

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIA APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



TEMA:

“COMPORTAMIENTO DE MATERIALES COMPUESTOS EN EL PARACHOQUE FRONTAL DURANTE EL IMPACTO CON LA PARTE INFERIOR DE LAS PIERNAS DE UN PEATÓN”

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz.

AUTORES:

ARÉVALO CHAMORRO ESTEBAN ANDRÉS

LÓPEZ HURTADO JIMY DANIEL

DIRECTOR:

ING. EDWIN SALOMÓN ARROYO TERÁN MSC.

Ibarra – Ecuador

2023



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:	0401980321		
APELLIDOS Y NOMBRES:	ARÉVALO CHAMORRO ESTEBAN ANDRÉS		
DIRECCIÓN:	El Sagrario/ Coop. Carchi/ Calle Obispo Jesús Yerovi y U. Navarro		
EMAIL:	eaarevaloc@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0993427403

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004730501		
APELLIDOS Y NOMBRES:	LÓPEZ HURTADO JIMY DANIEL		
DIRECCIÓN:	El Sagrario/ El Milagro/ Calle Naranjal y Aguacate 2-38		
EMAIL:	jdlopezh1@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0986077480

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	COMPORTAMIENTO DE MATERIALES COMPUESTOS EN EL PARACHOQUE FRONTAL DURANTE EL IMPACTO CON LA PARTE INFERIOR DE LAS PIERNAS DE UN PEATÓN.
AUTOR (ES):	ARÉVALO CHAMORRO ESTEBAN ANDRÉS LÓPEZ HURTADO JIMY DANIEL
FECHA: DD/MM/AAAA	13/04/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERÍA AUTOMOTRIZ
ASESOR /DIRECTOR:	ING. EDWIN SALOMÓN ARROYO TERÁN MSC.

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) 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 (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 13 días del mes de Abril de 2023

AUTORES:



Arévalo Chamorro Esteban Andrés



López Hurtado Jimy Daniel

CERTIFICADO

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.

CERTIFICO:

Que una vez analizado el plan de grado cuyo título es "COMPORTAMIENTO DE MATERIALES COMPUESTOS EN EL PARACHOQUE FRONTAL DURANTE EL IMPACTO CON LA PARTE INFERIOR DE LAS PIERNAS DE UN PEATÓN" presentado por los señores: ARÉVALO CHAMORRO ESTEBAN ANDRÉS con número de cédula 0401980321 y LÓPEZ HURTADO JIMY DANIEL con número de cédula 1004730501, 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 13 días del mes Abril del 2023.

Atentamente



Firmado electrónicamente por:
EDWIN SALOMON
ARROYO TERAN

Ing. Edwin Arroyo MSc.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

DEDICATORIA

El presente trabajo de grado es dedicado a mi familia y muchos amigos. Un sentimiento especial a mi amada madre, Martha Hurtado, quien fue la mejor motivadora cuyas palabras de aliento y empuje por la tenacidad resuenan en mis oídos, textualmente no se puede expresar mi profundo amor y gratitud. Mi hermana Katherine y mi abuela Rosa María, que nunca se han separado de mi lado, son muy especiales y con quienes tengo una gran deuda. También dedico este trabajo y agradezco especialmente a un gran amigo Esteban A. por su apoyo durante todo el proceso y las horas de trabajo prestadas para terminar este proyecto final. Finalmente, a toda persona que tenga ocasión de leer esta modesta investigación.

JIMY LÓPEZ

Dedico mi tesis principalmente a Dios, por haberme dado la salud, la fuerza necesaria y permitirme el haber llegado hasta este momento importante de mi formación profesional. A mi madre Gloria Chamorro por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional, por todo su amor y por motivarme a seguir hacia adelante día tras día. A mis padrinos Wilson N. y Emilia A. por su ayuda en el momento más difícil de mi vida, de todo corazón, gracias. También a mis hermanos Liliana y Bladimir A., por brindarme su sustento moral y económico. De igual forma a mi pareja Karina por a verme dado su apoyo y por no soltar mi mano en todo este camino. A mi compañero de tesis, Jimy L. porque sin el equipo que formamos, no habiéramos logrado esta meta. Y finalmente, a amigos, familiares y conocidos que de alguna manera supieron dar la mano en el momento que más lo necesite.

ESTEBAN ARÉVALO

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos a los docentes de la carrera de Ingeniería Automotriz, que compartieron su sabiduría y experiencias dentro de las aulas para una mejor formación académica de forma diaria. Un agradecimiento especial a los docentes Ing. Edwin Arroyo y Ing. Ramiro Rosero quienes aportaron sus conocimientos en cada subárea relevante del proyecto, por guiarnos de una manera correcta, disciplinada y con gran paciencia hasta el último momento de culminación del presente trabajo.

A mi familia, amigos y las personas más cercanas a mí, por siempre estar cuando más los he necesitado y nunca defraudarme, especialmente en las dificultades que han surgido. Sus consejos, ayuda y cariño han sido el motor para terminar esta etapa y empezar una nueva en mi vida.

JIMY LÓPEZ

Quiero expresar mi agradecimiento a mi familia y amigos cercanos quienes supieron estar en los momentos más difíciles, a ellos quienes supieron apoyarme incondicionalmente.

De la misma forma un profundo agradecimiento a todas mis compañeros y docentes que hacen la carrera de Ingeniería Automotriz de la UTN, por confiar en mí, abrirme las puertas y permitirme realizar todo el proceso investigativo dentro de su establecimiento.

De igual manera mis agradecimientos al cuerpo docente de UTN, en especial al Ing. Edwin Arroyo y Ing. Ramiro Rosero quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo y amistad.

ESTEBAN ARÉVALO

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	18
CAPÍTULO I	19
1. Introducción	19
1.1. Objetivos	19
1.1.1. Objetivo general	19
1.1.2. Objetivo específico	19
1.2. Justificación	19
1.3. Planteamiento del problema	20
1.4. Alcance	20
1.5. Antecedentes	20
1.6. Situación actual	21
CAPÍTULO II	22
2. Revisión Bibliográfica	22
2.2. Elementos de la carrocería	22
2.2.1. Estructura	22
2.2.2. Parachoques	24
2.2.3. Secciones de impactos frontales del parachoque	25
2.3. Seguridad Pasiva	27
2.3.1. Normativa vehicular	28
2.3.2. Peatón	29
2.3.3. Método de evaluación	31
2.3.4. Requisitos	31
2.4. NCAP VS GRT9	32
2.4.1. Criterios y valores límite	32
2.4.2. Puntos de impacto para análisis	33
2.4.3. El modelo del cuerpo humano	34
2.5. FEM	35
2.5.1. CAD	35
2.5.2. CAE	36

2.6.	Resistencia Estructural del parachoque	36
2.6.1.	Propiedades de materiales	36
2.6.2.	Termoplásticos convencionales	37
2.6.3.	Materiales compuestos	38
2.6.4.	Matriz	39
2.6.5.	Refuerzo	40
CAPÍTULO III		42
3.	Métodos y Materiales	42
3.1.	Análisis de Probetas	43
3.1.1.	Parámetros	43
3.1.2.	Modelado	44
3.1.3.	Materiales	45
3.1.4.	Condiciones de Borde	55
3.2.	Validación de Probetas	57
3.2.1	Línea base	57
3.2.2	Comparativa FEM vs Real	57
3.3.	Diseño del protector del parachoque	59
3.3.1	Selección del vehículo	59
3.3.2	Extracción del protector del parachoque	60
3.3.3	Vehículo utilizado para simulación de impacto	62
3.3.4	Configuración M1, M2 y M3	64
3.4.	Parámetros de simulación de impacto- Normativa	64
3.4.1	Parámetros para obtener grafica del protector del parachoque	64
3.4.2	Parámetros para obtener grafica de los acelerómetros del Dummy	66
3.4.3	Parámetros impacto VS FE y HBM FE	68
3.5.	Pruebas Piloto	69
3.5.1	Prueba Piloto 1	69
3.5.3	Prueba Piloto 2	73
3.6.	Simulación	77
3.6.1	Mallado de modelos FE CPC	77
3.6.2	Ensamble de modelos FE	78
3.6.3	Condiciones de borde	80

CAPÍTULO IV	82
4. Resultados y Discusión	82
4.1. Resultados	82
4.1.1. Simulación de las probetas	82
4.1.2. Impacto del parachoque M1, M2 y M3	84
4.2. Discusión de resultados	92
4.2.1. Probeta real vs modelada	92
4.2.2. Impacto M1 vs M2 vs M3	93
CAPÍTULO V	96
5. Conclusiones y Recomendaciones	96
5.1 Conclusiones	96
5.2 Recomendaciones	97
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
ANEXOS	107

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	PÁGINA
Tabla 2.1 Requisitos para poder aplicar el protocolo (R127/GTR 9)	31
Tabla 2.2 Valores límites (Euro NCAP/ GTR 9)	32
Tabla 2.3 Ventajas y desventajas de la resina epoxi como matriz	39
Tabla 2.4 Características mecánicas de resina epoxi como matriz	40
Tabla 3.1 Representación de materiales disponibles para el análisis	45
Tabla 3.2 Resultados del ensayo a tracción del M1 con C2	45
Tabla 3.3 Resultados del ensayo a tracción del M2 con C1	46
Tabla 3.4 Densidad de matriz y refuerzo de los materiales compuestos	47
Tabla 3.5 Cálculo de RO del M1 con matriz 60% - refuerzo 40%	47
Tabla 3.6 Cálculo de RO del M2 con matriz 75% - refuerzo 25%	48
Tabla 3.7 (a) Valores curva esfuerzo-deformación M1 con matriz 60% - refuerzo 40% (b) Valores curva esfuerzo-deformación M2 con matriz 75% - refuerzo 25%	51
Tabla 3.8 Ventas anuales por tipo de vehículo en unidades 2012-2021	62
Tabla 3.9 Principales modelos Hyundai vendidos (unidades), 2020-2021	63
Tabla 3.10 Características similares Hyundai i10/ Suzuki Alto 800	63
Tabla 3.11 Características del GV	65
Tabla 3.12 Características del Impactador	65
Tabla 3.13 Datos de las cartas de control	66
Tabla 3.14 Condiciones para la simulación de Dummy y FC	68

Tabla 3.15 Calibración de aPLI

68

Tabla 3.16 Parámetros para el vehículo

69

ÍNDICE DE FIGURA

FIGURA	PÁGINA
Figura 2.1 Partes de la estructura de la carrocería	22
Figura 2.2 Las dos secciones generales de la estructura	22
Figura 2.3 a) Distribuyen las cargas b) Colapso en forma de acordeón	23
Figura 2.4 Concentradores de esfuerzos y puntos de fusión en Atenuador De Impacto O “Crash-Box”	23
Figura 2.5 (a) Componentes simples de un parachoque anterior (b) Parachoque posterior por secciones	24
Figura 2.6 Campos de acción de la zona frontal	25
Figura 2.7 Prueba frontal de superposición: (a) pequeña del lado del conductor, (b) moderada, (c) pequeña del lado del pasajero	26
Figura 2.8 Prueba RCAR a baja velocidad	26
Figura 2.9 Prueba NCAP de peatones	27
Figura 2.10 Sistemas de seguridad pasiva	28
Figura 2.11 Simuladores de las partes más afectadas en un impacto	29
Figura 2.12 Simulador de pierna aPLI	31
Figura 2.13 Línea de referencia (a) parachoques superior (b) parachoques inferior (c) Esquina del parachoque (d) parachoques interno	33
Figura 2.14 HBM “Híbrido III percentil 50 masculino de pie”	34
Figura 2.15 Homologación de capo activo con análisis de elementos finitos (FEM)	35
Figura 2.16 Diseño de un parachoque	35
Figura 2.17 Un parachoque mallado y aplicación de condiciones de contorno al modelo	36

Figura 2.18 División de un compuesto	38
Figura 2.19 Matriz y refuerzo de un material compuesto	38
Figura 2.20 Tipos de refuerzos (a) Con partículas (b) Con fibras no orientadas (c) Con fibras continuos orientadas (d) Con placa o estructuras	40
Figura 3.1 Flujograma del proceso metodológico	42
Figura 3.2 Flujograma para el análisis FEM	43
Figura 3.3 Probeta para ensayo de tracción según ASTM D3039	43
Figura 3.4 Modelo CAD de prueba para ensayo de tracción	44
Figura 3.5 Mallado de probeta para ensayo a tracción	44
Figura 3.6 Transformación de elemento solido a shell	44
Figura 3.7 (a) Carta de material para M1 con matriz 60% - refuerzo 40% (b) Carta de material para M2 con matriz 75% - refuerzo 25%	49
Figura 3.8 Curva esfuerzo-deformación M1-C2 (b) Curva esfuerzo-deformación M2-C1	50
Figura 3.9 (a) Carta de definición de curva esfuerzo-deformación M1 con C2 (b) Carta de definición de curva esfuerzo-deformación M2 con C1	51
Figura 3.10 (a) Curva esfuerzo-deformación M1 con C2 en Ls Prepost (b) Curva esfuerzo-deformación M2 con C1 en Ls Prepost	52
Figura 3.11 Asignación de sección a la probeta para ensayo a tracción	53
Figura 3.12 (a) Ejemplo de iintegración de puntos de espesor y separación de la fibra.	53
Figura 3.13 Integración de puntos M1 con matriz 60% - refuerzo 40%	54
Figura 3.14 Integración de puntos M2 con matriz 75% - refuerzo 25%	54
Figura 3.15 Asignación de ID material y sección a la probeta	55
Figura 3.16 Asignación de set de nodos para M1 Y M2	55

Figura 3.17 Condición de contorno punto móvil para M1 Y M2	56
Figura 3.18 Condición de contorno velocidad del punto móvil para M1 Y M2	56
Figura 3.19 Carta de control *DATABASE_BINARY_D3PLOT para M1 Y M2	56
Figura 3.20 Carta de control *CONTROL_HOURLASS para M1 Y M2	56
Figura 3.21 Carta de control *CONTROL_TERMINATION para M1 Y M2	57
Figura 3.22 Carta de control *CONTROL_TIMESTEP para M1 Y M2	57
Figura 3.23 ID de elementos tomados para obtención de datos para M1	58
Figura 3.24 Número de nodos tomados para obtención de datos para M2	59
Figura 3.25 Vehículo Toyota Camry	59
Figura 3.26 Tiempo de simulación del vehículo Camry	60
Figura 3.27 Identificación PART ID del protector del parachoque	61
Figura 3.28 Creación del subsistema para extracción del protector del parachoque	61
Figura 3.29 Carta de control de la sección del protector del parachoque	61
Figura 3.30 Carta de control del material del protector del parachoque	62
Figura 3.31 Suzuki alto modelo FEM	63
Figura 3.32 Identificación del ID del protector del Suzuki Alto	64
Figura 3.33 Vehículo Genérico Family Car/Sedan	65
Figura 3.34 Respuesta del modelo de GV en LS-DYNA al impacto en la línea central del parachoques.	66
Figura 3.35 Acelerómetro de la tibia superior e inferior	67
Figura 3.36 Imagen de la superposición del esqueleto de referencia	67
Figura 3.37 (a) Ubicación del primer punto de contacto (b) ubicación de nodos	70

Figura 3.38 (a) Keyword Manager “Contacto” (b) CC Contacto automatico superficie a superficie	70
Figura 3.39 Velocidad del impactador	71
Figura 3.40 (a) Keyword Manager “Control” (b) CC Paso entre respuestas para el output (c) CC del tiempo de duracion dentro de la simulación (d) CC de control de la energía de Hourglass	71
Figura 3.41 (a) Keyword Manager “Base de Datos” (b) CC Fuerzas resultantes de la interfaz.	71
Figura 3.42 Grafica del desplazamiento del nodo (mm/ms)	72
Figura 3.43 Grafica de la fuerza axial en kN/ms	73
Figura 3.44 Impacto del HBM contra el GV	74
Figura 3.45 Traslación del GV en el entorno del HBM	74
Figura 3.46 Visualización del Maestro y Esclavo del CC de contacto	75
Figura 3.47 “Entity Creation” creación de velocidad	75
Figura 3.48 Grafica de la fuerza del fémur en kN	76
Figura 3.49 Gráfica del momento de la tibia superior en Nm	77
Figura 3.50 (a) Jacobiano (b) VS FE mallado	78
Figura 3.51 (a) HBM FE mallado (b) Jacobiano	78
Figura 3.52 (a) Restricción de grados de libertad de la plataforma (b) visualización de la restricción mediante la carta de control	79
Figura 3.53 Posicionamiento de percentil FE H50 con el esqueleto de referencia	80
Figura 3.54 Ensamble de los modelos FE	80
Figura 4.1 Progreso de simulación del M1	82

Figura 4.2 Curva output de esfuerzo vs deformación del M1	83
Figura 4.3 Progreso de simulación del M2	83
Figura 4.4 Curva output de esfuerzo vs deformación del M2	84
Figura 4.5 Transición del CPC con material del protector del parachoque M1	85
Figura 4.6 (a) Desplazamiento en X nodal central del primer contacto de M1 (mm/ ms) (b) Fuerza en X que se aplica en el parachoque M1 (kN/ ms) (c) Deflexión del parachoque M1 (kN/ mm)	86
Figura 4.7 Transición del Impacto CPC con material del protector del parachoque M2	87
Figura 4.8 (a) Desplazamiento en X nodal central del primer contacto de M2 (mm/ ms) (b) Fuerza en X que se aplica en el parachoque M2 (kN/ ms) (c) Deflexión del parachoque M2 (kN/ mm)	88
Figura 4.9 Transición del Impacto CPC con material del protector del parachoque M3	89
Figura 4.10 (a) Desplazamiento en X nodal central del primer contacto de M3 (mm/ ms) (b) Fuerza en X que se aplica en el parachoque M3 (kN/ ms) (c) Deflexión del parachoque M3 (kN/ mm)	90
Figura 4.11 Momento de rigidez de la tibia (Nm/ ms) de (a) M1 (b) M2 (c) M3	91
Figura 4.12 Curva input de esfuerzo vs deformación del M1	92
Figura 4.13 Curva input de esfuerzo vs deformación del M2	93
Figura 4.14 Comparación de la deflexión de los parachoques M1, M2 y M3	94
Figura 4.15 Comparación del momento de rigidez de las piernas impactadas con los parachoques M1, M2 y M3	95

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	PÁGINA
Anexo I. Vehículo	107
Anexo II. Flujograma de los parámetros de la simulación de impacto	109
Anexo III. Vehículos genéricos	110
Anexo IV. Modelo FEM del Maniquí	113
Anexo V. Certificación del HBM	115
Anexo VI. Parámetros outup para el vehículo	118
Anexo VII. Aplicación al procedimiento final	119
Anexo VIII. Cartas de Control de la probeta con M1	120
Anexo IX. Cartas de Control de la probeta con M2	122

RESUMEN

Más del 80% de los accidentes por Colisión entre Vehículos y Peatones (CPC) se producen al momento que cruzan la calle, el protector del parachoque de un vehículo es el primero en absorber el impacto durante una colisión frontal. En este contexto, en el presente estudio se realizó una evaluación de la cinemática de un parachoques delantero al impactar con la parte inferior de las piernas de un peatón. El parachoques analizado fue caracterizado con tres materiales: (i) resina epoxi con fibra de cabuya (M1), (ii) resina epoxi con fibra de caña de azúcar (M2), y (iii) termoplástico convencional (M3). La investigación se realizó en tres etapas. En la primera etapa, se validó el ensayo físico de tracción de los materiales M1, M2 mediante un software denominado LsPrePost de LsDyna de Análisis de Elementos Finitos (FEA), como resultado se obtuvo una similitud a los ensayos reales de más del 90% en M1 y M2. En la segunda etapa se obtuvo dos vehículos de Elementos Finitos (FE): (i) el modelo del Vehículo Toyota Camry FE que fue creado y probado por la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras (NHTSA) en impactos frontales, del cual se extrajeron las Cartas de Control (CC) del parachoque para aplicar a un vehículo FE con menos gasto computacional. (ii) Del modelo simplificado del Suzuki Alto 800 FE se caracterizó el parachoque delantero con las CC entre ellas el M3 extraídas del Vehículo Toyota Camry FE; con el fin de validar su rendimiento se sometió a pruebas de impacto de la regulación de los Usuarios Vulnerables en las Vías (VRU) de NCAP, en donde se ocupó los parámetros y resultados de las pruebas físicas para comparar con los resultados obtenidos en el FEA, en donde se impactó a un modelo de maniquí híbrido III percentil 50 masculino de pie FE, y se obtuvo resultados deseables de 317 Nm. En la tercera etapa se caracterizó el parachoque del modelo simplificado del Suzuki Alto 800 FE con los materiales M1 y M2, se realizó el mismo proceso que al material M3 para saber si cumplen con las regulaciones de NCAP para homologación. Finalmente, en la cuarta fase, se analizó la colisión CPC la deflexión de los tres parachoques y el momento de rigidez de la pierna impactada con los tres materiales. Como resultado de este estudio, se concluyó que los parachoques caracterizados con los materiales M1 y M2 tuvieron un menor rendimiento comparados al termoplástico M3 utilizado en casi la totalidad de vehículos actuales.

CAPÍTULO I

1. Introducción

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

- Evaluar el comportamiento de dos materiales compuestos a base de fibras naturales: cabuya y caña, en el protector del parachoque frontal de un vehículo bajo condiciones de impacto en la parte inferior de las piernas de un peatón según Euro NCAP; protocolo de prueba VRU 2022 con en el boletín técnico TB024 2021.

1.1.2. Objetivo específico

- Validar las probetas de tracción de Resina Epoxi con Fibra de Cabuya (M1) y Resina Epoxi con Fibra de Caña de Azúcar (M2) mediante un software de simulación computacional.
- Obtener el protector del parachoque frontal de un vehículo liviano para la caracterización de los materiales compuestos en un software CAE.
- Simular el impacto del protector del parachoque frontal de un vehículo liviano en la parte inferior de las piernas de un peatón según el Euro NCAP; protocolo de prueba VRU 2022 con el boletín técnico TB024 2021.
- Analizar resultados de los ensayos computacionales de impacto entre los materiales aplicados M1, M2 y M3 en el protector del parachoque frontal de un vehículo liviano.

1.2. Justificación

Los materiales de uso común en la fabricación del protector del parachoques son los termoplásticos, se busca implementar materiales compuestos como una alternativa ecológica para el medio ambiente. La nueva economía que plantea el estado ecuatoriano se basa en los principios del diseño para evitar los residuos y la contaminación, mantener los productos y materiales en uso, y regenerar los ecosistemas (Consejo Nacional De Planificación, 2017).

El Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025 en el Objetivo 12. Fomentar modelos de desarrollo sostenibles aplicando medidas de adaptación y mitigación al Cambio Climático dice: el cambio climático, la contaminación, la crisis energética y la utilización inconsciente de los recursos naturales son algunos de los problemas ambientales más relevantes que enfrenta el país. El planteamiento de medidas de prevención, reducción, preparación y atención de desastres de manera oportuna es parte del Estado. En esta investigación se busca

idealizar el apartado que se encuentra en la política 12.3 “Implementar mejores prácticas ambientales con responsabilidad social y económica, que fomenten la concientización, producción y consumo sostenible, desde la investigación, innovación y transferencia de tecnología”(Secretaría Nacional de Planificación, 2021). El proyecto se enfoca en el análisis y comportamiento de materiales compuestos a base de fibras naturales en el protector del parachoque frontal durante el impacto con la parte inferior de las piernas de un peatón.

1.3. Planteamiento del problema

La implementación de materiales compuestos en el campo automotriz se está realizando en piezas de menor tamaño como retrovisores que se adaptan al material compuesto de cabuya y resina poliéster, también en las autopartes como el guardabarros de vehículos livianos, que ha mostrado resultados favorecedores en: costo, peso y periodo de degradación, indicando mejores propiedades y beneficios en comparación con termoplásticos de uso convencional en la fabricación de autopartes (Pozo & Valencia, 2020). ¿Cómo afectará las propiedades del material compuesto de fibras de cabuya y caña en el comportamiento del protector del parachoque durante un impacto en la parte inferior de las piernas de un peatón?

1.4. Alcance

En el proyecto se valida las probetas de materiales compuesto de resina epoxi y fibras naturales de caña y cabuya, los datos se extraen de una investigación realizada por (Ponce, 2020), todo el análisis es mediante el ensayo a tracción en el software Ls-Dyna versión estudiantil. Luego se obtiene y ejecuta la simulación de impacto del protector del parachoque frontal de un vehículo liviano con los materiales: original y compuestos, en la parte inferior de las piernas de un peatón siguiendo los parámetros más relevantes de Euro NCAP; protocolo de prueba VRU 2022 con en el boletín técnico TB024 2021. Finalmente se realizará un análisis comparativo de los ensayos computacionales de impacto entre los materiales aplicados en el protector del parachoque frontal del vehículo, para verificar si los materiales aplicados son aptos para reemplazar a los termoplásticos utilizados actualmente.

1.5. Antecedentes

El protector del parachoque de un vehículo es el primero que absorber el impacto durante una colisión frontal o posterior, la absorción de energía es un parámetro crítico para determinar su eficiencia (Sreenivas et al., 2021). Más del 80% de accidentes de colisión entre automóvil y peatón (CPC), ocurren cuando los peatones cruzan la calle, esto ha sucedido debido al aumento de la población urbana y el número de vehículos privados (Federación Iberoamericana de Asociaciones de Víctimas Contra la Violencia Vial, 2019). Por lo general,

se observa un daño significativo durante los choques de velocidad media a alta, donde se aplican fuerzas de compresión axiales o laterales severas a la rodilla "lesión por parachoques (Bierry, 2020).

Aparte de la simulación física de impacto para evaluar el comportamiento de un material, existen las simulaciones mediante software. Hay software que puede estabilizar una simulación con elementos finitos, separar capaz en laminados compuestos bajo cargas transversales; se produce una zona de ablandamiento disminuyendo gradualmente la rigidez inicial y la resistencia de la interfaz (ANSYS, 2022).

Los gobiernos buscan reducir la mortalidad de los accidentes fortaleciendo las regulaciones de seguridad de peatones (Organización Mundial de la Salud, 2017). El Programa Europeo de Evaluación de Automóviles Nuevos (NCAP), da una evaluación realista y objetiva del desempeño de seguridad de algunos de los automóviles más populares vendidos y cuenta con protección de peatones; uno de los subtemas es el impacto en la parte inferior de las piernas, introducido en 1997 (Ratingen & Williams, 2020).

1.6. Situación actual

En el campo automotriz se busca la aplicación de ideas innovadoras y amigables con el medio ambiente. En la fabricación de autopartes de vehículos livianos, se está implementando materiales con distintas propiedades a los termoplásticos convencionales. El escenario de las investigaciones se enfoca en los materiales compuestos a base de fibras naturales mezcladas con epoxi, puede ser una iniciativa para un cambio en la manufactura nacional.

Ecuador trabaja desde el 2015 con LATIN NCAP donde implementó las normas: UN 94, UN 95, UN 13, UN 13, que se relacionan en la protección en un impacto frontal o lateral y la seguridad activa del vehículo (Latin NCAP, 2015). En el RTE INEN 034 se encuentra definida una normativa dentro de los requisitos de parachoques frontal y posterior (NTE INEN 2715, 2013) igual que NCAP trabaja bajo el Reglamento Técnico Global No. 9. "Seguridad de los peatones"; se fomente el diseño de frentes de automóvil más tolerantes con protectores de parachoques más blandos, y la eliminación de estructuras innecesariamente rígidas, reduzca la gravedad del impacto en el peatón (Ward, 2015).

CAPÍTULO II

2. Revisión Bibliográfica

2.2. Elementos de la carrocería

2.2.1. Estructura

La estructura es uno de los componentes más importantes, ya que da al vehículo la resistencia de toda la carrocería y es el lugar principal donde se combinan diferentes elementos como el motor, la suspensión, el interior, la seguridad y la tecnología (Castro, 2020).

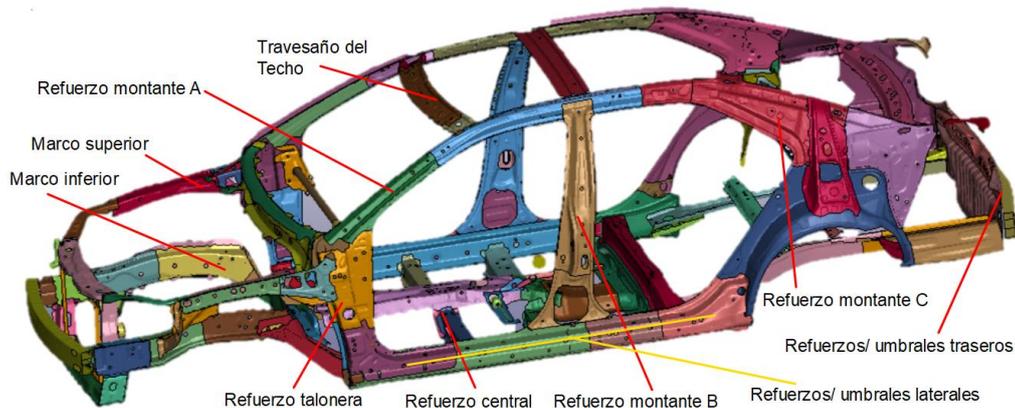


Figura 2.1 Partes de la estructura de la carrocería

(Auto Foam, 2018)

La **Figura 2.1** muestra las partes más importantes de la estructura bastidor: los largueros delanteros, refuerzo montante A, los largueros superiores, travesaño del techo, los travesaños delanteros, los puntales, los largueros traseros, los largueros inferiores y refuerzos o umbrales laterales entre otros.

Secciones generales

La **Figura 2.2** muestra las dos secciones generales de la estructura de una carrocería, jaula de seguridad y zonas de deformación/ compresión.

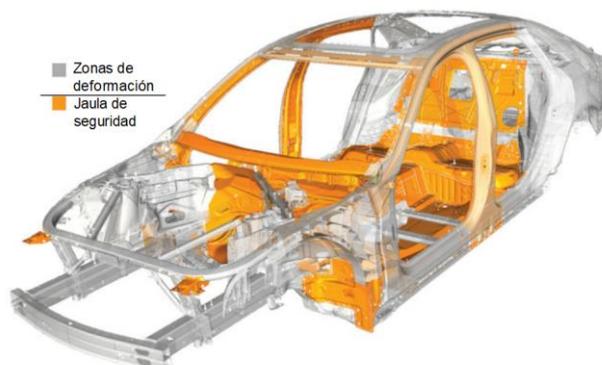


Figura 2.2 Las dos secciones generales de la estructura

(Automotive Engineering, 2016, p. 32)

Las zonas de compresión son componentes del vehículo diseñados para deformarse y colapsar durante una colisión. Esto absorbe parte de la energía del impacto y evita que se transfiera a los ocupantes. El diseño de esta zona toma en cuenta las cargas a las que se somete el vehículo en un accidente. (Ganesh, 2022)

La **Figura 2.3** (a) muestra la distribución de cargas impuestas por los impactos frontales y traseros de manera uniforme en toda la estructura. La combinación del miembro transversal frontal y los miembros diagonales, A y B, uno a cada lado, triangulan el extremo frontal del marco para obligarlo a colapsar en forma de acordeón.

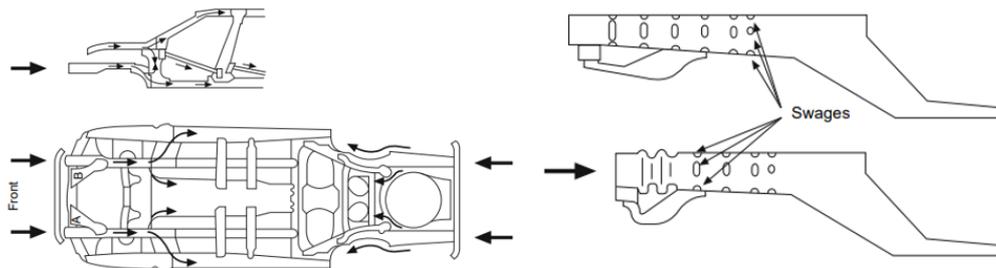


Figura 2.3 a) Distribuyen las cargas b) Colapso en forma de acordeón

(Blundell et al., 2004, p. 587 y 588)

En la **Figura 2.3** (b) se distribuyen las cargas longitudes de torsión en la parte superior, inferior, izquierda y derecha del chasis reduciendo gradualmente desde la parte delantera a la trasera, lo que hace que el chasis sea más resistente al colapso en caso de colisión frontal. (Blundell et al., 2004, p. 587 y 588)

Estructura de paragolpes

La estructura de paragolpes está adecuada en la sección delantera y trasera que es la división de la zona de compresión, con un diseño y características constructivas donde se integran variedad de materiales, y tipos de unión específicos que mitigan la energía antes que se prolongue hacia la carrocería.

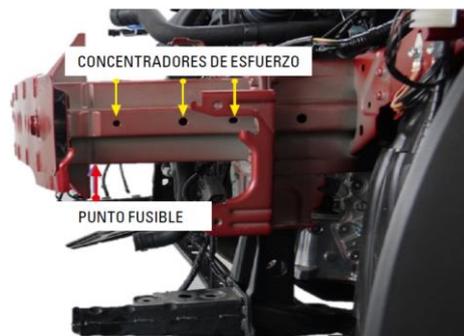


Figura 2.4 Concentradores de esfuerzos y puntos de fusión en Atenuador De Impacto O

“Crash-Box”

(Auto Crash, 2020)

La **Figura 2.4** muestra los puntos de fusión de las estructuras que permiten la deformación en la zona más cercana al impacto. Estos patrones suelen tener ranuras o depresiones que permiten una mayor absorción de energía. Las concentraciones de tensión, en cambio, son agujeros que disipan la energía y la redirigen a otras zonas adyacentes a la estructura (Auto Crash, 2020). El Crash-Box es la conexión entre la estructura de la carrocería y el parachoque delantero y trasero.

2.2.2. Parachoques

Según Salifu et al. (2020, p. 2) un sistema de parachoques típico consta principalmente de tres componentes: soporte para golpes, absorbedor de impacto y protector. El soporte para golpes o viga del parachoques es una estructura clave que ayuda a absorber la energía cinética de una colisión de alto impacto y proporciona resistencia a la flexión en una colisión de bajo impacto.

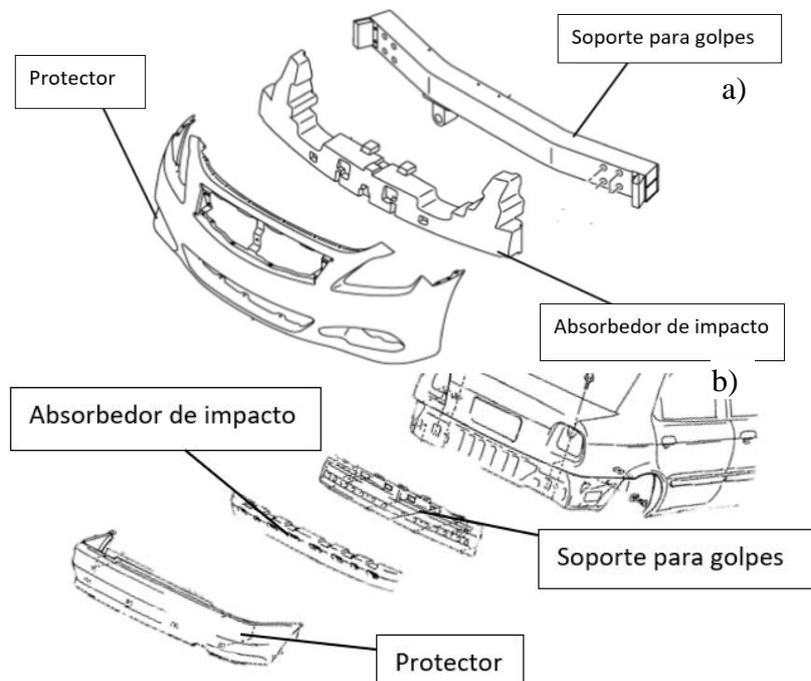


Figura 2.5 (a) Componentes simples de un parachoque frontal (b) Parachoque posterior por secciones

(Chevrolet, 2002, p. 356; Salifu et al., 2020, p. 2)

En la **Figura 2.5** (a) se muestra las partes del parachoque donde el protector generalmente se usa por estética y para disminuir la fuerza de arrastre aerodinámica; no puede tolerar la energía del impacto, por lo que se considera un componente no estructural, pero es un elemento importante para la protección para peatones. El absorbedor está diseñado para amortiguar una parte de la energía cinética de una colisión.

La **Figura 2.5** (b) muestra un sistema de parachoques trasero que generalmente tiene tres componentes: miembro del parachoques, absorbedor de energía y protector; los cuales tienen similitud con el parachoque anterior con la diferencia del miembro estructural del parachoque el cual está cumpliendo la función de la barra (Mundo Motor, 2018a)

2.2.3. Secciones de impactos frontales del parachoque

En la **Figura 2.6** se muestran los elementos actuales que componen la estructura de absorción de energía son tres: las puntas de chasis (que son el soporte estructural del motor, los elementos de suspensión y el conjunto delantero de carrocería, entre otros elementos), las cajas de colisión (o Crash box), el soporte paragolpes y el absorbedor de impacto.

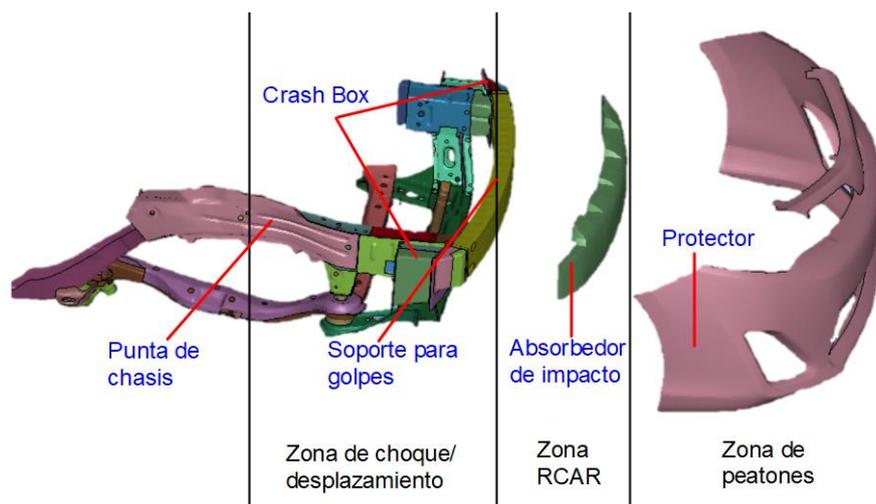


Figura 2.6 Campos de acción de la zona frontal

(Center for Collision Safety and Analysis, 2018)

Dependiendo de lo que la marca de autos quiera ofrecer, hay estructuras de absorción de energía de desempeño alto, mediano y bajo, lo que para el consumidor final puede significar que, en caso de accidente frontal o trasero, el vehículo ofrece una protección que se puede entender en la misma escala (alta, mediana o baja) (Auto Crash, 2017).

Zona Crash u Offset- Americanos

Las colisiones frontales causan más muertes y lesiones graves que cualquier otro tipo de accidente. Un escenario típico es una colisión frontal entre dos vehículos que se acercan a media velocidad. En este tipo de colisión, sólo se ve afectada una parte de la anchura del vehículo y los dos vehículos que colisionan están muy desplazados (Euro NCAP, 2015). En el Programa de Evaluación de Vehículos Nuevos (NCAP), los vehículos de pasajeros chocan a 56 km/h contra una barrera rígida que cubre todo el ancho del vehículo evaluando cinturones de seguridad y las bolsas de aire, pero hay menos aplastamiento de la estructura del vehículo. En una prueba de superposición del Instituto de Seguros para la Seguridad Vial

(IIHS) la estructura tiene que gestionar la energía del impacto y es más probable que se produzca una intrusión en el habitáculo, es más exigente con la estructura de un vehículo que una prueba de ancho completo (IIHS, 2020).

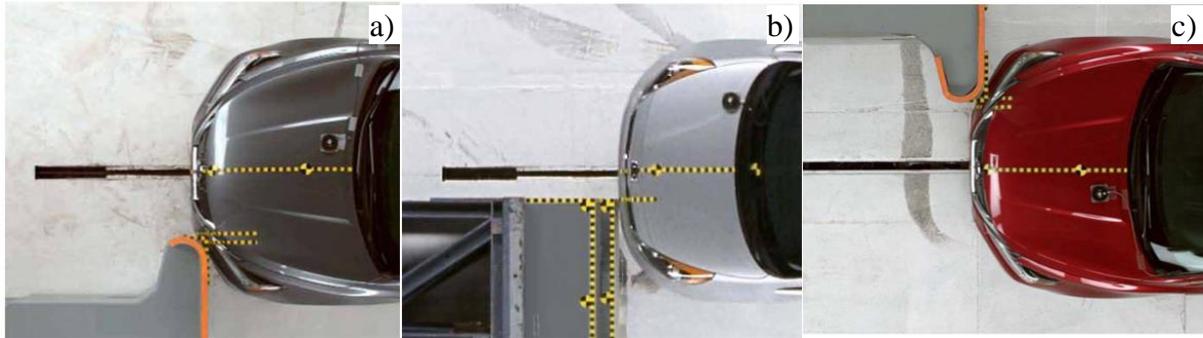


Figura 2.7 Prueba frontal de superposición: (a) pequeña del lado del conductor, (b) moderada, (c) pequeña del lado del pasajero
(IIHS, 2020)

La **Figura 2.7 (a)** muestra un vehículo que viaja a 64 km/h hacia una barrera rígida de 152 cm de altura, un maniquí Híbrido III percentil 50 (HIII-MP50) se coloca en el asiento del conductor y el 25 % del ancho total del vehículo golpea la barrera del lado del conductor. La **Figura 2.7 (b)** muestra un vehículo a 64 km/h contra una barrera con una cara deformable, a cara de la barrera mide 70 cm de altura, un HIII-MP50 se coloca en el asiento del conductor. El 40% del ancho total del vehículo golpea la barrera del lado del conductor. La **Figura 2.7 (c)** es similar a la "a", excepto que el vehículo se superpone a la barrera del lado derecho. Además, en lugar de un solo HIII-MP50, hay dos: uno en el asiento del conductor y otro en el asiento del pasajero (IIHS, 2020).

Zona RCAR (Medio impacto)- Alemanes

El Consejo de Investigación para Reparaciones de Automóviles (RCAR) tiene una prueba para evaluar la capacidad de daño y reparación de un vehículo a medianas velocidades. La evaluación incluye una estimación del daño del vehículo (daños físicos y costo de reparación) en dos impactos.



Figura 2.8 Prueba RCAR a baja velocidad
(RCAR, 2020, p. 4)

La **Figura 2.8** muestra un impacto frontal a 15 km/h contra una barrera rígida y una barrera móvil de cara rígida que golpea la parte frontal del vehículo parado a 15 km/h (RCAR, 2011, p. 3).

Zona de peatones (Euro NCAP)- Europeos

Las lesiones más comunes en las piernas, como consecuencia de las colisiones con el protector de parachoques son las fracturas de huesos, rodillas y ligamentos. Estas lesiones rara vez son mortales, pero a menudo dejan lesiones residuales. El potencial de lesiones en las piernas en choques de adultos se ha evaluado realizando pruebas de choque a 40 km/h con un impactador que se asemeja a la pierna de un adulto (Euro NCAP, 2014).

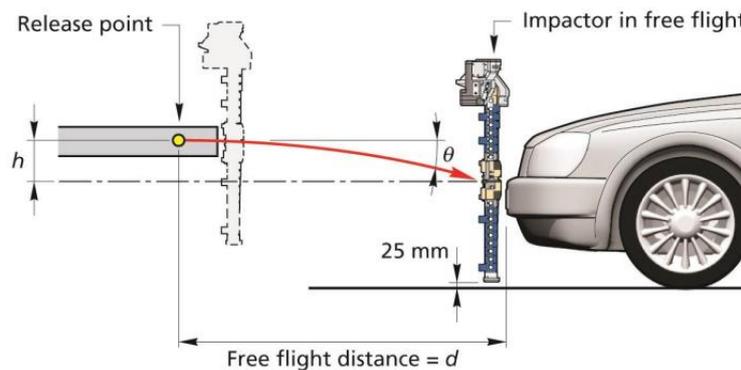


Figura 2.9 Prueba NCAP de peatones

(Euro NCAP, 2022b, p. 47)

Como se muestra en la **Figura 2.9** el impacto a bajas velocidades es controlado por el parachoque o zona de peatones. Se evalúa el lugar del impacto para calificar la protección ofrecida como buena, adecuada, marginal, débil o deficiente. Este procedimiento fomenta el uso de estructuras absorbentes de energía y una geometría más maleable que mitigue las lesiones en las piernas (Euro NCAP, 2014).

2.3. Seguridad Pasiva

La **Figura 2.10** muestra los dispositivos de seguridad pasiva (cinturones de seguridad, airbags y zonas de aplastamiento) que protegen a los ocupantes y a otros usuarios de la carretera en caso de accidente (ACEA, 2019, p. 6).

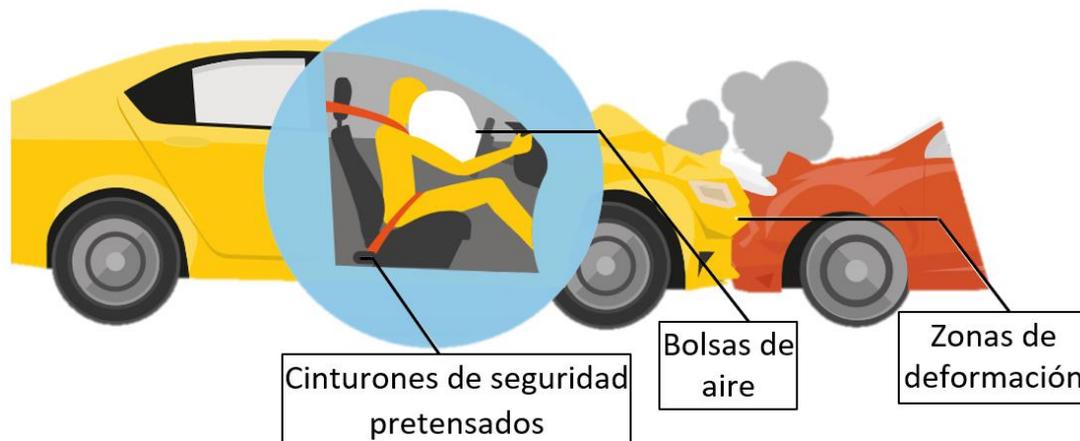


Figura 2.10 Sistemas de seguridad pasiva

(ACEA, 2019, p. 6)

Como se describe en el apartado 2.2.3, la zona de aplastamiento disipa la energía cinética del impacto de forma controlada y normada.

2.3.1. Normativa vehicular

En 1965 la inseguridad vehicular se daba a cualquier velocidad, la mala regulación llevo a tener en 1967 13,7 millones de accidentes automovilísticos en los Estados Unidos y que 53100 personas murieron en 44500 de los accidentes según el Departamento de Transporte (Rosenthal et al., 1972, pp. 11–15), haciendo que comience la investigación en 1970 y una década después NHTSA respaldara las regulaciones (Zuby, 2015, p. 3).

Protección contra colisiones frontales

La regulación 33 “Disposiciones uniformes relativas a la homologación de vehículos en relación con el comportamiento de la estructura del vehículo impactado en caso de colisión frontal” se establece en 1993, este reglamento se aplica al comportamiento de la estructura del habitáculo de los vehículos privados (de pasajeros) (que no sean vehículos con control de avance) cuando se someten a una colisión frontal y ya definiendo los parámetros de una producción definitivamente discontinuada (E/ECE/TRANS, 1993, p. 3).

Impacto Frontal

Con modificaciones de los parámetros a cumplir para poder ser homologados el R137 “Disposiciones uniformes relativas a la homologación de turismos en caso de colisión frontal con especial atención a la retención”, incluye instrucciones del uso de las bolsas de aire, obliga a cumplir con (E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.2); protección de los ocupantes en caso de colisiones frontales, la libertad de la autoridad homologante a revisar una vez cada dos años los métodos de control y sanciones en caso de no cumplir. También describiendo

quien puede homologar, los parámetros a seguir y frecuencia de verificaciones (E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.136/Rev.1, 1995, pp. 5–40).

Seguridad Peatonal (párrafo)

El porcentaje más alto de colisiones frontales a bajas velocidades se da en la urbe contra los peatones. La ONU en 1995 incluye el reglamento 127 “Disposiciones uniformes relativas a la homologación de vehículos de motor con respecto a su comportamiento en materia de seguridad para peatones” (E/ECE/324/Rev.2/Add.126-E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.126, 2013)

En 1997 Euro NCAP añade la evaluación de protección de peatones a sus investigaciones y en el 2008 nace el Reglamento Técnico Mundial 9 “Seguridad Peatonal”. Con el objetivo de contribuir significativamente reducir los niveles de lesiones sufridas por peatones involucrados en impactos frontales con vehículos motorizados (ECE/TRANS/180/Add.9, 2009, p. 5).

2.3.2. Peatón

Un peatón es una persona que camina, corre, se sienta o se traslada sobre un objeto en su trayecto (World Health Organization et al., 2013, p. 20). La evaluación de la protección para los usuarios vulnerables en la vía es una combinación de pruebas de impacto y pruebas de los Sistemas que Buscan y Reaccionan Específicamente a los Peatones (AEB/LSS).

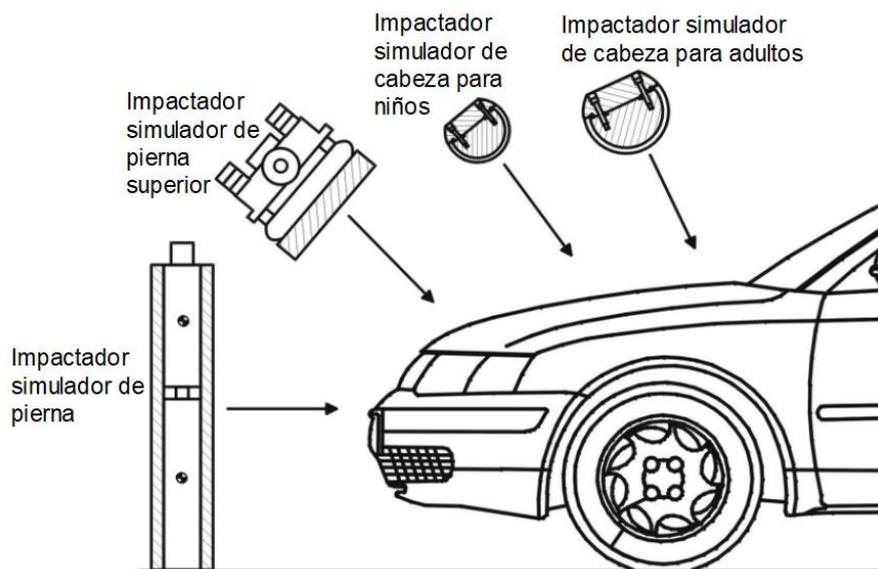


Figura 2.11 Simuladores de las partes más afectadas en un impacto

(Kalliske & Friesen, 2000, p. 3)

La **Figura 2.11** muestra las pruebas de impacto realizadas en la parte frontal de un vehículo, que según (Euro NCAP, 2022a, p. 5) los ensayos de impacto se realizan con simuladores de cabeza, pierna superior y un impactador que simula la parte la pierna completa.

2.2.1 Impactador simulador de cabeza adultos/ niños

Según los datos de la IHRA, la principal causa de las lesiones en la cabeza de los peatones, tanto niños como adultos, es la superficie superior del capó del vehículo que ha colisionado. Las normativas exigen que los capós/alas funcionen a un nivel que reduzca la probabilidad de un impacto en la cabeza. Para la homologación el capó/ala colisionará con el maniquí de la cabeza a 35 km/h. El capó/alas se dividirá en una "zona de ensayo del simulador de cabeza de niño" y una "zona de ensayo del simulador de cabeza de adulto" (ECE/TRANS/180/Add.9, 2009, p. 17).

2.2.2 Impactador simulador de pierna superior

Los estudios de accidentes realizados en varias regiones en los que se comparan los frontales de los vehículos "mejorados" matriculados desde 1990 con los vehículos más antiguos de los años ochenta y setenta han demostrado una reducción del número de lesiones en las extremidades superiores y la pelvis, causadas por los frontales del capó.

Los estudios de accidentes han sido realizados por el laboratorio de los Estados Unidos utilizando datos franceses (INF GR/PS/30) y por la Universidad de Dresde utilizando datos alemanes de GIDAS (INF GR/PS/92) para colisiones de peatones hasta 40 km/h (INF GR/PS/187 Rev.1). Sin embargo, sigue existiendo una gran incertidumbre entre las simulaciones y la realidad (ECE/TRANS/180/Add.9, 2009, p. 17).

2.2.3 Impactador simulador de pierna inferior

El primer impactador simulador de pierna que se utilizó para las pruebas en Europa fue diseñado por el Laboratorio de Investigación del Transporte (TRL) del Reino Unido. Sin embargo, tenía ciertas limitaciones con respecto a la biofidelidad y la repetibilidad de los resultados de la prueba. Por lo tanto, Japón propuso utilizar un simulador de pierna completamente nuevo, el denominado Impactador de Simulador de Pierna de Peatón Flexible (FlexPLI).

Como algunos consideran que la prótesis de pierna FlexPLI tiene una alta biofidelidad y una excelente capacidad para evaluar posibles lesiones en las piernas, se consideró que FlexPLI reemplace al impactador de la parte inferior de la pierna TRL (ECE/TRANS/180/Add.9/Amend.2, 2019, p. 11). Sin embargo, para el protocolo actual de NCAP 2023 se propone ocupar el Impactador Avanzado de Pierna de Peatón (aPLI).



Figura 2.12 Simulador de pierna aPLI

(Humanetics, 2022)

La **Figura 2.12** muestra el aPLI el cual es un dispositivo de última generación para pruebas de impacto de peatones que reproduce la flexibilidad ósea de la pierna humana (50% pierna masculina) y se utiliza para evaluar lesiones de rodilla, extremidad superior y extremidad inferior (Humanetics, 2022).

2.3.3. Método de evaluación

La evaluación de la protección VRU es una combinación de pruebas de impacto y los sistemas que buscan y reaccionan específicamente a los usuarios vulnerables de la carretera (AEB/LSS). Para los ensayos de impacto, consistentes en un simulador de pierna superior e impactos aPLI, se marcarán líneas de referencia en la superficie exterior del vehículo para todas las zonas de impacto. (Euro NCAP, 2022a, p. 5)

Los resultados que se deben obtener y como mostrarlos también se especifican. El rendimiento esperado se ajusta como referencia para identificar discrepancias entre los resultados esperados y los resultados de la prueba.

2.3.4. Requisitos

2.4.1 Requisitos genéricos

Para que un vehículo pueda ser homologado con los simuladores mencionados en la sección 2.4.3 deberá cumplir primero con requisitos genéricos que se muestran en la **Tabla 2.1** Requisitos para poder aplicar el protocolo (R127/GTR 9).

Tabla 2.1 Requisitos para poder aplicar el protocolo (R127/GTR 9)

Categoría de vehículo	M1(-SUV)
Parte de la prueba	parte frontal
Masa bruta vehicular (kg)	500-4500
Altura máxima del parachoque (mm)	425

Fuente:(ECE/TRANS/180/Add.9/Amend.2, 2019, p. 35)

El fabricante podrá designar anchos de prueba del parachoque máximo de 264 mm si el valor absoluto del momento flector en la tibia no supere los 380 Nm (ECE/TRANS/180/Add.9/Amend.2, 2019).

2.4.2 NCAP

Además de la eficacia de la protección de los ocupantes, Euro NCAP también evalúa la eficacia de la protección de los usuarios vulnerables de la carretera (VRU) peatones y ciclistas con los que un vehículo puede colisionar. Las pruebas evalúan el riesgo potencial de lesiones en la cabeza, la pelvis y las extremidades superiores e inferiores de los peatones. Los vehículos equipados con un sistema de frenado de emergencia autónomo (AEB) que detecta a los peatones y a los ciclistas también pueden obtener una buena puntuación (Euro NCAP, 2020).

2.4.3 GRT9

El objetivo del GRT N.-9 es mejorar la construcción de los elementos del parachoque delantero de los vehículos porque se han identificado como causantes de lesiones en caso de colisión con un peatón u otro usuario vulnerable. Los vehículos que se hará el ensayo son representativos de la mayoría de los vehículos que circulan en el entorno urbano, donde existe un mayor potencial de colisión con los peatones incluyendo desde vehículos livianos hasta camiones ligeros (ECE/TRANS/180/Add.9/Amend.2, 2019).

2.4. NCAP VS GRT9

2.4.1. Criterios y valores límite

Los criterios de evaluación de rendimiento superior utilizados para las pruebas de impacto de peatones según los dos reglamentos actuales se resumen a continuación en la **Tabla 2.2**.

Tabla 2.2 Valores límites (Euro NCAP/ GTR 9)

aPLI	Euro NCAP	GTR 9
Momento de flexión del fémur (Nm)	390	510
Momento de flexión tibial (Nm)	275	272
Alargamiento MCL (mm)	27	24

Fuente: (ECE/TRANS/180/Add.9/Amend.2, 2019, p. 35; Euro NCAP, 2022a, p. 7)

Cuando existan varios criterios para una prueba individual, se utiliza el parámetro de puntuación más bajo para determinar el rendimiento de esa prueba, a menos que se indique lo contrario.

2.4.2. Puntos de impacto para análisis

Para un vehículo sin una estructura de parachoques identificable las líneas de referencia del protector del parachoques son; línea de referencia superior del parachoques, línea de referencia del parachoques inferior, esquina del parachoque, línea de referencia del parachoques interno (Euro NCAP, 2022b); se encuentra siguiendo el proceso a continuación.

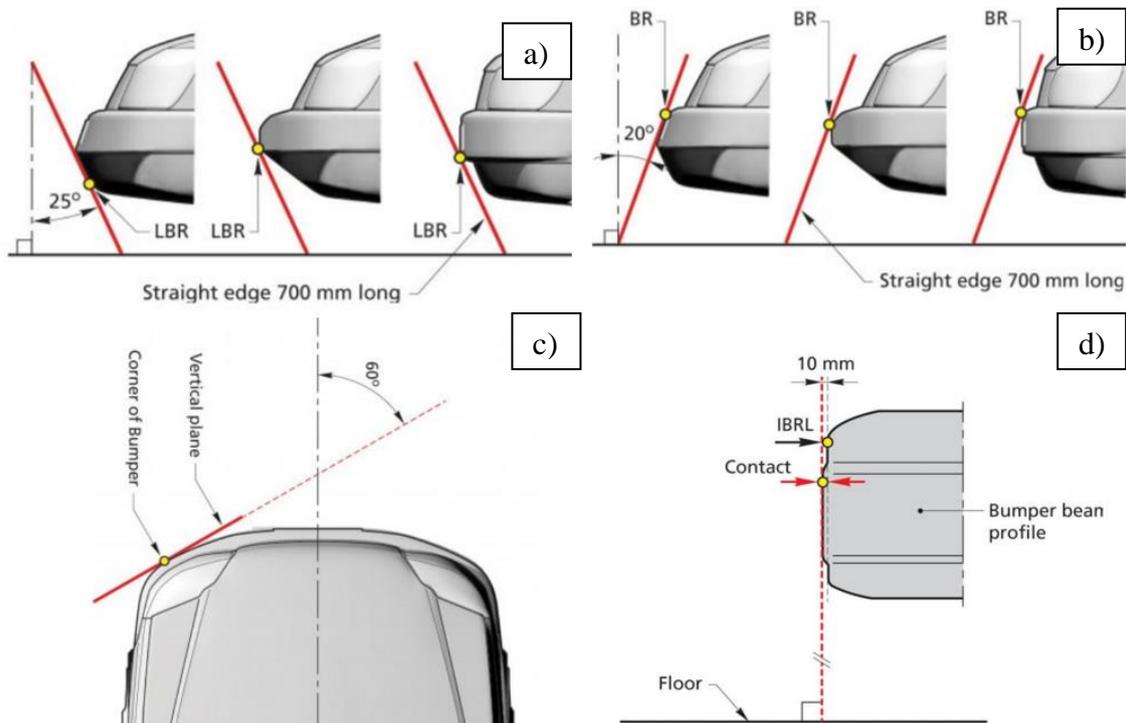


Figura 2.13 Línea de referencia (a) parachoques superior (b) parachoques inferior (c) Esquina del parachoque (d) parachoques interno

(Euro NCAP, 2022b, pp. 26–28)

La línea de referencia inferior del parachoques de la **Figura 2.13 (a)**: es el límite inferior de contacto entre el peatón y el parachoques, definido como la trayectoria del punto de contacto más bajo entre la regla y el parachoques cuando se cruza una regla de 700 mm, mantenida en paralelo a la sección longitudinal vertical del vehículo e inclinada 25° hacia delante con respecto a la vertical, de modo que la parte delantera del vehículo esté en contacto con el suelo y la superficie del parachoques (Euro NCAP, 2022b, p. 27).

La **Figura 2.13 (b)** define como la trayectoria geométrica del punto de contacto superior entre la regla y la sección del parachoques cuando se coloca una regla de 700 mm de longitud paralela a la sección longitudinal vertical del vehículo e inclinada hacia atrás. Pasa por delante del vehículo en un ángulo de 20° con respecto a la vertical, manteniendo el contacto entre el suelo y la superficie del parachoques (Euro NCAP, 2022b, p. 26).

La **Figura 2.13 (c)** es el punto de contacto con la superficie exterior del parachoques en un plano vertical que forma un ángulo de 60° con respecto a la sección longitudinal vertical del vehículo (Euro NCAP, 2022b, p. 27).

En la **Figura 2.13 (d)** para encontrar la línea de referencia del parachoques interno (IBRL) se mide la altura de la defensa desde un plano vertical que haga contacto con la viga hasta 10 mm en el perfil para obtener la altura de la línea de referencia interna de la defensa a intervalos de 100 mm fuera de la línea central del vehículo (Euro NCAP, 2022b, p. 28).

2.4.3. El modelo del cuerpo humano

El modelo del cuerpo humano (HBM) se entiende como una representación virtual del cuerpo humano en términos de geometría y mecánica. La geometría del modelo requiere que se calculen las dimensiones, la masa y el momento de inercia de cada parte del cuerpo según las bases de datos antropométricas estándar.



Figura 2.14 HBM “Híbrido III percentil 50 masculino de pie”

(ANSYS, 2022)

Además, debe tener en cuenta la compleja estructura del cuerpo humano y consistir en un esqueleto completo, que incluya todos los huesos (excepto las piernas, los brazos, la cara y las orejas, donde se permite la simplificación) y los tejidos blandos, como se muestra en la **Figura 2.14**. Todos los huesos deben articularse de forma realista y todas las articulaciones deben tener una amplitud de movimiento biológica (Euro NCAP, 2022a, p. 3).

HBM en la homologación

Euro NCAP ha adoptado un enfoque híbrido para la evaluación, que cubre simulaciones virtuales con modelos peatonales y pruebas físicas (se utilizan los impactadores convencionales, y las aceleraciones lineales medidas se aplican para derivar los valores del

La **Figura 2.16** ilustra el proceso de CAD, que comienza con la creación de dibujos y bocetos, seguida del uso de herramientas 3D en el mismo software para producir un modelo que pueda ser extraído y analizado para su posterior procesamiento.

2.5.2. CAE

La ingeniería asistida por ordenador (CAE) consiste en la modelización de los efectos de las variables sobre los elementos de diseño en condiciones aparentemente realistas para conseguir la forma geométrica óptima en condiciones específicas. El análisis no destructivo permite el modelado 3D interactivo en tiempo real.

También se utiliza para comprobar la viabilidad de diferentes alternativas de diseño: si se utiliza correctamente el CAE, se pueden conseguir soluciones fiables y eficientes en poco tiempo, pero la información inicial obtenida es sólo la base para la experiencia y el desarrollo futuro, es decir, las discusiones de viabilidad a través de ciclos de pruebas (Rojas Lazo & Rojas Rojas, 2006, p. 5).

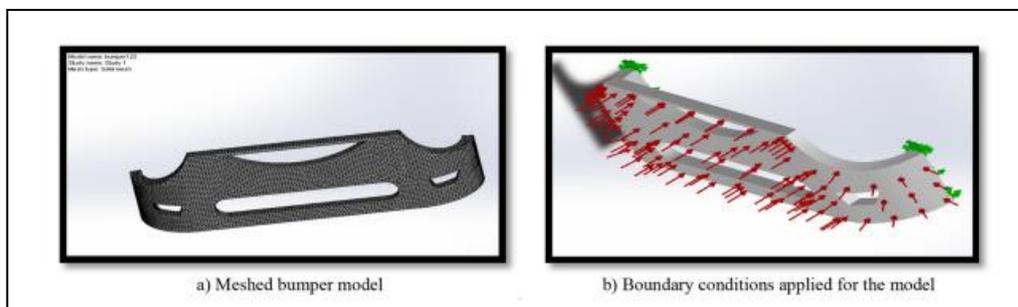


Figura 2.17 Un parachoque mallado y aplicación de condiciones de contorno al modelo
(Basith et al., 2021, p. 2)

La **Figura 2.17** muestra un proceso CAE continuo en el que el modelo se somete al análisis FEM, se colocan mallas y cargas en los puntos críticos del modelo. Tras este análisis, se pueden obtener resultados favorables y desfavorables y, si es necesario, se puede devolver el modelo CAD, realizar cambios y volver a aplicar el FEM para obtener un modelo completo.

2.6. Resistencia Estructural del parachoque

2.6.1. Propiedades de materiales

Los principales fabricantes de automóviles producen diferentes tipos de parachoques en función del aumento de la aerodinámica o la reducción de la resistencia del aire. Para ello se utilizan diferentes materiales dependiendo de la gama y la marca.

El acero es el material más utilizado para la barra del parachoques debido a su gran solidez y resistencia a los impactos, pero no sólo es fuerte sino también pesado. El aluminio es otro material utilizado actualmente, es ligero y pesa menos que el acero, por lo que se utiliza para

varias partes de la carrocería, algunos materiales son más económicos en cuanto a consumo de combustible debido a sus propiedades de ligereza (Mundo Motor, 2018b).

Las esponjas absorbentes de energía, por su parte, están fabricadas con polipropileno espumado (EPP) el cual es ligero, de alto rendimiento, que absorbe energía, es reciclable y duradero, y que, por sus propiedades, se utiliza en los reposacabezas, rellenos en reposabrazos, parachoques, paneles de puertas, en revestimientos del techo y paneles laterales, en los vehículos eléctricos como aislante de las baterías, etc.

Por último, los protectores de parachoques, que en vehículos de gama media y alta como alternativa es la fibra de vidrio que es tan ligera como el plástico, en cambio la fibra de carbono es resistente a los impactos, ligera y duradera como los materiales anteriores; suelen ser más caros, por lo que este tipo de parachoques se encuentra con más frecuencia en los coches de alta gama. Actualmente el material más usado para la fabricación son los termoplásticos teniendo un bajo costo y fáciles de producir, sin embargo, son propensos a agrietarse y no suelen ofrecer una protección fiable contra los impactos (Abán, 2020).

2.6.2. Termoplásticos convencionales

Los principales materiales termoplásticos utilizados para la construcción de refuerzo y protector de parachoques son: el policarbonato (PC), el tereftalato de poli butileno (PBT) y el elastómero termoplástico de poliolefina (TPO).

El PC tiene un peso ligero, alta resistencia, alta resistencia al impacto y excelente estabilidad dimensional. El PBT tiene una estructura molecular simétrica, una alta cristalinidad, punto de fusión y resistencia química. El TPO tiene buenas propiedades termoplásticas, poca resistencia a la deformación por compresión y resistencia al desgaste (Qiu & Li, 2021).

Por otro lado, los termoplásticos han ganado mucho estatus en las últimas décadas y juega un papel muy importante en los vehículos actuales (hasta el 50% de los vehículos están hechos de plástico), especialmente en tapicerías e interiores de vehículos. Los fabricantes también han agregado este material a algunas partes externas de la carrocería, como parachoques delantero y trasero, accesorios personalizados, carcasas y carcasas de espejos, así como molduras y algunos adornos.

Actualmente los materiales termoplásticos tienen demanda y por ende causan sobre capacidad en vertederos, para contrarrestar esta problemática se busca implementar materiales alternativos que se deterioren de una forma más eficiente.

2.6.3. Materiales compuestos

Los materiales compuestos se definen como materiales multifásicos formados por dos o más componentes que poseen propiedades especiales. El refuerzo y la matriz son dos componentes principales de cualquier material.

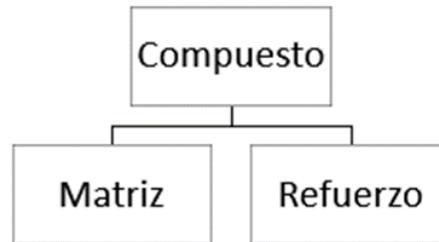


Figura 2.18 División de un compuesto
(Kerni et al., 2020)

En la **Figura 2.18** se analiza la constitución del compuesto. El refuerzo es el componente principal del material compuesto y es la parte que soporta la mayor parte de la carga aplicada sobre el material, debe ser duro y de alta resistencia. Por otro lado, la matriz rodea, protege y soporta al refuerzo (Kerni et al., 2020).

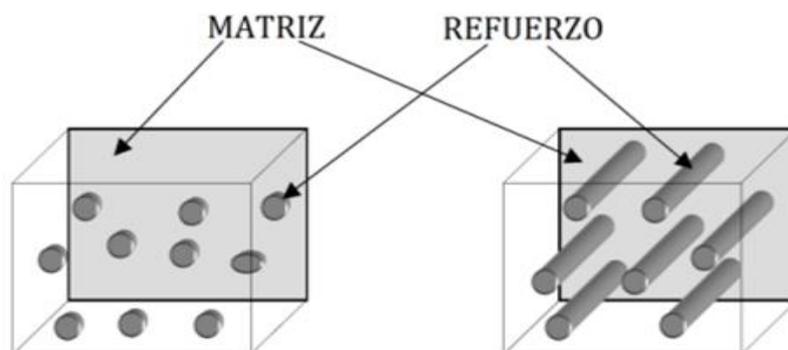


Figura 2.19 Matriz y refuerzo de un material compuesto
(Ponce, 2020)

Algunos de los factores que influyen en las propiedades de los materiales compuestos son: el tipo de refuerzo y las matrices, la disposición y dispersión del refuerzo, el volumen del refuerzo y también el método de producción de los compuestos; esto hace que el material sea anisotrópico y por ende las propiedades del material no van a hacer las mismas en todo el compuesto, y de esto dependen la variación de resultados en los ensayos mecánicos como: tracción, flexión e impacto (Imbaquingo, 2018). En la **Figura 2.19** se muestra una ilustración del material compuesto dependiente de cualquier configuración.

2.6.4. Matriz

Matrices termoestables

Las matrices termoestables son lo contrario de las matrices termoplásticas, en el momento que son sometidas a temperaturas elevadas se degrada y al volver a someterlas a un proceso de enfriamiento el cambio de su estructura o enlaces se ve afectada, así que una vez hecho el cambio de estado los materiales termoestables no pueden ser moldeados y por ende no se puede realizar procesos de reciclaje (Ponce, 2020).

Resina epoxi

La resina epoxi pertenece a la familia de los polímeros termoestable, debido a sus buenas características mecánicas, generalmente cumple con la función de transferir las tensiones mecánicas a las fibras y proteger la estructura del ambiente externo. El epoxi tiene cierta deformabilidad y una buena compatibilidad con las fibras (Abdellaoui et al., 2018). A continuación, se presenta en la **Tabla 2.3** algunas características importantes de la resina epoxi como ventajas y desventajas.

Tabla 2.3 Ventajas y desventajas de la resina epoxi como matriz

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Tienen buenas propiedades mecánicas (resistencia a la tracción, flexión, compresión, resiliencia, etc.) que son superiores a las de resinas de gran difusión como el poliéster.	Lijado muy dañino.
	Requiere un largo tiempo de polimerización
Tienen buena resistencia a altas temperaturas, llegando hasta 150-190 °C continuamente.	Susceptible de agrietarse
Tienen buenas propiedades físicas, especialmente en ambiente húmedo, así como una excelente resistencia química	Precio más alto
Muy buena adherencia sobre una amplia variedad de materiales.	Condiciones muy estrictas de usar.
Baja contracción (alrededor del 1 % frente al 6 % del poliéster)	Producto agresivo para piel.

Fuente: (Abdellaoui et al., 2018)

En la **Tabla 2.4** muestra ventajas favorables de la resina epoxi sin ningún tipo de refuerzo resulta ser favorable para la aplicación dentro del área automotriz en la creación de autopartes no estructurales.

Tabla 2.4 Características mecánicas de resina epoxi como matriz

Densidad	1200 - 1300 (kg/m ³)
Esfuerzo de fluencia	125 (MPa)
Módulo de elasticidad a tensión	2,8 - 4,2 (GPa)
Esfuerzo de tensión	55 - 130 (MPa)
Resistencia al impacto	5,3 - 53 (J/m)
Coefficiente de Poisson	0,2 - 0,33
Máxima temperatura que resiste	150 (°C)
Contracción de curado	1 - 5 (%)

Fuente: (Naranjo, 2021)

En la **Tabla 2.4** la resina epoxi muestra una buena resistencia a la tracción y a la temperatura, con un módulo de elasticidad considerable; hace que este material sea compatible con diferentes materiales como refuerzos y por ende favorable para diferentes aplicaciones en la industria.

2.6.5. Refuerzo

El refuerzo en el material compuesto contribuye con una mejora de sus propiedades como: estabilidad térmica, eléctrica y estructural. Su función principal es soportar las cargas que afectan la integridad del material compuesto y las estructura en sí.

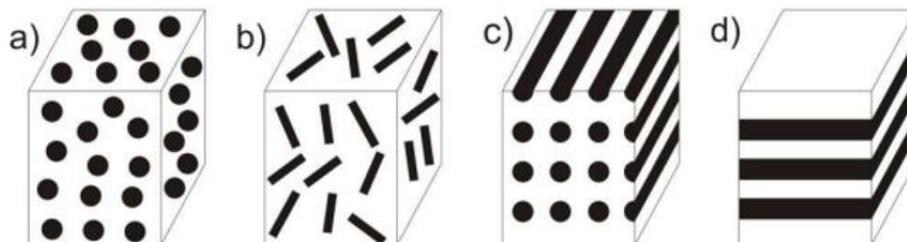


Figura 2.20 Tipos de refuerzos (a) Con partículas (b) Con fibras no orientadas (c) Con fibras continuas orientadas (d) Con placa o estructuras

(Pastuszak & Muc, 2013)

La **Figura 2.20** muestra tres diferentes refuerzos que suelen ser por lo general: estructuras, partículas o fibras largas o cortas. Para que el refuerzo realice su función requiere una fuerte adhesión y fuerzas interfaciales (tanto químicas como físicas) entre la matriz y los refuerzos; además, esta fuerte interacción debe mantenerse durante todos los tipos de carga (Miskolczi, 2013).

Fibras naturales

Las fibras vegetales son filamentos lignocelulósicos compuestos de células largas y delgadas de esclerénquima, que se encuentran formando parte de las plantas y que cumplen funciones específicas dentro de ellas, como las de dar soporte, dureza y rigidez a los tejidos vegetales (Naranjo, 2021, p. 11). Algunas fibras comunes en Ecuador son la cabuya y la caña de azúcar, las cuales se puede encontrar en la región andina o litoral; su uso varía dependiendo de las necesidades y distintas aplicaciones que se le pueda dar.

Las fibras de cabuya o conocida como fique se extraen de la planta de penca, también conocida como *Furcraea Andina*, es una planta nativa que se encuentra comúnmente en regiones cercanas a la cadena montañosa de los Andes, y debido a la adaptabilidad de este cultivo, se extendió fácilmente a otras regiones de América del Sur, usada para fabricar típicamente telas, cuerdas y otras artesanías utilizadas principalmente en la agricultura (Guerrero, 2019).

Según Rúa et al. (2021) esta fibra se emplea en compuestos para la industria automotriz con ecodiseño y materiales sostenibles. Aplicaciones que usan conceptos de economía circular: estrategias de peso ligero directamente relacionadas con la economía de combustible que conduce a la reducción de la contaminación.

La caña de azúcar tiene su origen en Asia y la India, también en distintas partes de Europa y África. Como materia prima fue aprovechada para la producción de energía, el azúcar, se ha realizado de manera ininterrumpida y cubriendo grandes espacios a lo largo y ancho del nuevo continente (Ponce, 2020).

Según Gilfillan et al. (2012) la caña de azúcar es un tipo de material lignocelulósico que después de su industrialización se obtiene el bagazo, es el residuo lignocelulósico sólido que queda después de la extracción del jugo del tallo de la caña de azúcar y es barato en comparación con las fibras sintéticas.

CAPÍTULO III

3. Métodos y Materiales

Para el desarrollo y la consecución de los objetivos se utilizó métodos como: la investigación transversal, bibliográfica, exploratoria, experimental, cuantitativa y descriptiva siguiendo los siguientes pasos; (a) un estudio transversal para desarrollar este proyecto, analizando los datos del material compuesto M1 y M2 en el parachoque al momento de impactarlo contra el HBM para poder correlacionarlos dentro de un periodo de tiempo determinado; (b) una búsqueda bibliográfica para recabar información de diversos autores y fuentes, como artículos académicos, revistas, disertaciones y libros. Esto se hizo con el fin de establecer valores sobre las CC de los M1 y M2, las propiedades de los parachoques, las normas de las pruebas y la seguridad de los peatones; (c) un estudio de las propiedades, los datos de las pruebas de fractura, las propiedades fisicoquímicas, la composición de la matriz y el refuerzo, y la relación de volumen en la producción de M1 y M2; (d) es un estudio piloto que permitió realizar ensayos de impacto FEM para obtener valores de referencia para el HBM y parachoques de materiales compuestos. Así, se determinaron los puntos de daño mayor o menor del maniquí y la deformación máxima del parachoques en función del material asignado; (e) un estudio cuantitativo para determinar los valores obtenidos para las diferentes condiciones de simulación realizadas en el software según los criterios aplicados y para evaluar los resultados; y (f) un estudio descriptivo para analizar los resultados obtenidos durante el proyecto y extraer conclusiones.

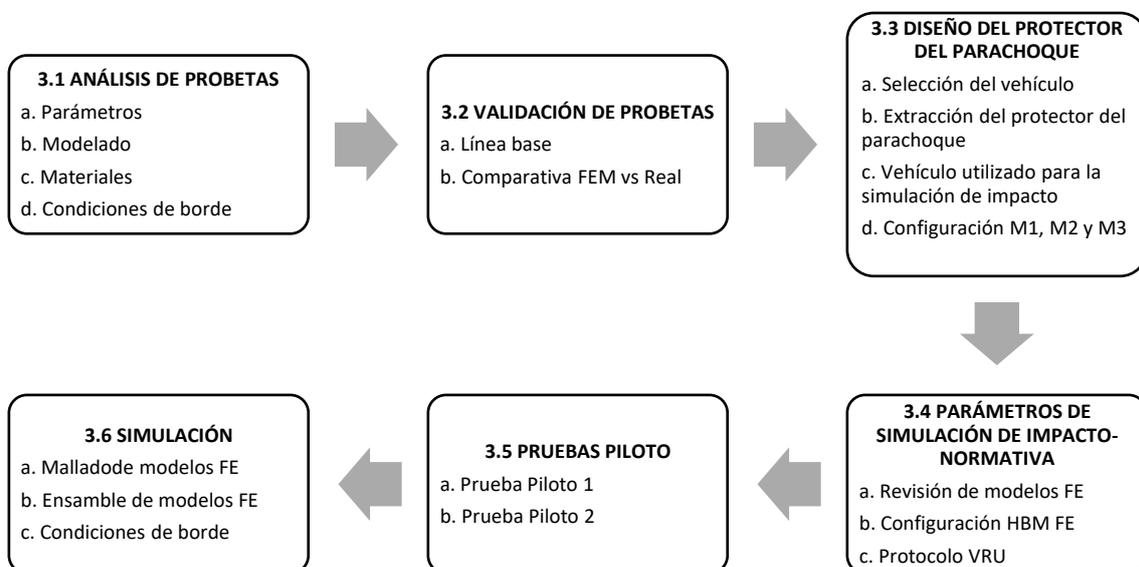


Figura 3.1 Flujograma del proceso metodológico

Para el cumplimiento de los objetivos de este proyecto se presenta un flujograma en la **Figura 3.1**, que detalla los puntos más relevantes del proceso metodológico que se siguió para obtener los resultados deseados, los mismos que serán analizados en el capítulo IV.

3.1. Análisis de Probetas

En esta parte se describe la metodología empleada para recoger y procesar los datos correspondientes a las preguntas de investigación del proyecto.

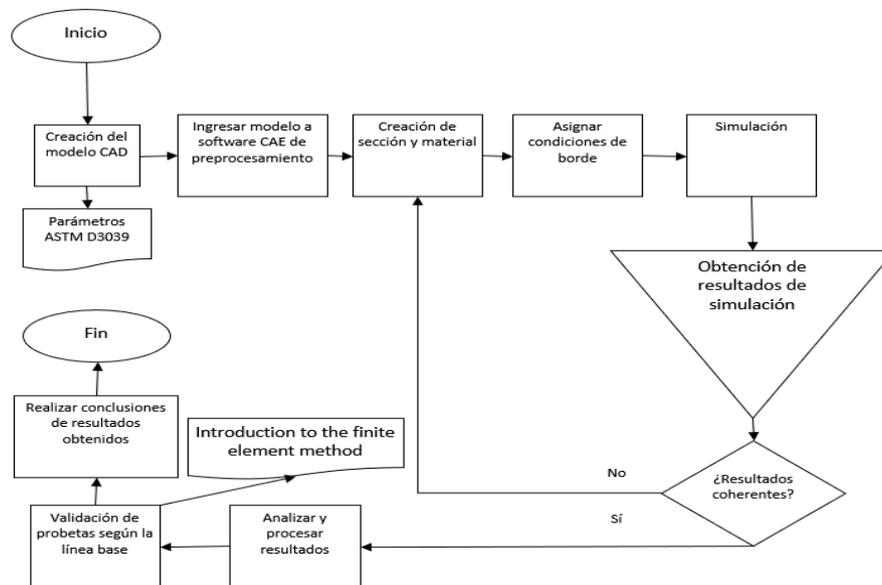


Figura 3.2 Flujograma para el análisis FEM

La **Figura 3.2** muestra la metodología propuesta de principio a fin de que consta de nueve pasos aplicados a cada simulación y una sección de decisión para repetir el análisis en caso de errores en el modelo FEM o el código de simulación.

3.1.1. Parámetros

El ensayo de tracción de un material consiste en aplicar una fuerza uniaxial a lo largo de su eje principal a una placa llamada probeta, que debe colocarse con medidas estándar, aumentando gradualmente la fuerza hasta que la probeta se rompe, con lo que se pretende determinar la elasticidad, resistencia a la fractura y plasticidad del material.

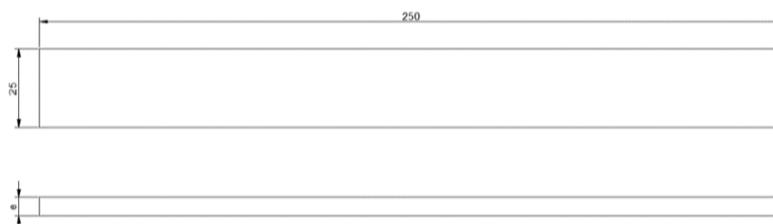


Figura 3.3 Probeta para ensayo de tracción según ASTM D3039

(D 3039/D 3039M – 00, 2002)

La **Figura 3.3** muestra las dimensiones de la probeta según los parámetros de ensayo de tracción ASMT D3039 (ASMT, 2011, p. 4). Para la validación de las probetas de material compuesto reforzado con fibra se hizo uso del software LS Dyna juntamente con el procesador Ls Prepost.

3.1.2. Modelado

El modelo según la norma ASTM D3039 se asignó las dimensiones establecidas en la **Figura 3.3**, se ocupó el software SolidWorks Estudiantil para el modelo CAD donde se obtuvo un volumen de 18750 mm³.

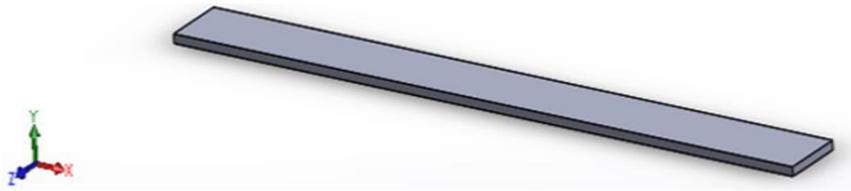


Figura 3.4 Modelo CAD de prueba para ensayo de tracción

En la **Figura 3.4** se muestra el modelo que se ocupó para el FEA de las probetas. A continuación, se asignó la sección a la probeta, para ello se exportó el modelo CAD al preprocesador LS Prepost de LS Dyna en un formato *.step.

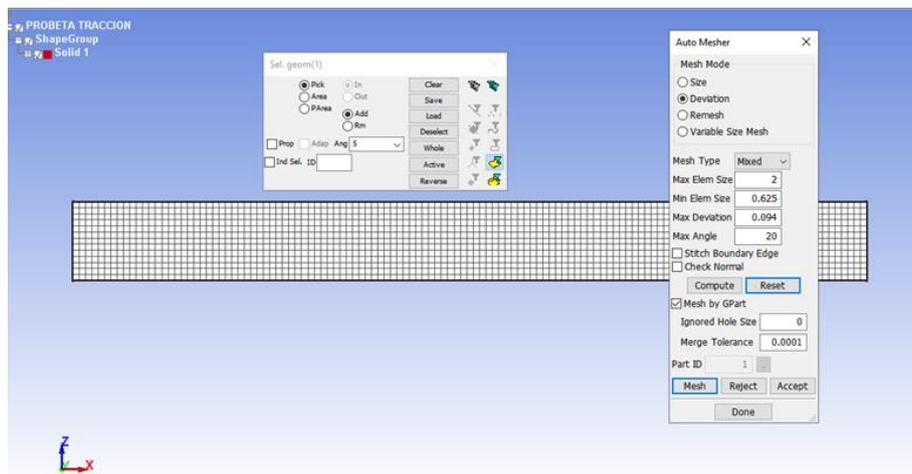


Figura 3.5 Mallado de probeta para ensayo a tracción

Una vez que el archivo estuvo en el procesador se realizó el mallado de una de las caras como se muestran en la **Figura 3.5**, los elementos del mallado tienen un tamaño máximo de 2 mm.

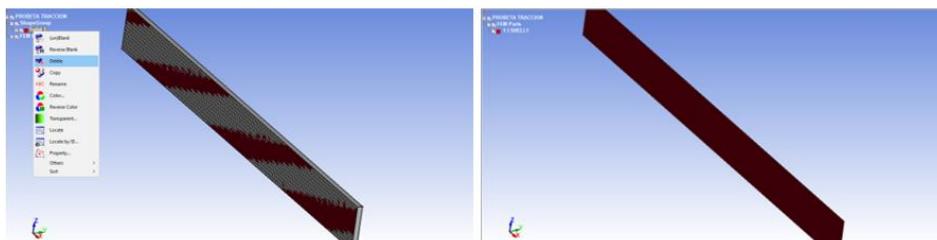


Figura 3.6 Transformación de elemento solido a shell

El modelo exportado fue un sólido, como solo se malló una sola cara del modelo se eliminaron el resto de las caras y el resultado es una transformación a Shell como se muestra en la **Figura 3.6**, esto se hizo para asignar las cartas de control del material y la sección del material correctamente.

3.1.3. Materiales

Para la caracterización de los materiales compuestos se extrajo datos del estudio de Ponce (2020, p. 83) donde incluye configuraciones de los materiales, orientación de las fibras, densidades volumétricas, graficas de ensayo de tracción y valores promedios.

Tabla 3.1 Representación de materiales disponibles para el análisis

MATERIALES		CONFIGURACIONES	
M1	Resina epoxi con fibra de cabuya	C1	Matriz 75% - Refuerzo 25%
M2	Resina epoxi con fibra de caña de azúcar	C2	Matriz 60% - Refuerzo 40%

Fuentes: (Ponce, 2020, p. 83)

En la **Tabla 3.1** se tiene dos materiales M1 y M2, con dos diferentes configuraciones C1 y C2, que fueron simulados mediante software Ls-Dyna como un ensayo a tracción.

Se seleccionó los resultados más relevantes del ensayo de tracción mecánico, que se muestran en la

Tabla 3.2 y

Tabla 3.3, para realizar la simulación del ensayo a tracción FEM.

Tabla 3.2 Resultados del ensayo a tracción del M1 con C2

PARÁMETROS DEL ENSAYO A TRACCIÓN				
Tipo de ensayo:	Tracción		Norma	ASTM D3039
Orientación	90°-0-90°		Numero de probetas	5
Matriz	Resina epoxi		Fracción Volumétrica	60%
Refuerzo	Fibra de cabuya		Fracción Volumétrica	40%
Dimensiones	250mm * 25mm		Espesor	3mm
RESULTADOS				
Probeta	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Elongación (%)
1	5000.07	62.88	989.93	6.35
2	5410.30	54.49	840.51	6.48
3	4523.57	51.44	905.44	5.68
4	4703.44	54.62	836.41	6.53
5	4086.52	48.71	811.55	6.00

Promedio	4744.78	54.43	876.78	6.20
-----------------	----------------	--------------	---------------	-------------

Fuentes: (Ponce, 2020)

En la

Tabla 3.2 y

Tabla 3.3 se muestran datos promediados como: el esfuerzo máximo a tracción, módulo de elasticidad y la elongación, estos se usaron para caracterizar las cartas de control de los materiales; otros datos empleados fueron la orientación y la fracción volumétrica, específicamente para la creación de sección del modelo.

Tabla 3.3 Resultados del ensayo a tracción del M2 con C1

Parámetros del ensayo a tracción				
Tipo de ensayo:	Tracción	Norma	ASTM D3039	
Orientación	90°-0-90°	Numero de probetas	5	
Matriz	Resina epoxi	Fracción Volumétrica	75%	
Refuerzo	Fibra de caña azúcar	Fracción Volumétrica	25%	
Dimensiones	250mm * 25mm	Espesor	3mm	
Resultados				
Probeta	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Elongación (%)
1	1754.52	26.84	459.01	5.85
2	2013.18	25.24	508.07	4.97
3	1718.23	23.76	592.60	4.01
4	1849.19	24.69	445.78	5.54
5	2256.26	28.20	595.92	4.73
Promedio	1918.28	25.75	520.28	5.17

Fuentes: (Ponce, 2020)

Dentro del software Ls Prepost para la caracterización del material se hizo uso de la carta de control MAT_024_PIECEWISE LINEAR PLASTICITY la cual modela el comportamiento elastoplástico del material permitiendo ingresar la curva de esfuerzo y deformación en la sección LCSS. Los valores que se necesita específicamente para la programación de la carta fueron: densidad de masa (RO), la relación de Poisson (PR), el módulo de Young (E) y punto de fallo (FAIL). El valor para RO se lo obtuvo a partir de un análisis de las fracciones volumétricas utilizadas en los materiales de (Ponce, 2020).

Tabla 3.4 Densidad de matriz y refuerzo de los materiales compuestos

DATOS				
Densidad cabuya	1,3	g/cm ³	0,0013	g/ mm ³
Densidad caña	0,83	g/cm ³	0,00083	g/ mm ³
Densidad resina	1,1	g/cm ³	0,0011	g/ mm ³
Volumen probetas tracción	18,75	cm ³	18750	mm ³

Fuente:(Ponce, 2020)

Para calcular la densidad de masa de la probeta completa se realizó un cálculo en base a los datos de la

Tabla 3.4 y según la configuración del refuerzo aplicada para cada material compuesto.

Tabla 3.5 Cálculo de RO del M1 con matriz 60% - refuerzo 40%

FRACCIÓN VOLUMÉTRICA (%)	ORIENTACIÓN DEL REFUERZO	FRACCIÓN VOLUMÉTRICA (mm ³)						TOTAL	
		60 Matriz/ 40 Refuerzo	90°-0°-90°	0,60	11250	mm ³	0,40	7500	mm ³
$\rho = \frac{m}{V}$ $m = \rho * V$	MASA						CARTA DE CONTROL PROBETA CABUYA (g/ mm ³)		
	MATRIZ (g)	REFUERZO (g)	PROBETA (g)						
60 Matriz/ 40 Refuerzo	12,375	9,75	22,125	RO-PROBETA 60/40=			0,00118		

En la **Tabla 3.5** y **mm³**.

Tabla 3.6 se muestra el cálculo realizado para RO, que consiste en tener el volumen en mm^3 de la probeta según la fracción volumétrica de la matriz y refuerzo, una vez obtenido el valor se lo multiplicó por cada densidad de la

Tabla 3.4, se obtuvo el valor de la masa correspondiente, se sumaron los valores obtenidos de la matriz y el refuerzo, el resultado se dividió para el volumen total y se obtuvo RO de la probeta en g/mm^3 . Para la carta de control y el análisis, las unidades a ocupar quedaron en ton/mm^3 , los valores obtenidos se transformo a ton/mm^3 y los valores obtenidos para el material con cabuya es $1,30072\text{E}-9 \text{ ton}/\text{mm}^3$; y para el material con fibra de caña fue de $1,138136\text{E}-9 \text{ ton}/\text{mm}^3$.

Tabla 3.6 Cálculo de RO del M2 con matriz 75% - refuerzo 25%

FRACCIÓN VOLUMÉTRICA (%)	ORIENTACIÓN DEL REFUERZO	FRACCIÓN VOLUMÉTRICA (mm^3)						TOTAL	
		75 Matriz/ 25 Refuerzo	90°-0°-90°	0,75	14063	mm^3	0,25	4687,5	mm^3
$\rho = \frac{m}{V}$ $m = \rho * V$	MASA			CARTA DE CONTROL PROBETA CABUYA (g/mm^3)					
	MATRIZ (g)	REFUERZO (g)	PROBETA (g)	RO-PROBETA 75/25=		0,0010325			
75 Matriz/ 25 Refuerzo	15,46875	3,890625	19,359375	RO-PROBETA 75/25=		0,0010325			

El valor de E fue tomado de la

Tabla 3.2 y

Tabla 3.3 respectivamente para cada material y el valor de PR 0.35 fue obtenido bibliográficamente del libro de (Pickett, 2019, p. 65).

TITLE
Material cabuya 6040

1	<u>MID</u>	<u>RO</u>	<u>E</u>	<u>PR</u>	<u>SIGY</u>	<u>ETAN</u>	<u>FAIL</u>	<u>TDEL</u>
	1	1.180e-09	876.78003	0.3500000	0.0	0.0	0.0620000	0.0

2	<u>C</u>	<u>P</u>	<u>LCSS</u> <input type="checkbox"/>	<u>LCSR</u> <input type="checkbox"/>	<u>VP</u>
	0.0	0.0	1	0	0.0 <input type="text"/>

TITLE
Material caña 7525

1	<u>MID</u>	<u>RO</u>	<u>E</u>	<u>PR</u>	<u>SIGY</u>	<u>ETAN</u>	<u>FAIL</u>	<u>TDEL</u>
	1	1.032e-09	520.28003	0.3500000	0.0	0.0	0.0517000	0.0

2	<u>C</u>	<u>P</u>	<u>LCSS</u> <input type="checkbox"/>	<u>LCSR</u> <input type="checkbox"/>	<u>VP</u>
	0.0	0.0	1	0	0.0 <input type="text"/>

Figura 3.7 (a) Carta de material para M1 con matriz 60% - refuerzo 40% (b) Carta de material para M2 con matriz 75% - refuerzo 25%

En la **Figura 3.7** se ingresó el RO calculado de la **Tabla 3.5** y **mm3**.

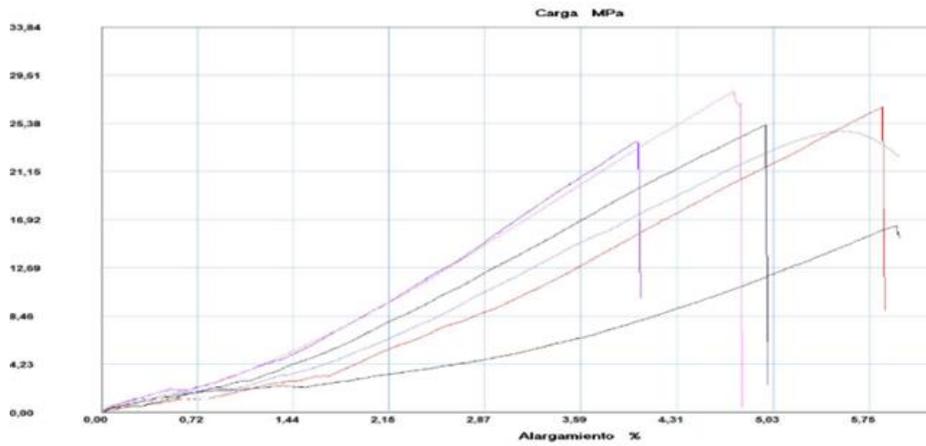
Tabla 3.6, de igual manera el E promediado anteriormente en la

Tabla 3.2 y

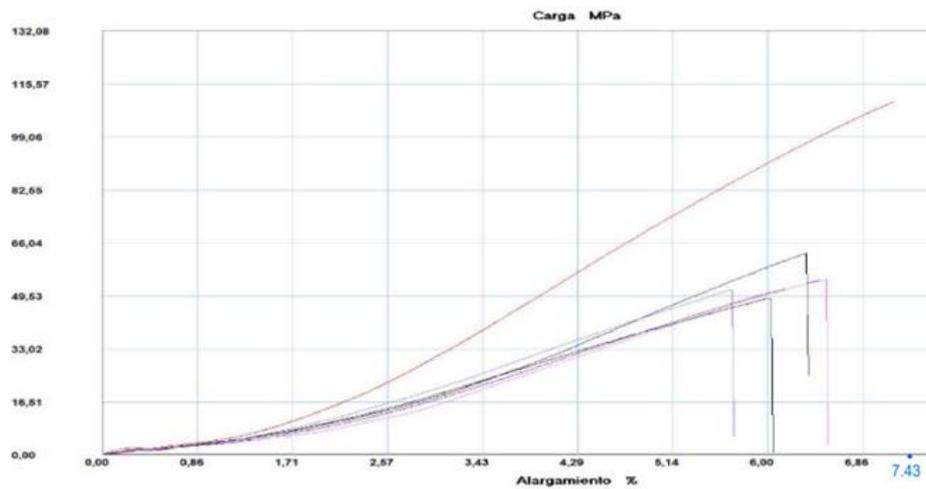
Tabla 3.3 respectivamente y el PR de 0.35 para ambos materiales. Para ingresar los valores de la curva de esfuerzo/deformación en el aparatado LCSS de la carta de control MAT_024_PIECEWISE LINEAR PLASTICITY se utilizó los valores promediados del esfuerzo máximo a la tracción y la elongación de la

Tabla 3.2 y

Tabla 3.3, para cada material se realizó una curva media basándose en las curvas obtenidas del ensayo mecánico de cada material.



a)



b)

Figura 3.8 Curva esfuerzo-deformación M1-C2 (b) Curva esfuerzo-deformación M2-C1
(Ponce, 2020, pp. 87–89)

Las curvas de la **Figura 3.8** están expresadas en MPa/ %. Para obtener la curva promedio se ocupó “GetData Graph Digitizer”, este software permite ingresar la imagen de la gráfica y establecer puntos de referencia y ubicación de los valores deseados, a partir de aquí el software permitió insertar la trayectoria. Ya definida la curva se extrajo los datos en formato .xlsx entregando a escala exacta de los ejes.

Tabla 3.7 (a) Valores curva esfuerzo-deformación M1 con matriz 60% - refuerzo 40% (b) Valores curva esfuerzo-deformación M2 con matriz 75% - refuerzo 25%

M1 60/40 (%)		M2 75/25 (%)	
Tensión verdadera	Estrés verdadero (MPa)	Tensión verdadera	Estrés verdadero (MPa)
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,00E+00	3,21E+00 - Sy	0,00E+00	1,81E+00 - Sy
1,71E-02	8,01E+00	1,43E-02	3,46E+00
2,57E-02	1,63E+01	2,14E-02	6,44E+00
3,43E-02	2,60E+01	2,86E-02	1,05E+01
4,29E-02	3,72E+01	3,58E-02	1,50E+01
5,14E-02	4,87E+01	4,31E-02	1,95E+01
6,20E-02	5,44E+01	5,17E-02	2,57E+01

En la **Tabla 3.7** se muestran los valores de la tensión y estrés verdaderos. Los valores de la tensión verdadera se obtuvieron de la elongación expresadas en la

Tabla 3.2 y

Tabla 3.3, estos valores se transformaron a valores reales de la deformación unitaria.

The image shows two side-by-side software interface panels, labeled 'a)' and 'b)'. Each panel has a header with four tabs: 'LCID', 'SIDR', 'SFA', and 'SFO'. Below the tabs are input fields for these values. Panel (a) shows 'LCID' as 1, 'SIDR' as 0, 'SFA' as 0.0, and 'SFO' as 0.0. Below this is a section 'Repeated Data by Button and List' with two columns: 'A1' and 'O1'. The 'A1' column contains the value 0.0, and the 'O1' column contains 3.21. Below these columns is a scrollable list of data points: (2, 0.0171, 8.01), (3, 0.0257, 16.3), (4, 0.0343, 26.0), (5, 0.0429, 37.2), (6, 0.0514, 48.7), and (7, 0.062, 54.4). Panel (b) shows 'LCID' as 1, 'SIDR' as 0, 'SFA' as 1.0000000, and 'SFO' as 1.0000000. Its 'A1' column contains 0.0 and its 'O1' column contains 1.81. Below these columns is a scrollable list of data points: (2, 0.0143, 3.46), (3, 0.0214, 6.44), (4, 0.0286, 10.5), (5, 0.0358, 15.0), (6, 0.0431, 19.5), and (7, 0.0517, 25.7).

Figura 3.9 (a) Carta de definición de curva esfuerzo-deformación M1 con C2 (b) Carta de definición de curva esfuerzo-deformación M2 con C1

En el apartado LCSS se definió el comportamiento plástico del material, la curva se determinó ingresando los valores de tensión verdadera en A1 y el estrés verdadero en O1 como se muestra en la **Figura 3.9**.

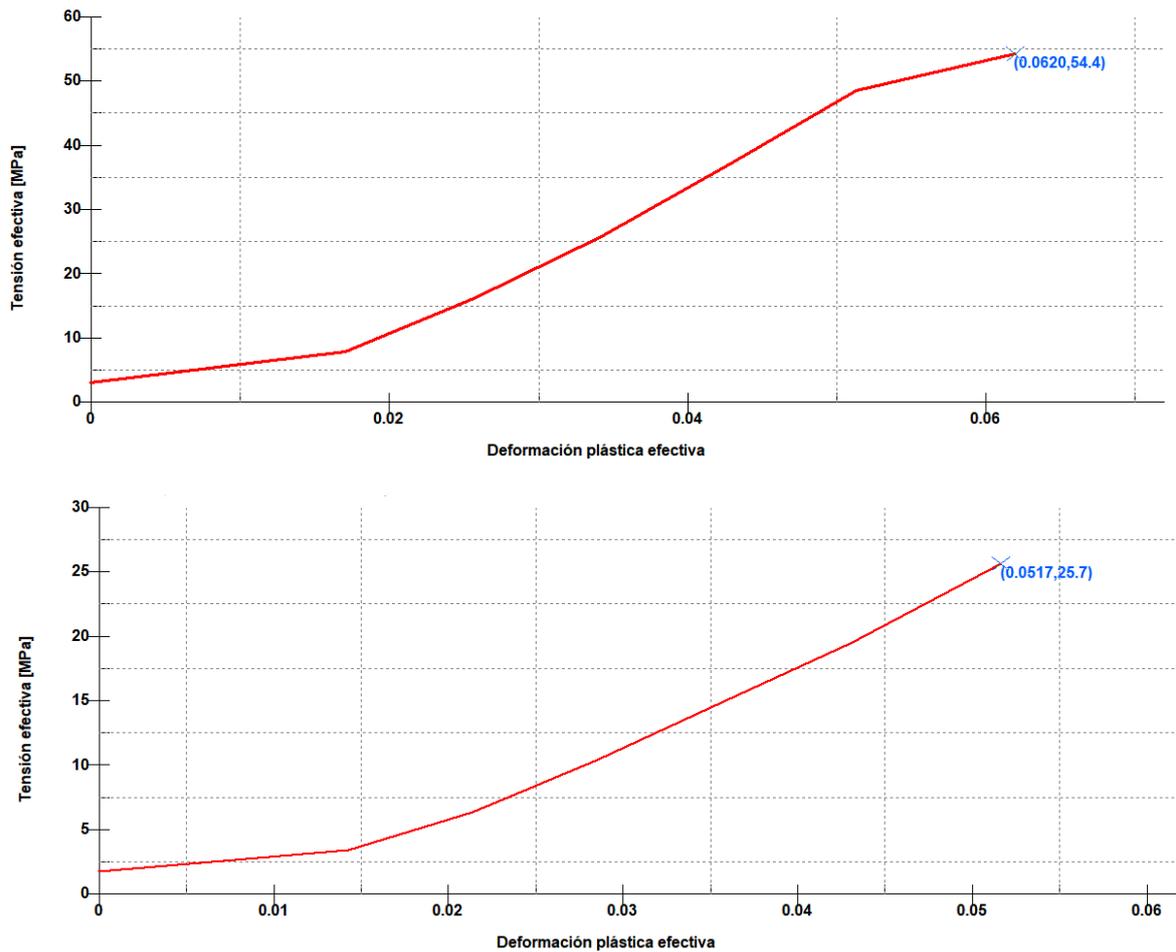


Figura 3.10 (a) Curva esfuerzo-deformación M1 con C2 en Ls Prepost (b) Curva esfuerzo-deformación M2 con C1 en Ls Prepost

Una vez ingresados los valores correspondientes de cada material para las curvas de esfuerzo y deformación se seleccionó el apartado PLOT para poder visualizar la curva entrante a la simulación como se muestra en la **Figura 3.10**.

Después de tener el material creado, el siguiente paso fue asignar la sección a la probeta, para ello se hizo uso de la carta de control *SECTION_SHELL la cual permite asignar el espesor de la probeta en T1, T2, T3, T4, la orientación del material compuesto en ICOMP y los puntos de integración en OR/IRID.

TITLE								
Section Matrial cabuya 6040								
1	SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
	1	2	1.0000000	3	1	-1	1	1
2	T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
	3.0000000	3.0000000	3.0000000	3.0000000	0.0	0.0	0.0	0
Repeated Data by Button and List								
	Bi	Bi	Bi	Bi	Bi	Bi	Bi	Bi
	90.0	0.0	90.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1 90.0 0.0 90.0 0.0 0.0 0.0 0.0							Data Pt. 1

Figura 3.11 Asignación de sección a la probeta para ensayo a tracción

En la **Figura 3.11** se asignó los valores para la sección, en T1-T4 un espesor de 3 mm según lo establece la normativa ASTM D3039, luego la orientación de la fibra del material compuesto estudiada por (Ponce, 2020, p. 45) de 90°-0°-90° escritas en los apartados “Bi” los cuales se activan en ICOMP. Es importante saber que por cada orientación de la fibra se activó el número de puntos de integración de espesor de capa (NIP), para este estudio se utilizó 3 puntos de integración y que esta configuración es para ambos materiales compuestos.

Con la sección definida, el siguiente paso fue definir los puntos de integración en la carta de control *INTEGRATION_SHELL con NIP igual a 3 establecido anteriormente para tres puntos de integración. Antes de asignar valores, se debe entender dentro de la programación de la carta de control, hubo tres aspectos importantes: S (posición de IP), WF (factor de ponderación equivalente al espesor de la capa/espesor total del laminado) y PID (para un enlace a la pieza y, por lo tanto, las propiedades de la capa), como se muestra en **Figura 3.12**

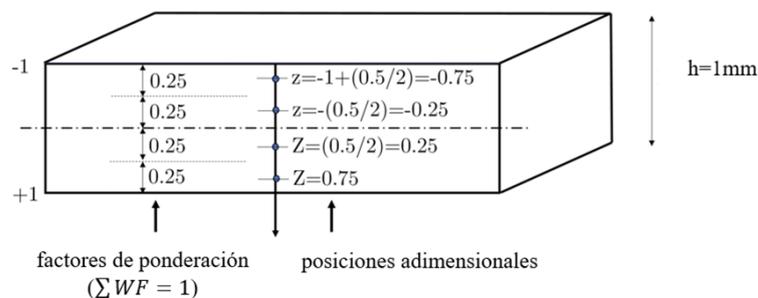


Figura 3.12 (a) Ejemplo de integración de puntos de espesor y separación de la fibra.

(Pickett, 2019, p. 98)

Para la validación de probetas se tiene dos materiales compuestos a base de resina epoxi con fibra de cabuya y caña de azúcar; para cada uno de ellos tienen diferente fracción volumétrica, y dependiendo de ello se asignó la posición de IP y espesor de la capa.

Para el material fibra de cabuya (M1) con la configuración 60/40, se hizo uso de la carta de controlo *INTEGRATION SHELL.

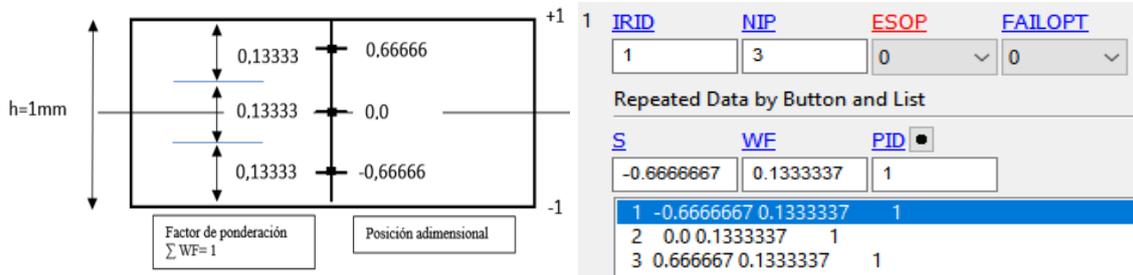


Figura 3.13 Integración de puntos M1 con matriz 60% - refuerzo 40%

En la **Figura 3.13** se aplicó la descripción de la **Figura 3.12**, por ende, si se tiene 1 unidad (mm), y la configuración del material es de 60/40, se tendría para el refuerzo el 40 % de la unidad equivalente a 0,4, de este resultado se divide para 3 (tres capas de refuerzo con orientación 90°-0°-90°) obtenido un espesor de 0,13333 WF, con una distribución de 0,66666.

Para el material fibra caña (M2) con la configuración 75/25, se hace uso de la carta de controlo *INTEGRATION SHELL de la misma manera que para el M1.

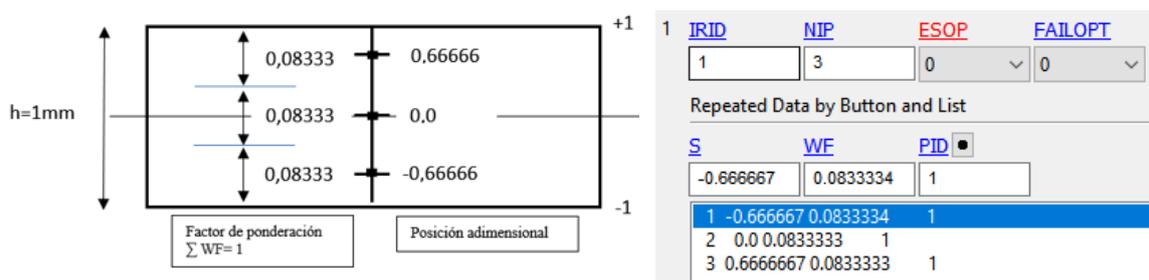


Figura 3.14 Integración de puntos M2 con matriz 75% - refuerzo 25%

En la **Figura 3.14**. se muestra el mismo procedimiento que en el M1, si se tiene 1 unidad (mm), y la configuración del material es de 75/25, entonces para el refuerzo el 25 % de la unidad equivalente a 0,25, de este resultado se divide para 3 (tres capas de refuerzo con orientación 90°-0°-90°) obtenido un espesor de 0,083333 WF, con una distribución de 0,66666 mm.

3.1.4. Condiciones de Borde

Los valores de frontera son los valores de las variables meteorológicas en los bordes de la región en la cual se hizo la simulación. Estos valores eran conocidos y los mismos restringen las variables en cualquier localidad específica.

Se realizó la asignación del material creado y la sección para los dos materiales, para ello se hizo uso de la carta de control PART DATA en el apartado ASSIGN se seleccionó la parte (el modelo) y se asignó el ID del material y sección.

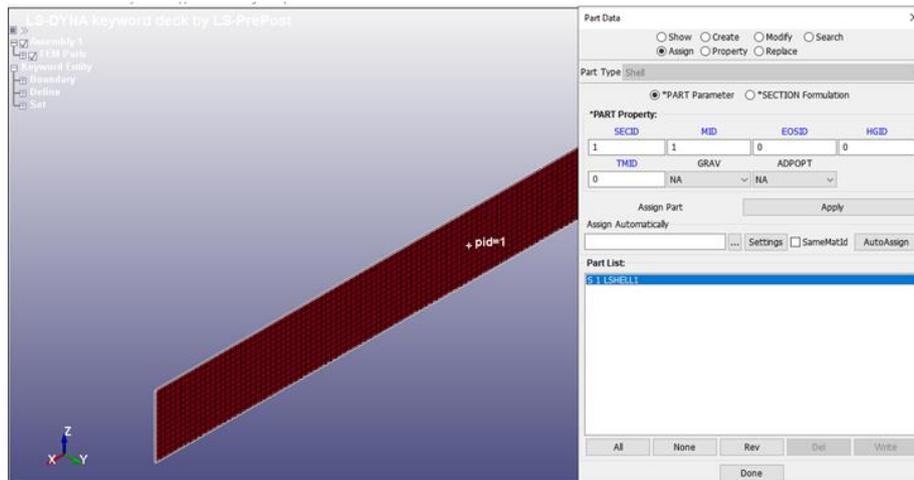


Figura 3.15 Asignación de ID material y sección a la probeta

Como se muestra en la **Figura 3.15** en el casillero SECID es donde se asignó el ID de la sección creada y en el casillero MID el material compuesto creado anteriormente, para que las asignaciones sean guardadas se pulsó APPLY.

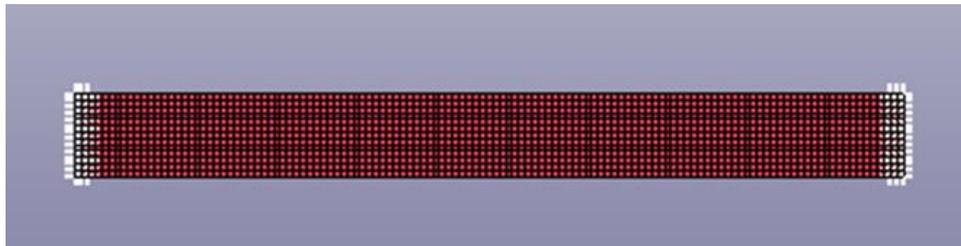


Figura 3.16 Asignación de set de nodos para M1 Y M2

Después de la asignación de material y sección lo siguiente fue establecer las condiciones de contorno, para este análisis se definió dos puntos: el primero es un extremo de la probeta como fijo (lado izquierdo) restringiendo todo movimiento con la carta de control *BOUNDARY_SPC_SET_ID, y el otro extremo como móvil (lado derecho) como se muestra en la **Figura 3.16**.

*BOUNDARY_SPC_SET(ID) (2)								
ID	TITLE							
0	P Movil							
1	NSID	CID	DOFX	DOFY	DOFZ	DOFRX	DOFRY	DOFRZ
2	0	0	1	1	1	1	1	1

Figura 3.17 Condición de contorno punto móvil para M1 Y M2

En la **Figura 3.17** se muestra la carta de control *BOUNDARY_SPC_SET_ID donde se estableció el punto móvil, que tiene un solo grado de libertad y es de traslación en eje de las abscisas, de esta manera se pudo asignar la velocidad con la cual se realizó el ensayo de tracción.

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET(ID) (1)								
ID	TITLE							
0	Velocidad							
1	NSID	DOF	VAD	LCID	SF	VID	DEATH	BIRTH
2	1	0	2	1.0000000	0	1.000e+28	0.0	

Figura 3.18 Condición de contorno velocidad del punto móvil para M1 Y M2

Para la asignación de la velocidad al punto móvil se utilizó la carta de control *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET_ID que se muestra en la **Figura 3.18**, en la cual en la parte NSID se asigna el SED de nodos móviles, en DOF el tipo de traslación, en VAD el tipo de velocidad y en LCID se asignó la curva de velocidad del ensayo.

Después que se define las condiciones de contorno, finalmente se coloca los controles de la simulación, para ello se tiene cuatro cartas de control para analizar: carta *DATABASE_BINARY_D3PLOT, carta *CONTROL_HOURLGLASS, carta *CONTROL_TERMINATION y carta *CONTROL_TIMESTEP.

*DATABASE_BINARY_D3PLOT (1)					
1	DT	LCDT	BEAM	NPLTC	PSETID
	0.0010000	0	0	0	0

Figura 3.19 Carta de control *DATABASE_BINARY_D3PLOT para M1 Y M2

En la **Figura 3.19** se muestra la carta de control *DATABASE_BINARY_D3PLOT la cual hace que el software agregue los datos de la simulación del modelo, el material, la ecuación de estado, la sección y el Hourglass al primer archivo d3plot.

*CONTROL_HOURLGLASS (1)		
1	IHQ	QH
	1	0.1000000

Figura 3.20 Carta de control *CONTROL_HOURLGLASS para M1 Y M2

En la **Figura 3.20** se muestra la carta de control *CONTROL_HOURLGLASS la cual se utilizó para el control de Hourglass, la carta se enfoca directamente a la viscosidad o rigidez que se agrega a los elementos de capa cuadrilátera y elementos sólidos hexaédricos que usan integración reducida.

*CONTROL_TERMINATION (1)						
1	ENDTIM	ENDCYC	DTMIN	ENDENG	ENDMAS	NOSOL
	0.1000000	0	0.0	0.0	0.0	0

Figura 3.21 Carta de control *CONTROL_TERMINATION para M1 Y M2

La **Figura 3.21** se muestra la carta de control *CONTROL_TERMINATION la cual se aplicó para determina el tiempo total de simulación, pero lo cual se utilizó un valor de 0.10 segundos, un tiempo corto para realizar el ensayo de tracción.

*CONTROL_TIMESTEP (1)								
1	DTINIT	TSSFAC	ISDO	ISLJMT	DT2MS	LCTM	ERODE	MS1ST
	0.0	0.9000000	0	0.0	-1.000e-06	0	0	0

Figura 3.22 Carta de control *CONTROL_TIMESTEP para M1 Y M2

En la **Figura 3.22** se muestra la carta de control *CONTROL_TIMESTEP que sirvió para establecer el control de tamaño de paso de tiempo estructural. Este tiempo no debe de ser mayor al tiempo de la carta *CONTROL_TERMINATION. Par la simulación en la parte DT2MS se agregó el tiempo de -1e-06 segundos, el signo menos indica que es para análisis estructural. Por otra parte, en la parte de TSSFAC que es el tiempo de solución, se establece en un valor de 0.90 (predeterminado) o algún valor menor, los valores superiores a 0.90 a menudo darán lugar a inestabilidades.

3.2. Validación de Probetas

3.2.1 Línea base

La validación y verificación de los cálculos FEM son los métodos principales para construir y cuantificar esta confianza. En esencia, la validación es la evaluación de la precisión de los modelos estructural y computacional mediante la comparación de los resultados numéricos con los datos experimentales. En la verificación, por otro lado, se realiza comparando los resultados numéricos de problemas de referencia simples con soluciones "exactas" obtenidas analíticamente, o utilizando métodos numéricos más precisos (Oñate et al., 2008).

3.2.2 Comparativa FEM vs Real

Determinada la línea base del proceso de validación de la probeta mediante ensayo a tracción, la comparativa realizada fue entre las gráficas de esfuerzo-deformación real entrante y la curva de esfuerzo-deformación saliente de la simulación que se encuentran en el capítulo III,

una vez obtenidos los valores de estas curvas se realiza una comparativa de los valores máximos obtenidos y se determina un margen de error, con este valor se puede determinar el porcentaje de error; para que el resultado sea favorable el margen de error debe de ser menor del 10%, también se puede decir que los resultados pueden estar del 90 al 100%, para que el análisis sea favorable.

Para realizar una simulación FEA de las muestras, las características de la región anisotrópica y plástica deben definirse con precisión. La región plástica multilínea se caracteriza por la pendiente de la curva tensión-deformación, es decir, el módulo de Young y también la relación de Poisson, que se ha determinado mediante el método de correlación de imágenes digitales. Las características necesarias para la región de deformación plástica, que debe insertarse en el software de simulación LS Prepost, se determinaron a partir de los resultados de ingeniería, mediante el cálculo de los valores reales de tensión y deformación, utilizando la investigación de Ponce (2020).

Las simulaciones se realizaron utilizando un análisis dinámico explícito, con el fin de obtener una visión relevante del comportamiento del material. La disposición del material de tres capas superpuestas y la orientación general se introdujeron utilizando la configuración compuesta de INTEGRATION_SHELL. El espécimen de tracción dio como resultado un espesor total de 3 mm, el equivalente M1 0,133 Y M2 0,0833 a 0,83 mm por capa individual. La orientación de las fibras se define colocando la urdimbre perpendicular a la trama de cada capa, permaneciendo la orientación constante en todo el material.

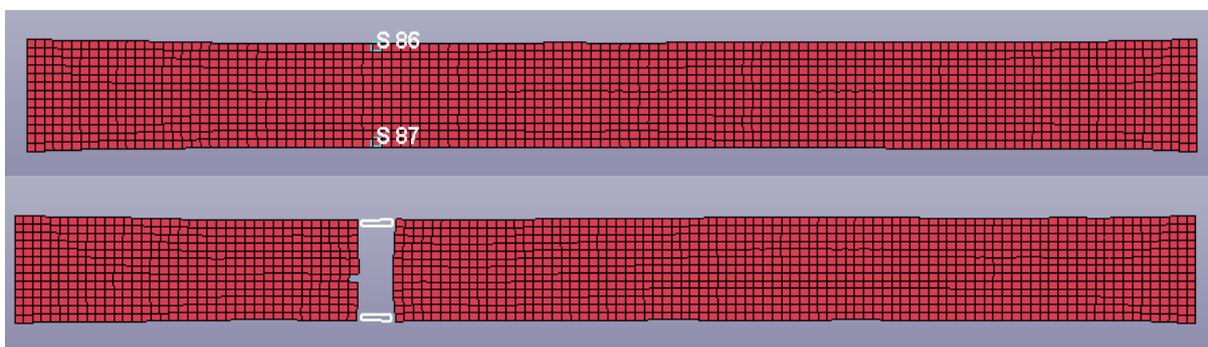


Figura 3.23 ID de elementos tomados para obtención de datos para M1

En la **Figura 3.23** se muestra el ID de los elementos tomados para el análisis, el primer elemento con ID 86 y para el segundo ID 87. A partir de estos puntos se obtuvo las gráficas de esfuerzo y deformación.

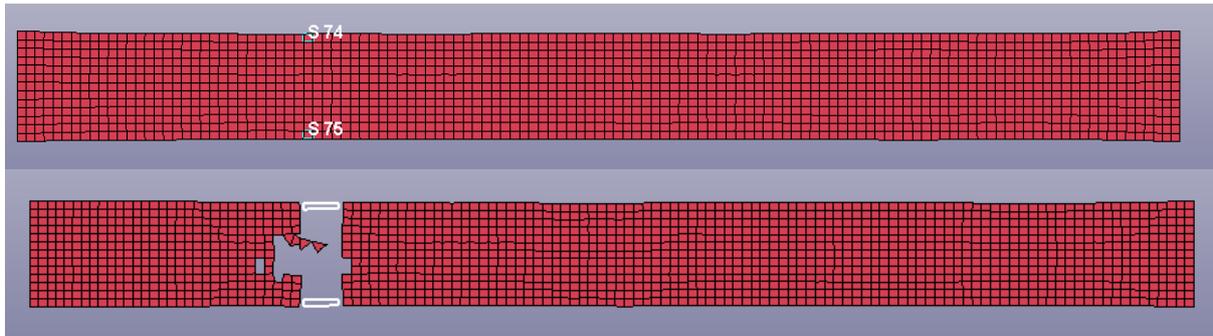


Figura 3.24 Número de nodos tomados para obtención de datos para M2

En la **Figura 3.24** se muestra el ID de los elementos que se tomaron para realizar el análisis, el primer elemento con ID 74 y para el segundo ID 75. A partir de estos puntos se obtuvo las gráficas de deformación y deformación salientes de la simulación, estas gráficas fueron comparadas con los valores de **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** tanto para el M1 y M2 respectivamente.

3.3. Diseño del protector del parachoque

3.3.1 Selección del vehículo

La **Figura 3.25** muestra un modelo detallado de elementos finitos a partir de un proceso de ingeniería inversa. El modelo consta de unas 1000 piezas y 2,25 millones de elementos que representan la geometría del último modelo de alta resolución con tecnología de modelado de última generación, con un peso exacto al original. (CCSA-George Mason University | College of Science, 2018a)

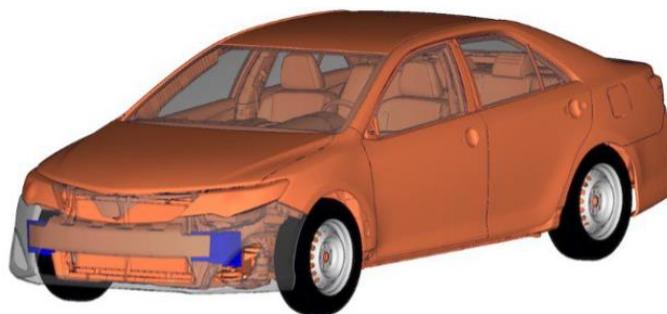


Figura 3.25 Vehículo Toyota Camry

(CCSA-George Mason University | College of Science, 2018a)

El vehículo tiene un amplio proceso de validación con resultados de pruebas de configuraciones de impacto frontal, lateral y de techo que garantiza una alta correlación para diferentes casos de carga. El software CORA (CORrelation and Analysis) se utilizó para calificar qué tan bien se comparan los resultados de la prueba y la simulación. CORA fue desarrollado por la Asociación para la tecnología y la biomecánica ficticias (PDB) y tiene en

cuenta el cambio de fase, el tamaño y la forma, así como la comparación de valores en cada incremento de tiempo. Con estos métodos, se otorga una calificación objetiva que indica qué tan bien se compara una curva (R. Reichert & Kan, 2017, pp. 1 & 2). Y la validación del modelo se detalla en el **Anexo I. Vehículo**.

3.3.2 Extracción del protector del parachoque

La metodología inicial estaba proyectada para realizar con el modelo FEM del vehículo Toyota Camry 2015, el código del modelo fue ejecutado con el fin de ver el tiempo de simulación real del modelo FEM en el software Ls Dyna como se muestra en la **Figura 3.26**.

```
bigger then scale the penalty of the offending surface.
Memory required to begin solution      :    59M
Additional dynamically allocated memory:   398M
Total:                                448M

initialization completed

calculation with mass scaling for minimum dt
added mass = 3.6541E-02
physical mass= 6.0150E-01
ratio = 6.0750E-02
1 t 0.0000E+00 dt 9.00E-07 flush i/o buffers      11/22/22 02:13:23
1 t 0.0000E+00 dt 9.00E-07 write d3plot file      11/22/22 02:13:23

Deformable Spotwelds:
added spotweld mass from mass scaling= 1.9189E-02
percentage mass increase = 3.1902E+00

cpu time per zone cycle.....          811 nanoseconds
average cpu time per zone cycle....   1180 nanoseconds
average clock time per zone cycle..   1173 nanoseconds

estimated total cpu time = 242525 sec ( 67 hrs 22 mins)
estimated cpu time to complete = 242409 sec ( 67 hrs 20 mins)
estimated total clock time = 241253 sec ( 67 hrs 0 mins)
estimated clock time to complete = 241137 sec ( 66 hrs 58 mins)

added mass = 5.5731E-02
percentage increase = 9.2652E+00

termination time = 1.500E-01
```

Figura 3.26 Tiempo de simulación del vehículo Carmy

En la **Figura 3.26** se muestra el tiempo que tarda el modelo del Camry, se demora 66 hrs 58 min tiempo, teniendo en cuenta que el HBM aun no consta en la simulación. Entonces del modelo básico del Toyota Camry 2015 se extraen las configuraciones que tiene el protector del parachoque para configurar en un modelo FEM de menor complejidad.

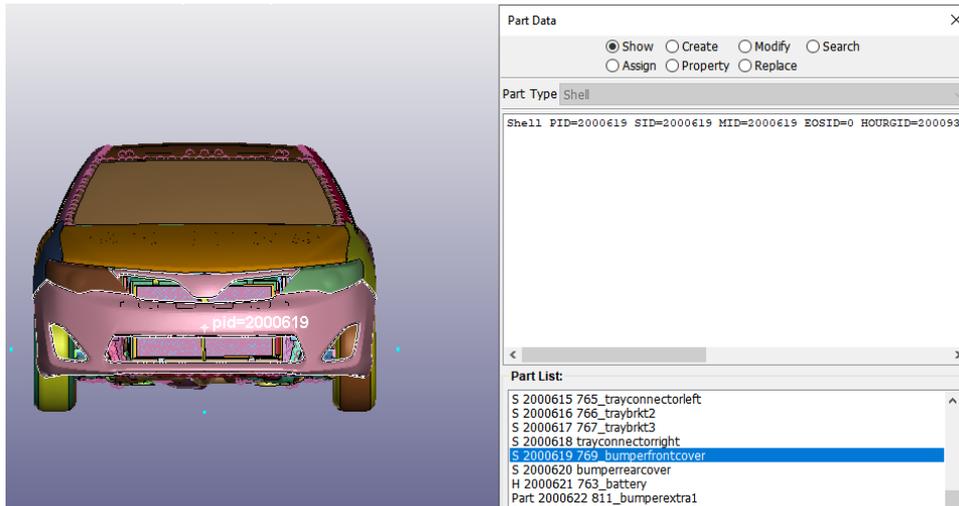


Figura 3.27 Identificación PART ID del protector del parachoque

La **Figura 3.27** muestra el apartado PART DATA donde se identificó el ID=2000619 el cual pertenece al protector, esta es la parte para extraer, de igual manera al seleccionar la parte se muestra el ID=2000619 de la sección y el ID=2000619 del material, los cuales se debe identificar para poder realizar la exportación.

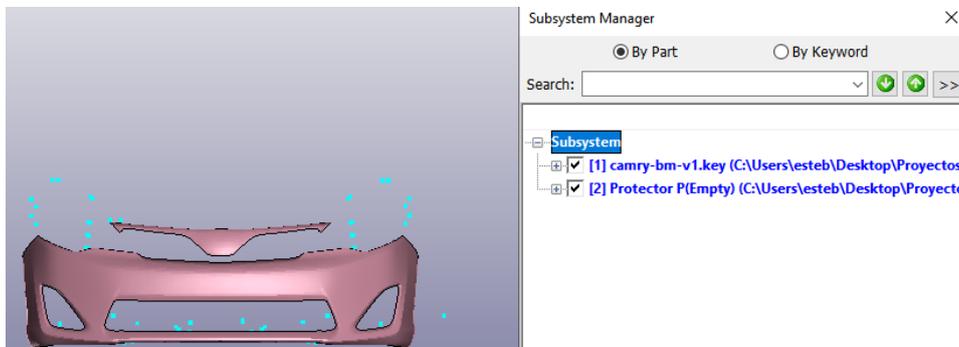


Figura 3.28 Creación del subsistema para extracción del protector del parachoque

Para la extracción del protector se hizo uso del apartado de SUBSYSTEM MANAGER que se muestra en la **Figura 3.28** el cual permitió crear un nuevo subsistema y copiar la parte seleccionada con los ID identificados, de igual manera se extrajo la sección y material de la misma parte.

*SECTION_SHELL_(TITLE) (58)

TITLE								
seccion camry								
1	SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
	2000619	2	0.0	3	1	0	0	1
2	T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
	3.1500001	3.1500001	3.1500001	3.1500001	0.0	0.0	0.0	0

Figura 3.29 Carta de control de la sección del protector del parachoque

En la **Figura 3.29** se muestra la sección exportada del protector del parachoque utilizada en el Toyota Camry 2015, esta carta tiene una asignación de 3,15 mm para el espesor.

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (7)

TITLE
material Carmy

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
	2000619	2.010e-09	1000.00000	0.3000000	20.000000	10.0000000	3.5000000	0.0
2	C	P	LCSS	LCSR	VP			
	8000.0000	8.0000000	0	0	0.0			

Figura 3.30 Carta de control del material del protector del parachoque

La **Figura 3.30** muestra el material exportado del parachoque utilizada en el Toyota Camry 2015, esta carta tiene una asignación de $2,010 \text{ e-}9 \text{ ton/ mm}^3$ para la densidad de masa, un módulo de Young de 1000 MPa, un radio de Poison 0,3, punto de deformación de 20 MPa, un módulo tangencial de 10 y un punto de fallo a 3,5; con estos valores la carta de control construye la curva de esfuerzo deformación internamente.

3.3.3 Vehículo utilizado para simulación de impacto

Por otra parte, se realizó un barrido de información sobre vehículos con similitudes al Toyota Carmy para obtener el modelo FEA del vehículo donde se va a caracterizar el protector del parachoque. La **Tabla 3.8** muestra las ventas anuales por tipo de vehículo en unidades en Ecuador en la última década

Tabla 3.8 Ventas anuales por tipo de vehículo en unidades 2012-2021

AÑO	SUV's	AUTOMÓVILES	CAMIONETAS	CAMIONES	VAN's	BUSES	TOTAL
2011	31.405	62.568	27.496	10.859	5.821	1.659	139.808
2012	26.860	53.124	24.037	10.971	4.912	1.464	121.368
2013	27.079	46.813	22.077	10.958	5.449	1.424	113.800
2014	31.025	47.596	23.262	11.594	5.199	1.381	120.057
2015	21.804	30.297	15.088	8.196	4.259	1.665	81.309
2016	17.057	27.760	11.070	3.948	2.298	1.422	63.555
2017	33.739	45.703	19.463	7.866	4.407	1.885	137.615
2018	45.139	58.855	7.866	4.407	1.885	1.842	137.615
2019	45.266	54.192	18.406	7.915	4.678	1.751	132.208
2020	32.791	28.543	13.461	7.692	2.926	405	85.818
2021	50.254	35.081	20.486	9.766	3.377	352	119.316

Fuente: (Aeade & Autoplus, 2021, p. 98)

El segmento “automóviles” tiene la segunda cifra de venta dentro de los segmentos genéricos de vehículo. Representa adecuadamente el segmento de vehículos medianos y es un buen candidato para la investigación de contramedidas estructurales prevista. En **Tabla 3.9** se puede ver como las ventas del subsegmento de automóviles “urbano/ hatchback” i10 es superior a la de cualquier otro subsegmento.

Tabla 3.9 Principales modelos Hyundai vendidos (unidades), 2020-2021

Modelo	2020	2021
i10 1.2 5P TM HB AC (CKD)	1.024	1.883
CRETA AC 1.5 5P 4X2 TM	-	1.118
TUCSON NX4E GL AC 2.0 5P 4X2 TM	-	1.018
VERNA GLS AC 1.4 4P 4X2 TM	-	483
VERNA GL AC 1.4 4P 4X2 TM	-	322

Fuente:(Aeade & Autoplus, 2021, p. 112)

Se obtuvo un modelo genérico del segmento “automóviles” con las partes relevantes para la investigación y con similares características al “i10”, como se muestra en **Tabla 3.10** para caracterizar el parachoque.

Tabla 3.10 Características similares Hyundai i10/ Suzuki Alto 800

VEHÍCULO	PRECIO (US)	LONGITUD MÁXIMA (mm)
Hyundai i10	7.950 - 21.870 (km77, 2020)	3.570-3.670 (km77, 2020)
Suzuki Alto 800	9.990 (DERCO, 2022)	3.446 (Restrepo, 2020)

Fuente: (DERCO, 2022; km77, 2020; Restrepo, 2020)

El Suzuki Alto 800 tiene un diseño moderno, sus dimensiones son: de largo más de 3.4 metros de largo y 1.5 aproximadamente de ancho, con un peso de 805 kg, el motor es de 800 cc de 3 cilindros y 12 válvulas desarrolla, tiene un torque de 69 Nm y una potencia máxima de 47 HP a un régimen de 3500 rpm (Muñoz, 2022).

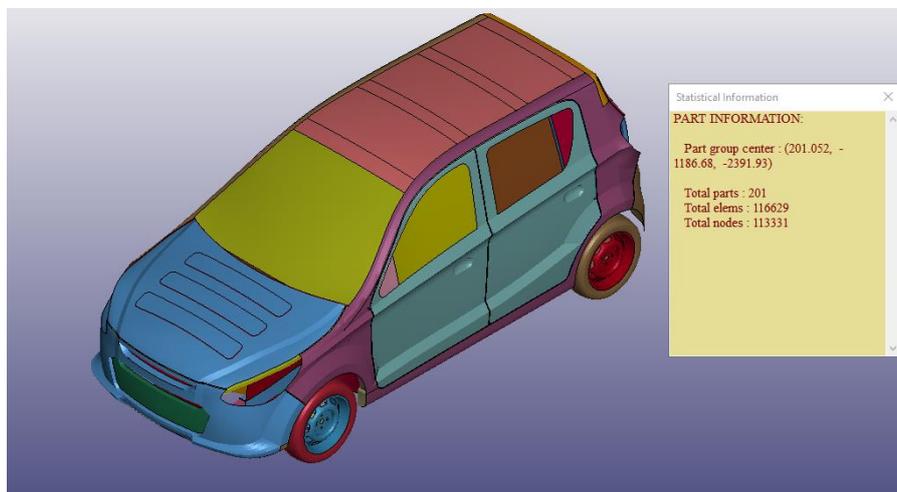


Figura 3.31 Suzuki alto modelo FEM

La **Figura 3.31** muestra el modelo simplificado de elementos finitos del vehículo real. El modelo consta de 201 partes, 116629 elementos y 113331 nodos, que representan la geometría del vehículo, correspondiente al modelo del Suzuki Alto 800.

3.3.4 Configuración M1, M2 y M3

La configuración de los materiales M1 (Compuesto cabuya), M2(compuesto caña) y M3 (termoplástico) se los realizó en la parte 172 Shell como se aprecia en la **Figura 3.32**, independientemente para cada material, se crearon tres tipos de códigos para realizar las simulaciones independientemente y así poder obtener los resultados.

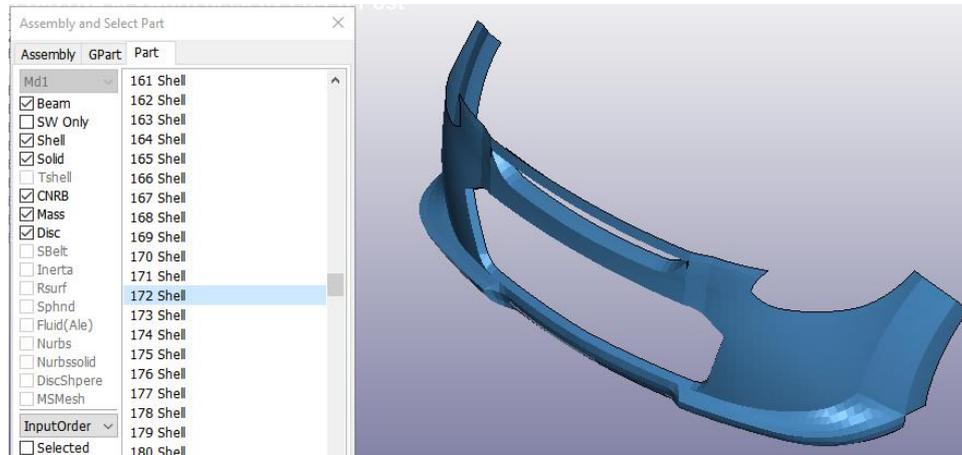


Figura 3.32 Identificación del ID del protector del Suzuki Alto

Para la caracterización del material en el protector se hace uso de las cartas de control del material y la sección utilizados **3.2 Validación de Probetas** correspondientes a los M1 y M2, el material M3 fue exportado y las cartas se las especifica en el apartado **3.3.2 Extracción del protector del parachoque.**

3.4. Parámetros de simulación de impacto- Normativa

Los parámetros de la simulación de impacto entre el “Suzuki 800 FE Simplificado (VS)” contra “HBM Percentil 50 de HYBRID III FE” se divide en tres fases explicada en el Anexo II. Flujograma de los parámetros de la simulación de impacto.

3.4.1 Parámetros para obtener grafica del protector del parachoque

Se ocupó un Vehículo Genérico (GV) representativo de una Family Car/Sedan (FC) de (Klug et al., 2017, p. 4), porque sus dimensiones se asemejan al Vehículo Simplificado (VS) en el que se realizó la evaluación de Euro NCAP, el GV se encuentra detallado en el Anexo III. Vehículos genéricos.

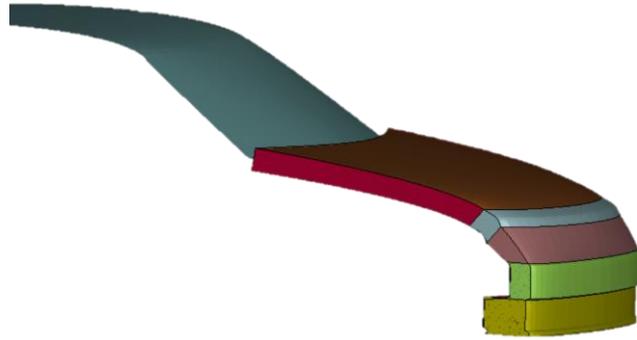


Figura 3.33 Vehículo Genérico Family Car/Sedan

(Klug et al., 2017, p. 4)

La **Figura 3.33** muestra el GV del FC que cuenta con tres capas de espesor diferentes para obtener efectos de inercia sobre impactos y estructuras realistas (módulo de Young, módulo tangencial, tensión de fluencia del plástico para todas las partes menos capot).

El GV cuenta con 4 puntos de impacto detallados en el

Anexo III. Vehículos genéricos, de los cuales solo se ocupa el impacto en el protector del parachoque en la parte central de la carrocería. A continuación, se presentan algunas características en la **Tabla 3.11**

Tabla 3.11 Características del GV

GV seleccionado	Family Car/Sedan (FC)
Área del GV	Parachoque (BMP),
Mallado	4 nodos/ solidos 8 nodos
Tamaño de elementos (mm)	12
Comparten Nodos	Parachoque
Masa del Vehículo+150 (kg)	1690
Grados de Libertad GV (Translación)	eje x

El archivo DYN también cuenta con un cilindro de impacto rígido que simula la pierna de un HBM, el cilindro se encuentra detallado en el

Anexo III. Vehículos genéricos, el cual tiene sus características que se muestra en la **Tabla 3.12**.

Tabla 3.12 Características del Impactador

Masa (kg)	5,95
Densidad (kg/mm³)	7,89E-06
Diámetro (mm)	120
Altura (mm)	400
Espesor de la pared (mm)	5
Graficas	Force Deflection Characteristic

Dentro del archivo DYN las cartas de control que se han desarrollado para el GV tienen los siguientes parámetros que se detallan en la **Tabla 3.13**, de igual forma la metodología que se utilizó para obtener la gráfica de análisis en el protector del parachoque.

Tabla 3.13 Datos de las cartas de control

Contacto	Superficie vs superficie
Velocidad	40 km/h
Tiempo de paso	0,1 ms
Tiempo de simulación	35 ms
Punto de análisis GV del FC	Nodo no. 10691
Grafica activa para protector	RCFORC

La **Tabla 3.13** muestra dos puntos importantes del análisis del protector del parachoque, el nodo del primer contacto de impacto y el RCFORC el cual muestra la gráfica de las fuerzas resultantes de la interfaz, juntos significan la deflexión del comportamiento físico que se analizó en la discusión de resultados.

Una vez analizado el archivo DYN se procedió a ejecutar el código, el proceso de la simulación se encuentra detallado en el apartado **3.5.1 Prueba Piloto 1**.

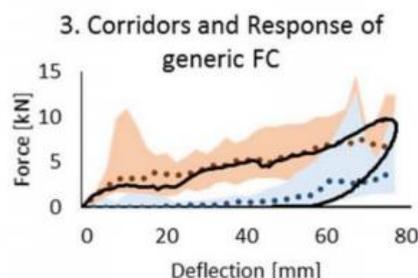


Figura 3.34 Respuesta del modelo de GV en LS-DYNA al impacto en la línea central del parachoques.

(Klug et al., 2017, p. 6)

La **Figura 3.34** muestra la gráfica de la fuerza aplicada al protector y la deflexión que produce esta fuerza (Klug et al., 2017, p. 6), la misma que fue obtenida en la Prueba Piloto 1 dando validez a las cartas de control que se ocuparon en la simulación del VS, los datos de estas cartas se encuentran detallados en la **Figura 3.34**.

3.4.2 Parámetros para obtener grafica de los acelerómetros del Dummy

Se obtuvo el HBM (Híbrido III percentil 50 masculino de pie) de (Copyright ANSYS, 2022) donde se analizó los sensores y posicionamiento. Los sensores o acelerómetros miden la fuerza y el momento en áreas importantes de la colisión.

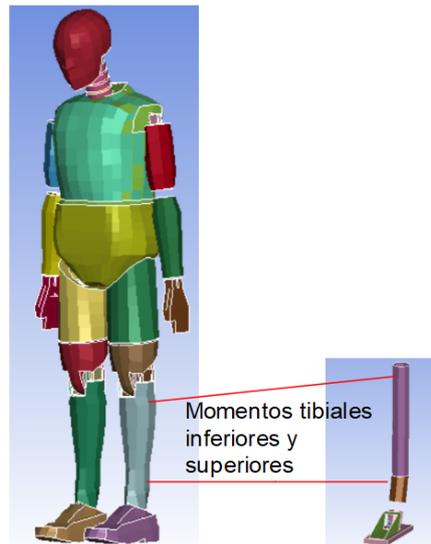


Figura 3.35 Acelerómetro de la tibia superior e inferior

La **Figura 3.355** muestra la ubicación de los acelerómetros de la tibia los cuales que entregan resultados en momento (Nm) y fuerza en (kN). Otros acelerómetros que contiene el modelo FE se encuentran descritos en el Anexo IV. Modelo FEM del Maniquí.

En el mundo real, pueden darse diferentes escenarios de colisión y reacciones de los peatones antes de un impacto (Anurag et al., 2013). Sin embargo, los fabricantes de vehículos deben tener objetivos de diseño para evitar mayor daño. Por lo tanto, fue importante definir la posición para garantizar la comparabilidad de los resultados de las pruebas virtuales. En el

Anexo V. Certificación del HBM se detalla los grados y posición que se siguió para el posicionamiento del Dummy.

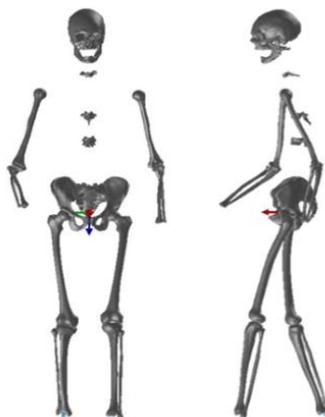


Figura 3.36 Imagen de la superposición del esqueleto de referencia

(Klug & Ellway, 2022, p. 4)

La **Figura 3.36** muestra la posición que ocupó (Klug & Ellway, 2022, p. 4) para realizar la certificación de un HBM FE al ser impactado contra un vehículo FE. También para el impacto FE se ocuparon otros parámetros que se muestran en la **Tabla 3.14**.

Tabla 3.14 Condiciones para la simulación de Dummy y FC

Modelo	HBM seleccionado
Velocidad de impacto (km/h)	30-50
Campo de gravedad	SI
Fricción HBM Y NCAP	0,3
Configuración de contacto	Segmento a segmento
Respuesta a CPU cada: (ms)	0,1
Time Termination >	Tiempo de contacto
Ubicación Dummy y NCAP	Lo más cerca posible
Reloj de Arena y Hourglass	Relevancia a 50 km/h
Lado golpeado HBM	Lado derecho
HBM FE y vehículo NCAP	Misma escala

Fuente: (Klug et al., 2017; Klug & Ellway, 2022)

La **Tabla 3.14** muestra los parámetros y/o recomendaciones que ocupó NCAP para definir el control del contorno. Replicamos este proceso, pero únicamente a 40 km/h por ser el estándar de velocidad de los CPC y con el resto de las condiciones.

En la prueba piloto 2 se muestra el impacto del GV con el HBM FE colocado de manera estándar con el fin de obtener la metodología para sacar las gráficas de los dos acelerómetros de la parte inferior de la pierna.

3.4.3 Parámetros impacto VS FE y HBM FE

Se define los valores de comparación para validar la simulación entre el VS contra el HBM FE Percentil 50 de HYBRID III. Una vez que el vehículo seleccionado cumplió con los requisitos generales de la **Tabla 2.1** Requisitos para poder aplicar el protocolo (R127/GTR 9), se ocupó el protocolo de evaluación de NCAP. Para el HBM FE se tomó dos puntos para el análisis que se muestran en **Figura 3.35** para analizar en el peatón.

Tabla 3.15 Calibración de aPLI

UBICACIÓN	MEDICIÓN	CFC (HZ)	CAC	UNIDADES	NRO. DE CANALES
Flexión de la Tibia		180	400	Nm	3

Fuente: (Euro NCAP, 2022b, p. 46)

La **Tabla 3.15** muestra el valor límite para la tibia superior el cual se toma de la calibración de la instrumentación que ocupa NCAP como valor superior en aPLI igual a 400 Nm. Por otro lado, se especifica la frecuencia para el filtro de las gráficas del fémur igual a 180 para la tibia según SAE.

Las pruebas incluyeron, masa del vehículo de la referencia., la fricción y velocidad del CPC de la **Tabla 3.14** entre otros los cuales se presentan a continuación en la **Tabla 3.16**. (Euro NCAP, 2022b, pp. 11 2.2.-3.5.)

Tabla 3.16 Parámetros para el vehículo

Placa de matrícula delantera	NO
Posición de ruedas	Recta hacia adelante
Posición y postura del peatón	Boletín Técnico TB 024.
Motor y accesorios en modelo FEM	NO
Datos de secciones a ocupar	2.5.1-2.5.2

Fuente:(Euro NCAP, 2022b, pp. 6–9)

Como se explica en la sección 2.4.2 **Puntos de impacto para análisis** del CAPÍTULO II existen cuatro puntos del parachoque para el análisis. Siguiendo el procedimiento de (Klug et al., 2017) se encontrará el Primer Punto de Contacto (IBRL). En el posprocesamiento se obtuvo los resultados del

Anexo VI. Parámetros outup para el vehículo y se controló los parámetros del

Anexo VII. Aplicación al procedimiento final.

3.5. Pruebas Piloto

Las pruebas piloto se realizaron para obtener las cartas de control y las gráficas según la normativa de NCAP. La primera prueba piloto se simuló el GV y el cilindro de impacto para obtener las gráficas de deflexión del protector del parachoque. La segunda prueba piloto se simula el GV y el HBM FE en la cual se comprobó el funcionamiento de los sensores y el proceso de obtención de las gráficas de los dos puntos en la parte inferior de las piernas siguiendo los lineamientos del

Anexo IV. Modelo FEM del Maniquí.

3.5.1 Prueba Piloto 1

Esta prueba consistió en verificar el archivo DYN del GV que se obtuvo de NCAP, donde se simuló el GV con un cilindro de impacto y se determinó el proceso para obtener las gráficas de fuerza y desplazamiento del protector del parachoque.

De los GV disponibles por (Klug & Ellway, 2022, p. 4) se seleccionó el vehículo FC que es un modelo genérico similar al VS.

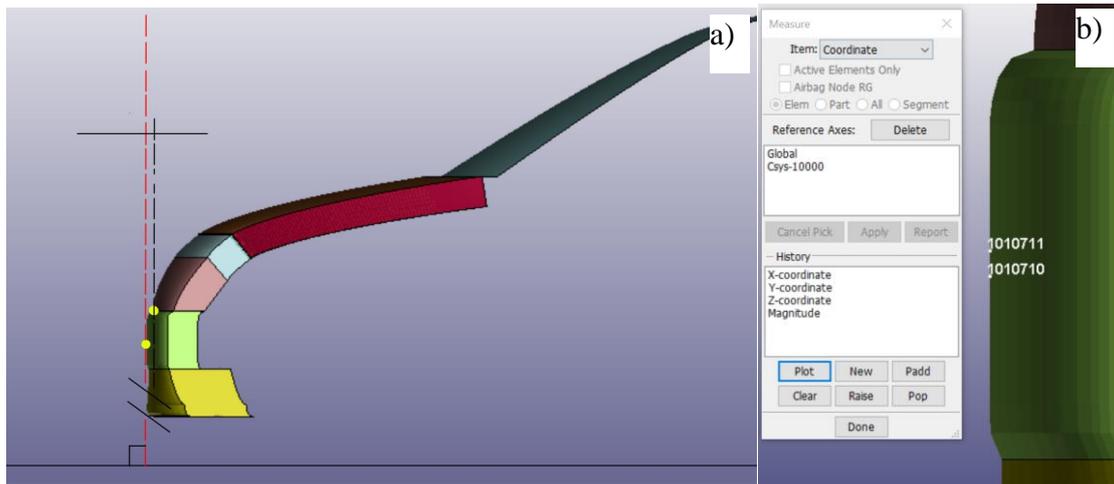


Figura 3.37 (a) Ubicación del primer punto de contacto (b) ubicación de nodos

La **Figura 3.37** muestra el punto de contacto que se encontró siguiendo el proceso de la sección **2.4.2 Puntos de impacto para análisis**. Los nodos están identificados con el ID 1010711 y 1010710, con ellos se encontró el desplazamiento y la fuerza aplicada al protector.

Preprocesamiento

El modelo FE del GV estaba configurado con los materiales y secciones, también asignado los ID a las partes según corresponde. Posterior a la revisión de los ID de las partes, se verificó la configuración de contacto entre la carcasa y el cilindro como se muestra en la **Figura 3.38**.



Figura 3.38 (a) Keyword Manager “Contacto” (b) CC Contacto automatico superficie a superficie

La **Figura 3.38** muestra la creación de CC de contacto entre el GV y el impactador, esta carta determina el esclavo y maestro en los apartados SSID y MSIS respectivamente, y en la parte de SSTYP y MSTYP se selecciona que tipo de conjunto es para el esclavo y el maestro respectivamente.

Una vez determinado la configuración de contacto, lo siguiente que se revisó fue las condiciones de contorno, las cuales delimitan o restringen algún movimiento en la simulación, por otro lado, en este apartado también se determina el control de tiempo.

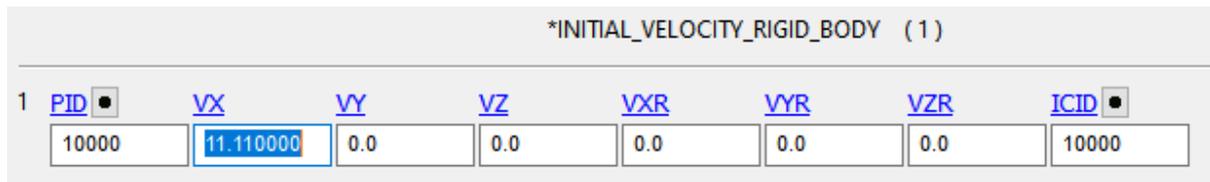


Figura 3.39 Velocidad del impactador

En la carta de control INITIAL_VELOCITY_RIGID_BODY como se muestra en la **Figura 3.39** se define la velocidad con la cual el impactador impacta al protector del GV, esta velocidad es de 40 Km/h, la cual viene determinada por NCAP.

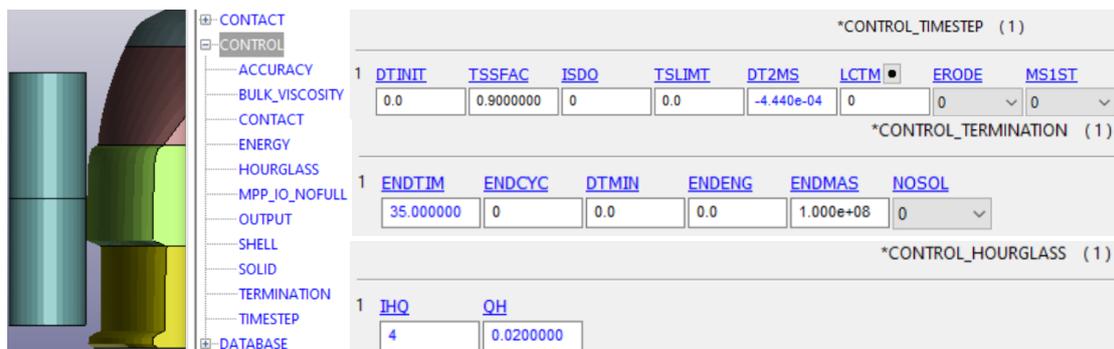


Figura 3.40 (a) Keyword Manager “Control” (b) CC Paso entre respuestas para el output (c) CC del tiempo de duración dentro de la simulación (d) CC de control de la energía de Hourglass

En la **Figura 3.40** se muestran las CC más relevantes que se utilizó en la simulación final teniendo en cuenta la misma escala de unidades. El control de paso y terminación estaban determinados previamente con valores de 0,9 ms y 35 ms respectivamente. La energía de Hourglass en relación a la viscosidad o rigidez que se agrega a los elementos tipo shell se pueden usar con Hourglass (IHQ = 1, 2 o 3) o de rigidez (IHQ = 4 o 5), en la carta de control de la prueba piloto es de forma de rigidez de tipo 2 (Flanagan-Belytschko IHQ = 4).



Figura 3.41 (a) Keyword Manager “Base de Datos” (b) CC Fuerzas resultantes de la interfaz. Finalmente se analizó las CC que tienen relación con el almacenamiento de datos recogidos durante la simulación, algunas de las CC se muestran en la **Figura 3.41** en la parte (a) CC

que deben estar activas para encontrar el resultado de análisis de aceleraciones, desplazamientos, velocidades, energías, fuerza, momentos, entre otras respuestas según la carta que se active y en (b) la CC fuerzas resultantes de la interfaz se activa para saber la fuerza que se aplica a la carcasa parachoque.

Posprocesamiento

Una vez realizada la ejecución del código en LS DYNA se obtiene los resultados almacenados en las cartas de la **Figura 3.42**. Para visualizar estos datos se identificó los nodos del protector del parachoque encontrados en la **Figura 3.37 (b)**; para la visualización del desplazamiento y la fuerza resultante se aplica una metodología respectivamente. Para el desplazamiento se aplicó los siguientes pasos:

Cargar sus d3plots en LS-PrePost (File > Open > LS-DYNA Binary Plot)

Ir a Post> Hist

Seleccionar en "Nodal" de History

Hacer clic en el nodo del primer contacto “

Seleccionar “R-displacement” de la lista inferior

Hacer clic en "Plot" o "New" (grafica del desplazamiento del nodo en mm/ms)

Seleccionar "Filter": SAE

Seleccionar C/s (Hz): 180

Hacer clic en "Aplicar"

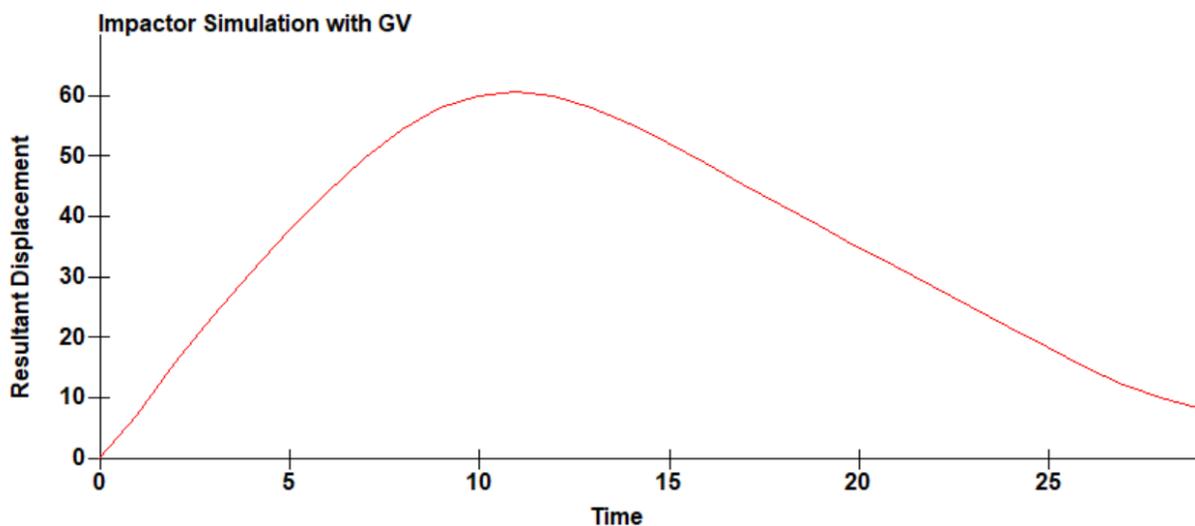


Figura 3.42 Grafica del desplazamiento del nodo (mm/ms)

El resultado de la metodología para hallar el desplazamiento se muestra en la **Figura 3.42**, la cual es una curva característica expresada en mm/ms para este estudio.

Una vez hallado el desplazamiento, después se aplicó otra metodología diferente para encontrar la fuerza resultante de la carcasa, siguiendo los siguientes pasos:

Cargar sus d3plots en LS-PrePost (File > Open > LS-DYNA Binary Plot)

Ir a Post> ASCII

Seleccionar "rcforc *" de la lista superior

Hacer clic en "Load"

Seleccionar "Ma-9900001: Compaction_Layer-Interface"

Seleccionar "R-force" de la lista inferior

Hacer clic en "Plot" o "New" (grafica de la fuerza axial en kN/ms)

Hacer clic en " Filter " en la grafica

Seleccionar Filter: SAE

Seleccionar C/s (Hz): 180

Hacer clic en "Aplicar"

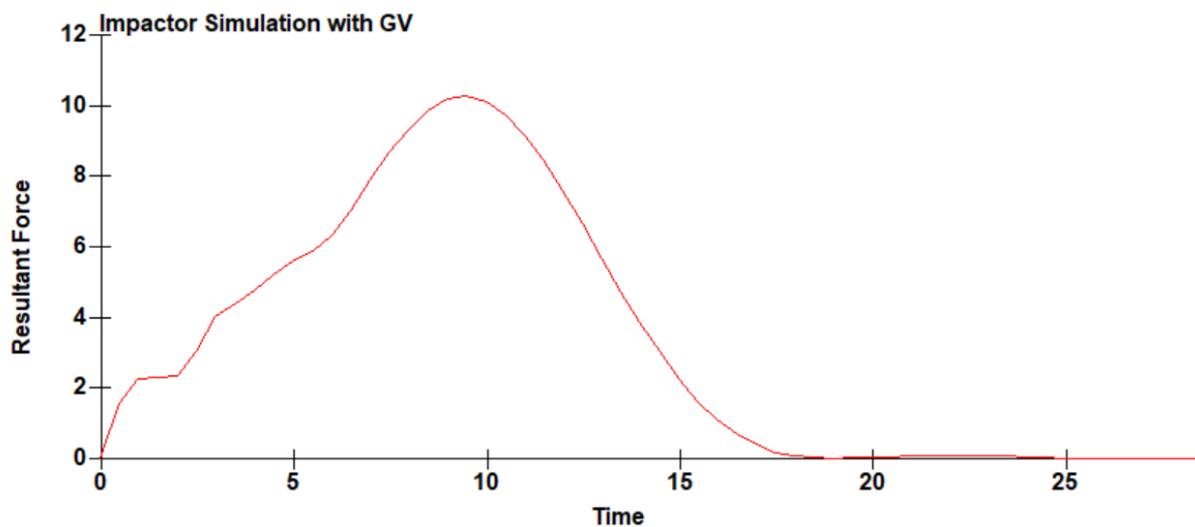


Figura 3.43 Grafica de la fuerza axial en kN/ms

El resultado de habers seguido los pasos para encontrar la fuerza resultante se muestra en la **Figura 3.43**, una curva característica expresada en unidades de fuerza vs tiempo.

3.5.3 Prueba Piloto 2

Esta prueba consistió en simular el GV contra un HBM FE con el fin de aprender a manejar la información y verificar el funcionamiento correcto de los acelerómetros de la parte inferior del HBM FE como se muestra en la **Figura 3.44**.

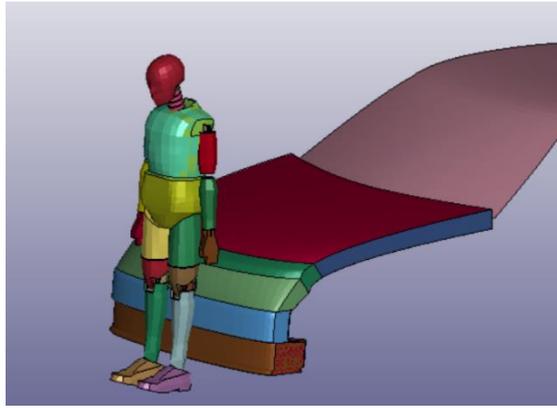


Figura 3.44 Impacto del HBM contra el GV

En la **Figura 3.44** se muestra el GV con el HBM FE posicionado de manera estándar, esto se lo hizo con el fin de obtener datos de los acelerómetros en la parte inferior de las dos piernas. Este ensamblaje se configuró con las mismas cartas de control de la prueba Piloto 1.

Ensamblaje de GV y HBM FE

El archivo que se utilizó para esta prueba es el mismo de la prueba piloto uno con las siguientes modificaciones: (1) se elimina el impactador con el acelerómetro y sus CC para descartar errores, (2) se guarda solo el GV con sus CC como archivo “.k” , (3) se introdujo HBM FE como un subsistema modificando sus ID con el fin de evitar nodos con el mismo ID como se muestra en la **Figura 3.45**.

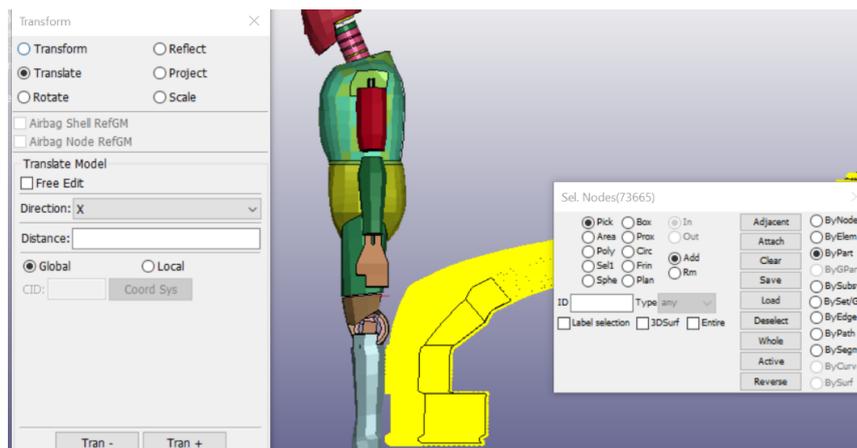


Figura 3.45 Traslación del GV en el entorno del HBM

El cambio de ID es de suma importancia ya que en modelos complejos estos se pueden repetir, causando al momento de la simulación del código arroje errores, ya que el software no puede guardar la información en dos bases de este ID.

Pre -procesamiento

Una vez que el modelo está en un mismo archivo se procedió a verificar el mallado. El mallado del GV y del HBM FE están predefinidos ya que son modelos obtenidos de organizaciones a realizar estos análisis como NCAP.

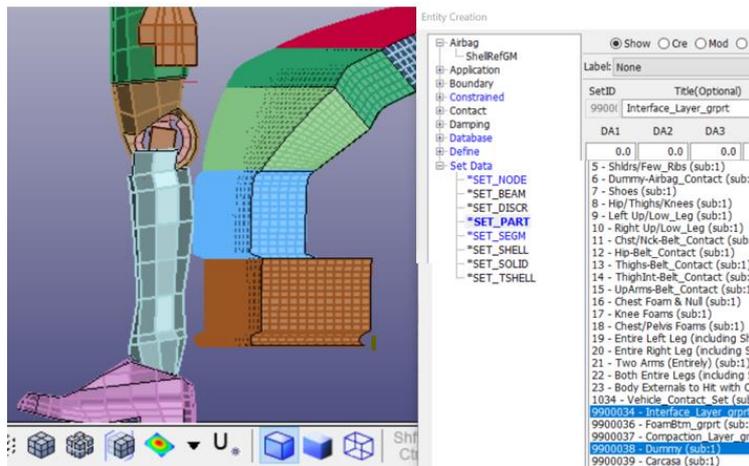


Figura 3.46 Visualización del Maestro y Esclavo del CC de contacto

La **Figura 3.46** muestra el paso previo para poder dar los valores a la CC de contacto descrita anteriormente de la prueba piloto 1; se designó el contacto entre el HBM FE y el GV, con coeficiente de fricción dinámico 0,3 y estático 0,2.

Una vez determinado los contactos, se procedió a establecer la condición de frontera como la velocidad de impacto. En la prueba piloto 1 el GV se queda estático, pero para esta simulación el HBM FE estuvo estático y el GV tuvo movimiento.

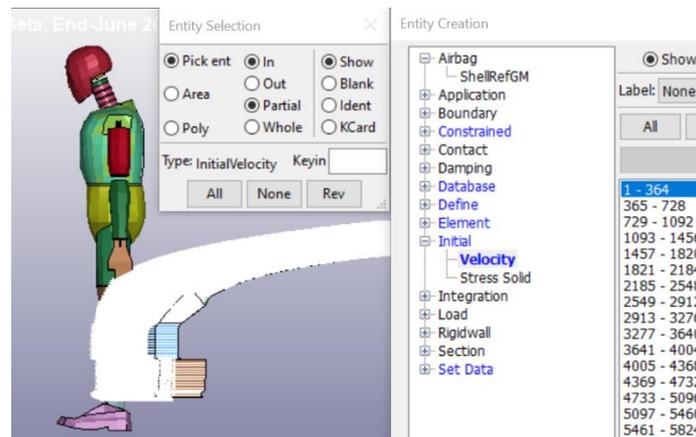


Figura 3.47 “Entity Creation” creación de velocidad

En la **Figura 3.47** muestra el paso previo para poder dar los valores a la CC de velocidad, se asignó la propiedad de la velocidad de impacto de 40 km/h indicada en NCAP. Finalmente se analiza las CC que tienen que ver con el almacenamiento de datos guardados durante la simulación, en este caso el HBM ya viene asignado todas las CC para poder ver resultados globales o específicos.

A continuación, se muestran los pasos para obtener las gráficas de análisis en el HBM FE en la parte inferior de las piernas.

Fuerzas de fémur (en CS local n.º 69 para la izquierda y CS local n.º 70 para la derecha)

Cargar los d3plots en LS-PrePost (File > Open > LS-DYNA Binary Plot)

Ir a Post > ASCII

Seleccionar "jntforc *" de la lista superior

Hacer clic en "Load"

Seleccionar "Jt-24" (fémur izquierdo) o "Jt-25" (fémur derecho) de la lista central

Seleccionar "X-force" de la lista inferior

Hacer clic en "Plot" o "New" (grafica de la fuerza axial del fémur en kN)

Hacer clic en " Filter " en la grafica

Seleccionar Filter: SAE

Seleccionar C/s (Hz): 180

Hacer clic en "Aplicar"

Momento de la tibia inferior (en CS local n.º 33 para la izquierda y CS local n.º 35 para la derecha)

Cargar los d3plots en LS-PrePost (File > Open > LS-DYNA Binary Plot)

Ir a Post > ASCII

Seleccionar "jntforc *" de la lista superior

Hacer clic en "Load"

Hacer clic en " JStifR "

Seleccionar "StR-19" (Tibia inferior izquierda) o "StR-21" (Tibia inferior derecha)

Seleccionar "StR-18" (Tibia superior izquierda) o "StR-20" (Tibia superior derecha)

Seleccionar "15-phi-moment-stiffness" para Mx o "18-theta-moment-stiffness" para My

Una vez realizado los pasos anteriores para encontrar la fuerza y momento se tiene las **Figura 3.48** y **Figura 3.49** respectivamente.

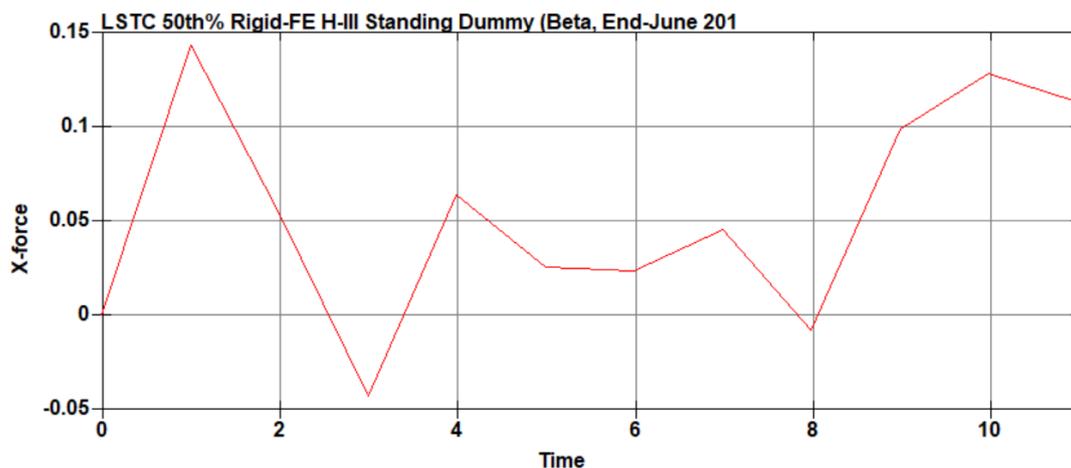


Figura 3.48 Grafica de la fuerza del fémur en kN

En la **Figura 3.48** muestra la curva característica aplicando la metodología descrita anteriormente señalando que el acelerómetro ubicado en el fémur está en correcto funcionamiento y entrega valores en kN de las fuerzas aplicadas con un valor mínimo de -38 KN y un valor máximo de 31 KN.

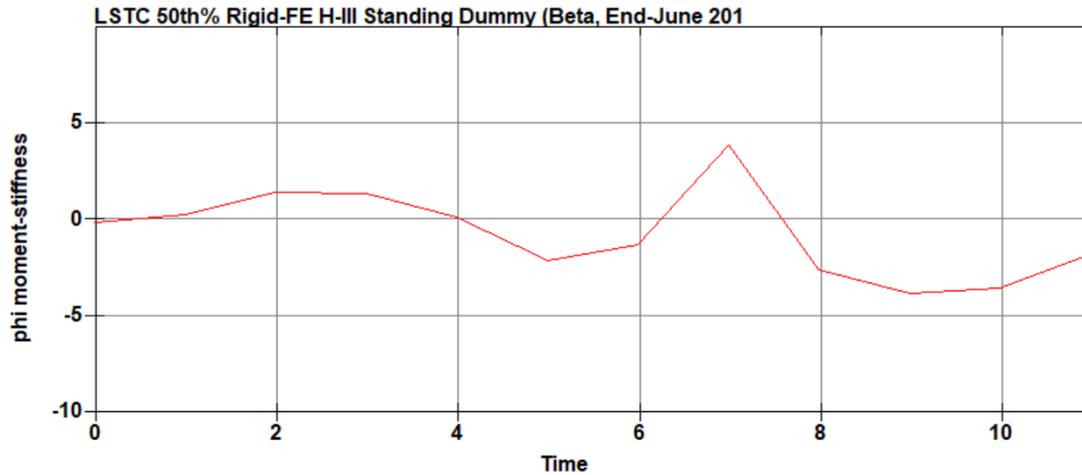


Figura 3.49 Gráfica del momento de la tibia superior en Nm

En la **Figura 3.49** muestra la curva característica del acelerómetro ubicado en la parte superior indicando un correcto funcionamiento y entregando resultados en Nm de los momentos aplicadas con un valor mínimo de -53 Nm y un valor máximo de 39 Nm.

3.6. Simulación

Del modelo simplificado del Suzuki Alto 800 FE se caracterizó el protector del parachoque delantero con las CC del M3 extraídas del Vehículo Toyota Camry FE con el fin de validar su rendimiento, se sometió a pruebas de impacto de la regulación de los Usuarios Vulnerables en las Vías (VRU) de NCAP, se ocupó los parámetros y resultados de las pruebas físicas para comparar con los resultados obtenidos en el FEA donde se impactó a un modelo de maniquí híbrido III percentil 50 masculino de pie FE. Después de tener la línea base de comparación del M3, se caracterizó el parachoque del modelo simplificado del Suzuki Alto 800 FE con los materiales M1 y M2, se realizó el mismo proceso que al material M3 para saber si cumplen con las regulaciones de NCAP para homologación.

3.6.1 Mallado de modelos FE CPC

El criterio de mallado jacobiano es una de las mejores medidas de calidad de malla, este número define cuan bueno o malo es un elemento. El Jacobiano es una medida de las normales de las caras del elemento en relación con las otras. Un valor de 1 significa que la calidad de malla es excelente, mientras que valores negativos o valores mayores dan calidades ineficientes. (Peña & Alejandro, 2018)

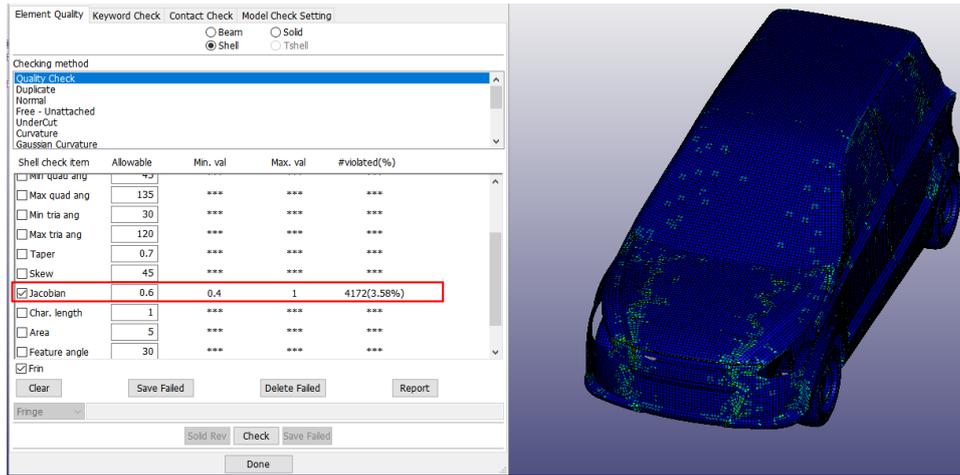


Figura 3.50 (a) Jacobiano (b) VS FE mallado

Como se observa en la **Figura 3.50** el resultado del índice jacobiano resaltado en la parte (a) con un recuadro rojo, con un valor de 0.6 que fue un valor válido para proceder con la simulación, es un valor que se encuentra dentro lo estipulado por el criterio. También en la F (b) el modelo está de color azul indicando un correcto mallado, caso contrario si se hubiera obtenido valores superiores a uno o inferiores de cero el color de los elementos sería rojo, esta característica es propia de Ls Prepost.

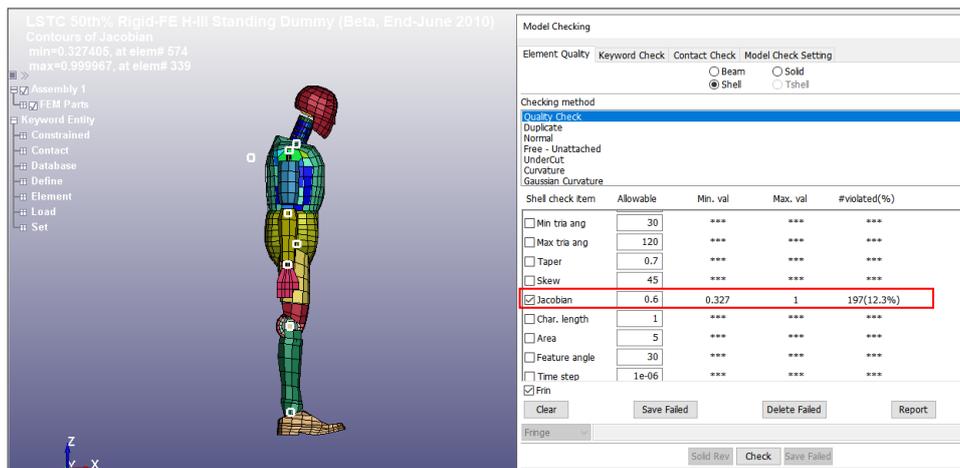


Figura 3.51 (a) HBM FE mallado (b) Jacobiano

De igual manera para el HBM FE se aplicó el criterio jacobiano aplicado al modelo del vehículo como se muestra en la **Figura 3.51**, el resultado según el criterio tuvo un valor de 0.6, estos resultados indicaron que la discretización del maniquí es buena.

3.6.2 Ensamble de modelos FE

Para el ensamble de los modelos FE se creó una plataforma en Ls Prepost con las dimensiones 22450 mm largo, de ancho 1000 mm y de alto 200 mm; esta plataforma se le asigna una carta de control denominada * BOUNDARY_SPC como se muestra en la **Figura**

3.52 la cual restringe cualquier movimiento en los 6 grados de libertad, esta carta elimina su asignación de material y de sección.

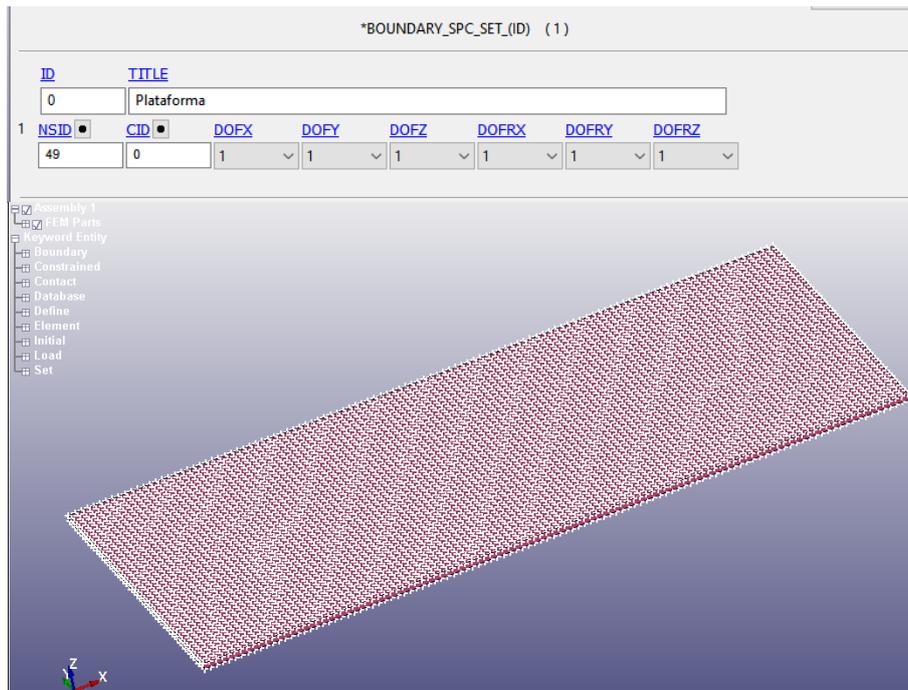


Figura 3.52 (a) Restricción de grados de libertad de la plataforma (b) visualización de la restricción mediante la carta de control

Una vez que la plataforma esta fija se procedió a importar los modelos tanto como el VS FE y el HBM FE. Para el vehículo se hizo uso de la herramienta TRASFORM moviendo el modelo al punto o ubicación deseada, por otro lado, el HBM FE tiene un apartado denominado DUMMY POSITIONIUNG en donde se ubica el modelo lo más cerca posible del modelo FE a impactar como lo establece la normativa, también se posiciona el HBM según el reglamento con el fin de tener valores más reales.

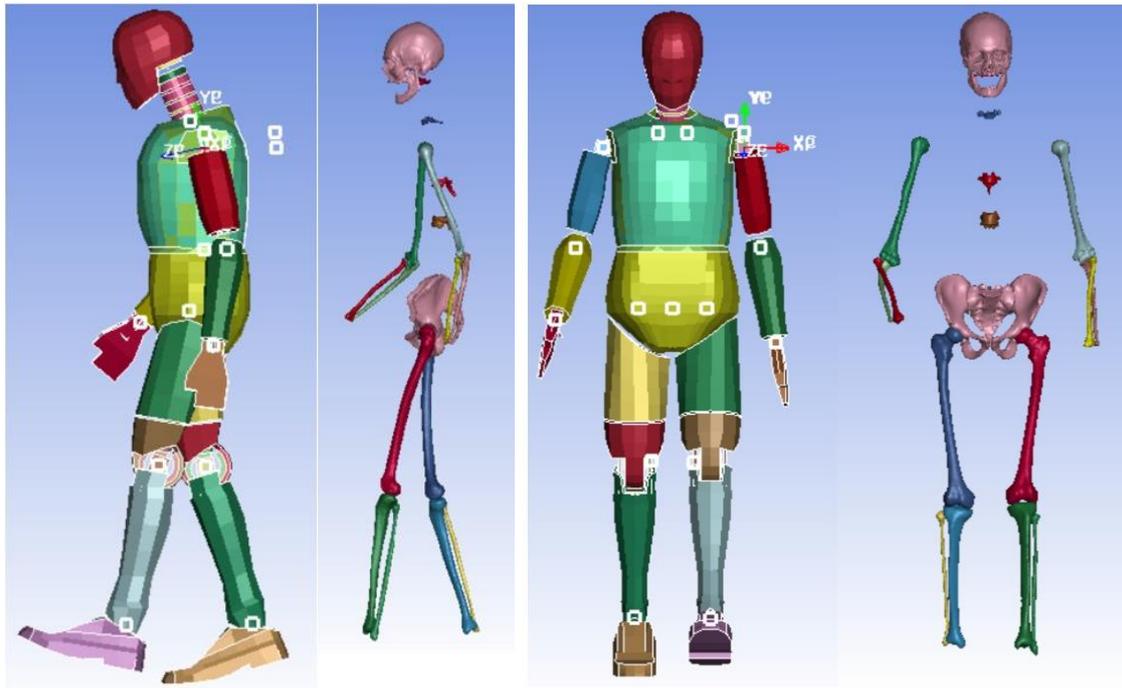


Figura 3.53 Posicionamiento de percentil FE H50 con el esqueleto de referencia

En la **Figura 3.53** muestra el HBM FE configurado según el

Anexo V. Certificación del HBM listo para la importación al modelo CPC el cual se encuentran los modelos: la plataforma, VS y HBM FE.

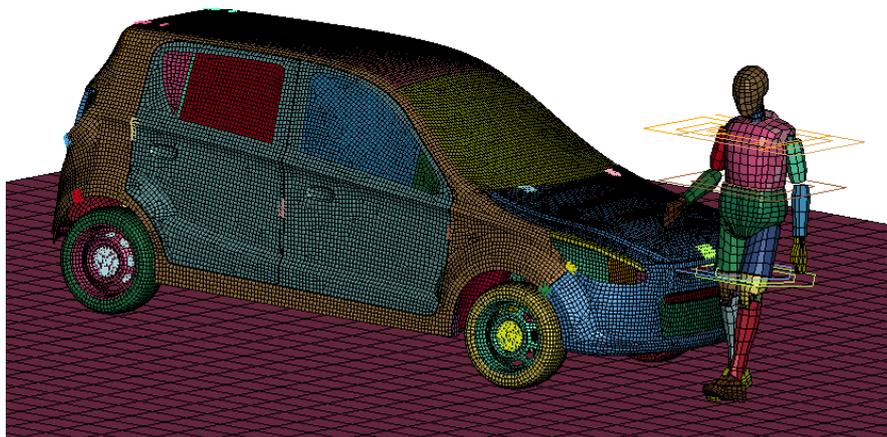


Figura 3.54 Ensamble de los modelos FE

En la **Figura 3.54** se muestra el ensamble finalizado, cabe recalcar que el posicionamiento para ambos modelos se puede configurar en cualquier momento.

3.6.3 Condiciones de borde

Una vez montado el modelo se asignó las condiciones de borde según los parámetros de la normativa detallados anteriormente. El primer punto que ya se detalló anteriormente es la

caracterización de los materiales y secciones de las tres diferentes configuraciones M1, M2 y M3 en el protector del parachoque respetando la escala de unidades. El segundo punto fue la asignación de las condiciones de contorno y los contactos según lo detallado en el apartado de pruebas piloto como: el contacto entre superficies, la velocidad de impacto, el tiempo de simulación, almacenamiento de datos, control de energías, etc.

CAPÍTULO IV

4. Resultados y Discusión

4.1. Resultados

4.1.1. Simulación de las probetas

Los resultados de M1 se obtuvieron aplicando las cartas de control del **Tabla A. VIII. 1.** Cartas de Control de la probeta con M1. El proceso de simulación para la obtención de resultados se detalla en la **Figura 4.1** la cual muestra el avance del proceso de simulación de la probeta del M1 cada 0.02 s.

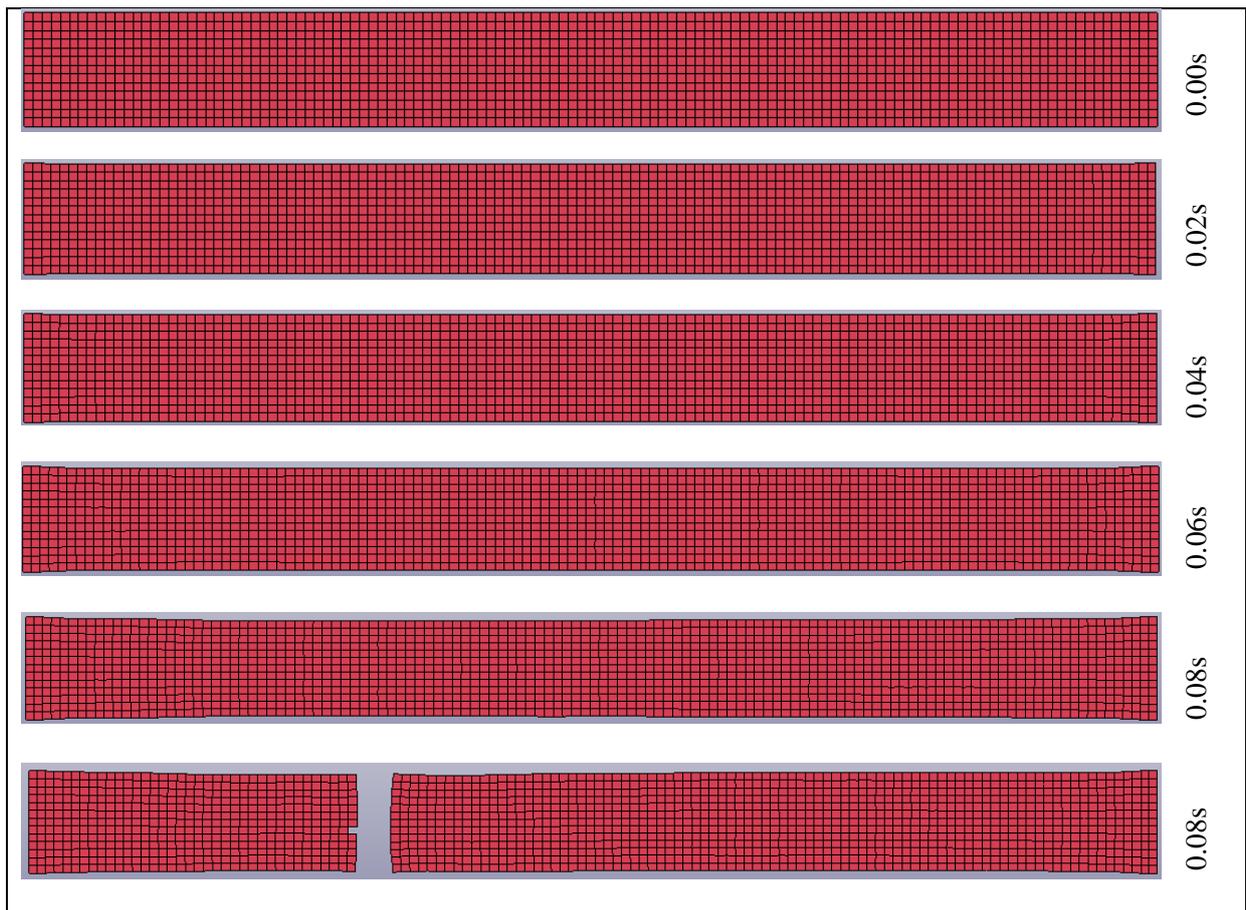


Figura 4.1 Progreso de simulación del M1

En el tiempo de 0,0869 s la probeta se rompe, la cual entrega una curva de esfuerzo vs deformación según muestra la **Figura 4.1.**

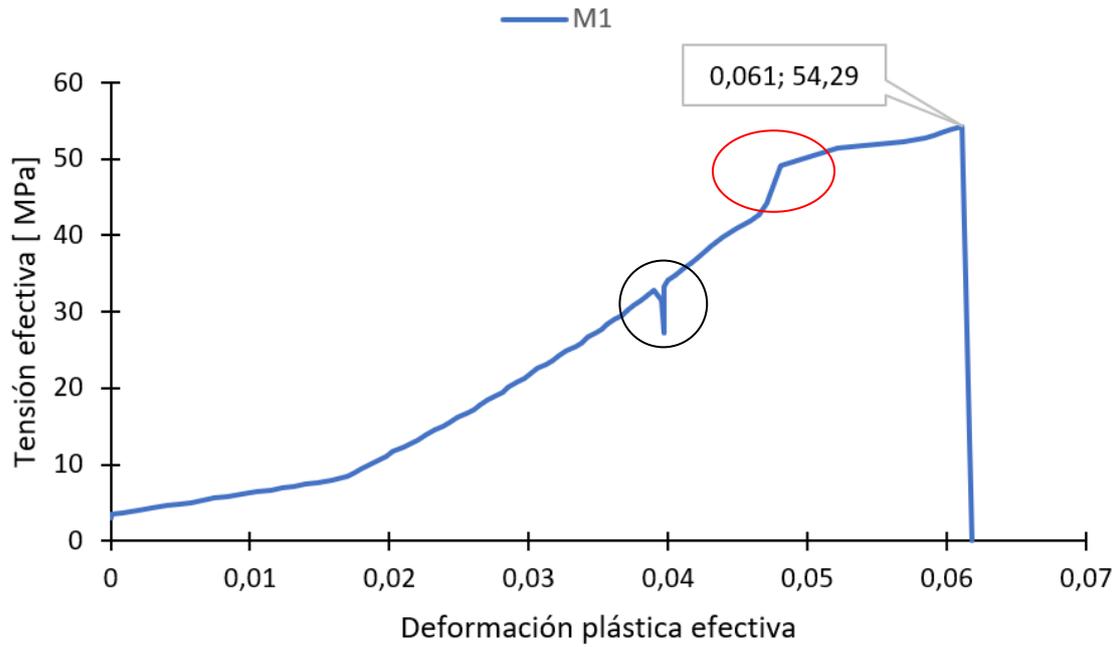


Figura 4.2 Curva output de esfuerzo vs deformación del M1

En la **Figura 4.2** se muestra la máxima deformación plástica efectiva observada en 0,061 con un esfuerzo de 54,29 MPa siendo este el punto máximo que soportó la probeta en el ensayo; la deformación en la sección transversal de la probeta disminuye en el lado izquierdo, donde están establecidos los puntos fijos. Como se puede observar, el círculo negro hay un desfase que indica el primer punto de fractura de la matriz, por otra parte, el círculo rojo indica el último esfuerzo a la tracción de la fibra natural.

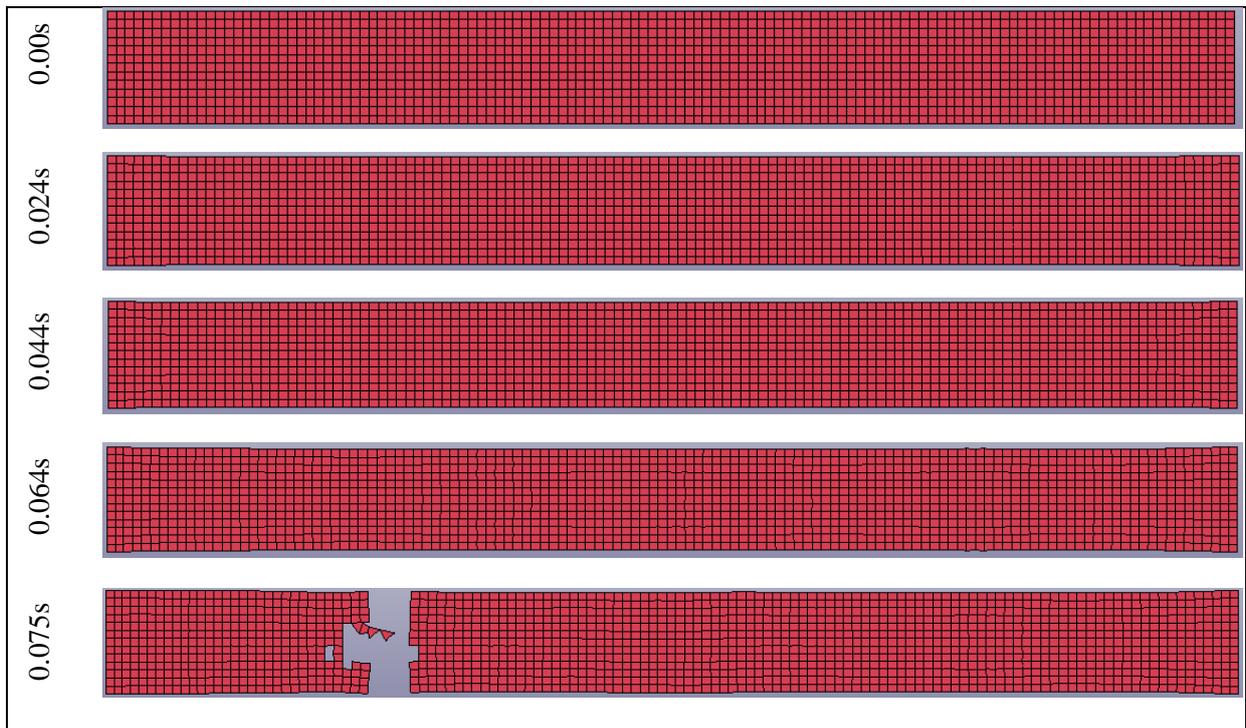


Figura 4.3 Progreso de simulación del M2

De igual manera para el M2 se detalla el proceso de simulación gráficamente como se puede ver en la **Figura 4.3** mostrando su avance cada 0.02 s hasta el momento de la fractura. Los resultados de M2 se obtuvieron aplicando las cartas de control del **Tabla A. IX. 1**. Cartas de control de M2, obteniendo la siguiente curva como resultado.

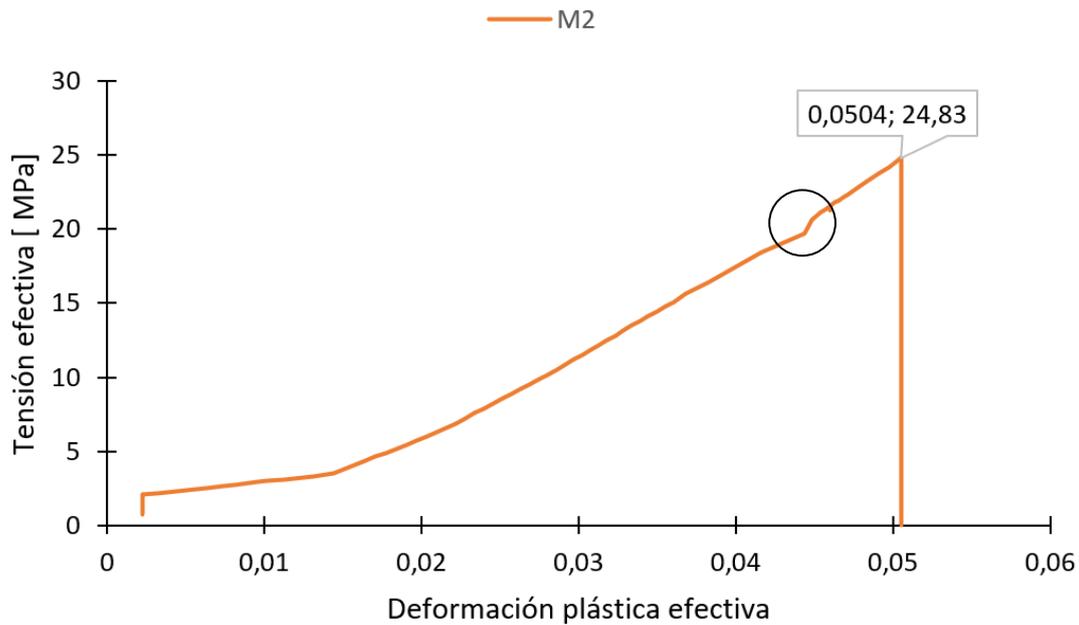


Figura 4.4 Curva output de esfuerzo vs deformación del M2

La **Figura 4.4** muestra la máxima deformación plástica efectiva observada es 0,050 con un esfuerzo máximo de 24,83 MPa que soportó la probeta en el ensayo simulado. Su deformación en la sección transversal de la probeta disminuye en el lado derecho, donde están establecidos los puntos móviles. En comparación al anterior material, este solo tiene un desfase el cual indica la fractura inicial de la matriz y el refuerzo se rompe justo en el punto de fallo.

4.1.2. Impacto del parachoque M1, M2 y M3

En la **Figura 4.5** se describe la transición de Impacto Peatón-Vehículo (CPC) con el protector (color azul) del parachoque caracterizado con el material compuesto M1. La simulación tuvo un tiempo de 15 ms, y el vehículo impacta a 40km/h en dirección del eje x contra la pierna derecha de un HBM FE en una posición percentil con vistas al eje y.

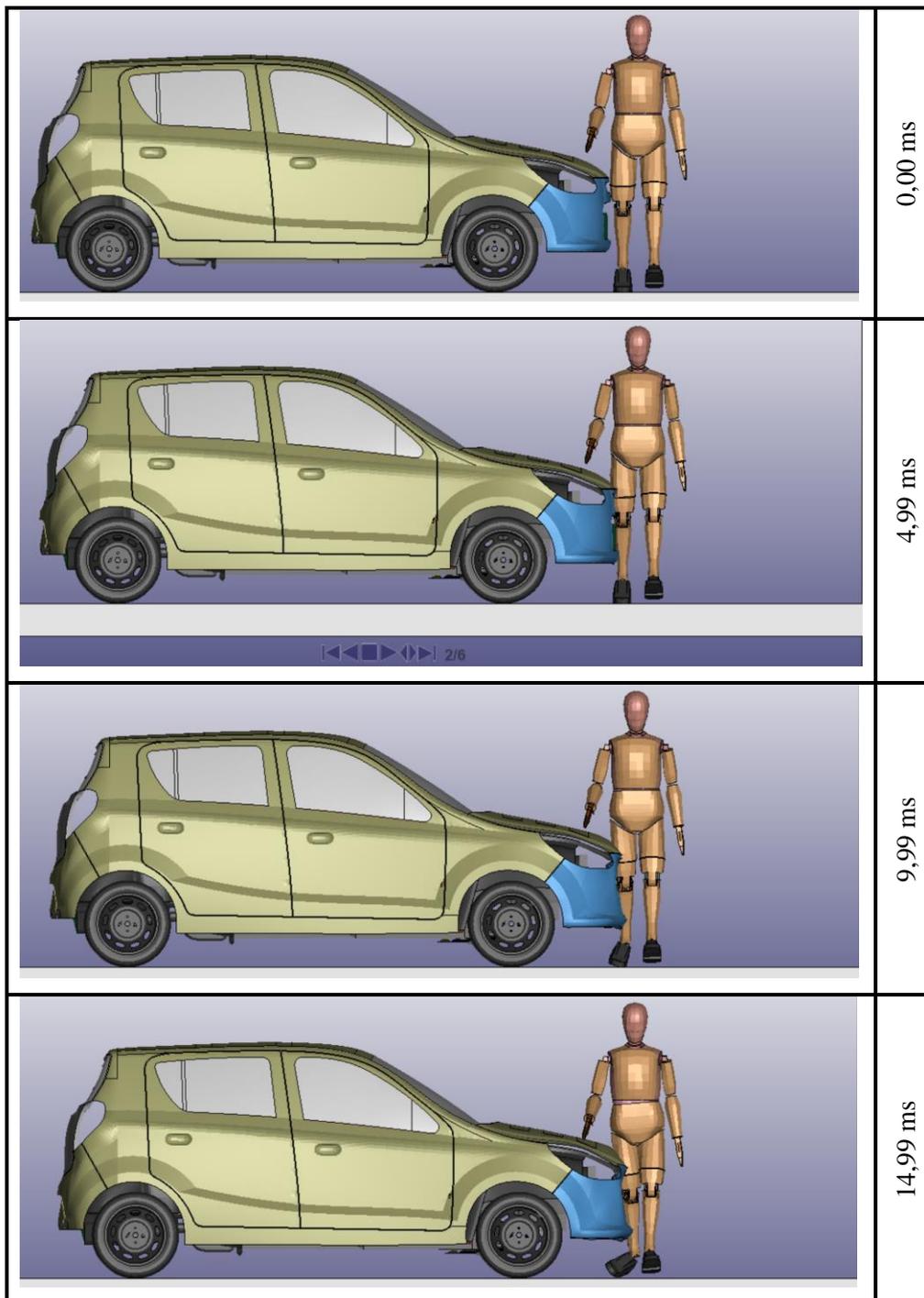


Figura 4.5 Transición del CPC con material del protector del parachoque M1

El resultado de la deflexión del protector del parachoque caracterizado con los tres compuestos M1, M2 y M3; impactados a una velocidad de 40 km/h contra la pierna derecha del HBM FE se muestra a continuación, en la **Figura 4.6**, **Figura 4.8** y **Figura 4.10**.

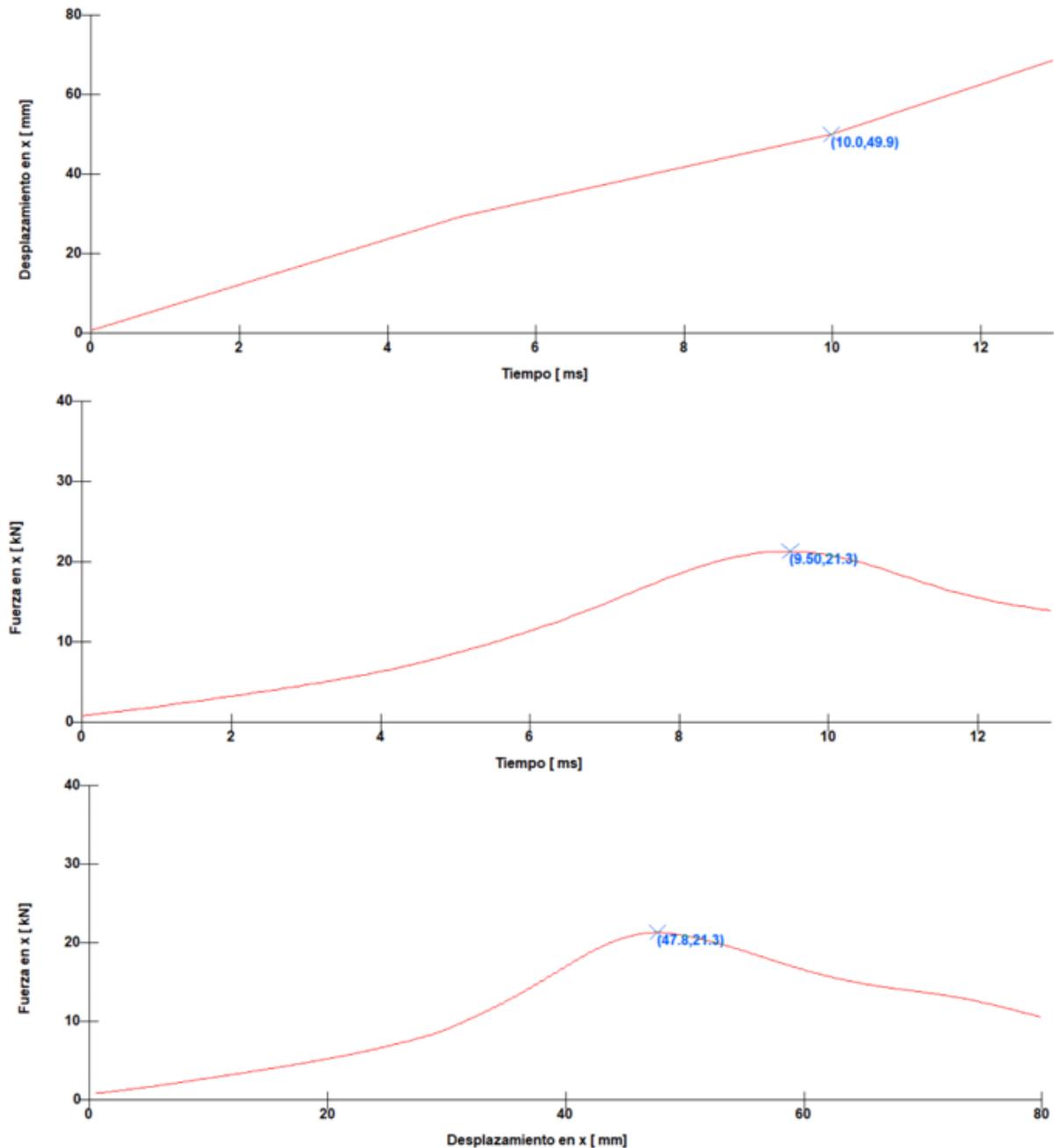


Figura 4.6 (a) Desplazamiento en X nodal central del primer contacto de M1 (mm/ ms) (b) Fuerza en X que se aplica en el parachoque M1 (kN/ ms) (c) Deflexión del parachoque M1 (kN/ mm)

En la **Figura 4.6** se muestra el desplazamiento y la fuerza en el eje x aplicados al protector parachoques M1 por el HBM FE. La **Figura 4.6 (a)** muestra el desplazamiento (mm/ms) en el punto de contacto con el protector del parachoque, a partir del primer nodo (ID 12866) de contacto donde se observa un desplazamiento constante de 49,9 mm hasta los 10,0 ms. La **Figura 4.6 (b)** muestra las fuerzas que actúan sobre todo el protector del parachoque, lo que demuestra que la pierna derecha del HBM FE ejerce una fuerza máxima de 21,3 kN en un

tiempo de 9,9 ms. La **Figura 4.6 (c)** muestra la combinación de las graficas (a) y (b), fuerza vs deflexión del protector del parachoque del M1 con unidades kN/mm. Se debe tener en cuenta que, el desplazamiento es analizado en el nodo 12866, en cambio la fuerza actúa sobre el protector y no sobre un nodo, por ende, el primer contacto tiene una fuerza máxima de 21,3 kN y con un desplazamiento 47,8 mm.

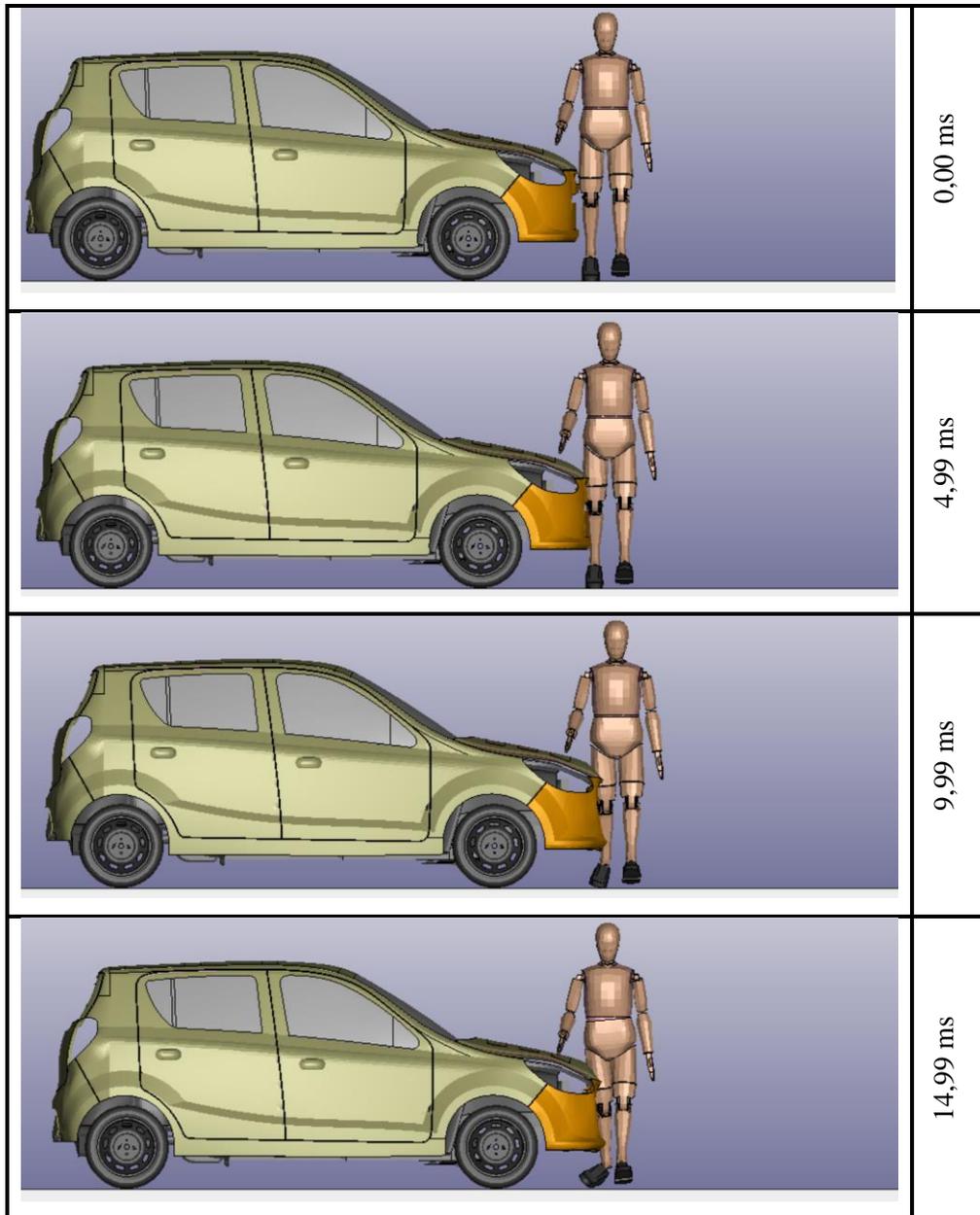


Figura 4.7 Transición del Impacto CPC con material del protector del parachoque M2

En la **Figura 4.7** se observa el progreso de simulación del CPC con el protector (color naranja) del parachoque caracterizado con el material compuesto M2. Es importante mencionar que sólo se analizó el movimiento en el eje x durante 15 ms y el vehículo impactó a 40km/h.

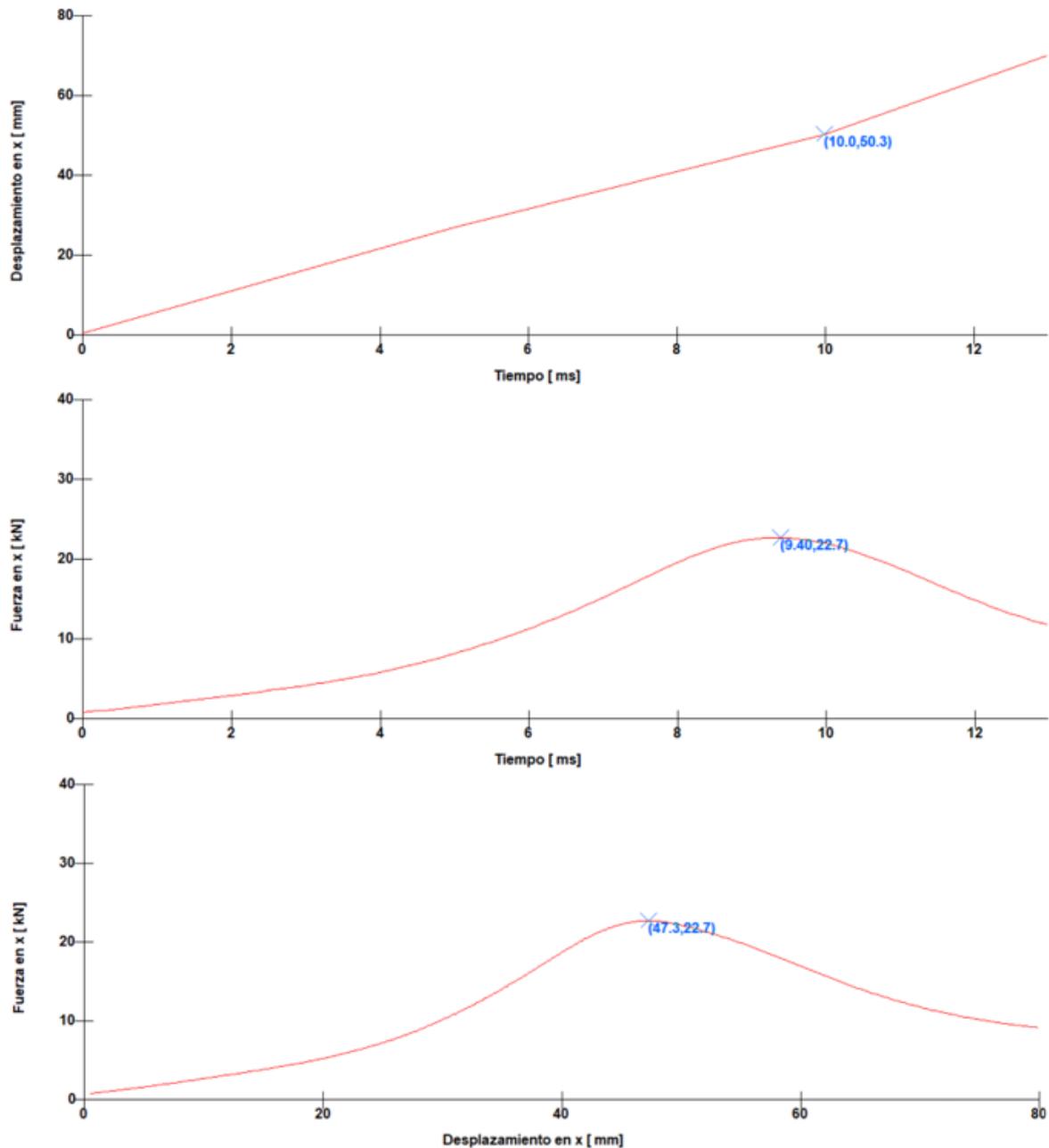


Figura 4.8 (a) Desplazamiento en X nodal central del primer contacto de M2 (mm/ ms) (b) Fuerza en X que se aplica en el parachoque M2 (kN/ ms) (c) Deflexión del parachoque M2 (kN/ mm)

Se observa en la **Figura 4.8** el desplazamiento y la fuerza sólo en el eje x, aplicados al parachoque M2. La **Figura 4.8 (a)** muestra el desplazamiento de 50,3 mm del primer nodo de contacto (12866) del protector del parachoque, en un tiempo de contacto igual a 10 ms. La **Figura 4.8 (b)** muestra las fuerzas que actúan sobre todo el protector del parachoque, obteniendo como resultado una fuerza máxima de impacto de 22,7 kN en un tiempo de 9,4 ms. La **Figura 4.8 (c)** detalla la fuerza y el desplazamiento en el primer contacto con la pierna del HBM FE con una fuerza máxima de 22.7 kN y un desplazamiento de 47.3mm.

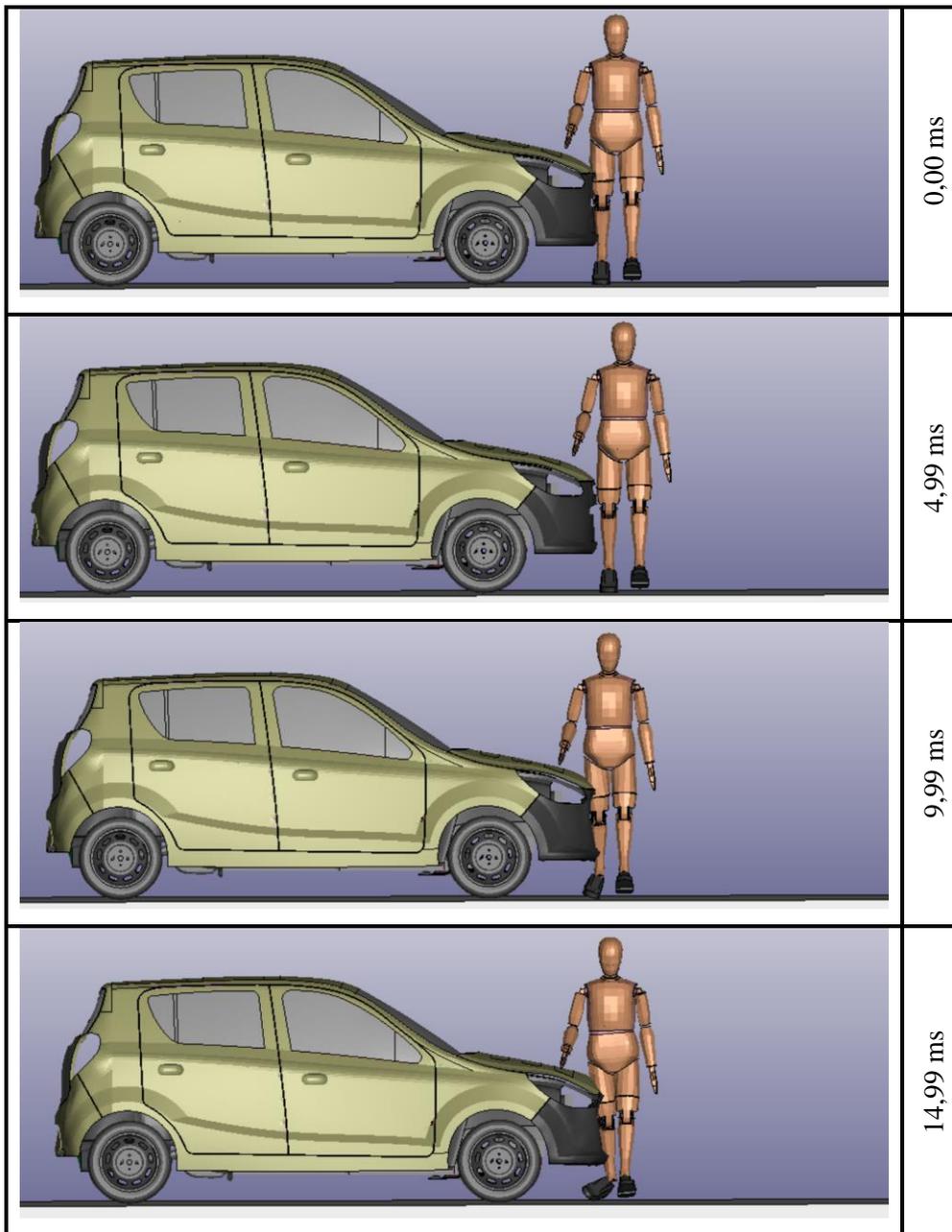


Figura 4.9 Transición del Impacto CPC con material del protector del parachoque M3

La **Figura 4.9** describe la transición de CPC con el protector (color plomo) del parachoque caracterizado con el material compuesto M3. La simulación duró 15 ms, se impacta a 40 km/h y se analizó solo la traslación en el eje X.

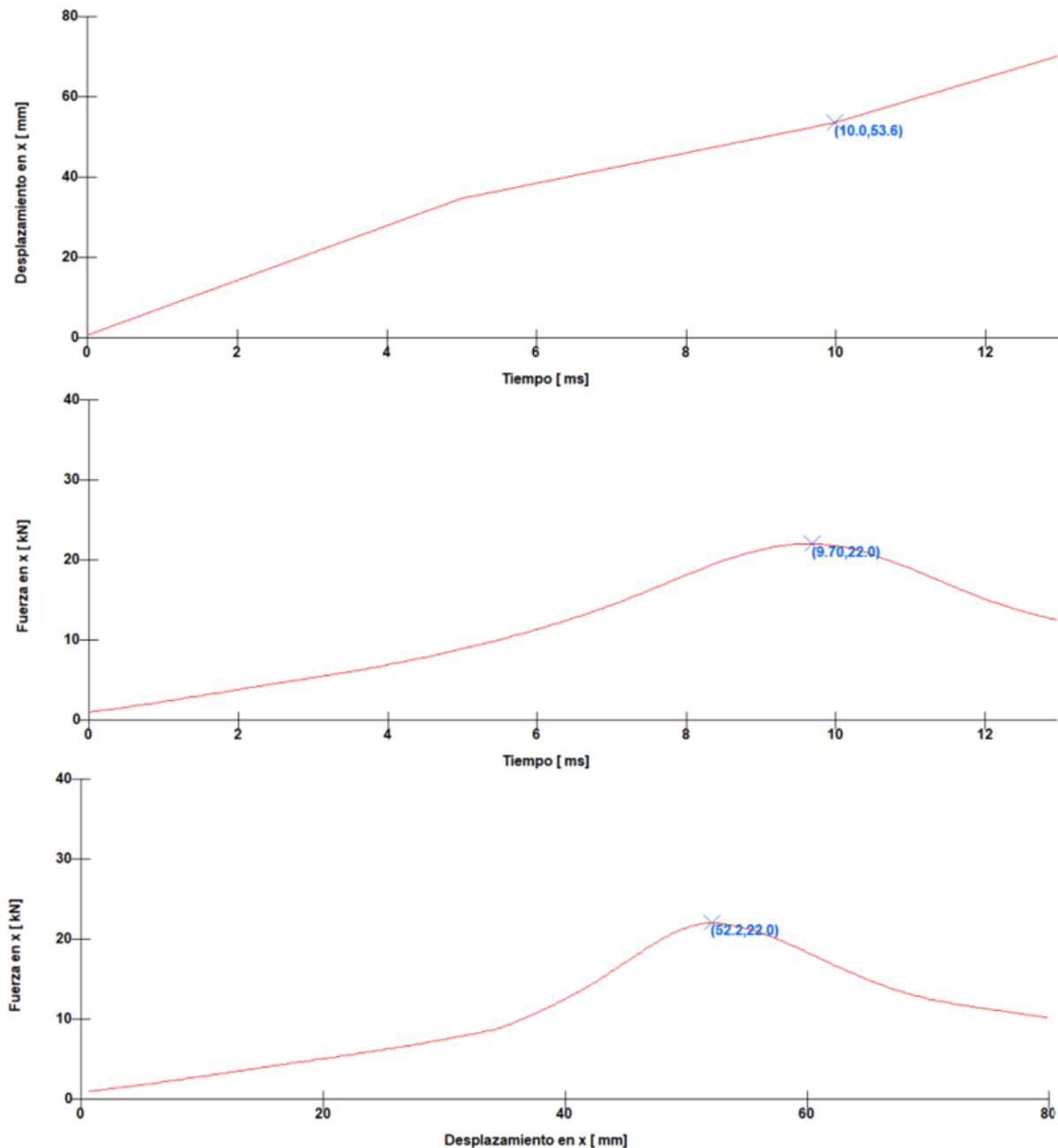


Figura 4.10 (a) Desplazamiento en X nodal central del primer contacto de M3 (mm/ ms) (b) Fuerza en X que se aplica en el parachoque M3 (kN/ ms) (c) Deflexión del parachoque M3 (kN/ mm)

La **Figura 4.10** muestra el desplazamiento y la fuerza del M3 en el protector del parachoque. La **Figura 4.10 (a)** muestra el desplazamiento (mm/ms) del nodo 12866, siendo este el primer punto de contacto entre el protector del parachoque y la pierna, tiene un desplazamiento de 53.6 mm en un tiempo de 10 ms. La **Figura 4.10 (b)** muestra la fuerza máxima de 22 kN aplicada de la pierna del HBM FE al protector del parachoque en un tiempo de 9.70 ms.

La **Figura 4.10 (c)** muestra la combinación de las graficas de fuerza vs deflexión del protector del parachoque del M3 con unidades kN/mm. En el primer contacto se registra una fuerza máxima de 22 kN y con un desplazamiento de 52.2 mm.

A continuación, en la **Figura 4.11**, se muestran los resultados del impacto de la pierna del HBM FE impactada por protector del parachoque caracterizado con los materiales M1, M2 y M3.

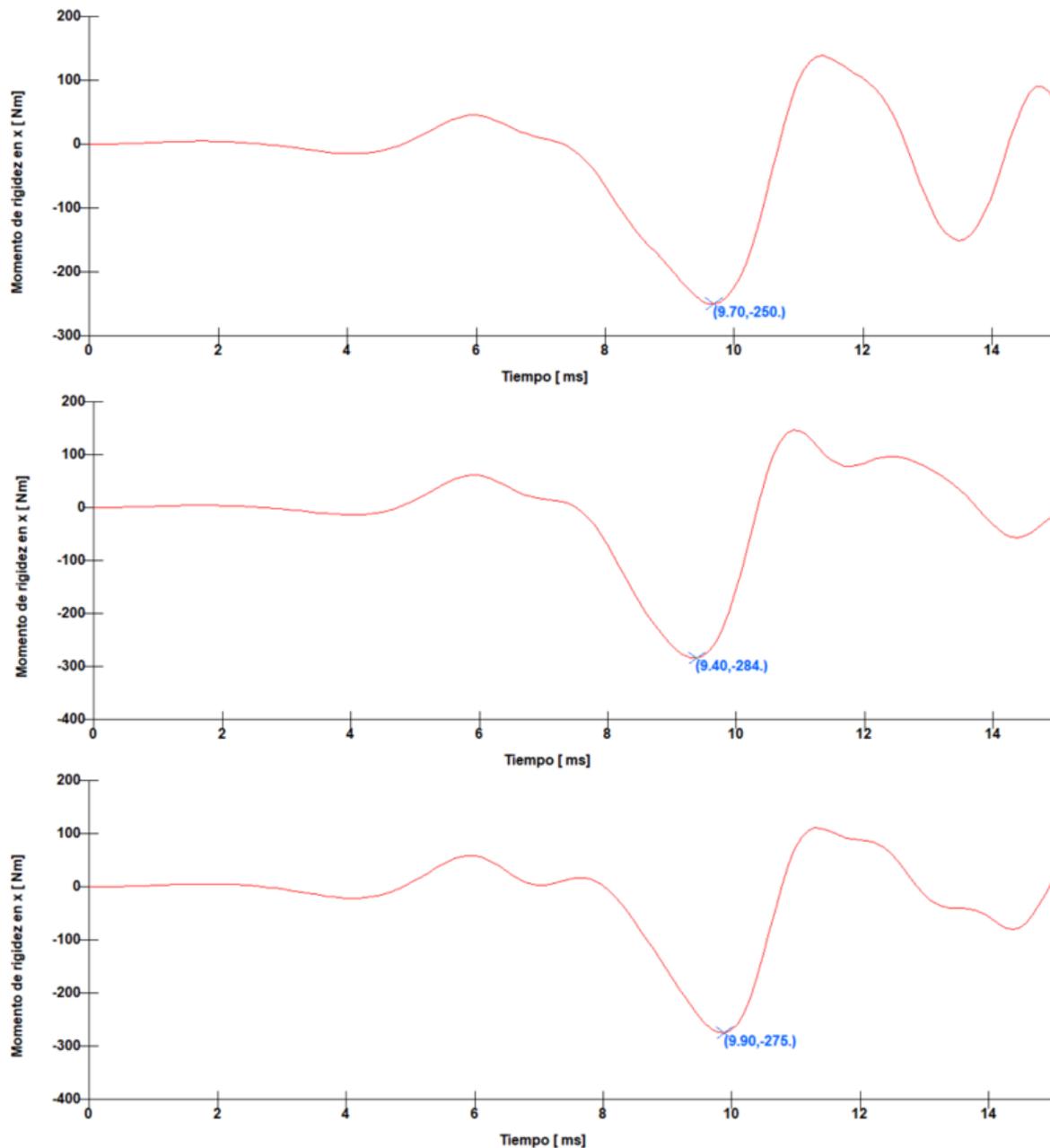


Figura 4.11 Momento de rigidez de la tibia (Nm/ ms) de (a) M1 (b) M2 (c) M3

La **Figura 4.11** muestra los momentos de rigidez de la tibia HBM golpeada por 3 parachoques de diferentes materiales M1, M2 y M3. La **Figura 4.11 (a)** muestra el Momento

de rigidez máximo (M_{rmax}) determinado en el HBM, correspondiente a 250 Nm aplicados por el parachoques M1 en un tiempo de impacto de 9,7 ms. La **Figura 4.11 (b)** muestra el M_{rmax} aplicado al HBM, correspondiente a 284 Nm aplicados por el parachoques M2 en un tiempo de 9,4 ms. **Figura 4.11 (c)** muestra el M_{rmax} aplicado al HBM, correspondiente a 275 Nm aplicados por el parachoques M3 en un tiempo de 9,9 ms. Este impacto se analizó en la articulación StR-20 de la parte superior de la tibia de la pierna derecha del maniquí de cuerpo humano numérico.

4.2. Discusión de resultados

4.2.1. Probeta real vs modelada

Para la discusión de resultados tenemos dos variables a comparar: la primera es la curva de entrada obtenida del ensayo físico que se le asignó a la probeta la cual la denominamos para este apartado como ASTM, y la segunda, es la curva saliente de la simulación denominada como FEA. Esta comparativa será para los dos materiales M1 y M2.

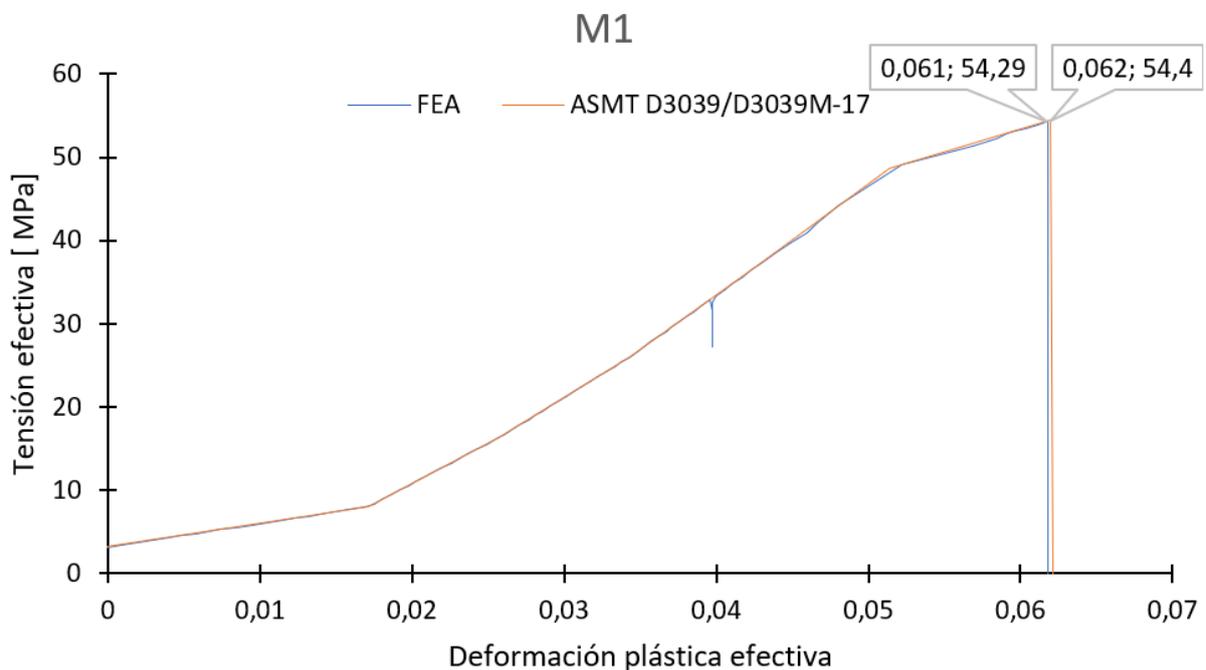


Figura 4.12 Curva input de esfuerzo vs deformación del M1

Como se puede observar en la **Figura 4.12** hay dos curvas sobrepuestas. Para la curva ASTM se muestra una deformación plástica establecida en un valor máximo 0,062, mientras que en la de la curva FEA se registra un valor máximo de 0,061; entonces se calculó un margen de error de 1,61% en relación con el dato de las gráficas. Por otro lado, el valor máximo de tensión de la curva de ASTM es 54.4 MPa a diferencia del valor de tensión de la curva FEA es de 54,29 MPa; con estos valores se tiene un margen de error 0.20% con relación al valor real de tensión.

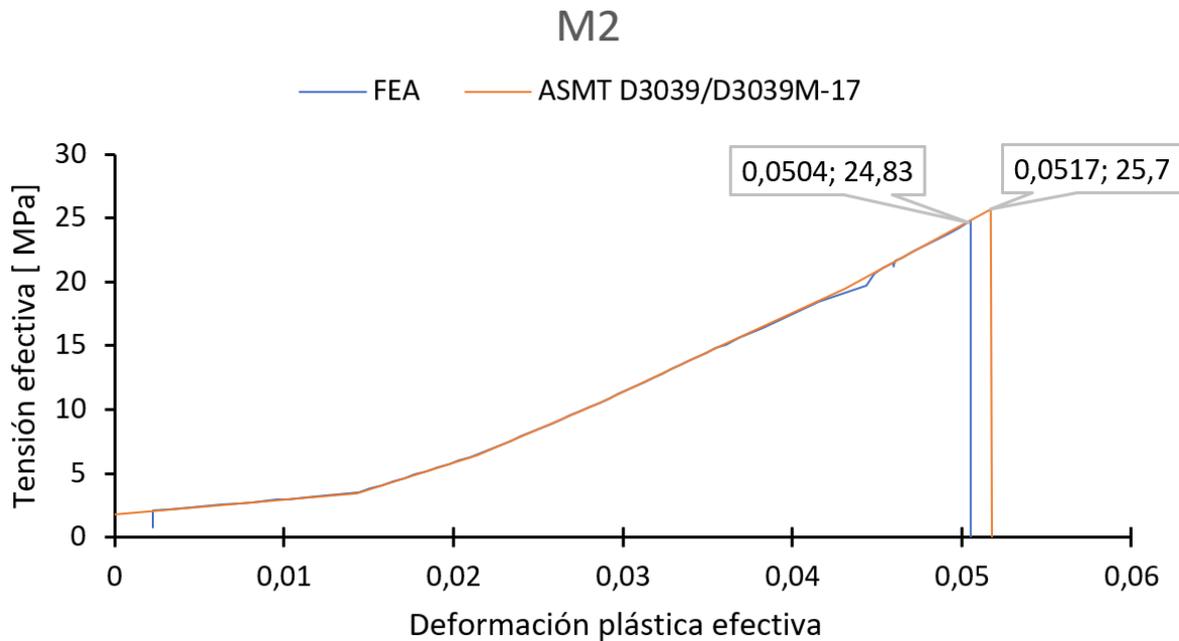


Figura 4.13 Curva input de esfuerzo vs deformación del M2

Por otra parte, en la **Figura 4.13** se muestra el valor de la deformación plástica de entrada de la curva ASTM en 0,0517, mientras que el valor de la curva FEA es de 0,050; entonces se determina el margen de error de 2,5% en relación con el dato. En cambio, el valor máximo de tensión de la curva ASTM es 25,7 MPa el cual es mayor al valor encontrado en la curva FEA con un resultado de 24,83 MPa; con estos resultados se obtiene un margen de error de 3,39% con relación al valor real de tensión.

4.2.2. Impacto M1 vs M2 vs M3

El análisis de la simulación CPC se tomó los resultados obtenidos en el impacto de la pierna del HBM FE contra el protector del parachoque de los tres materiales compuestos M1, M2 y M3 en la **Figura 4.14** se estudia el impacto en protector del parachoque y en la **Figura 4.15** se examinó como se afecta la según el material con el que se choca.

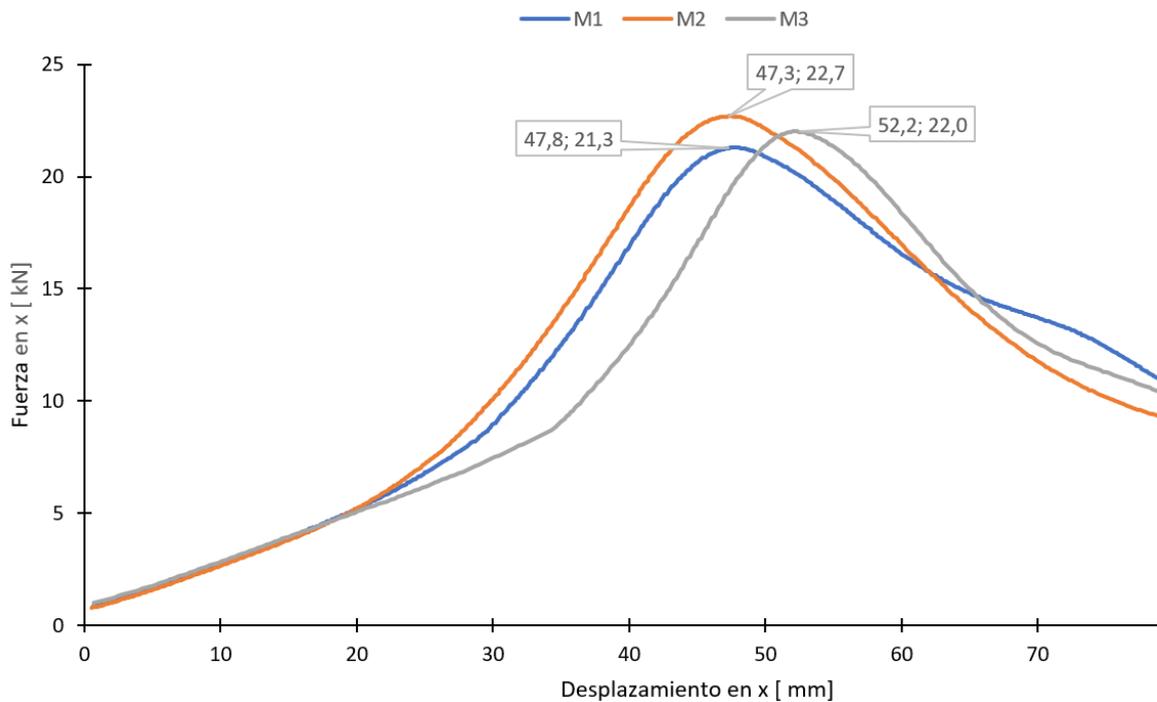


Figura 4.14 Comparación de la deflexión de los parachoques M1, M2 y M3

En la **Figura 4.14** se compara el desplazamiento de los tres protectores del parachoque caracterizados con los materiales M1, M2 y M3, para M1 con un desplazamiento de 47,8 mm encontrando una similitud cercana al M2 con un valor de 47,3 mm; para el M3 el desplazamiento se aleja a los valores de los dos materiales anteriores con un valor de 52,2 mm. Las propiedades mecánicas como el Módulo de Young para el M3 con un valor de 1000 MPa hace que sea el más afectado dentro del desplazamiento en comparación con el M1 y M2 los cuales sus desplazamientos son similares, pero sus propiedades mecánicas no lo son; esta variación de desplazamiento se da por la fracción volumétrica que tienen los materiales compuestos.

De lo anterior, resulta que se debe de abordar el tema de la reparabilidad el cual se relacionado con la fuerza y desplazamiento aplicado al protector de parachoque, por ende, se toma la bibliografía de un material compuesto con matriz polimérica y refuerzo de Fibra de Vidrio (GF) el cual determina que, en el caso de colisiones ligeras, donde solo sea afectada la matriz el proceso de reparabilidad no afectara las propiedades mecánicas; este proceso consiste en aplicar el mismo material de la matriz en la parte afectada. Por otro lado, si el impacto es leve, el material llega a fracturar la matriz y el refuerzo, se podrá realizar una reparación la cual consiste aplicar capas del polímero y refuerzo hasta que se cubra la parte fracturada, pero solo será de manera estética ya que sus propiedades mecánicas originales se pierden debido a la fracturado la fibra. De esta manera se podrá aplicar el criterio de reparabilidad para el material M1 y M2.

Para el análisis del momento en la tibia la línea base de donde se partió para poder comparar M1 y M2 fue la validación del M3 creado por (George Mason University, 2018), respaldando con los valores límites de (ECE/TRANS/180/Add.9/Amend.2, 2019, p. 35; Euro NCAP, 2022a, p. 7). En la **Figura 4.11 (c)** muestra un valor de 275 Nm en la tibia impactada por el protector caracterizado con el M3. Entonces, este valor está dentro de los límites 275 Nm hasta 320 Nm de las especificaciones EURO NCAP y 272 Nm hasta 340 Nm de la GTR. Por ende, esta base es la norma comparativa para los materiales M1 y M2.

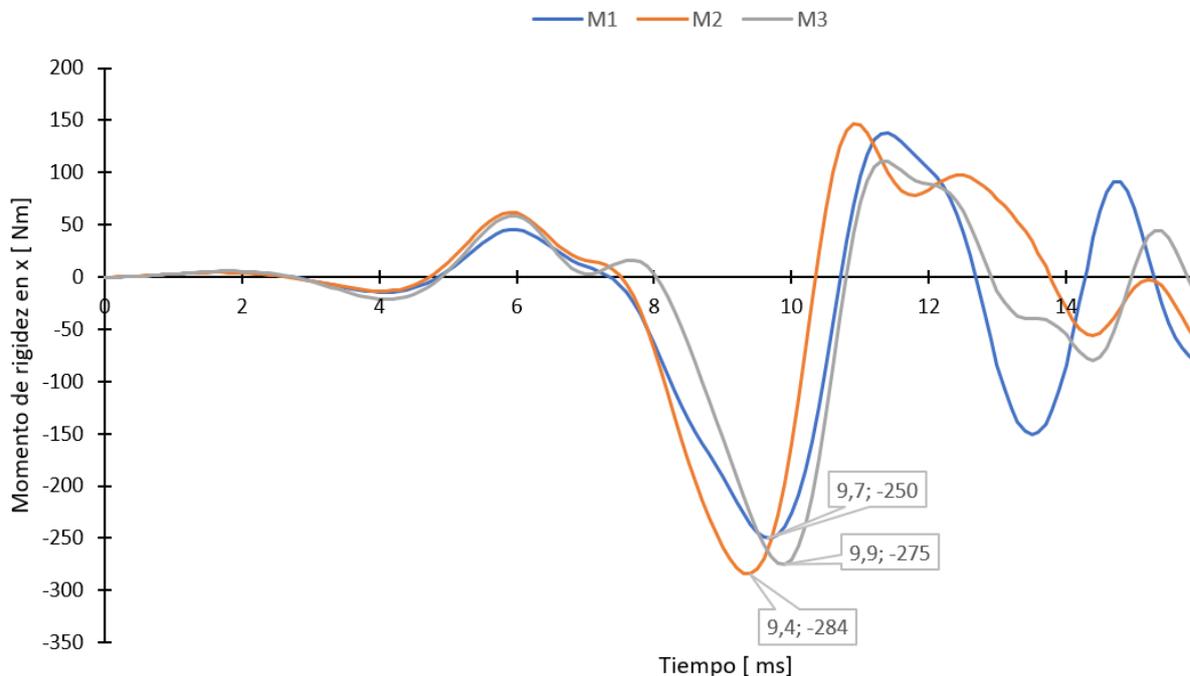


Figura 4.15 Comparación del momento de rigidez de las piernas impactadas con los parachoques M1, M2 y M3

En la **Figura 4.15** se compara el daño que causa al impactar la pierna derecha del HBM FE con el protector caracterizado del parachoque con M1, M2 y M3 donde se descubrió que: M1 con un momento de 250 Nm causa poco daño a la pierna, y se encuentra fuera de los límites de NCAP y GTR. Mientras que M2 igual a 284 Nm causa mayor que M1, pero se encuentra dentro de los parámetros de los reglamentos internacionales. También se observa oscilaciones similares en la trayectoria de M1, M2 y M3 que se ven afectadas por las diferentes características que presentan los materiales.

Dentro de la zona de deformación para peatones, se analizaron las trayectorias del primer contacto en colisiones peatón-vehículo que según (Bellavia & Mariotti, 2007, p. 7; Gothenburg & Sweden, 2015, p. 18; Schejbalová et al., 2012, p. 3; Simms & Wood, 2006b, p. 4) se da dentro de 0,3-20 ms. En la **Figura 4.15** se observa el daño peatonal máximo se produjo en un tiempo de contacto de M2 en 9,4 ms, M1 igual 9,7 ms y M3 igual 9,9 ms.

CAPÍTULO V

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Las probetas de tracción fueron validadas por Análisis de Elementos Finitos (FEA) en el software Ls-Dyna /Ls-PrePost, obteniendo el esfuerzo máximo de tracción para el material compuesto de resina epoxi con fibra de cabuya (M1) de 54,29 MPa y para resina epoxi con fibra de caña de azúcar (M2) de 24,83 MPa, con un error de 0,02% y 3,39% respectivamente, respecto al ensayo experimental.

En el proceso de selección del protector del parachoque, se obtuvo un vehículo de Elementos Finitos (FE) de NHTSA validado para impacto frontal, se utilizó como línea base el material termoplástico Convencional (M3) del protector del vehículo de NHTSA que se caracterizó en un modelo simplificado del Suzuki 800 para ser sometido a pruebas de impacto en la parte inferior de las piernas de un maniquí FE siguiendo el protocolo de evaluación de NCAP, a una velocidad de 40 km/h, dando como resultado un momento de 275 Nm, validando el material con la normativa y obtuvimos una línea base para la comparación de M1 y M2.

En el software de Ls-Dyna /Ls-PrePost se realizó la simulación de impacto de la parte inferior de la pierna de un peatón contra el protector caracterizado del parachoque con los materiales compuestos M1 y M2, donde los dos modelos se simularon bajo las mismas condiciones NCAP del reglamento GTR9 Seguridad Peatonal, igual que el M3; para el M1 se obtuvo un momento 250 Nm y para el M2 un valor de 284 Nm, determinando que el M1 no es óptimo y el M2 si cumple con los límites de la normativa.

En el modelo FE del Suzuki 800 donde se caracterizaron los tres materiales M1, M2 y M3 en el protector del parachoque, los resultados de desplazamiento para M1 y M2 en comparación al M3 son: 47,8 mm, 47,3 mm y 52,2 mm respectivamente. Las propiedades mecánicas como el Módulo de Young para el M3 con un valor de 1000 MPa hacen que su desplazamiento sea el mayor de los tres materiales, en cambio para M1 y M2 son materiales con un bajo módulo de Young de 876 MPa y 520 MPa, esfuerzo a la tracción de 53 MPa y 24,8 MPa y su plasticidad efectiva de 0,60 y 0,50 respectivamente; estos valores hacen que sus

desplazamientos sean similares debido a la fracción volumétrica. Para concluir, el material compuesto M1 no es apto para construir por su fragilidad y M2 si es apto por su resistencia.

5.2 Recomendaciones

Para el análisis de resultados en el post procesamiento en el modelo se debe tomar los elementos que se eliminan en el proceso de la simulación porque hay presenta el límite de elasticidad del material. En cambio, si se analiza en un elemento alejado a la fractura los resultados se distorsionan por el efecto de la simulación. También al momento de discretizar el modelo FE es necesario tener un criterio de mallado, para ello se puede hacer uso del software ANSA el cual ayuda a discretizar por elementos de una forma didáctica.

En futuros estudios es relevante determinar las unidades en las cartas de control específicamente en las de material y sección, ya que se caracteriza las propiedades de las partes que se van a someter al análisis. Si las unidades no están en una misma escala el análisis arroja datos erróneos o puede aumentarse o reducirse el tiempo de simulación. Por otro lado, si la simulación es correcta, en el post procesamiento se recomienda aplicar filtros de paso 60, 180 según corresponda el caso que especifica la normativa SAE (J. K. Reichert & Landolt, 1981).

Para futuras investigaciones validar los ensayos mecánicos de la tesis “Caracterización de un material compuesto a base de resina epóxica reforzado con fibra de cabuya comparado con la misma resina reforzado con fibra de caña de azúcar” mediante el software Ls Prepost de Ls Dyna y comparar los resultados con el impacto de un protector del parachoque y peatón.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abán, H. (2020). *Tipos de parachoques en términos de material utilizado*.
<https://blog.laminasyaceros.com/blog/tipos-de-parachoques-en-t%C3%A9rminos-de-material-utilizado>
- Abdellaoui, H., Raji, M., Bouhfid, R., & Qaiss, A. el kacem. (2018). Investigation of the deformation behavior of epoxy-based composite materials. In *Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* (pp. 29–49). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102293-1.00002-4>
- ACEA. (2019). *Road Safety*. https://roadsafetyfacts.eu/themes/ACEA-Road-Safety-Facts/img/ACEA_Road_Safety.pdf
- Aeade, & Autoplus. (2021). *Anuario 2021*. <https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2022/03/Anuario-Aeade-2021.pdf>
- Ansys. (2022). *Ansys LS-DYNA Student*. <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-ls-dyna-student>
- ANSYS. (2022). *HÍBRIDO III PERCENTIL 50 HOMBRES DE PIE*.
<https://lsdyna.ansys.com/dummies-d83/>
- Anurag, S., Thomas, R., Rongieras, F., & Beillas, P. (2013). Submission Number Observations on Pedestrian Pre-Crash Reactions during Simulated Accidents. In *Stapp Car Crash Journal* (Vol. 57).
https://thomasrobertresearch.files.wordpress.com/2014/05/sonietal-13s-16_formatted_final.pdf
- ASMT. (2011). *Standard Guide for materials*.
<https://oss.jishulink.com/upload/201912/6ace19c3bc884fd1af6fe5f65880fa2e.pdf>
- Auto Crash. (2017). *En la ingeniería está la diferencia - Revista Autocrash*.
<https://www.revistaautocrash.com/la-ingenieria-esta-la-diferencia/>
- Auto Crash. (2020). *¿Por qué el diseño y el material de la carrocería es fundamental en la seguridad del vehículo? - Revista Autocrash*. <https://www.revistaautocrash.com/por-que-el-diseno-y-el-material-de-la-carroceria-es-fundamental-en-la-seguridad-del-vehiculo/>
- Auto Foam. (2018). *Chasis - Diseño Automotriz UFT*.
<https://dautomotrizuft.weebly.com/chasis.html>
- AutoDesk. (2020). *FEM*.

- Automotive Engineering. (2016). *First crack at Le Mans-good enough to win?/ Multi-material design for strength & mass reduction*.
<https://www.nxtbook.com/nxtbooks/sae/16AUTP06/index.php#/p/30>
- Basith, M. A., Reddy, N. C., Uppalapati, S., & Jani, S. P. (2021). Crash analysis of a passenger car bumper assembly to improve design for impact test. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1684–1690. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.561>
- Bellavia, G., & Mariotti, G. V. (2007). *Multibody Numerical Simulation for Vehicle-Pedestrian Crash Test and Analysis of Characteristic Parameters*.
- Bierry, G. (2020). Traumatismo esquelético-Capítulo 10 - Rodilla. In *Skeletal Trauma* (pp. 311–360). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85475-7.00013-9>
- Blundell, Michael., Harty, Damian., & Society of Automotive Engineers. (2004). *Multibody systems approach to vehicle dynamics*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
<http://160592857366.free.fr/joe/ebooks/Automotive%20engineering%20books/Automotive%20Engineering%20Powertrain,%20Chassis%20System%20and%20Vehicle%20Body.pdf>
- Castro, M. (2020). ¿Qué es un chasis? Cuáles son los tipos de chasis automotriz que hay y las partes de un chasis? <https://automexico.com/mantenimiento/que-es-un-chasis-de-carro-aid5447>
- CCSA-George Mason University | College of Science. (2018a). *2015 Toyota Camry Detailed Finite Element Model*.
- CCSA-George Mason University | College of Science. (2018b). *2015 Toyota Camry Detailed Finite Element Model*.
- Center for Collision Safety and Analysis. (2018). *Toyota Camry FEM*.
<https://www.ccsa.gmu.edu/models/2015-toyota-camry/>
- Chen, H., Poulard, D., Crandall, J. R., & Panzer, M. B. (2015). *PEDESTRIAN RESPONSE WITH DIFFERENT INITIAL POSITIONS DURING IMPACT WITH A MID-SIZED SEDAN*. <https://www-esv.nhtsa.dot.gov/proceedings/24/files/24ESV-000391.PDF>
- Chevrolet. (2002). *Manual de Mantenimiento Chevrolet Esteem*.
- Consejo Nacional De Planificación. (2017). *Plan Nacional Para El Buen Vivir 2017-2021*.
<https://www.gobiernoelectronico.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/09/Plan-Nacional-para-el-Buen-Vivir-2017-2021.pdf>
- D 3039/D 3039M – 00. (2002). *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials-ASTM International*.

- DERCO. (2022, March). *Cotizar Suzuki Alto 800 ABS PS 2023 • DERCO PERÚ*.
<https://www.derco.com.pe/catalogo-derco/autos/suzuki/alto-800/abs-ps/2023/687/cotizar>
- ECE/TRANS/180/Add.9. (2009). *PEDESTRIAN SAFETY*.
<https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29registry/EC-E-TRANS-180a9e.pdf>
- ECE/TRANS/180/Add.9/Amend.2. (2019). *Addendum 9: United Nations Global Technical Regulation No. 9-United Nations Global Technical Regulation on Pedestrian Safety*.
<https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29registry/EC-E-TRANS-180a9am2e.pdf>
- E/ECE/324/Rev.2/Add.126-E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.126. (2013). *Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to their pedestrian safety performance*.
- E/ECE/TRANS. (1993). *UNIFORM PROVISIONS CONCERNING THE APPROVAL OF VEHICLES WITH REGARD TO THE BEHAVIOUR OF THE STRUCTURE OF THE IMPACTED VEHICLE IN A HEAD-ON COLLISION*.
https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/r033r1e_1.pdf
- E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.136/Rev.1. (1995). *Uniform provisions concerning the approval of passenger cars in the event of a frontal collision with focus on the restraint system*. <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2017/R137r1e.pdf>
- Elliott, J. R., Simms, C. K., & Wood, D. P. (2012). Pedestrian head translation, rotation and impact velocity: The influence of vehicle speed, pedestrian speed and pedestrian gait. *Accident Analysis and Prevention*, 45, 342–353.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.07.022>
- Euro NCAP. (2014). *Euro NCAP | Impacto en la parte inferior de las piernas*.
<https://www.euroncap.com/es/seguridad-en-los-veh%C3%ADculos/descripci%C3%B3n-de-las-valoraciones/protecci%C3%B3n-para-los-usuarios-vulnerables-de-la-carretera-vru/impacto-en-la-parte-inferior-de-las-piernas/>
- Euro NCAP. (2015). *Euro NCAP | Offset-Deformable Barrier - ODB*.
<https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/adult-occupant-protection/previous-tests/offset-deformable-barrier/>
- Euro NCAP. (2020). *Protección para los usuarios vulnerables de la carretera (VRU)*.
<https://www.euroncap.com/es/seguridad-en-los-veh%C3%ADculos/descripci%C3%B3n-de-las-valoraciones/protecci%C3%B3n-para-los-usuarios-vulnerables-de-la-carretera-vru/>

- Euro NCAP. (2022a). *ASSESSMENT PROTOCOL*.
<https://cdn.euroncap.com/media/70316/euro-ncap-assessment-protocol-vru-v112.pdf>
- Euro NCAP. (2022b). *VULNERABLE ROAD USER TESTING PROTOCOL*.
<https://cdn.euroncap.com/media/75475/euro-ncap-vru-testing-protocol-v902.pdf>
- Federación Iberoamericana de Asociaciones de Víctimas Contra la Violencia Vial. (2019). *Informe sobre la Década de Acción para la Seguridad Vial. Avances y retos desde la visión de las asociaciones de víctimas viales en Iberoamérica*.
[https://contralaviolenciavial.org/uploads/INFORME_DECADA_DE_ACCION_\(FICVI\)_web.pdf](https://contralaviolenciavial.org/uploads/INFORME_DECADA_DE_ACCION_(FICVI)_web.pdf)
- Ganesh, G. (2022). *How Crumple Zones Work? | Explained*. <https://gomechanic.in/blog/how-crumple-zones-work-explained/>
- Gilfillan, W. N., Nguyen, D. M. T., Sopade, P. A., & Doherty, W. O. S. (2012). Preparation and characterisation of composites from starch and sugar cane fibre. *Industrial Crops and Products*, 40(1), 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.02.036>
- Göthenburg, & Sweden. (2015). *THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY in MACHINE AND VEHICLE SYSTEMS Head kinematics in car-pedestrian crashes The influence of sliding, spine bending, elbow and shoulder impacts*.
- Guerrero. (2019). *Cabuya Blanca (Furcraea andina)* · iNaturalist Ecuador.
<https://ecuador.inaturalist.org/taxa/552062-Furcraea-andina>
- Humanetics. (2022). *aPLI Legform – Pedestrian Legform Impactor*.
<https://www.humaneticsgroup.com/products/anthropomorphic-test-devices/pedestrian/apli-legform>
- Ideen Sadreghighi. (2022). *Computer Aided Design (CAD)*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12634.62408>
- IIHS. (2020). *About our tests*. Frontal Crash Test. <https://www.iihs.org/ratings/about-our-tests#frontal-crash-tests>
- Kalliske, I., & Friesen, F. (2000). *IMPROVEMENTS TO PEDESTRIAN PROTECTION AS EXEMPLIFIED ON A STANDARD-SIZED CAR*.
https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww-nrd.nhtsa.dot.gov%2Fpdf%2Fesv%2Fesv17%2Fproceed%2F00143.pdf&psig=AOvVaw0mzINp3s-w2eNZ_TgkjKwe&ust=1669813798209000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjhxqFwoTCPj-yqS70_sCFQAAAAAdAAAAABAq

- Kerni, L., Singh, S., Patnaik, A., & Kumar, N. (2020). A review on natural fiber reinforced composites. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1616–1621. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.851>
- Klug, C., & Ellway, J. (2022). *TB 024 - Pedestrian Human Model Certification v3.0.1*. <https://cdn.euroncap.com/media/66108/tb-024-pedestrian-human-model-certification-v301.pdf>
- Klug, C., Feist, F., Raffler, M., Sinz, W., Petit, P., Ellway, J., & Ratingen, M. (2017). *Development of a Procedure to Compare Kinematics of Human Body Models for Pedestrian Simulations*. <http://www.ircobi.org/wordpress/downloads/irc17/pdf-files/64.pdf>
- km77. (2020). *Hyundai i10 | Precios, equipamientos, fotos, pruebas y fichas técnicas - km77.com*. <https://www.km77.com/coches/hyundai/i10/listado-completo>
- Latin NCAP. (2015, March 6). *Ecuador es el primer país de América Latina y el Caribe en adoptar normativa ONU*. <https://www.latinncap.com/es/area-de-prensa/noticia/854f9919e59f98/ecuador-es-el-primer-paa%C2%ADs-de-ama%C2%A9rica-latina-y-el-caribe-en-adoptar-normativa-onu>
- Li, G., Yang, J., & Simms, C. (2015). The influence of gait stance on pedestrian lower limb injury risk. *Accident Analysis and Prevention*, 85, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.07.012>
- Miskolczi, N. (2013). *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*. <https://books.google.com.ec/books?id=RYNwAgAAQBAJ&pg=PA44&lpg=PA44&dq=10.1533/9780857098041.1.44&source=bl&ots=vkTyM-tgqN&sig=ACfU3U0NfFdiT0nqJXlw7JVdn8lf6oZB6A&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjIo7Oksbr8AhUYRDABHYIvAsoQ6AF6BAgIEAM#v=onepage&q=10.1533%2F9780857098041.1.44&f=false>
- Mizuno, Y., & Ishikawa, H. (2001). *SUMMARY OF IHRA PEDESTRIAN SAFETY WG ACTIVITIES – PROPOSED TEST METHODS TO EVALUATE PEDESTRIAN PROTECTION AFORDED BY PASSENGER CARS*. https://lindseyresearch.com/wp-content/uploads/2019/12/NHTSA-2019-0112-0009-2_ESV_2001_IHRA_WG_Activities_00136.pdf
- Mundo Motor. (2018a). *Parachoques: Importancia, Tipos, Instalacion Y Beneficios De Seguridad*. <https://www.mundodelmotor.net/parachoques/>

- Mundo Motor. (2018b). *Parachoques: Importancia, Tipos, Instalacion Y Beneficios De Seguridad*. <https://www.mundodelmotor.net/parachoques/>
- Muñoz, J. (2022). *Suzuki Alto 800: El auto más barato de Chile 2022 - Autofact*. <https://www.autofact.cl/blog/comprar-auto/mercado/auto-mas-barato>
- Naranjo, R. (2021). *TECNOLOGÍA DE MANUFACTURA DE CARROCERÍAS DE VEHÍCULOS TIPO GO-KARTS CON EL USO DE MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ EPOXICON FIBRA BIODEGRADABLE YUTE*. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/33069>
- NTE INEN 2715. (2013). *VEHÍCULOS AUTOMOTORES SEGURIDAD DE LOS PEATONES. REQUISITOS Y METODO DE ENSAYO*. https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_2715.pdf
- Oñate, E., Díez, P., Zárate, F., & Larese, A. (2008). *Computacional Mechanics INTRODUCTION TO THE FINITE ELEMENT METHOD*. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/184007/FEM-Book.pdf>
- Organización Mundial de la Salud. (2017). *Paquete de medidas técnicas de seguridad vial*. [http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/255308/9789243511702-spa.pdf;jsessionid=F7E8C5A4CD158456A35C2D309ED0C800?sequence=1#:~:text=Un paquete de medidas técnicas,resultado sanitario específico \(12\)](http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/255308/9789243511702-spa.pdf;jsessionid=F7E8C5A4CD158456A35C2D309ED0C800?sequence=1#:~:text=Un paquete de medidas técnicas,resultado sanitario específico (12))
- Pastuszak, P. D., & Muc, A. (2013). Application of composite materials in modern constructions. *Key Engineering Materials*, 542, 119–129. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.542.119>
- Peña, V., & Alejandro, D. (2018). *SIMULACIÓN NUMÉRICA DE CONTACTO ENTRE SUPERFICIES CON MOVIMIENTO RELATIVO PARA PREDICCIÓN DE DESGASTE EN COJINETES DE FRICCIÓN DE ALEACIÓN DE ALUMINIO*. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19315/1/CD-8684.pdf>
- Pickett, A. (2019). *Introduction to Process and Mechanical Modelling of Engineering Composites Part 2. Fundamentals*.
- Ponce, L. (2020). *CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO A BASE DE RESINA EPÓXICA REFORZADO CON FIBRA DE CABUYA COMPARADO CON LA MISMA RESINA REFORZADO CON FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR*. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10299>
- Pozo, W., & Valencia, B. (2020). *UTILIZACIÓN DE LA FIBRA DE CABUYA PARA REFORZAR UNA MATRIZ POLIMÉRICA Y CONSEGUIR UN MATERIAL*

COMPUESTO PARA USO AUTOMOTRIZ.

<http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10645>

- Qiu, W., & Li, W. (2021). Non-destructive characterization and discrimination of vehicle bumpers fragments in forensic science using molecular spectral fusion analysis and chemometrics. *Microchemical Journal*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106299>
- Ratingen, M., & Williams, A. (2020). *AN UPDATE ON THE EURO NCAP SAFETY RATINGS PROGRAM*. <https://cdn.euroncap.com/media/17733/airbag2014-paper-euro-ncap-m-van-ratingen.pdf>
- RCAR. (2011). *RCAR Low-speed structural crash test protocol Issue 2.2*. https://www.rcar.org/Papers/Procedures/rcar_LowSpeedCrashTest2_2.pdf
- RCAR. (2020). *RCAR Bumper Test Issue 2.2*. https://www.rcar.org/images/papers/procedures/RCAR_Bumper_Test_Procedure_2_2%20-%202020.pdf
- Reichert, J. K., & Landolt, J. P. (1981). *Digital and Analog Filters for Processing Impact Test Data NON-CONTROLLED GOODS DMC A*. https://cradpdf.drddc.gc.ca/PDFS/unc341/p35845_A1b.pdf
- Reichert, R., & Kan, S. (2017). *Development of a 2015 Mid-Size Sedan Vehicle Model*. https://www.dynalook.com/conferences/11th-european-ls-dyna-conference/crash-model-building/development-of-a-2015-mid-size-sedan-vehicle-model/@@download/file/01_Reichert_George_Mason_University.pdf
- Restrepo, O. (2020). *Suzuki Alto 800 MC 2020: Lo nuevo del carro más barato de Colombia*. <https://www.elcarrocolombiano.com/novedades/suzuki-alto-800-mc-2020-lo-nuevo-del-carro-mas-barato-de-colombia/>
- Rojas Lazo, O., & Rojas Rojas, L. (2006). *Diseño asistido por computador (1)*. <https://www.redalyc.org/pdf/816/81690102.pdf>
- Rosenthal, F., Bort, R. L., O'hara, G. J., Clements, E. W., & Skop, R. A. (1972). *The Mechanics of Automobile Collisions*. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD0743449.pdf>
- Rua, J., Buchely, M. F., Monteiro, S. N., Echeverri, G. I., & Colorado, H. A. (2021). Impact behavior of laminated composites built with fique fibers and epoxy resin: a mechanical analysis using impact and flexural behavior. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 428–438. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.068>
- Salifu, S., Desai, D., Ogunbiyi, O., Sadiku, R., Adesina, O., & Adesina, O. (2020). Comparative study of high velocity impact response of aluminium 3105-H18 and carbon

- fibre-epoxy composite double hat bumper beams. *Materials Today: Proceedings*, 38, 712–716. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.828>
- Schejbalová, Z., Kvášová, A., Mičunek, T., & Marek, Z. (2012). of a Collision between Passenger Car and Child Pedestrian SIMULATION OF A COLLISION BETWEEN PASSENGER CAR AND CHILD PEDESTRIAN. *Promet-Traffic&Transportation*, 24(2), 109–118.
- Secretaria Nacional de Planificación. (2021). *Plan-de-Creación-de-Oportunidades-2021-2025*. https://observatorioplanificacion.cepal.org/sites/default/files/plan/files/Plan-de-Creaci%C3%B3n-de-Oportunidades-2021-2025-Aprobado_compressed.pdf
- Simms, C. K., & Wood, D. P. (2006a). Pedestrian risk from cars and sport utility vehicles - A comparative analytical study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 220(8), 1085–1100. <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO319>
- Simms, C. K., & Wood, D. P. (2006b). *Pedestrian risk from cars and sport utility vehicles-a comparative analytical study*. <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO319>
- Sreenivas, H. T., Krishnamurthy, N., & Suprith, S. v. (2021). Investigating the Crashworthiness of Kenaf/Kevlar Hybrid Composite Frontal Car Fascia for Low-Velocity Impact Using LS-DYNA. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 102(2), 413–427. <https://doi.org/10.1007/s40033-021-00279-w>
- Untaroiu, C. D., Meissner, M. U., Crandall, J. R., Takahashi, Y., Okamoto, M., & Ito, O. (2009). Crash reconstruction of pedestrian accidents using optimization techniques. *International Journal of Impact Engineering*, 36(2), 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.01.012>
- Ward, D. (2015). *GLOBAL NCAP FLEET SAFETY GUIDE AND SAFER CAR PURCHASING POLICY*. GLOBAL NCAP. <https://static1.squarespace.com/static/5fb4ea8933ae6c208c3dac41/t/6061aca68424f6747784854d/1617013928942/FleetBuyersGuide.pdf>
- World Health Organization, FIA Foundation for the Automobile and Society, Global Road Safety Partnership, & World Bank. (2013). *Pedestrian safety : a road safety manual for decision-makers and practitioners*. World Health Organization. https://www.grsproadsafety.org/wp-content/uploads/PedestrianSafety_eng.pdf
- Zuby, D. S. (2015). *Vehicle Design for Pedestrian Protection NTSB Pedestrian Safety Forum*.

https://www.nts.gov/news/events/Documents/2016_Pedestrian_FRM_panel4_3_Zuby.pdf

ANEXOS

Anexo I. Vehículo

El vehículo muestra un modelo detallado de elementos finitos a partir de un proceso de ingeniería inversa



Figura A. I. 1. Vehículo Toyota Camry FE b) Descripción del vehículo

(CCSA-George Mason University | College of Science, 2018a)

El modelo consta de unas 1000 piezas y 2,25 millones de elementos que representan la geometría del último modelo de alta resolución con tecnología de modelado de última generación, con un peso exacto al original como se muestra en la **Tabla A. I. 1.** (CCSA-George Mason University | College of Science, 2018a)

Tabla A. I. 1 Detalles del modelo FEM

Unidades del modelo	toneladas, mm, N, seg.
Elementos	2,277,485
Nodos	2,227,769
Partes	1,107

Validación

Para validar el modelo de desarrollado, se configuraron casos de carga, impacto frontal oblicuo, barrera lateral e impactos de poste lateral, y se compararon con los resultados de las pruebas de choque a gran escala respectivas.

CORA se utilizó para calificar qué tan bien se comparan los resultados de la prueba y la simulación. CORA fue desarrollado por la Asociación para la tecnología y la biomecánica ficticias (PDB) y tiene en cuenta el cambio de fase, el tamaño y la forma, así como la comparación de valores en cada incremento de tiempo. Con estos métodos, se otorga una calificación objetiva que indica qué tan bien se compara una curva (p. ej., simulación) con una curva de referencia (p. ej., prueba).

Se utilizó el análisis visual de imágenes de prueba, películas de prueba y animaciones de simulación para comparar la cinemática general del vehículo y las características del choque. Se utilizaron diagramas de datos históricos en el tiempo, en combinación con videos de prueba y animaciones de simulación, para evaluar los modos de choque y los mecanismos de absorción de energía estructural.

El modelo FE desarrollado representa bien el desempeño estructural de un sedán de tamaño mediano MY 2015 en las configuraciones de choque de clasificación existentes, permite la investigación y los estudios de seguridad de los vehículos en una amplia gama de áreas, se está utilizando actualmente para desarrollar contramedidas estructurales para la configuración de impacto compensado frontal oblicuo y los resultados de las pruebas de colisión han demostrado que los vehículos que reciben buenas calificaciones en las pruebas de información del consumidor colineales existentes aún pueden requerir modificaciones estructurales para un buen desempeño en el procedimiento de prueba de compensación frontal oblicua de la NHTSA. (R. Reichert & Kan, 2017, pp. 8 & 9)

Conclusiones del Vehículo Toyota Camry FE

El modelo FE desarrollado representa bien el desempeño estructural de un sedán de tamaño mediano MY 2015 en las configuraciones de choque de clasificación existentes, Permite la investigación y los estudios de seguridad de los vehículos en una amplia gama de áreas.

Se está utilizando actualmente para desarrollar contramedidas estructurales para la configuración de impacto compensado frontal oblicuo.

Los resultados de las pruebas de colisión han demostrado que los vehículos que reciben buenas calificaciones en las pruebas de información del consumidor colineales existentes aún pueden requerir modificaciones estructurales para un buen desempeño en el procedimiento de prueba de compensación frontal oblicua de la NHTSA.

Con este modelo se están evaluando los requisitos de cambio estructural incremental del vehículo y sus cambios de masa y costo asociados, a fin de reducir significativamente la intrusión en el compartimiento de ocupantes.

Anexo II. Flujograma de los parámetros de la simulación de impacto

Para cumplir los objetivos de la investigación se presenta a continuación un flujograma en la **Figura A. II. 1**, que detalla los puntos más relevantes del proceso metodológico que se siguió para realizar la simulación de impacto.

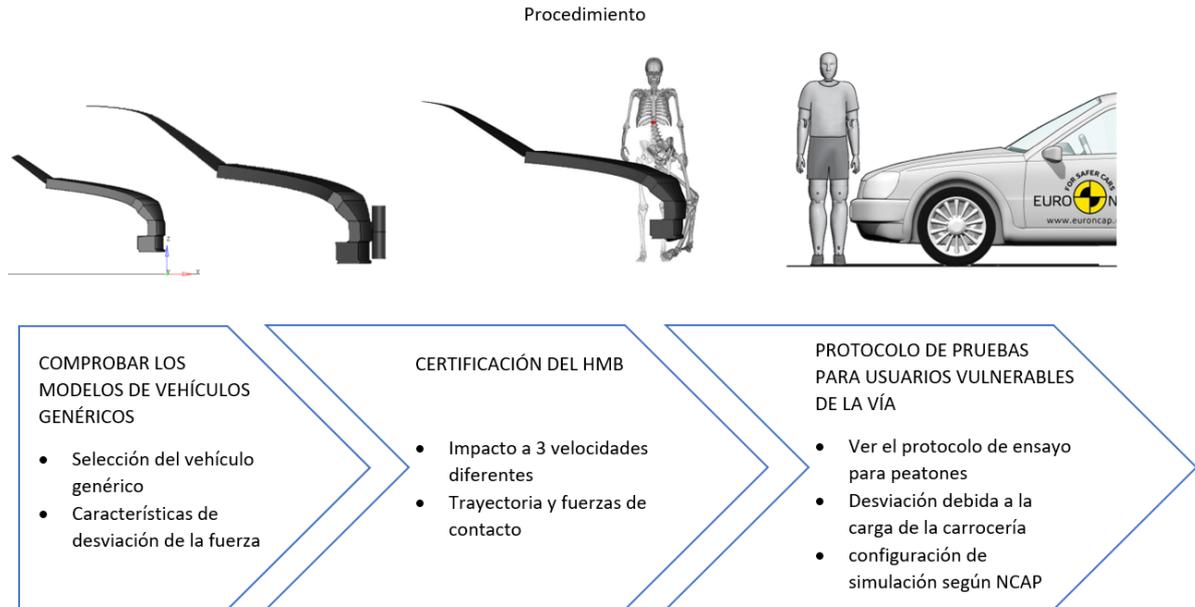


Figura A. II. 1 Flujograma de los parámetros de la simulación de impacto

Anexo III. Vehículos genéricos

Vehículo genérico (GV)

Se desarrollaron tres modelos GV representativos. Sport Utility Vehicle (SUV), Family Car/Sedan (FC) y Roadster (RDS), con el valor medio de cada parámetro calculado para cada tipo de vehículo. El GV se separó en las áreas deformables alerón (spl), parachoque (bmp), la parrilla (grl), Capó de plomo (ble) y Capó (bnt). (Klug et al., 2017, p. 3)

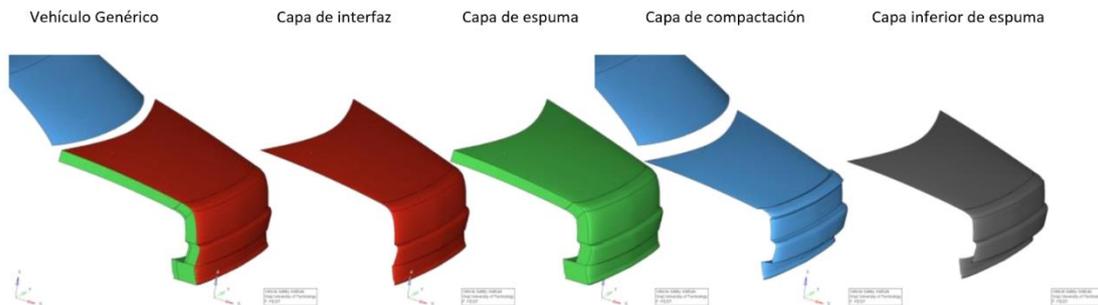


Figura A. III. 1. Capas del GV

(Klug et al., 2017, p. 4)

Se asumió que la respuesta estructural a las cargas de impacto de los peatones podía modelarse utilizando una capa exterior, una capa intermedia (que modelaba el revestimiento del vehículo) y una espuma genérica que se muestra en la **Figura A. III. 1. Capas del GV**. Las superficies de espuma están cubiertas por la capa intermedia, que reproduce de forma realista la masa de las superficies de contacto, obteniendo así efectos de inercia sobre el impacto y estructuras realistas (módulo de Young, módulo tangencial, tensión de fluencia del plástico para todas las partes menos capot). (Klug et al., 2017, p. 4)

Característica de desviación de la fuerza

Para obtener las dimensiones del corredor de rigidez, se utilizaron 11 modelos de vehículos de cinco fabricantes de automóviles. Se analizaron el impacto a la parte en la línea central del parachoques en una gráfica de carga-deformación con discretizaron (pasos de 2,5 mm) y se dividieron en curvas de carga y sin carga que se muestra en la **Figura A. III. 2**, también la fuerza mediana para cada paso de deflexión. (Klug et al., 2017, p. 6)

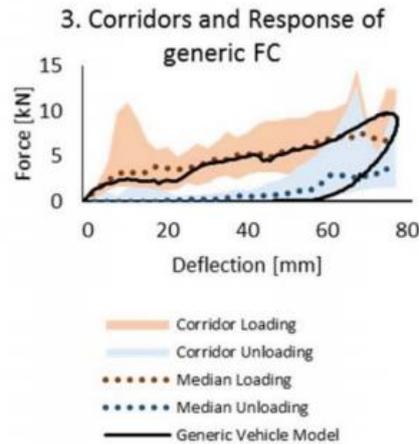


Figura A. III. 2. Respuesta del modelo de automóvil familiar genérico en LS-DYNA en comparación con los corredores y la curva mediana para carga y carga (impacto en la línea central del parachoques).

(Klug et al., 2017, p. 6)

Mallado

La forma del vehículo se malla utilizando sólo una estructura de 4 nodos y elementos sólidos de 8 nodos. El tamaño medio de los elementos es de 12 mm. En la capa de interfaz, comparten nodos: Spoiler, Bumper, Grill y Bonnet Lead (según la figura 3.34 identificar con colores). Sólo se conectan los nodos coincidentes en los bordes de las distintas partes de la capa de compactación. Esto significa que la superficie de la capa de compactación es continua. Todas las capas de espuma tienen un grosor de 100 mm, excepto el alerón que tiene un grosor de 200 mm. Los conjuntos de alerón y parachoques se extruyen a lo largo del eje X. (Klug & Ellway, 2022, p. 39)

Condiciones de borde

Al vehículo se le asigna la masa mediana establecida para cada vehículo, que se presenta a continuación en la **Tabla A. III. 1**. La mediana de la masa (mediana del peso en vacío del vehículo y la masa adicional de 150 kg para el conductor y el pasajero delantero según lo especificado en el protocolo de prueba de peatones Euro NCAP). Sin embargo, los momentos de inercia del vehículo no se tienen en cuenta, ya que los vehículos tienen solo un grado de libertad, que es la dirección x en el sistema de coordenadas del vehículo. (Klug & Ellway, 2022, p. 40)

Tabla A. III. 1. Masa mediana por categoría de vehículo

CATEGORÍA DE VEHÍCULO	PESO EN VACÍO MEDIO [KG]	MASA TOTAL MEDIA [KG]
SUV	1625	1775
Familycar	1540	1690
MPV	1440,5	1590,5
Roadster	1312,5	1462,5

Fuente: (Klug & Ellway, 2022, p. 40)

Impactador cilíndrico

La fuerza es calculada a partir de la aceleración del impactador y los desplazamientos de las simulaciones del impactador. Los impactadores rígidos se utilizaron para evitar la deformación del impactador y para simplificar la optimización del material del modelo GV. Un impactador cilíndrico rígido con una masa total de 5,95 kg (densidad = $7,89E-6$ kg/mm³, diámetro = 120 mm, altura = 400 mm y espesor de pared = 5 mm) propulsado contra el parachoques según la norma Euro NCAP v8.2. (Klug et al., 2017, p. 4)

Anexo IV. Modelo FEM del Maniquí

En el MANIQUÍ DE PIE LSTC RIGID-FE (PERCENTIL 50 H-III), todos los materiales de las extremidades externas están hechos de materiales "deformables" para permitir una mejor "interacción de contacto" con objetos que golpean externamente a: brazos, manos, muslos y piernas. En la **Figura A. IV. 1** se puede apreciar que el Dummy tiene "zapatos" los cuales son deformables para una interacción realista con el suelo.

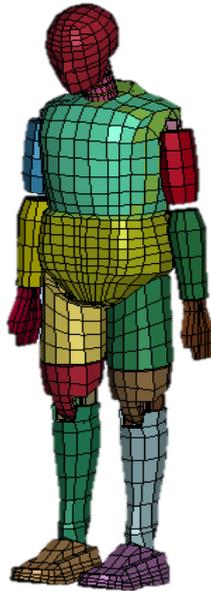


Figura A. IV. 1 HBM Percentil 50 de HYBRID III

(Copyright ANSYS, 2022)

El Dummy de la **Figura A. IV. 1** tiene todas las "masas" e "inercias" de las extremidades definidas en "Part_Inertia". Las "articulaciones de tobillo" son "esféricas" mejorando las respuestas cuando el muñeco de pie sea golpeado desde el "lado" por un objeto externo como un automóvil o una barrera. Se encontrará en "+/-45 grados" para las rotaciones "arriba-abajo" de los pies y "+/-23 grados" para las rotaciones sobre los otros dos ejes. Los "Ángulos de tope de la articulación de la pierna inferior a la pierna superior" se han permitido "rotaciones realistas".

Los marcos de coordenadas "maestro y esclavo" de la cadera, las rodillas, los tobillos y el brazo-hombro tienen "torque nulo" en la "condición inicial". Esto hace que no se muevan cuando inicie la simulación.

Dummy Percentil 50 de HYBRID III al ser un modelo FEM tiene ciertas características que se muestran en la **Tabla A. IV. 1**, juntamente con sus valores numéricos.

Tabla A. IV. 1 Detalles FEM del Dummy

Detalles	Unidades
Unidades del modelo	kilogramos, mm, KN, ms
Elementos	4299
Nodos	7470
Partes	143

Puntos para posprocesamiento

En la salida el HBM H50 tiene la capacidad de entregar respuestas de partes fundamentales: cabeza, pecho, pelvis, fémur, tibia y tórax. Cuenta con sensores que entregan resultados globales y locales como se muestra en la **Tabla A. IV. 2**.

Tabla A. IV. 2 Tipos de acelerómetros del HBM H50

ACELERÓMETROS (SENSORES)	
1	Acelerómetros específicos
	• Aceleración de cabeza
	• Aceleración del pecho
	• Aceleración pélvica
2	CS global
	• Aceleraciones de cabeza, pecho y pelvis
3	Locales CS
	• Fuerzas de fémur
	• Fuerzas superiores del cuello
	• Momento superior del cuello en el cóndilo occipital
	• Fuerzas de la tibia inferior y superior
	• Momentos tibiales inferiores y superiores
	• Fuerzas lumbares inferiores
	• Momentos lumbares inferiores
4	Criterios de lesiones en la cabeza (HIC)
5	Índice de gravedad torácica (CSI)
6	Deflexión del pecho

Anexo V. Certificación del HBM

Definición de sensores para el seguimiento de la cinemática de HBM

El HBM debe estar equipado con "sensores" de salida, que permiten rastrear las trayectorias de partes del cuerpo seleccionados. Después de la **Tabla A. IV. 1** se encuentra explicado los acelerómetros con los que cuenta el HBM seleccionado.

Definición de postura inicial de HBM

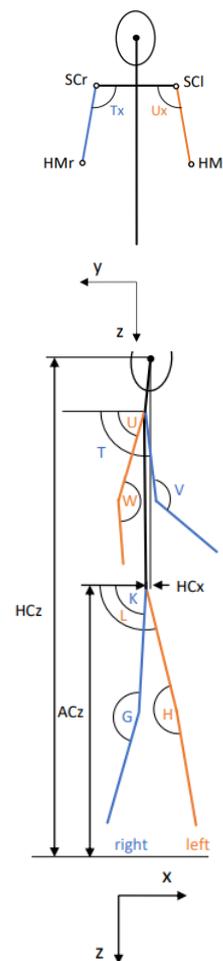
Los parámetros clave de la postura inicial del HBM que emerge la cinemática en las simulaciones de peatones (Chen et al., 2015; Elliott et al., 2012; Li et al., 2015). Se identificaron mediante un estudio de sensibilidad, utilizando el coche familiar genérico con una velocidad de impacto de 40 km/h.

En el mundo real, pueden darse diferentes escenarios de colisión y reacciones de los peatones antes de un choque (Anurag et al., 2013). Sin embargo, los fabricantes de vehículos deben tener objetivos de diseño. Por lo tanto, es importante definir las posiciones para garantizar la comparabilidad de los resultados de las pruebas virtuales. Por el momento solo se reemplazó una posición:

- La postura 3, que combina la postura de la pierna definida en (Emisión, 2010) y la postura natural de la mano (Untaroiu et al., 2009) (ciclo de marcha del 40 %), fue seleccionada como la postura de referencia final. Los ángulos de las articulaciones de las piernas se basan en SAE J2782 y la postura del brazo se basa en una postura natural 6. La postura del modelo se especifica en la **Tabla A. V. 1** La postura inicial debe apuntar a una postura natural para caminar. El ángulo de las zapatas no se da como medida de referencia ya que el estudio de sensibilidad no mostró una influencia significativa en la cinemática (Klug & Ellway, 2022, p. 7)

Tabla A. V. 1. Postura objetivo del modelo

Abreviatura	Medida	Ref. Valor	Tolerancia (+/-)
Px	Distancia talón a talón Longitudinal	310 mm	5.0%
Py	Distancia talón a talón lateral	185 mm	15.0%
ACz	Altura de AC en relación con el nivel del suelo	949 mm	1.2%
K	Ángulo superior de la pierna derecha (alrededor de Y w.r.t. horizontal)	89°	3°
L	Ángulo de la parte superior de la pierna izquierda (alrededor de Y con respecto a la horizontal)	106°	5°
G	Ángulo de flexión de la rodilla derecha (Y)	164°	3°
H	Ángulo de flexión de la rodilla izquierda (Y)	175°	5°
Ty	Ángulo del brazo superior derecho (Y w.r.t. horizontal)	98°	3°
Uy	Ángulo del brazo superior izquierdo (Y w.r.t. horizontal)	70°	3°
Tx	Ángulo del brazo superior derecho (X w.r.t. horizontal)	100°	10°
Ux	Ángulo del brazo superior izquierdo (X w.r.t. horizontal)	100°	10°
V	Ángulo de flexión del codo derecho	140°	5°
W	Ángulo de flexión del codo izquierdo Izquierda	160°	10°
HCx	x-Posición de HC relativa a AC	44 mm	15 mm
HCz	Altura de HC relativa al nivel del suelo	1686 mm	0.8%



Fuente: (Klug & Ellway, 2022, p. 8)

- El HBM debe estar equipado con un par de zapatos, con un grosor de suela (en los talones) entre 20 y 30 mm en el talón.
- El par de zapatos para el peatón masculino de talla mediana no deberá pesar más de 1.300 g

Definición de otras configuraciones de simulación

Un estudio de sensibilidad (Klug et al., 2017) mostró que el coeficiente de fricción entre HBM y el automóvil tiene un efecto notablemente a la cinemática y condujo a la mejor correlación con pruebas (Chen et al., 2015) por lo tanto, se fijó en 0,3, lo cual está de acuerdo con varios estudios (Mizuno & Ishikawa, 2001; Simms & Wood, 2006a; Untaroiu et al., 2009). El sistema de coordenadas global es paralelo al eje longitudinal del vehículo en la dirección x con respecto a la dirección de desplazamiento y paralelo al eje de altura del vehículo en la dirección z con t0 apuntando hacia arriba (Klug & Ellway, 2022, p. 10).

En el caso de los algoritmos de contacto, cambiar la configuración de las penalizaciones puede suponer una gran diferencia. Como la trayectoria y el tiempo de contacto dependen de la configuración de contacto, es necesario utilizar aplicar formulaciones de contacto coherente para comparar los resultados de la simulación los cuales se presentan a continuación en la **Tabla A. V. 2.**

Tabla A. V. 2. Condiciones para la simulación de Dummy y FC

Modelo	HBM seleccionado
Velocidad de impacto (km/h)	30-50
Campo de gravedad	SI
Fricción HBM Y NCAP	0,3
Configuración de contacto	segmento a segmento
Respuesta a CPU cada: (ms)	0,1
Time Termination >	Tiempo de contacto
Ubicación Dummy y NCAP	lo más cerca posible
Reloj de Arena y Hourglass	relevancia a 50 km/h
lado golpeado HBM	lado derecho
Dummy y NCAP	Kg/mm/ ms/ GPa

Fuente: (Klug et al., 2017; Klug & Ellway, 2022)

Se puede utilizar HBM con o sin eliminación de elementos, siempre que muestre resultados consistentes y sin inestabilidades numéricas, pero se deben aplicar los mismos ajustes para todos los pasos.

Anexo VI. Parámetros output para el vehículo

En los resultados se debe incluir película de alta velocidad de buena calidad que muestra una descripción general de la prueba y documentación de la ubicación correcta de la prueba, utilizando marcas de pintura y fotografías posteriores a la prueba, los cuales se presentan a continuación en la **Tabla A. VI. 1.**

Tabla A. VI. 1. Lista de fotografías fijas

CANTIDAD DE VEHÍCULO VISIBLE	PUNTO DE VISTA
Vehículo completo	Lado izquierdo
Vehículo completo	Lado derecho
Tercer vehículo delantero	Lado izquierdo
Tercer vehículo delantero	Lado derecho
Vehículo completo	Delantero
Semivehículo izquierdo	Delantero
Semivehículo derecho	Delantero
Tercio delantero del vehículo	Arriba
Tercio delantero, mitad derecha del vehículo	Arriba
Tercero delantero, mitad izquierda del vehículo	Arriba
Puntos de prueba del simulador de piernas	frente
Puntos de prueba del simulador de pierna superior	Parte delantera
Puntos de prueba de la zona de la cabeza del niño	Arriba
Puntos de prueba de la zona de la cabeza de adultos	Arriba

Fuente: (Euro NCAP, 2022b, p. 43)

Anexo VII. Aplicación al procedimiento final

Posprocesamiento

Se requieren las siguientes salidas (Klug & Ellway, 2022, p. 10 y 11):

Fuerzas de contacto (fuerza de contacto total entre el vehículo y HBM y fuerza de contacto por capa de interfaz y parte del cuerpo como se especifica en la plantilla).

Deben aplicarse reloj de arena, contacto y energías internas.

El intervalo de tiempo entre las salidas debe ser de 0,1 ms para todas las salidas excepto las animaciones en las que 1 ms es suficiente.

No es necesario aplicar filtrado.

Las curvas de salida (Plot) deben incluirse en la plantilla de posprocesamiento para el vehículo.

Controles de calidad

Los criterios de calidad se eligieron en base a las recomendaciones del proyecto IMVITER (FP7- 2007 SST – 218688 - D4.3). Se deben cumplir todos los controles y criterios de calidad (Klug & Ellway, 2022, p. 11):

Las superficies FE que entran en contacto no se cruzan entre sí.

Las superficies que entran en contacto no quedan atrapadas unas en otras (sin nudos pegajosos).

La fuerza de contacto (entre HBM y el vehículo) es cero al inicio de la simulación.

Evaluación de las fuerzas de contacto

Se ignora un primer (step) contacto entre el vehículo y las extremidades superiores del HBM. Por lo tanto, las fuerzas de contacto entre el parachoques y las extremidades inferiores y el torso se solicitan en la plantilla. Las fuerzas de contacto solo se controlan. (Klug & Ellway, 2022, p. 13)

Anexo VIII. Cartas de Control de la probeta con M1

Tabla A. VIII. 1. Cartas de Control de la probeta con M1

Carta de Control	Definición	Parámetro de Ls Dyna	Valor de la línea base
MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (024) M1	Material identification. A unique number has to be used.	MID	1
	Mass density	RO	1,18E-06
	Young's modulus.	E	877
	Poisson's ratio	PR	0,35
	Yield stress	SIGY	0.0
	Failure flag	FAIL	0,062
	Defaine curve	LCSS	1
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
DEFINE_CURVE_ M1	Load curve ID	LCID	1
	Scale factor for abscissa value	SFA	0
	Scale factor for ordinate value (function)	SFO	0
	Ordinate (function) values	O1	3,21
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
SECTION_SHELL (M1 Y M2)	Section ID	SECID	1
	Number of through shell thickness integration points	NIP	3
	INTEGRATION_SHELL	QR/ IRID	-1
	Flag for orthotropic/anisotropic layered composite material model.	ICOMP	1
	Shell thickness at node n1	T1	3
	Shell thickness at node n2	T2	3
	Shell thickness at node n3	T3	3
	Shell thickness at node n4	T4	3
	beta-1	Bi	90
	beta-2	Bi	0
	beta-3	Bi	90
	beta-4	Bi	0
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
INTEGRATION_SHELL (M1)	Integration rule ID	IRID	1
	Number of integration points.	NIP	3
	Coordinate of integration point in range	S	-0,6666667
	Weighting factor.	WF	0,1333337
	Part ID	PID	1
	Resto de variables de la CC	VLD	Default

Tabla A. VIII. 2 Continuación de **Tabla A. VIII. 1**

Carta de Control	Definición	Parámetro de Ls Dyna	Valor de la línea base
BOUNDARY_SPC_SET	SED_NODE_LIST	NSID	2
	translational constraint in local y-direction	DOFY	1
	translational constraint in local z-direction	DOFZ	1
	rotational constraint about local x-axis	DOFRX	1
	rotational constraint about local y-axis	DOFRY	1
	rotational constraint about local z-axis	DOFRZ	1
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET	SED_NODE_LIST	NSID	2
	DEFINE_CURVE	LSID	2
	Load curve scale factor	SF	0
	Time imposed motion/constraint is removed	DEATH	0
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
DATABASE_BINARY_D3PLOT	Time interval between outputs.	DT	0,001
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
CONTROL_HOURLASS	Resto de variables de la CC	VLD	Default
CONTROL_TERMINATION	Termination time. Mandatory	ENDTIM	0,15
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
CONTROL_TIMESTEP	Time step size for mass scaled solutions	DT2MS	-1,00E-06
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
CONTROL_HOURLASS	Resto de variables de la CC	VLD	Default
CONTROL_TERMINATION	Termination time. Mandatory	ENDTIM	0,15
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
CONTROL_TIMESTEP	Time step size for mass scaled solutions	DT2MS	-1,00E-06
	Resto de variables de la CC	VLD	Default

Anexo IX. Cartas de Control de la probeta con M2

Tabla A. IX. 1. Cartas de control de M2

Carta de Control	Definición	Parámetro de Ls Dyna	Valor de la línea base
MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (024) M2	Material identification. A unique number has to be used.	MID	1
	Mass density	RO	1,03E-09
	Young's modulus.	E	520,28003
	Poisson's ratio	PR	0,35
	Yield stress	SIGY	0.0
	Failure flag	FAIL	0,0517
	Defaine curve	LCSS	1
Resto de variables de la CC	VLD	Default	
DEFINE_CURVE_ M2	Load curve ID	LCID	1
	Scale factor for abcissa value	SFA	1
	Scale factor for ordinate value (function)	SFO	1
	Ordinate (function) values	O1	1,81
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
SECTION_SHELL (M1 Y M2)	Section ID	SECID	1
	Number of through shell thickness integration points	NIP	3
	INTEGRATION_SHELL	QR/ IRID	-1
	Flag for orthotropic/anisotropic layered composite material model.	ICOMP	1
	Shell thickness at node n1	T1	3
	Shell thickness at node n2	T2	3
	Shell thickness at node n3	T3	3
	Shell thickness at node n4	T4	3
	beta-1	Bi	90
	beta-2	Bi	0
	beta-3	Bi	90
	beta-4	Bi	0
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
INTEGRATION_SHELL (M2)	Integration rule ID	IRID	1
	Number of integration points.	NIP	3
	Coordinate of integration point in range	S	-0,6666667
	Weighting factor.	WF	0,0833334
	Part ID	PID	1
	Resto de variables de la CC	VLD	Default

Tabla A. IX. 2 Continuación de **Tabla A. IX. 1**

Carta de Control	Definición	Parámetro de Ls Dyna	Valor de la línea base
BOUNDARY_SPC_SET	SED_NODE_LIST	NSID	2
	translational constraint in local y-direction	DOFY	1
	translational constraint in local z-direction	DOFZ	1
	rotational constraint about local x-axis	DOFRX	1
	rotational constraint about local y-axis	DOFRY	1
	rotational constraint about local z-axis	DOFRZ	1
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
VLD	SED_NODE_LIST	NSID	2
	DEFINE_CURVE	LSID	2
	Load curve scale factor	SF	0
	Time imposed motion/constraint is removed	DEATH	0
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
DATABASE_BINARY_D3PLOT	Time interval between outputs.	DT	0,001
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
CONTROL_HOURLASS	Resto de variables de la CC	VLD	Default
CONTROL_TERMINATION	Termination time. Mandatory	ENDTIM	0,15
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
CONTROL_TIMESTEP	Time step size for mass scaled solutions	DT2MS	-1,00E-06
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
CONTROL_HOURLASS	Resto de variables de la CC	VLD	Default
CONTROL_TERMINATION	Termination time. Mandatory	ENDTIM	0,15
	Resto de variables de la CC	VLD	Default
CONTROL_TIMESTEP	Time step size for mass scaled solutions	DT2MS	-1,00E-06
	Resto de variables de la CC	VLD	Default