar los detalles del daño. Sin embargo, a partir de 1990 se incluyó en las simulaciones el comportamiento tanto de la carrocería, como también del ocupante.

Por otra parte, es primordial reconocer como empezó la modelación del cuerpo humano virtual y como fue mejorando con el pasar del tiempo. En 1997, Toyota y Central R & D Labs lanzaron un proyecto conjunto para crear un modelo virtual del cuerpo humano que pudiera explorarse en el futuro. En el 2000 se hace oficial la primera versión de THUMS donde se incluyen huesos, cerebro, órganos y músculos. Permitiendo la diversificación de modelos por su físico, género y edades.

Para el 2004 con base en THUMS V1 se desarrolló un modelo de mujer embarazada para analizar el comportamiento y afecciones mediante la reproducción de feto, útero, placenta, el cordón umbilical y el líquido amniótico. En las últimas versiones presentadas desde 2020 se han agregado músculos para analizar la dinámica de postura del conductor durante el frenado. (Corporación Toyota Motor, 2021)

1.5 SITUACIÓN ACTUAL

En la actualidad se cuenta con múltiples formas de analizar el comportamiento dinámico de todo tipo de atropellamiento y colisiones multi-cuerpo, estas interacciones se ven mejor reflejadas con el uso prototipos y herramientas para el análisis FEM en la industria automotriz, mismos que están en constante evolución y evaluación.

Es notable el refinamiento de estructuras biomecánicas desde el TRL legform con su sucesor el Flex PLI hasta los THUMS que a diferencia de los dos primeros permite el monitoreo de las afecciones al cuerpo completo. Con la liberación de material científico como los THUMS V6 de Toyota en 2021 se continúa y se pretende cubrir la limitante de este modelo, como es la reproducción de apariencia de tejidos humanos y afectaciones óseas.

En pruebas de flexión estática e impacto dinámico en sujetos humanos post mórtem PMHS, el modelo para peatones THUMS (AM50 versión 4.0) presentó una buena concordancia, con errores relativos máximos dentro del $\pm 15\%$. Los THUMS están constituidos por más de 2 millones de elementos y es capaz de predecir lesiones cerebrales, de órganos internos, esqueléticas y de ligamentos. En particular, el modelo de piernas incluye todas las partes esqueléticas y los principales tejidos blandos, modelados con materiales plásticos elásticos para las partes esqueléticas y materiales hiperelásticos para la carne, ligamentos y tendones (Shigeta, Kitagawa y Yasuki, 2009).

La investigación desarrollada por Panday et al (2021) detalla la sistemática usada para el análisis FEM de un evento por atropellamiento con resultados de mayor interés a nivel medicinal, pues el uso de dos modelos FE de humanos como es el MADYMO™ que permite escalar sus dimensiones a una antropometría determinada y converge iterativamente a la cinemática del peatón bajo impacto. Por otro lado, los THUMS versión 4.0.2 de Toyota permite estimar las lesiones a nivel óseo en todo el tren inferior del peatón. Además de combinar dos herramientas dentro del análisis como ya se mencionó, la dinámica de la investigación integra factores de un entorno real de atropellamiento, pues se toma la velocidad a la que camina el peatón promedio en los cruces peatonales en Taiwán (Chang, Woo y Wang, 2011).

La simulación numérica se ha convertido en una herramienta versátil para analizar la respuesta de diferentes poblaciones ante el impacto, un ejemplo de ello es el estudio realizado por Tang, Zhou, Nie y Hu (2020), quienes utilizaron el modelo de elemento finito peatonal masculino del percentil 50 del GHBM (Global Human Body Model Consortium) para analizar la cinemática de la extremidad inferior en personas con diferentes índices de masa corporal (IMC). Los resultados mostraron que la masa corporal tuvo un impacto significativo en las lesiones sufridas por el peatón. Concretamente, se observó un aumento en el momento de flexión de la tibia en la fase de contacto inicial, así como en el ángulo de flexión y la fuerza en el ligamento colateral medial (MCL) en la fase de rebote de la tibia, lo que aumenta la probabilidad de lesiones.

Las pruebas experimentales y simulaciones de atropellamiento continúan evolucionando para mejorar la seguridad de los peatones. Una de las áreas en las que se ha avanzado es en la creación de materiales biomecánicamente representativos para las pruebas experimentales, como las tibias sintéticas que imitan las propiedades mecánicas de los huesos humanos. Estos materiales

se fabrican mediante técnicas de moldeo por inyección de fibras cortas de vidrio y espuma de poliuretano para simular el hueso cortical y esponjoso, respectivamente. (Cameron et al., 2020)

1.6 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Cómo se puede estimar la probabilidad de lesiones en extremidades inferiores por atropellamiento en función de variables biomecánicas?

1.7 VARIABLES

- Ángulo de flexión entre la rodilla y la tibia
- Aceleración de la parte superior de la tibia de la parte inferior de la pierna.
- Desplazamiento lateral de la articulación de la rodilla.

1.8 HIPÓTESIS

Existe una relación significativa entre los valores del ángulo de flexión entre la rodilla y la tibia, la aceleración de la parte superior de la tibia y del desplazamiento lateral de la articulación de la rodilla, con la probabilidad de lesiones en atropellamientos.

1.9 PARTICIPACIÓN DE ATROPELLOS EN SINIESTROS DE TRÁNSITO DEL ECUADOR 2021

Durante el 2021 la ANT registro 21 352 accidentes de tránsito, de los cuales 17532 corresponden a personas lesionadas y 2131 fallecidas. El número de víctimas mortales están constituidas por 1140, 529 y 462 entre conductores, pasajeros y peatones respectivamente (ANT, 2022).

Mientras que los peatones en los accidentes de tránsito representan el 22% de víctimas mortales como lo muestra la Figura 1.1. Este porcentaje se compone por 52 fallecidos entre 0-19 años, 48 muertos mayores a 70 años y el segmento de análisis para esta investigación que corresponde a 205 muertos entre 20-69 años (población económicamente activa - PEA).

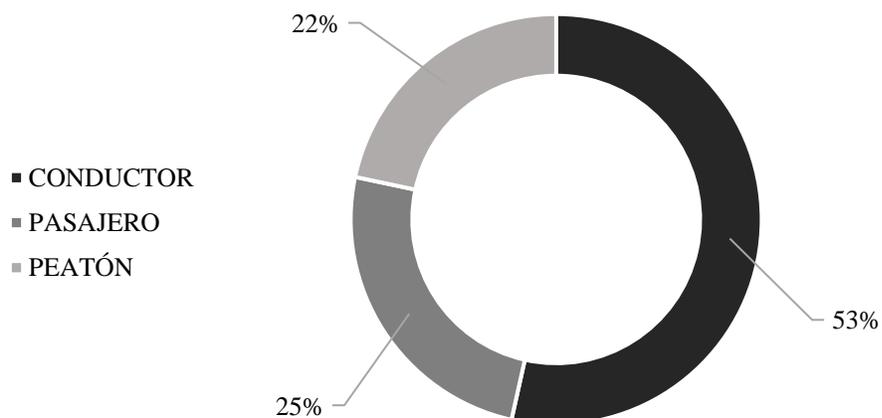


Figura 1.1 Víctimas mortales en accidentes de tránsito según su participación (ANT, 2022)

En la Figura 1.2 se muestra la información mencionada y la Tabla 1.1 desglosa a detalle las edades y cuantifica la mortalidad durante el 2021.

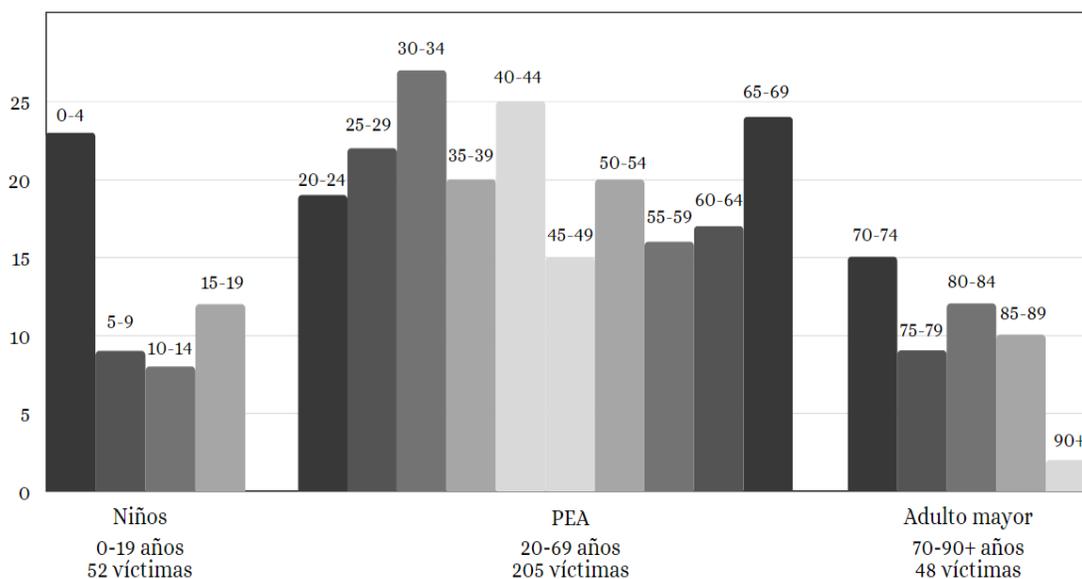


Figura 1.2 Peatones fallecidos según rango de edad (ANT, 2022)

Tabla 1.1 Mortalidad según edad del peatón

Rango etario	Niños	Rango etario	PEA	Rango etario	Tercera edad
0-4	23	20-24	19	70-74	15
9-May	9	25-29	22	75-79	9
14-Oct	8	30-34	27	80-84	12
15-19	12	35-39	20	85-89	10
Total	52	40-44	25	90+	2
		45-49	15	Total	48
		50-54	20		
		55-59	16		
		60-64	17		
		65-69	24		
		Total	205		

Fuente: (ANT, 2022)

Los países europeos, al igual que Japón cuentan con una importante legislación de seguridad peatonal, mediante el cual se ven reflejadas variables de forma detallada como las antropometrías de la víctima como zonas de interés del automotor. En la Figura 1.3 se muestra porcentualmente las regiones del cuerpo de los peatones con mayor lesividad en accidentes automovilísticos.

Acorde a una muestra de 80800 de la base de análisis de datos ITARDA del Instituto de Investigación del Automóvil de Japón (JARI). Da como resultado un claro 40%, el miembro inferior es el que mayor daño presenta desde el primer contacto con el vehículo.

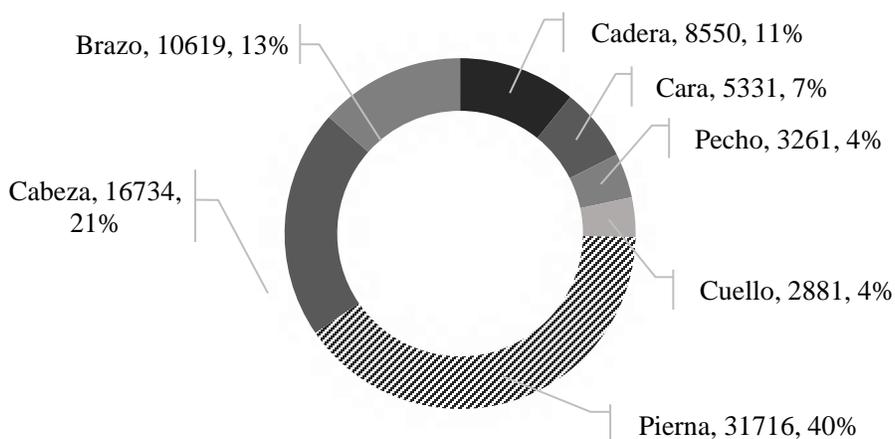


Figura 1.3 Regiones del cuerpo de los peatones con mayor lesividad en accidentes automovilísticos (ITARDA, 2000)

1.10 ANTROPOMETRÍA DE LA POBLACIÓN ECONÓMICAMENTE ACTIVA

La distancia vertical del miembro inferior se toma de datos estadísticamente representativos de un estudio desarrollado en 2014 enfocado en mejorar los diseños de puestos de trabajos, este estudio detalla las dimensiones anatómicas de una muestra total de 800 personas de la población económicamente activa del Ecuador desde los 18 años hasta los 65 años. La tabla antropométrica se desarrolla en Quito como ciudad referente de diversidad por la migración laboral. (Cortés y Mejía, 2014)

Por otra parte, mediante una encuesta antropométrica a 61 poblaciones militares y civiles la NASA publica un libro en 1978 con datos de tamaños corporales resumidos y codificados. Con base en los datos de la investigación de la NASA, se hace uso de dos códigos que representan la longitud total del miembro inferior. En la Figura 1.4 se ejemplifica los extremos de la medición mientras el paciente está sentado y erguido. El código 196 corresponde a la longitud entre el glúteo y rodilla (rotula) de la misma extremidad, el código 678 corresponde a la altura comprendida entre el suelo y la zona posterior de la articulación de rodilla o zona poplíteo.

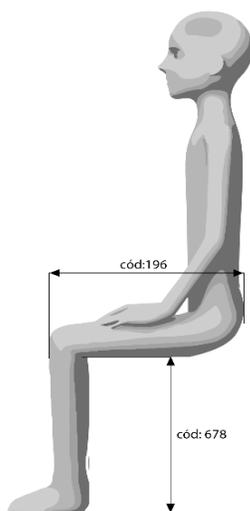


Figura 1.4 Códigos antropométricos (NASA, 1978)

Las dimensiones obtenidas de cada codificación se establecen para cada género como se refleja en la Tabla 1.2. Se obtiene el largo total del miembro inferior para el sexo masculino y femenino sumando los dos valores de cada código.

Tabla 1.2 Medidas antropométricas

Código (cód)	Medidas	Género	Media [cm]
194	Longitud glúteos-rodilla	Femenino	55.24
		Masculino	56.48
678	Altura poplítea	Femenino	41.87
		Masculino	41.65
Longitud total miembro inferior		Femenino	97.11
		Masculino	98.13
Media longitudinal total			97.62 976.2 [mm]

Fuente: (Cortés y Mejía, 2014)

El largo representativo del miembro resulta del promedio de los largos totales de los datos obtenidos tanto del sexo masculino, así como del femenino. En la Figura 1.5 se evidencia que la longitud promedio del miembro inferior tanto del hombre como de la mujer son comparables y congruentes con las dimensiones del simulador impactador TRL.

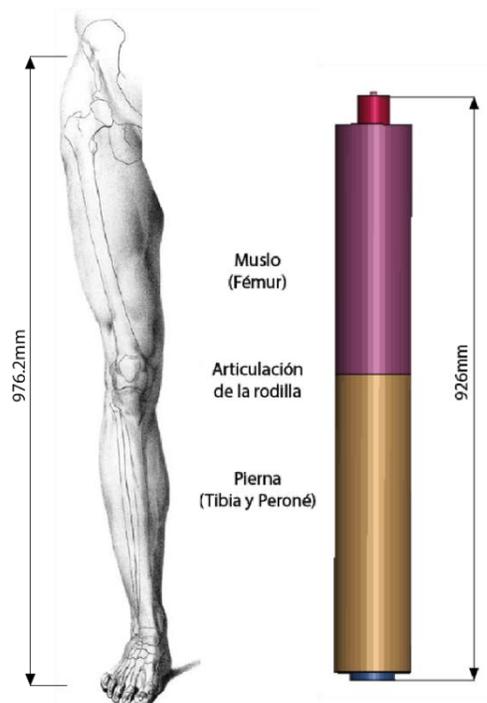


Figura 1.5 Longitud: Miembro Inferior vs TRL (LSTC, 2018)

El impactador TRL simulador de pierna fue diseñado para simular la extremidad inferior del percentil 50 de un varón estadounidense, que tiene una altura promedio de 175.30 cm. En el estudio, también se consideró el percentil 50 de la antropometría de la población económicamente activa en Quito, tanto para hombres como para mujeres, con una altura promedio de 168.85 cm para los hombres y 158.67 cm para las mujeres.

Es importante destacar que, en términos de altura, no existe una diferencia significativa entre los estadounidenses y la PEA de Quito. Los datos recolectados muestran que la altura P50 de los varones de la población económicamente activa es menor en 6.45cm comparado con los varones estadounidenses en el cual se basó el diseño del impactador.

1.11 ÍNDICES DE ATROPELLAMIENTOS 2021

Arrollamiento a diferencia del atropello es aquel acontecimiento en la que la o las ruedas de un vehículo pasan sobre el cuerpo de una persona (Terrenos y Ulloa , 2011).

El presente análisis centra y analiza datos de eventos por atropello definido como golpe o derribo por parte de un vehículo a una persona.

Según datos de la ANT (2022), en de enero a diciembre de 2021 se registraron 21 352 siniestros de tránsito de todo tipo, de los cuales 2 474 (12%) son por atropellamientos. Los datos antes mencionados se muestran en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Siniestros y de atropellamiento durante el 2021

2021	Total de siniestros de Tránsito 100%	Atropellamiento	Porcentaje por atropellamiento
Enero	1,763	202	11%
Febrero	1,577	167	11%
Marzo	1,691	199	12%
Abril	1,429	154	11%
Mayo	1,488	160	11%
Junio	1,780	219	12%
Julio	1,828	202	11%
Agosto	1,916	213	11%
Septiembre	1,921	233	12%
Octubre	2,048	254	12%
Noviembre	1,896	222	12%
Diciembre	2,015	249	12%
TOTAL	21,352	2,474	12%

Fuente: (ANT, 2022)

Acorde a los datos se puede notar que el choque lateral y atropellamiento son los dos siniestros que más lesionados causa. En el 2021 los siniestros por atropellamiento causaron un total de 2 379 personas lesionadas, porcentualmente representa un 14% del total de lesionados en accidentes de tránsito como lo detalla la Tabla 1.4.

Tabla 1.4 Lesionados y por atropellamiento durante el 2021

2021	Total de lesionados	Lesionados por atropellamiento	% por atropellamiento
Enero	1 364	196	14%
Febrero	1 241	148	12%
Marzo	1 329	186	14%
Abril	1 186	147	12%
Mayo	1 230	159	13%
Junio	1 483	206	14%
Julio	1 598	194	12%
Agosto	1 616	198	12%
Septiembre	1 493	214	14%
Octubre	1 696	249	15%
Noviembre	1 565	221	14%
Diciembre	1 731	261	15%
TOTAL	17 532	2 379	14%

Fuente: (ANT, 2022)

La ANT (2022) reportó, que 2 131 personas fueron víctimas mortales producto de siniestros de tránsito, de los cuales 398 personas murieron (19%), durante accidentes de tránsito del tipo atropellamiento.

En la Tabla 1.5 se detalla mes a mes las víctimas mortales a causa de todo tipo de accidentes de tránsito, incluyendo los fallecidos por atropellamiento.

Tabla 1.5 Fallecidos y por atropellamiento durante el 2021

2021	Total de fallecidos	Fallecidos por atropellamiento	% por atropellamiento
Enero	198	27	14%
Febrero	145	35	24%
Marzo	174	26	15%
Abril	134	21	16%
Mayo	154	28	18%

Junio	155	35	23%
Julio	188	42	22%
Agosto	177	32	18%
Septiembre	185	36	19%
Octubre	205	43	21%
Noviembre	173	34	20%
Diciembre	243	39	16%
TOTAL	2 131	398	19%

Fuente: (ANT, 2022)

1.12 PARQUE AUTOMOTOR ECUATORIANO

Para el Ecuador la industria automotriz es un multiplicador de empleos directos e indirectos. Durante la manufactura de un equipo de transporte se ven involucradas 57 actividades económicas como lo detalló en 2011 el Banco Central del Ecuador, el consumo de bienes y servicios para la fabricación de estos representa 800 141 millones de dólares anuales (Jácome, Oleas, Angulo y Trávez, 2011).

Asimismo, es fundamental mencionar que el sector automotriz ha tenido un crecimiento. El presidente de la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE) describe al 2021 como un año rebote post-pandemia, este año presentó un 39% más de ventas frente al 2020, sobresaliendo el segmento de vehículos con fines productivos. Además, resalta que las motocicletas son un grupo de vehículo creciente para cubrir la demanda de entregas y despacho de bienes a pie de casa (Serrano, 2022).

La reactivación económica durante el 2021 se debió principalmente a la introducción de nuevas marcas en el mercado automotriz, en las que resaltan los vehículos de procedencia asiática por su valor de venta asequible para el público.

También, según cifras de la AEADE al final del 2021 el Ecuador cuenta con 1'160 631 automóviles, 619 314 SUV's y 638 314 camionetas circulando en las vías a nivel nacional. De los cuales 141 002 automóviles, 140 847 SUV's y 111 431 camionetas son vehículos nuevos según datos del Reporte Nacional del SRI de vehículos nuevos adquiridos y reportados en el periodo de enero a diciembre del 2021 (AEADE, 2020).

En la Tabla 1.6 se detallan los vehículos que se vendieron en el año 2021.

Tabla 1.6 Vehículos nuevos vendidos durante el 2021

Etiquetas de fila	Vehículos nuevos vendidos 2021
SEDÁN	141002
CAMION	31483
CAMIONETA	111431
ESPECIAL	9855
SUV	140847
MOTOCICLETA	222837
OMNIBUS	699
TANQUERO	504
TRAILER	1298
VOLQUETA	1106
TOTAL	661062

Fuente: (SRI, 2021)

En su reporte anual, la ANT contabiliza el tipo de vehículos involucrados en cada accidente de tránsito. Esta muestra permite determinar los segmentos de vehículos que mayor accidentabilidad presentan, esto se presenta en la Tabla 1.7.

Cabe mencionar que la segmentación de los vehículos de la agencia nacional de tránsito (ANT) se realiza bajo criterios de la Norma Técnica de INEN: NTE INEN 2656. Para ser más precisos los vehículos especiales incluyen toda aquella clase de vehículo que no constan en la siguiente tabla, tractores, maquinaria pesada, de limpieza, transporte y de funciones gubernamentales. Por otra parte, los vehículos dados a la fuga se consideran como no identificados.

Tabla 1.7 Participación de vehículos en siniestros, lesionados y fallecidos según su segmento

TIPO DE VEHÍCULO	SINIESTROS	LESIONADOS	FALLECIDOS EN SITIO
AUTOMÓVIL	7171	4504	313
BICICLETA	217	194	23
BUS	802	883	181
CAMIÓN	1459	958	223
CAMIONETA	2210	1662	192
EMERGENCIAS	16	7	1
ESPECIAL	101	63	14

FURGONETA	134	86	5
MOTOCICLETA	5131	5546	704
NO IDENTIFICADO	2983	2832	397
SCOOTER ELÉCTRICO	4	3	0
TRICIMOTO	21	28	1
VEHÍCULO DEPORTIVO UTILITARIO	1103	766	77
TOTAL	21352	17532	2131

Fuente: (ANT, 2022)

En la Figura 1.6 se logra diferenciar las tres columnas más prominentes, que corresponden a los tres segmentos de vehículos que más participación en siniestros presenta, así como los lesionados y fallecidos resultantes. En el presente análisis se obvia datos referentes a las motocicletas.

Comparando la Tabla 1.7 y Figura 1.6 se puede distinguir según sus datos los tres tipos de vehículos de mayor interés para este estudio. Para el cual dos factores determinan los segmentos a estudiar: en primer lugar, los vehículos que mayor tránsito generan, pues son los que en mayor proporción han sido comercializados. Y por otra parte por ser los que mayor índice de accidentes acumulan. Los datos son congruentes y lidera dichos índices el segmento de los automóviles, seguido por los SUV`s denominados como no identificados por la ANT en sus reportes nacionales y finalmente las camionetas con un tercer lugar en ventas y accidentes de tránsito en el 2021.

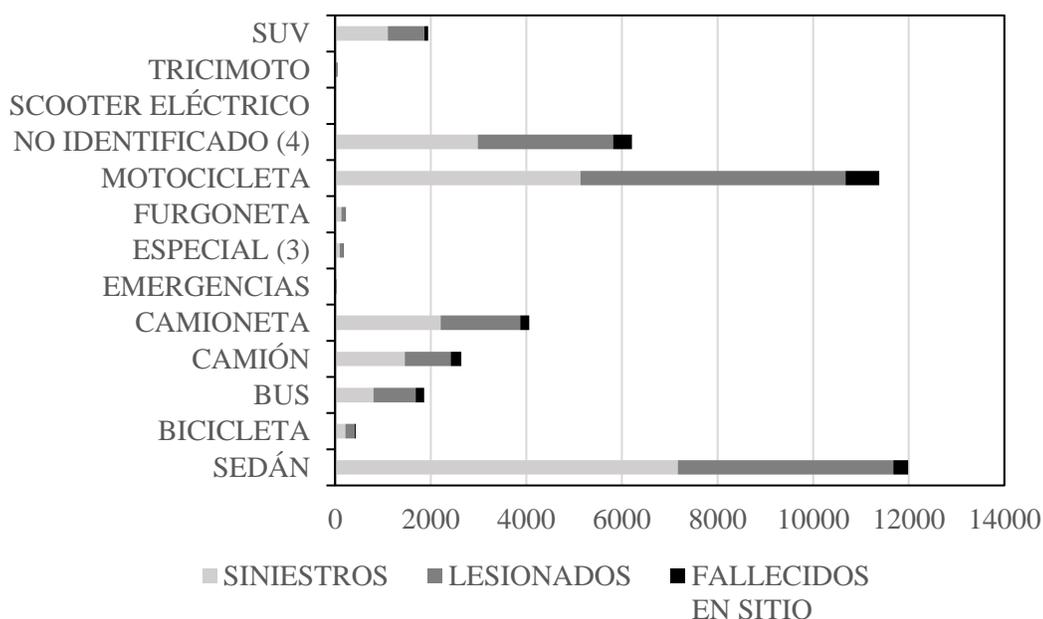


Figura 1.6 Segmentos de vehículos involucrados en siniestros, lesionados y fallecidos: entre enero y diciembre 2021 (ANT, 2022)

1.13 ZONA DE IMPACTO

El Instituto de Investigación del Automóvil de Japón (JARI) en su informe anual de accidentes de tránsito de 1999, no solo reconstruyó y analizó 52 siniestros de tránsito por atropellamiento, sino también distribuyó y cuantificó cada accidente respecto a su zona de primer impacto con el peatón, todo esto lo realizó mediante la segmentación del frente vehicular, ver Figura 1.7.

Adicional a ello, se definen como zonas de impacto a los 5 segmentos creados mediante líneas verticales a lo largo del guardachoque (A, B y C). El área A y B están seguidos por una letra adicional que describen el lado derecho (R-right) o el lado izquierdo (L-left) en el que se posiciona, visto desde el asiento del conductor. (Y Matsui, 2003)

Este trabajo va dirigido a la simulación del escenario más frecuente de un atropellamiento. Como se evidencia en la Figura 1.8 el principal foco de contacto con la pierna es la zona C o la zona central del guardachoque (21/52) con un 40.38% de reincidentes.

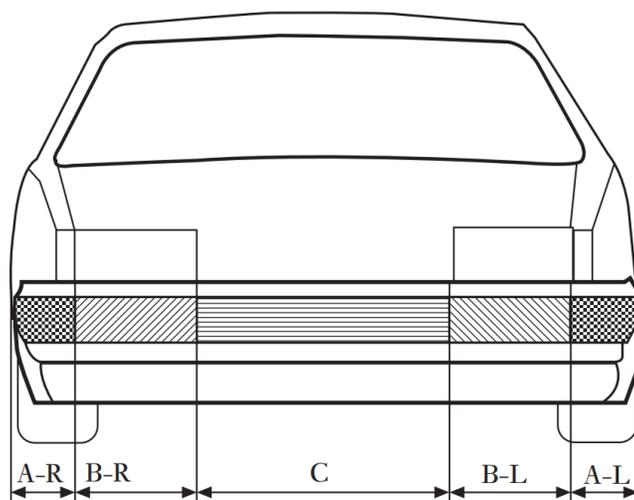


Figura 1.7 Definición de zonas de contacto
(Y Matsui, 2003)

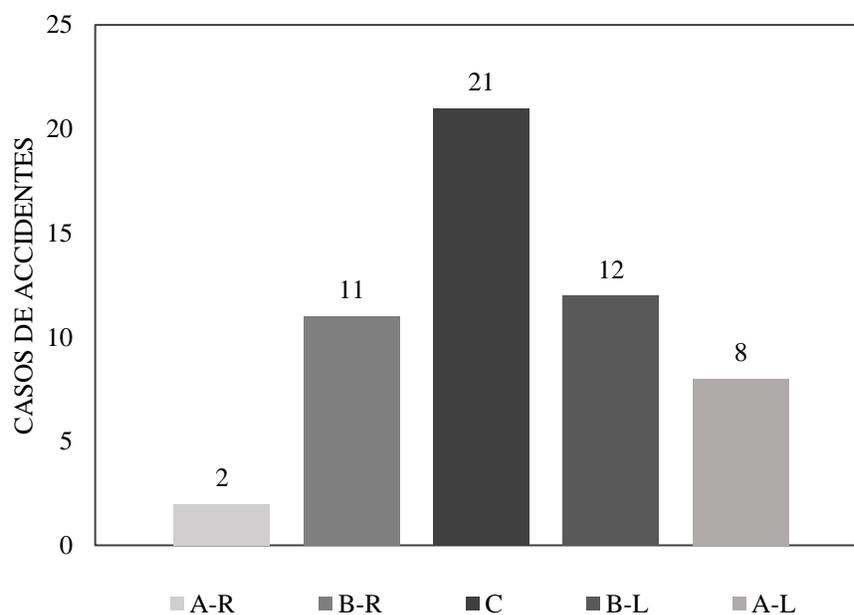


Figura 1.8 Distribución de zonas de contacto vehículo – peatón
(ITARDA, 2000)

1.14 IMPACTADOR TLR

Transport Research Laboratory fueron los desarrolladores del impactador con sus mismas iniciales TRL. Este dispositivo de testeo es utilizado en programas de evaluación de automóviles nuevos (NCAP) para brindar información de seguridad al consumidor, investigación de la

seguridad vehicular desde fuera del habitáculo en condiciones de peatones, desarrollo e innovación de vehículos. (CE, 2009)

La prótesis TRL cuenta con:

- Masa total de $13,4 \pm 0,2$ kg
- Longitud total de 926 ± 5 mm
- Centro de gravedad del fémur a 217 ± 10 mm y la tibia estará a 233 ± 10 mm del centro de la rodilla

Hay que mencionar que este impactador con forma de pierna con 926mm cumple con el largo descrito en el Reglamento (CE) No 631/2009 de la comisión del 22 de julio de 2009, y también, es congruente con las dimensiones de una extremidad inferior de un trabajador promedio ecuatoriano, como se ejemplifica en la Figura 1.5.

En una pierna humana el segmento comprendido entre los 19cm hasta los 46cm desde el nivel del suelo se denomina tercio medio de la pierna, esta parte de la extremidad inferior que es de interés fundamental para el presente estudio debido a que es la zona que sufre el 82,5% de todas las fracturas registradas en *Characteristics on fractures of tibia and fibula in car impacts to pedestrians – Influences of car bumper height and shape*. (Otte y Haasper, 2007)

1.14.1 GEOMETRÍA DESCRIPTIVA

El impactador TRL es un dispositivo diseñado para evaluar los niveles de agresividad de un vehículo sobre una pierna de un peatón. Para garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos a través de su uso, se deben seguir las regulaciones establecidas por la Unión Europea.

El Reglamento (CE) No 631/2009 de la Comisión de 22 de julio de 2009 establece los requisitos y especificaciones generales para los ensayos de impacto, incluyendo los materiales y dimensiones que deben ser utilizados en la construcción del impactador TRL, así como los parámetros necesarios para llevar a cabo los ensayos. Además, este reglamento también establece que el hardware utilizado para los ensayos de impacto, como los sistemas de medición de aceleración y los dispositivos de registro de datos, deben cumplir con los requisitos establecidos en el mismo. Siguiendo estas regulaciones, se garantiza la fiabilidad de los resultados obtenidos en los ensayos, los cuales deben ser evaluados según los criterios técnicos

establecidos por el Reglamento (CE) No 78/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 14 de enero de 2009, para la evaluación de la seguridad peatonal.

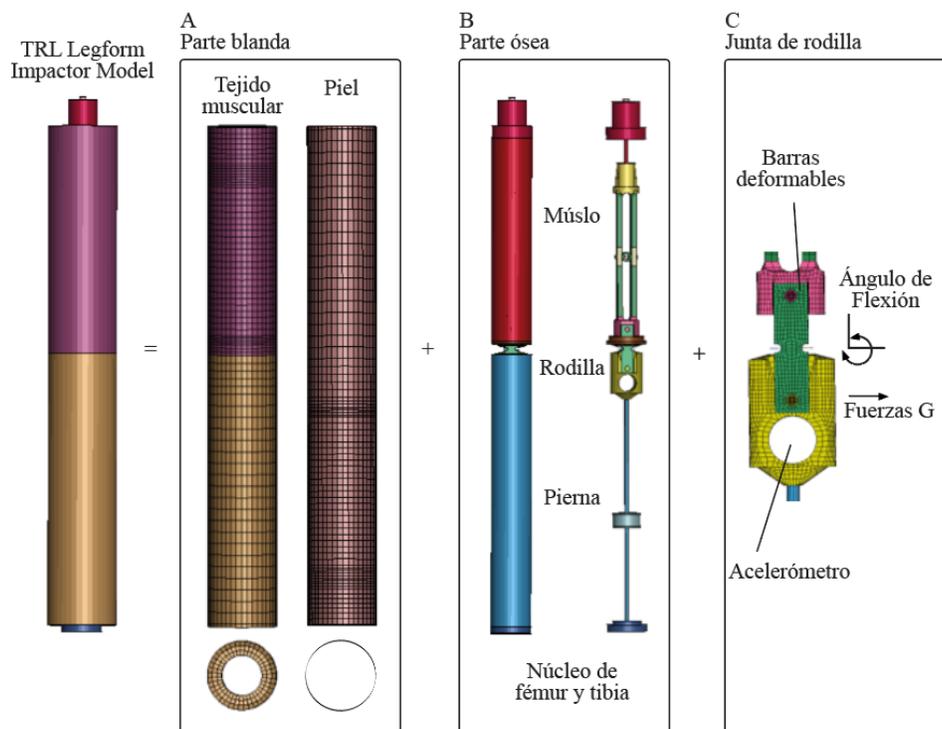


Figura 1.9 Modelo FE TRL
(LSTC, 2018)

En la Figura 1.9 A) Se detalla los componentes que conforman la parte blanda del TRL. Este dispositivo de testeo simula el tejido muscular mediante capas de espuma Confor™ CF-45 con un espesor total de 25mm, compuesta por un 80% caucho de nitrilo butadieno (NBR) y 20% de policloruro de vinilo (PVC). Finalmente, la piel será de espuma de neopreno, revestida por ambas caras con tela de nailon de 0.5 mm de espesor, con un espesor total de 6mm.

Por otra parte, B) Enumera los elementos que representan la parte ósea de la prótesis con forma de pierna. La construcción consta de ejes de acero de 70mm \pm 1 mm de diámetro y 500mm de longitud que simula la tibia y el fémur. El muslo y pierna se define como todas las partes de componentes que la conforman como: tejido muscular, piel, instrumentación, poleas y soportes como se expone.

Una masa de $8,6 \pm 0,1$ kg corresponde al fémur y $4,8 \pm 0,1$ kg responde a la masa de la tibia. Además, el centro de gravedad del fémur se sitúa a 217 ± 10 mm del centro de la rodilla, mientras que el centro de gravedad de la tibia se encuentra a 233 ± 10 mm de la misma referencia, como se ilustra en la Figura 1.11.

La junta de rodilla enmarcada en C) Esquematiza la conexión de las dos barras (fémur y tibia) detalladas en la sección B, mediante una articulación rotacional simplificada que representará la deformación efectiva de la rodilla. Esta articulación cinemática de rodilla incorpora un acelerómetro X200-4, dispositivo desarrollado por Gulf Coast Data Concepts con capacidades de medición de 3 ejes y una incertidumbre de ± 200 g, con un muestreo máximo de 3200 Hz, encargado de censar las fuerzas aplicadas al impactador. Mostrando tres variables de afección durante un atropellamiento como es el desplazamiento lateral o cizallamiento entre el fémur y tibia, ángulo de flexión y aceleración de la tibia. Este acelerómetro se encuentra instalado a 66 ± 5 mm debajo de la rodilla al lado no impactado (GCDC, 2017).

Para la construcción del impactador e instalación de este acelerómetro se ha de controlar y definir el valor de la frecuencia a 180Hz como lo define la norma ISO 6487:2002. En este estudio cada una de las curvas generadas tendrán un canal de respuesta a 108Hz como valor de frecuencia más cercano al sugerido según la norma.

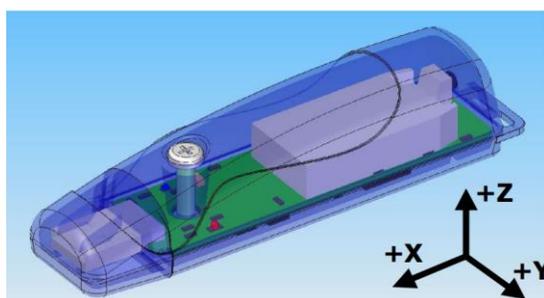


Figura 1.10 Acelerómetro X200-4
(GCDC, 2017)

En la Figura 1.11 se destacan todas las medidas y especificaciones del impactador TRL, incluyendo el acelerómetro y la ubicación de los centros de gravedad. Todas están en consonancia con los requisitos establecidos en el Reglamento (CE) No 631/2009.

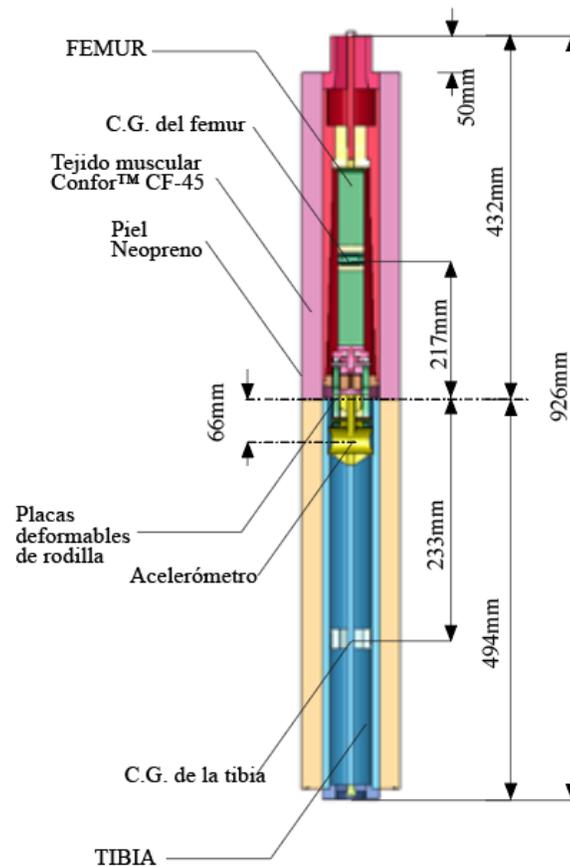


Figura 1.11 Sección longitudinal TRL
(LSTC, 2018)

1.14.2 FIABILIDAD MODELO TRL

Un análisis dinámico asitido por computadora sera confiable a medida que los datos obtenidos tengan una tendencia de similitud a los datos experimentales.

El análisis experemintal y por simulacion, se realiza siguiendo un orden, en el cual el impactador es proyectado por un propulsor neumatico sobre la mirad de la zona delantera de un vehiculo tipo sedan a 40.1km/h. De igual modo este mismo procedmiento es modelado para un analisis de elementos finitos, por el contrario la velocidad del TRL es 40.2km/h. Por tanto, es necesario recalcar que la sistematica en particular la velocidad de los dos procedimientos se rigen al Reglamento Europeo al igual que el presente estudio. (Matsui y Takagi, 2012)

Sirva de ejemplo la Tabla 1.8 que permite evidenciar la exactitud y proximidad de los resultados que existe entre el analisis CAE y las pruebas experemintales.

La anterior afirmación se esclarecerá puesto que una de las condiciones más determinantes y estrictas que resalta el reglamento CE No 631/2009 es que se debe mantener la prótesis del miembro inferior a una humedad estabilizada del 35% con una incertidumbre de $\pm 15\%$. Los investigadores realizan las pruebas experimentales con una humedad estable del 29%, manteniéndose dentro del límite inferior de lo establecido en la norma.

Tabla 1.8 Congruencia de resultados prácticos vs simulación

Medidas de criterios de lesión en la prueba de impacto de parachoques y simulación para el Sedan					
Humedad		Velocidad (km/h)	Aceleración (g)	Desplazamiento de corte (mm)	Angulo de Flexión (°)
Prueba	29% RH	40.1	198	1.7	12.6
	28% RH	40.2	204	2.2	12.8

Fuente: (Matsui y Takagi, 2012)

El modelo CAE (elementos finitos) de la prótesis simuladora de pierna excede las aceleraciones máximas en 3.03%, el desplazamiento de corte con 29.41% y el ángulo de flexión en un 1.58% según un análisis comparativo respecto a pruebas experimentales. Razones por las cuales consideramos a este modelo como una forma confiable y barata de obtener resultados coherentes a la realidad, además de ser procedimientos versátiles por permitir evaluar la lesividad de cualquier elemento externo que pueda impactar a la pierna de una persona. Habría que decir también que las simulaciones son ambientalmente amigables por no producir desechos de materiales técnicos automotrices después de ensayos por colisión.

1.15 GLOBAL NCAP

Los programas NCAP a nivel mundial proporcionan resultados de seguridad y protección de los ocupantes dentro del habitáculo, así como para los peatones mediante el uso de impactadores y/o dummies físicos o modelos CAE. Este informe se convierte en una herramienta para la toma de decisiones previo a la compra de un vehículo. Los requerimientos de los diferentes programas NCAP según su localidad se detallan en la Tabla 1.9, siendo EuroNCAP los más exigentes en

lo que refiere al impacto del guardachoque con el miembro inferior del peatón (Constantin, Iozsa y Stan, 2017).

Los límites máximos de cada una de las instancias enumeradas en la parte superior de la tabla se concluyen posterior a los ensayos de laboratorio. Todos los atropellamientos se ejecutan con una dirección de impacto de 0° (Figura 3.18), por supuesto se implementa un impactador de miembro inferior normado y certificado por la EEVC (3.2 Simulación: Certificación dinámica del impactador TRL según EEVC).

Tabla 1.9 Valores límites de las variables según organismos de seguridad peatonal

		Velocidad de impacto	Ángulo máximo de flexión dinámica de la rodilla	Desplazamiento máximo de rotura dinámica de la rodilla	Aceleración máxima en el extremo superior de la tibia
Reglamento (CE) n.º 78/2009 del parlamento europeo y del consejo de 14 de enero de 2009		40 km/h	19°	6.00 mm	170g
Informe del Grupo de Trabajo (WG) EEVC 17 del Comité Europeo de Seguridad Vehicular Reforzada 2002		40 km/h	15°	6.00mm	150g
EuroNCAP	Max score	40 km/h	15°	6.00mm	150g
	Zero score	40 km/h	20°	7.00mm	200g
KNCAP	Max score	40 km/h	15°	5.00mm	150g
	Zero score	40 km/h	19°	6.00mm	170g
GTR No.09		40 km/h	19°	6.00mm	170g

Fuente: (Constantin et al., 2017)

Cada uno de los límites permisibles y máximos que establece cada entidad servirán como soporte para juzgar nivel de agresividad de los guardachoques, decidir si un modelo posee características estructurales que protejan al peatón y si cumple con los estándares de seguridad que pueden limitar su producción y/o circulación.

1.16 CARROCERÍA: SECCIÓN DELANTERA

Durante una colisión frontal, el diseño estructural y la configuración de la sección delantera de un vehículo se centran en la búsqueda de una optimización multiobjetivo. El principal objetivo es maximizar la capacidad de absorción de energía a través de una distribución adecuada de fuerzas, utilizando materiales específicos y una geometría optimizada en la estructura frontal. Esto permite mitigar los efectos del impacto y reducir las fuerzas transmitidas al habitáculo del vehículo a la vez que se minimiza las deformaciones estructurales.

Además, se busca minimizar intrusión, es decir, limitar la penetración de los componentes delanteros en el habitáculo durante una colisión. Esto se logra mediante el uso de zonas de deformación controlada, como los "crash box".

En la Figura 1.12 se presenta un esquema de un modelo de elementos finitos (FE) que representa la estructura frontal.

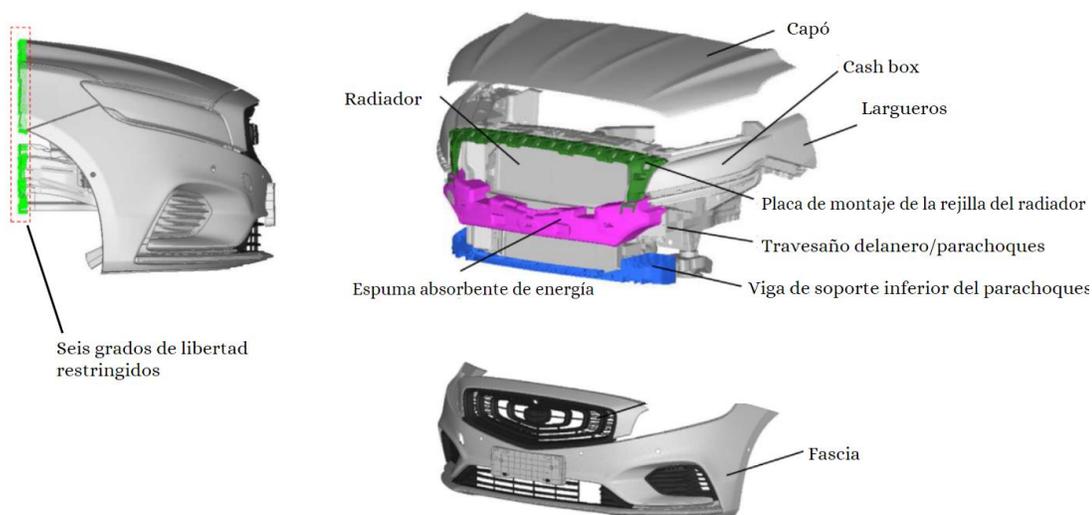


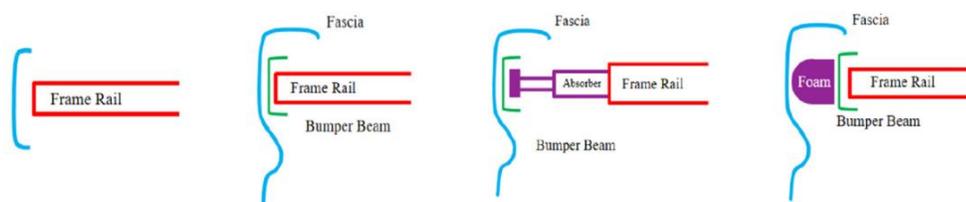
Figura 1.12 Modelo FE de estructuras frontales
(Lei et al.,2021)

La fascia, como zona de impacto primaria, se encarga de cubrir y englobar el parachoques. En su composición se incluyen elementos como rejillas, cuartos, deflectores, fascias delanteras, portaplacas, entre otros.

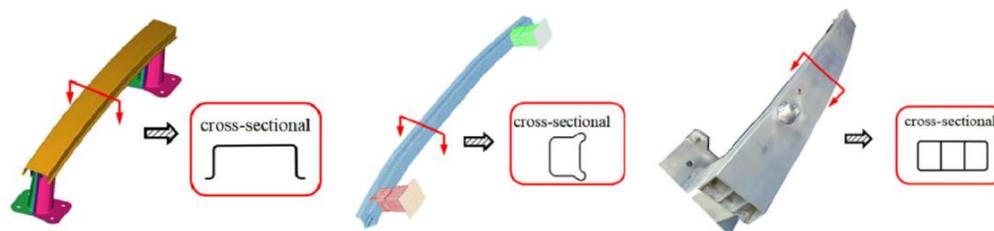
El parachoques, también conocido como bumper, cumple la función de unir los largueros formando una especie de travesaño. Dado los materiales con los que está construido, su objetivo es absorber y distribuir la energía generada por impactos de menor magnitud, generalmente en el rango de 5 a 10 km/h. Una vez superados estos límites y con el bumper en su estado más

rígido, la energía se disipará a través de los "crash box", los cuales se deforman de manera controlada a partir de velocidades cercanas a los 20 a 30 km/h (al igual que los airbags). Estos "crash box" o "frame rail" y otros mecanismos ayudan a absorber la energía del impacto y redirigirla lejos del compartimento de pasajeros.

Sin embargo, a velocidades superiores a los 60 km/h, la zona de impacto que comienza a tener una influencia significativa es la estructura principal del vehículo, que incluye el chasis y los componentes estructurales de resistencia. En estas condiciones, la protección del vehículo y de sus ocupantes se basa principalmente en la solidez y resistencia de la estructura del vehículo en su conjunto.



(a) Configuraciones típicas del frente vehicular



(b) Sección transversal del parachoques

Figura 1.13 Sistemas de parachoques
(Sun et al., 2021)

Todos los elementos que intervienen en la absorción de energía cinética del frente vehicular tienen una configuración diferente de acuerdo con las consideraciones de diseño de las marcas automotrices (a). El bumper se diseña estratégicamente para absorber y dispersar la energía generada durante una colisión. Su construcción utiliza materiales de alta resistencia y se basa en principios geométricos (b) y de espesor de lámina adecuados para una óptima respuesta ante impactos. Los bumpers se asientan sobre crash box que en su mayoría son elementos programados mecánicamente mediante pliegues, orificios y canales que actúan como puntos fusibles y concentradores de esfuerzos para absorber de manera controlada energía cinética específica cuando se someten a cargas axiales como es el caso durante un choque frontal.



Figura 1.14 Carrocerías inteligentes - deformación programada
(Autocrash, 2020)

El diseño y fabricación de las carrocerías representan un desafío de ingeniería, ya que deben cumplir con requisitos de rigidez, ligereza y capacidad de deformación. La ciencia de los materiales sigue avanzando en la búsqueda de materiales con límites elásticos más altos, a través de aleaciones y tratamientos superficiales, para cumplir con las exigencias estructurales. Al mismo tiempo, se está implementando el uso de materiales como aluminio, fibra de carbono y otros, con el fin de reducir el riesgo de lesiones en peatones.

Por otro lado, se sigue trabajando en el desarrollo de la seguridad de los pasajeros. Se han incorporado elementos retráctiles y colapsables, como la columna de dirección y los soportes del motor, diseñados para evitar la penetración de estos elementos en el habitáculo en caso de colisión.

CAPITULO II

2. METODOLOGÍA

En lo que respecta al marco metodológico se implementó con el fin de analizar por medio de simulación computacional el comportamiento dinámico de un atropellamiento y las afecciones sobre la pierna de un peatón, se utilizó técnicas y herramientas para recrear un entorno de accidentabilidad de mayor frecuencia según estadísticas internacionales.

Se ordenó de forma lógica los pasos del diseño de investigación, para ser desarrollados cada uno de ellos en las diferentes secciones que conformaban este capítulo.

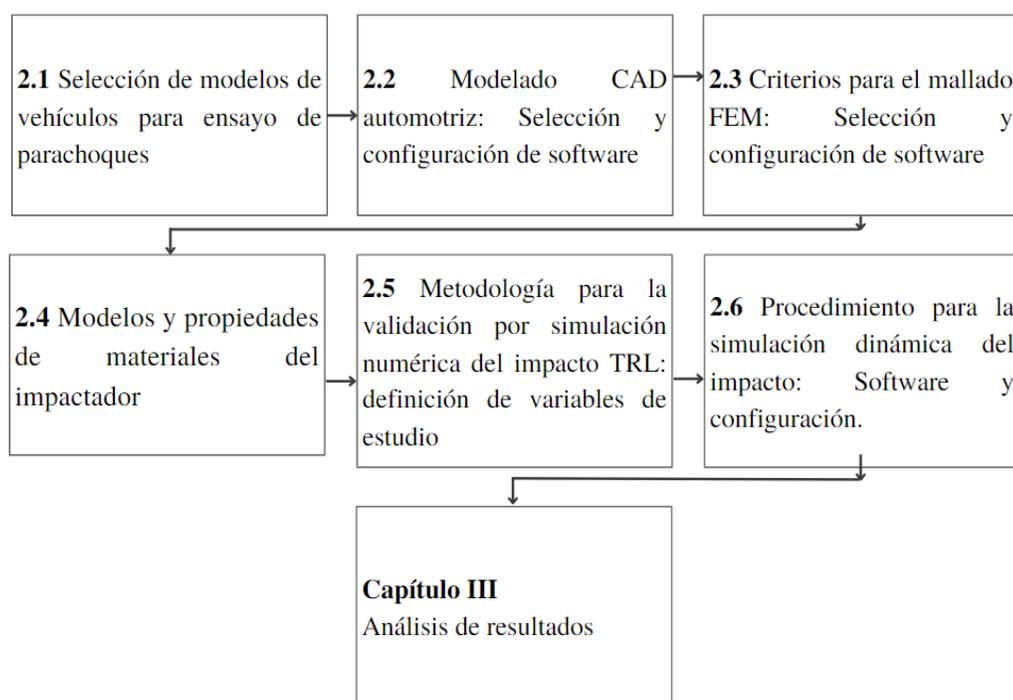


Figura 2.1 Marco metodológico

2.1 SELECCIÓN DE LOS MODELOS DE VEHÍCULOS PARA ENSAYO DE PARACHOQUES

En constancia con la estadística del parque automotor ecuatoriano, se tomó los tres segmentos de vehículos más involucrados en siniestros de tránsito, con mayor número de lesionados y fallecidos causados a lo largo de todo el 2021. Como se evidenció en la Figura 1.6: los automóviles, vehículos que no fueron identificados (SUV's) y camionetas fueron los vehículos

cuadriciclos que más resaltan en las estadísticas y son de interés para el análisis, exceptuando a las motocicletas.

Las Tablas 2.1, 2.2 y 2.3 mostraron las marcas y modelos más vendidos por segmento durante el 2021, mismos que fueron de interés para la generación de geometrías para la simulación por atropellamiento.

2.1.1 AUTOMÓVILES

Los automóviles ocuparon el primer lugar entre todos los segmentos de vehículos involucrados en siniestros, lesionados y fallecidos. Por lo tanto, también fueron los vehículos cuadriciclos con mayor presencia en el parque automotor.

Acorde a los datos que arrojó el SRI (Servicio de Rentas Internas) durante el 2021 la marca Chevrolet se posicionó como líder en ventas superando a Kia y Renault. El modelo que en mayor proporción fue comercializado es el Chevrolet SAIL LS AC 1.5 4P 4X2 TM con un total de 24211 unidades vendidas como lo resalta la Tabla 2.1.

El Chevrolet Sail cuenta con un MEP con cuatro cilindros dispuestos en línea, un total de 16 válvulas y con inyección electrónica multipunto. Una cilindrada de tan solo 1498cc, traduciéndose en un vehículo muy económico que a las 6000rpm brinda una potencia de 109hp, así como a sus 4000rpm logra un torque de 141Nm.

Tabla 2.1 Automóviles nuevos más vendidos durante el 2021

	SAIL LS AC 1.5 4P 4X2 TM	24 211
		
	BEAT PREMIER AC 1.2 4P 4X2 TM	17 092
	SPARK GT LS AC 1.2 5P 4X2 TM	14 563
	RIO LX AC 1.4 4P 4X2 TM	2 191
	SOLUTO XCITE AC 1.4 4P 4X2 TM	1 874
	PICANTO LX AC 1.0 4P 4X2 TM	1 358

 RENAULT	STEPWAY INTENS FASE II AC 1.6 5P 4X2 TM	1 927
	LOGAN ZEN FASE II AC 1.6 4P 4X2 TM	668
	SANDERO ZEN FASE II AC 1.6 5P 4X2 TM	406

Fuente:(SRI, 2021)

2.1.2 CAMIONETAS

El 94% del total de camionetas comercializadas corresponden a modelos doble cabina, como lo es la Chevrolet D-Max. El modelo HI RIDE AC 2.5 CD 4X2 TM DIESEL fabricado por Isuzu se impuso en ventas durante todo el 2021, superando modelos de su propia familia y marcas como Great Wall y Toyota. Utiliza un motor diesel de 2.5 litros con tecnología Common Rail Direct Injection (CRDI) que entrega una potencia de 136 caballos de fuerza y un torque de 320 Nm. Está equipada con transmisión manual de 5 velocidades y sistema de frenos con ABS y EBD para mayor seguridad en la carretera.

Tabla 2.2 Camionetas nuevas más vendidas durante el 2021

 CHEVROLET	D-MAX CRDI HI RIDE AC 2.5 CD 4X2 TM DIESEL	38 289
		
	D-MAX CRDI 2.5 CD 4X2 TM DIESEL	15 010
	D-MAX CRDI FULL AC 2.5 CD 4X4 TM DIESEL	14 207
 Great Wall	WINGLE 7 AC 2.0 CD 4X4 TM DIESEL	1 066
	WINGLE STEED AC 2.4 CD 4X2 TM	796
	WINGLE 7 AC 2.0 CD 4X2 TM DIESEL	663
 TOYOTA	HILUX 2.7 CD 4X2 TM	1 717
	HILUX 2.4 CD 4X4 TM DIESEL	766
	HILUX SR 2.7 CD 4X4 TM	682

Fuente: (SRI, 2021)

2.1.3 SUV'S

La Chevrolet Captiva LT Turbo 5pas AC 1.5 5p 4x2 TM es un vehículo SUV compacto de 5 puertas que cuenta con un motor turboalimentado de gasolina de 1.5 litros y 4 cilindros, capaz de generar una potencia máxima de 147 caballos de fuerza y un torque de 250 Nm. Además, tiene una caja de cambios manual de 6 velocidades, tracción delantera y una suspensión McPherson en la parte delantera y trasera de tipo MultiLink. En cuanto a seguridad, cuenta con frenos ABS, control electrónico de estabilidad, asistente de arranque en pendientes, cámara de visión trasera y bolsas de aire frontales y laterales para conductor y pasajero.

Tabla 2.3 SUV's nuevos más vendidos durante el 2021

	CAPTIVA LT TURBO 5PAS AC 1.5 5P 4X2 TM	24 564
		
	CAPTIVA PREMIER TURBO 7PAS AC 1.5 5P 4X2 TM	16 773
	GROOVE PREMIER AC 1.5 5P 4X2 TM	11 074
	STONIC LX AC 1.0 5P 4X2 TM HYBRID	2 204
	SELTOS LX AC 1.6 5P 4X2 TM	2 089
	SPORTAGE LX AC 2.0 5P 4X2 TM	1 244
	RUSH AC 1.5 5P 4X2 TM	1 008
	COROLLA CROSS MID AC 1.8 5P 4X2 TA HYBRID	998
	COROLLA CROSS HIGH AC 1.8 5P 4X2 TA HYBRID	933

Fuente: (SRI, 2021)

2.2 MODELADO CAD AUTOMOTRIZ

Para el modelado de autos se utilizó el programa CAD SolidWorks en el que se representó los principales componentes frontales como mascarillas, capo, parachoques frontal, neblineros, faros entre otros componentes. Para el dibujo se utilizaron componentes de tipo superficie para generar geometrías realistas que conforman el frente del vehículo.

2.2.1 TÉCNICA DE MODELADO EN 3D DE AUTOS

El propósito de este apartado es exponer el proceso para el modelamiento en 3D de los autos de interés para el estudio. El generar geometrías de los parachoques se consideró un importante paso para garantizar resultados validos durante las simulaciones, indiscutiblemente.

Cabe mencionar que las fotos de los vehículos sirvieron como modelos base que permitieron obtener proporciones de los vehículos, además lograron resaltar curvas bases y características que lograron dar la singularidad de cada frente de los tres automotores.

Dada la versatilidad del software SolidWorks y la destreza de cada usuario se pudo dejar a libre configuración y técnicas para la réplica de los vehículos. Se consideró detallar la sistemática aplicada para generar las geometrías del Chevrolet Captiva puesto que es la que se aplicó también para el Chevrolet Dmax y Sail.

En primer lugar, se importó las fotos y/o planos de referencia del modelo mediante la herramienta Sketch Picture. Las vistas lateral transversal y longitudinal fueron centradas en el origen común como lo ejemplifica la Figura 2.2.

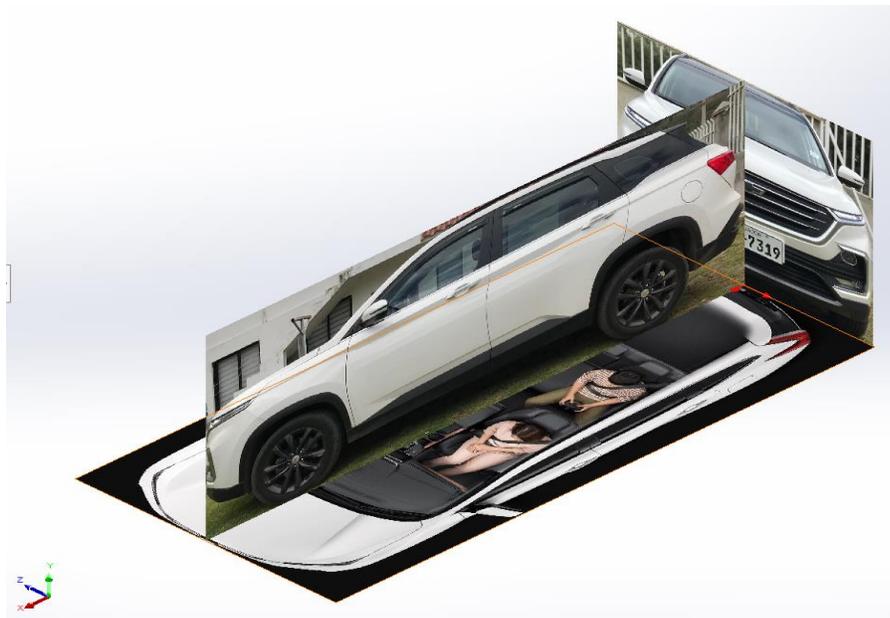


Figura 2.2 Imágenes de guía en los planos tridimensionales

Mediante la herramienta de trazado, líneas constructivas y comando tipo mirror se generó un croquis en 2D en el plano Y-Z que respondió a la vista lateral del vehículo, a su vez el plano X-

Z respondió a la vista del techo del vehículo. Dicho lo anterior en cada uno de los dos planos se delineó acorde a la línea roja de la Figura 2.3.



Figura 2.3 Reconocimiento de la estructura alámbrica

En este punto, el objetivo fue crear una curva en 3D mediante la fusión de los croquis 2D creados anteriormente como muestra la Figura 2.4. La línea expuesta en azul resultó de usar la función Proyectar curva de modo que satisfice su geometría proyectada en cada uno de los planos.

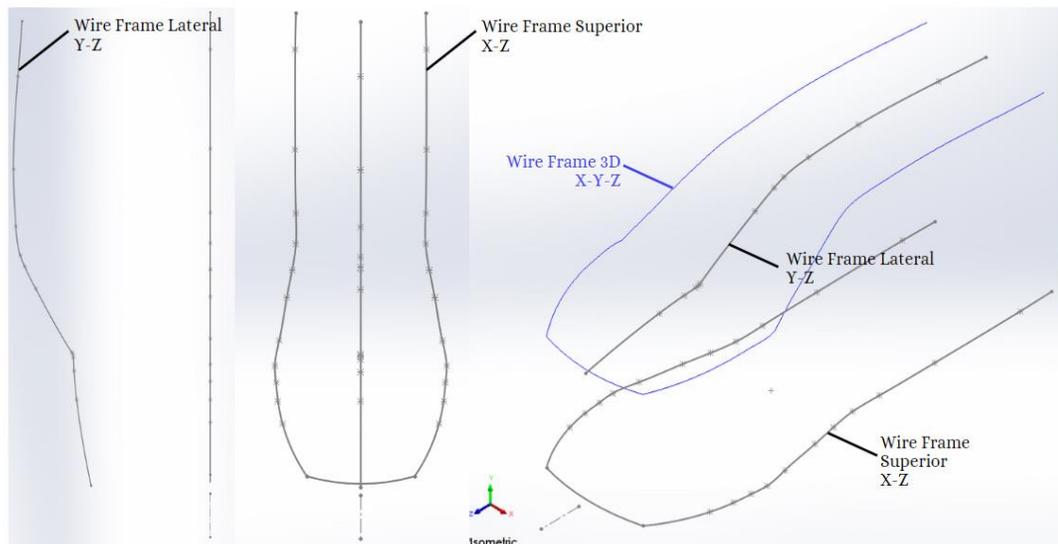


Figura 2.4 Wire frame en los planos Y-Z, X-Z y curva 3D

De igual manera se continúa con la localización y creación de curvas 3D principales de la parte externa del vehículo, con el mismo proceso detallado anteriormente. El fin de estos croquis fue

de dotar de las características y personalidad al vehículo. Fue conveniente realizar el bosquejado de al menos 4 líneas guías como se mostró en la Figura 2.5 al límite que dividió el techo del lateral, lateral superior, medio e inferior (chasis).

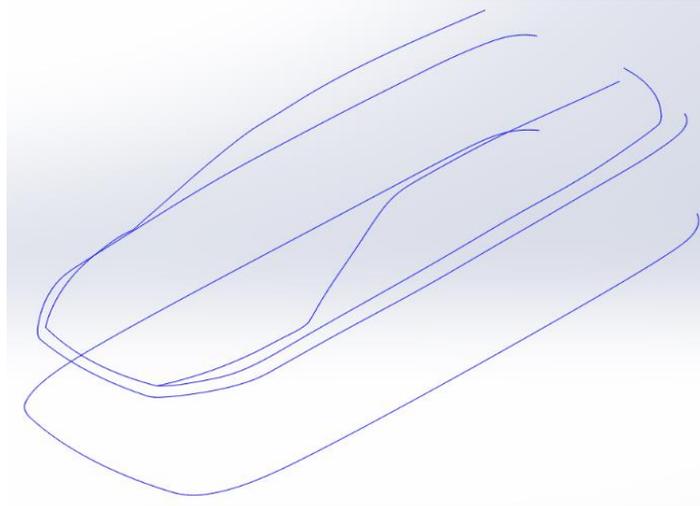


Figura 2.5 Curvas características 3D

Se consideró dotar de un perfil visto desde el frente del vehículo. Para ello se creó un punto 3D en cualquiera de las curvas a una altura aproximada del final del parabrisas. Se continuó con la creación de un plano con referencia al punto y a la vez paralelo al plano Alzado. (Ver Figura 2.6).

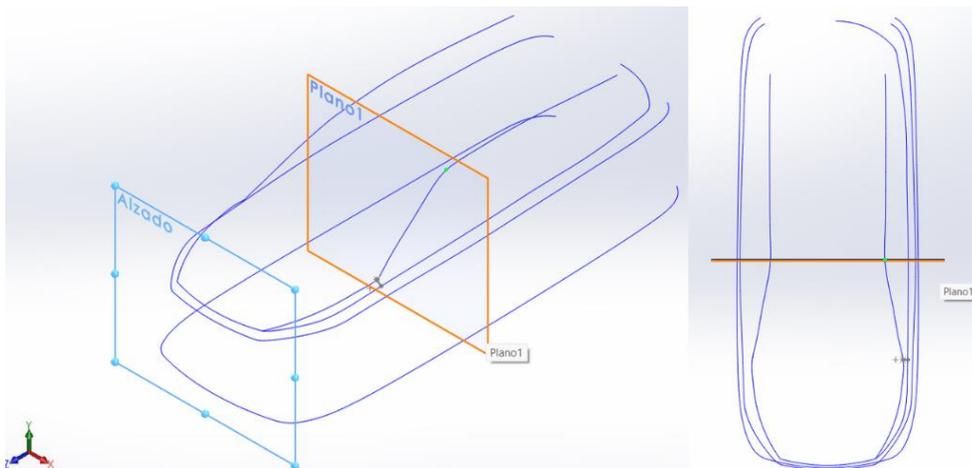


Figura 2.6 Plano frontal para croquis

Cada una de las líneas constructivas mantuvieron simetría en sus dos mitades, fiel al modelo físico como lo señala la Figura 2.9. Fue fundamental que todas las entidades estuvieran unidas para tener una intersección perfecta, esto con el fin de cumplir lo antes mencionado se utilizó el comando perforar, en la cual se referenció dos entidades a unirse. Pero cuando las separaciones sean detectadas por el software no se crearán las superficies.

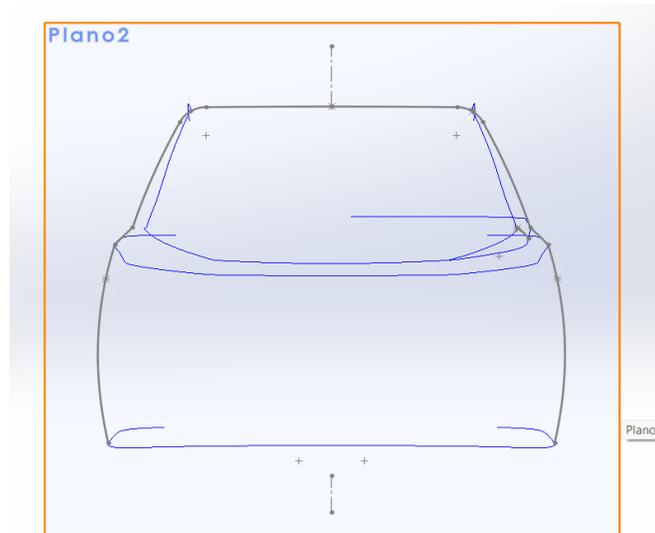


Figura 2.7 Croquis del perfil desde una vista frontal

La operación Superficie limitante permitió crear superficies de alta calidad por encima de la herramienta recubrimiento. Razón por la cual el modelado automotriz de carrocerías fue en su mayoría comandado en un 90% aproximadamente por esa operación. Además, se agregó que las superficies se crearan siempre y cuando las curvas 3D sean transformadas en croquis.

La Figura 2.8 mostró la gestión de líneas para generar superficies. Los Splines (líneas en el espacio) en color celeste determinaron la dirección en la que se extenderá la superficie, mientras que las líneas determinaron el límite hasta donde se extendió los contornos, estos están representados en color rosa.

Se produjo el mismo proceso para crear el resto de las superficies complejas, ver Figura 2.9. Utilizando Splines anteriormente creadas como entes de dirección y limítrofes.

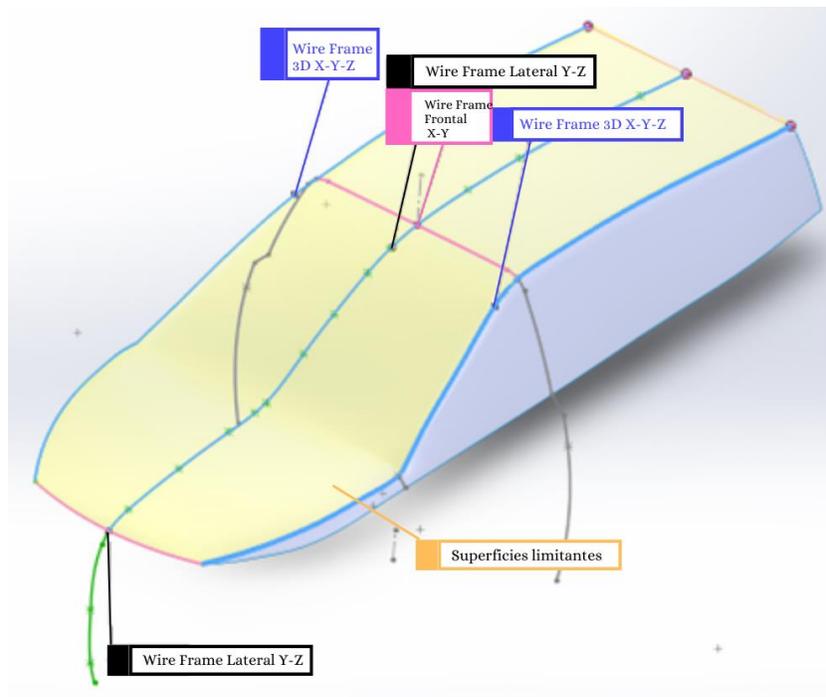


Figura 2.8 Superficies limitantes

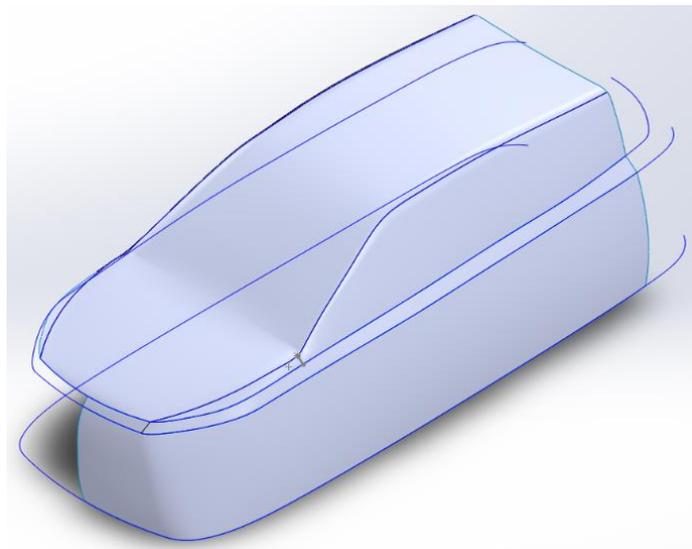


Figura 2.9 Superficies complejas con Splines

En cuanto a los detalles del parachoques esto fue generado por medio de la herramienta líneas de partición. La herramienta en cuestión permitió dividir una o más superficies seleccionadas en más áreas con geometrías que el usuario diseño.

Para ilustrar mejor el comportamiento de las líneas sobre la superficie se adjunta la Figura 2.10. Adicional, se evidenció en color naranja las líneas de partición que se dibujaron sobre un croquis del plano frontal X-Y (1).

Las líneas de partición se caracterizaron por estar suspendidas en el espacio sin formar parte de la geometría del vehículo como se ejemplificó (2) y (3).

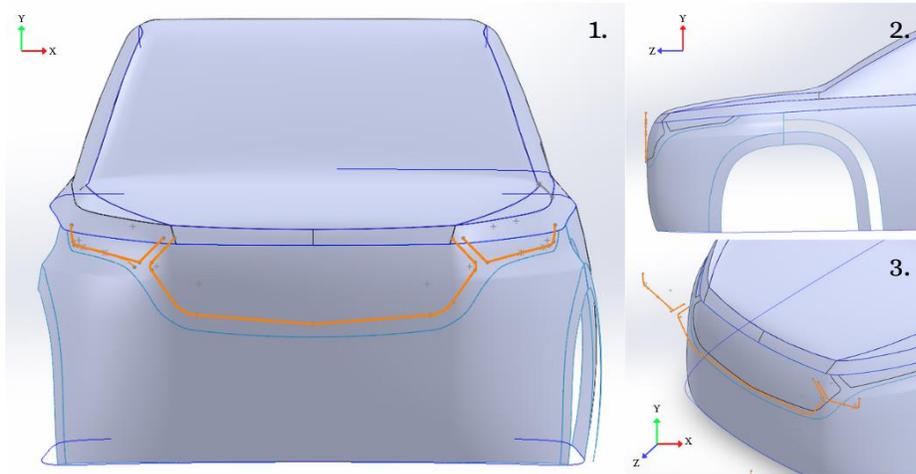


Figura 2.10 Croquis de líneas de partición

Como se resaltó en la línea verde del apartado (1) de la Figura 2.11, a pesar de que existió excedentes de líneas de partición que involucraron a otras piezas, estas líneas segmentaron únicamente las superficies de interés que se seleccionaron (áreas celestes).

Dicho lo anterior una vez que fueron proyectadas las líneas y cortadas las superficies (2), el software permitió eliminar caras, como se pudo evidenciar en la imagen (3) las cavidades que ocuparon los faros y la mascarilla del radiador.

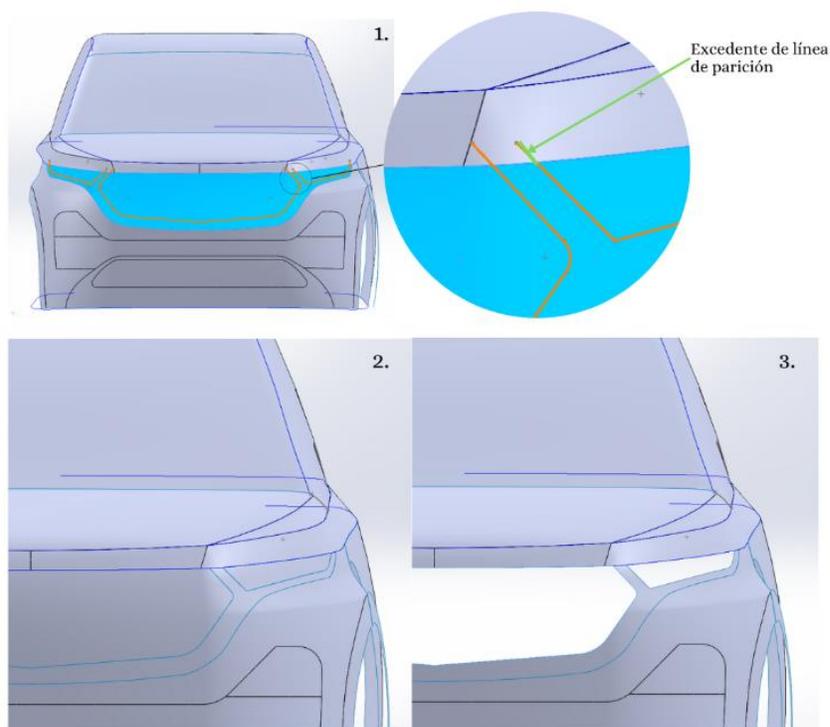


Figura 2.11 Líneas de partición excedentes (1), segmentación (2) y eliminación de caras (3).

En cuanto a los detalles en relieve de los parachoques la combinación de los comandos Superficie-Equidistancia y Solido-Mover/Copiar resultaron como la mejor opción, puesto que permitieron mover una cara en cualquiera de los tres ejes como se mostró en la Figura 2.12.

Para iniciar, mediante el comando Superficie-Equidistancia se creó una superficie idéntica a una superficie que fue seleccionada, en el mismo lugar y de iguales dimensiones (Superficies sobrepuestas). La nueva superficie idéntica fue representada en color azul (2) y en verde la superficie original (1).

Se seleccionó una de las dos caras idénticas para mover a lo largo del eje Z. La superficie fue trasladada sin perder sus características mediante el comando Solido-Mover/Copiar. Sirvió de ejemplo el apartado (2) y (3) se pudo observar que la superficie seleccionada tuvo un desfase en el eje Z generando así una profundidad sin paredes.

Por supuesto se pudo observar el progreso igual al apartado (3) siempre y cuando la superficie verde del apartado (1) fuese suprimida con el comando Eliminar cara.

Finalmente, se generaron los contornos de unión (celeste) entre el parachoques (gris) y la superficie desfazada (negro), esto se lo detalló anteriormente, asimismo, se desarrolló mediante Superficies limitantes tal como se ejemplificó (4).

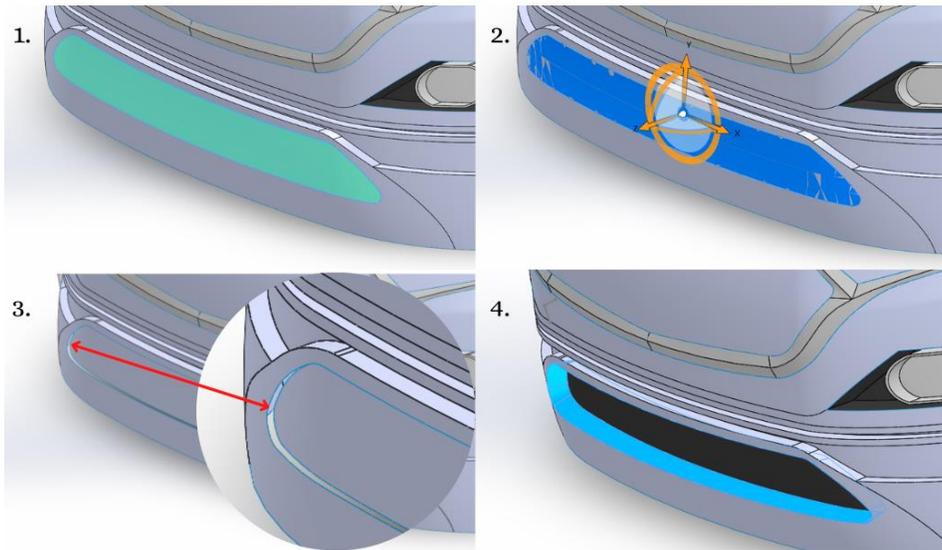


Figura 2.12 Geometrías complejas

Este mismo proceso se realizó para generar detalles en cualquiera de los planos, dando como resultado geometrías complejas de las superficies de un vehículo. Ver Figura 2.13.

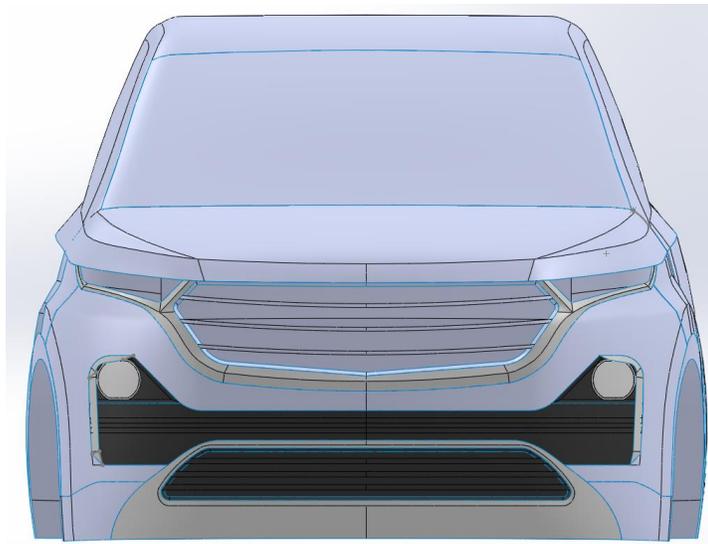


Figura 2.13 Modelo automotriz de superficies

De manera similar la constitución del chasis, largueros, travesaños y el radiador se desarrollaron mediante comandos antes detallados, entre los principales se pudo identificar las líneas de partición, superficies limitantes y simetría.

Una vez que se crearon los nuevos elementos con Splines y asignado un espesor con Dar espesor (largueros). Se unió cada uno de estos al modelo mediante Superficie-Coser, cuando los dos elementos se excedieron y transpusieron entre sí, se utilizó Superficie-Recortar para eliminar el excedente del cuerpo.

Además, se utilizó la Figura 2.14 para mostrar las fases de diseño comprendida desde materialización de los largueros del bastidor delantero y paragolpes, siguiendo con las protecciones del apoyo de la suspensión. Seguido por las columnas del radiador y finalizando con el travesaño delantero y el radiador.

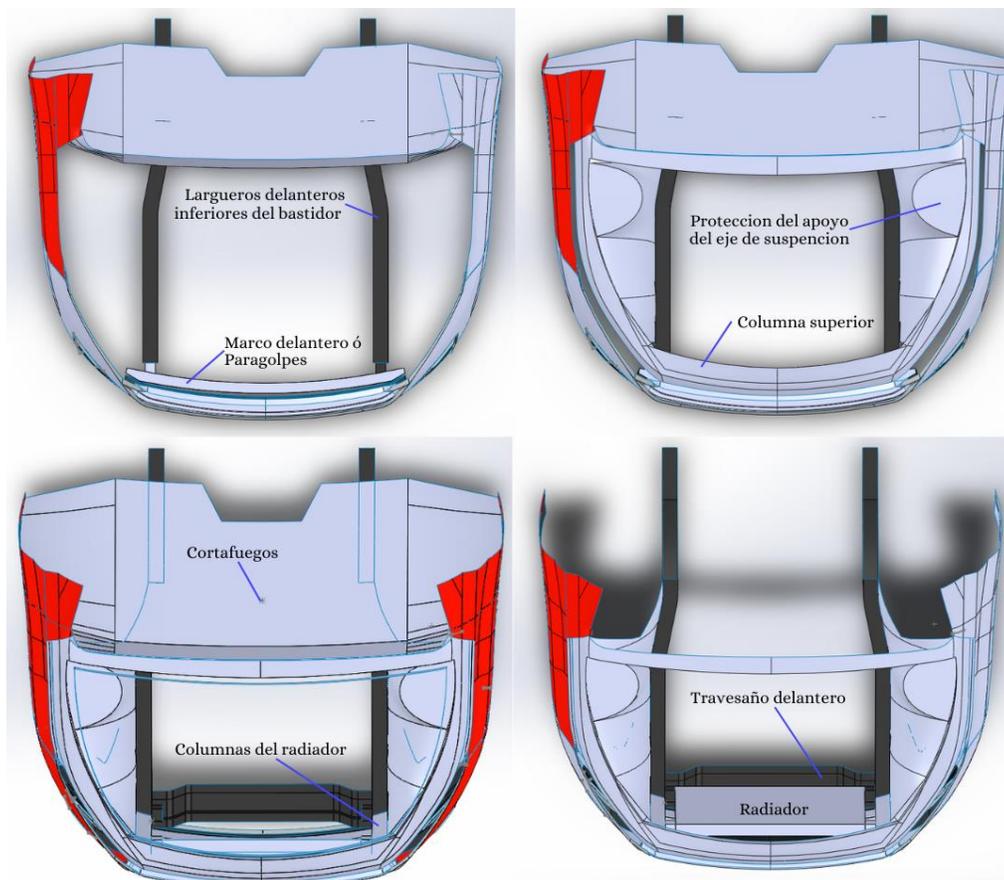


Figura 2.14 Modelado del chasis, bastidor y carrocería interna

2.3 CRITERIOS PARA EL MALLADO FEM

El mallado de una pieza (dominio) fue una técnica numérica que se usó en los análisis para elementos finitos FEM, la malla resultó de la subdivisión continua del dominio. Este proceso no solo buscaba generar cuerpos geométricos más simples (cuadrados y triángulos) llamados elementos, sino también permitió la simulación mediante procesos numéricos del software, siendo el método idóneo para predecir el comportamiento mecánico y sus reacciones, este fue sometido a fuerzas y efectos naturales.

Se definió como elementos a la unión de nodos mediante aristas formando figura geométrica, estos elementos se fueron extendieron sobre la superficie o volumen producto del proceso de mallado. En general el software utilizó primordialmente cuadrados para mallar las superficies más simples/lisas, y complementar las superficies complejas con triángulos.

Se analizó el comportamiento de todo un sistema (pieza/s) el cual resultó complejo y a la vez demandó de un gasto computacional elevado, con base en lo anterior, se pudo reconocer la necesidad de discretizar la pieza en piezas aún más pequeñas (elementos), esto permitió evaluar cada uno de los segmentos que arrojaron resultados que fueron confiables. El FEM se basó en un análisis numérico, en la solución de sistemas de ecuaciones diferenciales PDE en cada nodo de los elementos y se interpoló los valores encontrados en los nodos de un elemento adyacente. Durante el proceso de mallado del software y refinamiento manual de la malla se buscó cumplir con la oblicuidad, este índice valoró los ángulos de los elementos cuadrados y triángulos, ya sea reduciendo el tamaño de los lados o eliminando nodos de forma manual, el objetivo fue mantener una malla con elementos equilaterales y/o equiangulares. La Tabla 2.4 se mostró los rangos de aceptación para el mallado según la oblicuidad.

Tabla 2.4 Calidad de malla acorde a los rangos de oblicuidad

Índice de oblicuidad	Calidad de malla
1	Deforme
0.9 – <1	Mala
0.75 – 0.9	Pobre
0.5 – 0.75	Justa
0.25 – 0.5	Buena
>0 – 0.25	Excelente

0	Equilátera
---	------------

Fuente: (Molina y Vilaña, 2018)

ANSA fue desarrollado por BETA CAE Systems fue la herramienta encargada de generar los elementos finitos de las geometrías CAD importadas desde SolidWorks. Para el análisis del tipo impacto estructural automotriz se recomendó un índice Jacobiano mayor a 0.45.

La distorsión de un elemento de malla se calibró y midió mediante el índice Jacobiano. Esto se analizó geoméricamente este parámetro en la Figura 2.15 tenemos dos matrices Jacobianas. El cubo de la derecha a diferencia del de la izquierda presentó un desface del nodo a y la matriz Jacobina de la parte izquierda (matriz idónea).

Para el cubo de la izquierda, se generó una superficie entre b, c y d. El vector normal a este plano se expresó como $(c-b) \times (d-b)$.

Enseguida se calculó la distancia con signo de a hasta el plano generado mediante la expresión $(a-b) \cdot \hat{n}$. El signo de la respuesta a esta última operación determinó si la posición de a fue válida o no.

Como se apreció en la matriz del lado izquierdo, el vector de la normal tuvo dirección positiva hacia el nodo a. Por lo tanto, no hubo interferencia.

Sin embargo, el nodo a de la matriz Jacobiana de la derecha tuvo una distancia con signo negativo puesto que se encuentro en el lado contrario a la dirección de la normal. Entonces, se definió como un elemento con interferencias que no resultó válido para el análisis por elementos finitos.

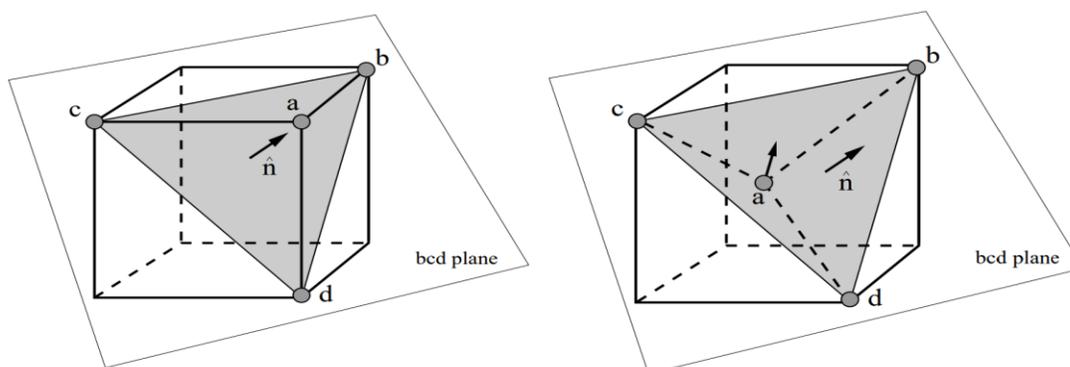


Figura 2.15 Validación de elementos bajo el criterio Jacobiano
(Bucki, Lobos, Payan y Hitschfeld, 2011)

Una vez que el software optimizó todas las matrices para no tener interferencias, se continuo con el cálculo de la Razón Jacobina.

Se tomó en cuenta a la distorsión general de una matriz que no dio información, entonces, se utilizó la Razón Jacobiana (JR) en la cual se evaluó la distorsión de nodos que existió entre un elemento de malla real y un elemento de malla referencia/ideal.

Además, se calculó la matriz Jacobinana del nodo a desfazado, se obtuvo que $|J(a)|$ fue muy pequeño debido a que a estuvo demasiado cerca del plano generado bcd. Razón por la cual JR(a) también fue un valor muy pequeño. La razón Jacobina tuvo un valor ideal de 1, pero manteniendo siempre una configuración como la matriz de la izquierda de la Figura 2.29.

Puesto que no se pudo mantener JR=1 dentro del mallado por la naturaleza de las geometrías complejas.

Según los desarrolladores del software FE ANSYS, si todos los nodos de un elemento y se mantienen entre 0.03 y 1, se considera en elemento de buena calidad. Basta que la JR de un solo nodo este fuera de rango para considerarse como un elemento de mala calidad (Buck et al., 2011)

En conclusión, la relación Jacobiana cualifica que tan bueno o mal elemento es un elemento, mediante las relaciones que existe entre las normales de las caras de elementos adyacentes. A lo largo del proceso de refinamiento de malla se tiende alcanzar un valor de 1 que representa una malla de la más alta calidad (Molina y Vilaña, 2018).

2.3.1 MODELOS DE MATERIALES AUTOMOTRICES

Los materiales utilizados en la construcción de un vehículo se clasifican como "no comerciales", lo que implica que son auténticos y no se adhieren a designaciones estandarizadas. Estos materiales destacan por sus propiedades mecánicas únicas, lo cual los distingue en términos técnicos y la diferencia de los materiales convencionales ampliamente comercializados en el mercado. Estos materiales son suministrados por empresas especializadas en la formulación, producción y suministro de materiales, que se dedican a satisfacer las necesidades específicas de las empresas automotrices para la fabricación de piezas y componentes para los sistemas de vehículos.

Para la asignación de materiales se recurrió a modelos FE que fueron utilizados en investigaciones automotrices, como fue en el caso de La Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras (NHTSA). La agencia del departamento de transporte de los

Estados Unidos puso a disposición modelos automotrices confiables para el análisis y simulación.

En el repositorio se encontró el Toyota Yaris del 2010, del cual se rescató las propiedades mecánicas de los materiales que se usaron. Las características del material resultaron del ensayo de probetas en el laboratorio, mediante ensayos como el de tracción, compresión, etc (NHTSA, 2010).

En primer lugar, la Tabla 2.5 describe las propiedades mecánicas del acero estructural que se constituyó el chasis. Después se referenció el material que se representó en el polímero técnico de todo el frente del vehículo como guardachoques y mascarilla.

Tabla 2.5 Propiedades mecánicas de los materiales

Características	Denominación
Material acero del auto	
Densidad masa	7,89e-6 kg/mm ³
Módulo de elasticidad	200 GPa
Radio de Poisson	0,3
Límite de fluencia	0,35 GPa
Parámetro de tasa de deformación C	8
Parámetro de tasa de deformación P	8
Material polímero técnico del parachoques	
Densidad masa	1,41e-06 kg/mm ³
Módulo de elasticidad	1 GPa
Radio de Poisson	0,3
Límite de fluencia	0,020 GPa
Parámetro de tasa de deformación C	8
Parámetro de tasa de deformación P	8

Fuente: (NHTSA, 2010)

C y P son parámetros esenciales en el modelo de material de Cowper-Symonds, ampliamente utilizado junto con el modelo de Johnson-Cook para describir el comportamiento de los materiales en situaciones de alta velocidad de deformación, como impactos o explosiones. Estos parámetros permiten ajustar la velocidad de deformación en los modelos para lograr una simulación más precisa del comportamiento real del material. Además, se combinan con otros parámetros, como la tensión y la deformación, para definir las propiedades mecánicas del material en el software LS-DYNA. Los valores de C y P dependen del tipo de material y las

condiciones específicas de la simulación. Su selección requiere una evaluación cuidadosa de las características del material y los objetivos de la simulación.

En aplicaciones que involucran altas tasas de deformación, los parámetros C y P generalmente no se obtienen mediante pruebas de tracción debido a las limitaciones de los equipos de prueba existentes, especialmente en términos de baja frecuencia de muestreo.

Estos parámetros varían para diferentes tensiones de referencia, ya que cada tensión tiene su propia sensibilidad a la velocidad de deformación. Para estimar estos parámetros, se utilizan métodos de ingeniería inversa que involucran simulaciones numéricas que reproducen fielmente el experimento real. Esto implica realizar una serie de simulaciones numéricas con diferentes combinaciones de parámetros de materiales para determinar cuál de estas combinaciones se ajusta mejor a los resultados experimentales obtenidos.

Škrlec y Klemenc (2016) han propuesto el uso de matrices de Taguchi como metodología de estimación para reducir la variabilidad y omitir combinaciones de parámetros irrelevantes en las simulaciones. También Marangoni y Massaroppi (2017) aplican métodos de búsqueda de parámetros mediante simulaciones de ensayo de impacto Izod en modelos de materiales constitutivos, por otro parte Hernandez, Maranon, Ashcrof y Casas (2013) calculan mediante modelos matemáticos, basados en algoritmos genéticos de codificación real con adaptación de rango.

Al igual que las propiedades mecánicas asignadas, es necesario representar el comportamiento mecánico del acero implementado, para lo cual los estamentos (NHTSA) sometieron una probeta a un ensayo de tracción y generó una curva del comportamiento mecánico del material del cual fue fabricado, denominada como curva esfuerzo-deformación. Durante el ensayo el material paso la zona elástica, zona elastoplástica y zona plástica, para finalmente experimentar el fallo o rompimiento del material.

Durante el análisis, el software de simulación LS-PrePost emplea únicamente la zona plástica como datos de entrada de una curva. En esta etapa, el material experimenta una deformación progresiva y permanente hasta alcanzar su resistencia última a la tracción, momento en el cual se produce el rompimiento de la probeta.

La Figura 2.16 describe el comportamiento mecánico del acero estructural automotriz que se produjo durante la zona plástica. La resistencia ultima a la tracción es de 0.650 GPa y la deformación plástica máxima fue de 0.3 mm/mm.

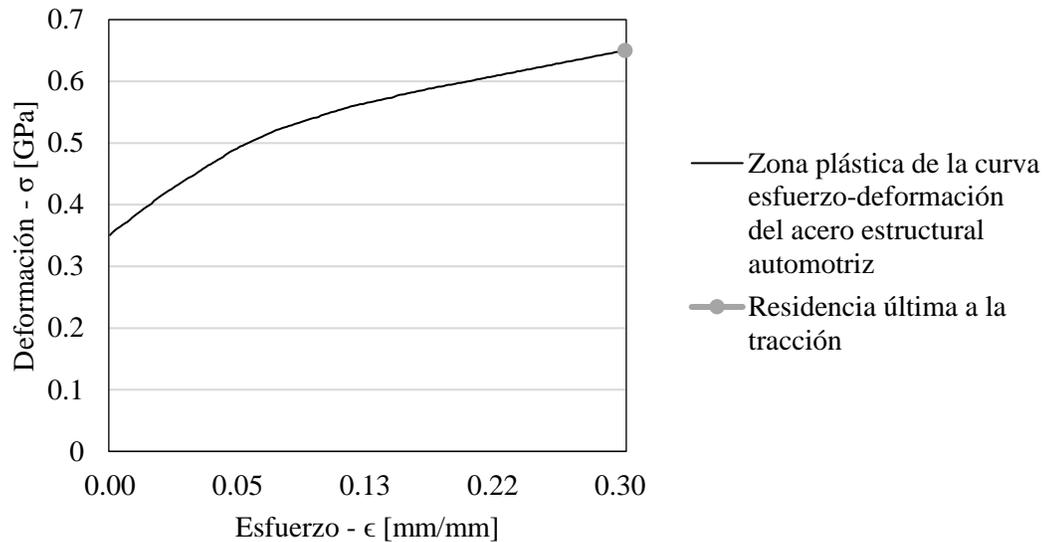


Figura 2.16 Curva plástica de esfuerzo vs deformación del material acero del auto (NHTSA, 2010)

En el ámbito de las simulaciones, es común simplificar los materiales para optimizar el proceso computacional. En el presente análisis, se han seleccionado dos materiales clave para la constitución de los modelos automotrices: un polímero técnico y un acero automotriz. Estos materiales se eligieron cuidadosamente debido a sus características específicas y su relevancia en la simulación de situaciones como impactos y colisiones.

La simplificación de los materiales en las simulaciones se realiza principalmente para reducir los costos computacionales asociados. Los modelos detallados de materiales requieren mayor poder de procesamiento y tiempo de cálculo, lo que puede resultar prohibitivo en términos de recursos y tiempo necesario para completar una simulación. Por lo que se omite la inclusión de elementos de sujeción y pequeñas piezas de plástico, ya que su impacto en el comportamiento del material en escenarios de alta carga es insignificante, y su inclusión no justificaría el costo computacional adicional.

No obstante, a pesar de la simplificación, es fundamental asegurar que las propiedades y características de los materiales utilizados en las simulaciones sigan siendo representativas de la realidad. En este sentido, se basa en datos confiables provenientes de fuentes reconocidas, como la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en Carreteras (NHTSA, por sus siglas en inglés). La NHTSA es un organismo líder en la investigación de seguridad vehicular y

recopila una amplia gama de datos reales relacionados con las propiedades y características de los materiales utilizados en la industria automotriz, incluyendo información sobre resistencia, rigidez, densidad y otras propiedades relevantes para la simulación de impactos y colisiones. Al utilizar datos de la NHTSA, se garantiza una base sólida respaldada por información confiable y actualizada. Esto proporciona resultados más realistas en las simulaciones y permite tomar decisiones informadas en relación con el diseño y seguridad de los vehículos.

2.4 MODELOS Y PROPIEDADES DE MATERIALES DEL IMPACTADOR TRL

En el trabajo se simuló el impacto que sucede en un atropellamiento. Para el estudio de este tipo de sucesos se consideró tres variables de interés: Fuerzas g sobre el ligamento de la rodilla (ta), el ángulo de flexión máxima (ba) y el desplazamiento de corte máximo (sd), también fue evaluado en rodilla. En este documento a las variables se las denominó variables de estudio.

Para entender el comportamiento de las variables de estudio se utilizó un objeto impactador que estuvo conformado por 55 componentes enlistados en la Tabla 2.6. Con estos componentes se representó la estructura completa de la pierna del peatón. Este impactador fue desarrollado por la Technology Research Laboratory, de ahí su denominación: Impactador TRL Legform.

Tabla 2.6 Partes constitutivas del impactador TRL según normativa europea

PID	Parte
1	Tubo de muslo
2	Tubo de pierna
3	Ballestas de fémur
4	Rodilla inferior de pierna
5	Tapa común de muslo y pierna
6	Tapa superior de muslo
7	Tapa inferior de pierna
8	Ligamento de rodilla
9	Base de ballestas y varilla
12	Contrapesa tibia
13	Rodillo de resorte de cizalla
14, 15, 54, 55	Tacos de metal del rodillo de resorte de cizalla
23	Unión de ballestas
25	Tornillos de apriete fémur
26	Tornillos de apriete tibia

28	Rodilla superior de la pierna
30	Varilla fémur
31	Varilla tibia
34, 35, 36, 37	Espárragos de resorte
44	Carne de la parte inferior de la pierna
45	Carne de la parte superior de la pierna
48	Piel de neopreno

Este modelo fue desarrollado por el grupo de investigación de LSTC, pero en particular la versión LSTC.PEDESTRIAN_LEGFORM.100813_V2.3 en la cual se enumeró 1 a los 55 elementos que lo constituyeron, no obstante, se omitieron algunos de los números dentro de este intervalo. El modelo TRL constó de 22 componentes con propiedades del material que fueron definidas por *MAT_RIGID, 5 partes del tipo *MAT_ELASTIC y solo un elemento del tipo *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY.

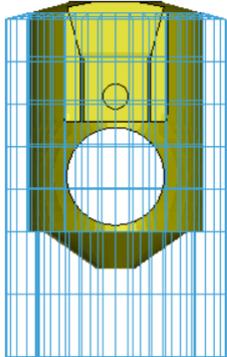
Para lograr una masa de 8.6 y 4.8 kg del fémur y tibia respectivamente, se variaron las densidades de los materiales. Así como también se variaron las masas en los esfuerzos de ubicar el centro de gravedad según lo que se especificó en el Reglamento de la Comisión Europea (CE) n.º 631/2009.

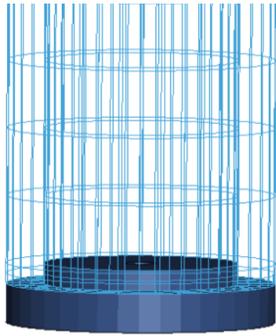
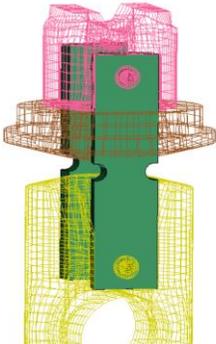
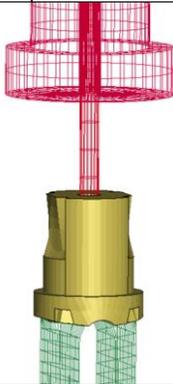
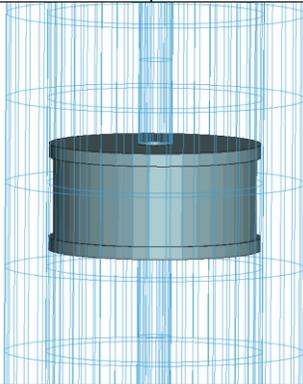
En la Tabla 2.7 se resalta cada uno de los elementos como sólidos de color llano y están acompañados por elementos mallados adyacentes. La designación inicia por “PID” (identificación de la pieza), seguido del número de elemento al que representa.

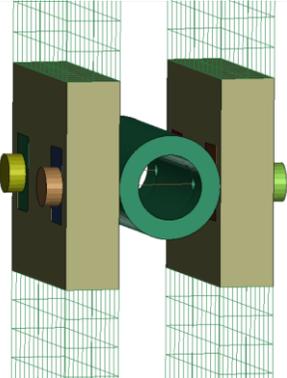
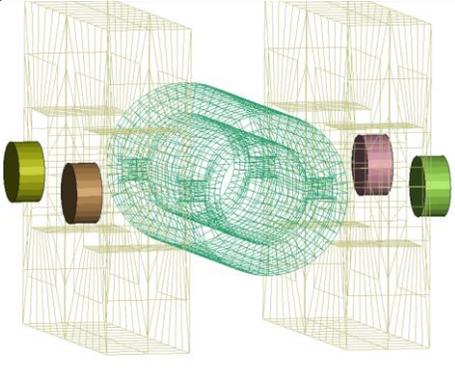
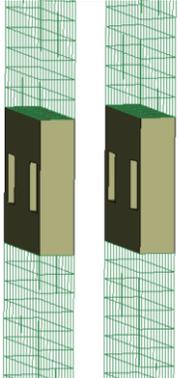
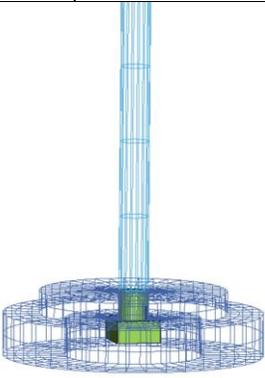
Se debe agregar que PID 50 y 51 son vigas elásticas pues simularon los espárragos que mantuvieron en posición al rodillo de resorte de cizalla PID 13. Cada viga a su vez tuvo en cada uno de sus extremos cabezales rígidos que sostuvieron y simularon las tuercas de los espárragos.

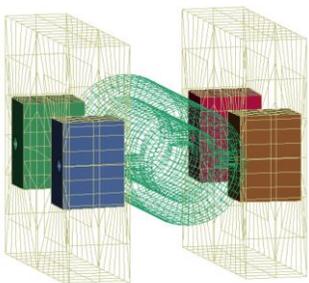
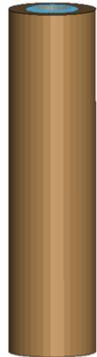
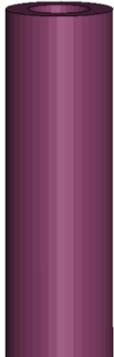
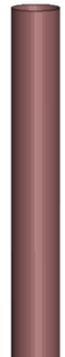
Tabla 2.7 Identificación de partes del TRL y sus materiales

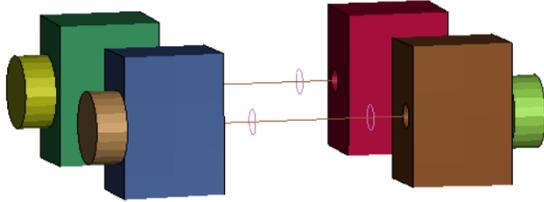
PID 1		PID 2	
Parte	Tubo del muslo	Parte	Tubo de pierna
Tipo de material	*MAT_RIGID	Tipo de material	*MAT_RIGID
Densidad	7.75e-03 kg/mm ³	Densidad	2.86e-03 kg/mm ³

			
PID 3		PID 4	
Parte	Ballestas del fémur	Parte	Rodilla – extremo superior de la tibia
Tipo de material	*MAT_ELASTIC	Tipo de material	*MAT_RIGID
Densidad	7.83e-03 kg/mm ³	Densidad	9.00e-03 kg/mm ³
			
PID 5		PID 6	
Parte	Tapa inferior del tubo del muslo	Parte	Tapa superior del tubo del muslo
Tipo de material	*MAT_RIGID	Tipo de material	*MAT_RIGID
Densidad	8.80e-03 kg/mm ³	Densidad	7.53e-03 kg/mm ³
			
PID 7		PID 8	

Parte	Tapa inferior del tubo de la pierna	Parte	Ligamento de rodilla
Tipo de material	*MAT_RIGID	Tipo de material	*MAT_PIECEWISE_ LINEAR_PLASTICITY
Densidad	8.63e-03 kg/mm ³	Densidad	7.85e-03 kg/mm ³
			
PID 9		PID 12	
Parte	Base de las ballestas y varilla	Parte	Contrapesa de la tibia
Tipo de material	*MAT_RIGID	Tipo de material	*MAT_RIGID
Densidad	7.00e-03 kg/mm ³	Densidad	8.30e-03 kg/mm ³
			
PID 13		PID 14, 15, 54, 55	
Parte	Rodillo del resorte de cizalla	Parte	Tuercas de espárragos
Tipo de material	*MAT_RIGID	Tipo de material	*MAT_RIGID
Densidad	7.83e-03 kg/mm ³	Densidad	7.83e-03 kg/mm ³

			
PID 23		PID 25	
Parte	Muelle parte media del muslo	Parte	Tornillo de apriete fémur
Tipo de material	*MAT_ELASTIC	Tipo de material	*MAT_RIGID
Densidad	7.83e-03 kg/mm ³	Densidad	7.83e-03 kg/mm ³
			
PID 26		PID 28	
Parte	Tornillos de apriete tibia	Parte	Rodilla – extremo inferior del fémur
Tipo de material	*MAT_RIGID	Tipo de material	*MAT_RIGID
Densidad	7.83e-03 kg/mm ³	Densidad	7.83e-03 kg/mm ³
			
PID 30		PID 31	
Parte	Varilla del muslo	Parte	Varilla de la pierna

Tipo de material	*MAT_RIGID	Tipo de material	*MAT_RIGID
Densidad	7.83e-03 kg/mm ³	Densidad	9.00e-03 kg/mm ³
			
PID 34, 35, 36, 37		PID 44	
Parte	Bases de los espárragos de resorte	Parte	Espuma Confor™ de la pierna
Tipo de material	*MAT_RIGID	Tipo de material	*MAT_FU_CHANG_FOAM
Densidad	7.83e-03 kg/mm ³	Densidad	1.02e-04 kg/mm ³
			
PID 45		PID 48	
Parte	Espuma Confor™ del muslo	Parte	Piel de neopreno de toda el impactador
Tipo de material	*MAT_FU_CHANG_FOAM	Tipo de material	*MAT_ELASTIC
Densidad	1.02e-04 kg/mm ³	Densidad	1.00e-05 kg/mm ³
			

PID 50, 51	
Parte	Vigas elásticas
Tipo de material	-
Densidad	-
	

En la Figura 2.17 se han identificado algunos de los componentes principales con el propósito de proporcionar un punto de referencia para localizar otros componentes que podrían resultar difíciles de identificar, ya sea porque forman parte de un subsistema o son demasiado pequeños para su identificación directa. Es importante destacar que las dimensiones, materiales y demás características del TRL cumplen con las especificaciones generales establecidas en el Reglamento (CE) No 631/2009 de la Comisión, emitido el 22 de julio de 2009.

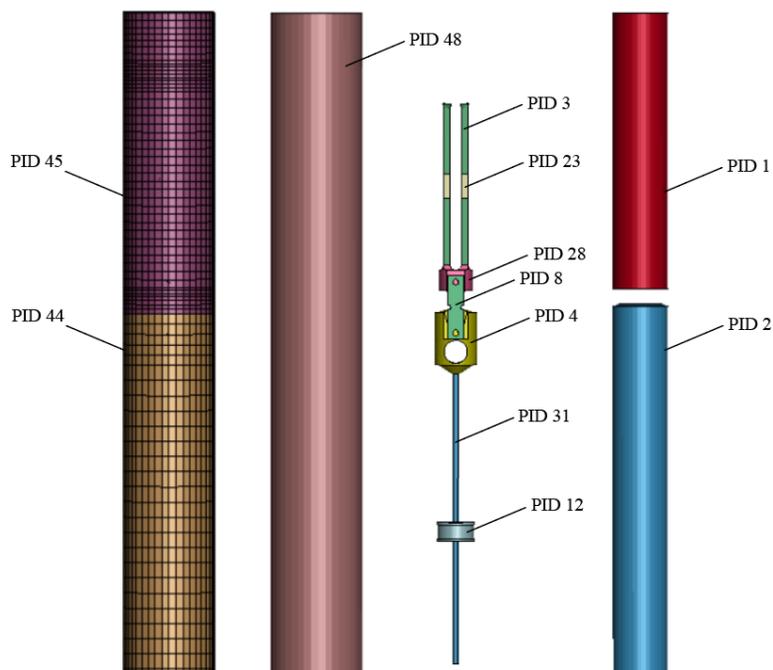


Figura 2.17 Códigos de identificación de las piezas
(LSTC, 2018)

2.4.1 MODELOS DE MATERIALES *Mat DEL IMPACTADOR TRL

La estructura compleja del impactador respondió a la cantidad y variedad de materiales que lo conformaron. Estos materiales fueron capaces de perder y no perder su forma, de deformarse y recuperar la forma y capaces de amortiguar. Fueron algunos de los materiales que se encontraron en la construcción.

Como se resaltó al inicio de esta sección, un total de 22 partes fueron capaces de resistir los esfuerzos sin deformarse. Según el Volumen II del manual de usuario de LS-DYNA, se consideró que aquellas piezas que pertenecieron a un cuerpo rígido fueron fabricadas con el material *MAT_RIGID. A través de esta carta de control fueron variando los valores de densidad y esto permitió lograr masas y centros de gravedad como lo estableció el reglamento europeo (LSTC, 2018).

Se enumeró en la Tabla 2.7 con la carta de control *MAT_RIGID todas las piezas rígidas.

Para caracterizar un material fue fundamental definir dos campos: en primer lugar, la correcta asignación del modelo del material (*MAT_RIGID, *MAT_ELASTIC, *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY, etc.). Y la asignación de las propiedades mecánicas del material. El modelo del material y las propiedades mecánicas en conjunto le permitieron al software generar y esquematizar una curva esfuerzo deformación del comportamiento mecánico del material.

Entre los principales campos de propiedades físicas y mecánicas se nombraron a los siguientes:

- MID: Material identification. El número de identificación del material es la librería que guardara las propiedades mecánicas del material.
- RO: Mass density, densidad del material.
- E: Young's modulus. Módulo de Young o módulo de elasticidad.
- PR: Poisson's ratio. El radio de Poisson del material corresponde al coeficiente de estrechamiento de un material elástico lineal al ser sometido a tracción.

Estos campos ocuparon valores resultantes del ensayo de laboratorio, en los cuales fueron expuestos los materiales. Cada valor representó puntos de inflexión o críticos de la curva esfuerzo deformación.

Por otra parte, el PID 3, PID 23 y PID 48 fueron modeladas mediante *MAT_ELASTIC, por ser susceptibles a esfuerzos de flexión y no presentar deformaciones permanentes.

Todos los materiales obtenidos a partir de *MAT_ELASTIC definieron un comportamiento elástico lineal que se basó en la ley de Hooke, las propiedades mecánicas se extendieron en todo el cuerpo y en todas las direcciones.

Las Figuras 2.18 y 2.19 mostraron los cuadros de diálogos del software evidenciando que la carta de control de la pieza fue la mencionada. Además, muestro las propiedades mecánicas asignadas al material de cada parte.

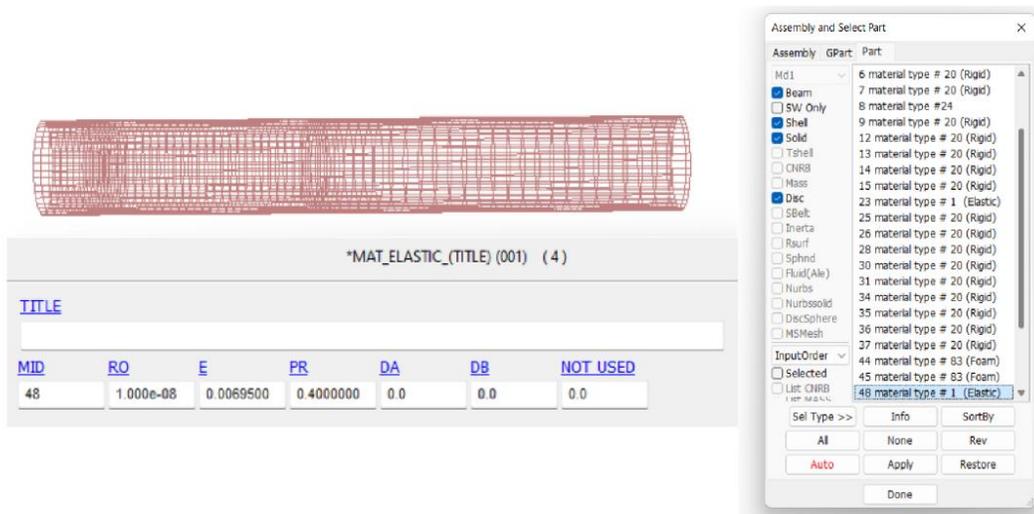


Figura 2.18 Modelo del material *MAT_ELASTIC: Piel de neopreno

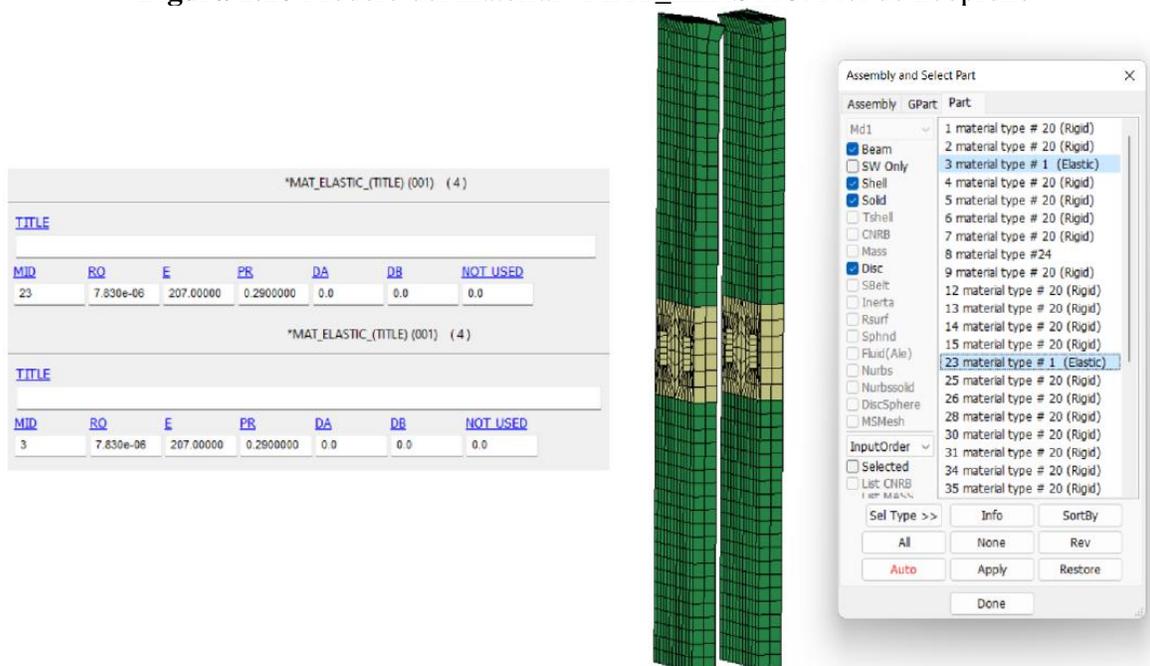


Figura 2.19 Modelo del material *MAT_ELASTIC: Ballestas (PID 3) y muelle parte media del muslo (PID23)

El PID 8 (Figura 2.21) se representó el material del ligamento de la rodilla mismo que experimentó una deformación plásticamente producto de la flexión que se dio durante los ensayos dinámicos, este material del ligamento fue modelado usando *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY.

La carta de control *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY describió el comportamiento elastoplástico de todo el cuerpo y en todas las direcciones de un material. El software utilizó tabulaciones de curvas de esfuerzo deformación. Hasta 8 curvas resultado de deformaciones no lineal a diferentes velocidades (ALTAIR, 2021), también denominado como la secuencia segmentos lineales que se esquematiza de mejor manera en la Figura 2.20.

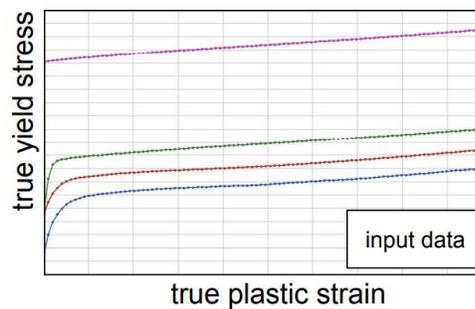


Figura 2.20 Modelo numérico *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (Kolling y Haufe , 2009)



Figura 2.21 Modelo del material *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY: Ligamento de la rodilla (PID 8)

Se modelo mediante *MAT_FU_CHANG_FOAM las piezas PID 44 y 45 (Ver Figura 2.24) de espuma Confor™ CF-45 de 25mm de grosor que revisten el Leg Form. Los modelos matemáticos para materiales de espuma con relación Poissin cero fueron descritas por Fu Chang en 1995 en su artículo Ecuaciones constitutivas unificadas para materiales de espuma, de ahí la nomenclatura de la carta de control *MAT_FU_CHANG_FOAM.

Para modelar un material tipo espuma en LS-DYNA especialmente curvas de carga de compresión uniaxial, el software calcula datos mediante la interpolación dentro de una base de datos. La base de datos cuenta con resultados experimentales para cuatro densidades diferentes de espuma sometidas a diferentes cargas, representadas matemáticamente como lo resalta la Figura 2.23.

Durante la compresión del material tipo espuma existe un mínimo ensanchamiento en su sección transversal (horizontal), de ahí que se considera un material con características de Radio de Poisson cero o compresión uniaxial.

Un cubo de material tipo espuma es sometido a cargas de compresión longitudinal. Una de sus caras consta de trazos longitudinales y transversales a fin de observar su comportamiento de compresión uniaxial. Como se evidencia en la Figura 2.22, el material reduce su sección longitudinal (vertical) a la vez que mantiene su sección transversal (horizontal), es decir no experimenta un ensanchamiento.

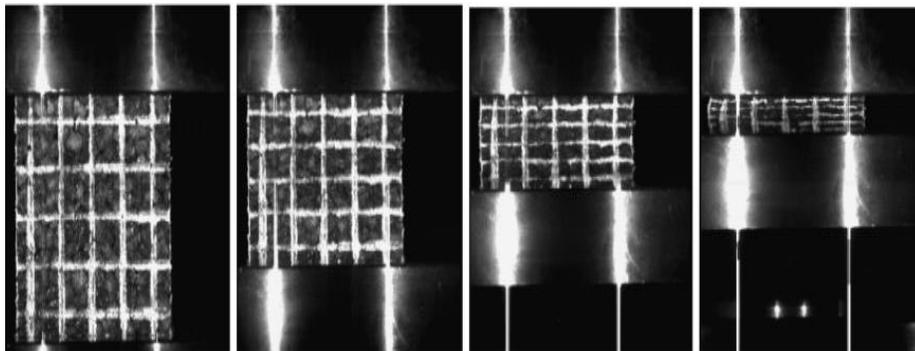


Figura 2.22 Ensayo de compresión: Espuma Fu Chang
(Kolling y Haufe , 2009, pág. 19)

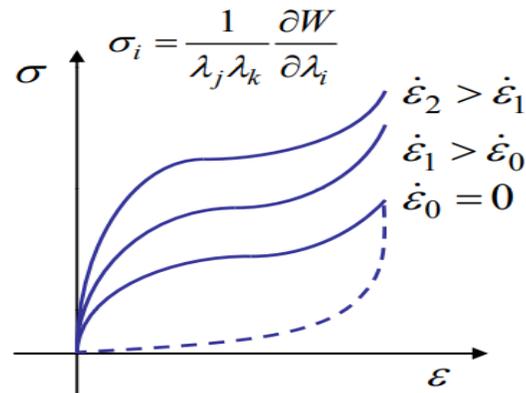


Figura 2.23 Modelo numérico: Espuma Fu Chang (Kolling y Haufe , 2009, pág. 22)

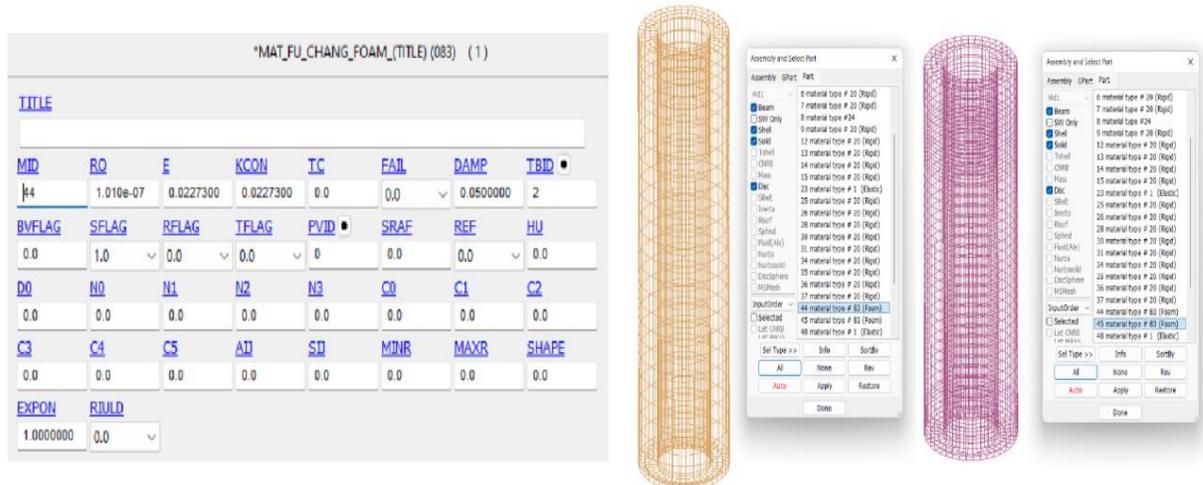


Figura 2.24 Modelo del material *MAT_FU_CHANG_FOAM: Espuma muslo (PID 45) y espuma de la pierna (PID 44)

2.4.2 INTERFACES DE CONTACTO

Se construyó el fémur y la tibia mediante dos grupos de partes unidas esto se dio a través de *CONSTRAINED_RIGID_BODIES, por la naturaleza de crear contactos entre piezas rígidas, el cuerpo resultante tuvo un comportamiento rígido. El grupo de piezas unidas se denominó cuerpo rígido esclavo (unión de PID 5, 6, 9, 25 y 30), este grupo a su vez se unió con un cuerpo rígido maestro (PID 1) y se formó la estructura del fémur solo entre piezas rígidas, ver Figura 2.38.

Para el caso de la tibia (Figura 2.26), el cuerpo rígido esclavo resultó de la unión de PID 4, 7, 12, 26 y 31. Por otra parte, la pieza PID 2 (cuerpo rígido maestro) fue quien alojó el cuerpo rígido esclavo.

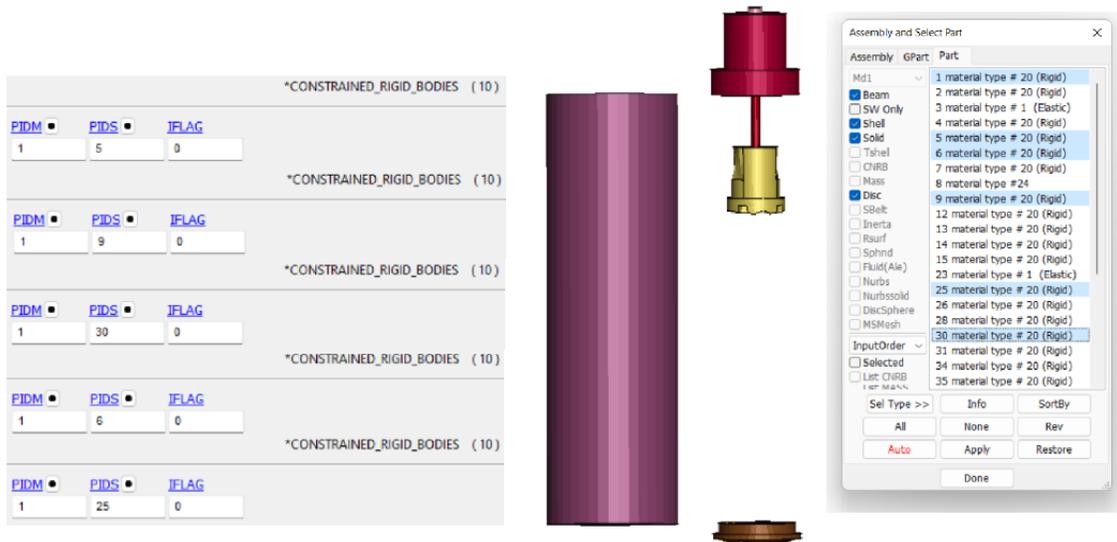


Figura 2.25 Fémur: Contactos de tipo *CONSTRAINED_RIGID_BODIES

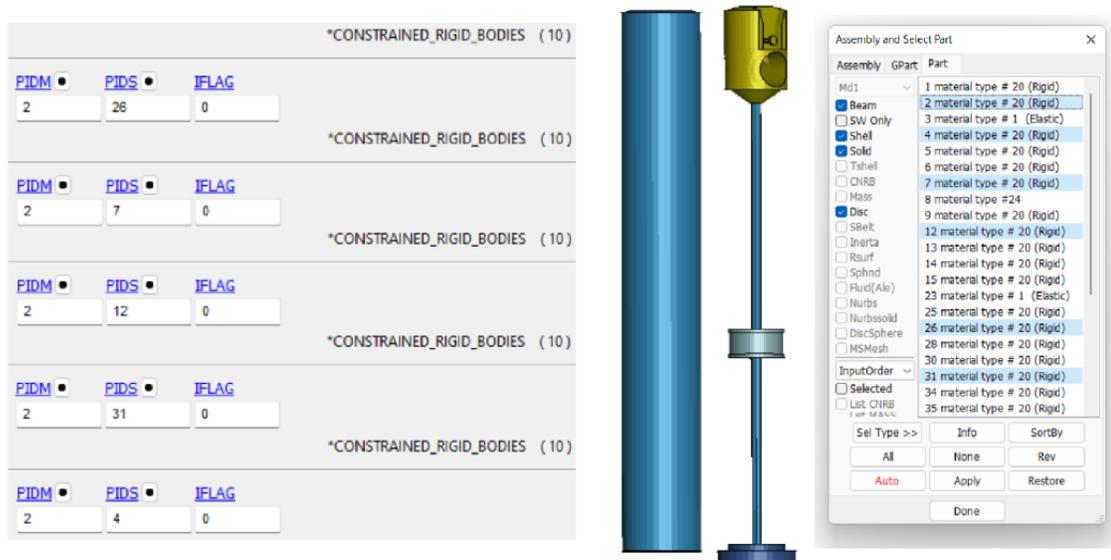


Figura 2.26 Tibia: Contactos de tipo *CONSTRAINED_RIGID_BODIES

Se generó un contacto entre un material rígido y un material elástico con la carta de control *CONSTRAINED_EXTRA_NODES_SET, entre los contactos que fueron mencionados son la

unión entre extremo inferior del fémur y las ballestas del fémur (entre PID 28 y PID 3) como se resaltó en la Figura 2.27.

Al igual como se mostró en la Figura 2.28: el contacto del ligamento de la rodilla con los soportes rígidos (entre PID 8 y PID 4) y (entre PID 8 y PID 28).

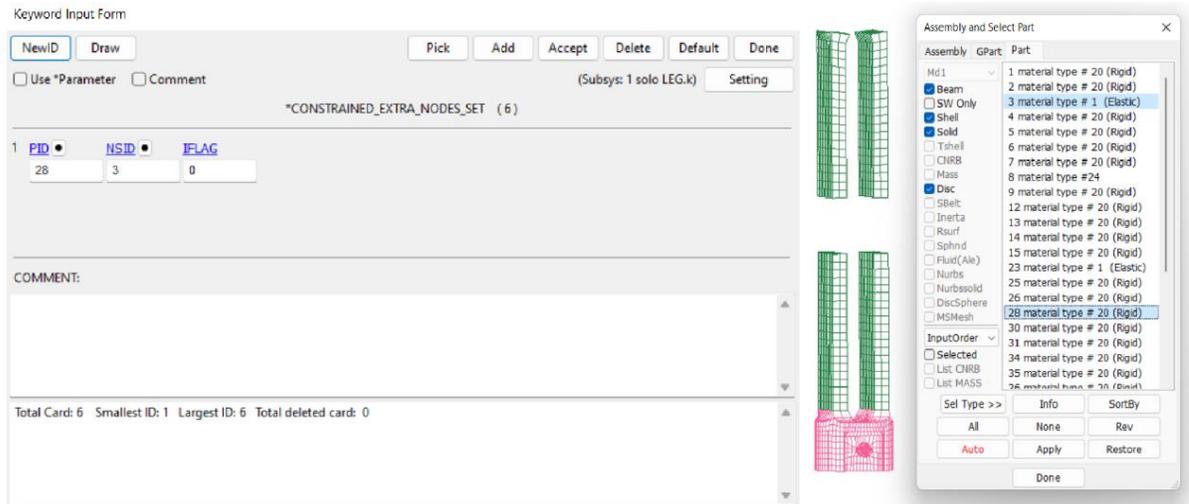


Figura 2.27 Contacto de tipo *CONSTRAINED_EXTRA_NODES_SET: extremo inferior del fémur (PID 28) y las ballestas del fémur (PID 3)

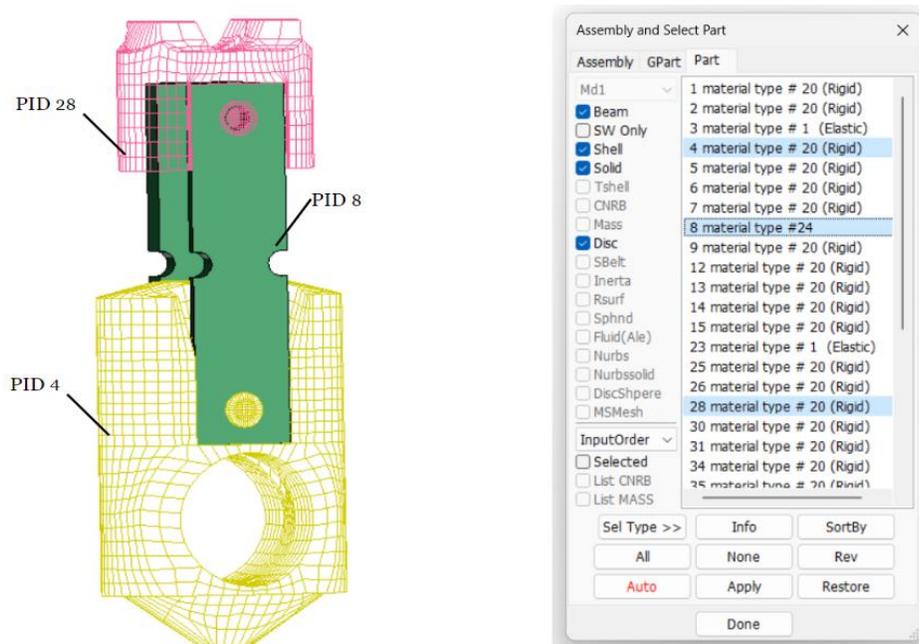


Figura 2.28 Contacto de tipo *CONSTRAINED_EXTRA_NODES_SET: ligamento de la rodilla (PID 8) con sus dos soportes rígidos (PID 4 y PID 28).

Para asignar un contacto deslizante usamos la carta de control *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE que posibilita el contacto entre PID 28 y PID 1. Permitiendo el movimiento relativo entre estas dos partes (deslizamiento) y limita el desplazamiento de corte del sistema, es decir, las dos entidades no se superpondrán, evitando errores durante la simulación. El roce entre estas dos entidades se esquematiza en la Figura 2.29.

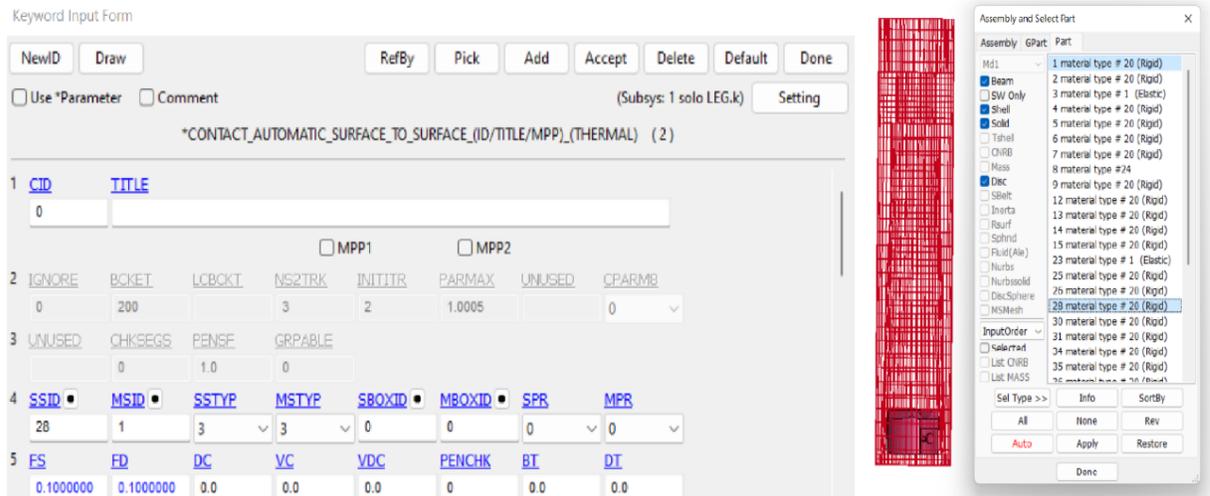


Figura 2.29 Contacto del tipo *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE: Rodilla – extremo inferior del fémur (PID 28) y tubo del femur (PID 1)

CAPITULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 MODELOS Y PLANOS CAD AUTOMOTRICES

Todo el proceso detallado anteriormente en la sección 2.2 del Modelado CAD automotriz puede resumir en que el modelado inicia insertando en el software los gráficos de las tres vistas del modelo. Se genera el wire frame o estructura alámbrica sobre un coquis. Mediante la proyección de curvas se representan las estructuras alámbricas principales como curvas en el espacio. Creamos un modelo base mediante la generación de superficies para posteriormente dar los detalles mediante líneas de partición y superficies limitantes para esculpir la mascarilla del guardachoque, faros, neblineros, etc.

Como resultado, se obtienen modelos realistas de todo el frente vehicular de los Chevrolet Captiva, D Max y Sail, como se muestra en la Figura 3.1. Estos modelos CAD no solo son realistas, como se muestra en el Anexo 1, sino que también cumplen con las proporciones de un vehículo real, como se indica en el Anexo 2.



Figura 3.1 Modelos CAD automotrices

3.2 SIMULACIÓN: CERTIFICACIÓN DINÁMICA DEL IMPACTADOR TRL SEGÚN EEVC

Para validar los criterios y variables de estudio se realizó la simulación numérica del ensayo de certificación. Como resultado de esta modelización numérica, se obtuvieron las Figuras 3.2 – 3.5. En constancia de lo establecidos en la normativa un impacto con una masa de aluminio de 9kg que viaja a 27km/h, las curvas resultantes del ensayo fueron procesadas mediante filtro SAE a 180 Hz en LS-PrePost de ANSYS.

Los requisitos para el ensayo dinámico de certificación que exige la comisión europea EEVC. En primer lugar, se deberá evidenciar una deformación progresiva y fluida de la simulación como se muestra en la Figura 3.2. Por otra parte, se censará al impactador TRL y se obtendrá curvas de cada variable con su valor máximo, mismo que deberá estar dentro de los límites expuestos en la Tabla 3.1, el impactador aprobará la veracidad de sus datos si y solo si todos los valores se encuentran dentro de los rangos establecidos (CE, 2009).

Tabla 3.1 Límites permisibles del EEVC/WC17 para la certificación del modelo TRL

	Aceleración de la tibia (ta)	Angulo de flexión (ba)	Desplazamiento de corte (sd)
Unidades de medida	[g]	[°]	[mm]
Límite máximo	250	8.2	6
Límite mínimo	120	6.2	3.5
Resultados de la simulación (curvas)	Figura 3.3	Figura 3.4	Figura 3.5

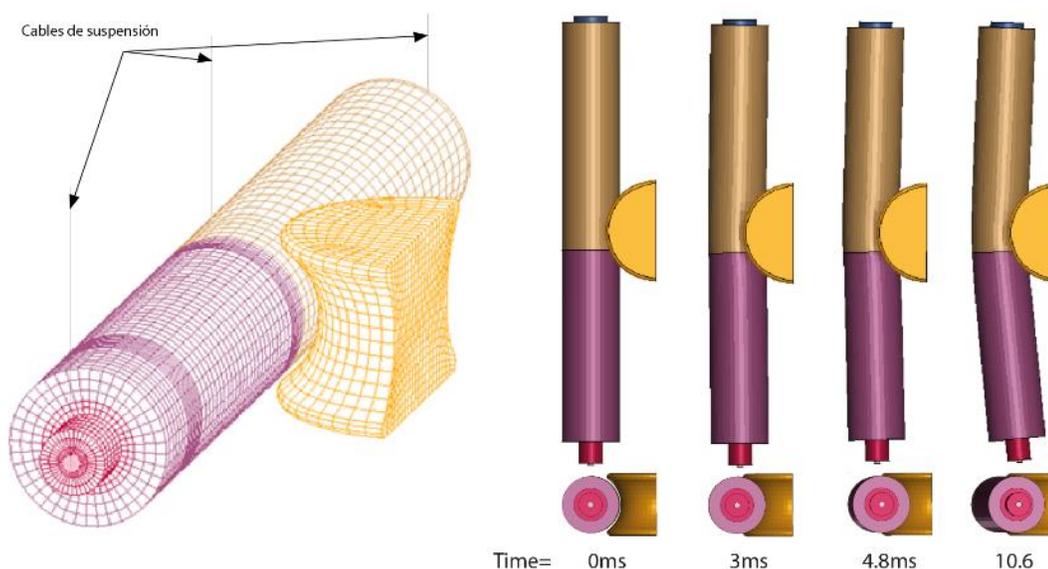


Figura 3.2 Deformación del impactador TRL en la simulación de la certificación dinámica

En síntesis, la aceleración en la tibia (tibia acceleration - ta) es la variación brusca de la velocidad o dirección de un punto, un elemento sobre la tierra en reposo posee 1G de fuerzas gravitatorias, para el presente análisis el punto se refiere al extremo superior de la tibia. Durante los 15ms que dura la simulación se tiene 154g de aceleración máxima que experimenta el tercio superior de la tibia. Como lo detalla la normativa del comité europeo la aceleración máxima debe tener un

mínimo de 120g y no superar los 250g. El valor máximo obtenido y representado con un punto azul en la Figura 3.3 cumplen los requerimientos del reglamento del comité europeo.

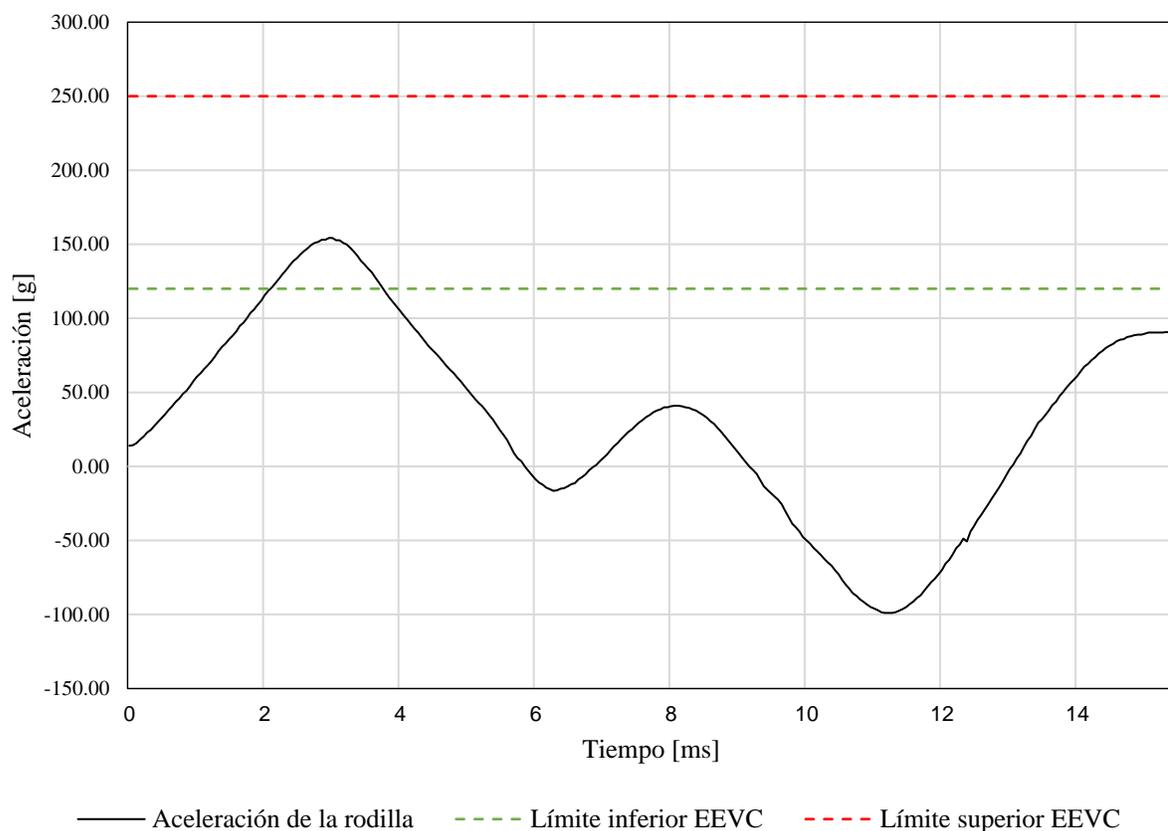


Figura 3.3 Onda de la aceleración máxima del tercio superior de la tibia durante la simulación de certificación dinámica

El ángulo de flexión (Bending angle - ba) es aquel formado desde que el TRL está totalmente erguido, hasta registrar su máxima dobladura en la parte de la rodilla. Acorde al Comité Europeo esta variable no solo debe ser mayor a $6,2^\circ$ sino también no debe exceder los $8,2^\circ$ (grados sexagesimales) para certificar la validez de sus datos. La Figura 3.4 registra a los 10,6 ms de la simulación el ángulo de flexión máximo cumpliendo con $7,6^\circ$ los límites permisibles.

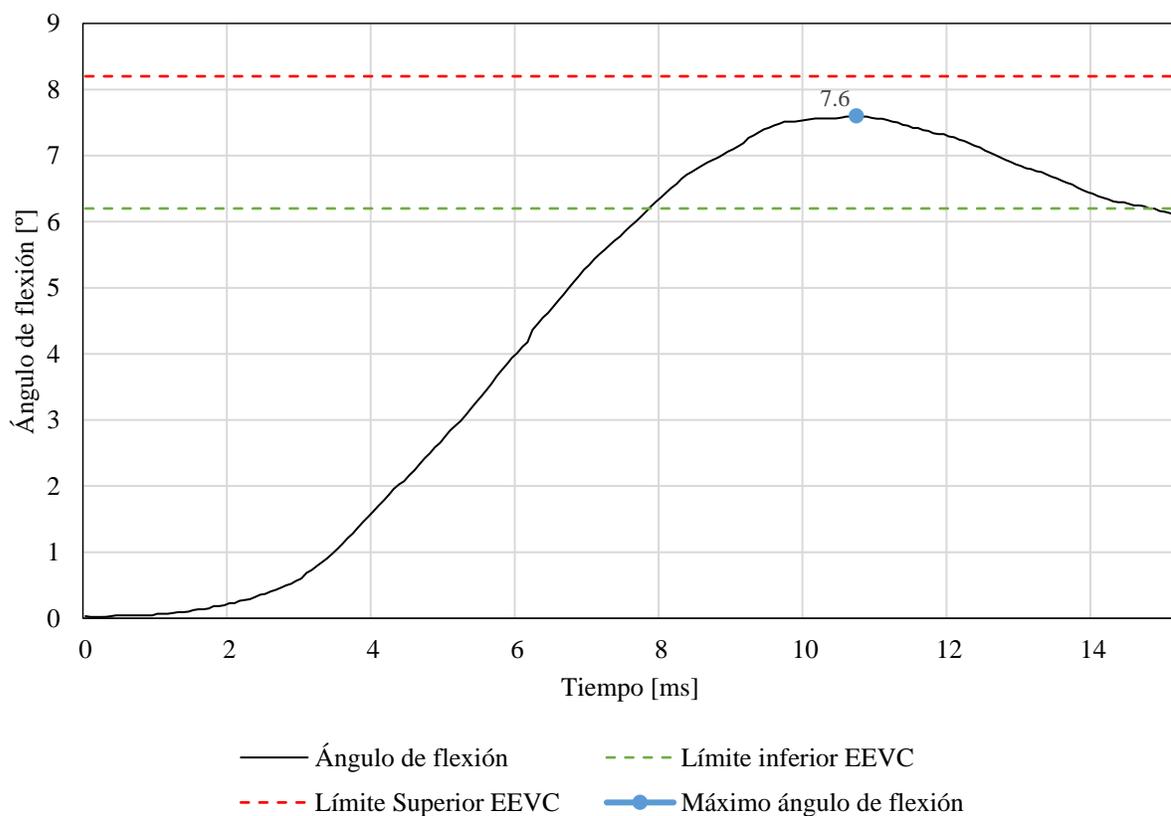


Figura 3.4 Onda del ángulo de flexión de la rodilla durante la simulación de certificación dinámica

Durante un accidente de tránsito por lo general se presentan fracturas de algún miembro ósea o ligamentos, de manera análoga el desplazamiento de corte (sd) representa la fractura del impactador, producto de las fuerzas que se ejercen de forma transversal.

Durante la simulación de forma clara a los 4.8ms de empezada la simulación se puede distinguir el desplazamiento de corte máximo, ver Figura 3.5. Se cumple con los límites de la normativa, teniendo en cuenta que el valor máximo de 3,91mm se mantiene entre los 3,5 y 6,0 mm.

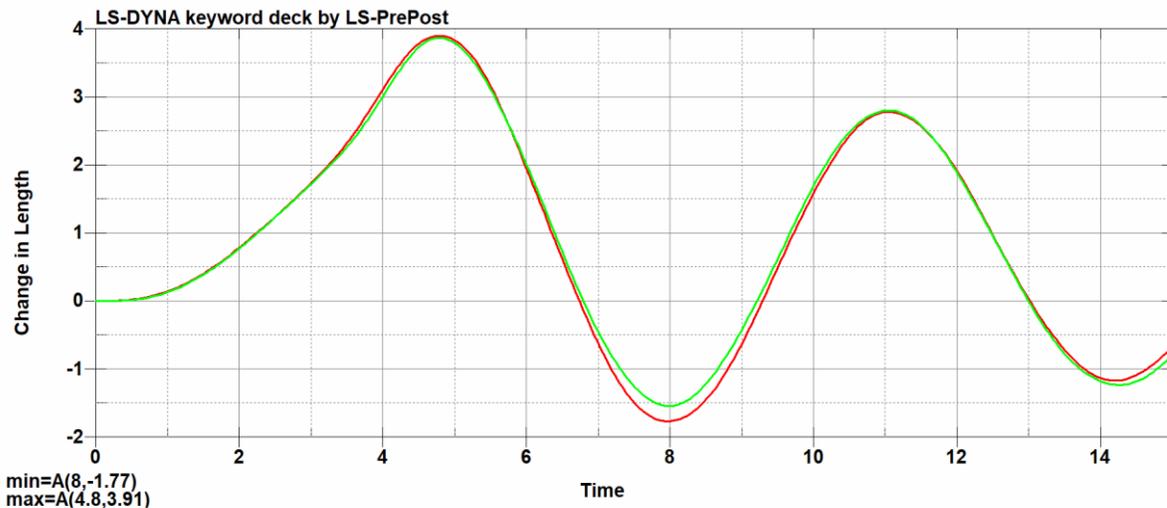


Figura 3.5 Onda del desplazamiento de corte durante la simulación de certificación dinámica

Si bien el modelo FE del TRL ha sido configurado y certificado por sus creadores, es fundamental realizar el proceso de certificación en el hardware específico donde se llevarán a cabo las simulaciones. Esto se debe a que los resultados de los cálculos y tareas pueden variar de una PC a otra, al igual que la configuración del software utilizado.

Hay varios factores importantes a considerar que pueden afectar la configuración al transferir información a otro dispositivo. Uno de ellos es la cantidad de memoria RAM disponible en el dispositivo de destino, ya que esto puede influir en la capacidad de LS-DYNA para manejar conjuntos de datos grandes o ejecutar operaciones complejas de manera eficiente. En consecuencia, el uso de múltiples núcleos de procesamiento se vuelve crucial para distribuir la carga de trabajo y acelerar los cálculos. Además, la tarjeta gráfica desempeña un papel fundamental al mostrar gráficos intensivos requeridos por este software.

3.2.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS: SIMULACION DE CERTIFICACIÓN DINÁMICA

El procedimiento de calibración es una sistemática a la que será sometido cualquier impactador para cumplir y validar la confiabilidad de sus datos, los resultados obtenidos en las pruebas deberán cumplir con normado por grupo de trabajo #17 de la Comisión Europea por sus siglas

EEVC/WG17. El fin de este método es evaluar la sensibilidad de testeo y recopilación de datos de un impactador (CE, 2009).

No solo se cuantifican los parámetros de aceleración del tercio superior de la tibia, el desplazamiento de cizallamiento de la rodilla y el ángulo de flexión de la rodilla, sino también los datos resultantes de cada variable deberán mantenerse dentro de los límites permisibles como la Tabla 3.2 lo detalla.

Por un lado, se tienen los límites máximos y mínimos (Límites EEVC) y los datos máximos de la simulación (Resultados FE) para cada variable, mismos que no sobrepasaran los límites antes mencionados para cumplir con la comisión europea. Se debe agregar también que el tiempo ($T_{máx}$) hace referencia a los milisegundos en la que se registró el valor pico desde que empezó la simulación.

Esquemmatizando, la prótesis TRL suspendido horizontalmente en contacto con un impactador de aluminio que viaja a 7.5m/s da como resultado. En primer lugar, el mayor registro de fuerzas Gs en el tercio superior de la pierna a los 3.05ms (Ver Figura 3.3) con 154g. Enseguida, el desplazamiento máximo de cizallamiento de la rodilla registrado es de 3.91mm y se presenta a los 4.8ms después de iniciada la simulación (Ver Figura 3.5).

Dicho lo anterior la Figura 3.4 evidencia que el ángulo de flexión llega a su punto máximo, a los 10.6ms después de iniciado el contacto pierna-vehículo.

Finalmente, la inercia del impactador empuja la masa de aluminio en sentido contrario para la descarga de momentos.

Tabla 3.2 Resultados obtenidos de la prueba de certificación dinámica

	Aceleración máxima del tercio superior de la tibia [g]		Ángulo de flexión máximo [°]		Desplazamiento de corte máximo [mm]	
	Máx	$T_{máx}$	Máx	$T_{máx}$	Máx	$T_{máx}$
Resultados FE	154	3,05	7,6	10,6	3,91	4,8
Límites EEVC	120 < ta < 250		6,2 < ba < 8,2		3,5 < sd < 6,0	

3.3 MALLA FEM

El mallado FEM (Método de Elementos Finitos) es una técnica utilizada en el análisis numérico y simulación computacional. Consiste en dividir un dominio continuo en elementos más pequeños para aproximarse a soluciones de ecuaciones diferenciales parciales o problemas físicos complejos. Cada elemento finito tiene propiedades físicas y geométricas específicas. El mallado FEM permite resolver las ecuaciones en cada elemento y obtener una solución global del problema. En resumen, el mallado FEM es una herramienta fundamental para el análisis por elementos finitos y la simulación de sistemas físicos.

Por estas razones exponemos las propiedades del mallado FEM que caracterizan el impactador TRL, así como la metodología y criterios de los modelos automotrices implementados para la discretización de su estructura en elemento finitos.

3.3.1 PROPIEDADES FEM DEL IMPACTADOR TRL

El modelo FEM del impactador TRL (TRANSPORT RESEARCH LABORATORY) fue desarrollado por LSTC en 2014. LSTC pertenece Ansys desde 2019. La adquisición fue motivada principalmente a que Livermore Software Technology Corporation es el principal proveedor de análisis de dinámica explícita de elementos finitos, como un equipo de alto nivel que integra en sus análisis sus softwares LS-DYNA®, LS-OPT® y LS-PrePost® con especial enfoque a cálculos multifísicos, escalables, acoplados y estables.

El modelo de LSTC del impactador fue comparado y concuerdan con las magnitudes en el Reglamento de la Comisión Europea (CE) n.º 631/2009. Este modelo de elementos finitos del simulador de pierna fue desarrollado para ser usado en LS-DYNA. La Tabla 3.3 enumera las características según el tipo de elemento y partes que lo constituyen.

Tabla 3.3 Características FE del impactador TRL

Elementos Finitos TRL	
Nodos	47409
Elementos Solidos	33664
Elementos Shell	2960
Elementos viga	2
Partes	29

3.3.2 PROPIEDADES FEM DE LOS MODELOS AUTOMOTRICES

Por otra parte, cada uno de los de los modelos automotrices constan de un mallado compuesto en diferentes componentes ya sea por ser geometrías complejas o por poseer detalles muy pequeños. A la vez que garantizamos resultados confiables de alta calidad con un gasto computacional menor.

Entre los que podemos nombrar es el guardachoque y la mascarilla del guardachoque. Por un lado, la mascarilla consta de 10mm de tamaño de malla (distancia entre dos nodos), en contraste del guardachoque que tiene 20mm. Este proceso de refinamiento de malla se lo realiza con fin de que piezas con detalles muy pequeños tengan mayor número de elementos para una mejor simulación, pues son de los principales componentes que interactúan con el impactador.

En relación con el espesor, se estableció un valor de 2 mm para todas las superficies que conforman los modelos automotrices, siguiendo la descripción del Sun et al (2021). No obstante, se hizo una excepción para los largueros en el modelo CAD, asignándoles un espesor de 5 mm. En la Figura 3.6 mediante la herramienta Assembly and Select Part enmarcado en rojo, nos permite crear cuadros de dialogo con las características físicas de cada pieza. Como se observa en leyenda Thickness enmarcado en azul, resalta y verifica el espesor de estas.

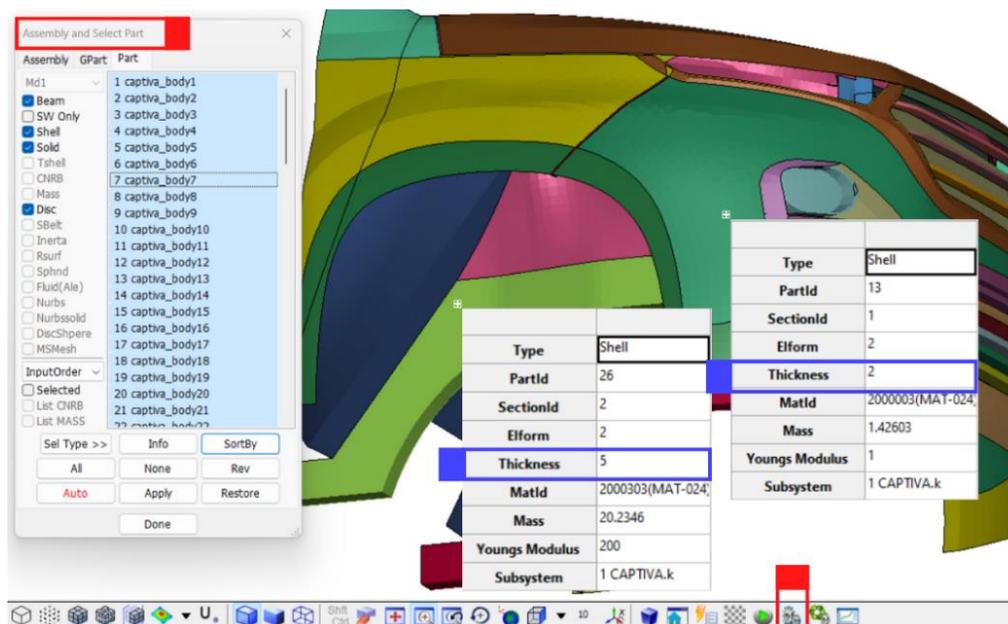


Figura 3.6 Espesor del larguero vs guardachoques - Chevrolet Captiva

Resumiendo lo expuesto, se enlista en la Tabla 3.4 las características del mallado. Se cuantifica de un sistema formado por un modelo automotriz y el TRL el número de elementos, nodos, quad y trias. Mismos que han sido evaluados por el software y cumplen con la calidad del índice Jacobiano como se analiza en la sección 2.3 de los Criterios para el mallado FEM. Pues todos los valores superan el 0.4 de índice Jacobiano según lo argumentado por profesionales de la evaluación automotriz por simulación.

Tabla 3.4 Especificaciones del mallado de los modelos automotrices

	Captiva + TRL	Sail + TRL	D-MAX + TRL
Número de elementos	67992	59972	70070
Numero de nodos	76763	69005	78730
Número de elementos quad	32310	24535	34094
Número de elementos trias	1804	1559	2098
Índice Jacobiano mínimo	0.5	0.505	0.47
Peso	195.31 kg	163.13 kg	215.72 kg
Espesor	2 y 5 mm	2 y 5 mm	2 y 5 mm

3.3.3 MODELOS AUTOMOTRICES MALLADOS

Las Figuras 3.7, 3.8 y 3.9 en su apartado Shell resalta la cuantificación de elementos, el total de elementos son las unidades de todo el modelo entre elementos cuadrados y triángulos.

Cade destacar que, si las aristas no se encuentran perfectamente unidas a los elementos adyacentes, no forman parte de una composición, existen interferencias entre piezas, líneas o puntos libres. El software los interpreta como elementos tipo error. Mismos que deberán ser gestionados, unidos o eliminados. Caso contrario creara interferencias durante la simulación.

Las aristas rojas que se pueden evidenciar en las figuras representan geometrías abiertas. Por ejemplo, del capo, no está unido con el bastidor y forma una línea a su alrededor. Otro ejemplo claro es el espacio que aloja las llantas, mantiene el vivo en color rojo al ser geometrías con un fin sin unirse a otras entidades.

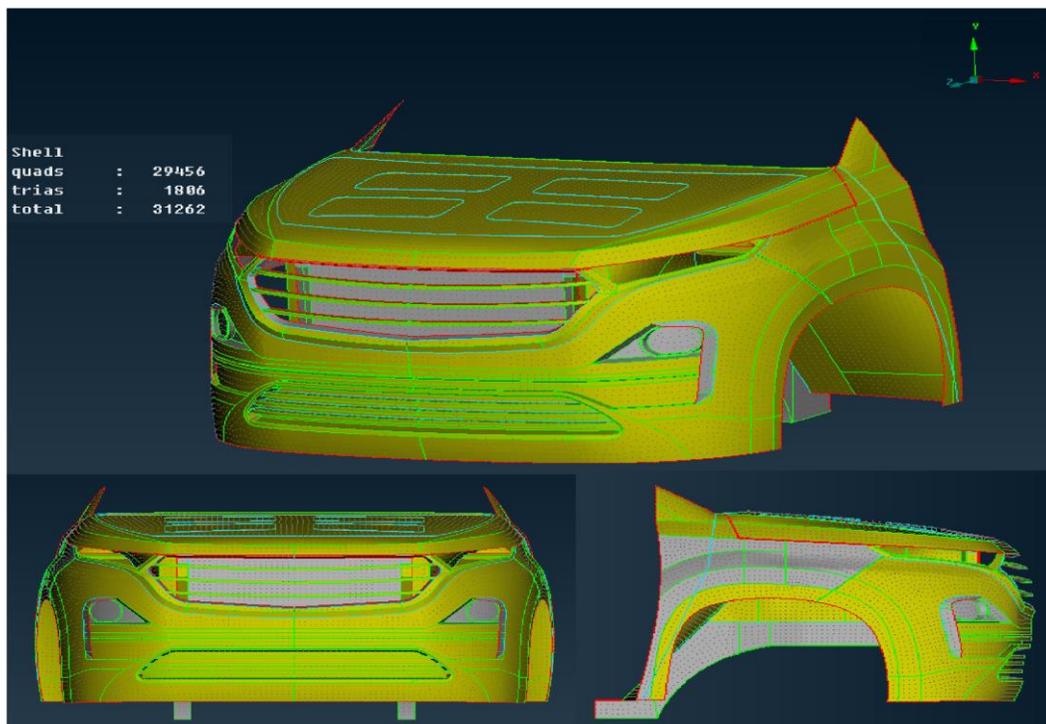


Figura 3.7 Mallado FE modelo Captiva

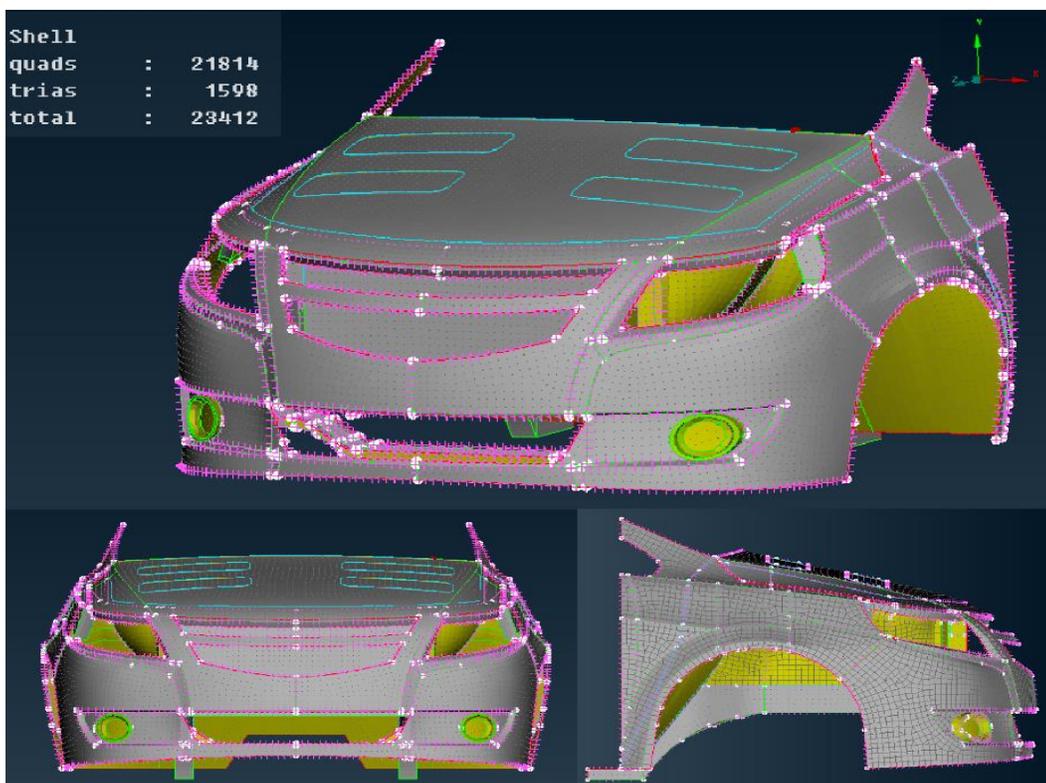


Figura 3.8 Mallado FE de modelo Sail

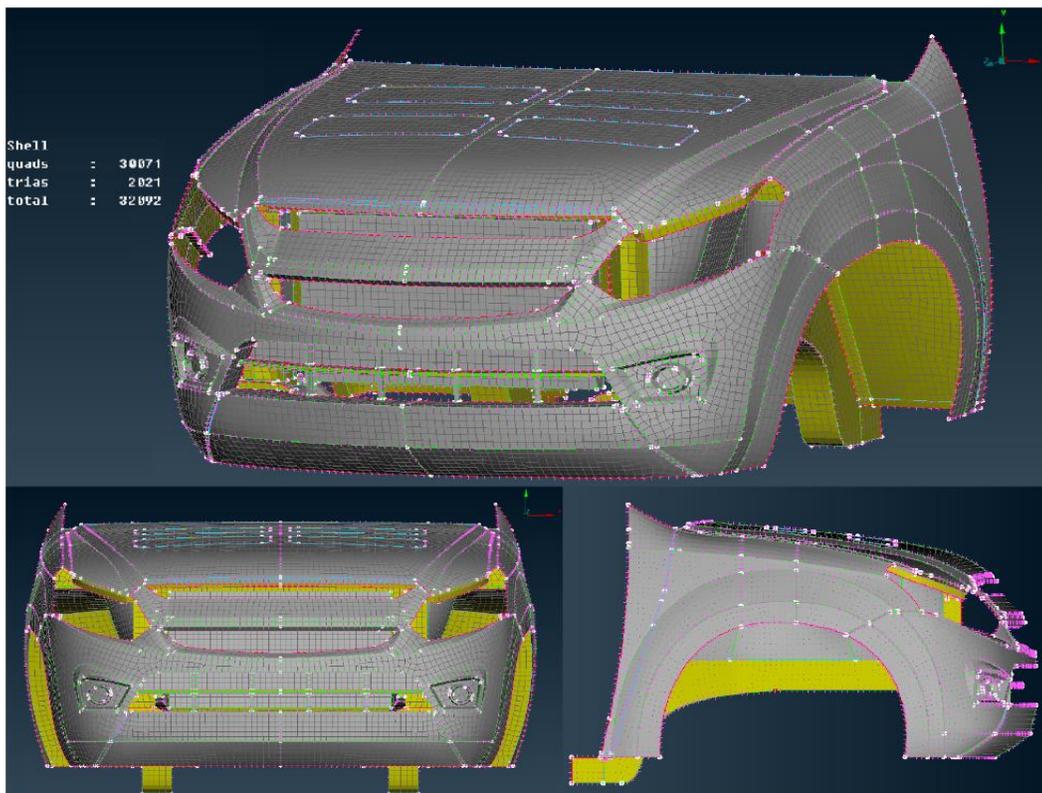


Figura 3.9 Mallado FE de modelo D MAX

3.4 SIMULACIÓN Y SOLUCIÓN

Las Tablas 2.1-2.3 evidencia los vehículos que serán modelados por su notable demanda. Al mismo tiempo la Figura 1.7 simplifica la zona de mayor frecuencia de impacto guardachoques-peatón (zona C). El peatón se interpreta como la primera parte del cuerpo en hacer contacto cuando un peatón se atraviesa de pie frente a un vehículo, el miembro inferior (muslo y pierna) representado por el TRL Leg Form.

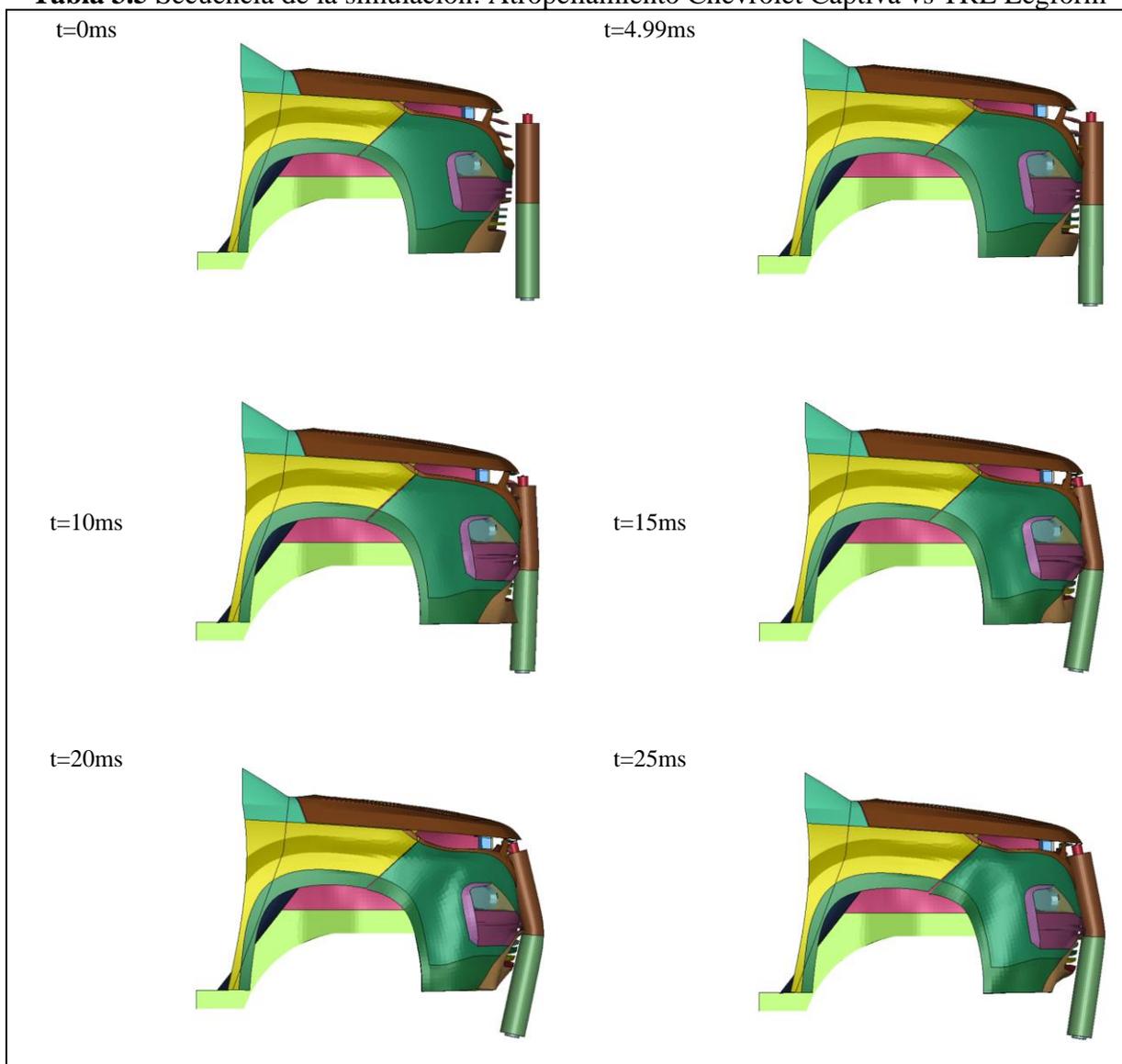
El simulador de pierna será controlado para viajar a 40km/h e impactarse con el segmento frontal de los tres diferentes vehículos. Los largueros tienen asignadas restricciones de translación y rotación en los tres ejes para que el modelo vehicular no se mueva al momento del impacto (Ver Figura 1.12).

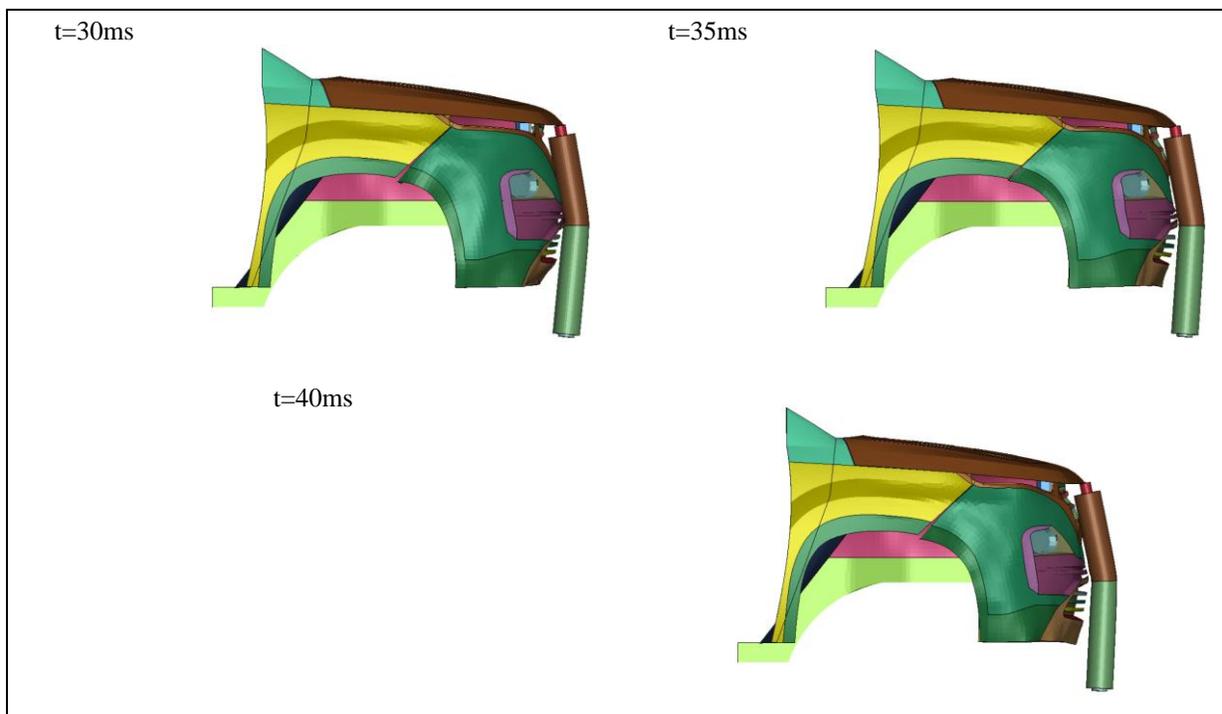
Durante la simulación se tomó una secuencia de fotogramas cada 5ms. Fueron ordenadas de tal manera que se resalta la interacción entre los dos cuerpos.

3.4.1 SIMULACIÓN CHEVROLET CAPTIVA

El impactador TRL parte del reposo para impactarse con el Chevrolet Captiva, $t=0\text{ms}$. La deformación de los dos cuerpos es progresiva, para después mostrar el mayor doblez del impactador a la altura de la rodilla entre los 20 y 30ms. Continúa y finaliza con el rebote de TRL y la recuperación de su dobladura por efectos de la inercia. Ver Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Secuencia de la simulación: Atropellamiento Chevrolet Captiva vs TRL Legform



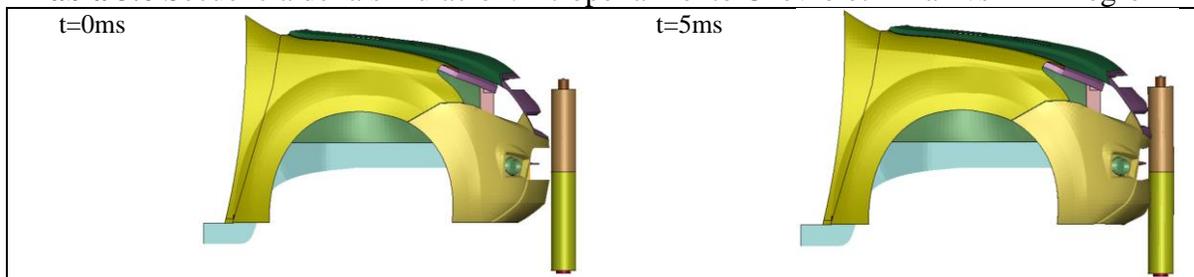


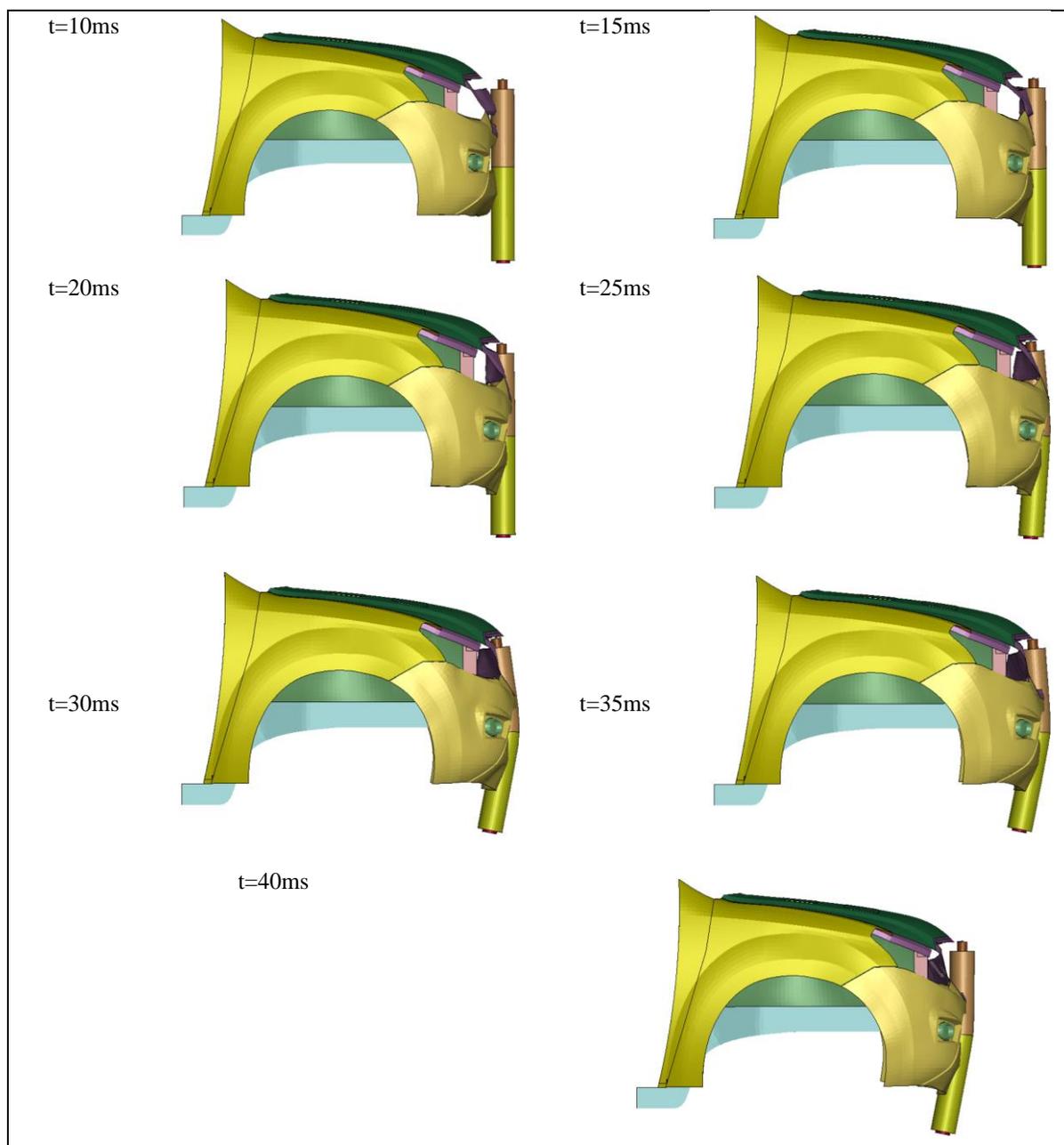
3.4.2 SIMULACIÓN CHEVROLET D-MAX

Todas las piezas que conforman el frente vehicular de la Chevrolet D-Max actúan como un caparazón, no solo por estar fabricadas de un material polímero técnico, sino por la particularidad de su geometría.

Para la Tabla 3.6, es importante considerar que durante los primeros 20ms el TRL no presenta deformaciones importantes, pues este se encaja en el frente vehicular. A partir del $t=25\text{ms}$ se evidencia que el impactador sufre una flexión progresiva en la rodilla. Esto sucede porque el impactador se ha enclavado de tal manera que ha entrado en contacto con el travesaño del chasis vehicular. Para alrededor de $t=40\text{ms}$ por efectos de la inercia el TRL busque recuperar la forma.

Tabla 3.6 Secuencia de la simulación: Atropellamiento Chevrolet Dmax vs TRL Legform



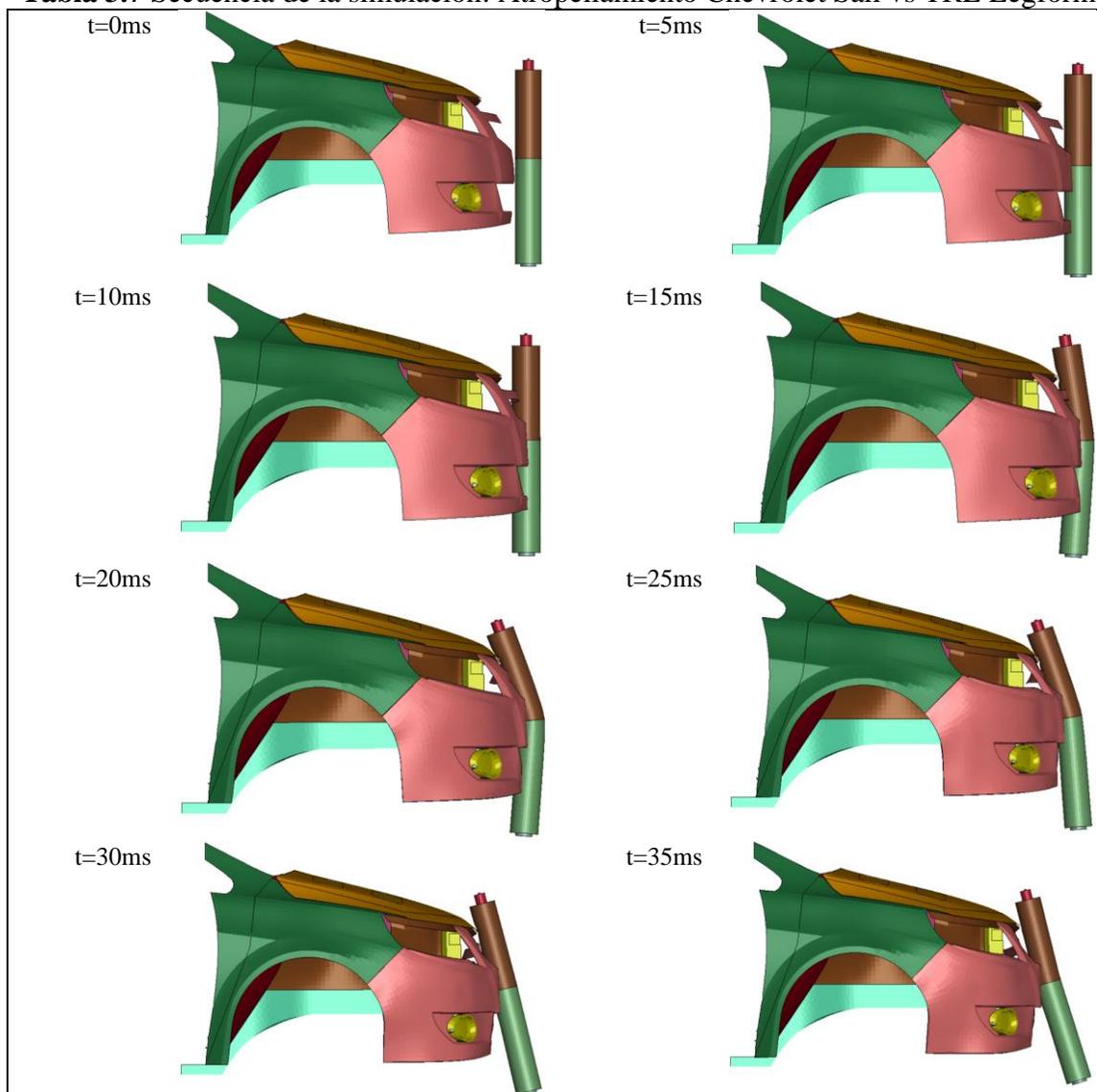


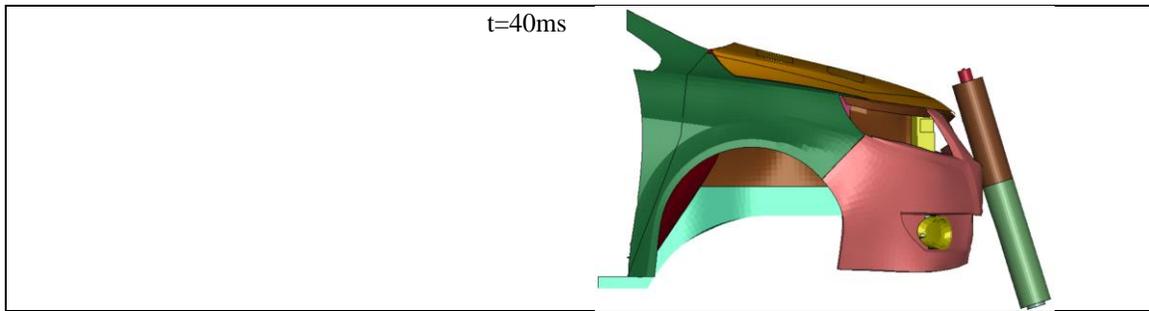
3.4.3 SIMULACIÓN CHEVROLET SAIL

Mediante la progresión ilustrada en la Tabla 3.7 se puede inferir el comportamiento del TRL al impacto. Entonces se parte desde su reposo a $t=0\text{ms}$ y su incrustación en el guardachoque a $t=10\text{ms}$.

A la altura de la rodilla durante $t=15\text{ms}$ a $t=25\text{ms}$ es clara la flexión y lesión de esta, por lo tanto, durante este periodo se encuentra el ángulo máximo de flexión. Enseguida el TRL recupera su forma y muestra una flexión de la rodilla contraria a la provocada por la colisión, todo esto durante los últimos 15ms.

Tabla 3.7 Secuencia de la simulación: Atropellamiento Chevrolet Sail vs TRL Legform





3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Una vez realizadas las simulaciones de impacto explicadas previamente. Se obtuvieron los resultados mostrados en las Figuras 3.10 - 3.18.

Estos resultados están clasificados según la variable evaluada, así se tiene: aceleración del tercio superior de la tibia, ángulo de flexión del ligamento de la rodilla y desplazamiento de corte máximo de la rodilla. Todas las simulaciones de 40 ms generan curvas representativas del comportamiento del TRL antes durante y después del impacto. Como se describió en la sección de procedimientos de simulación, la colisión se desarrolla cuando el impactador se proyecta sobre los modelos automotrices CAD a 40km/h, de los tres segmentos de autos más vendidos durante el 2021.

3.5.1 ACELERACIÓN DEL TERCIO SUPERIOR DE LA TIBIA

Las fuerzas gravitatorias son aquellas que experimenta un cuerpo como resultado de la atracción gravitatoria hacia otro cuerpo. Su magnitud está relacionada con la masa del objeto, la distancia que separa los dos cuerpos y la constante gravitacional universal. Cuando un objeto está en reposo en la superficie terrestre, se dice que experimenta 1G de fuerza gravitatoria, aunque en realidad se refiere a la aceleración de la gravedad y no a una fuerza. Sin embargo, esta fuerza puede variar cuando el objeto se somete a cambios bruscos de velocidad, como por ejemplo en una montaña rusa. Esto se produce debido a que la aceleración a la que está siendo sometido el cuerpo en cuestión, se ve afectada por estos cambios en su velocidad original.

Una vez explicado el concepto y aplicación de las fuerzas g, se puede entender el fenómeno del impacto en base a esta información. Como lo describe LSTC y asumiendo que el impacto vehículo-impactador ocurre a lo largo del eje horizontal, se deberá utilizar un nodo de la malla como un punto de referencia para evaluar la aceleración. El nodo de coordenadas locales (a: [1]

nodout*) con un ID de 80001 será el utilizado para censar las fuerzas G sobre a lo largo del eje X (b: 9-X-acceleration). Ver Figura 3.10.

Cabe recalcar que el modelo FE del TRL posee 47409 nodos, los desarrolladores nombraron como 80001 a un nodo ubicado en la zana de la rodilla, específicamente para el análisis de las aceleraciones. Por lo tanto, en todas las simulaciones se toma el mayor nodo (c: Node ID 130731), pues LS DYNA cuantifica los nodos totales adicionando los nodos del impactador TRL y los nodos de los modelos automotrices como se enumera en la Tabla 3.4.

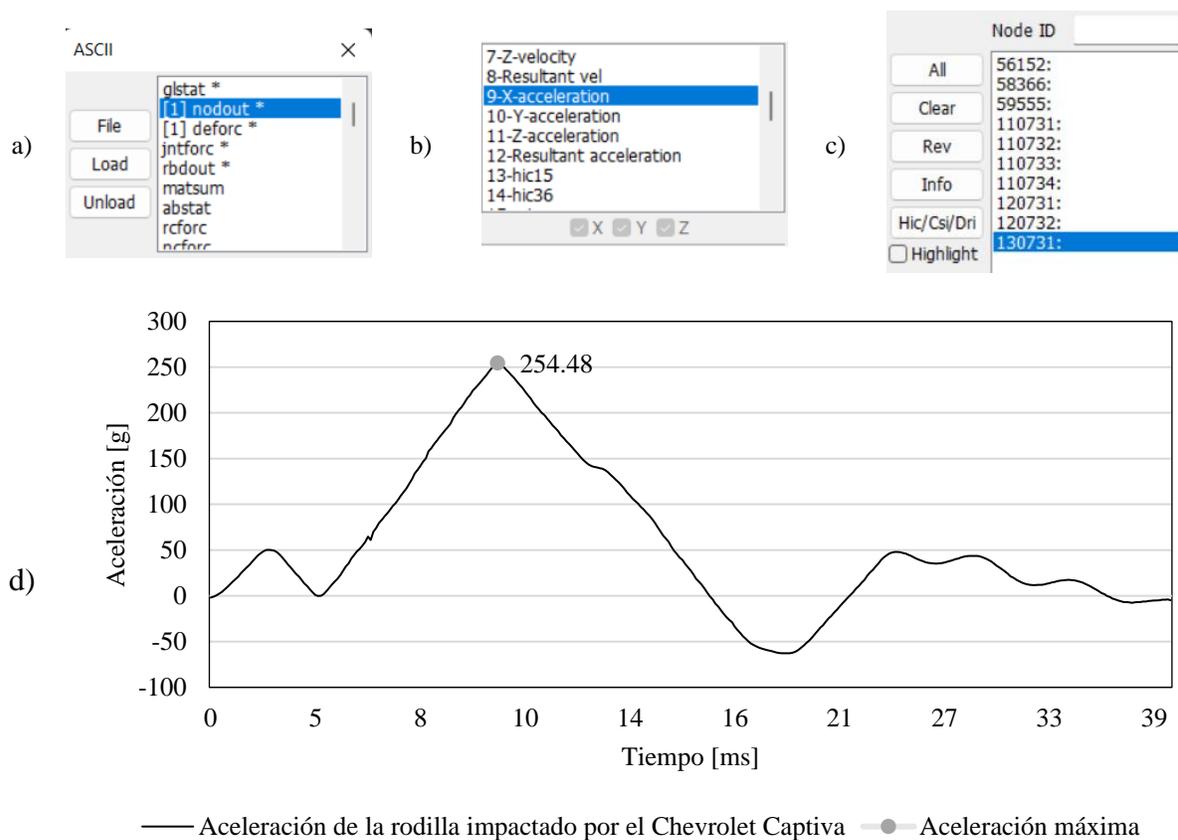


Figura 3.10 Aceleración máxima del tercio superior de la tibia – Captiva

De igual forma se configura A y B para las simulaciones con el Chevrolet Dmax y Sail. Si bien el número del Node ID no es igual en los tres casos, el principio seguirá siendo el mismo, puesto que se selecciona el mayor nodo. Node ID Chevrolet Dmax: 134763 (Figura 3.11). Node ID Chevrolet Sail: 118905 (Figura 3.12).

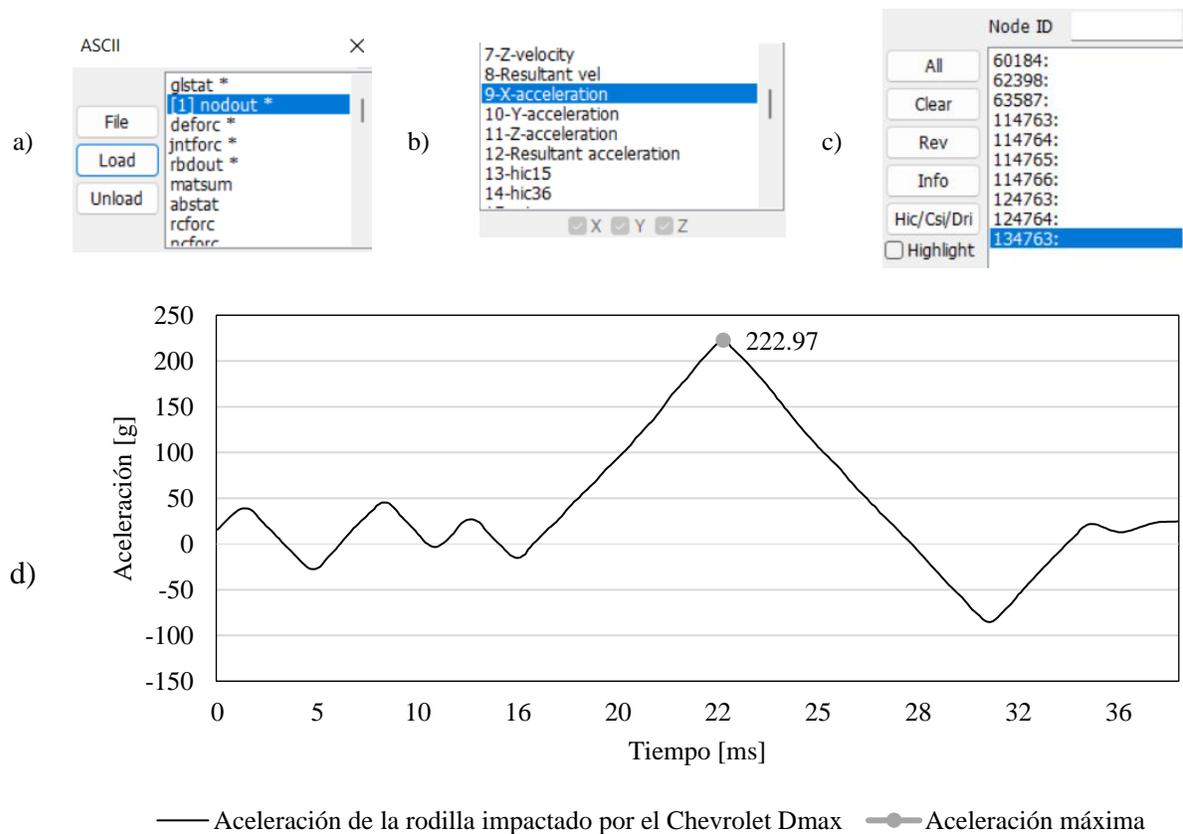
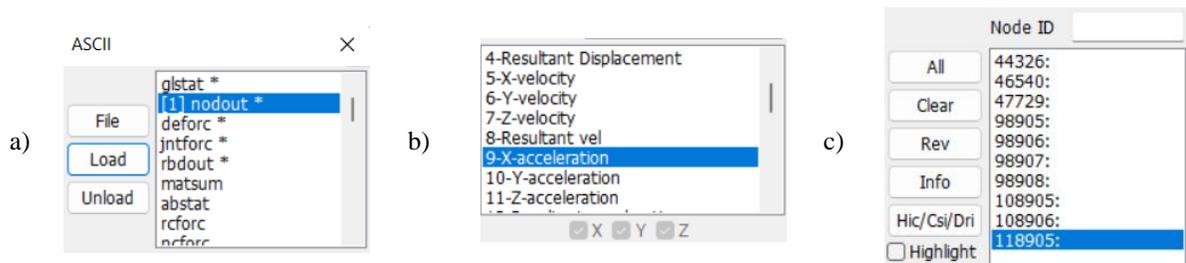


Figura 3.11 Aceleración máxima del tercio superior de la tibia – Dmax

Se esquematiza en el d) la variación de las fuerzas G sobre la rodilla a lo largo del tiempo. Los resultados arrojan que la mayor aceleración sobre la rodilla es provocada por el Chevrolet Sail (381.75g), seguido por el vehículo SUV Chevrolet Captiva (254.48g) y en menor magnitud la camioneta Chevrolet Dmax con 222.97g.



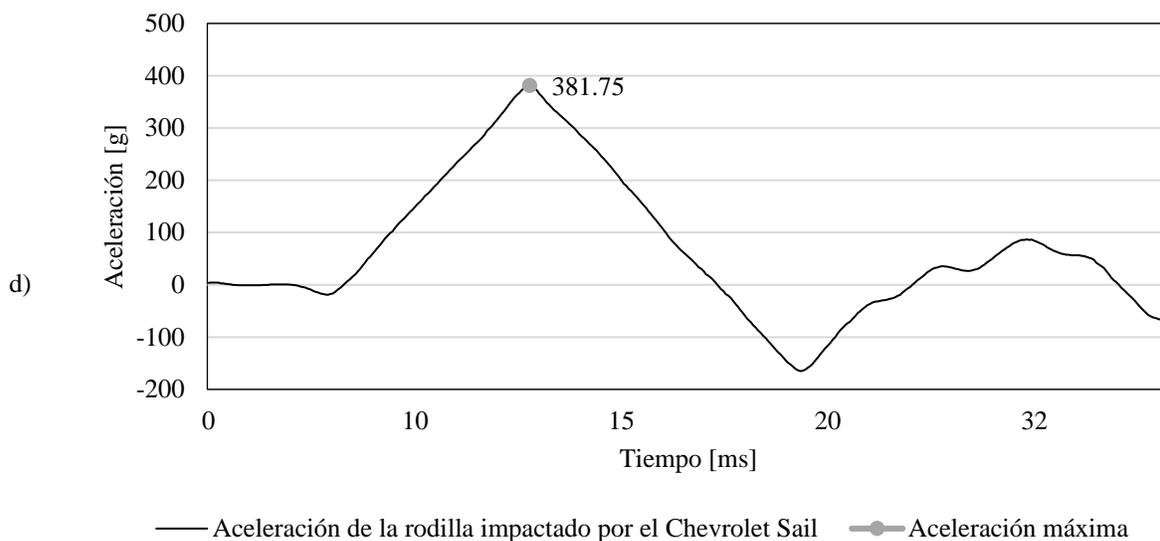


Figura 3.12 Aceleración máxima del tercio superior de la tibia – Sail

En la Tabla 3.8 se enumeran los máximos valores de aceleración registrados durante cada simulación, que tiene una duración de 40 ms. Los datos correspondientes a las Figuras 3.10-3.12 incluyen tanto los valores máximos de aceleración como su tiempo de registro para cada vehículo.

Tabla 3.8 Aceleraciones máximas de la rodilla producto del impacto vehicular y el tiempo de registro

	Aceleración máxima del tercio superior de la tibia [g]	Tiempo [ms]
CAPTIVA LT TURBO 5PAS AC 1.5 5P 4X2 TM	255	9.15
D-MAX CRDI HI RIDE AC 2.5 CD 4X2 TM DIESEL	223	22.6
SAIL LS AC 1.5 4P 4X2 TM	383	12

3.5.2 ÁNGULO DE FLEXIÓN LATERAL DE LA RODILLA

En este documento se analiza un evento de atropellamiento lateral a 0° con el centro del guardachoque de un vehículo a una velocidad de 40 km/h. Se asume que el peatón se encuentra en reposo y sin flexión en ninguna de las rodillas, tal como se muestra en la Figura 3.13.

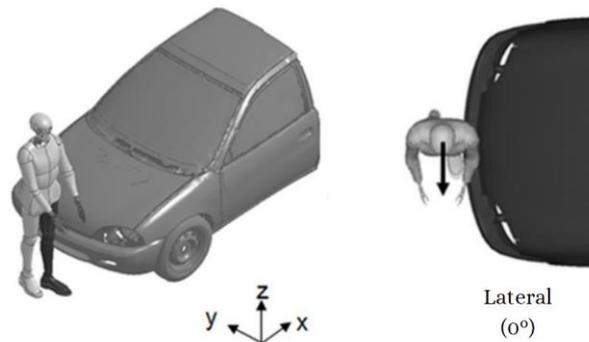


Figura 3.13 Ángulo de flexión lateral de la rodilla
(Fahlstedt, Halldin y Kleiven, 2015)

Para ilustrar de manera más clara el comportamiento del ángulo de flexión y el desplazamiento cortante en la articulación de la rodilla, se definen dos vectores en color rojo con su respectivo origen en color amarillo sobre el centro de la articulación de la rodilla, como se muestra en la Figura 3.14.

El origen del vector diafisario del fémur (vector rojo sobre el miembro óseo verde) se asienta sobre el surco terminal de los cóndilos femorales (punto amarillo sobre el miembro óseo verde). De manera similar, el origen del vector diafisario de la tibia (vector rojo sobre el miembro óseo naranja) se define en la eminencia intercondilar de la meseta tibial (punto amarillo sobre el miembro óseo naranja).

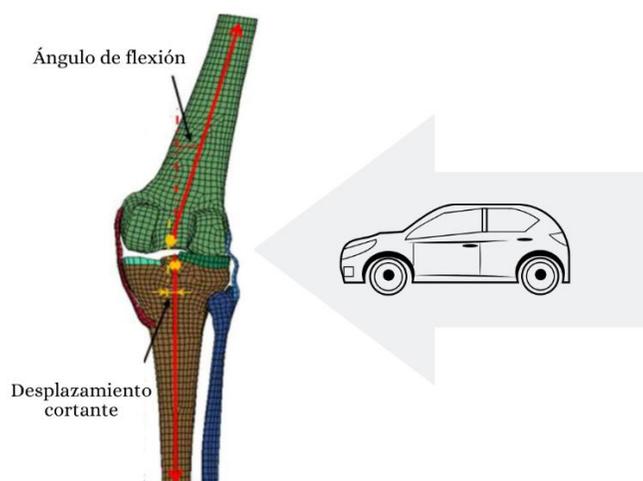


Figura 3.14 Lesiones en las extremidades inferiores de los peatones
(Li, Yang y Simms, 2015)

Por sus siglas en inglés, "ba" (bending angle) se refiere al ángulo máximo formado entre el fémur y la tibia producto del impacto sobre la rodilla, lo que lleva el nombre de ángulo de flexión máxima. Es importante destacar que este ángulo de flexión solo aparece cuando existe un doblez lateral de la rodilla en dirección a la otra, fenómeno que se conoce como flexión valgo en términos biomecánicos. (Bose et al., 2008)

Para ilustrar este concepto de una manera más clara, se puede hacer un símil entre el impacto sobre la rodilla y un ángulo llano. De esta forma, se puede esquematizar al TRL como un ángulo llano (de 180°), donde la rodilla es el vértice y el fémur y la tibia son los lados. Al aplicar una fuerza sobre la rodilla, el ángulo llano empieza a cerrarse hasta un punto máximo (representado en rojo en la Figura 3.15), para inmediatamente volver a abrirse, generando un efecto de vaivén. La diferencia entre el ángulo llano y el ángulo resultante se conoce como ángulo de flexión máxima.

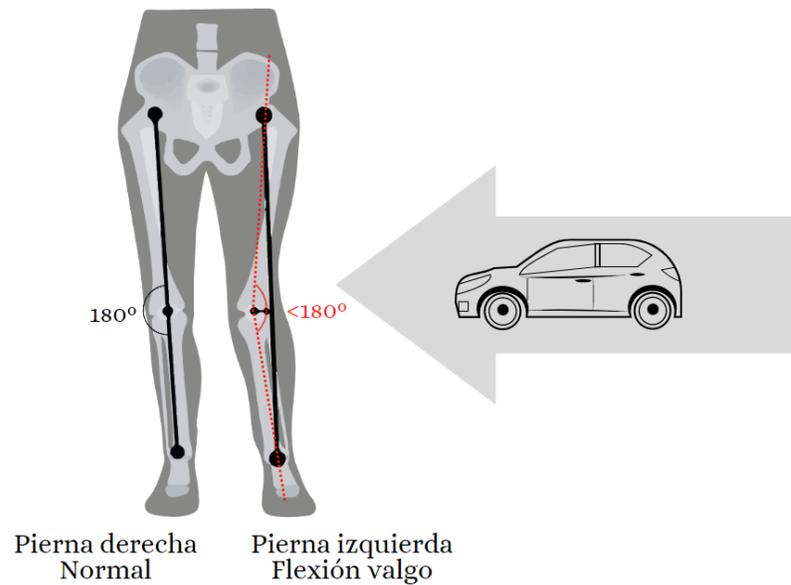
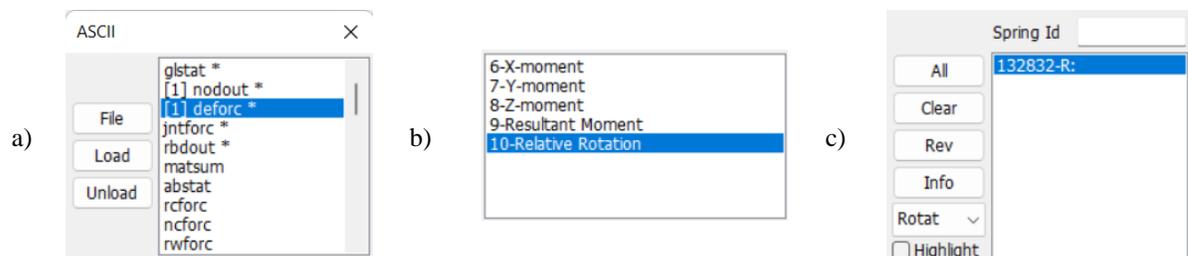


Figura 3.15 Ejes de rodilla: Normal vs Flexión valgo

Elaborado: Autor

Para evaluar la rotación relativa de un elemento discreto 70001 (c: Spring Id:132832-R), el software se configura con el análisis b: 10-Relative Rotation. En este caso, se elige el Spring Id:132832 (Figura 3.16) para analizar la interacción entre el modelo automotriz y el TRL en el Chevrolet Captiva, el Spring Id:136079 (Figura 3.17) para las simulaciones con la camioneta Chevrolet Dmax y el Spring Id:116967 (Figura 3.18) para el sedán líder de Chevrolet, Sail. Además, se considera un análisis a: [1] deforc* para evaluar el ángulo de la deformación de los dos montajes de los ligamentos (PID 8).



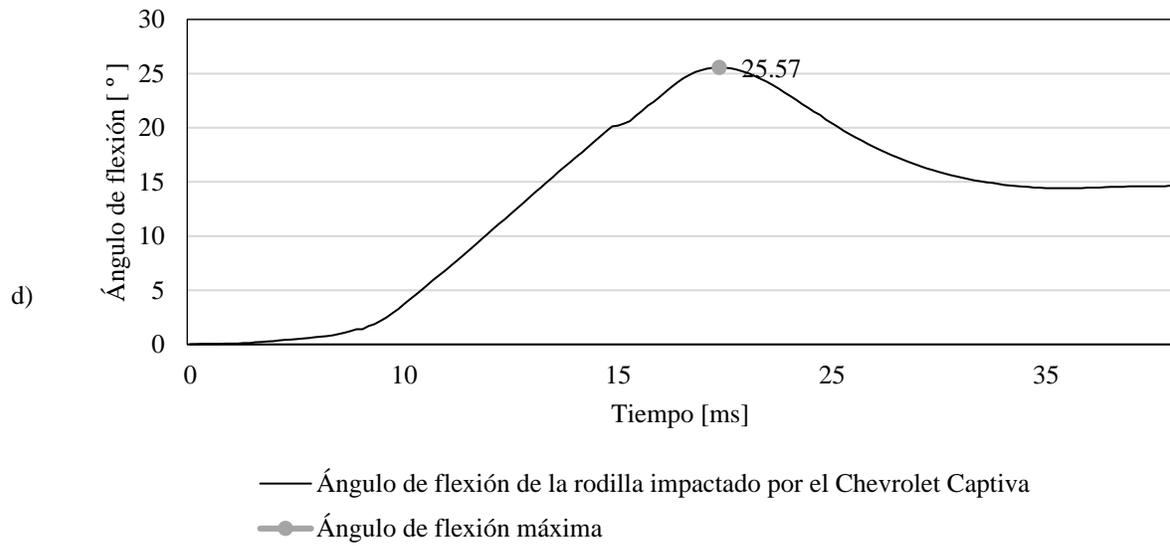


Figura 3.16 Ángulo de flexión máximo – Captiva

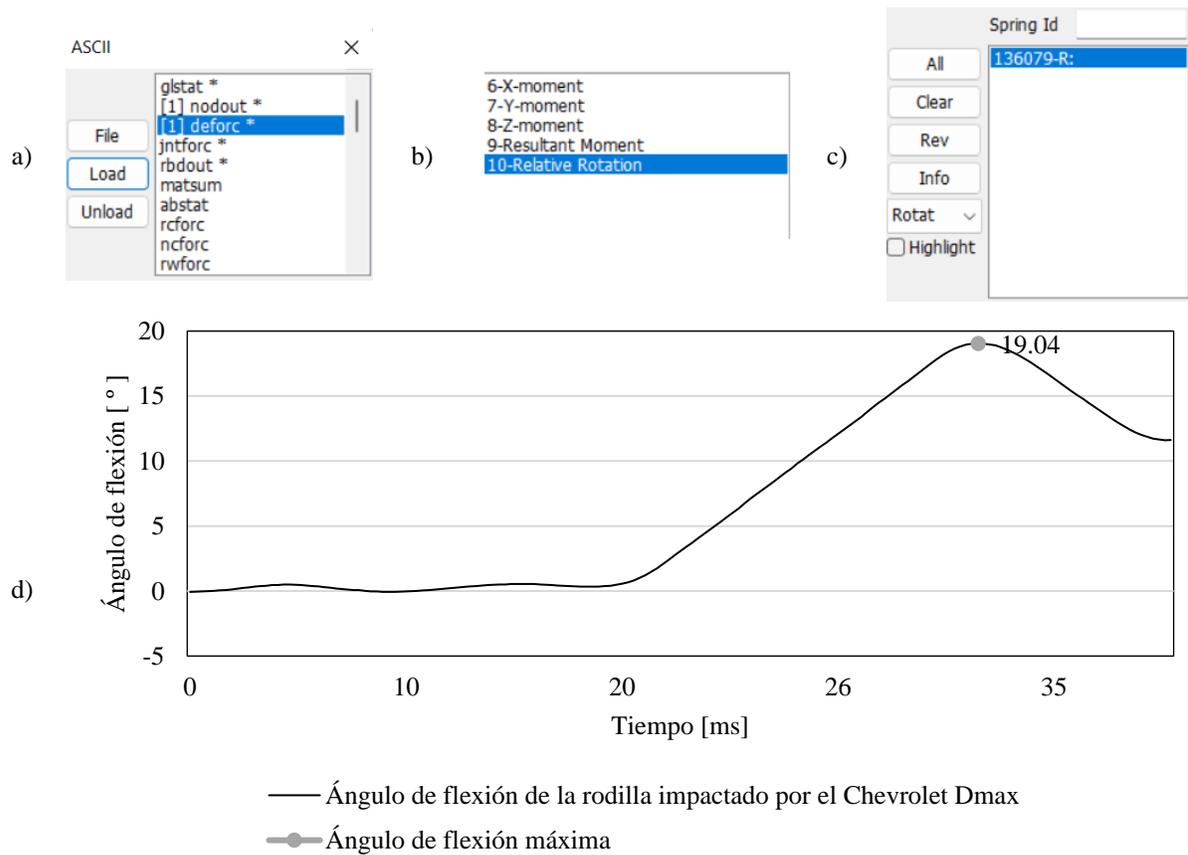


Figura 3.17 Ángulo de flexión máximo – Dmax

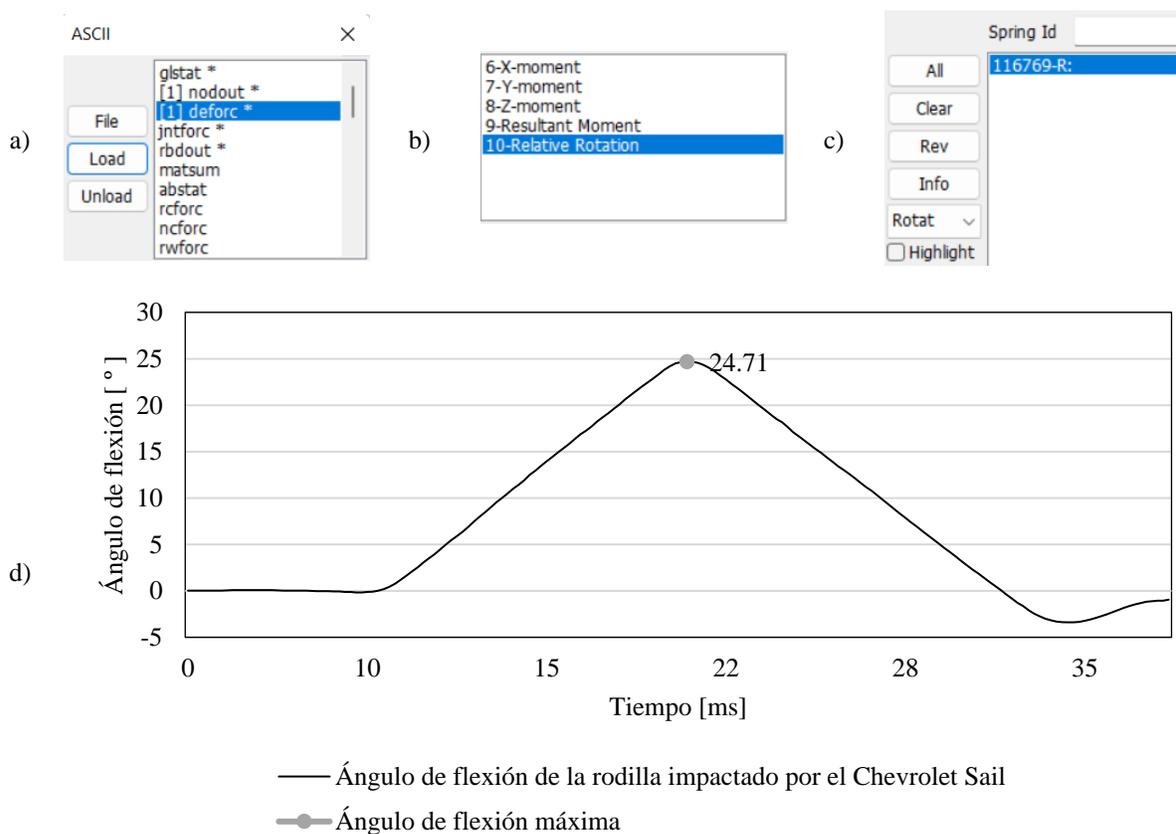


Figura 3.18 Ángulo de flexión máxima – Sail

La Tabla 3.9 presenta los valores máximos de aceleración registrados durante las simulaciones de 40 ms para cada vehículo, junto con el tiempo en el que se alcanzaron dichos valores. Estos datos se obtuvieron de las Figuras 3.16-3.18.

Tabla 3.9 Ángulos de flexión máxima de la rodilla producto del impacto vehicular y el tiempo de registro

	Ángulo de flexión máximo [°]	Tiempo [ms]
CAPTIVA LT TURBO 5PAS AC 1.5 5P 4X2 TM	25.6	19.3
D-MAX CRDI HI RIDE AC 2.5 CD 4X2 TM DIESEL	19.1	31.1
SAIL LS AC 1.5 4P 4X2 TM	24.4	19.8

3.5.3 DESPLAZAMIENTO DE CORTE MÁXIMO DE LA RODILLA

El desplazamiento por corte o shear displacement (sd) de la tibia se define como el movimiento relativo entre los puntos amarillos (Figura 3.14) a lo largo de un plano paralelo a la dirección de la fuerza aplicada por vehículo al impactar la pierna. (Mo et al., 2014)

Las curvas resultantes exhiben el desplazamiento del punto de referencia ubicado en la rodilla, este modelo FE incorpora dos resortes discretos (60001 y 60002). El desplazamiento del resorte discreto número 60001 representa el desplazamiento por corte en el centro de la rodilla, de acuerdo con las regulaciones. Por otro lado, el resorte discreto número 60002 representa la medición del desplazamiento por corte en la ubicación donde se encuentra un potenciómetro en el impactador TRL real para medir dicho desplazamiento

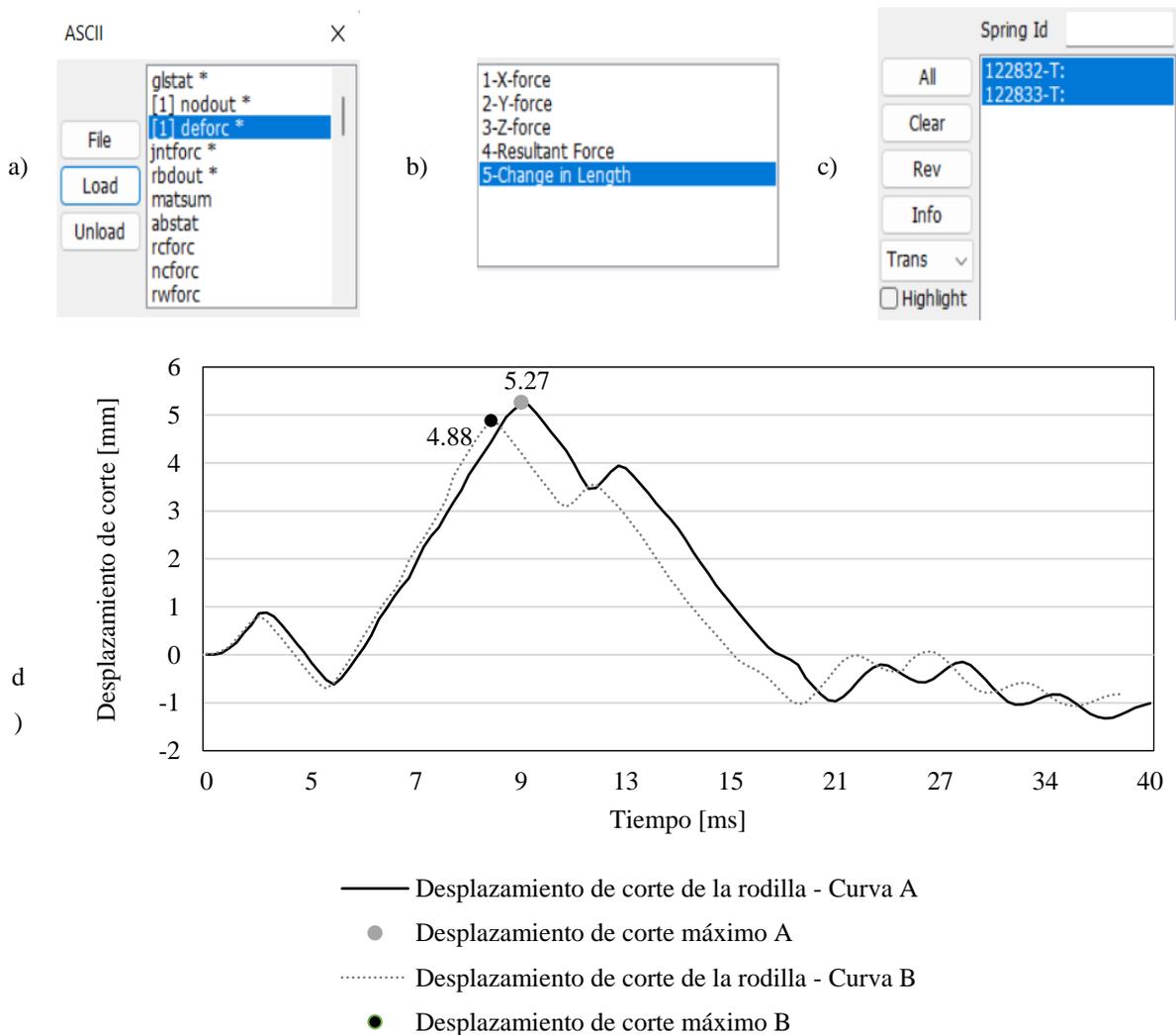


Figura 3.19 Desplazamiento de corte máximo – Captiva

Comparando la Figura 3.24, 3.25 y 3.26. El mayor desplazamiento de cizalladura a la rodilla corresponde al Chevrolet Sail, seguido por el captiva y en último lugar D-Max. Supera al resto por ser un vehículo bajo (menor distancia entre el piso y el chasis), provocando un atropellamiento a menor nivel y por ende genera un desplazamiento mayor de la tibia.

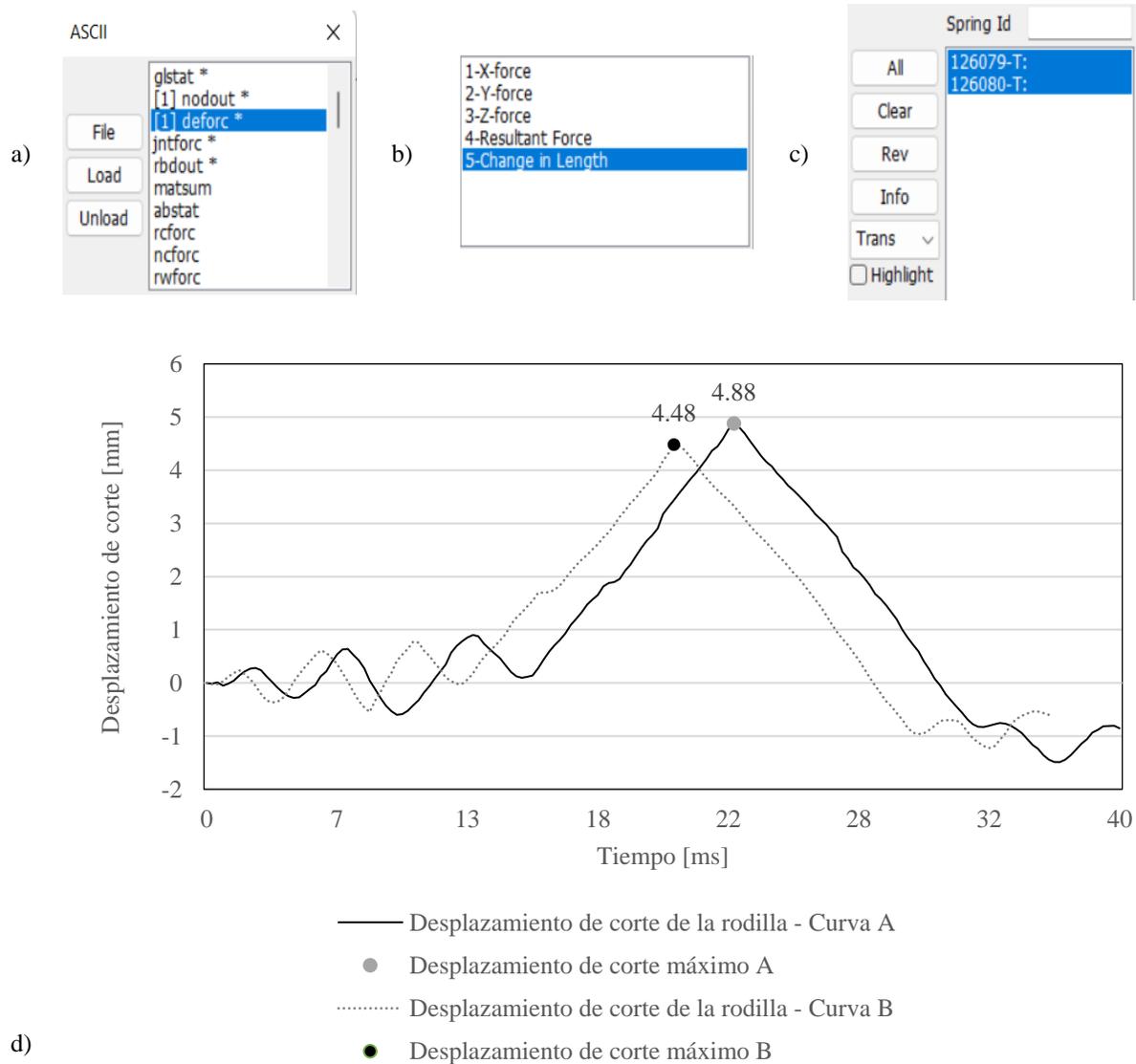


Figura 3.20 Desplazamiento de corte máximo – Dmax

Se considera un análisis a: [1] deforc* y se configura el software para realizar un análisis b: 5-Change in Length para calcular el desplazamiento de corte de los resortes discretos 60001 y 60002, representados en el apartado de la Tabla 3.19 c: Spring Id:122832-T y 122833-T respectivamente. Para el análisis con la Chevrolet Dmax se tiene Spring Id: 126079-T y 126080-T (Figura 3.20), y por parte del Sail Spring Id: 106769-T y 106770-T (Figura 3.21).

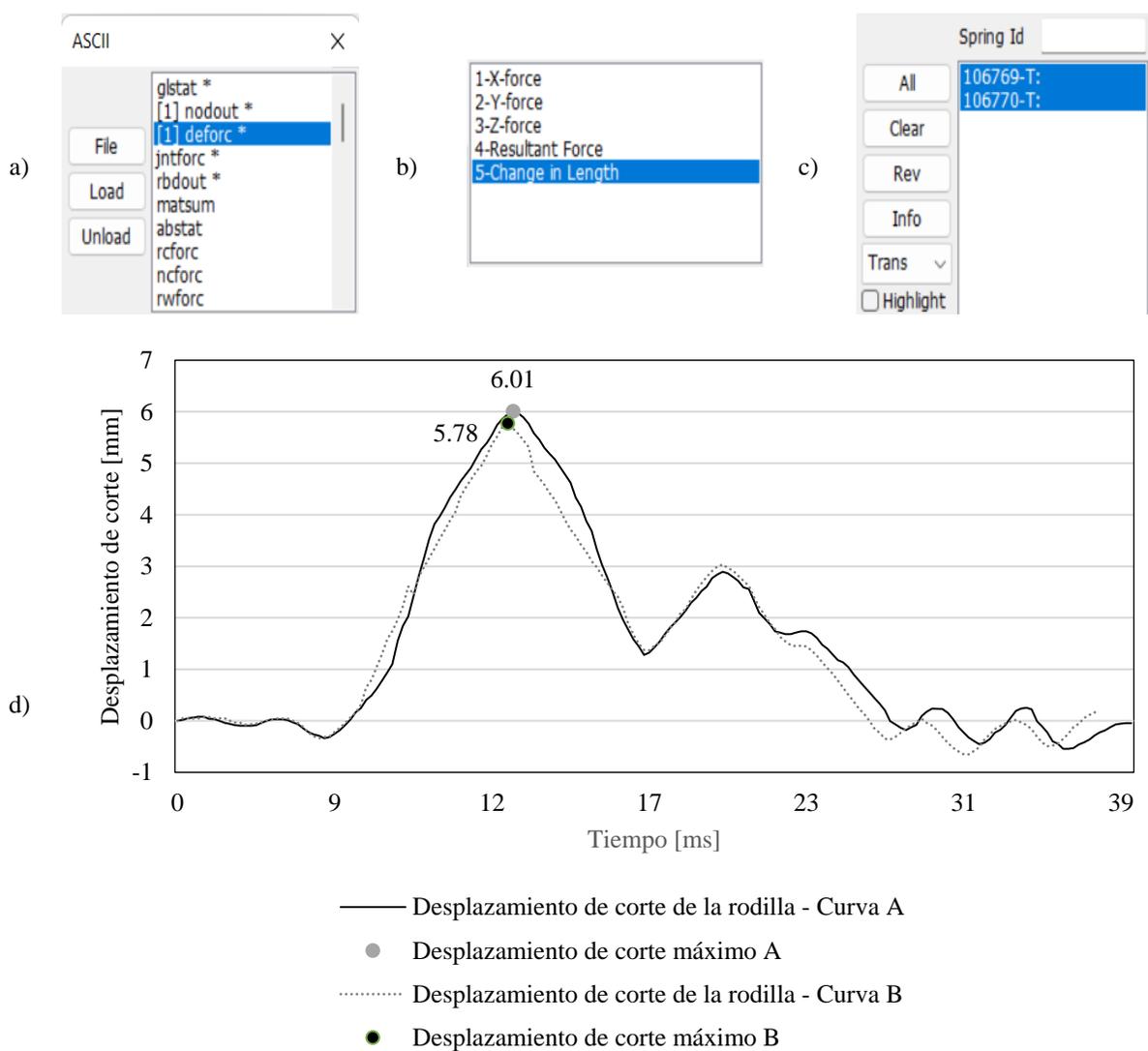


Figura 3.21 Desplazamiento de corte máximo – Sail

En la Tabla 3.10 se resumen los máximos valores de aceleración registrados durante las simulaciones de 40 ms para cada vehículo, junto con el tiempo en el que se alcanzaron dichos valores. Estos datos fueron obtenidos a partir de las Figuras 3.19-3.21.

Tabla 3.10 Desplazamiento de corte máximo de la rodilla producto del impacto vehicular y el tiempo de registro

	Desplazamiento de corte máximo [mm]	Tiempo [ms]
CAPTIVA LT TURBO 5PAS AC 1.5 5P 4X2 TM	5.27	9.25
D-MAX CRDI HI RIDE AC 2.5 CD 4X2 TM DIESEL	4.88	22.7
SAIL LS AC 1.5 4P 4X2 TM	6.01	13.1

3.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para llevar a cabo el presente estudio, se seleccionaron 15 casos de atropellamiento de las bases de datos del JARI e ITARDA que cumplieran con escenarios similares al del estudio. Los autores de las Figuras 3.22-3.24 emplearon técnicas de análisis estadístico, como la regresión logística y las pruebas t, para analizar los datos recopilados. A partir de los índices de gravedad y los valores físicos registrados por estas instituciones, se establecieron puntos de referencia para determinar las curvas de estimación del riesgo de lesión en el miembro inferior, ya sea a nivel óseo o en los ligamentos de la rodilla.

Como resultado, se obtuvieron tres curvas que ilustran la relación entre la aceleración sobre la rodilla y el riesgo de fractura de la tibia (Figura 3.22), el ángulo de flexión de la rodilla y el riesgo de lesión del ligamento colateral (Figura 3.23), y el desplazamiento de corte de la rodilla y el riesgo de lesión del ligamento cruzado (Figura 3.24).

Para la obtención de valores de las variables de la aceleración sobre la rodilla, ángulo de flexión de la rodilla y el desplazamiento de corte de la rodilla, se realizaron simulaciones mediante el método de elementos finitos utilizando el software LS-DYNA, en tres modelos de vehículos diferentes: el Chevrolet Captiva, el Sail y la Dmax. Cada simulación tuvo una duración de 40 ms, durante la cual se registró el comportamiento de estas variables. Se tomaron los valores máximos de cada una de ellas y se enlistan en las Tablas 3.11, 3.12 y 3.13. Estos valores máximos se proyectaron en las curvas de tendencia de las Figuras 3.22, 3.23 y 3.24, con el fin de estimar la probabilidad de lesión en el miembro inferior del peatón atropellado.

Los resultados obtenidos de las aceleraciones en la rodilla revelan una deficiencia en el diseño para absorber la energía cinética y mitigar los daños en los peatones. Ninguno de los vehículos sometidos a prueba cumple con los estándares establecidos por los organismos reguladores. Además, representan un peligro potencial de fractura de tibia, ya que el impacto con un Chevrolet Sail tiene una probabilidad del 100% de fractura, seguido de un 81% en el caso de la Captiva y un 64% en el caso de la Dmax.

Tabla 3.11 Aceleraciones máximas de la rodilla producto del impacto vehicular

	Aceleración máxima del tercio superior de la tibia [g]	Reglamento (CE) n.º 78/2009 Max score: 170	Informe del Grupo de Trabajo EEVC 17 Max score: 150	Euro NCAP KNCAP Max score: 150	GTR No.09 Max score: 170
CAPTIVA	255	X	X	X	X
D-MAX	223	X	X	X	X
SAIL	383	X	X	X	X

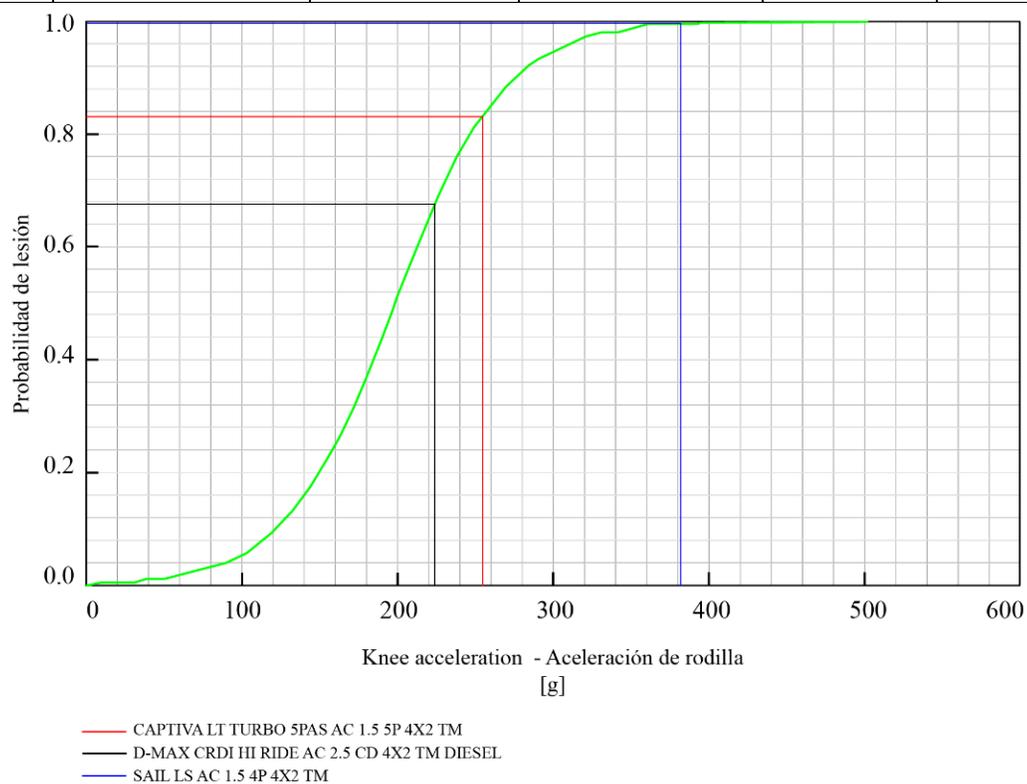


Figura 3.22 Curva de probabilidad de riesgo de fractura de la tibia según las fuerzas [g] aplicadas a la rodilla
(Y Matsui, 2003)

Como se puede observar en la Tabla 3.12, se identifica un único caso que cumple con los límites permitidos establecidos por un organismo regulador. En particular, la Chevrolet Dmax cumple con los estándares establecidos por la Comunidad Europea (CE) en cuanto al ángulo de flexión máximo, que no debe superar los 19°. En contraste, la Chevrolet Captiva y Sail no aprueba los estándares de seguridad peatonal y su probabilidad de lesión al ligamento colateral es del 42% y 40% respectivamente (Figura 3.23).

Tabla 3.12 Ángulos de flexión máxima de la rodilla producto del impacto vehicular

	Ángulo de flexión máximo [°]	Reglamento (CE) n.º 78/2009 Max score: 19°	Informe del Grupo de Trabajo EEVC 17 Max score: 15°	Euro NCAP KNCAP Max score: 15°	GTR No.09 Max score: 19°
CAPTIVA	25.6	X	X	X	X
D-MAX	19	/	X	X	X
SAIL	24.4	X	X	X	X

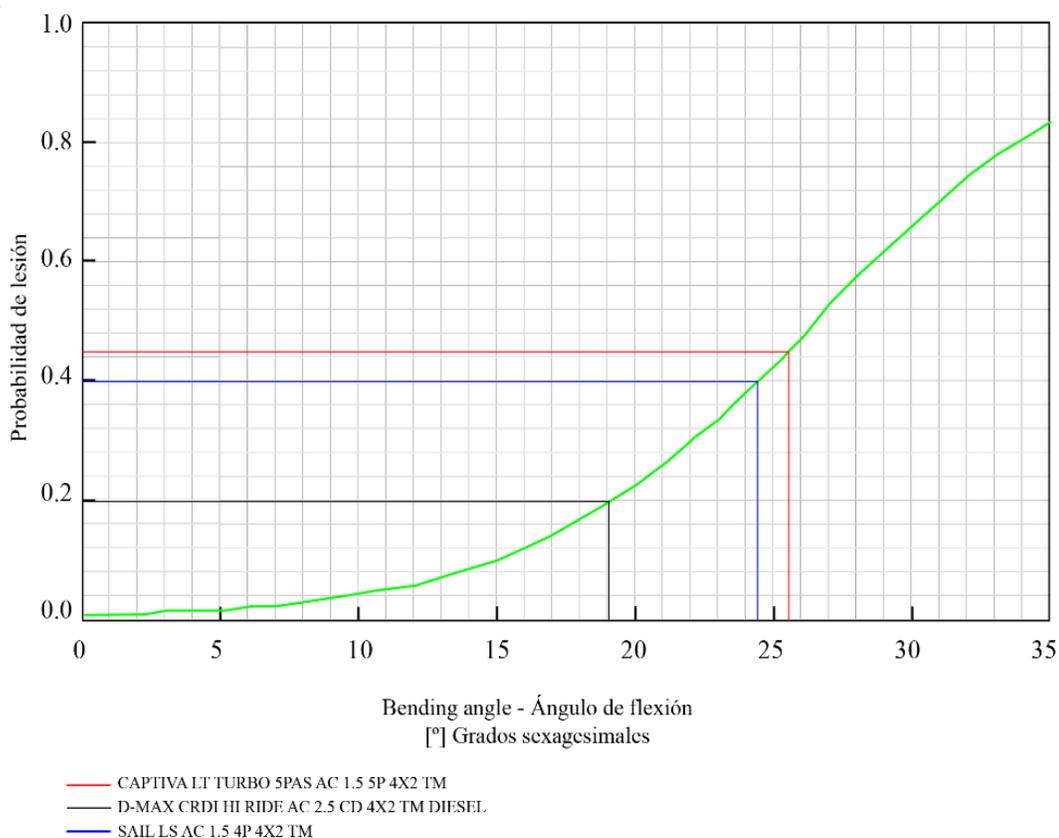


Figura 3.23 Curva de probabilidad del riesgo de lesión del ligamento colateral según el ángulo de flexión [°] provocado en la rodilla (Y Matsui, 2003)

En cuanto a los desplazamientos de corte en la rodilla y con ello los daños al ligamento cruzado, se destaca que la Chevrolet Dmax cumple con todas las regulaciones, provocando un desplazamiento de corte de 4.88 mm durante el atropellamiento. Por otro lado, tanto la Chevrolet Captiva como el Sail cumplen la mayoría de las normativas, a excepción del límite de 5 mm establecido en las pruebas KNCAP. En la Figura 3.24, estos dos últimos vehículos presentan un 10% y 21% de probabilidad, respectivamente, de provocar la falla del ligamento cruzado.

Tabla 3.13 Desplazamiento de corte máximo de la rodilla producto del impacto vehicular

	Desplazamiento de corte máximo [mm]	Reglamento (CE) n.º 78/2009 GTR No.09 Max score: 6.00mm	Informe del Grupo de Trabajo EEVC 17 Max score: 6.00mm	Euro NCAP Max score: 6.00mm	KNCAP Max score: 5.00mm
CAPTIVA	5.27	/	/	/	X
D-MAX	4.88	/	/	/	/
SAIL	6.01	/	/	/	X

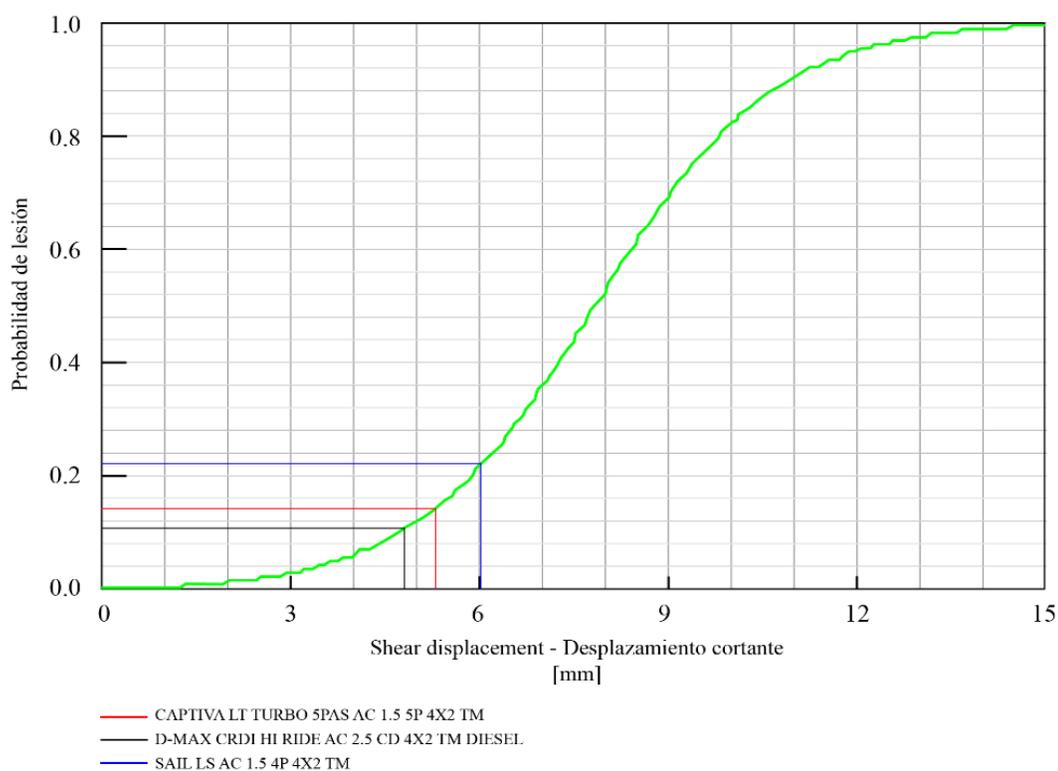


Figura 3.24 Curva de probabilidad de riesgo de lesión del ligamento cruzado según el desplazamiento cortante [mm]
(Matsui, Hitosugi y Mizuno, 2011)

3.7 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS VARIABLES RESPECTO A PACKAGE DE OTROS VEHÍCULOS

La configuración de los vehículos y la disposición de sus principales elementos, como el sistema de propulsión, transmisión, dirección y seguridad, junto con las dimensiones del vehículo, son resultado de un proceso de diseño automotriz conocido como "package". Durante este proceso, se organiza eficientemente todos los componentes para minimizar el uso del espacio y mejorar la comodidad y seguridad de los pasajeros. La disposición de estos elementos tiene un impacto directo en factores relacionados con la seguridad activa, seguridad pasiva, rendimiento y aerodinámica del vehículo. El diseño abarca desde la capacidad del maletero, altura del techo y posición de los asientos, hasta la altura sobre el suelo, el centro de gravedad y otros aspectos relevantes.

En la Figura 3.25 se acota dimensiones que influyen directamente en un atropellamiento, como la línea de referencia del parachoques inferior (LBRL, por sus siglas en inglés) o H103 según SAE J1100, la huella del parachoques sobre la pierna (H127), rejillas del radiador (H125) y el alcance del bumper (L126).

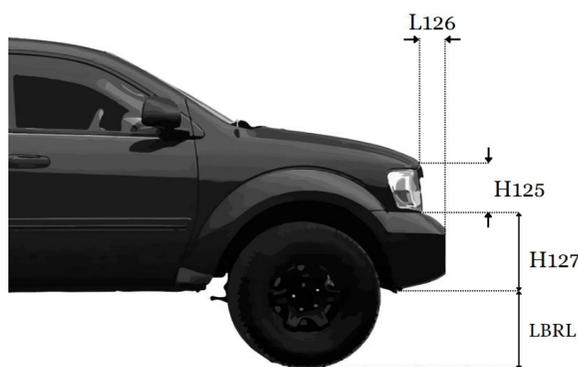


Figura 3.25 Cotas del Package

Los resultados de las simulaciones obtenidos en el presente estudio se comparan con 14 resultados seleccionados de pruebas experimentales previas, las cuales se llevaron a cabo siguiendo las normativas previamente descritas y que forman la base de este estudio. Los vehículos utilizados en estas pruebas están específicamente relacionados con los segmentos vehiculares que estamos investigando en este estudio.

Con el objetivo de realizar un análisis comparativo y comprender la influencia del package sobre el TRL, se determinan las magnitudes de las cotas del package de cada vehículo y se registran en la Tabla 3.14.

Además, para facilitar la visualización e interpretación de los resultados, se ha desarrollado una escala de colores. Esta escala comienza en verde, destacando las magnitudes más bajas, y se desplaza gradualmente hacia el rojo, resaltando los valores más altos. Esta representación visual nos permite identificar rápidamente las diferencias y los aspectos de mayor interés en el análisis comparativo. Esta comparación nos permite evaluar la precisión de los modelos de simulación y validar su capacidad para predecir las afecciones reales de los vehículos sobre los peatones.

Tabla 3.14 Influencia del package sobre la pierna del peatón

Menor valor al máximo valor 	Package				Evaluación de fractura ósea	Evaluación de lesiones de ligamentos de rodilla	
	LBRL [mm]	L126 [mm]	H125 [mm]	H127 [mm]	Gravity Forces [g]	Bending angle [°]	Shear displacement [mm]
Vehículo marca, modelo y año							
***Nissan Tiida 2007	213.7	151.6	104.6	434.9	307.0	24.3	3.0
**Mazda Miata 2002	218.0	88.3	0.0	369.4	159.0	18.7	4.2
*** Toyota Corolla 1995	219.8	130.5	106.0	345.4	371.0	25.6	3.9
*Chevrolet Sail 2021	220.8	148.5	237.4	369.6	383.0	24.4	6.0
**VW Passat 2006	230.0	121.5	192.6	329.3	181.0	28.5	5.4
***Nissan Sentra 2007	232.7	142.2	141.8	382.0	291.0	20.3	2.0
***Nissan Xtrail 2007	238.0	100.6	176.6	538.7	342.0	25.3	6.8
**Toyota Sienna 2006	264.0	142.8	103.5	437.2	202.0	31.0	6.7
*Chevrolet Captiva 2021	264.1	49.0	249.9	456.2	255.0	25.6	5.3
*Chevrolet Dmax 2021	279.3	165.8	322.1	396.8	223.0	19.1	4.9
***Honda CRV 2010	296.4	173.5	154.6	443.2	383.0	25.3	7.5
**Toyota Tacoma 2006	378.0	186.4	273.2	472.0	388.0	23.9	8.2
**Ford E-350 Van 2003	408.0	94.8	395.6	441.4	562.0	32.0	7.6
**Honda CR-V 2005	415.0	211.4	183.7	297.9	85.0	1.8	1.5
**Dodge Durango 2006	452.0	199.2	349.0	260.9	314.0	31.6	8.4
**Jeep Wrangler 2002	481.0	305.7	398.0	205.0	445.0	31.3	7.8
**Chevy Silverado 2005	505.0	158.6	321.4	320.7	306.0	28.3	8.4

Fuente: *Autoría propia

** (Mallory y Stammen, 2009)

*** (Matsui, Hitosugi y Mizuno, 2011)

Al analizar los resultados de las simulaciones y las pruebas experimentales con vehículos reales, se observa una relación significativa entre la altura respecto al suelo (LBRL) y la altura del frente vehicular (H125+H127) con las lesiones a nivel óseo y articular. Los datos indican que, a menor altura en estas medidas, se reducen las posibilidades de sufrir dichas lesiones. Esto se refleja en el caso del Chevrolet Sail y la Toyota Corolla, cuyos perfiles laterales y alturas respecto al suelo de 220 mm son congruentes.

Por otro lado, los valores del Mazda Miata reportan incluso menores afectaciones. Esto se debe a que su frente vehicular es significativamente reducido (H125+H127) en comparación con el Toyota Corolla y el Sail,

La probabilidad de fractura en la tibia debido a las fuerzas G (k_a) aplicadas en el miembro inferior depende directamente del package, geometrías y materiales de su sistema de protección. Con el paso del tiempo, los organismos evaluadores de vehículos, como NCAP, establecen exigencias más rigurosas, lo que impulsa la innovación en seguridad activa y pasiva tanto para pasajeros como para peatones. En el ámbito de estudio actual, se pueden destacar tecnologías como bumpers equipados con materiales de absorción intrínseca, sistemas de detección y frenado, superficies flexibles en la fascia, zonas deformables y/o dispositivos fusibles mecánicos, entre otros. La implementación de la mayoría de estos mecanismos contribuye a reducir el riesgo de lesiones óseas. Resultados y resaltar ejemplos de la tablas

Después de realizar un análisis comparativo, se ha evidenciado una relación significativa entre dos variables y las afecciones al ligamento colateral debido a los marcados ángulos de flexión (θ): la huella del parachoques (H127) y la cota LBRL. Cuando la huella del parachoques es reducida ($H127 < 320$ mm) y la cota LBRL es elevada ($LBRL > 350$ mm), se observa que, al alcanzar la máxima intrusión del TRL en el frente vehicular, las placas de la rodilla (PID 8) actúan como ejes de flexión, permitiendo un desplazamiento rotacional del fémur o la tibia, según la altura del impacto y la cota LBRL.

En impactos con LBRL superiores a los 220 mm, el fémur se proyecta hacia el capó como en el caso de atropellamientos con vehículos sedanes, mientras que en impactos mayores a los 270 mm, la tibia se proyecta hacia la viga de soporte inferior (Figura 1.12), efecto de intrusión, ocurre en camionetas y SUVs.

Por otra parte, durante el análisis de los resultados de los atropellamientos, se ha observado que en la sección entre el acelerómetro y el centro de gravedad de la tibia ($454 \text{ mm} \geq \text{impacto} \geq 290 \text{ mm}$), combinada con un alcance del paragolpes (L126) superior a 170 mm, se produce un notable esfuerzo cortante (sd) en el ligamento cruzado. Esta tendencia se evidencia en los últimos siete vehículos de la Tabla 3.14, a excepción del Honda CR-V de 2005, el cual obtuvo una calificación de cinco estrellas en Euro NCAP, indicando una mejor protección en este aspecto.

CONCLUSIONES

1. Este estudio se centró en el análisis de los vehículos más vendidos del 2021 de los segmentos de mayor incidencia en atropellamientos en Ecuador, con 2379 lesionados y 398 fallecidos, según los datos de la ANT. Los vehículos resaltan del registro de ventas del SRI, fueron el Chevrolet Captiva (24564 unidades vendidas), Sail (24211 unidades vendidas) y Dmax (38289 unidades vendidas), los cuales fueron modelados en SolidWorks y sometidos a impactos utilizando el impactador TRL.

Se ha observado que diversos factores como la configuración del package, geometrías, estructura y materiales del frente vehicular tienen un impacto significativo en las lesiones del miembro inferior. En particular, se ha constatado que las lesiones del ligamento cruzado anterior (ACL) tienden a ocurrir cuando el impacto se produce por debajo de la rodilla, como suele ser el caso en atropellamientos por vehículos sedán. Por otro lado, cuando el impacto se produce por encima de la articulación de la rodilla, existe una probabilidad de lesión en el ligamento medial colateral (MCL) o el ligamento cruzado posterior (PCL). Estudios previos han evidenciado una mayor incidencia de lesiones en el MCL.

Si bien estas observaciones son generalidades y pueden variar en cada vehículo, resulta relevante tener en cuenta algunas consideraciones durante el proceso de diseño y configuración del package para reducir los valores de los tres indicadores de lesividad:

- Fuerzas G (ka): Los resultados del análisis de los impactos del TRL en los atropellamientos registrados en la Tabla 3.14 muestran una dispersión significativa, sin encontrar una relación directa entre el package y las fuerzas g generadas en la rodilla (probabilidad de fractura de la tibia). Esta variabilidad se debe a la utilización de diferentes sistemas de atenuación de fuerzas por parte de las marcas de vehículos, así como a la influencia del año de fabricación y la tecnología disponible para proteger a los peatones de fracturas de la tibia.
- Ángulo de flexión: Configurar el package con una huella del parachoques de tamaño adecuado evita la formación de ángulos de flexión en la rodilla. Mantener una zona de contacto más amplia ($H127 > 420$ mm) ayudará a mantener el TRL en una posición más rígida y prevenir los ángulos de flexión perjudiciales para los ligamentos medial.

- Desplazamiento: Para mitigar el riesgo de lesiones en los ligamentos cruzados debido a desplazamientos cortantes elevados, es importante que el package considere limitar el valor de LBRL a no exceder significativamente los 220 mm. Además, el alcance del bumper (L126) se encuentre en torno a los 140 mm.

2. El presente trabajo ha demostrado ser una herramienta eficaz en la investigación de seguridad vehicular pues su enfoque metodológico se basa en la simplificación de modelos en simulaciones automotrices como es común para optimizar los recursos computacionales. En este estudio, durante el modelado se omitieron elementos de sujeción y pequeñas piezas de plástico debido a su impacto insignificante en escenarios de alta velocidad y carga. Se seleccionaron cuidadosamente dos materiales que desempeñan un papel crucial en la interacción entre la zona C y el TRL. Las propiedades y características mecánicas de estos materiales se basaron en datos confiables provenientes de la NHTSA, una institución líder en la investigación de seguridad vehicular. Además, se observa que los resultados de la simulación son consistentes con pruebas experimentales anteriores en otros vehículos, aunque es importante mencionar que los resultados del presente estudio no pueden ser comparados directamente con su homólogo pues no se han realizado evaluaciones reales debido a que ninguno de los tres modelos se comercializa en Europa.

3. Se ha observado que los resultados de las simulaciones presentan una considerable aproximación a los datos obtenidos en pruebas experimentales. En particular, la metodología utilizada mediante el análisis por elementos finitos del software LSDYNA mostró una alta congruencia entre las simulaciones realizadas con el Chevrolet Captiva de 2021 y los datos experimentales del Nissan X Trail de 2007, difiriendo en un 15.44% en sus resultados. Esto demuestra la validez y semejanza de la metodología utilizada, que cumple con los estándares de homologación del impactador TRL (Transport Research Laboratory) establecidos en el Reglamento (CE) n.º 78/2009.

4. El Chevrolet Sail y Captiva presentan un alto riesgo de causar lesiones graves en caso de atropellar a un peatón a 40 km/h, con una probabilidad del 100% de fractura de tibia en el caso del Sail y un 40% de riesgo de lesión del ligamento colateral en el caso de la Captiva. Además,

el Sail también presenta un 21% de riesgo de lesión del ligamento cruzado. En contraste, la camioneta Chevrolet D-MAX presenta el menor riesgo de causar lesiones graves a miembros óseos o ligamentos en caso de atropellamiento, lo que la convierte en una opción más segura para los peatones. Es relevante señalar que todos los modelos mencionados en el estudio tienen una probabilidad superior al 50% de fracturar la tibia del peatón al impactarse a 40 km/h, lo que subraya la necesidad de continuar mejorando las características de seguridad de los vehículos y los métodos de prueba para reducir el riesgo de lesiones graves en accidentes con peatones.

RECOMENDACIONES

- El presente trabajo se ha desarrollado utilizando software CAD, CAE y revisión de normativa específica. Con esto se demuestra la importancia de estas herramientas dentro de la ingeniería automotriz. Se recomienda el fortalecimiento, dentro de la malla curricular de la carrera, de asignaturas relacionadas a CAD-CAM-CAE y manejo de normas.
- En este estudio se analizaron tres modelos que registran más incidencia de daños a nivel óseo y articular, en atropellamiento. Estos modelos son de los más comercializados de su segmento durante el 2021. Mediante esta metodología se propone una sistemática aplicada a los nuevos vehículos que pretenden ingresar al parque automotor, para admitir su comercialización y/o advertir de sus desventajas a la integridad peatonal en caso de atropellamiento.
- Para la simulación por elementos finitos se recomienda la simplificación de los modelos automotrices, dejando de tomar en cuenta pequeños elementos de sujeción y materiales que no influyen directamente en el impacto en contra del TRL. La participación de este tipo de elementos durante las simulaciones a altas velocidades de deformación, no son representativas en los resultados y significan un gasto computacional mayor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEADE. (22 de abril de 2020). Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador. Obtenido de Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador: <https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2022/05/4.-Sector-en-Cifras-Resumen-Abril-1.pdf>
- ALTAIR. (2021). Altair Radioss. Obtenido de Altair Radioss: https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/rad/topics/solvers/rad/mat_024_lsdyna_r.htm
- ANT. (17 de Enero de 2022). Visor de Siniestralidad Nacional. Obtenido de Agencia Nacional de Tránsito: <https://www.ant.gob.ec/visor-de-siniestralidad-estadisticas/>
- Autocrash. (1 de abril de 2020). Autocrash. Obtenido de Autocrash: <https://www.revistaautocrash.com/por-que-el-diseno-y-el-material-de-la-carroceria-es-fundamental-en-la-seguridad-del-vehiculo/>
- Bose, D., Bhalla, K., Untaroiu, C., Ivarsson, J., & Crandall, J. (2008). Injury Tolerance and Moment Response of the Knee Joint to Combined Valgus Bending and Shear Loading. *Journal of Biomechanical Engineering*. Obtenido de doi: 10.1115/1.2907767
- Bucki, M., Lobos, C., Payan, Y., & Hitschfeld, N. (2011). Jacobian-based repair method for finite element meshes after registration. *Engineering With Computers manuscript No.*, 1 - 20. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/220677913_Jacobian-based_repair_method_for_finite_element_meshes_after_registration
- Bunketorp , O., & Romanus, B. (1980). Clinical studies on leg injuries in car pedestrian accidents. Department of Orthopaedic Surgery II. Obtenido de http://www.ircobi.org/wordpress/downloads/irc1981/pdf_files/1981_21.pdf
- Cameron, M., Schemistsch, E., Zdero, R., & Quenneville, C. (2020). Biomechanical impact testing of synthetic versus human cadaveric tibias for predicting injury risk during pedestrian-vehicle collisions. *Traffic Injury Prevention*, 1-6.
- CE. (22 de julio de 2009). Diario Oficial de la Unión Europea . Obtenido de Diario Oficial de la Unión Europea : <https://eur-lex.europa.eu/ES/legal-content/summary/protection-of-pedestrians-and-vulnerable-road-users.html>
- Chang, C.-Y., Woo, H., & Wang, S.-F. (2011). Analysis of Pedestrian Walking Speeds at Crosswalks in Taiwan. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. Obtenido de https://www.jstage.jst.go.jp/article/easts/9/0/9_0_1186/_article

- Constantin, B., Iozsa, D., & Stan, C. (2017). Experimental research on pedestrian lower leg impact. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1 - 9. doi:10.1088/1757-899X/252/1/012006
- Corporación Toyota Motor. (2021). Modelo de cuerpo humano virtual THUMS. Obtenido de https://www.toyota.co.jp/thums/contents/pdf/Toyota_THUMS_History_Japanese.pdf
- Cortés, O., & Mejía, M. (2014). ¿Sufre de molestias debido a su puesto de trabajo? Cómo una tabla antropométrica puede ayudar a mejorar los diseños de puestos de trabajo (tesis de pregrado). Quito, Ecuador : Universidad San Francisco de Quito. Obtenido de <https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/3187/1/000110623.pdf>
- Fahlstedt, M., Halldin, P., & Kleiven, S. (2015). Comparison of Multi-body and Finite Element Human Body Models in Pedestrian Accidents with the Focus on Head Kinematics. *Traffic Injury Prevention*, 320-327.
- GCDC. (2017). X200-4 USB Accelerometer Data Logger. Misipi. doi:https://www.gcdadataconcepts.com/GCDC_X200-4_User_Manual.pdf
- HAN, Y., & LEE, Y. (23 de Enero de 2002). Optimization of Bumper Structure for Pedestrian Lower Leg Impact. *SAE TECHNICAL PAPER SERIES*, 16. doi:10.4271/2002-01-0023
- Hayes, W., & Gerhart, T. (1985). *BIOMECHANICS OF BONE: APPLICATIONS FOR ASSESSMENT OF*. ResearchGate, 272. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Wilson-Hayes/publication/290796878_Biomechanics_of_bone_Applications_for_assessment_of_bone_strength/links/575f1fba08ae9a9c955fb06f/Biomechanics-of-bone-Applications-for-assessment-of-bone-strength.pdf
- Hernandez, C., Maranon, A., Ashcrof, I., & Casas, J. (2013). A computational determination of the Cowper–Symonds parameters from a single Taylor test. *Applied Mathematical Modelling*, 4694 - 4708. doi: 10.1016/j.apm.2012.10.010
- ITARDA. (2000). Institute for Traffic Accident Research and Data Analysis of Japan,. Obtenido de Institute for Traffic Accident Research and Data Analysis of Japan,.
- Jácome, H., Oleas, J., Angulo, D., & Trávez, C. (Abril de 2011). Centro de Investigaciones Económicas y de la Micro, Pequeña y Mediana Empresa. Obtenido de Centro de Investigaciones Económicas y de la Micro, Pequeña y Mediana Empresa:

<https://www.flacso.edu.ec/portal/pnTemp/PageMaster/07xhc02kdn0i8zlp9o7iz17oh19gcv.pdf>

- Kolling, S., & Haufe, A. (30 de 11 de 2009). DYNA MORE. Obtenido de DYNA MORE.
- Lei, F., Lv, X., Fang, J., Pang, T., Li, Q., & Sun, G. (2021). Injury biomechanics-based nondeterministic optimization of front-end structures for safety in pedestrian–vehicle impact. *Thin-Walled Structures*, 167. doi: 10.1016/j.tws.2021.108087
- Li, G., Yang, J., & Simms, C. (2015). The influence of gait stance on pedestrian lower limb injury risk. *Análisis y prevención de accidentes*, 83-92.
- Linder, A., Clark, A., Douglas, C., Fildes, B., Yang, J., & Chispa, L. (2004). Mathematical modelling of pedestrian crashes: review of pedestrian models and parameter study of the influence of the sedan vehicle contour. *Nacional Academies Sciences Engineering Medicine*, págs. 1 - 10. Obtenido de <https://acrs.org.au/files/arsrpe/RS040193.pdf>
- LSTC. (2018). *Material Models*. California.
- Mallory, A., & Stammen, J. (2009). *The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*. Obtenido de *The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*: <https://trid.trb.org/view/1100079>
- Marangoni, A., & Massaroppi, E. (2017). Cowper-Symonds parameters estimation for ABS material using design of experiments with finite element simulation. *Polímeros: Ciencia y Tecnología*, 2020 - 2024.
- Matsui, Y., & Takagi, S. (2012). Effect of humidity on pedestrian legform impactor-to-car bumper impact test results. *International Journal of Crashworthiness*, 39 - 49. doi:10.1080/13588265.2011.625675
- Matsui, Y., Hitosugi, M., & Mizuno, K. (2011). *Forensic Science International*, 205 - 209. doi: 10.1016/j.forsciint.2011.06.012
- Matsui, Y., Hitosugi, M., & Mizuno, K. (2011). Severity of vehicle bumper location in vehicle-to-pedestrian impact accidents. *Forensic Science International*, 205-209.
- Mo, F., Arnoux, P., Cesari, D., & Masson, C. (2014). Investigation of the injury threshold of knee ligaments by the parametric study of car–pedestrian impact conditions. *Safety Science*, 58-67.
- Molina, I., & Vilaña, D. (2018). Simulación numérica de contacto entre superficies con movimiento realtivo para predicción de desgaste en cojinetes de fricción de alineación

- de aluminio. Quito, Ecuador : Escuela Politécnica Nacional . Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19315/1/CD-8684.pdf>
- NASA. (1978). Anthropometric Source Book. Obtenido de https://books.google.com.ec/books?id=R3w4AQAAIAAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- NHTSA. (2010). National Highway Traffic Safety Administration. Obtenido de National Highway Traffic Safety Administration: <https://www.nhtsa.gov/crash-simulation-vehicle-models>
- Otte, D., & Haasper, C. (2007). Characteristics on Fractures of Tibia and Fibula in Car Impacts to Pedestrians and Bicyclists – Influences of Car Bumper Height and Shape. Accident Research Unit . Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/5666910_Characteristics_on_Fractures_of_Tibia_and_Fibula_in_Car_Impacts_to_Pedestrians_and_Bicyclists_-_Influences_of_Car_Bumper_Height_and_Shape
- Panday, P., Vikram, A., Chawla, A., & Mukherjee, S. (2021). Prediction of lower extremity injuries in car-pedestrian crashes - real - world accident study . Traffic Injury Prevention, 173-176.
- Rust, W., & Schweizerhof , K. (2003). Finite element limit load analysis of thin-walled structures by ANSYS (implicit), LS-DYNA (explicit) and in combination. ScienceDirect. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823102000897?via%3Dihub>
- Serrano, D. (13 de enero de 2022). El comercio. Obtenido de El comercio: <https://www.elcomercio.com/actualidad/sector-automotriz-crecimiento-2020.html>
- Shigeta, K., Kitagawa, Y., & Yasuki, T. (2009). Development of Next Generation Human Body FE Model Capable of Organ Injury Prediction. National Academies Sciences Engineering Medicine. Obtenido de National Academies Sciences Engineering Medicine: <https://trid.trb.org/view/1099815>
- Škrlec, A., & Klemenc, J. (2016). Estimating the Strain-Rate-Dependent Parameters of the Cowper-Symonds and Johnson-Cook Material Models using Taguchi Arrays. Journal of Mechanical Engineering, 220-230. Obtenido de <https://www.sv->

- jme.eu/?ns_articles_pdf=/ns_articles/files/ojs/3266/public/3266-18082-1-PB.pdf&id=3283
- SRI. (2021). Servicio de Rentas Internas. Obtenido de Servicio de Rentas Internas: <https://www.sri.gob.ec/o/sri-portlet-biblioteca-alfresco-internet/descargar/b0751ad8-2a88-4ec8-8500-a551964bf1b1/ESTAD%c3%8dSTICA%20VEHICULAR%202021.xlsb>
- Sun, G., Wang, X., Fang, J., Pang, T., & Li, Q. (2021). Parallelized optimization design of bumper systems under multiple low-speed impact loads. *Thin-Walled Structures*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108197>
- Tang, J., Zhou, Q., Nie , B., & Hu, J. (2020). Obesity effects on pedestrian lower extremity injuries in vehicle-to-pedestrian impacts: A numerical investigation using human body models. *Traffic Injury*, 1-6.
- Terrenos , V., & Ulloa , C. (2011). “CARACTERÍSTICAS DE LAS LESIONES DE LOS OCUPANTES DE LOS VEHÍCULOS LIVIANOS EN ACCIDENTES DE TRÁNSITO EN LOS SERVICIOS DE EMERGENCIA DEL HOSPITAL VICENTE CORRAL MOSCOSO EN LA CIUDAD DE CUENCA EN EL PERÍODO JULIO - DICIEMBRE DE 2009. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/3465/1/MED15.pdf>
- Y Matsui. (2003). New injury reference values determined for TRL legform impactor from accident reconstruction test. *International Journal of Crashworthiness*, 179 - 188.

ANEXOS

ANEXO I MODELOS CAE DE CHEVROLET CAPTIVA, DMAX Y SAIL PARA SIMULACIONES NUMÉRICAS DE ATROPELLAMIENTOS

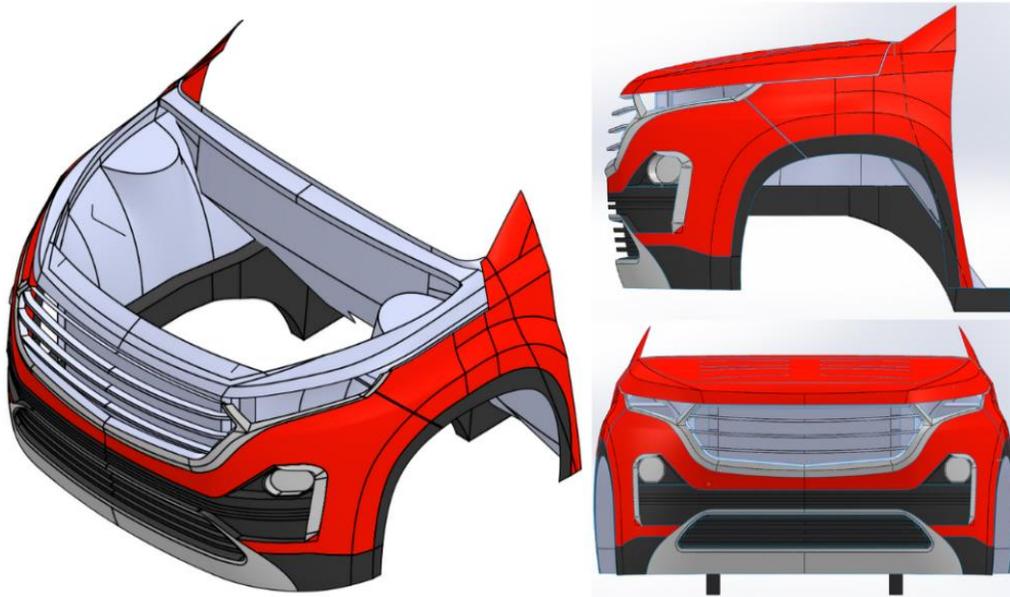


Figura AI.1 Modelo CAD: Chevorlet Captiva

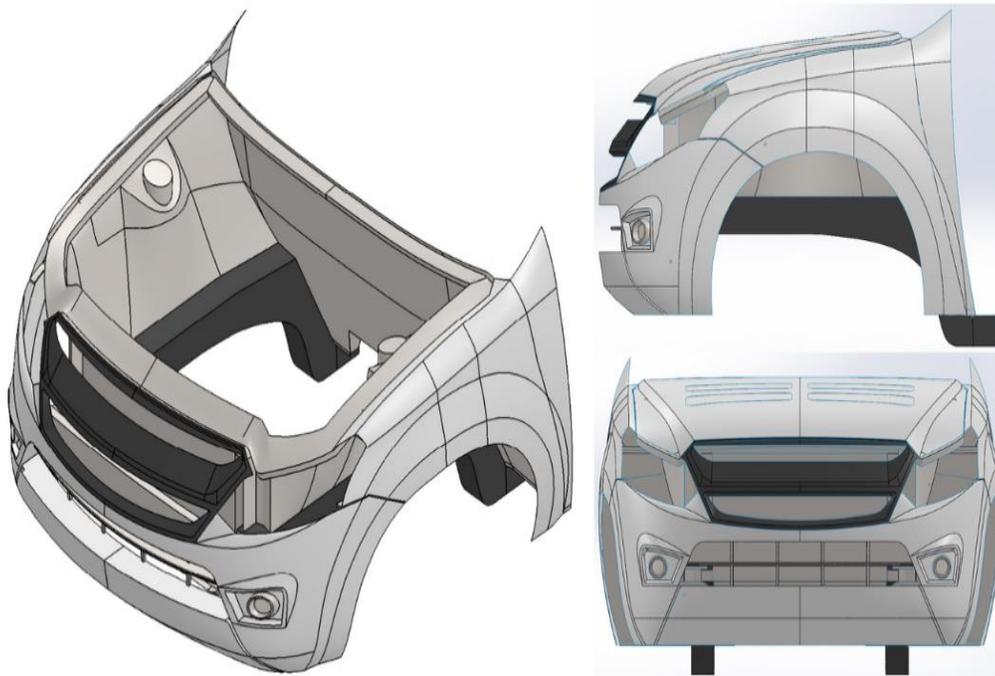


Figura AI.2 Modelo CAD: Chevrolet Dmax

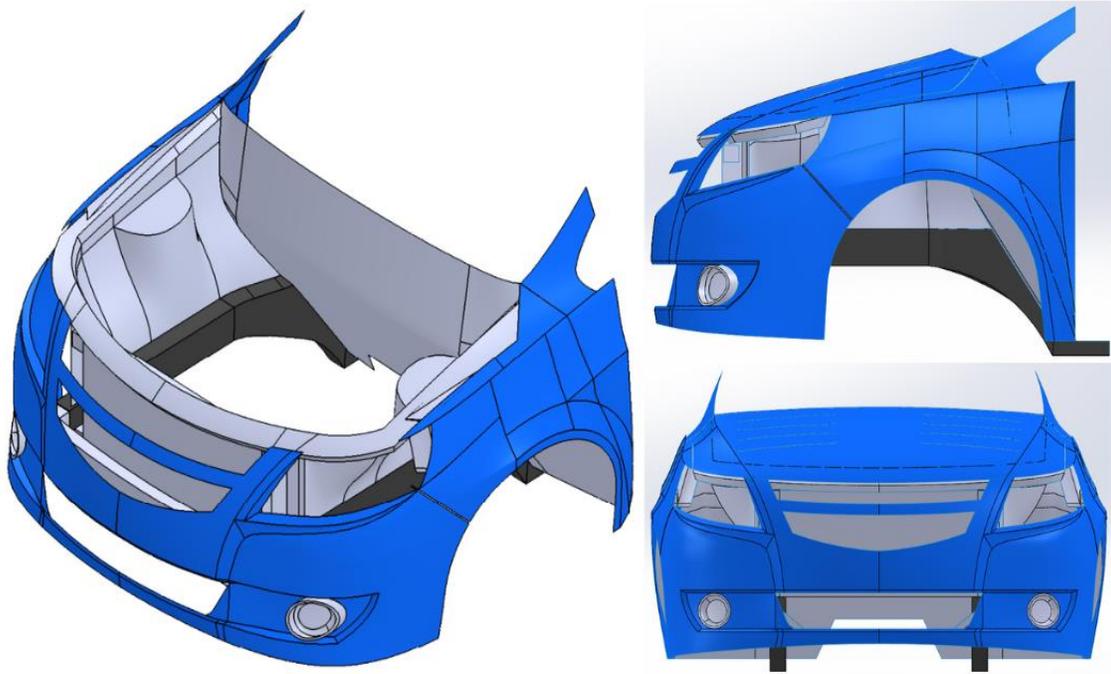


Figura AI.3 Modelo CAD: Chevrolet Sail

ANEXO II PLANOS CAE DE CHEVROLET CAPTIVA, DMAX Y SAIL PARA SIMULACIONES NUMÉRICAS DE ATROPELLAMIENTOS

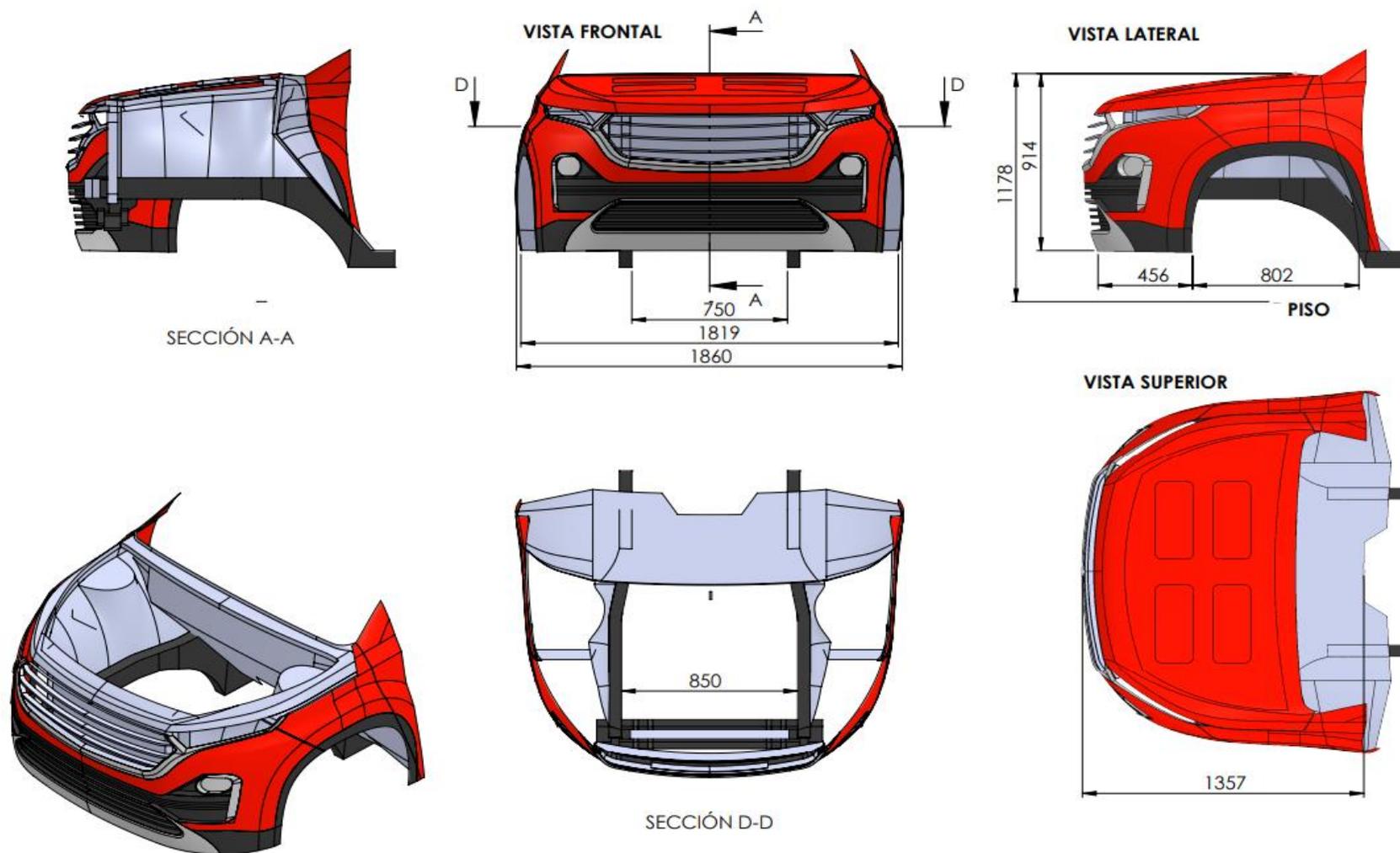


Figura AII.1 Planos CAD: Chevrolet Captiva

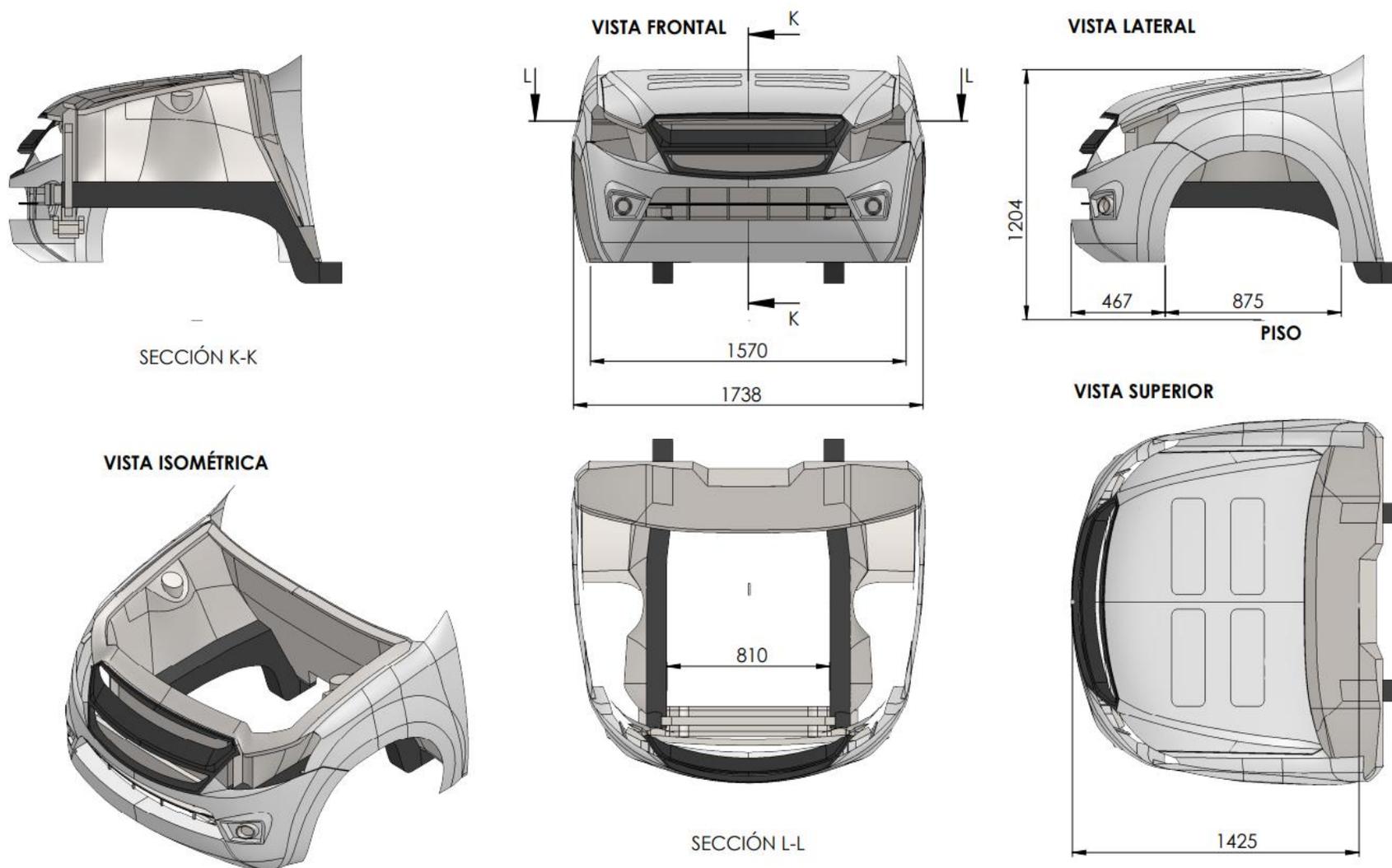


Figura AII.2 Planos CAD: Chevrolet Dmax

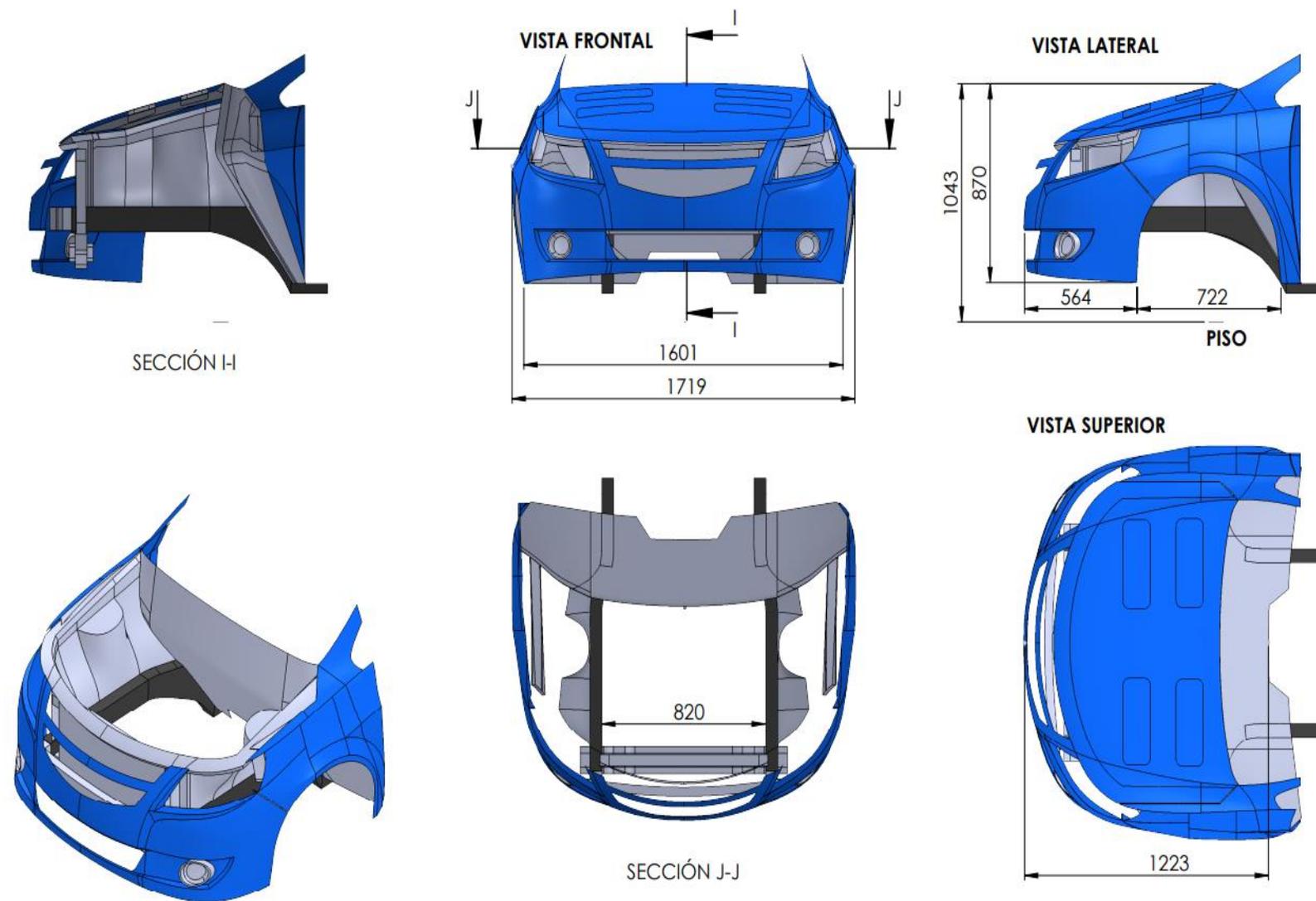


Figura AII.3 Planos CAD: Chevrolet Sail