

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

Facultad de Arquitectura e Ingeniería

Maestría en Diseño Mecánico

Mención Fabricación de Autopartes de Vehículos

Aplicación de ingeniería inversa para el estudio del refuerzo del parachoques inferior del Sportage R por simulación CAE usando materiales alternos

Ing. Andrés Fabricio Villarruel Jaramillo

Nota del autor

Ing. Andrés Fabricio Villarruel Jaramillo, Facultad de Ingeniería Arquitectura e Ingeniería,
Universidad Internacional SEK.

Director Ing. Juan Carlos Rocha, M.Sc.

Codirector Ing. Edilberto Llanes, PhD.

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

avillarruel,mdm@uisek.edu.ec

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, Andrés Fabricio Villarruel Jaramillo con cédula de identidad 1723147185, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

ANDRES FABRICIO VILLARRUEL JARAMILLO

C.I.: 172314718-5

ÍNDICE

PORTADA.....	1
DECLARACIÓN JURAMENTADA.....	2
ÍNDICE.....	3
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABLAS.....	14
LISTA DE ECUACIONES.....	16
LISTA DE ANEXOS.....	17
RESUMEN.....	18
ABSTRACT.....	19
INTRODUCCIÓN.....	20
Antecedentes.....	20
Planteamiento del problema.....	25
Justificación.....	27
Estudio del arte.....	29
Generalidades del sistema de protección delantera.....	29
Refuerzo inferior del parachoques (LBS).....	31
Parámetro de material del refuerzo inferior de parachoques (LBS).....	36
Comportamiento dinámico del automóvil en una colisión.....	38
Trayectoria del peatón frente a un impacto frontal.....	39
Análisis de lesiones durante el atropello.....	41
Miembros inferiores para ensayos físicos de impacto.....	41
Ingeniería inversa.....	44

Aplicación de ingeniería inversa para el estudio del refuerzo inferior del parachoques	4
Simulación computacional.....	45
Polímeros en la industria automotriz	46
MÉTODO	48
Definición de los principios de un impacto entre un Sportage R y un peatón.....	49
Condiciones geométricas.	52
Modelado CAD.....	53
Generación de la geometría del impactador de miembros inferiores.	54
Generación de la geometría de refuerzo superior e inferior de guardachoque.	56
Ensamble de los refuerzos de guardachoque y el impactador según el protocolo de EuroNCAP.	61
Materiales.....	62
Materiales para impactador y refuerzos de guardachoque.....	62
Materiales considerados como posible reemplazo del refuerzo inferior (LBS).	63
Cálculo para la introducción de datos en la simulación computacional	63
Aceleración y fuerza de impacto.....	64
Paso mínimo para asegurar propagación de onda mecánica en el material.	65
Criterio para validación de resultados.....	70
Parámetros de funcionamiento del sistema.....	71
Geometría de placa y proyectil a validar.	72
Simulación de análisis explícito para el problema de validación.	74
Simulación de análisis estructural por deformación.	76
Simulación FEM y SIM.	77
Generación de malla computacional.....	77
Asignación de materiales.	79
Datos iniciales del funcionamiento del sistema.	79
Post-procesamiento.	81

Simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita	82
Introducción de materiales en <i>engineering data</i>	83
Elementos CAD generados introducidos en <i>Geometry</i>	84
Generación del mallado computacional.....	85
Selección de nodos para análisis en el impactador y LBS.....	87
Condiciones iniciales para el funcionamiento del sistema.	88
Selección del tipo de solución requeridas para la simulación.....	89
RESULTADOS.....	90
Presentación y análisis de resultados	90
Resultados de cálculos de propagación de onda	90
Resultados de simulación de proyectil con análisis de dinámica explícita para validación de datos generados entre un ensayo experimental y simulación computacional.....	91
Malla computacional generada para la placa y proyectil de acero	91
Resultados de simulación de colisión entre proyectil y placa de acero con variación de velocidad para análisis de deformación	92
Masa del refuerzo inferior de guardachoques en base al material original y alterno	94
Resultados de análisis estructural del refuerzo inferior de guardachoques	94
Resultados del mallado para análisis estructural por deformación	94
Resultados de simulación por deformación estructural con polipropileno (PE).....	95
Resultados de simulación por deformación estructural con polietileno (PE)	96
Resultados de simulación por deformación estructural con poliestireno (PE)	97
Resultados de simulación por deformación estructural con policarbonato (PC).....	98
Resultados de simulación por deformación estructural con acrilonitrilo butadieno (ABS)	99
Resultados de simulación por deformación estructural con poliácido láctico (PLA)....	100
Resultados de simulación por deformación estructural con PC/ABS con 10% Fibra de vidrio	101

Resultados de la simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita	103
Resultados del mallado para la simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita	103
Resultados de simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita usando polipropileno (PP)	104
Resultados de simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita usando polietileno (PE)	109
Resultados de simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita usando poliestireno (PS).....	113
Resultados de simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita usando policarbonato (PC)	118
Resultados de simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita usando acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	123
Resultados de simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita usando poliácido láctico (PLA)	128
Resultados de simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita usando PC/ABS reforzado con 10% de fibra de vidrio.....	133
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	138
Discusión de resultados.....	138
Criterio de validación: Ensayo físico vs Simulación computacional entre un proyectil de acero 4340 y una lámina de acero 304.....	138
Tiempo de propagación de onda para la generación de la malla computacional para eventos dinámicos.....	139
Simulación estructural: deformación refuerzo inferior de parachoques (LBS) aplicando una carga de 20 kN	140
Simulación dinámica: aceleración en la zona superior de la tibia durante la colisión...	142
Simulación dinámica: deformación del refuerzo inferior de parachoques (LBS) producido por la colisión con el impactador de miembros inferiores.....	144
Simulación dinámica: esfuerzo equivalente de Von Mises en el refuerzo inferior de parachoques.....	146

Simulación dinámica: comparación de resultados obtenidos.	149
Selección de material de reemplazo para el refuerzo inferior de parachoques en base al análisis y discusión de resultados presentada.	150
Conclusiones	152
Recomendaciones	154
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	156
ANEXOS	163

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Comparación de impacto en las piernas inferiores con y sin uso del LBS. (Wüst, 2007)	32
<i>Figura 2.</i> Simulación de un evento de impacto del refuerzo inferior del parachoques. (Chon, Uikey, & Mohammed, 2007)	33
<i>Figura 3.</i> Condiciones físicas para pruebas de impacto entre piernas y parachoques. Recuperado de (Chon, Uikey, & Mohammed, 2007)	34
<i>Figura 4.</i> Modelado del sistema de protección de peatones con la inclusión de un LBS. (Karimullah, Gokhale, Joshi, & Chalipat, 2011)	37
<i>Figura 5.</i> Pruebas FEA del LBS, carga vs deflexión. (Chon, Uikey, & Mohammed, 2007)..	38
<i>Figura 6.</i> Trayectorias de post-impactos. Recuperado de (Gálvez Román, 2011).....	40
<i>Figura 7.</i> Definición del ángulo de lanzamiento [θ], velocidad inicial [v_0], altura inicial de lanzamiento [h_0] y la distancia recorrida [da]. (Stevenson, 2006)	41
<i>Figura 8.</i> Ensayo físico entre un impactador de miembros inferiores y un vehículo. (EuroNCAP, 2017)	43
<i>Figura 9.</i> Diagrama de método experimental y analítico, para el estudio del refuerzo inferior de parachoques.....	49
<i>Figura 10.</i> Calificación en puntos de la protección de peatones en el modelo Sportage R (2010-2014). (EuroNCAP, 2017)	50
<i>Figura 11.</i> Refuerzo inferior y superior de guardachoque de un Sportage R.....	51
<i>Figura 12.</i> Vista lateral del refuerzo superior e inferior del guardachoque y material dado por el fabricante.....	52
<i>Figura 13.</i> Esquema de posición de los refuerzos de guardachoque, respecto al impactador de miembros inferiores, las unidades corresponden a milímetros.....	53
<i>Figura 14.</i> Generación de la geometría del fémur y tibia, las medidas se encuentran en milímetros.	54
<i>Figura 15.</i> Generación de la geometría de la masa muscular (a) y la piel (b) para el impactador de piernas, las unidades se encuentran en milímetros.....	55
<i>Figura 16.</i> Visualización del ensamble de las partes que conforman el impactador de piernas según las normas ACEA.	56

<i>Figura 17.</i> Refuerzo superior de guardachoque.	57
<i>Figura 18.</i> Refuerzo inferior de guardachoque.....	57
<i>Figura 19.</i> a) Refuerzos de guardachoques pintados de color blanco. b) Scanner 3D GO!SCAN50.....	58
<i>Figura 20.</i> Modelado 3D del refuerzo superior de guardachoques.	58
<i>Figura 21.</i> Refuerzo superior de guardachoque convertido en figura simétrica.	59
<i>Figura 22.</i> Modelado 3D del refuerzo inferior de guardachoques.	59
<i>Figura 23.</i> Refuerzo inferior de guardachoque convertido en figura simétrica.	60
<i>Figura 24.</i> Comparación de medidas del refuerzo superior de guardachoques (a) y el refuerzo inferior de guardachoque (b), las unidades se encuentran en milímetros.	60
<i>Figura 25.</i> Ensamble de los refuerzos superior e inferior de guardachoques en el software NX.....	61
<i>Figura 26.</i> Propiedades físicas del refuerzo inferior de guardachoques. (SolidWorks, 2016).	68
<i>Figura 27.</i> Volumen de las caras de mayor extensión del refuerzo inferior de parachoques, cara A: ubicada en el eje +X, cara B: ubicado en el eje -X. (SolidWorks, 2016).....	69
<i>Figura 28.</i> Parámetros de funcionamiento del sistema.....	72
<i>Figura 29.</i> a) Dimensiones del proyectil con seccionamiento en el centro para el cumplimiento del peso establecido; b) Ensamble generado en el software NX de los elementos a simular.....	74
<i>Figura 30.</i> Segmentación de la geometría para un mejor análisis durante la simulación.	75
<i>Figura 31.</i> Generación de mallado computacional para el impacto entre un proyectil y una placa de acero.....	76
<i>Figura 32.</i> Selección de tipo de análisis y método de resolución. (NX Unigraphics, 2017) ...	77
<i>Figura 33.</i> Parámetros para creación de la malla computacional del análisis estructural. (NX Unigraphics, 2017).....	78
<i>Figura 34.</i> Generación de la malla computacional para análisis estructural. (NX Unigraphics, 2017)	78
<i>Figura 35.</i> Asignación de material para el análisis estructural. (NX Unigraphics, 2017)	79

Figura 36. Asignación de cargas en el refuerzo inferior de guardachoque para el análisis estructural. (NX Unigraphics, 2017).....	80
Figura 37. Restricción de fijación en las bases del refuerzo inferior de guardachoque. (NX Unigraphics, 2017).....	80
Figura 38. Selección de nodos para análisis de resultados en el análisis estructural (NX Unigraphics, 2017).....	81
Figura 39. Ingreso del componente del sistema <i>Geometry</i> , enlazado con la selección del análisis <i>Explicit Dynamics</i> (Ansys, 2017).	83
Figura 40. Introducción de datos para agregar nuevos materiales (Ansys, 2017).	84
Figura 41. Creación de corte simétrico para la geometría importada (Ansys, 2017).....	85
Figura 42. Asignación de materiales y espesor de elementos <i>Shell</i> , previo a la generación de mallado (Ansys, 2017).....	85
Figura 43. Generación de mallado para las geometrías sometidas a análisis.....	86
Figura 44. Selección de nodos específicos para la obtención de resultados específicos.	87
Figura 45. Selección de nodos específicos para la obtención de resultados específicos del LBS.	88
Figura 46. a. Selección de cuerpos para aplicar velocidad en el eje X; b. Selección de caras para soportes fijos.	88
Figura 47. Introducción de soluciones requeridas para el análisis del evento de impacto.....	89
Figura 48. Resultados de deformación de placa de acero, a) velocidad de proyectil a 54 m/s; b) velocidad de proyectil 77 m/s (Ansys, 2017).	92
Figura 49. Resultados de deformación de placa de acero, a) velocidad de proyectil a 148 m/s; b) velocidad de proyectil 165 m/s (Ansys, 2017).	93
Figura 50. Resultados de deformación de placa de acero, a) velocidad de proyectil a 207 m/s; b) velocidad de proyectil 225 m/s (Ansys, 2017).	93
Figura 51. Deformación total (a) y direccional en Y (b) del refuerzo inferior de guardachoques usando polipropileno como material base, con una carga aplicada de 20 kN. (NX Unigraphics, 2017).....	95
Figura 52. Deformación total (a) y direccional en Y (b) del refuerzo inferior de guardachoques usando polietileno como material base, con una carga aplicada de 20 kN. (NX Unigraphics, 2017).....	96

Figura 53. Deformación total (a) y direccional en Y (b) del refuerzo inferior de guardachoques usando poliestireno como material base, con una carga aplicada de 20 kN. (NX Unigraphics, 2017).....97

Figura 54. Deformación total (a) y direccional en Y (b) del refuerzo inferior de guardachoques usando policarbonato como material base, con una carga aplicada de 20 kN. (NX Unigraphics, 2017).....98

Figura 55. Deformación total (a) y direccional en Y (b) del refuerzo inferior de guardachoques usando acrilonitrilo butadieno como material base, con una carga aplicada de 20 kN. (NX Unigraphics, 2017).....99

Figura 56. Deformación total (a) y direccional en Y (b) del refuerzo inferior de guardachoques usando poliácido láctico como material base, con una carga aplicada de 20 kN. (NX Unigraphics, 2017)..... 100

Figura 57. Deformación total (a) y direccional en Y (b) del refuerzo inferior de guardachoques usando PC/ABS reforzado con 10% de fibra de vidrio como material base, con una carga aplicada de 20 kN. (NX Unigraphics, 2017) 102

Figura 58. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos, usando como material base del refuerzo inferior de guardachoques polipropileno..... 105

Figura 59. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises, para el LBS usando polipropileno como material base, a) Diagrama de resultados; b) Distribución gráfica de presión en él LBS..... 106

Figura 60. Resultados del acelerómetro ubicado a 60 mm del centro de la división entre fémur y tibia usando polipropileno como material base. 106

Figura 61. Resultados de la deformación total del refuerzo inferior de guardachoque usando como material base polipropileno, en diferentes zonas de tiempo. 107

Figura 62. Resultados de deformación direccional del refuerzo inferior de guardachoques en los nodos 1, 2 y 3, usando polipropileno como material base. La posición de los nodos en el LBS, se detalla en la figura 45. 108

Figura 63. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos, usando como material base del refuerzo inferior de guardachoques polietileno. 109

Figura 64. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises, para el LBS usando polietileno como material base, a) Diagrama de resultados; b) Distribución gráfica de presión en él LBS. 110

Figura 65. Resultados del acelerómetro ubicado a 60 mm del centro de la división entre fémur y tibia usando polietileno como material base. 111

Figura 66. Resultados de la deformación total del refuerzo inferior de guardachoque usando como material base polipropileno, en diferentes zonas de tiempo. 112

Figura 67. Resultados de deformación direccional del refuerzo inferior de guardachoques en los nodos 1, 2 y 3, usando polietileno como material base. 113

Figura 68. Resultados de esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos, usando como material base del refuerzo inferior de guardachoques, poliestireno. 114

Figura 69. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises, para el LBS usando poliestireno como material base, a) Gráfico de resultados; b) Distribución gráfica de presión en él LBS. 115

Figura 70. Resultados del acelerómetro ubicado a 60 mm del centro de la división entre fémur y tibia usando poliestireno como material base. 116

Figura 71. Resultados de la deformación total del refuerzo inferior de guardachoque usando como material base poliestireno, en diferentes zonas de tiempo. 117

Figura 72. Resultados de deformación direccional del refuerzo inferior de guardachoques en los nodos 1, 2 y 3, usando poliestireno como material base. La posición de los nodos en el LBS, se detalla en la figura 45. 118

Figura 73. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos, usando como material base del refuerzo inferior de guardachoques policarbonato. 119

Figura 74. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises, para el LBS usando policarbonato como material base, a) Diagrama de resultados; b) Distribución gráfica de presión en él LBS. 120

Figura 75. Resultados del acelerómetro ubicado a 60 mm del centro de la división entre fémur y tibia usando polipropileno como material base. 121

Figura 76. Resultados de la deformación total del refuerzo inferior de guardachoque usando como material base policarbonato, en diferentes zonas de tiempo. 122

Figura 77. Resultados de deformación direccional del refuerzo inferior de guardachoques en los nodos 1, 2 y 3, usando policarbonato como material. 123

Figura 78. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos, usando como material base del refuerzo inferior de guardachoques ABS. 124

Figura 79. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises, para el LBS usando ABS como material base, a) Diagrama de resultados; b) Distribución gráfica de presión en él LBS 125

Figura 80. Resultados del acelerómetro ubicado a 60 mm del centro de la división entre fémur y tibia usando ABS como material base. 126

Figura 81. Resultados de la deformación total del refuerzo inferior de guardachoque usando como material base ABS, en diferentes zonas de tiempo.	127
Figura 82. Resultados de deformación direccional del refuerzo inferior de guardachoques en los nodos 1, 2 y 3, usando polipropileno como material. La posición de los nodos en el LBS, se detalla en la figura 45.	128
<i>Figura 83.</i> Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos, usando como material base del refuerzo inferior de guardachoques PLA.....	129
<i>Figura 84.</i> Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises, para el LBS usando PLA como material base, a) Diagrama de resultados; b) Distribución gráfica de presión en él LBS	130
Figura 85. Resultados del acelerómetro ubicado a 60 mm del centro de la división entre fémur y tibia usando PLA como material base.	130
Figura 86. Resultados de la deformación total del refuerzo inferior de guardachoque usando como material base PLA, en diferentes zonas de tiempo.	131
Figura 87. Resultados de deformación direccional del refuerzo inferior de guardachoques en los nodos 1, 2 y 3, usando PLA como material base.	132
<i>Figura 88.</i> Resultados de esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos, usando como material base del refuerzo inferior de guardachoques, PC/ABS reforzado con 10 % de fibra de vidrio.....	133
<i>Figura 89.</i> Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises, para el LBS usando PC/ABS reforzado con 10 % de fibra de vidrio como material base, a) Gráfico de resultados; b) Distribución gráfica de presión en él LBS.	134
Figura 90. Resultados del acelerómetro ubicado a 60 mm del centro de la división entre fémur y tibia usando PC/ABS reforzado con 10 % de fibra de vidrio como material base.	135
Figura 91. Resultados de la deformación total del refuerzo inferior de guardachoque usando como material base PC/ABS reforzado con 10 % de fibra de vidrio, en diferentes zonas de tiempo.	136
Figura 92. Resultados de deformación direccional del refuerzo inferior de guardachoques en los nodos 1, 2 y 3, usando PC/ABS reforzado con 10 % de fibra de vidrio como material base. La posición de los nodos en el LBS, se detalla en la figura 45.	137
Figura 93. <i>Comparación de resultados del análisis estructural obtenidos con distintos materiales en un gráfico radial</i>	142
Figura 93. <i>Deformación total del refuerzo inferior de parachoques con diferentes materiales. a. Polipropileno; b. Poliacido láctico; c. Policarbonato; d. PC/ABS 10 % fibra de vidrio; e. Polietileno; f. ABS; g. Poliestireno</i>	148

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Polímeros usados en un vehículo.....	21
Tabla 2. Composición de polímeros por cada zona del automotor.....	23
Tabla 3. Principales modelos vendidos por KIA.	26
Tabla 4. Calificación de la EuroNCAP para protección de peatones del modelo Picanto.	33
Tabla 5. Límites biomecánicos de miembros inferiores recomendados en un impacto.	35
Tabla 6. Comparación de resultados entre pruebas computacionales y ensayos físicos de la EuroNCAP.	36
Tabla 7. Resultados de pruebas estáticas Instron.	38
Tabla 8. Características del impactador de piernas avalado por la ONU.	44
Tabla 9. Tabla de propiedades mecánicas de materiales usados en los refuerzos de guardachoque.	62
Tabla 10. Tabla de propiedades mecánicas de materiales alternos para reemplazar el polipropileno de propiedades mecánicas de materiales usados en los refuerzos de guardachoque.	63
Tabla 11. Índice de calidad de la malla.....	87
Tabla 12. Cálculo de tiempo de paso mínimo para asegurar propagación de onda en el material.	91
Tabla 13. Parámetros geométricos de post-procesamiento para proyectil y laca de acero.....	92
Tabla 14. <i>Masa generada por Ansys en él post-procesamiento con polipropileno. para él LBS.</i>	94
Tabla 15. Deformación del LBS sometido a una carga de 20 kN, usando polipropileno como material base.	95
Tabla 16. Deformación del LBS sometido a una carga de 20 kN, usando polietileno como material base.	97
Tabla 17. Deformación del LBS sometido a una carga de 20 kN, usando poliestireno como material base.	98
Tabla 18. Deformación del LBS sometido a una carga de 20 kN, usando policarbonato como material base.	99
Tabla 19. Deformación del LBS sometido a una carga de 20 kN, usando ABS como material base.	100

Tabla 20. Deformación del LBS sometido a una carga de 20 kN, usando PLA como material base.	101
Tabla 21. Deformación del LBS sometido a una carga de 20 kN, usando PC/ABS/10%FV como material base.	102
Tabla 22. Parámetros geométricos de post-procesamiento.....	103
Tabla 23. Comparación de resultados del lanzamiento de proyectil y placa de acero.....	139
Tabla 24. Comparación de resultados de análisis estructural del refuerzo inferior de parachoques.....	141
Tabla 25. Comparación de aceleraciones G, considerando las diferentes opciones de material propuestas.	143
Tabla 26. Comparación de la deformación del LBS considerando el uso de distintos materiales.	145
Tabla 27. Comparación de resultados entre aceleración de la tibia y esfuerzo equivalente de Von Mises.	146
Tabla 28. Materiales para selección de reemplazo de material del refuerzo inferior de guardachoques.....	149
Tabla 29. Selección de materiales en base a métodos multicriterio.	150

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación de tiempo en base a la distancia.	64
Ecuación 2. Aceleración	64
Ecuación 3. Fuerza.	65
Ecuación 4. Paso mínimo para asegurar propagación de onda.	66
Ecuación 5. Frecuencia natural de onda.	66
Ecuación 6. Longitud del elemento.	66
Ecuación 7. Modelo tetraédrico de propagación de onda.	67
Ecuación 8. Reemplazo de valores en la ecuación de propagación de onda.	67
Ecuación 9. Paso mínimo para asegurar propagación de onda en base al modelo tetraédrico de propagación de onda.	69
Ecuación 10. Cálculo de propagación de onda.	70
Ecuación 11. Cálculo del diámetro de una esfera a partir de la masa. y densidad.	73

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Fichas técnicas de materiales de la empresa RTP Co.	163
Anexo B. Análisis de calidad de mallado, para simulación estructural en NX.	169
Anexo C. Informe de simulación con material base de polipropileno para el refuerzo inferior de guardachoques.	173
Anexo D. Tabla de resultados obtenidos para selección de materiales por métodos multicriterio.	189
Anexo E. Imágenes de la simulación computacional del refuerzo inferior de parachoques.	190

RESUMEN

Con el fin de incrementar la producción nacional de partes automotrices, las ensambladoras nacionales buscan constantemente alternativas que permitan disminuir el CKD importado y así beneficiarse con las regulaciones impuestas por el COMEX.

Este documento, describe el funcionamiento del refuerzo inferior de parachoques, mismo que forma parte del sistema de protección de peatones, usando la metodología de ingeniería inversa se digitalizó el repuesto con ayuda de un scanner 3D, se procedió a realizar una simulación computacional con análisis de dinámica explícita, donde se determinaron los parámetros principales de funcionamiento, de diseño y de falla.

Con los resultados del estudio, es posible establecer una lista de materiales alternos para el reemplazo del polipropileno como material base de fábrica sin variar la geometría y respetando la normativa referente a la protección de peatones.

Palabras clave: Ingeniería inversa, refuerzo inferior de parachoques, materiales alternos, sistema de protección de peatones, simulación CAE, dinámica explícita.

ABSTRACT

In order to increase the national production of automotive parts, the national assemblers are constantly looking for alternatives to reduce the imported CKD and obtain benefit from the regulations imposed by the COMEX.

This document describes the operation of the lower bumper snifter, which is part of the pedestrian protection system, using the reverse engineering methodology, the part was digitized with the help of a 3D scanner, a computational simulation was carried out with analysis of explicit dynamics, where the main parameters of operation, design and failure were determined.

With the results of the study it is possible to establish a list of alternative materials for the replacement of polypropylene as a factory base material, without changing the geometry and respecting the regulations pertaining to the protection of pedestrians.

Keywords: Reverse engineering, lower bumper snifter, alternative materials, pedestrian protection system, CAE simulation, explicit dynamics.

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

En los últimos 50 años, la industria automotriz incremento el uso de plásticos en la constitución del vehículo reemplazando los metales que comúnmente se usaba tanto en el exterior como interior del vehículo, esto se debe a la facilidad de moldeo, disminución de peso, lo que permite una reducción de consumo de combustible, disminución de emisiones, reducción de ruido, funciona como aislante y disminuye la vibración. En 2012 a nivel mundial la producción del plástico para uso automotriz abarco el tercer lugar, siendo el 8,2 % de su producción, el polipropileno, siendo el polímero de mayor producción abarcando un 19 % (Gongora, 2014). Sin embargo, se tiene previsto un crecimiento anual del 10,9 % hasta el 2020, siendo la región Asia-Pacífico el mayor mercado para la industria automotriz, esto debido a la mayor producción del polipropileno (PP), uno de los materiales más comunes dentro de los polímeros de uso automotriz y se estima un crecimiento del 12 % hasta el 2025 (Grand View Research, 2014).

El uso de los polímeros como material del vehículo, se vuelve cada vez más común, puesto que reemplaza elementos metálicos, cumpliendo las mismas o mejores funciones dentro del automotor como sucedió con los guardachoques, que, a partir de normas en los años 70, se redefinen los materiales usados y se empieza a considerar al plástico como el material más idóneo para la absorción de impactos e incluso de menor costo por su facilidad de producción en relación al metal. (Navarro, Gómez, García, & Águeda, 2010).

A partir de investigaciones y nuevas tecnologías, el plástico aumenta en la composición de polímeros en un automotor con respecto al metal, en la actualidad abarca entre el 10 y 15 % del vehículo en relación a su peso, siendo el polipropileno el que ocupa el

mayor porcentaje de material plástico seguido del poliuretano, en la tabla 1, se puede apreciar la composición del plástico en un automotor (Szeteiová, 2010).

Tabla 1.

Polímeros usados en un vehículo.

Componente	Principales tipos de polímeros	Peso (kg)
Parachoques	PS, ABS, PC/PBT	10
Asientos	PUR, PP, PVC, ABS, PA	13
Tableros	PP, ABS, SMA, PPE, PC	7
Sistema de combustible	HDPE, POM, PA, PP, PBT	6
Cuerpo (paneles incluidos)	PP, PPE, UP	6
Componente	Principales tipos de polímeros	Peso (kg)
Componentes del capó	PA, PP, PBT	9
Cuerpo interior	PP, ABS, PET, POM, PVC	20
Componentes eléctricos	PP, PE, PBT, PA, PVC	7
Cuerpo exterior	ABS, PA, PBT, POM, ASA, PP	4
Iluminación	PC, PBT, ABS, PMMA, UP	5
Tapicería	PVC, PUR, PP, PE	8
Reservorio de líquidos	PP, PE, PA	1
Total		96

Nota: Composición de polímeros en relación a la masa del vehículo, señalando los principales materiales acorde a su componente. Adaptado de “Szeteiová, K. (2010). Automotive materials plastics in automotive markets today. Bratislava, Slovak: Slovak University of Technology.

La industria automotriz ecuatoriana, tuvo caídas de ventas de automotores debido a la legislación tributaria impuesta por el Comité del Ministerio Exterior con la resolución número 30 en 2011 (Resolución N°30, 2011), donde fijo un arancel a partes automotrices de los ensambladores entre el 0 y 18%, cuya variación fue proporcional al porcentaje de *Completely Knock Down* (CKD) producido por empresas locales, en razón de cumplir con el objetivo 10 del plan nacional del buen vivir respecto al cambio de matriz productiva (SENPLADES, 2013).

Si bien, el número de producción disminuyó, empresas nacionales lograron establecerse como distribuidores de partes automotrices, tal es el caso de fábricas que se han especializado en producir diferentes piezas del vehículo, como de Tecnifaissa CIA LTDA en filtros, Tecnividrio 00 S.A. en parabrisas y vidrios laterales, Metaltronic S.A. con la producción de partes estructurales del automotor etc., cuyo fin es alimentar de producto nacional a las ensambladoras ecuatorianas beneficiando a la reducción del cobro de arancel del CKD utilizado por las ensambladoras del país, sin embargo, la composición entre partes importadas y producidas en el país sigue sin cumplir el mínimo requerido, por ese motivo el COMEX y la CINEA acuerdan reducir el mínimo requerido del 18 % al 16 % en 2017, sin embargo, dentro del acuerdo esta integrar partes nacionales hasta alcanzar un 19 % en 3 años, el sector estima que para disminuir la tasa arancelaria del CKD a un 0 %, deberá integrarse un 30 % de partes producidas en el Ecuador (Zumba, 2017).

Algunos elementos nacionales del vehículo son elaborados en la industria metalmecánica, ocupando zonas estructurales, siendo una solución viable para alcanzar la composición legislada para vehículos con chasis independiente, sin embargo, la mayor parte de automotores en la actualidad producidos por las ensambladoras usan vehículos con chasis autoportante o monocasco llegando a condiciones de fabricación más complejas y con restricciones económicas por el limitado número de unidades en producción, mientras que la carrocería del vehículo como guardafangos, techos, capos, puertas (etc.), tienen acabados y formas que limitan su fabricación local por factores tecnológicos y económicos al tratarse de componentes con un número de producción muy pequeño para el mercado nacional.

Sin embargo, los vehículos actuales poseen una composición aproximada del 30% con respecto al peso de polímeros, misma que tiende a aumentar, por tanto, las ensambladoras

consideran la industria del plástico como una alternativa viable para cumplir la legislación del país. Es por ello que varias empresas nacionales han centrado su producción en las zonas con mayor porcentaje de polímero, si se toma la tabla 1 y se dividen los sistemas por zonas dividiéndolas entre habitáculo, carrocería y componentes de sistemas eléctricos y de fluidos, tendríamos la composición de la tabla 2.

Tabla 2.

Composición de polímeros por cada zona del automotor.

Habitáculo	
Componente	% Composición
Cuerpo interior	21%
Asientos	14%
Tapicería	8%
Tableros	7%
Total	50%
Carrocería	
Componente	% Composición
Parachoques	10%
Componentes del capó	9%
Cuerpo (paneles incluidos)	6%
Cuerpo exterior	4%
Total	30%
Sistemas eléctricos y fluidos	
Componente	% Composición
Componentes eléctricos	7%
Sistema de combustible	6%
Iluminación	5%
Reservorio de líquidos	1%
Total	20%

Nota: Porcentaje de composición de polímeros en relación a la masa total de componente plásticos en el vehículo, clasificado según las zonas de mayor influencia en un automotor. Adaptado de “Szeteiová, K. (2010). Automotive materials plastics in automotive markets today. Bratislava, Slovak: Slovak University of Technology.

Según la composición presentada, la opción lógica para abarcar un mayor porcentaje de piezas de fabricación ecuatoriana, sería replicar los componentes del habitáculo mismos que ocupan aproximadamente el 50% del total de polímeros existentes en el automotor, sin embargo la industria tiene dos limitantes, el elevado nivel de acabado por tratarse de las partes más visibles de un conductor y la baja demanda por piezas de recambios, puesto que estas autopartes no tienen exposición al exterior y su porcentaje de daño en un impacto es bajo en relación a la carrocería, sin embargo componentes como la espuma de los asientos e insonorizantes son fabricadas por la empresa ecuatoriana Elasto, debido a que los acabados del asiento termina con el tapizado del mismo, sin embargo partes de mayor magnitud y visibilidad como tableros o tapizados plásticos, siguen formando parte del CKD.

Por tanto, para aprovechar la demanda tanto de unidades vendidas por concesiones y la demanda de repuestos de recambio por colisión, los elementos de carrocería son más rentables para la producción. El sistema de protección delantera mismo que ocupa el 10 % de la composición tiene elementos viables para fabricación, aunque los guardachoques ocupan una zona muy amplia en un automotor son elementos complicados de replicar por el factor económico debido al tipo de maquinaria y moldes de inyección de gran tamaño haciendo que el análisis costo-beneficio no sea rentable al tratarse de la demanda local, puesto que en el mercado existen alternativas de fabricación importadas desde China con un número de producción para abastecer un mercado regional, por tanto, el costo de producción en base a un potencial de unidades a producir en el mercado local, disminuye rentabilidad en las empresas ecuatorianas. Por ese motivo, las industrias de polímeros en Ecuador junto con las ensambladoras nacionales fijan como objetivo aumentar los componentes no visibles de mayor demanda en una colisión, con el fin de disminuir gasto en acabados, pero al tratarse del sistema de parachoques, estos requieren diferentes aprobaciones técnicas, regidas por la

normativa INEN y la homologación desde fábrica de origen para asegurar la calidad del automotor.

Las normas internacionales, nacionales, al igual que las especificaciones técnicas de las compañías automotrices tienen como objetivo asegurar confort y seguridad, por ese motivo los vehículos son sometidos a rigurosas pruebas de sus elementos con el fin de garantizar calidad. Por tanto, las empresas locales antes de proponer partes de fabricación nacional a las ensambladoras, para disminuir las partes importadas de CKD y cumplir la resolución del COMEX (Resolución N°30, 2011), deben realizar estudios previos de la función específica del componente, el tipo de material a usarse y pruebas que corroboren que la autoparte cumple con las especificaciones técnicas. Uno de los componentes a fabricar para aumentar la composición nacional en el CKD es el refuerzo inferior de guardachoques, elemento que sirve para la protección de miembros inferiores del peatón, pero esta pieza requiere ser validada técnicamente antes de proceder al prototipado y fabricación.

Planteamiento del problema

Tomando los antecedentes expuestos en cuanto a producir partes no visibles del sistema de protección delantera y posterior, sumado al compromiso de las ensambladoras de incrementar la integración de partes locales en la composición del vehículo, es necesario desarrollar un estudio que permita definir los mínimos requisitos de fabricación para un refuerzo inferior de guardachoques, sin modificar la geometría y asegurando calidad en cuanto a su finalidad, que es proteger a los peatones.

La empresa AYMESA, quien ensambla vehículos de la segunda marca más vendida del país, en 2015 produjo 4798 unidades del SPORTAGE ACTIVE, mismas que fueron comercializadas en los últimos años siendo el vehículo más vendido de la sección SUV de la

marca KIA. A finales del 2016 se hace oficial el cierre de producción del SPORTAGE ACTIVE, para dar paso al SPORTAGE R proyectándose como el reemplazo de su anterior versión, aumentando en 2016 un 35 % sus ventas en relación al 2015 (AEADE, 2017).

Considerando la participación de KIA en el mercado, la cual fue en 2016 del 13% y aumento al 19 % durante el segundo trimestre el 2017, se puede proyectar que el vehículo SPORTAGE R ocupará el margen de venta del Sportage Active, como se muestra en la tabla 3 (AEADE, 2017).

Tabla 3.

Principales modelos vendidos por KIA.

Modelo	Año	
	2015	2016
Rio R	640	2228
Sportage Active	2156	1728
Sportage R	594	913
Cerato Forte	1019	546
Picanto R	--	545

Nota: El modelo Picanto R fue introducido por KIA en 2015, mientras que el Sportage R de producción nacional empieza a comercializarse a finales del 2016. Adaptado de “AEADE (2017). Anuario 2016. Quito, Ecuador.

Obtenido de <http://www.aeade.net/anuario-2016/>

Si bien existen elementos como espumas, compactadores metálicos y otros elementos que son de fabricación nacional, el sistema de protección de peatones conformado por el refuerzo inferior de guardachoques, sigue sin ser validado para la fabricación nacional.

Por la proyección de crecimiento en cuanto a la producción del Sportage R, se ha considerado este vehículo, para brindar una alternativa para incentivar la producción nacional, por tanto, el presente estudio se plantea desarrollar un modelo ingenieril para validar alternativas de materiales para la producción del refuerzo inferior de guardachoques,

sin afectar su geometría y a su vez manteniendo las especificaciones mínimas que el fabricante diseño para el elemento a evaluar, es así, que él estudia se centra en evaluar los factores que sufre el refuerzo inferior del guardachoque de un Sportage R al impactarse con los miembros inferiores de un peatón, aplicando distintos materiales.

Por tanto, el problema del caso sería:

¿Se puede usar la ingeniería inversa para reproducir el refuerzo inferior de guardachoques para un Sportage R, seleccionando un material alternativo al repuesto original y así disminuir costos de prototipado?

A partir de esta pregunta, se puede tener preguntas específicas como:

¿Qué parámetros se deben tomar en cuenta para determinar el cumplimiento de la función específica del refuerzo inferior de guardachoques?

Mediante un análisis computacional, ¿Es posible validar los mínimos esfuerzos a los que debe someterse el refuerzo inferior de guardachoques de un Sportage R?

¿Es posible, definir materiales alternos que se acoplen a la función principal del elemento a estudiar?

Justificación

El objetivo principal de la investigación es, reproducir el refuerzo inferior del guardachoque frontal (LBS) del auto KIA SPORTAGE R, mediante la ingeniería inversa y la simulación computacional para la fabricación con un material alternativo.

Sin embargo, el elemento en estudio, se trata de una pieza que forma parte del sistema de protección delantera en vehículos tipo turismo, por tanto, su diseño está basado en requerimientos mínimos de normas internacionales, por ende, la complejidad del estudio se basa en cumplir con las normas internacionales como las características del elemento original para obtener la homologación de la autoparte mencionada.

Una manera de validar un repuesto, suele ser sometiendo un prototipo a ensayos físicos, sin embargo, esto significa, no solo el uso de un vehículo para las pruebas pertinentes, también requiere el molde de inyección para su fabricación y material para extruir el elemento, por lo que representa un coste elevado para la evaluación de un prototipo. Por este motivo para conseguir el desarrollo del tema propuesto será necesario aplicar la metodología de la ingeniería inversa basándose en un modelo computacional, por tanto, para el desarrollo se debe:

Determinar la función específica del elemento y los requerimientos técnicos para su homologación, tomando argumentos teóricos de investigaciones relacionadas tanto de ensayos físicos como pruebas computacionales. Para identificar los parámetros a evaluar del refuerzo inferior de guardachoques del Sportage R, es necesario comprender la funcionalidad y los parámetros de diseño, al ser un elemento basado en una normativa de protección de peatones, existe información en la red que permite encontrar datos relacionados con este estudio.

Desarrollar un modelo de simulación computacional para corroborar las principales propiedades del repuesto original al ser sometido a un impacto con los miembros inferiores de un peatón. Una manera para disminuir costos de pre-producción, se basa en el análisis computacional validado por un método de elementos finitos (FEM), lo cual permite disminuir

los costos producidos al ir a un ensayo físico sin realizar estudios previos en softwares informáticos.

Con los datos obtenidos previamente se sugerirá materiales existentes en el mercado como posibles reemplazos, los cuales serán sometidos a pruebas computacionales con el fin de seleccionar el material más apto para cumplir las funciones específicas del componente.

Dado, a la limitada producción nacional, en cuanto a partes del CKD en el ensamblaje del país, el estudio busca incentivar a la producción local, de la misma manera, beneficia directamente a las ensambladoras al contribuir con el aumento del porcentaje de partes nacionales en el sector automotriz, al tener mayor capacidad productiva, beneficia directamente a la comunidad, puesto que, a mayores partes automotrices producidas en el Ecuador, mayor será el número de plazas de empleo en el sector.

Siguiendo los pasos descritos y cumpliendo con el objetivo principal de la investigación el cual es replicar un elemento con materiales disponibles en el mercado regional, se podrá disponer de diferentes opciones de materiales donde se podrá evaluar su producción con la certeza que se respeta los requisitos técnicos y de calidad de la autoparte, antes de proceder a la fabricación y someter al componente a ensayos físicos para la homologación de la marca.

Estudio del arte

Generalidades del sistema de protección delantera

El sistema de protección delantera de los vehículos empezó a implementarse en los años 20 y 30, con el objetivo de proteger al vehículo de colisiones frente a otros automotores, siendo los primeros parachoques fabricados de barras de acero, sin embargo a raíz de los

múltiples accidentes con graves saldos de colisión que afectaron a los pasajeros, causando graves lesiones debido a la poca absorción de energía de los elementos de protección trasero y delantero, se vuelve necesario un estudio más profundo respecto al diseño del sistema de parachoques, siendo así que para los años 70 empieza a entrar en vigencia normas con el fin de disminuir el daño al pasajero en caso de una colisión (Navarro, Gómez, García, & Águeda, 2010).

Sin embargo, los resultados no fueron difundidos por los fabricantes ni por las organizaciones encargadas de la homologación de los vehículos hasta 1997, año en el cual un gran número de organizaciones europeas forman la EuroNCAP donde someten a rigurosas pruebas a vehículos ya a la venta, cuyo objetivo es crear conciencia de seguridad tanto para el consumidor como para los fabricantes, asesorando incluso a los legisladores para la creación de nuevas normativas de seguridad, siendo parte importante la incorporación de medición de la seguridad categorizándola respecto a ocupantes adultos, ocupantes infantiles, daños al peatón y asistentes de seguridad del vehículo. (EuroNCAP, 2017)

En la actualidad las normas que los fabricantes usan para el diseño de los vehículos son la: Europa: ECE R-42; USA: Us-Part 581, estas normas dan especificaciones mínimas de la capacidad de absorción de energía, así como la altura del montaje del parachoques. (Dietsche & Klingebiel, 2005).

Las pruebas a las que son sometidos los parachoques, son a un impacto frontal con una pared indeformable a una velocidad de 4 km/h, con el fin de evaluar que no exista deformación a bajas velocidades. Mientras que a 40km/h, la finalidad de la prueba es evaluar la cantidad de energía absorbida en el sistema de paragolpes antes que sea transmitida a la zona estructural del automotor con la finalidad de disminuir la energía generada al interior del

habitáculo, debido a las propiedades mecánicas de absorción de energía, los polímeros ocupan la mayor parte de los materiales empleados en el sistema. (Martin J., Et al., 2010)

Sin embargo, el enfoque inicial no es suficiente al tratarse de la vía pública, las normas mencionadas toman en cuenta únicamente la seguridad de los pasajeros sin precisar afectación a los peatones, que son vulnerables ante posibles impactos directos de un automotor por tal motivo nace normas internacionales destinadas a la protección del peatón, la normativa promovió el desarrollo de geometrías que produzcan un menor impacto al peatón al ser golpeado por el guardachoque, guardafangos y capot, como el diseño de nuevos componentes que disminuyan el daño producido, uno de estos elementos es el refuerzo inferior del parachoques (LBS).

Refuerzo inferior del parachoques (LBS)

El refuerzo inferior del parachoques o *lower bumper snifter* (LBS) forma parte del sistema de protección delantera en vehículos de motor, aprobado por el parlamento europeo y del consejo relativo de protección a los peatones y otros usuarios vulnerables en la vía pública, este elemento entró en vigencia en octubre del 2005, donde Adam Opel GmbH en Rüsselsheim en cooperación con la empresa BASF crean un nuevo elemento el cual fue introducido en el Corsa Opel 2006. (BASF, 2006). Esta autoparte tiene como finalidad evitar lesiones en los peatones en una colisión frontal, según la presentación de la empresa BASF en la *European HyperWorks Technology Conference Berlin* en 2007 (Wüst, 2007), se muestra el funcionamiento del refuerzo, el cual está ubicado detrás del guardachoque frontal en la zona inferior y su función es absorber energía para evitar las lesiones de rodilla que generalmente esfuerzan a los miembros inferiores del peatón como muestra la figura 1 (Wüst, 2007).

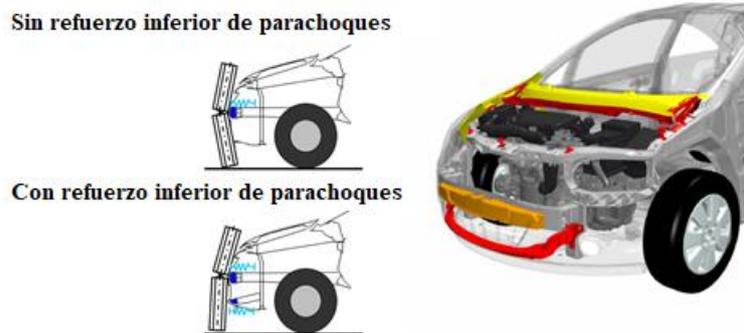


Figura 1. Comparación de impacto en las piernas inferiores con y sin uso del LBS. (Wüst, 2007)

Peter Schuster afirma que la fuerza máxima permitida para un impacto a baja velocidad del vehículo es mayor que la tolerada por los miembros inferiores de un humano, por tanto, llega a la conclusión que entre las patentes examinadas la mejor opción es el refuerzo inferior o LBS. (Schuster , 2006). En base a estudios y pruebas, la unión europea aprueba en 2007 el uso de un protector inferior de piernas (DIR2003/102/EC), por tanto, las fabricas automotrices insertan en el diseño de sus vehículos un nuevo elemento cuya función específica es evitar lesiones de rodilla en los peatones, puesto que se regula la homologación de vehículos para la circulación en la unión europea en Octubre del 2007, cuya principal directriz es reducir el número de lesiones en víctimas peatonales causado por accidentes frontales, mejorando las medidas que permitan una mayor protección de los peatones y otros usuarios vulnerables en la vía pública antes y en caso de una colisión con la zona delantera de un automotor. (Directiva 2003/102/CE, 2003). Estos parámetros se incluyen en el apéndice 126 con la regulación técnica de la ONU con respecto a protección de peatones. (Addendum 126: Regulation No. 127, 2013)

Una comparación entre vehículos KIA que circularon en la unión europea es el Picanto modelo 2004 y 2011. Según los datos de la EuroNCAP, se puede apreciar una

notable mejora en las pruebas en cuanto a la protección de peatones como muestra la tabla 4, donde en base a normativas técnicas se mide en puntos (Pts) la eficiencia del sistema en una zona específica siendo el máximo puntaje en este caso 20 puntos (EuroNCAP, 2017).

Tabla 4.

Calificación de la EuroNCAP para protección de peatones del modelo Picanto.

PICANTO	2004 (Pts)	2011 (Pts)
PROTECCIÓN PARA PEATONES	6	16.8

Nota: La calificación se encuentra definida en un número de puntos con un rango de 0 a 20. El modelo 2011 presenta varias modificaciones en el diseño del sistema de protección delantero, siendo el LBS un elemento introducido por primera vez en el diseño de este vehículo. Adaptado de EuroNCAP, (2017).

Los análisis teóricos al ser corroboradas con pruebas experimentales, demostraron comportamientos entre un impacto en piernas y los vehículos similares a la mostrada en la figura 2, donde la barra número 1 representa las extremidades inferiores (Fémur-tibia) siendo impactadas por la zona delantera del vehículo en este caso conformado por el guardachoque (2), el refuerzo superior de guardachoques (3) y refuerzo inferior de guardachoques (4) (Chon, Uikey, & Mohammed, 2007).

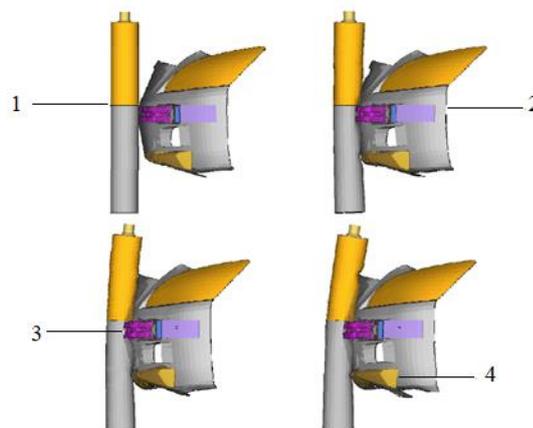


Figura 2. Simulación de un evento de impacto del refuerzo inferior del parachoques. (Chon, Uikey, & Mohammed, 2007)

Chon, Uikey, & Mohammed (2007), toma como referencias de diseño el medir la aceleración de la tibia, la rotación entre el fémur-tibia y el cizallamiento en la articulación de la rodilla, con condiciones de velocidad de 40 km/h y espacio con una altura del parachoques con respecto al suelo de 500 mm, en cualquier ubicación del bumper, siempre que se encuentra en las posiciones máximas que es a 66 mm desde la esquina del parachoques como muestra la figura 3 (Chon, Uikey, & Mohammed, 2007).

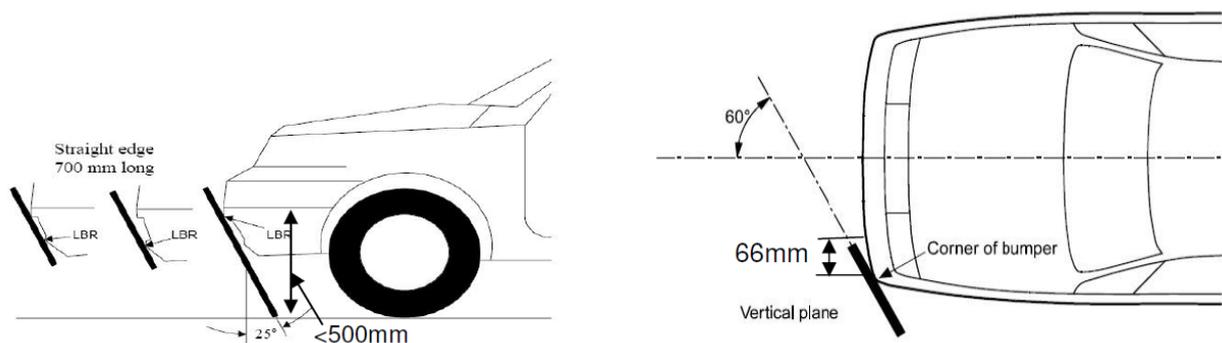


Figura 3. Condiciones físicas para pruebas de impacto entre piernas y parachoques.

Recuperado de (Chon, Uikey, & Mohammed, 2007)

Según Chon, Uikey, & Mohammed, (2007):

“El impacto de peatones en la parte inferior de la pierna es un evento dinámico en el que una forma de pierna deformable choca con el extremo delantero deformable del vehículo a 40 km/h. Tan pronto como la pierna golpea el vehículo, comienza a desacelerar y luego se dobla en la articulación de la rodilla. La aceleración se mide en la articulación de la rodilla. La rotación se mide como una flexión relativa del fémur y tibia en la articulación de la rodilla. El cizallamiento se mide como el desplazamiento lateral del fémur con respecto a la tibia.” (Chon, Uikey, & Mohammed, 2007)

Sin embargo, para las pruebas de simulación Chon, Uikey, & Mohammed (2007), los parámetros que usa se basan en la absorción de energía con una profundidad de 50 mm, que conforma el absorbedor de energía acorde a la normativa europea, con una carga de 2 kN considerando una velocidad a 40 km/h con esto se evalúa el daño de los miembros inferiores

en base a la aceleración vertical, ángulo provocado por el momento flector entre tibia y fémur, desplazamiento provocado por el momento cortante entre tibia y fémur, siendo los límites los valores dados por la tabla 5, en base a diferentes normativas internacionales encargadas de evaluaciones en base a ensayos físicos (Chon, Uikey, & Mohammed, 2007).

Tabla 5.

Límites biomecánicos de miembros inferiores recomendados en un impacto.

	ACEA		EuroNCAP		GTR
	Fase 1 (2005)	Fase 2 (2010)	Rojo	Verde	2010
Aceleración vertical [g]	<200	<150	>200	<150	<170
Ángulo [deg]	<21	<15	>20	>15	<19
Desplazamiento [mm]	<6	<6	>7	>6	<6

Nota: Comparación de normativas para evaluación de daños en miembros inferiores. Adaptado de (Chon, Uikey, & Mohammed, (2007). Energy Absorber Developments and Correlation. SAE.

Chon, Uikey, & Mohammed, (2007), simulo las condiciones para la fabricación de un LBS probo el diseño con distintos materiales, entre ellos el polietileno de alta densidad (*High Density Polyethylene*, HDPE) y Olefinas termoplásticas (*Thermoplastic olefin*, TPO), comparando los datos obtenidos con ensayos de la EuroNCAP, el estudio tuvo como resultados el cuadro de la tabla 6, donde el TPO se considera la mejor opción como material para un refuerzo inferior de guardachoques (Chon, Uikey, & Mohammed, 2007).

Tabla 6.

Comparación de resultados entre pruebas computacionales y ensayos físicos de la EuroNCAP.

	HDPE		TPO	
	Simulación computacional	Ensayos físicos	Simulación computacional	Ensayos físicos
Aceleración vertical (g)	110	100	105	110
Ángulo (deg)	18	20	9	8,5
Desplazamiento (mm)	1,3	1,5	4	3,8

Nota: Resultados del estudio desarrollado para el diseño de un refuerzo inferior de guardachoques. Adaptado de (Chon, Uikey, & Mohammed, 2007).

Parámetro de material del refuerzo inferior de parachoques (LBS).

Los parámetros a tomar en cuenta en relación al material tienen variaciones que no se encuentran normados, pero existen estudios que permiten caracterizar los principios mecánicos a considerar para el diseño de un LBS, en el caso de Chon, Uikey, & Mohammed (2007), consideran que un factor que contribuye en la aceleración del miembro inferior se basa en el porcentaje de corrugación del material. Mientras Karimullah, Gokhale, Joshi, & Chalipat (2011), coinciden en que un parámetro importante es que la amortiguación y rigidez del LBS (1), debe contribuir a un movimiento relativo mínimo entre el fémur y la tibia, en relación a la absorción de energía del absorbedor frontal (2) ubicado en la zona media del vehículo como indica la figura 4 (Karimullah, Gokhale, Joshi, & Chalipat, 2011).

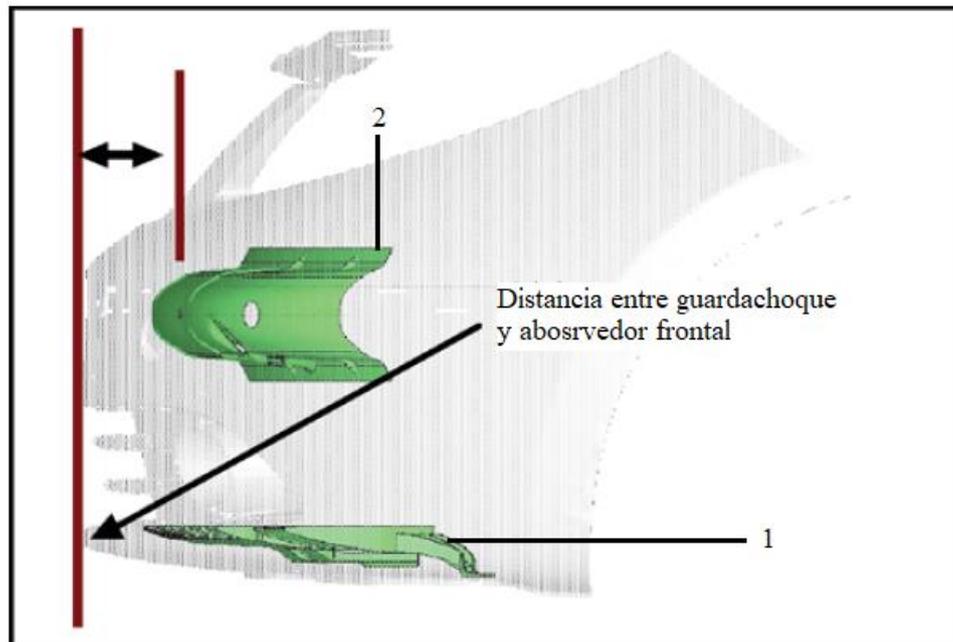


Figura 4. Modelado del sistema de protección de peatones con la inclusión de un LBS. (Karimullah, Gokhale, Joshi, & Chalipat, 2011)

El estudio efectuado por Chon, Uikey, & Mohammed, basado en la absorción de energía del material, seleccionan como el polietileno de alta densidad (*High Density Polyethylene*, HDPE) y el polipropileno expandible (*Expanded Polypropylene*, EPP) de 50 mm con dos variaciones en su fabricación, modelado por inyección y formado al vacío para evaluar características que podrían influir tanto en las pruebas computacionales como los ensayos físicos. Para el desarrollo de las pruebas experimentales, se realiza un estudio de prueba estática de Instron para analizar compresibilidad a una carga de 2 kN, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7 (Chon, Uikey, & Mohammed, 2007).

Tabla 7.

Resultados de pruebas estáticas Instron.

Materiales	Parámetros		
	Fuerza (kN)	Desplazamiento (mm)	Comprensibilidad
HDP	20	45-50	90 %
Espuma PCF 2,8	20	20-50	60 %
Espuma PCF 1,8	20	30-50	40 %

Nota: Comparación de resultados de un refuerzo inferior de guardachoques, sometidos a cargas estáticas con diferentes materiales. Adaptado de Chon, Uikey, & Mohammed, (2007). Energy Absorber Developments and Correlation. Michigan, USA. Obtenido de 10.4271/2007-01-1763.

En cuanto a los resultados de análisis de elementos finitos (FEA) de la figura 5 muestra el análisis de cargas vs deflexión, Chon, Uikey, & Mohammed consideran pruebas de varios materiales, siendo el HDPE el único en mantenerse en la base de 50 mm de acuerdo a la propuesta de diseño que los autores realizaron (Chon, Uikey, & Mohammed, 2007).

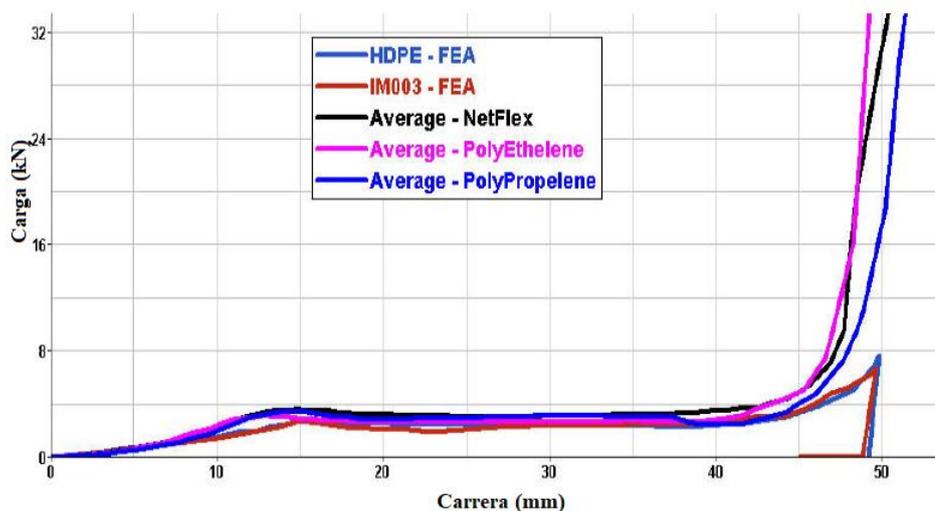


Figura 5. Pruebas FEA del LBS, carga vs deflexión. (Chon, Uikey, & Mohammed, 2007).

Comportamiento dinámico del automóvil en una colisión.

Cortes O., (2015) afirma que, para el estudio de sistemas rígidos el impacto se estudia mediante la teoría de impulsiones, por tanto, su duración es instantánea. Por tal motivo, se

debe estudiar los cambios instantáneos del pre-impacto y post-impacto, considerando que, al hacer un análisis de una partícula dentro de esta dinámica, se trata de un sistema de un grado de libertad. (Goicolea, 2011). En el caso de cargas estáticas se puede usar el concepto de deformación para determinar los efectos de cargas de choque sobre estructuras o componentes de máquinas, siendo la teoría de resortes un concepto que describe diferentes tipos de cargas estáticas, una aplicación gradual de la carga de masa por gravedad, la cual se distingue por el periodo natural de vibración natural de la masa sin amortiguación en el resorte (Goicolea, 2011).

Dinámica del impacto de un cuerpo rígido contra un cuerpo flexible. Cortes O. (2015), establece que para efectos de cálculo se puede usar los conceptos de la tasa de cambio de movimiento lineal de un cuerpo, volumen, velocidad, material igual a la fuerza actuando sobre el cuerpo. (Cortes Vasquez, 2015).

Trayectoria del peatón frente a un impacto frontal.

Para comprender la dinámica de un post-impacto entre un peatón y la zona frontal del vehículo, se debe considerar la física del movimiento de proyectiles, para establecer un modelo de proyectil en base a un atropellamiento, la NHTSA establece que el 80% de los post-impactos dan trayectorias dentro de las categorías ilustradas en la figura 6 (Gálvez Román, 2011).

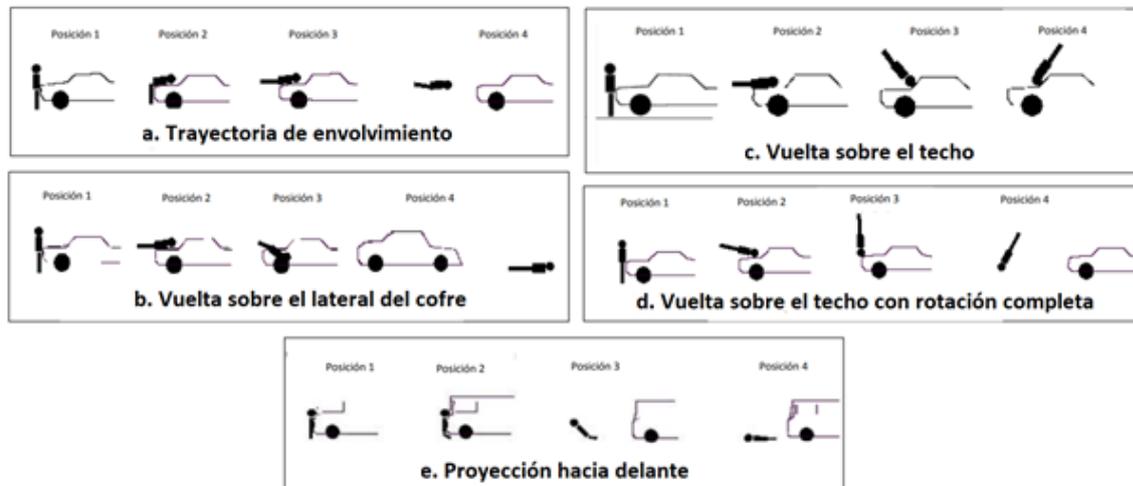


Figura 6. Trayectorias de post-impactos. Recuperado de (Gálvez Román, 2011).

La trayectoria que se usara para el estudio será la vuelta sobre el lateral del cofre, puesto que la dinámica producida en esta categoría, se basa en un impacto en una de las esquinas del vehículo, produciendo una rotación perpendicular al eje del suelo como muestra la figura 5b, esto causa una menor probabilidad de que el peatón logre alcanzar una velocidad similar a la del vehículo y el contacto puede ocurrir con el vehículo está desacelerando, como sin accionamiento de freno a una velocidad media de 40Km/h. (Cortes Vasquez, 2015)

Por tanto, en la teoría se considera que el peatón permanece de pie, pero debido al impacto, el mismo termina tendido en el suelo, se puede asumir que su trayectoria se modela mejor usando su centro de masa, por tanto, lo correcto en este modelo matemático sería usar un punto de lanzamiento más alto que el punto de aterrizaje, como muestra la figura 7. (Stevenson, 2006)

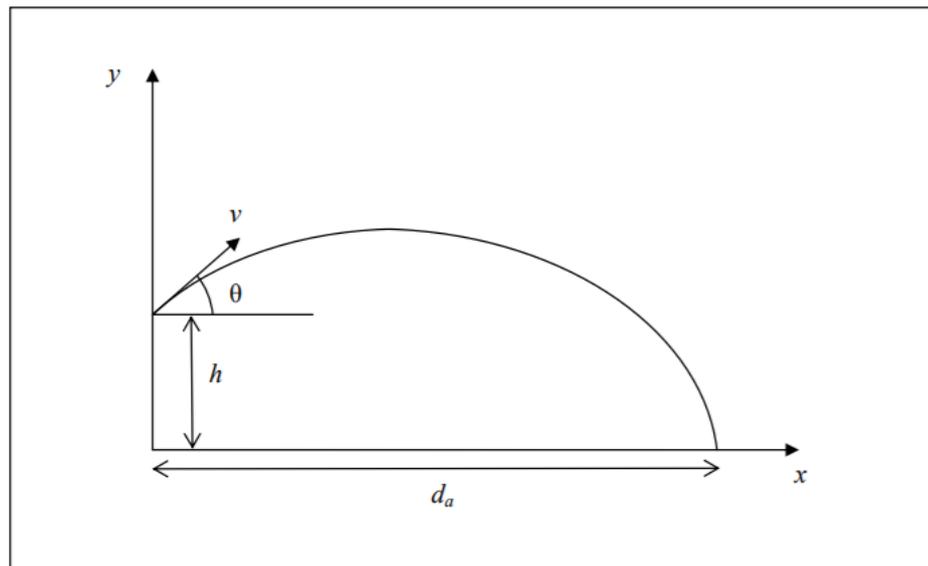


Figura 7. Definición del ángulo de lanzamiento $[\theta]$, velocidad inicial $[v_o]$, altura inicial de lanzamiento $[h_o]$ y la distancia recorrida $[d_a]$. (Stevenson, 2006)

Análisis de lesiones durante el atropello.

Para el análisis de lesiones, los estudios biomecánicos indican que existen tres variables a estudiar en el impacto de un vehículo a un peatón, siendo tres áreas según la EuroNCAP; impacto en cabeza; impacto en pelvis, e; impacto en piernas. Debido al estudio a desarrollar, el análisis se enfocará en los impactos en piernas.

Miembros inferiores para ensayos físicos de impacto

Para evaluar lesiones producidas en un impacto de un vehículo contra un peatón, las diferentes instituciones desarrollaron un análisis estadístico tomando el historial de accidentes ocurridos y tomando distribuciones de lesiones más comunes en los peatones, desde 1994 estos estudios fueron complementados con análisis biomecánicos, donde se dedujo zonas de mayor riesgo durante una colisión, siendo cabeza del 31% y las extremidades una media del

33%. Estos estudios no solo permitieron identificar las zonas más expuestas, lograron replicar muñecos o maniqués de pruebas, mismos que permiten evaluar el daño en una situación real (Maudes, 2010).

Las empresas dedicadas a la evaluación de daños, así como la legislación de distintos países, encabezando la Unión Europea, han establecido parámetros mínimos a considerar para la construcción de *dummys*, cuyo comportamiento mecánico se asemeje al movimiento de un cuerpo real, el estudio para determinar este parámetro se basó en análisis de consecuencias de post-accidentes, esto ha permitido mejorar las simulaciones físicas como virtuales en relación a un evento real. (Arnoux, y otros, 2005)

Existen normas internacionales que se centran en el análisis de un atropello completo, como una segmentación según la zona de lesión para identificar lesiones en zonas vulnerables, sin embargo, para el estudio propuesto se definirán los parámetros en base a lo establecido por la Directiva 2003/102/CE, misma que evalúa las lesiones de peatones en una colisión entre el parachoques y las extremidades inferiores:

Valores máximos (RED):

- a. Colisión parte inferior de la pierna-parachoques: el ensayo se realiza a velocidades de impacto de 40 km/h. El ángulo máximo de flexión dinámica de la rodilla no deberá sobrepasar los 21,0°, el desplazamiento máximo de rotura dinámica de la rodilla no superará los 6,0 mm y la aceleración medida en el extremo superior de la tibia no excederá de 200 g (Directiva 2003/102/CE, 2003).
- b. Colisión parte superior de la pierna-parachoques: el ensayo se realiza a velocidades de impacto de 40 km/h. La suma instantánea de las fuerzas de impacto por unidad de tiempo no excederá de 7,5 kN y el momento flector del impactador no excederá los 510 Nm (Directiva 2003/102/CE, 2003).
- c. Colisión cabeza de niño o cabeza de adulto de pequeño tamaño-parte superior del capó: el ensayo se realiza a velocidades de impacto de 35 km/h utilizando un impactador de ensayo de 3,5 kg. La norma de referencia en el ensayo de comportamiento de la cabeza (NCC) no excederá de 1 000 en 2/3 de la zona de

ensayo del capó, ni de 2 000 en el caso del 1/3 restante de la zona de ensayo del capó (Directiva 2003/102/CE, 2003).

Valores mínimos (Green):

- d. Colisión parte inferior de la pierna-parachoques: el ensayo se realiza a velocidades de impacto de 40 km/h. El ángulo máximo de flexión dinámica de la rodilla no deberá sobrepasar los 15,0°, el desplazamiento máximo de rotura dinámica de la rodilla no superará los 6,0 mm y la aceleración medida en el extremo superior de la tibia no excederá de 150 g (Directiva 2003/102/CE, 2003).
- e. Colisión parte superior de la pierna-parachoques: el ensayo se realiza a velocidades de impacto de 40 km/h. La suma instantánea de las fuerzas de impacto por unidad de tiempo no excederá de 5,0 kN y el momento flector del impactador no excederá los 300 Nm (Directiva 2003/102/CE, 2003).
- f. Colisión cabeza de niño-parte superior del capó: el ensayo se realiza a velocidades de impacto de 40 km/h utilizando un impactador de ensayo de 2,5 kg. La NCC no excederá de 1 000 para la totalidad de la zona de ensayo del capó (Directiva 2003/102/CE, 2003).

La EuroNCAP para los ensayos, utiliza un impactador de miembros inferiores mismo que es propulsado por medio de una máquina neumática, hidráulica o mecánica a una distancia de 400 mm, mientras el vehículo se encuentra estático, al momento del impacto el elemento tiene una velocidad de 40 km/h. (EuroNCAP, 2015)



Figura 8. Ensayo físico entre un impactador de miembros inferiores y un vehículo. (EuroNCAP, 2017)

El modelo representado, es el avalado por la ONU y la Directiva ACEA. Para simplificar la normativa, las especificaciones que deberá tener el impactador se detallan en la tabla 8, donde se especifica las condiciones geométricas, masa y materiales con un rango de tolerancia para la construcción del prototipo de ensayos físicos (Directiva 2003/102/CE, 2003).

Tabla 8

Características del impactador de piernas avalado por la ONU.

	Longitud [mm]	Masa [kg]	Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Centro de gravedad [mm]	Momentos de inercia [kgm^2]	Material
Fémur	432	8,6±0,1	70±1		217±10	0,127 ± 0,01	Acero
Tibia	494	4,8±0,1	70±1		233±10	0,120 ± 0,01	Acero
Masa muscular				25			CF-45
Piel				6			Nylon
Total	926±5	13,4±0,2	70±1	31			0,5mm

Nota: Los centros de gravedad están respectivamente del centro de la rodilla. En el lado no impactado de la tibia se colocará un acelerómetro uniaxial a 66±5mm del centro de la articulación de la rodilla, ligeramente orientado a la dirección del impacto. Shahbeyk & Abvabi, (2009). A Numerical Study on the Effect of Accident Configuration on Pedestrian Lower Extremity Injuries. Sharif University of Technology.

Ingeniería inversa

La ingeniería inversa es una metodología de investigación, cuyo fin es analizar o estudiar un producto existente en el mercado para conocer su diseño, construcción y operación, con lo cual se consigue replicar componentes sin disponibilidad u optimizar el producto (Ramos, 2013).

Ramos D. (2013), considera que la ingeniería inversa es una metodología que aporta conocimiento, innovación y habilidades de investigación que permiten desarrollar nuevos productos e incluso mejorar los ya existentes, en base a una hipótesis, estudios de funcionamiento, simulaciones computacionales o construcción para validar de forma experimental la hipótesis y así obtener mejoras en la industria (Ramos, 2013).

Montoy, Arciniegas, & Rodríguez, (2012), afirma que existen herramientas que permiten caracterizar en diagramas de clase y grafos de relaciones aspectos importantes sobre los elementos que se investigan, por tanto, es posible aplicar una variedad de métodos para obtener y caracterizar datos que permitan replicar y mejorar un elemento ya existente en el mercado (Montoy, Arciniegas, & Rodríguez, 2012).

Una de las herramientas que es compatible con la ingeniería inversa, son los scanner 3D, los cuales son herramientas que permiten transformar un elemento físico en un modelo digital, sin embargo su precisión aun no alcanza a las herramientas de medición física disponibles en la actualidad, sin embargo en la construcción de modelos con geometrías complejas es una herramienta que facilita la construcción digital de un elemento en específico (Parras, Romero, Nieto, Cañavete, & Fernández, 2016).

Simulación computacional

La simulación para eventos dinámicos es ampliamente utilizada en la industria automotriz, existen muchas investigaciones realizadas para nuevos diseños o la optimización de la función de un elemento determinado, tal es el caso, que la EuroNCAP, solicita a los fabricantes una simulación computacional que sea corroborada por un método numérico para disminuir el número de ensayos destructivos a realizar sobre el vehículo, evitando con esto, pruebas innecesarias que incurren a costos adicionales tanto para las fábricas y las entidades encargadas de homologar los vehículos previo a su libre venta y circulación (EuroNCAP, 2015).

Hai Trong & Tso Liang, (2008), desarrollaron modelos de simulación para impactos de la cabeza de un niño, la cabeza de un adulto, la parte superior de la pierna y, el impactador de pierna en base a la normativa EEVC WG17, donde aseguran que una simulación

computacional, pueden predecir el comportamiento del sistema de protección frontal con el fin evaluar un diseño óptimo que permita cumplir la normativa de protección a peatones y a su vez optimizar los diseños antes de llegar a la fase experimental (Hai Trong & Tso Liang, 2008).

En cuanto a la aplicación de métodos numéricos como validación a simulación computacional, Shahbeyk & Abvabi, (2009), aseguran que el modelo FEM proporciona buenos resultados que permiten evaluar con precisión las cargas dinámicas a las que es sometida en una colisión un impactador de miembros inferiores y la zona frontal de un sistema de protección de peatones evaluando la deformación en diferentes posiciones de impacto (Shahbeyk & Abvabi, 2009).

Polímeros en la industria automotriz

En función de la estructura interna, los polímeros en la industria automotriz se clasifican en termoplásticos, termoestables, elastómeros y materiales compuestos (Navarro, Gómez, García, & Águeda, 2010).

Debido al tipo de estudio, se simplificará el estudio de polímeros en la clasificación de termoplásticos.

Termoplásticos. Las principales características de los termoplásticos, es su estructura lineal, su resistencia mecánica en frío y su maleabilidad al ser sometido a elevadas temperaturas, los derivados del polietileno suelen ser los polímeros más usados en la industria automotriz, entre los principales polímeros termoplásticos está el acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), ABS-Policarbonato (ALPHA), poliamida (PA), polietileno (PE), polipropileno (PP), etileno-polipropileno-dieno-monómero (PP-EDPM), cloruro de polivinilo

(PVC), Policarbonato-poliéster-termoplástico (XENOY -PC-PBTP), etc. (Navarro, Gómez, García, & Águeda, 2010).

El material más usado debido a al costo es el polipropileno (PP), para que este material se ajuste a las prestaciones mecánicas requeridas, suele hibridarse con otros materiales por lo que sus usos pueden ser muy variados dentro del automotor. (Szeteiová, 2010).

La propiedad física de los polímeros para evaluar su utilidad en un automóvil se centra en la caracterización de su densidad, resistencia a la tracción, módulo de Young, módulo de Poisson, y elongación a la rotura. Por tal motivo para determinar el material más apropiado para un fin determinado, se debe identificar las principales propiedades que afectaran el desempeño de un elemento a raíz de una función específica (Gere & Goodno, 2009).

MÉTODO

La modalidad de investigación se basará en tomar un enfoque cuantitativo, se determinará el material usado por el fabricante, se realizará una recolección de datos numéricos con lo cual se delimitará las condiciones físicas y de borde para los parámetros de funcionamiento del sistema para dar paso a la simulación computacional.

El instituto ecuatoriano de normalización, no dispone de regulación específica a los vehículos que circulan en el país en cuanto a protección de peatones, sin embargo, para la homologación de vehículos de venta en el mercado nacional tiene como referencia en el punto 6.23 la reglamentación técnica INEN (Resolución No. 14 453, 2014) misma reglamentación que se basa en la normativa europea ya mencionada, por ende, el estudio hará énfasis a los límites técnicos dados por el parlamento europeo y consejo respecto a protección de peatones.

Antes de comenzar la simulación es necesario desarrollar un modelo de funcionamiento del sistema, tomando los parámetros geométricos y posición inicial. Esto se modelará en un software CAD, sin embargo, previo al análisis computacional, será necesario calcular las condiciones iniciales para el funcionamiento del sistema. Una vez obtenidos los datos de entrada se procederá a desarrollar la simulación computacional la cual se realizará con ANSYS Student para el desarrollo del mallado para determinar las propiedades a evaluar, los resultados se deberán validar matemáticamente. En el principio, se determinará las condiciones de diseño a las que está sometido el refuerzo inferior del parachoques usando como material base el dado por el fabricante, al ser un componente original será la referencia de requisitos mínimos para proceder a seleccionar materiales alternos que igualen o superen sus funciones específicas. En base a los datos obtenidos, se efectuará la selección del material

más idóneo para el refuerzo inferior del parachoques del Sportage R, para este fin se seguirá el proceso de la figura 10.

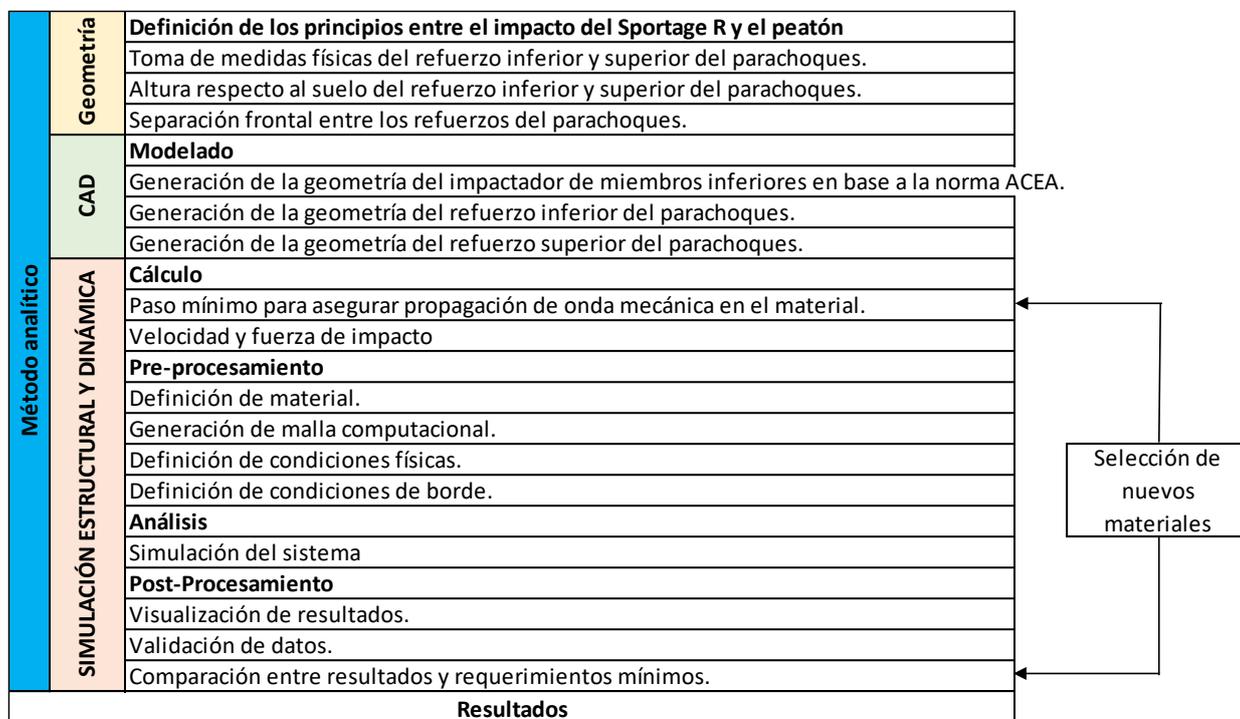


Figura 9. Diagrama de método experimental y analítico, para el estudio del refuerzo inferior de parachoques.

Definición de los principios de un impacto entre un Sportage R y un peatón

Para un evento de atropello a un peatón con un vehículo Sportage R, se debe considerar que el guardachoque si bien cumple una función de amortiguación protegiendo en cierto grado la estructura del vehículo y a su vez mejorar su aerodinámica, los refuerzos inferior y superior del guardachoque permiten que su facilidad de deformación al atropellar a un peatón disminuya para evitar que termine con daños severos, principalmente con lesiones en las articulaciones y a su vez se aprovecha el capot para disminuir golpes producidos por la elevación del cuerpo al ser convertido en un proyectil, en la figura 11, se puede observar la

calificación gráfica en base a pruebas experimentales de la EuroNCAP donde se aprecia que el impacto en piernas tiene un buena calificación en la zona central en base al código de colores detallado (EuroNCAP, 2017).



Figura 10. Calificación en puntos de la protección de peatones en el modelo Sportage R (2010-2014). (EuroNCAP, 2017)

Si bien el guardachoque es el primer punto de contacto entre el vehículo y el peatón, se debe considerar que gran parte de la energía es absorbida por elementos de mayor rigidez como lo es el refuerzo de parachoques, en la figura 12, se puede apreciar un Sportage R sin su guardachoque, las piezas pintadas de color blanco son los refuerzos superior e inferior, estos elementos son los encargados de la protección de los miembros inferiores del peatón.



Figura 11. Refuerzo inferior y superior de guardachoques de un Sportage R.

Para definir las condiciones de impacto en base a su ubicación geométrica se puede deducir en base a la figura 13, que existe influencia del refuerzo superior del guardachoques durante un impacto, debido a disponer de una distancia mínima, mientras que el compacto metálico llegaría a tener contacto con el peatón en caso de una deformación casi total de estos elementos, es decir bajo velocidades superiores a 40 km/h, por tanto, la zona metálica no influirá en el evento. En la misma figura 13, se puede apreciar los materiales usados por el fabricante, mismos que se encuentran detallados en el asiento de la base de cada elemento, PP (Polipropileno) para el refuerzo inferior y TPO (Poliolefinas termoplásticas) para el refuerzo superior de parachoques.



Figura 12. Vista lateral del refuerzo superior e inferior del guardachoque y material dado por el fabricante.

Condiciones geométricas.

Las condiciones a tomar en cuenta en un impacto entre un Sportage R y un peatón se deben basar en el análisis del refuerzo inferior del guardachoque, por tanto, se debe definir altura de los refuerzos y sus medidas respecto a su ubicación en el vehículo. La figura 14, muestra un esquema básico donde se determina que el LBS, está a 500 mm respecto al suelo como lo indica la normativa, sin embargo, se incluye un refuerzo a 700 mm, esto permite cubrir casi la totalidad de la longitud del impactador que simula los miembros inferiores de un peatón, ambos refuerzos tienen una separación entre sus caras frontales de 2 mm.

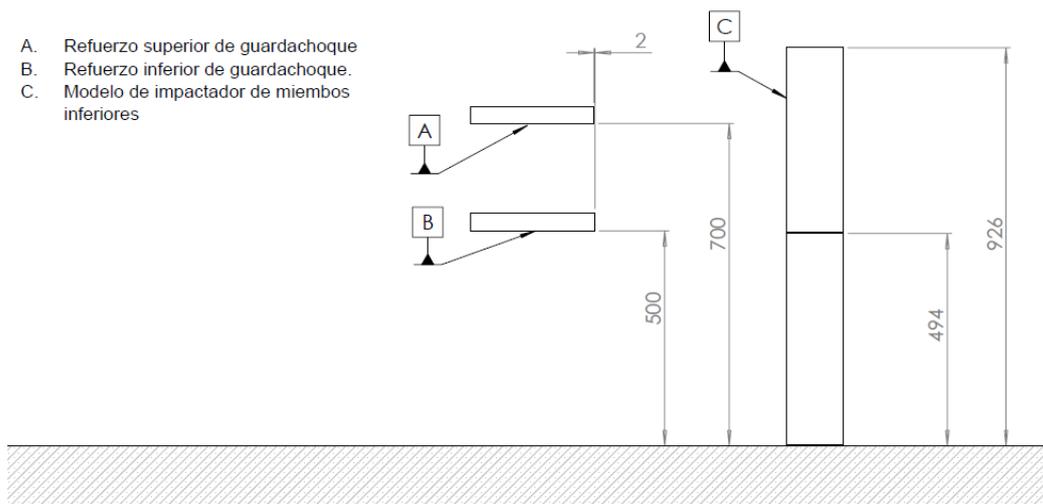


Figura 13. Esquema de posición de los refuerzos de guardachoque, respecto al impactador de miembros inferiores, las unidades corresponden a milímetros.

Al poseer una distancia frontal de apenas 2 mm, se puede deducir que el refuerzo superior de guardachoques tiene influencia sobre la deformación máxima que tendrá el refuerzo inferior del guardachoque, por tanto, debe ser incluido en la simulación computacional.

Modelado CAD

Para el modelado computacional, se usará el software NX Siemens versión 10, este software permite la construcción virtual de la geometría de los elementos a estudiar, se usará un equipo con procesador Intel Core I7-7700k de 4.2 Ghz, memoria RAM de 32 GB, gráficos GeForce GTX 1070 de 8 Gb. Para cumplir con el estudio propuesto se deberá modelar el impactador de miembros inferiores en base a la normativa ACEA, el refuerzo superior del guardachoque y; los refuerzos inferiores del guardachoque se modelarán en base a toma de medidas físicas de los repuestos originales.

Generación de la geometría del impactador de miembros inferiores.

Para la creación de la geometría de los miembros inferiores, se tomó las medidas usadas en la tabla 8, para la tibia y el fémur, se debe cumplir con la masa reglamentada según las normas ACEA es de $13,4 \text{ kg} \pm 0,2$. El material seleccionado fue el acero AISI 304, se realizó un corte por revolución con un diámetro de 51.5 mm, con este corte se tiene una masa de 13.5 kg, conservando las medidas de la normativa. La figura 14 muestra la geometría generada en el software donde se puede visualizar el corte interno y las medidas generadas, donde (a) es la visualización del fémur y tibia generados en el software NX 10; (b) es la vista seccionada donde se muestra la cavidad interna; (c) muestra las medidas de secciones internas generadas acorde al criterio de las normas ACEA, las unidades corresponden a milímetros.

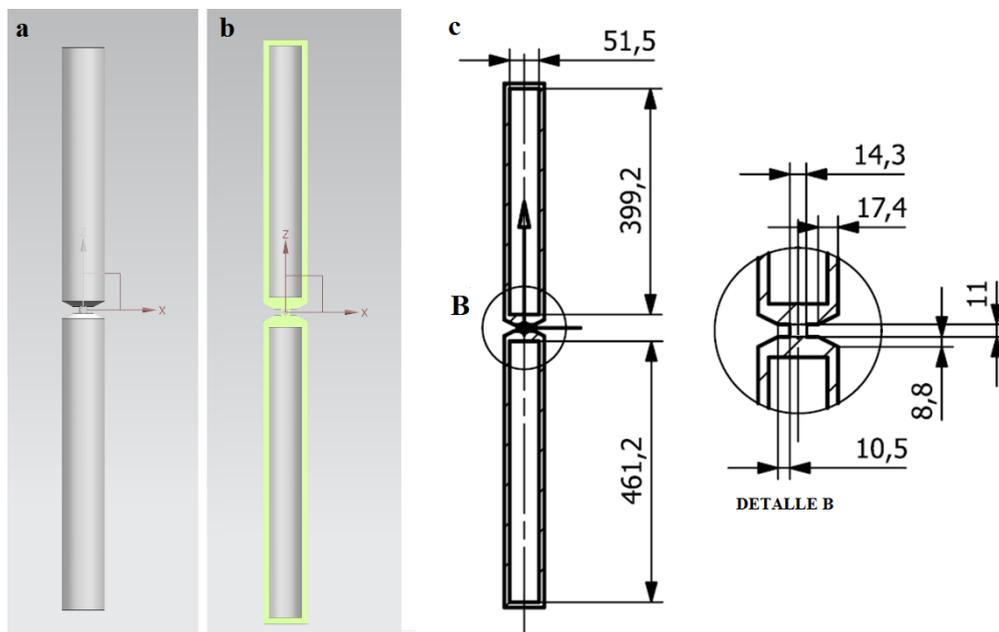


Figura 14. Generación de la geometría del fémur y tibia, las medidas se encuentran en milímetros.

Para la creación de la masa muscular se usó espuma CF-45, con un espesor de 25 mm, generando la geometría tiene una masa de 0.6426 kg, un diámetro interno de 70 mm y un diámetro externo de 120 mm. La generación de la geometría de la piel se hizo con un espesor de 6 mm, dando como resultado un diámetro interno de 10 mm y un diámetro externo de 132 mm, acorde a las normas ACEA se uso como material Nylon resultando una masa de 2.64 kg. Los resultados del modelado CAD se puede apreciar en la figura 15, donde (a) representa la visualización de la masa muscular creado en el software NX 10, (b) muestra la vista de la geometría generada para la piel en el software NX 10, (c) indica las medidas generadas para la masa muscular y la piel del impactador de piernas, las unidades corresponden a milímetros.

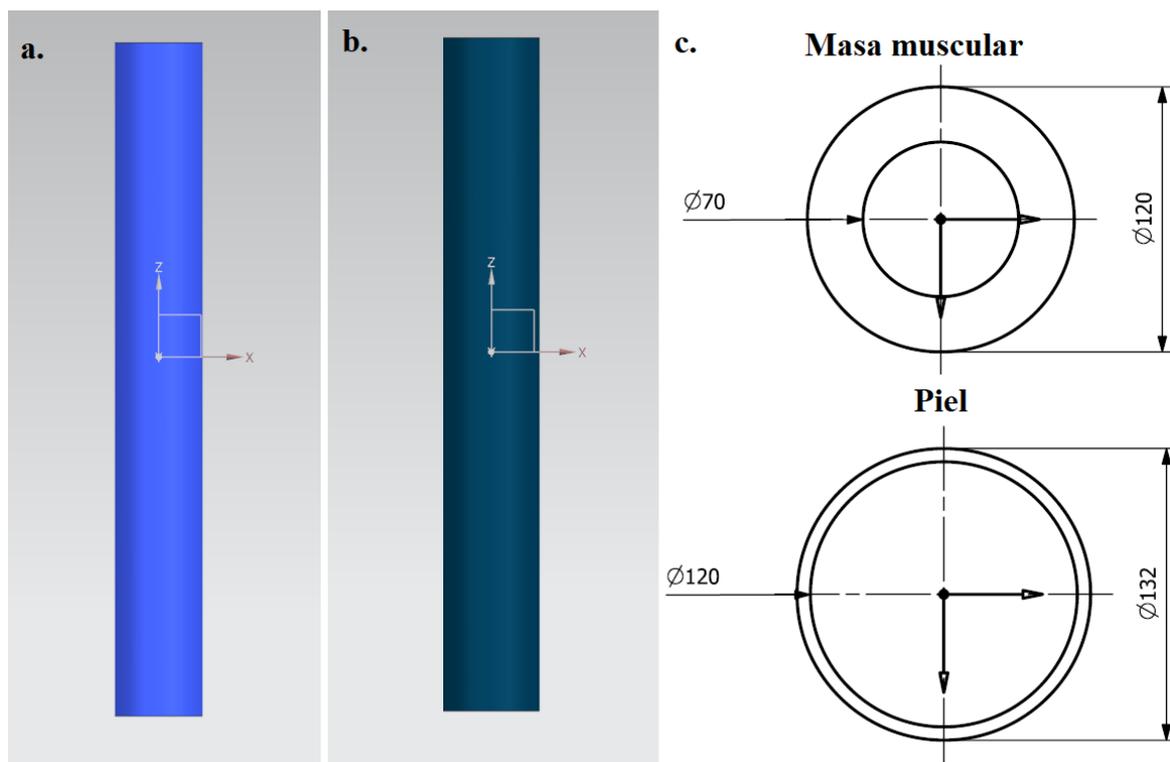


Figura 15. Generación de la geometría de la masa muscular (a) y la piel (b) para el impactador de piernas, las unidades se encuentran en milímetros.

Una vez generada la geometría se realizó el ensamble de los elementos generados, el impactador tiene en total la masa de 16.78 kg. En la figura 16 se muestra el ensamble de las partes generadas para el impactador de piernas.

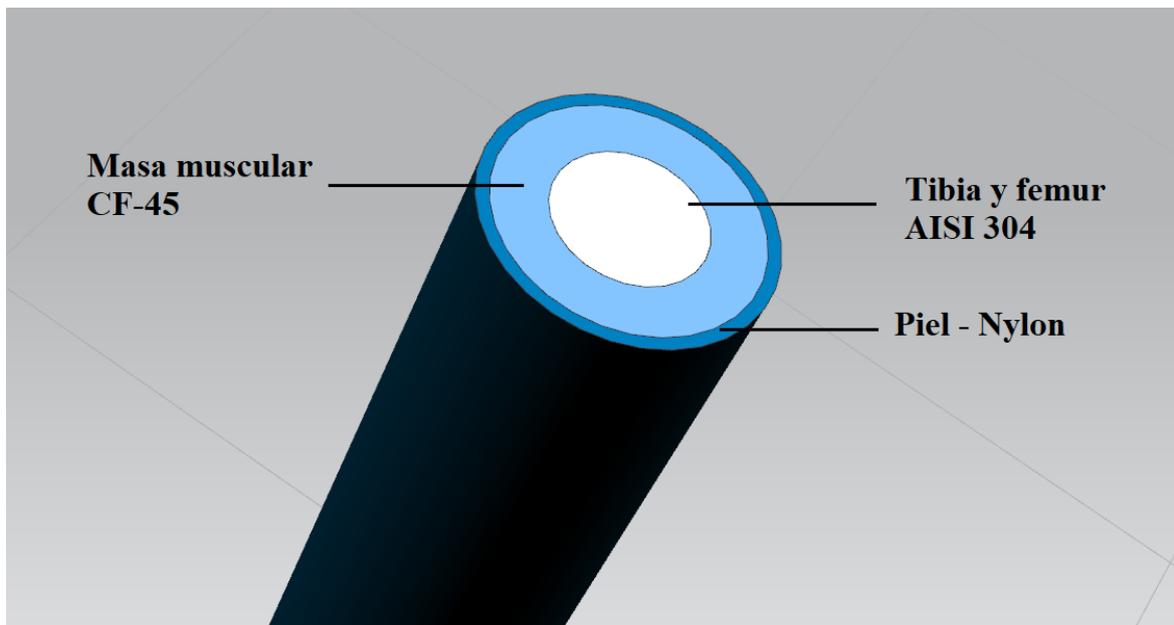


Figura 16. Visualización del ensamble de las partes que conforman el impactador de piernas según las normas ACEA.

Generación de la geometría de refuerzo superior e inferior de guardachoque.

Para elaborar el refuerzo superior de guardachoques, se adquirió en la casa comercial los repuestos identificados con el código: 86560-3W000 para el refuerzo inferior del guardachoque y, 86570-3W000 para el refuerzo superior del guardachoque. En la figura 17 y 18 se puede apreciar la geometría de los refuerzos de guardachoque.



Figura 17. Refuerzo superior de guardachoque.

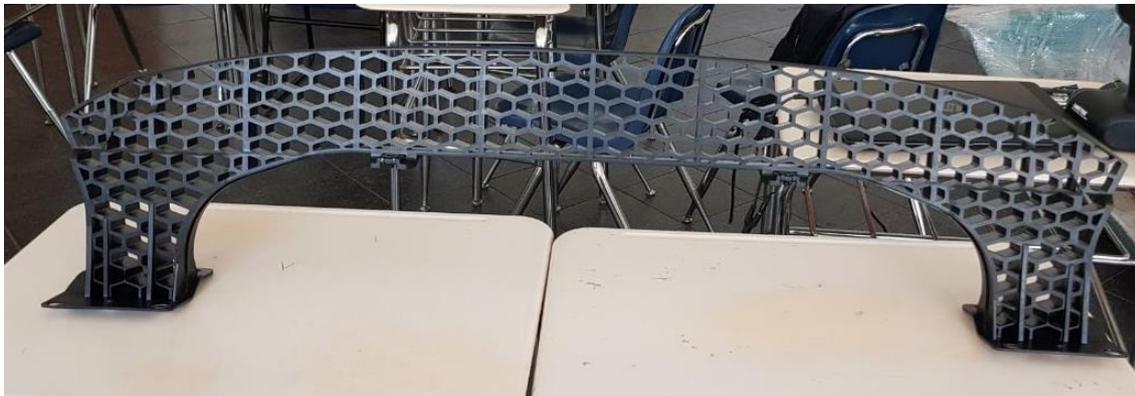


Figura 18. Refuerzo inferior de guardachoque.

Para la toma de medidas se usó un calibrador pie de rey con una precisión de 0.02 mm, sin embargo, al tener radios en varias zonas del cuerpo de los elementos a dibujar, se precisó el uso de un Scanner 3D. El Scanner 3D representado en la figura 19 b, es de modelo *GO!SCAN50* y tiene una exactitud de 0.10 mm, debido a no igualar o superar la precisión del calibrador pie de rey la geometría capturada por este método será para medir únicamente los radios de los elementos, se optó por modelar los refuerzos de guardachoques usando el software Siemens NX 10. Para un buen reconocimiento de la geometría por el Scanner, es necesario pintar de color blanco los repuestos como se muestra en la figura 19 a.



Figura 19. a) Refuerzos de guardachoques pintados de color blanco. b) Scanner 3D GO/SCAN50.

Para facilitar el modelado tridimensional, se dibujó la mitad del elemento como muestra la figura 20, para el caso del refuerzo superior de guardachoque para posteriormente se transformado en un parasolido, se lo abre en una nueva pieza y es convertido en una figura simétrica sin afectar las restricciones geométricas del modelado como se muestra en la figura 21 y a su vez disminuyendo la carga computacional generados en los procesos de modelado.

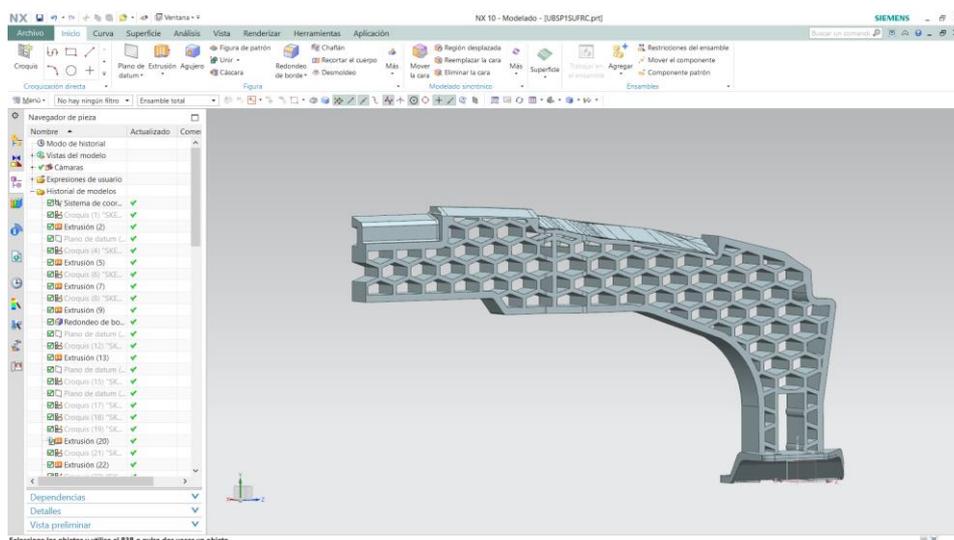


Figura 20. Modelado 3D del refuerzo superior de guardachoques.

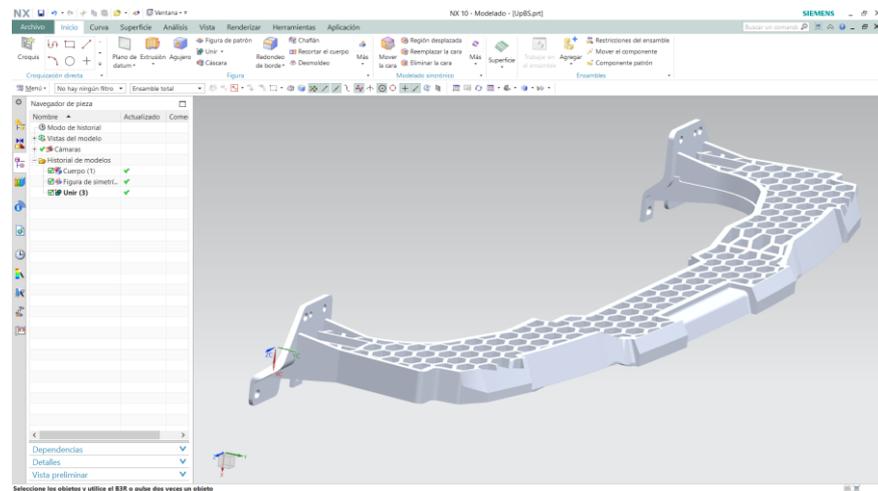


Figura 21. Refuerzo superior de guardachoque convertido en figura simétrica.

El mismo procedimiento se usará en el caso de construcción tridimensional del refuerzo inferior de guardachoques, como se puede apreciar en la figura 22 y 23.

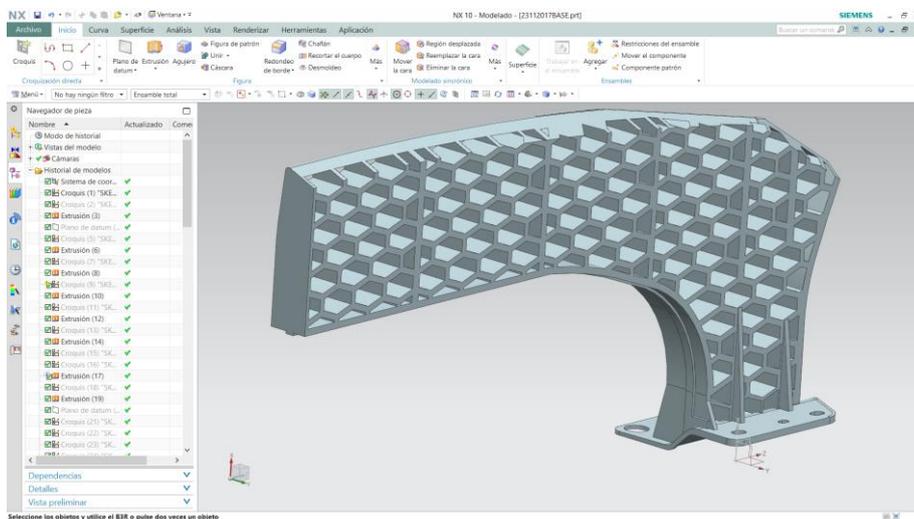


Figura 22. Modelado 3D del refuerzo inferior de guardachoques.

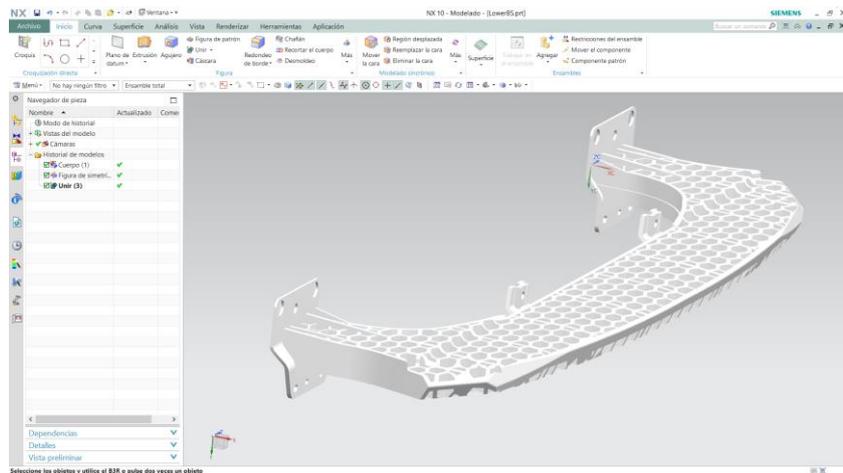


Figura 23. Refuerzo inferior de guardachoque convertido en figura simétrica.

A los elementos creados, se les asignó el material correspondiente, siendo que para el refuerzo superior de guardachoque con TPO como material, se tiene una masa 1.5293 kg. Mientras que para el refuerzo inferior de guardachoques se tiene una masa de 1.9204 kg. Una comparación de medidas muestra que la altura tiene una diferencia de 2 mm, mientras que las longitudes de los elementos tienen una diferencia de 83.3 mm, como muestra la figura 24.

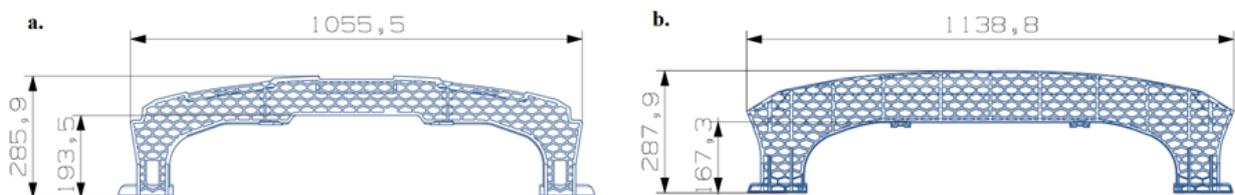


Figura 24. Comparación de medidas del refuerzo superior de guardachoques (a) y el refuerzo inferior de guardachoque (b), las unidades se encuentran en milímetros.

Ensamble de los refuerzos de guardachoque y el impactador según el protocolo de EuroNCAP.

Para el ensamble de los elementos generados en CAD, se usará la normativa *TESTING PROTOCOL 8.3*, publicada en diciembre del 2016. Según indica la normativa, los ensayos físicos para pruebas de miembros inferiores, el impactador debe ubicarse a 400 mm del guardachoque, para simplificar el gasto computacional en la simulación del análisis de compresión el análisis dinámico, se considerará únicamente el momento de impacto sin recorrido y resguardando la aceleración producida en el trayecto, a su vez, deberá tener una altura respecto de 75 mm respecto al suelo, el resultado del ensamble será el mostrado en la figura 25.

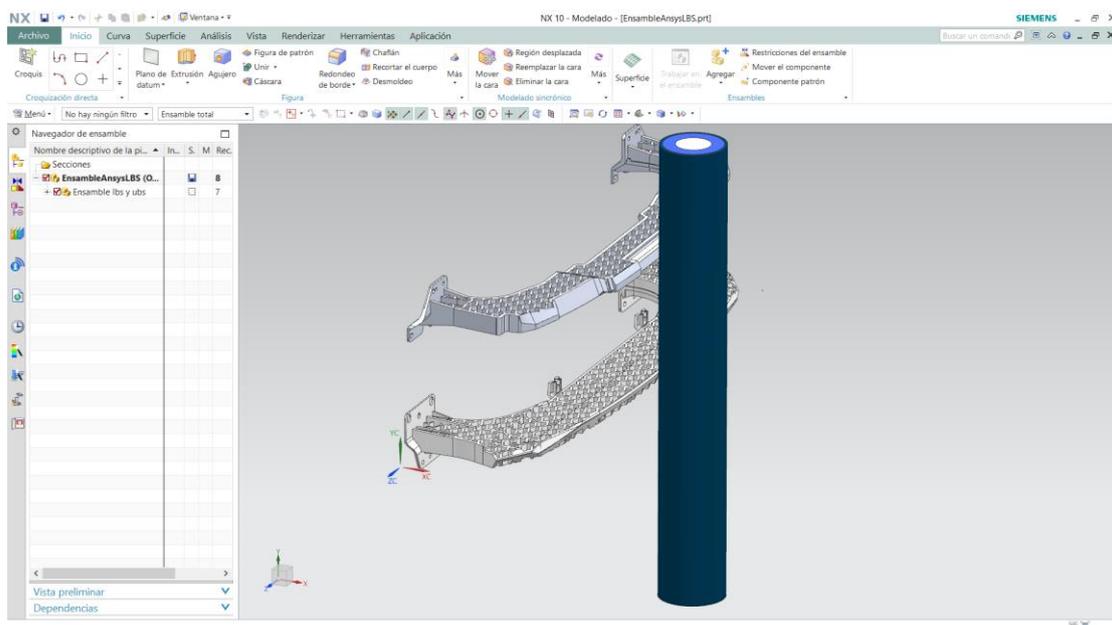


Figura 25. Ensamble de los refuerzos superior e inferior de guardachoques en el software NX.

Materiales

Las propiedades usadas para la simulación, se basan en datos proporcionados por la compañía americana RTP Co, los datos no disponibles en las fichas técnicas han sido complementados por la base de datos de ingeniería Matweb, GoodFellow y la biblioteca de NX Unigraphics Siemens.

Materiales para impactador y refuerzos de guardachoque.

Los materiales usados para la construcción del impactador al igual que los refuerzos de guardachoques dados por el fabricante, se encuentran son considerados, en la tabla 9 acorde a los antecedentes ya expuestos, las propiedades mecánicas que poseen los materiales son las necesarias para la introducción de datos al software, los datos se han tomado en base a los parámetros requeridos por el software de simulación.

Tabla 9.

Tabla de propiedades mecánicas de materiales usados en los refuerzos inferior y superior de guardachoques.

Descripción	Materiales				
	UBS	LBS	Impactador		
	TPO	PP	Nylon	CF-45	SS 304
d [kg*m-3]	970	890	1140	93	7900
E [Pa]	1.30E+09	1.38E+09	3.00E+09	1.04E+08	1.93E+11
v	0,35	0.405	0.48	0.17	0,29
Esfuerzo de fluencia [Pa]	1.87E+07	3.20E+07	5.00E+07	1.54E+07	7.70E+10
Elongación a la rotura [%]	0.8	0.1	0.17	1.08	0.7

Nota: Propiedades mecánicas del polipropileno (PP) y Poliolefinas termoplásticas (TPO). Significado de términos; d: densidad; E: Módulo de Young; v: coeficiente de Poisson. Adaptado de Universidad de Barcelona, 2017. Materiales. RTP, Imagineering Plastics, (2017). RTP4900.

Materiales considerados como posible reemplazo del refuerzo inferior (LBS).

Para el análisis se han tomado 6 opciones en base a la disponibilidad en el mercado nacional como lo son el polietileno (PE), poliestireno (PS) y el policarbonato (PC) se tomará en cuenta materiales usados en el mercado extranjero como son el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), poliácido láctico (PLA) y PC/ABS con 10% de fibra de vidrio, en la tabla 10, se detallan las propiedades de los materiales seleccionados.

Tabla 10.

Tabla de propiedades mecánicas de materiales alternos para reemplazar el polipropileno.

Descripción	MATERIALES					
	Mercado local			Mercado externo		
	PE	PS	PC	ABS	PLA	PC/ABS 10% F. vidrio
d [kg*m-3]	918	1180	1200	882	1072,7	962
E [Pa]	2,76E+08	3,17E+09	2,34E+09	2,41E+09	1,28E+09	4,14E+09
v	0,46	0,4	0,37	0,33	0,36	0,36
Esfuerzo de fluencia [Pa]	7,70E+06	5,90E+07	7,90E+07	3,00E+07	7,00E+07	7,90E+07
Elongación a la rotura [%]	0,1	0,03	0,05	0,1	0,7	0,05

Nota: Materiales seleccionados para el reemplazo del polipropileno en el refuerzo inferior del guardachoque.

Significado de términos; d: densidad; E: Módulo de Young; v: coeficiente de Poisson. RTP Co. (2017), Product Data Sheet & General Processing Conditions. Minnesota, USA. Obtenido de <http://web.rtpcompany.com/>.

Cálculo para la introducción de datos en la simulación computacional

Para la simulación computacional se usaran dos softwares el NX Unigraphics 10 de Siemens para simular el análisis estructural del refuerzo inferior a guardachoque sometido a 20 kN según la normativa, mientras que para el evento de impacto entre un automóvil y un peatón, se usará el software ANSYS *Student* este programa facilitarán replicar la colisión en base a las condiciones controladas desarrolladas por la EuroNCAP, esta normativa, considera

al impactador un proyectil que será disparado por un sistema de propulsión neumático, de muelle mecánico o hidráulico, por tanto, se replicará el mismo concepto en la simulación computacional teniendo la velocidad dada por la norma y una aceleración constante en base a la distancia recorrida del impactador, mientras se considera como elementos fijos a los refuerzos inferiores de guardachoque, sin embargo para un simulación adecuada, será necesario conocer el mínimo recorrido de tiempo para la propagación de la energía resultante del impacto a 40 km/h.

Aceleración y fuerza de impacto.

La normativa *Pedestrian Testing Protocol* de la EuroNCAP, indica que la velocidad de impacto es de 40 km/h o 11.1 m/s, sin embargo, parte a una distancia de 400 mm, para conocer el tiempo que tarda el impactador en recorrer esta distancia se usa la ecuación 1.

$$t = \frac{d}{v} \quad (1)$$

Donde, tiempo (t) es igual a distancia (d) sobre tiempo (t); reemplazando los datos de la ecuación 1, se tiene que el impactador se tardara en recorrer 400 mm 36 milisegundos. Si se considera una aceleración constante, se usará la ecuación 2, para determinar la aceleración que tendrá el impactador previo al contacto con el refuerzo inferior de guardachoques.

$$a = \frac{v_f - v_o}{t} \quad (2)$$

Donde, aceleración (a) es igual a velocidad final (v_f) menos la velocidad inicial (v_o) sobre la distancia (d) multiplicada por dos, para el estudio se considerará que la aceleración es constante. Reemplazando la ecuación con los valores disponibles, se tiene que el impactador tendrá una aceleración de 308.58 m/s^2 . El inconveniente de la ecuación 2, es que no puede ser usada para el cálculo de la fuerza ejercida sobre el refuerzo, entonces, acorde a la segunda ley de Newton según Serway & Faughn (2001), se tiene que:

“La aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta o resultante que actúa sobre él” (Serway & Faughn, 2001).

Lo cual se traduce en la ecuación 2.

$$F = mg \tag{3}$$

Donde fuerza (F) es igual a la masa (m), multiplicada por la aceleración gravitacional (g). Considerando que 1 G es igual a 9.8 m/s^2 , por tanto, se tienen que la fuerza que actuara en el refuerzo inferior de guardachoques será de 528 N , es una fuerza sumamente baja si se considera que el refuerzo debe ser sometido a una prueba con carga de 20 kN para determinar su deformación.

Paso mínimo para asegurar propagación de onda mecánica en el material.

Para asegurar la calidad de los resultados, Chapra & Canale, (2011) indica que el primer paso previo a la resolución, es brindar estabilidad y convergencia al sistema, esto se cumple acorde a la ecuación 4 (Chapra & Canale, 2011).

$$\Delta t \leq \frac{2}{w} \quad (4)$$

Donde, el tiempo de paso (Δt) debe ser menor o igual respecto a la diferencia entre 2 y la frecuencia natural (w) (COMPLX, s.f.).

La ecuación de la frecuencia natural se describe en la ecuación 5.

$$w = 2 \frac{c}{l} \quad (5)$$

Donde, la frecuencia natural (w) es igual a dos por la diferencia entre la velocidad de propagación de onda en el material (c) y la longitud característica del elemento (l) (ANSYS, 2018).

Para determinar la longitud del elemento se describen la ecuación 6.

$$l = \frac{v}{A_m} \quad (6)$$

Donde, la longitud característica del elemento (l), es igual a la diferencia entre el volumen del elemento (v) y el área del lado mayor (A_m) del elemento (COMPLX, s.f.). Sin embargo, para obtener la velocidad de propagación de onda de propagación se tiene 3 tipos cálculos acorde al elemento de estudio que son *Shell*, barra y tetra, hexadréico, al tener un elemento de alta complejidad como el refuerzo inferior de parachoques (LBS), se

recomendaría usar un elemento *Shell*, sin embargo se perdería parte de la geometría generada, por tanto se considerara usar el modelo tetraédrico al tratarse de la interacción de 3 elementos que pueden perder características en su geometría al realizar esta transformación por su complejidad, se usara el modelo de ecuación tetraédrico descrito en la ecuación 10 (COMPLX, s.f.).

$$c_{3D} = \sqrt{\frac{E(\nu - 1)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)\rho}} \quad (7)$$

Donde la velocidad de propagación de onda en el material (c_{3D}) es igual a la raíz cuadrada de la diferencia del módulo de Young (E) por la resta entre el coeficiente de Poisson (ν) y uno, sobre la suma entre uno y el coeficiente de Poisson (ν), por la resta entre uno y el producto entre dos y el coeficiente de Poisson, todo multiplicado por la densidad (ρ) del material. (Santos, 2017).

Por tanto, velocidad de propagación de la onda en el refuerzo inferior del guardachoque (LBS), misma que está fabricada de polipropileno (PP), reemplazando los valores se tiene ecuación 8.

$$c_{3D} = \sqrt{\frac{1.55 \times 10^9 \text{ Pa} * (0.427 - 1)}{(1 + 0.427) * (1 - (2 * 0.427)) * 910 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} \quad (8)$$

El valor resultante de la ecuación, es de 1 858.36 m/s. Para obtener la longitud característica del elemento, será necesario obtener el volumen total, al igual que el área de cada cara, para este fin, se usará el software SolidWorks, donde se puede observar en la figura 26, que el volumen total es de 0.0021578 m^3 , mientras que el área es de 0.9689462 m^2 , considerando que el tiempo de impacto es de 35 mm, se deberían realizar como mínimo 1 500 puntos de corte en el tiempo para la estabilidad del análisis.

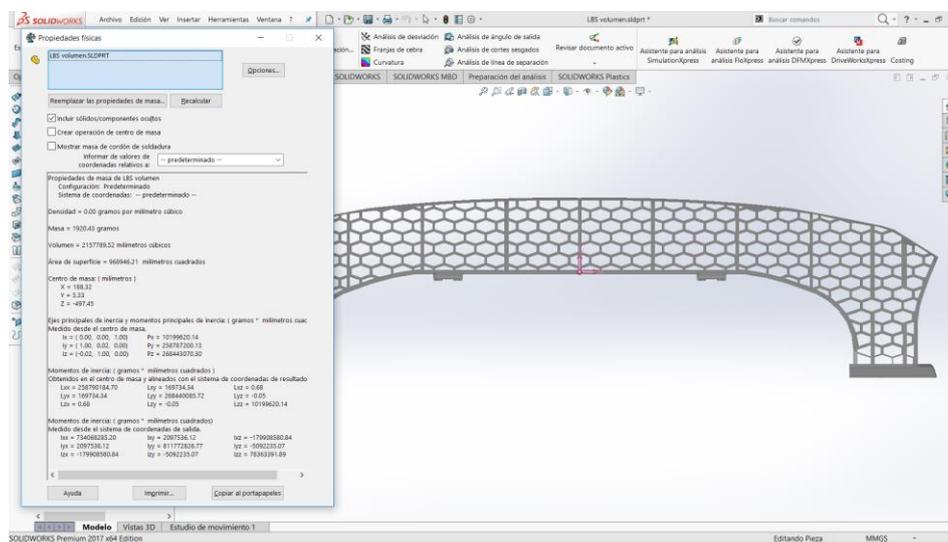


Figura 26. Propiedades físicas del refuerzo inferior de guardachoques. (SolidWorks, 2016).

Como se conoce que las caras de mayor área son donde se encuentra la estructura hexagonal, por tanto usando el software SolidWorks, se determinara que la cara A, será el área completamente plano y que no dispone de los bordes de sujeción, el cual tiene un área de 0.0553175 m^2 como muestra la figura 27, mientras que la cara B tiene un área de 0.0605131 m^2 , por tanto para aplicar la ecuación 9, se usara el área de la cara B.

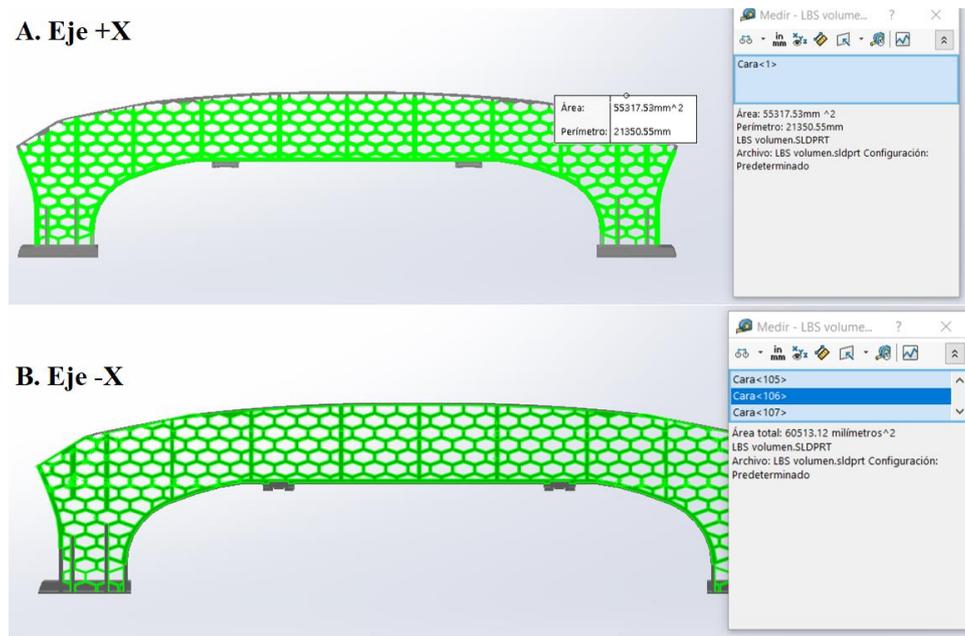


Figura 27. Volumen de las caras de mayor extensión del refuerzo inferior de parachoques, cara A: ubicada en el eje +X, cara B: ubicado en el eje -X. (SolidWorks, 2016).

Sustituyendo los valores de la ecuación 6, en base a los datos obtenidos se tiene que la longitud del elemento es igual a 0.0356584 m. Por tanto, reemplazando la ecuación 5, en la ecuación 4, se tiene la siguiente expresión que permitirá el cálculo del paso del tiempo crítico con la ecuación 9.

$$\Delta t \leq \frac{l}{c} \tag{9}$$

Reemplazando por los valores obtenidos se tiene la expresión de la ecuación 10.

$$\Delta t \leq \frac{0,0356584 \text{ m}}{1092,5295 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \quad (10)$$

El valor obtenido en la ecuación 10, transformado a milisegundo el paso de punto crítico es $\leq 0.0326384 \text{ ms}$, este valor deberá dividirse para el tiempo que se prevé que durara el impacto, según los antecedentes la duración del evento no supera los 70 ms una vez que los elementos entran en contacto, sin embargo, se disminuirá a 35 ms puesto que según estudios expuestos los valores críticos se dan entre los 20 y 30 milisegundos y no se tendrán valores relevantes después de 35 ms y con esto se evita gasto computacional, tomando en cuenta lo expuesto para asegurar el equilibrio de la simulación, para tener un mejor resultado se considerara un paso de tiempo de 0.030 milisegundos como mínimo valor para el polipropileno.

Se debe tomar en cuenta, que los valores de paso mínimo deben ser calculados para cada material, con esto se asegura que el resultado obtenido este dentro de lo mínimo permitido, para verificar que esto se cumple será necesario comparar los resultados de la malla computacional, con los valores calculados.

Criterio para validación de resultados.

Un análisis explícito para colisión, es uno de los problemas más complejos de predicción de forma computacional en ingeniería, esto se debe a las numerosas variables existentes para replicar un evento similar (Karthikeyan, Russell, Fleck, Wadley, & Deshpande, 2013), por tanto la validación de una simulación de esta clase, suele ir acompañada de una prueba experimental, sin embargo, uno de los objetivos del estudio, es

disminuir los costos para prototipado y la forma de realizarlo es por medio del análisis computacional, por tanto, para asegurar que los criterios tomados para la validación de la simulación son correctos, se ha procedido a replicar un estudio experimental realizado en 2013 respecto a un estudio balístico, que consiste en el lanzamiento de un proyectil a diferentes velocidades para deducir la fortaleza de materiales compuestos frente al acero SS 304. El estudio realizado por Karthikeyan, Russell, Fleck, Wadley, & Deshpande (2013), tiene similitud en el tipo de análisis a realizar, puesto que, en ambos casos el objeto es un proyectil con una velocidad límite al momento del impacto, donde sus resultados evalúan la falla del material, sea por rotura o deformación del objeto al recibir el impacto.

Parámetros de funcionamiento del sistema.

El objetivo del estudio es comparar los efectos del impacto recibido de placas de acero inoxidable SS 304, frente a materiales de polímero reforzado con fibra de carbono circular y placas de fibras de polietileno de peso molecular ultra bajo, donde un proyectil esférico de acero con diámetro de 12.7 mm y una masa de 8.3 g deberá impactarse a una placa de longitud y altura de 150 mm con espesor de 71 mm, como muestra la figura 28, la placa está sujeta a un anillo de apriete con grosor de 25 mm y tornillos M6, las velocidades del proyectil será de 54, 77, 148, 165, 207 y 225 m/s. (Karthikeyan et al. 2013).

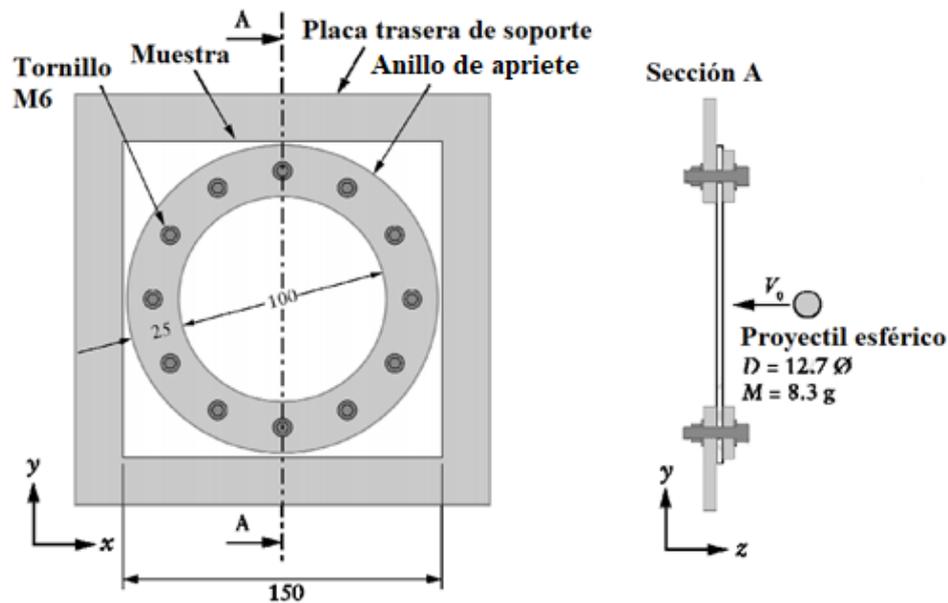


Figura 28. Parámetros de funcionamiento del sistema.

Para efectuar las simulaciones se usarán los datos proporcionados tan solo del acero SS 304, mismo que esta disponible en Ansys, por tanto, para la validación se debe considerar que los datos generados por el método experimental y computacional no deben superar una diferencia del 15%.

Geometría de placa y proyectil a validar.

Para la simulación computacional, se procederá a realizar un modelo similar, pero simplificado con el fin de disminuir el gasto computacional, esto se debe a que los experimentos no mostraron deformaciones en la zona donde se ubica el anillo de apriete, por tanto a una placa de 150x150 mm será seccionada con dos cortes circulares, la de diámetro de 100 mm, será la zona del impacto y la que sufrirá una deformación, no se tomara en cuenta sujeciones de tornillos y la zona de soporte será colocada bajo condiciones de fijación que el

software permite aplicar. Para la construcción de la esfera se debe tomar en cuenta que debe ser más fuerte que el acero SS 304, debido a que no presenta deformaciones críticas tras el impacto y debe considerarse que su masa no debe exceder de 8.3 g, por tanto, se tomara al acero 4340 como material base, sin embargo, su masa es de 8.4g. Para cumplir con la masa establecida se calculó el diámetro que una esfera de acero 4340 debería tener para tener una masa de 0.1 g, para este fin se usa la ecuación 12.

$$\phi = \left[\left(\frac{3 * m}{4 * \pi * d} \right)^{1/3} \right] * 2 \quad (12)$$

Donde, diámetro (ϕ) es igual a 3 por la masa (m) dividido para la multiplicación entre cuatro, pi (π) y la densidad (d), elevado a la 1/3 potencia y multiplicado por dos. Aplicando esta ecuación se tiene que el diámetro para la masa de 1 g usando acero 4340 para la reducción de peso en la esfera por medio de un corte por revolución, es 2.8976 mm como muestra la figura 29.b, mientras que la figura 29.a muestran los elementos y el ensamble generado en el software NX, en este problema no se considerara el tiempo que tarda el proyectil en impactar a la placa, por tanto, se encuentran en contacto.

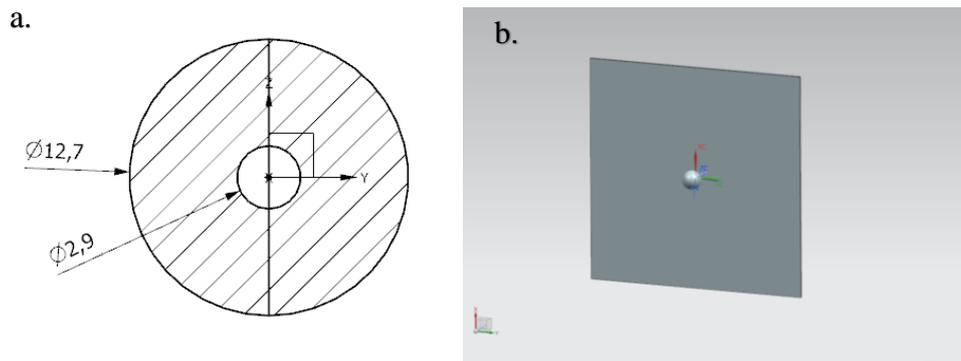


Figura 29. a) Dimensiones del proyectil con seccionamiento en el centro para el cumplimiento del peso establecido; b) Ensemble generado en el software NX de los elementos a simular.

Simulación de análisis explícito para el problema de validación.

Para el análisis dinámico del sistema, se procederá a modificar la geometría, para disminuir la carga computacional se procede a segmentar la geometría, dejando un diámetro de 100 mm deformables, mientras el resto del cuerpo simulara el soporte brindado por el anillo como se indicó en los ensayos físicos, para disminuir el gasto computacional se procederá a realizar dos cortes por simetría en los planos “X” y “Y” se deduce que el programa no variara los resultados tomando estas consideraciones, en la figura 30, se conserva la modificación de la geometría antes de introducir los parámetros de funcionamiento del sistema.

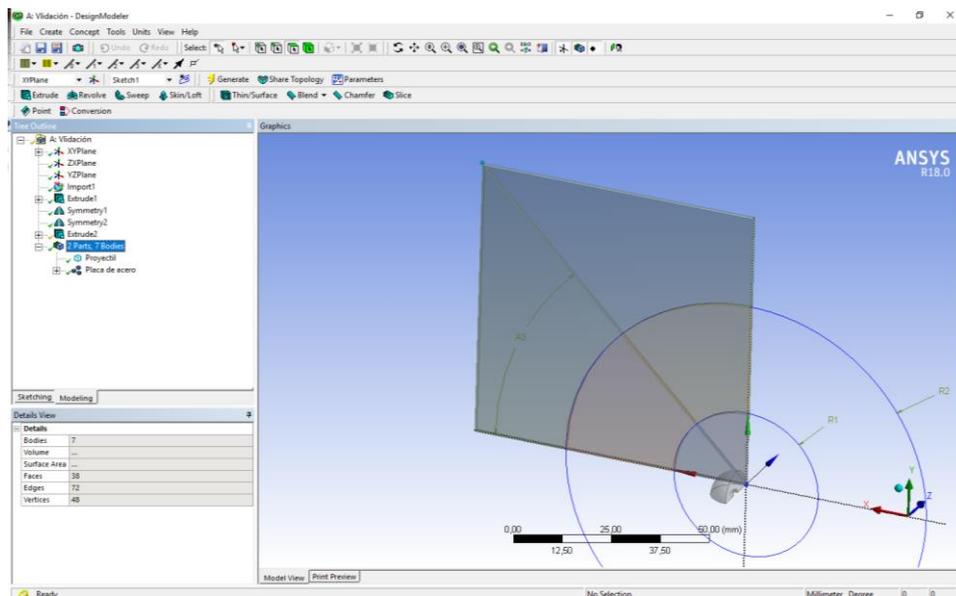


Figura 30. Segmentación de la geometría para un mejor análisis durante la simulación.

Para la aplicación de la malla se debe considerar el paso mínimo para asegurar la propagación de onda, para obtener el la longitud mínima del elemento se debe conocer el volumen total de la placa y el área de mayor tamaño, si se tiene que el área es igual a la base por la longitud, el área mayor de la placa sería 22500 mm^2 , mientras que para el volumen es igual a la multiplicación de base, altura y profundidad, teniendo como resultado 15975 mm^3 , por tanto aplicando la ecuación 6 se tiene que la longitud mínima del elemento es 0,71 mm, tomando los datos predeterminados por Ansys del material SS 304, se aplica la ecuación 7, teniendo como resultado un paso mínimo de onda de 0.1255 segundos, si se tiene un tiempo de interacción de 5 milisegundos el número mínimo de ciclos de cálculo deben ser 39, por tanto la malla debe ser fuerte en el centro y se puede considerar menores distancias en el cuerpo de la placa como se muestra en la figura 31.

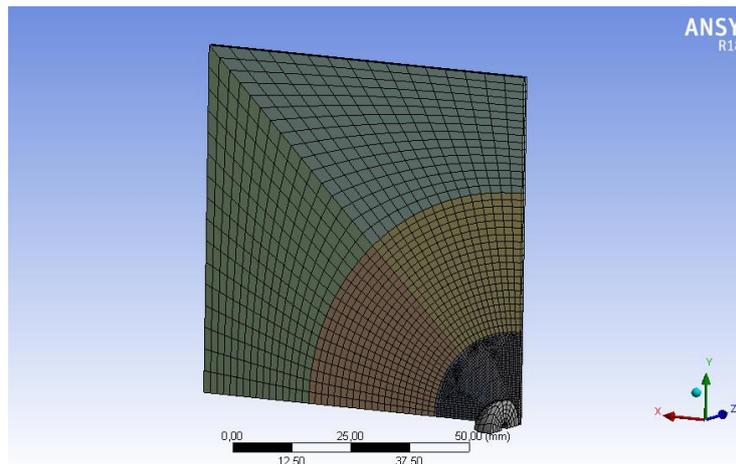


Figura 31. Generación de mallado computacional para el impacto entre un proyectil y una placa de acero.

En las condiciones iniciales se fijará los extremos de la placa, posteriormente se procede a realizar un desplazamiento de 0 en todos los ejes puesto que este será el límite donde empieza la sujeción por el anillo de apriete, el tiempo de análisis será de 0.5 milisegundos, las velocidades tendrán variación y se colocaran a 54, 77, 148, 165, 207 y 225 m/s, al proceder a la simulación del sistema, el tiempo de ejecución es de aproximadamente 7 minutos con un total de 46 245 ciclos, con un paso de tiempo de 1.991E-08 segundos.

Los valores serán comparados al finalizar la simulación para verificar que no existe un margen de error mayor al 15%, se debe considerar que, para alcanzar una aproximación cercana, el paso de tiempo no debe ser mayor a la calculada.

Simulación de análisis estructural por deformación.

La simulación se realizará en el software NX Unigraphics 10 de Siemens. En base a las pruebas realizadas para el diseño de un refuerzo inferior de guardachoques por Chon, Uikey, & Mohammed, (2007), al someter a 20 kN la estructura del refuerzo inferior de

guardachoques diseñado, logran establecer un criterio de selección en base a la deformación, por tal motivo, en el estudio se determinara la máxima deformación que tendrá el elemento con el material de fábrica, para en base a este dato, tener un criterio adicional de selección puesto que los refuerzos también se han diseñado para disminuir los daños en la estructura del vehículo (Chon, Uikey, & Mohammed, 2007).

Simulación FEM y SIM.

Para someter el refuerzo inferior de guardachoque o LBS, se ingresará a la opción simulación avanzada, se creará un FEM y SIM nuevo, se seleccionará análisis estructural con *solver* NX Nastran, como muestra la figura 32.

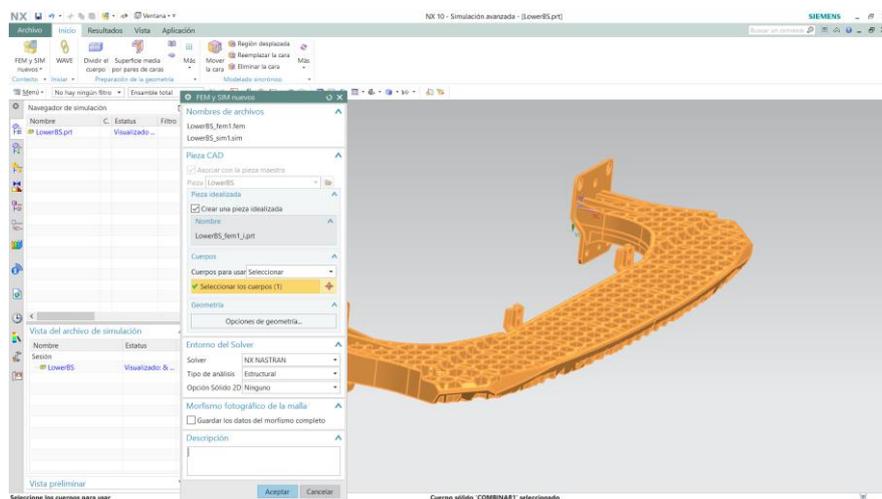


Figura 32. Selección de tipo de análisis y método de resolución. (NX Unigraphics, 2017)

Generación de malla computacional.

Para la creación de la malla computacional del elemento, se seleccionó malla de tipo tetraédrico, con un tamaño de elemento de 10 mm, mientras la calidad se evalúa en base al método del nodo medio mixto y con una máxima de Jacobiano de 10, los ajustes de malla se

ajustarán por defecto del software al igual que la limpieza del modelo, como muestra la figura 33, mientras la figura 34 muestra el elemento con la malla generada por el software.

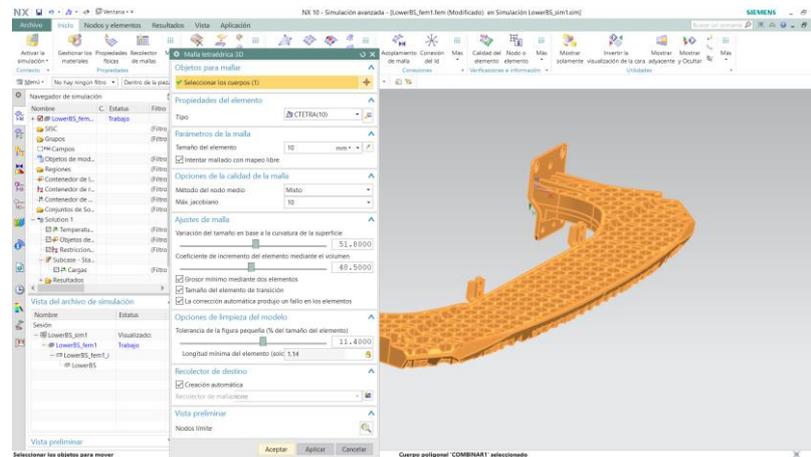


Figura 33. Parámetros para creación de la malla computacional del análisis estructural. (NX Unigraphics, 2017)

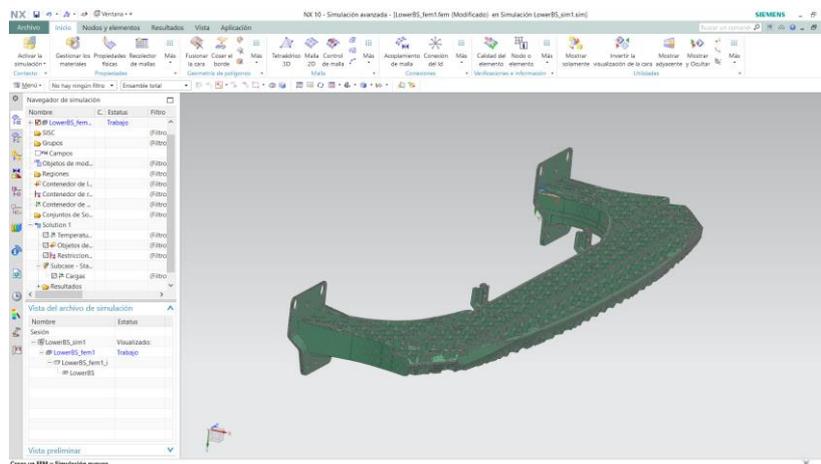


Figura 34. Generación de la malla computacional para análisis estructural. (NX Unigraphics, 2017)

Asignación de materiales.

Se asignará el material acorde a los materiales tanto originales, como los propuestos para el reemplazo, en la figura 35, se muestra la biblioteca de materiales disponibles.

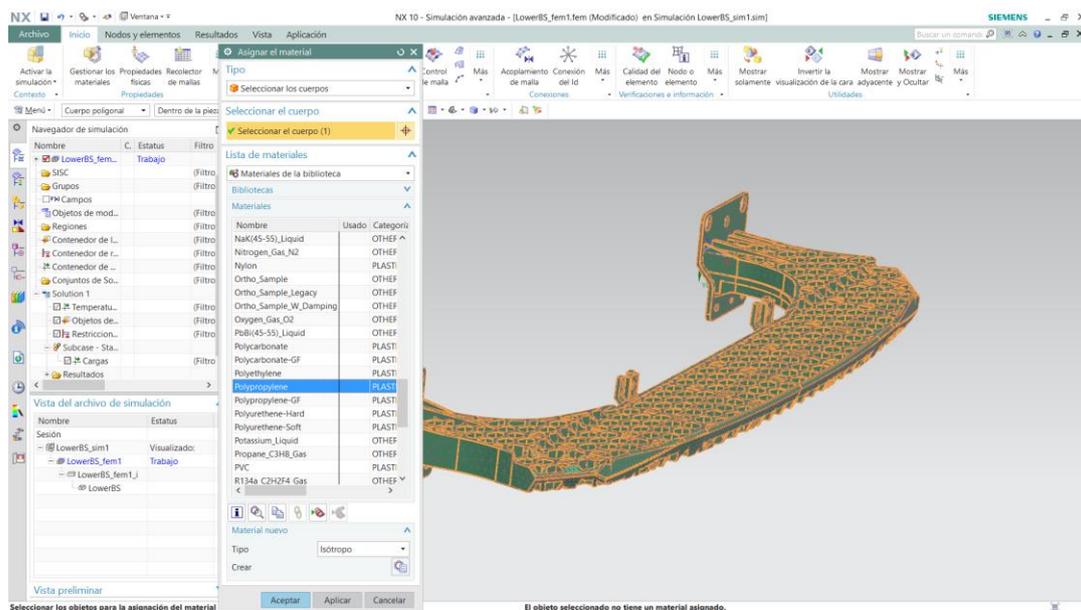


Figura 35. Asignación de material para el análisis estructural. (NX Unigraphics, 2017)

Datos iniciales del funcionamiento del sistema.

Una vez generada la malla y asignado el material, se proceder a la activación de la simulación, como paso inicial se procede a colocar la carga que será de 20 kN en las zonas de impacto del LBS, con dirección en el eje X como se muestra en la figura 36.

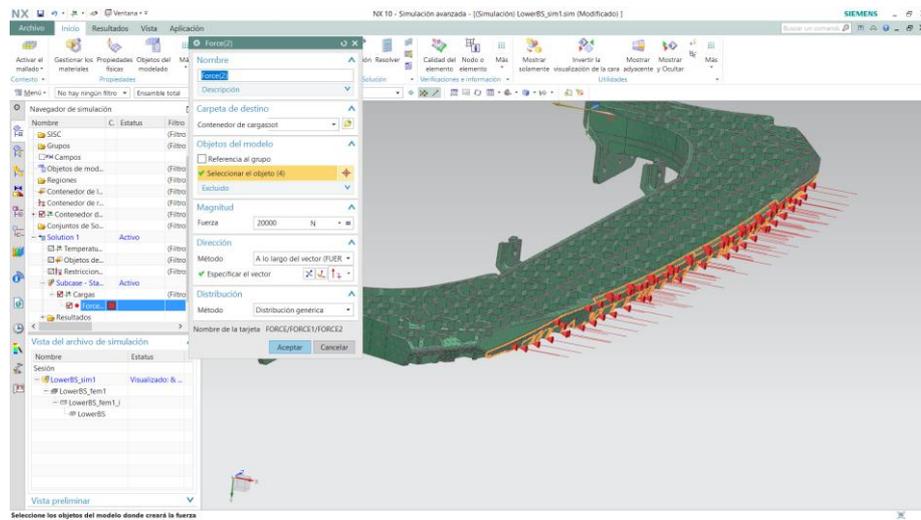


Figura 36. Asignación de cargas en el refuerzo inferior de guardachoque para el análisis estructural. (NX Unigraphics, 2017)

Se colocará restricciones de fijación en los asientos del refuerzo inferior del guardachoque, se toma en cuenta únicamente los nervios que poseen como se observa en la figura 37, debido a que representan las zonas donde se asientan a la estructura del vehículo.

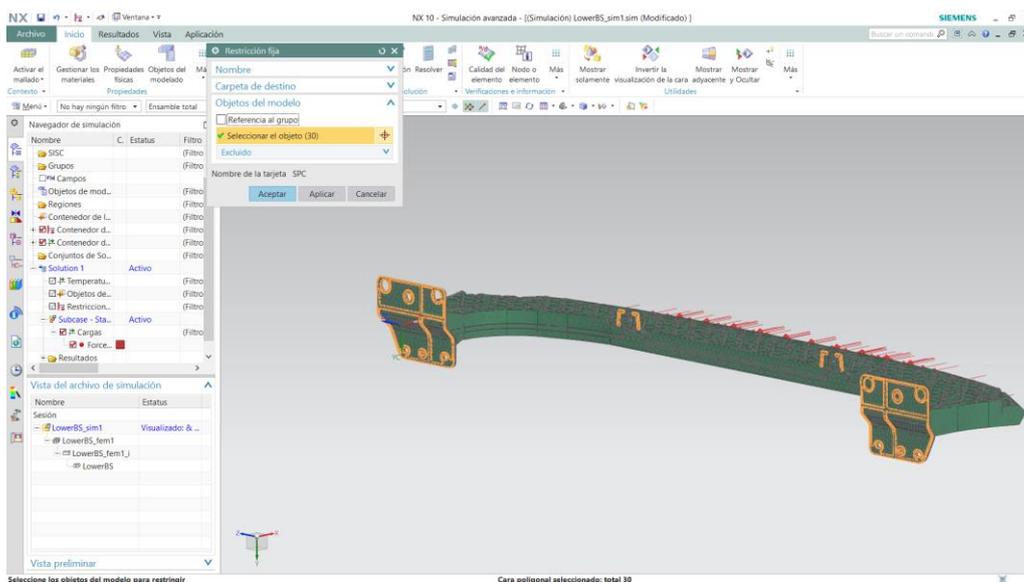


Figura 37. Restricción de fijación en las bases del refuerzo inferior de guardachoque. (NX Unigraphics, 2017)

Post-procesamiento.

Una vez colocadas las condiciones del sistema, se procede al correr el *Solver*, la simulación tiene una duración de 15 minutos, con un número de interacciones de 398 661. El mismo procedimiento se realizará para los materiales seleccionados como posibles reemplazos.

Para obtener datos que permitan establecer un criterio de selección, se medirá los resultados de 3 nodos, en la figura 38, se muestra las trayectorias escogidas para la obtención de datos.

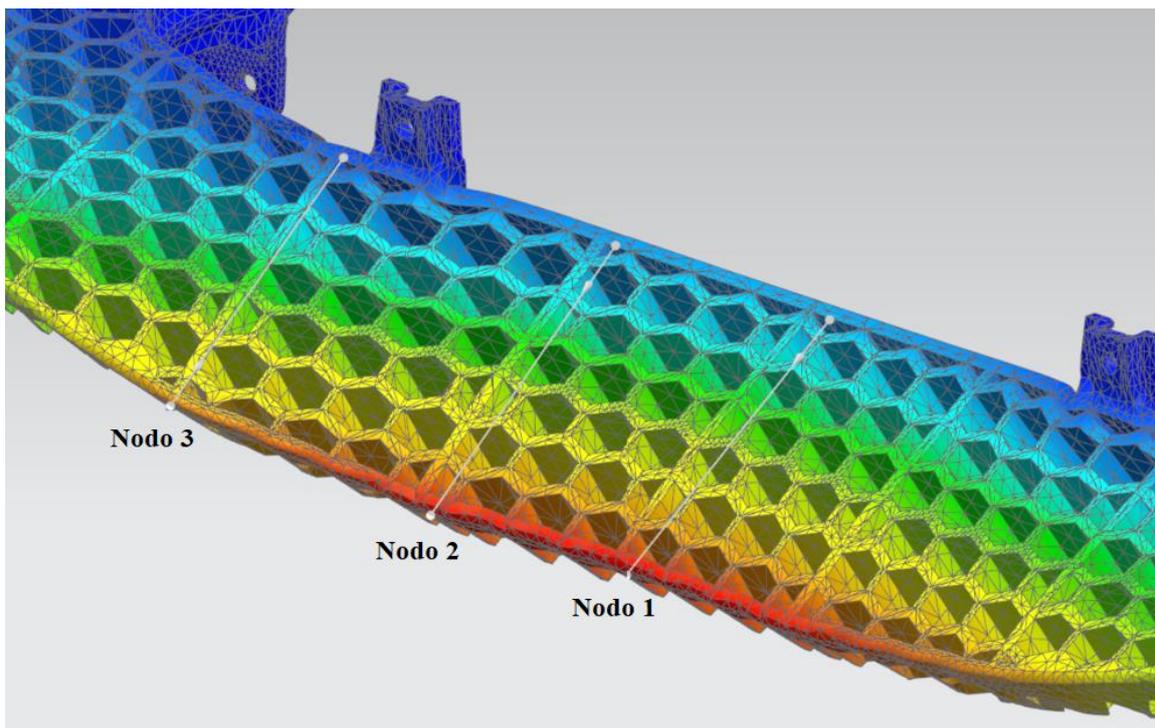


Figura 38. Selección de nodos para análisis de resultados en el análisis estructural (NX Unigraphics, 2017).

Simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita

El análisis computacional del evento dinámico entre el impactador de miembros inferiores y los refuerzos superior e inferior de guardachoques, se realizará en ANSYS Student, por tanto, se debe definir el tipo de sistema de análisis, al ser un evento dinámico el software permite la aplicación del sistema *Explicit Dynamics* con resolución con Autodyn.

En la figura 39, se muestra la disposición del programa en base al sistema seleccionado, por tanto, como primer paso se realizará un pre-procesamiento, como la definición de partes fijas dentro del ensamble, en *Engineering Data*, se ingresará los materiales, en *Geometry*, se importará la geometría generada en NX 10 y se seccionara las partes que requieren un mayor detalle en el mallado, al igual que el tipo de falla a evaluar por el software.

En *Model*, será posible definir la malla acorde al criterio ingenieril y la preferencia de resultados que se desean obtener, mientras en *Setup*, se ingresaran los datos físicos de funcionamiento del sistema, a su vez, se ingresaran las opciones requeridas, para realizar el análisis del sistema, dentro de las pruebas disponibles para el análisis del impactador de miembros inferiores se tiene cizallamiento de la rodilla, aceleración de la zona superior del fémur y grados de rotación de la rodilla, sin embargo, al tratarse de un estudio centrado en cambiar el material del LBS, se tomara como referencia un solo criterio, debido al diseño de dos refuerzos de guardachoque, se prevé que el cizallamiento será mínimo debido a la posición del refuerzo superior de guardachoques, mientras que los grados de rotación es un análisis opcional dentro de los ensayos físicos, por tanto solo se evaluara la aceleración en el impactador, los valores máximos se comparan con la normativa, mientras que en el refuerzo

inferior de guardachoques se evaluar la deformación en diferentes nodos, y el esfuerzo equivalente de Von Mises.

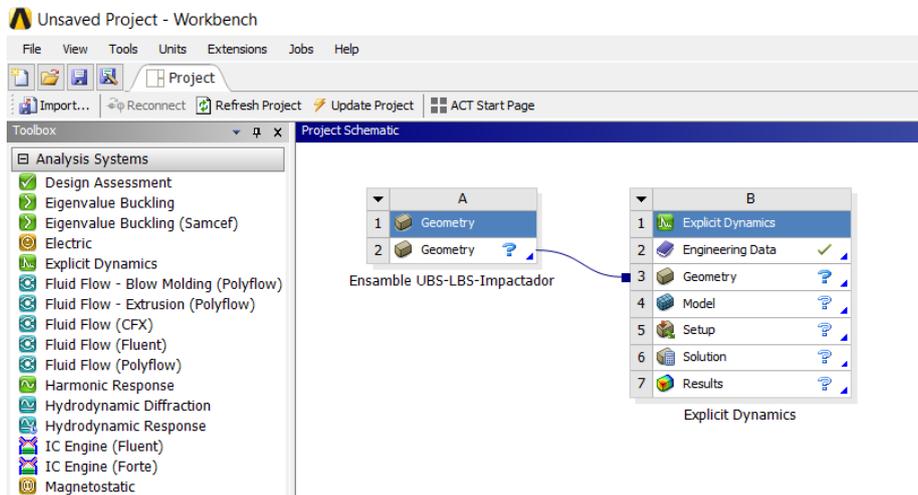


Figura 39. Ingreso del componente del sistema *Geometry*, enlazado con la selección del análisis *Explicit Dynamics* (Ansys, 2017).

Introducción de materiales en *engineering data*

Como primer paso se procederá a la introducción de datos del material, los materiales a usar son los detallados en la tabla 9, sin embargo, el software ANSYS, no dispone en su biblioteca de estos materiales, por tanto, será necesario introducir manualmente los datos requeridos. Para la creación del material se introducirá el nombre del material, referencia de datos obtenidos y en la pestaña *Linear Elastic*, se seleccionará la opción *Isotropic Elastic*. Por tanto, para completar los datos que el software necesita para el estudio, será la densidad, el módulo de Young, el coeficiente de Poisson, esfuerzo de fluencia y elongación a la rotura, usando los datos de la tabla 9 de este capítulo, se tiene como resultado la figura 40. El mismo

procedimiento se seguirá, para el material TPO y la espuma CF-45. El Nylon al igual que el acero 304, se encuentran como predeterminados en el software.

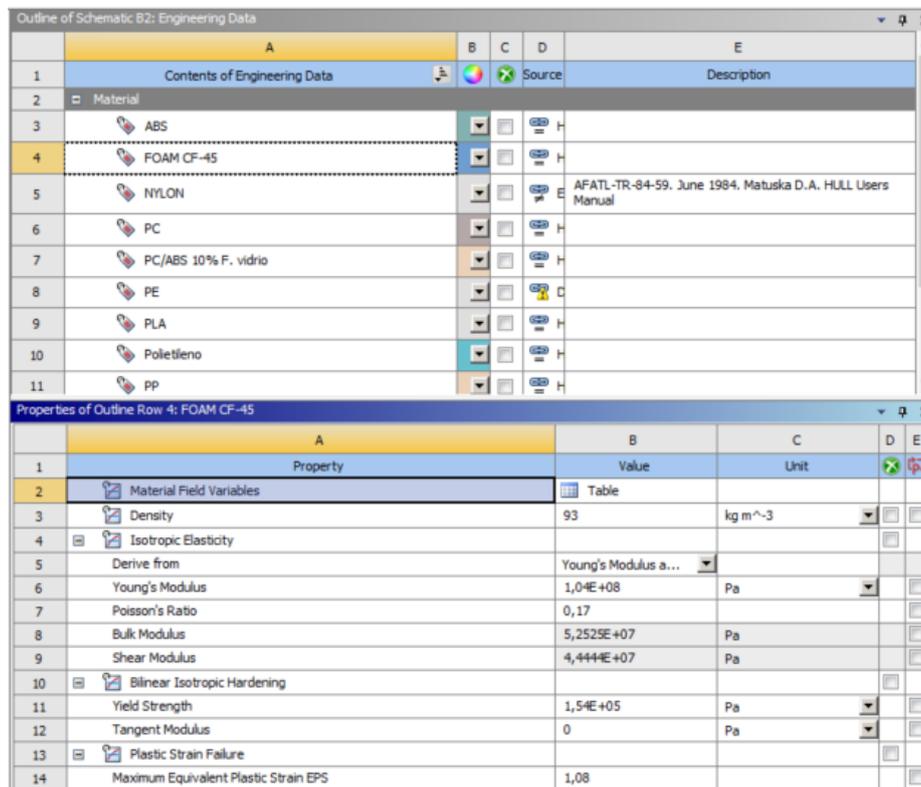


Figura 40. Introducción de datos para agregar nuevos materiales en base a las tablas 9 y 10 (Ansys, 2017).

Elementos CAD generados introducidos en *Geometry*.

Como siguiente paso, se importará la geometría generada en el software NX 10, por tanto, se ingresará al componente de sistema *Geometry*, donde se procederá a realizar una simetría en el eje y, en la figura 41, se observa creación de la simetría para luego convertir las entidades en superficies con el fin de disminuir la carga computacional del sistema, puesto que el número de divisiones en el tiempo será de 1 532 partes para un paso de tiempo de 0.023 milisegundos.

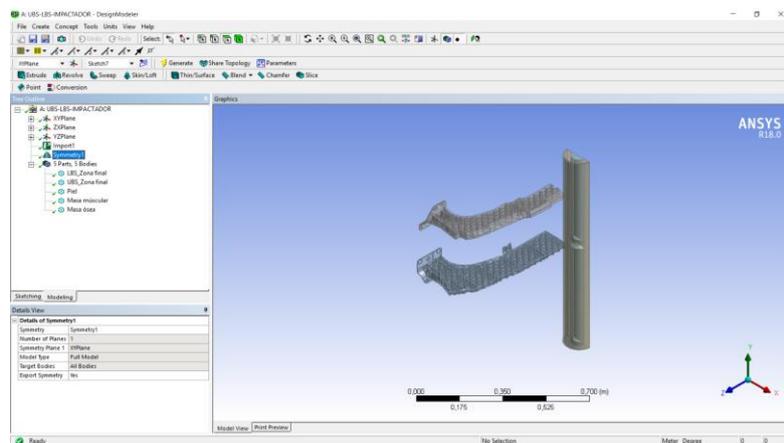


Figura 41. Creación de corte simétrico para la geometría importada (Ansys, 2017).

Generación del mallado computacional.

Una vez detallada la geometría, se ingresará a la opción *Model* de la aplicación análisis *Explicit Dynamics*, en esta ventana se definirán los materiales, acorde a la tabla 9 como indica la figura 42, con lo cual se dará por terminada la sección de geometría para continuar al mallado, puesto que el software automáticamente detecta los puntos de contacto y la simetría generada.

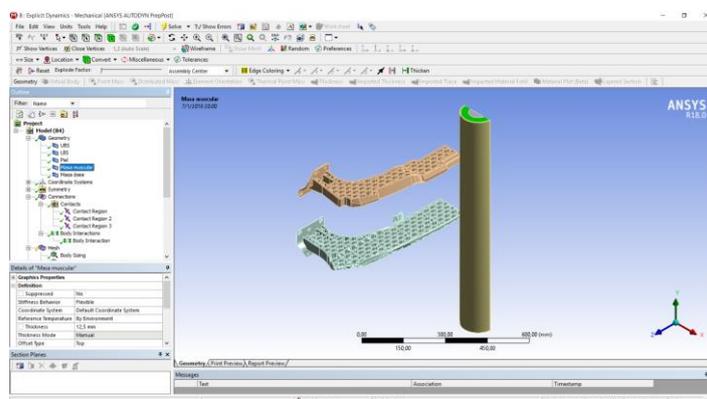


Figura 42. Asignación de materiales y espesor de elementos *Shell*, previo a la generación de mallado (Ansys, 2017).

Para la generación del mallado, se debe tomar en cuenta para un mejor resultado, se debe considerar elementos tetraédricos para una buena ejecución de la simulación, debido a la complejidad de los refuerzos inferiores al contener un número de caras que varía entre 938 y 1218 para el UBS y el LBS respectivamente, se usa la opción de mallado *Body Sizing* para delimitar el número máximo y mínimo de medidas lo cual permite obtener elementos tetraédricos con un menor gasto computacional, esto variara según la geometría de cada elemento, adicional, la figura 43 muestra el mallado generado.

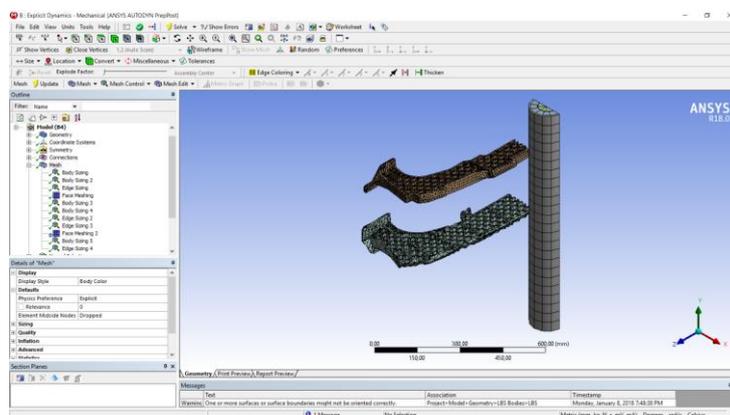


Figura 43. Generación de mallado para las geometrías sometidas a análisis.

Según lo afirma Santos (2017), al analizar la malla se debe considerar parámetros geométricos de cada elemento siendo los principales índices de calidad el *Warpage*, *Skewness* y Jacobiano. Ansys permite generar el análisis del mallado por medio de índices de calidad *Jacobiano Ratio* y *Skewness*, en la tabla 10, se muestra los resultados de la malla generada, donde se puede apreciar que los valores dados por el software se encuentran cerca del ideal para el Jacobiano y en *Skewness* se tiene un mallado con precaución, al ser el método Jacobiano el más apropiado para la malla generada, el software tomara como predeterminado este parámetro.

Tabla 11.

Índice de calidad de la malla.

Índice de calidad	Ideal	Precaución	Inaceptable	Parámetro máximo calculado	Parámetro mínimo calculado	Parámetro promedio calculado
Skewness	0	0.4	0.7	0.99	0,008	0.66
Jacobiano	1	0.6	0.3	1	0.53	0.99

Nota: Parámetros de índice de calidad generados por ANSYS en la generación de mallado de los elementos a simular.

Selección de nodos para análisis en el impactador y LBS.

Adicional se colocará una selección de nodos específicos para analizar aceleración de la zona superior del fémur a 60 mm del centro de unión del fémur y tibia acorde a la normativa europea ACEA y la deformación del refuerzo inferior de guardachoques, como muestra la figura 44.

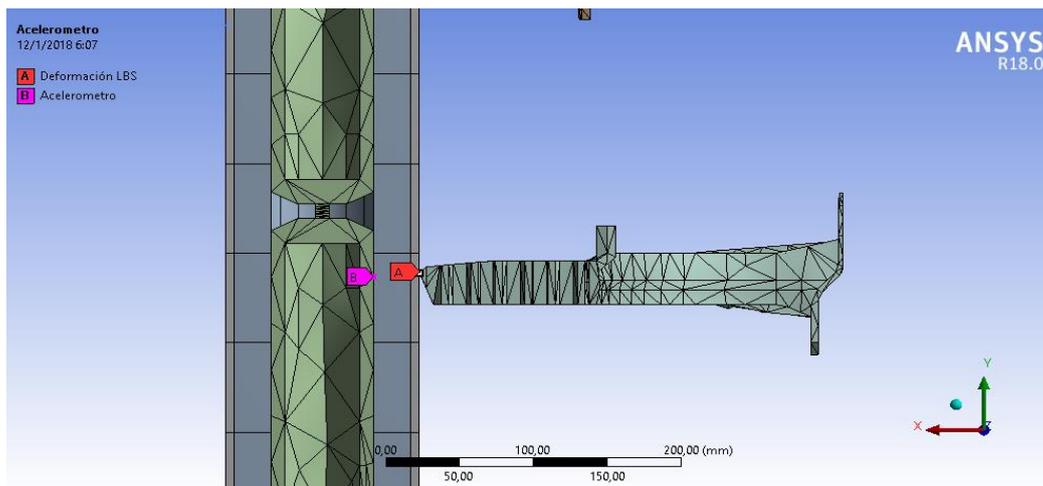


Figura 44. Selección de nodos específicos para la obtención de resultados específicos.

Para obtener valores que permitan tomar una decisión acorde a la deformación del LBS, se procedió a colocar 3 nodos (A, B, C) ubicados en distintas secciones de la zona frontal del refuerzo inferior de guardachoques, como se muestra en la figura 45.

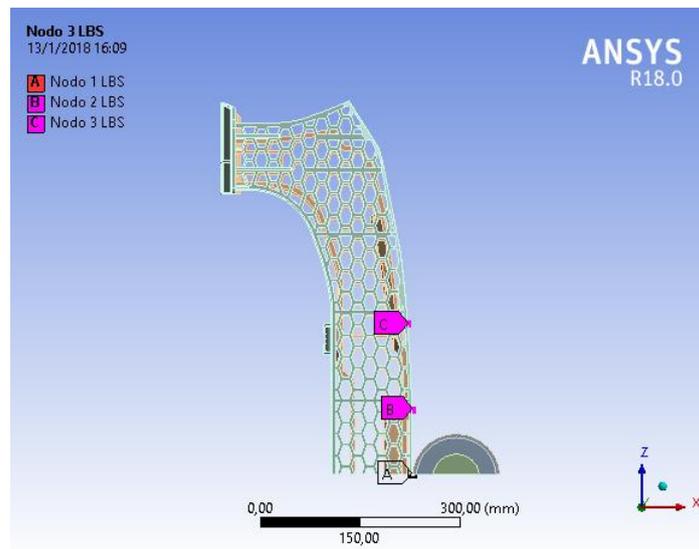


Figura 45. Selección de nodos específicos para la obtención de resultados específicos del LBS.

Condiciones iniciales para el funcionamiento del sistema.

En la introducción de condiciones iniciales, se determinará una velocidad de 11 m/s en el eje X en dirección al LBS, y soportes fijos en los asientos de los refuerzos que están acoplados a la estructura el vehículo, como muestra la figura 46.

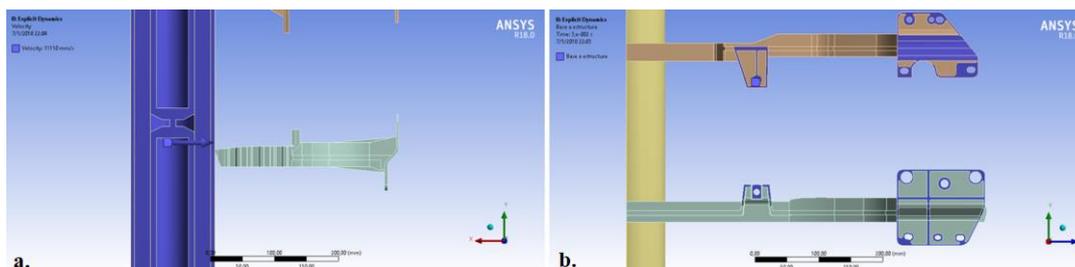


Figura 46. a. Selección de cuerpos para aplicar velocidad en el eje X; b. Selección de caras para soportes fijos.

Un factor importante será determinar el número de ciclos, duración del evento, como el margen de error permitido para el cálculo y el número de subdivisiones de tiempo, estos valores se ingresarán en *Analysis Settings*, donde el número de ciclos máximo asignado será de 10 000 000, con una duración de 0.35 segundos, error máximo de 5, con un factor de seguridad de 0.9, mientras que el paso de tiempo será 0.023 milisegundos o 2.3E-05 segundos.

Selección del tipo de solución requeridas para la simulación.

Acorde a los datos que se requieren obtener, en *Solution*, se introduce deformación total de todos los cuerpos, deformación total del LBS; deformación direccional del nodo 1,2 y 3 LBS en X; acelerómetro direccional en X; esfuerzo equivalente de Von Mises en todos los cuerpos, y elasticidad plástica equivalente del LBS como se muestra en la figura 47.

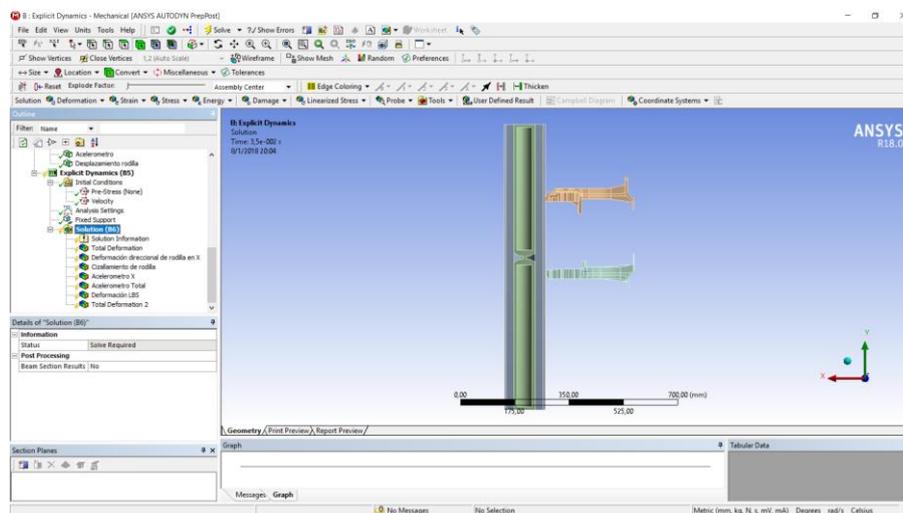


Figura 47. Introducción de soluciones requeridas para el análisis del evento de impacto.

La duración del cálculo dura aproximadamente 19 horas con 2 399 091 ciclos, el mismo procedimiento se realizará para el análisis de materiales alternos, se debe considerar, que la aceleración dada por el software debe ser transformada a aceleración G.

RESULTADOS

Presentación y análisis de resultados

Los resultados se obtendrán en base de un análisis asistido por computador, el primer análisis será para validar los resultados del estudio experimental, mientras que el análisis estructural y análisis de dinámica explícita será para analizar el refuerzo inferior de guardachoques, los valores conseguidos se centrarán en el cumplimiento de la normativa de protección de peatones para validar que se cumplen los requisitos mínimos, mientras que en las cargas máximas se analizará el comportamiento del material original, para después mostrar el comportamiento de los materiales seleccionados como posibles reemplazos y basar en estos parámetros un criterio de selección, las condiciones de borde para la simulación dinámica se basan en la colisión del impactador de piernas a 40 km/h o 11.11 m/s.

Resultados de cálculos de propagación de onda

Los parámetros referenciales para asegurar una buena simulación se basan en el cálculo del tiempo crítico (t_c), los valores obtenidos acorde al tipo de material se clasifican en la tabla 12, donde agrupan los materiales por tipo de análisis a realizar donde c es igual a propagación de onda y l es la longitud característica del elemento.

Tabla 12.

Cálculo de tiempo de paso mínimo para asegurar propagación de onda en el material.

Proyectil - Validación				
Descripción	Material	c [m/s]	l [mm]	[ms]
Placa de acero	SS 304	5658,154251	0,7100	0,1255
Materiales del refuerzo inferior de guardachoque (LBS)				
Descripción	Material	c [m/s]	l [mm]	tc [ms]
LBS	PP	1858,3634	0,0357	0,0192
LBS	PE	1178,9860	0,0357	0,0302
LBS	PS	2400,0605	0,0357	0,0149
LBS	PC	1858,7094	0,0357	0,0192
LBS	ABS	2013,3371	0,0357	0,0177
LBS	PLA	1416,1438	0,0357	0,0252
LBS	PC/ABS 10% F. vidrio	2688,4177	0,0357	0,0133

Nota: Resultados de cálculo de tiempo crítico para los materiales de validación de resultados y materiales que serán reemplazados en el refuerzo inferior de parachoques (LBS).

Resultados de simulación de proyectil con análisis de dinámica explícita para validación de datos generados entre un ensayo experimental y simulación computacional

Malla computacional generada para la placa y proyectil de acero

Tomando el método *Jacobiano Ratio*, para el análisis de la malla computacional en el software Ansys, se tiene que los valores tienen un promedio de 1.14, por tanto, la malla generada es idónea para la creación de la geometría, la malla puede ser refinada aún más, sin embargo, se encuentra dentro de los parámetros requeridos para obtener un valor cercano a los obtenidos en el método experimental, la tabla 13 describen los datos del mallado generado.

Tabla 13.

Parámetros geométricos de post-procesamiento para proyectil y laca de acero.

Estadísticas de malla (<i>Jacobian Ratio</i>)						
Descripción	Placa de acero					Proyectil
	Malla 1	Malla 2	Malla 3	Malla 4	Malla 5	Malla 6
Nodos	153	190	187	153	187	197
Elementos	128	162	160	128	160	169
Mínimo	1,0577	1,0043	1,0614	1,0578	1,0616	1,0113
Máximo	1,3092	3,6739	1,1533	1,3093	1,1533	3,6144
Promedio	1,1069	1,2591	1,0964	1,1069	1,0964	1,2240
Desviación estándar	0,0417	0,3550	0,0272	0,0417	0,0272	0,3334

Nota: Los valores generados por Ansys muestran los datos de calidad de malla. Recuperado de Ansys, (2018).

Resultados de simulación de colisión entre proyectil y placa de acero con variación de velocidad para análisis de deformación

Los resultados del impacto del proyectil sobre una placa de acero SS 304, muestran una deformación a una velocidad de 54 m/s de 6.11 mm como indica la figura 48.a, mientras que a 77 m/s su deformación es 8.39 mm, este desplazamiento no presenta riesgo de rotura para la placa de acero como se muestra en la figura 48.b.

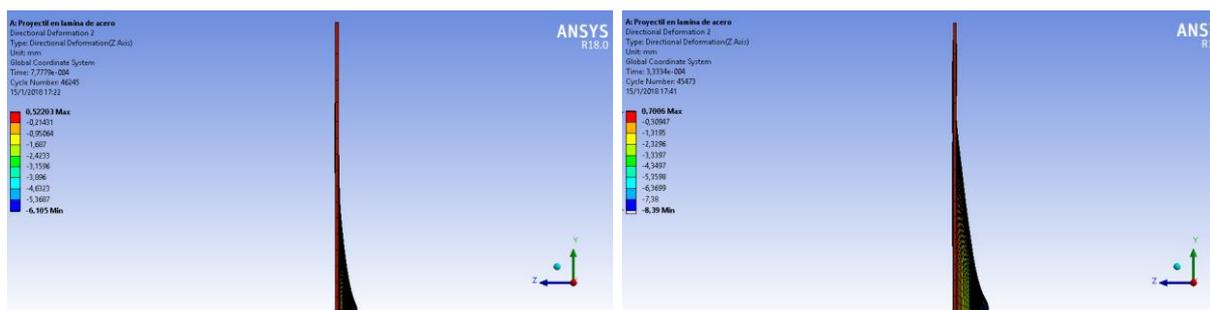


Figura 48. Resultados de deformación de placa de acero, a) velocidad de proyectil a 54 m/s; b) velocidad de proyectil 77 m/s (Ansys, 2017).

La deformación producida por el impacto a 148 m/s produce una deformación de 14.80 mm, como se muestra en la figura 49.a, sin embargo, el desplazamiento solo produce una deformación mas no la falla del material, similar resultado se obtiene con el lanzamiento del proyectil a una velocidad de 165 m/s donde se tiene una deformación de 16.29 mm, como se muestra en la figura 49.b.

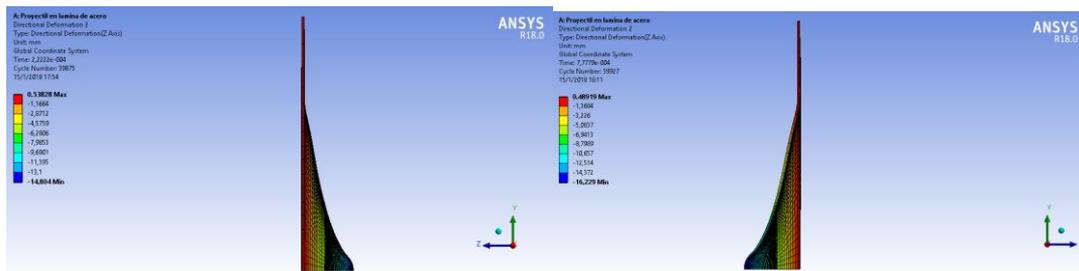


Figura 49. Resultados de deformación de placa de acero, a) velocidad de proyectil a 148 m/s; b) velocidad de proyectil 165 m/s (Ansys, 2017).

Los valores obtenidos de la simulación, muestran una deformación de 19.62 mm a una velocidad de 207 m/s, como lo indica la figura 50.a., sin embargo, aún no se muestra esta rotura en el software, algo que, si ocurre a una velocidad de 225 m/v, donde el software cálculo un desplazamiento de 197.52 mm, como lo muestra la figura 50.b.

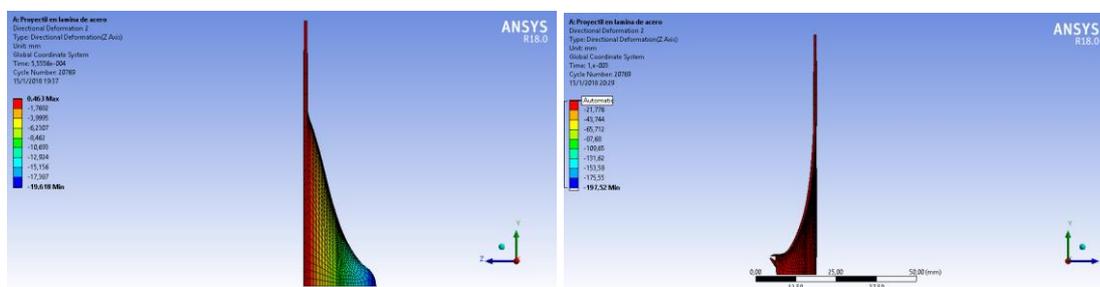


Figura 50. Resultados de deformación de placa de acero, a) velocidad de proyectil a 207 m/s; b) velocidad de proyectil 225 m/s (Ansys, 2017).

Masa del refuerzo inferior de guardachoques en base al material original y alterno

La masa de los materiales propuestos, fue dada por el software Ansys, los datos resultantes deben ser multiplicados por dos siendo esta la masa real, como se muestra en la tabla 14, esto se debe a que el software para efecto del cálculo toma en cuenta únicamente los elementos generados en la geometría sin considerar cortes por simetría.

Tabla 14.

Masa generada por Ansys en el post-procesamiento con polipropileno.

Descripción	Masa del LBS calculado por Ansys	
	Simetría [kg]	Masa total [kg]
PP	0,96	1,92
PS	1,26	2,52
PE	1,03	2,07
PC	1,28	2,56
ABS	0,94	1,88
PLA	1,14	2,29
PC FG 10%	1,03	2,05

Nota: Valores de masa por simetría y total del refuerzo inferior de parachoques (LBS), de acuerdo al material original y de posible reemplazo para el estudio. (Elaboración propia, 2017).

Resultados de análisis estructural del refuerzo inferior de guardachoques

Resultados del mallado para análisis estructural por deformación

Considerando el método Jacobiano para la calidad de la malla en el software NX, se tiene un máximo de borde de 29.56 y un mínimo de 0.21, obteniendo un promedio de 3,76, por tanto, el mallado se considera apropiado para la resolución del problema usando una malla tetraédrica de 10 nodos, con un tamaño de elemento de 10 mm, como principal eje de resultados se tomará en cuenta las cargas máximas generadas en la zona frontal del refuerzo inferior de guardachoque (LBS).

Resultados de simulación por deformación estructural con polipropileno (PE)

En el análisis estructural se sometió a una carga de 20 kN, obteniendo como resultado un desplazamiento total de 29.38 mm como se observa en la figura 48.a, mientras en el eje Y se muestra una deformación de 26.55 como lo muestra la figura 51.b.

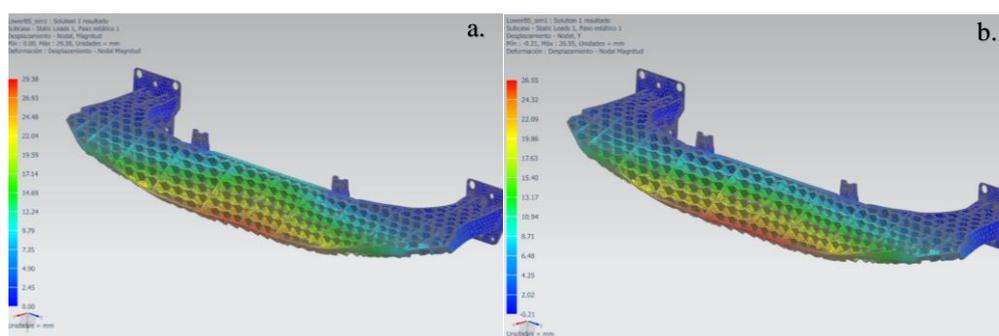


Figura 51. Deformación total (a) y direccional en Y (b) del refuerzo inferior de guardachoques usando polipropileno como material base, con una carga aplicada de 20 kN. (NX Unigraphics, 2017)

Considerando los nodos seleccionados en la figura 38, se tiene una variación en la deformación de 26.14 a 22.99 mm según la posición y trayectoria marcada, la tabla 15 muestra un resumen de los resultados de la simulación aplicando una carga de 20 kN.

Tabla 15.

Deformación del LBS sometido a una carga de 20 kN, usando polipropileno como material base.

Descripción	Análisis estructural - Carga a 20 kN				
	Deformación Total [mm]	Deformación Y [mm]	Nodo 1 [mm]	Nodo 2 [mm]	Nodo 3 [mm]
PP	29,38	26,55	26,14	25,84	22,99

Nota: Valores de deformación generados por NX Unigraphics tras simulación estructural del LBS tomando al polipropileno como material base. Los nodos frontales de referencia para análisis pueden ser ubicados en la figura 38.

Resultados de simulación por deformación estructural con polietileno (PE)

Este elemento sometido a la carga de 20 kN tiene una deformación total de 58.8 mm como indica la figura 52.a, y una deformación direccional en Y de 53.11 mm como lo muestra la figura 52.b.

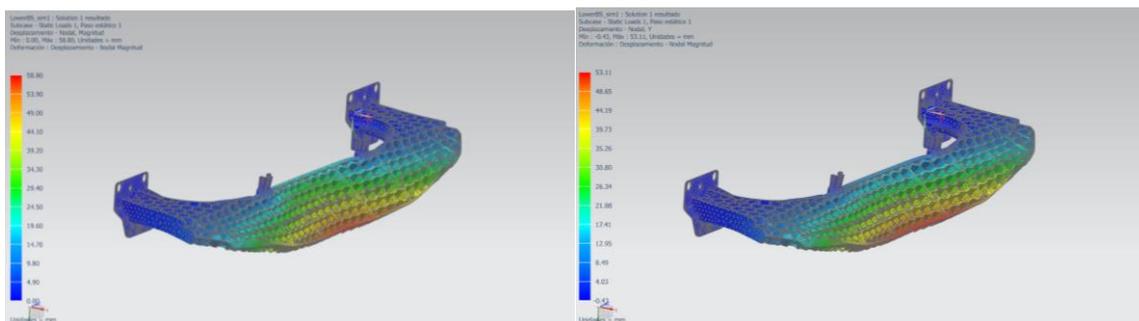


Figura 52. Deformación total (a) y direccional en Y (b) del refuerzo inferior de guardachoques usando polietileno como material base, con una carga aplicada de 20 kN. (NX Unigraphics, 2017)

En la figura 38 se puede reconocer la ubicación de los nodos colocados en la zona frontal, usando como material base al polietileno en el refuerzo inferior de guardachoques (LBS), se observa una deformación máxima de 41.96 mm en el nodo 1, mientras la deformación mínima se encuentra en el nodo 3 con 37.19, la tabla 16 muestra los resultados obtenidos en cada nodo, como a su vez la deformación total del refuerzo inferior de guardachoques (LBS) aplicando como material base el polietileno.

Tabla 16.

Deformación del LBS sometido a una carga de 20 kN, usando polipropileno como material base.

Descripción	Análisis estructural - Carga a 20 kN				
	Deformación Total [mm]	Deformación Y [mm]	Nodo 1 [mm]	Nodo 2 [mm]	Nodo 3 [mm]
PLA	46,48	41,96	42,98	42,62	37,19

Nota: Valores de deformación generados por NX Unigraphics tras simulación estructural del LBS tomando al polietileno como material base. Los nodos frontales de referencia para análisis pueden ser ubicados en la figura 38.

Resultados de simulación por deformación estructural con poliestireno (PE)

Usando como material base el poliestireno para analizar la deformación del refuerzo inferior de guardachoques (LBS), colocando una carga de 20 kN, se tiene un desplazamiento total de 18.53 mm como se muestra en la figura 53.a, mientras que la máxima deformación en el eje Y es de 16.74 mm como se muestra en la figura 53.b, los valores obtenidos un comportamiento de mayor esfuerzo en la mitad del refuerzo.

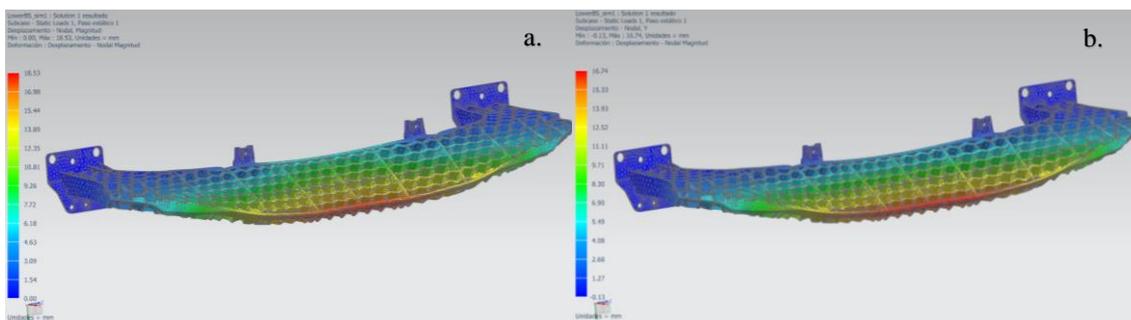


Figura 53. Deformación total (a) y direccional en Y (b) del refuerzo inferior de guardachoques usando poliestireno como material base, con una carga aplicada de 20 kN. (NX Unigraphics, 2017)

Las trayectorias de los nodos ubicados en la zona frontal del refuerzo inferior de parachoques pueden apreciarse en la figura 38, los valores obtenidos muestran una

deformación mínima de 14.26 mm en el nodo 3, los resultados muestran que casi no existe variación en los nodos, según los valores expuestos en la tabla 17.

Tabla 17.

Deformación del LBS sometido a una carga de 20 kN, usando poliestireno como material base.

Descripción	Análisis estructural - Carga a 20 kN				
	Deformación Total [mm]	Deformación Y [mm]	Nodo 1 [mm]	Nodo 2 [mm]	Nodo 3 [mm]
PS	18,53	16,74	16,48	16,29	14,26

Nota: Valores de deformación generados por NX Unigraphics tras simulación estructural del LBS tomando al polietileno como material base. Los nodos frontales de referencia para análisis pueden ser ubicados en la figura 38.

Resultados de simulación por deformación estructural con policarbonato (PC)

El análisis estructural del policarbonato como material base, a una carga de 20 kN, muestran como máximo resultado 23.52 mm considerado la deformación total del elemento como se observa en la imagen 54.a, mientras que en el eje Y, la deformación máxima es de 21.25 mm, como muestra la imagen 54.b.

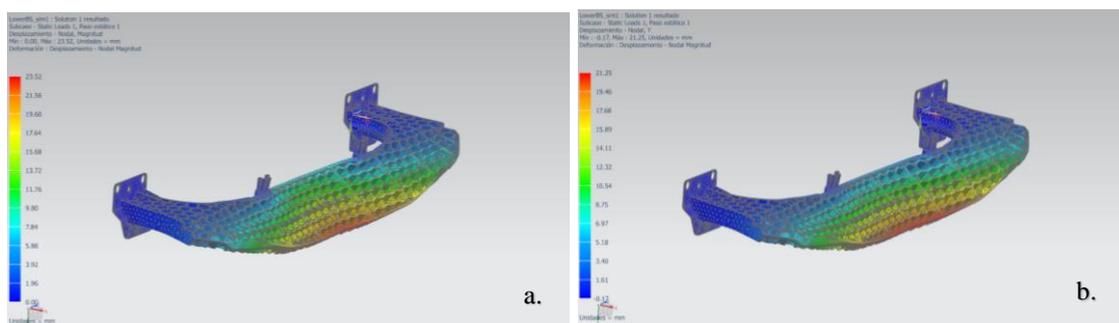


Figura 54. Deformación total (a) y direccional en Y (b) del refuerzo inferior de guardachoques usando policarbonato como material base, con una carga aplicada de 20 kN. (NX Unigraphics, 2017)

Los nodos seleccionados en la zona frontal del refuerzo inferior de guardachoques (LBS) pueden apreciarse en la figura 38, se tiene un valor de mínimo de 18.02 mm en el nodo

3, aplicando una carga de 20 kN, en la tabla 18, se aprecian las variaciones producidas durante la simulación.

Tabla 18.

Deformación del LBS sometido a una carga de 20 kN, usando policarbonato como material base.

Descripción	Análisis estructural - Carga a 20 kN				
	Deformación Total [mm]	Deformación Y [mm]	Nodo 1 [mm]	Nodo 2 [mm]	Nodo 3 [mm]
PC	23,52	21,25	20,91	20,67	18,02

Nota: Valores de deformación generados por NX Unigraphics tras simulación estructural del LBS tomando al policarbonato como material base. Los nodos frontales de referencia para análisis pueden ser ubicados en la figura 38.

Resultados de simulación por deformación estructural con acrilonitrilo butadieno (ABS)

Los resultados del análisis estructural usando como material base acrilonitrilo butadieno (ABS) a una carga de 20 kN en la zona frontal, muestran una deformación total de 31.30 mm como muestra la figura 55.a, mientras que la deformación en el eje Y, es de 28.57 mm como se observar en la figura 55.b.

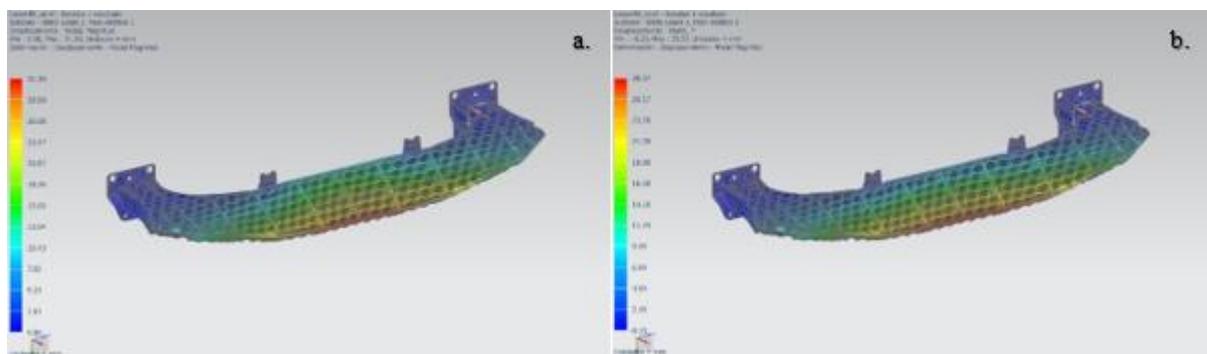


Figura 55. Deformación total (a) y direccional en Y (b) del refuerzo inferior de guardachoques usando acrilonitrilo butadieno como material base, con una carga aplicada de 20 kN. (NX Unigraphics, 2017)

Considerando los nodos seleccionados en la zona frontal del refuerzo inferior de parachoques (LBS) en la figura 38, se tiene una variación entre 25.02 a 28.57 mm según la posición y trayectoria marcada, la tabla 19 muestra un resumen de los resultados de la simulación aplicando una carga de 20 kN.

Tabla 19.

Deformación del LBS sometido a una carga de 20 kN, usando ABS como material base.

Descripción	Análisis estructural - Carga a 20 kN				
	Deformación Total [mm]	Deformación Y [mm]	Nodo 1 [mm]	Nodo 2 [mm]	Nodo 3 [mm]
ABS	31,30	28.57	29.27	28.95	25.02

Nota: Valores de deformación generados por NX Unigraphics tras simulación estructural del LBS tomando al ABS como material base. Los nodos frontales de referencia para análisis pueden ser ubicados en la figura 38.

Resultados de simulación por deformación estructural con poliácido láctico (PLA)

El refuerzo inferior de guardachoques sometido a una carga de 20 kN considerando como material base poliácido láctico, se tiene una deformación total de 46.48 mm como muestra la figura 56.a, mientras que la deformación en Y, se muestra una deformación de 41.96 mm, como se indica en la figura 56.b.

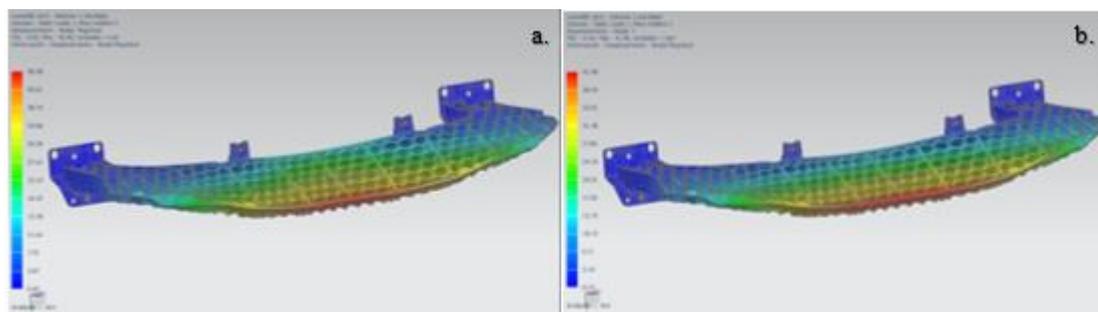


Figura 56. Deformación total (a) y direccional en Y (b) del refuerzo inferior de guardachoques usando poliácido láctico como material base, con una carga aplicada de 20 kN. (NX Unigraphics, 2017)

Las trayectorias de los nodos ubicados en la zona frontal del refuerzo inferior de parachoques (LBS) pueden apreciarse en la figura 38, los valores obtenidos muestran una deformación mínima de 37.19 mm en el nodo 3, los resultados muestran una variación en los nodos puesto que la mayor variación sucede en el nodo 1 con 42.98 mm, según los valores expuestos en la tabla 20.

Tabla 20.

Deformación del LBS sometido a una carga de 20 kN, usando PLA como material base.

Descripción	Análisis estructural - Carga a 20 kN				
	Deformación Total [mm]	Deformación Y [mm]	Nodo 1 [mm]	Nodo 2 [mm]	Nodo 3 [mm]
PLA	46,48	41,96	42,98	42,62	37,19

Nota: Valores de deformación generados por NX Unigraphics tras simulación estructural del LBS tomando al PLA como material base. Los nodos frontales de referencia para análisis pueden ser ubicados en la figura 38.

Resultados de simulación por deformación estructural con PC/ABS con 10%

Fibra de vidrio

Los valores obtenidos usando como material base policarbonato con ABS reforzado con 10 % de fibra de vidrio, sometido a una carga de 20 kN, se observa una deformación total de 14.92 mm como se observa en la figura 57.a, mientras que la deformación total en Y, es de 11.51 mm como lo indica la figura 57.b.

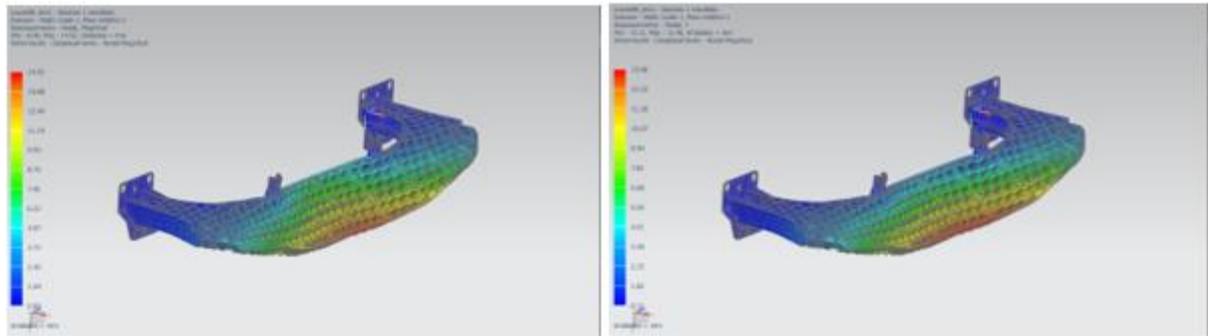


Figura 57. Deformación total (a) y direccional en Y (b) del refuerzo inferior de guardachoques usando PC/ABS reforzado con 10% de fibra de vidrio como material base, con una carga aplicada de 20 kN. (NX Unigraphics, 2017)

Considerando los nodos seleccionados en la zona frontal del refuerzo inferior de parachoques (LBS) en la figura 38, se tiene una variación entre 13.25 a 11.51 mm según la posición y trayectoria marcada, la tabla 19 muestra un resumen de los resultados de la simulación aplicando una carga de 20 kN.

Tabla 21.

Deformación del LBS sometido a una carga de 20 kN, usando PC/ABS con 10% de fibra de vidrio.

Descripción	Análisis estructural - Carga a 20 kN				
	Deformación Total [mm]	Deformación Y [mm]	Nodo 1 [mm]	Nodo 2 [mm]	Nodo 3 [mm]
PC FG 10%	14,92	13,46	13,25	13,31	11,51

Nota: Valores de deformación generados por NX Unigraphics tras simulación estructural del LBS tomando al PC/ABS reforzado con 10 % de fibra de vidrio como material base. Los nodos frontales de referencia para análisis pueden ser ubicados en la figura 38.

Resultados de la simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita

Resultados del mallado para la simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita

Como valor base, antes de proseguir al análisis del refuerzo inferior de parachoques (LBS) con el software Ansys Student, se tiene los parámetros geométricos de los elementos que no tendrán variación de material en el transcurso de las simulaciones computacionales, se debe considerar que existe un corte por simetría en el eje Z, como se mencionó en capítulos anteriores, el corte permite disminuir la carga computacional, sin afectar los resultados de la simulación generada, en la tabla 22 se observan los datos de la malla generada considerando un corte por simetría. Las propiedades físicas generadas por Ansys en el LBS, serán tomadas en cuenta para el análisis de masa según el cambio de material, estas variaciones se darán por la densidad del material, los materiales alternos a usar son polietileno (PE), poliestireno (PS), policarbonato (PC), acrilonitrilo butadieno (ABS), poliácido láctico (PLA) y PC/ABS reforzado con 10% de fibra de vidrio.

Tabla 22.

Parámetros geométricos de post-procesamiento.

Descripción	Nombre de los elementos generados				
	Piel	M. Muscular	M. Ósea	UBS	LBS
Material	Nylon	CF-45	SS 304	TPO	n/a
Longitud X [mm]	131.5	119.51	69.149	285.99	287.48
Longitud Y [mm]	926	926	926	118.48	119
Longitud Z [mm]	60.558	54.558	29.558	550.23	593.93
Volumen [mm^3]	1,0391E+06	3.202E+06	7,4447E+05	8,4362e+005	1,0658E+06
Masa [kg]	1,1846	0,29779	5,8813	0,81831	n/a

Estadísticas de malla (<i>Jacobian Ratio</i>)					
Descripción	Piel	M. Muscular	M. Ósea	UBS	LBS
Nodos	350	350	275	5747	2889
Elementos	144	144	623	16529	8094
Mínimo	0.87108	0.52689	1	1	1
Máximo	0.89751	0.55225	1	1	1
Promedio	0.88429	0.53969	1	1	1
Desviación estándar	1.0828E+02	0.01039	0	0	0

Nota: Los valores generados por Ansys muestran los datos para el post-procesamiento, se debe considerar que la masa de los elementos y la longitud en el eje Z es la mitad del valor real por el corte simétrico. En la columna del LBS, los valores que aparecen como n/a, son datos que variarían según el material asignado y se detallan en la tabla 9.

Resultados de simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita usando polipropileno (PP)

Esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos. Para obtener un entendimiento apropiado del funcionamiento del sistema, se procedió a realizar un análisis de esfuerzo equivalente en todos los cuerpos con el fin de obtener la trayectoria total de los elementos, en la figura 58, se observa el desplazamiento del impactador de miembros inferiores dividida en 4 secciones que muestran su trayectoria entre 0 y 35 ms, se observa que una vez que alcanza su mayor valor que es de 354 MPa entre los 25 y 30 ms como se muestra en la figura 58.c, empieza el retroceso del impactador, se puede observar un desprendimiento de pequeñas partículas marcadas en color rojo, la actuación del refuerzo superior del guardachoques impide una penetración directa, sin embargo causa la inclinación del impactador evitando el desplazamiento de la rodilla.

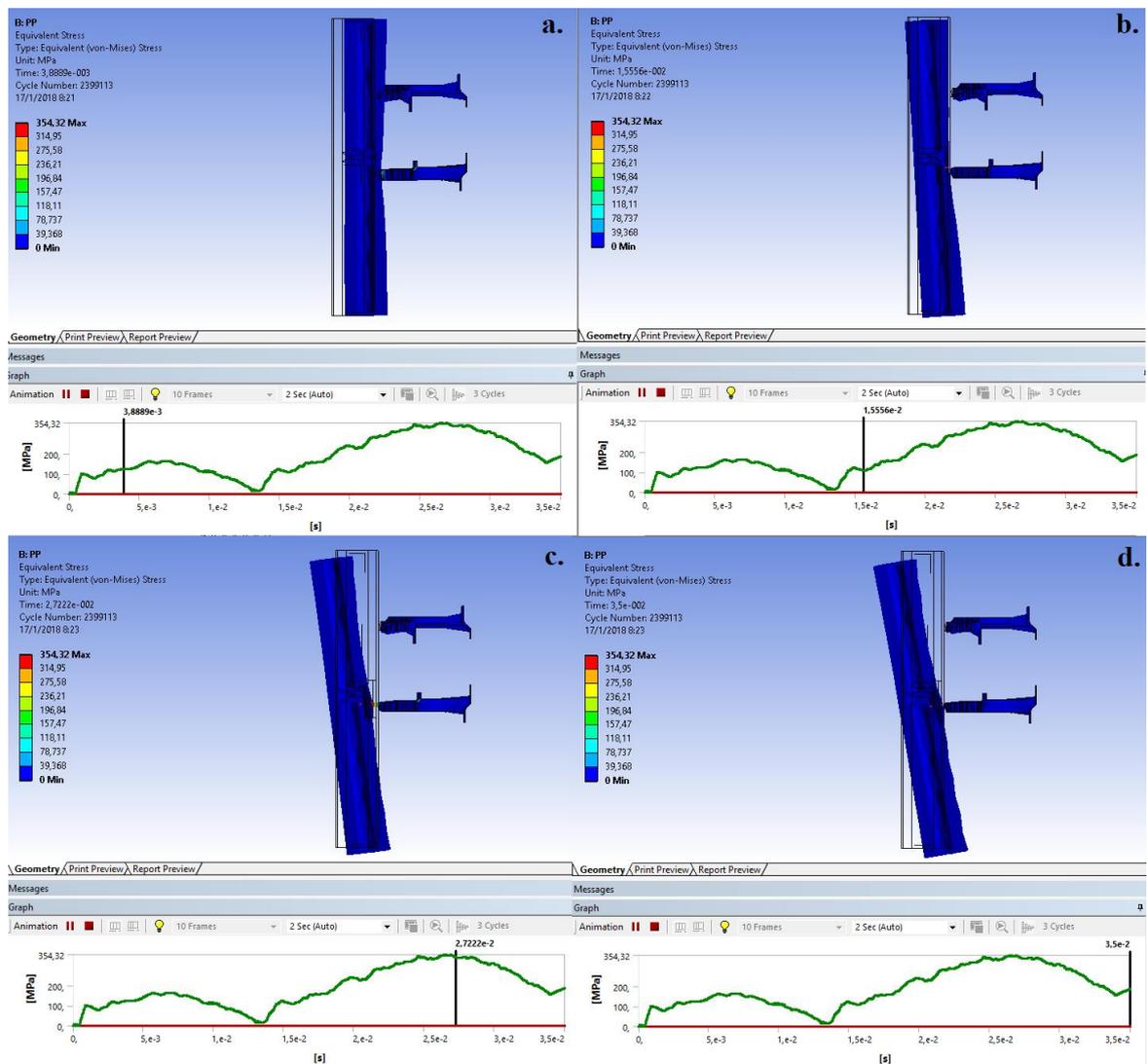


Figura 58. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos, usando como material base del refuerzo inferior de guardachoques polipropileno.

Esfuerzo equivalente de Von Mises en el refuerzo inferior de parachoques. El máximo esfuerzo equivalente se produce entre los 25 y 30 milisegundos, siendo su valor máximo de 354.32 MPa, como los muestra la figura 59.a, sin embargo, esta presión es de aproximadamente 66 MPa en la base más cercana al centro del refuerzo como lo indica la figura 59.b, los valores alrededor del refuerzo varían acorde la trayectoria del impactador.

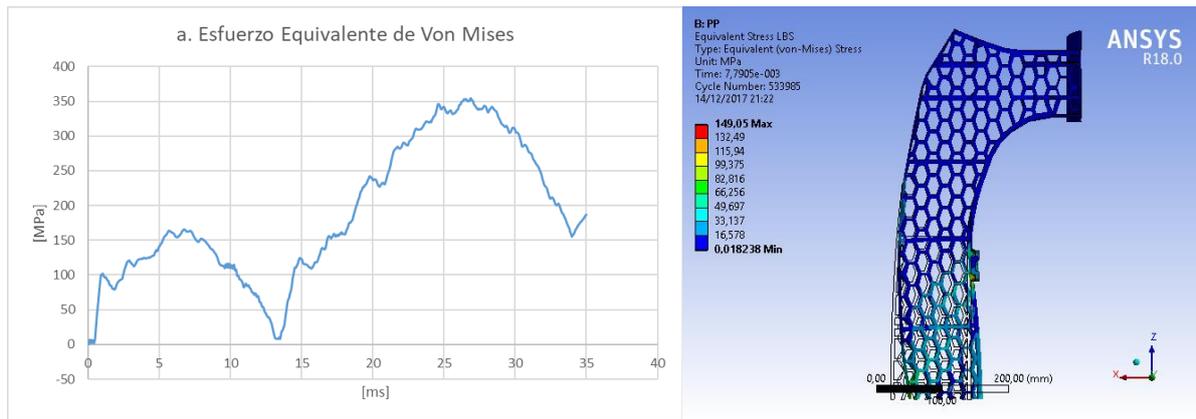


Figura 59. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises, para el LBS usando polipropileno como material base, a) Diagrama de resultados; b) Distribución gráfica de presión en el LBS

Aceleración en la zona superior de la tibia del impactador. Los resultados obtenidos para el análisis de dinámica explícita, muestran un cambio de aceleración abrupto en la zona superior de la tibia, teniendo una aceleración máxima de retroceso de 32.25 G, en la figura 60 se puede observar que su máxima aceleración la obtiene cuando han transcurrido cerca de 1.5 milisegundos tras el impacto.

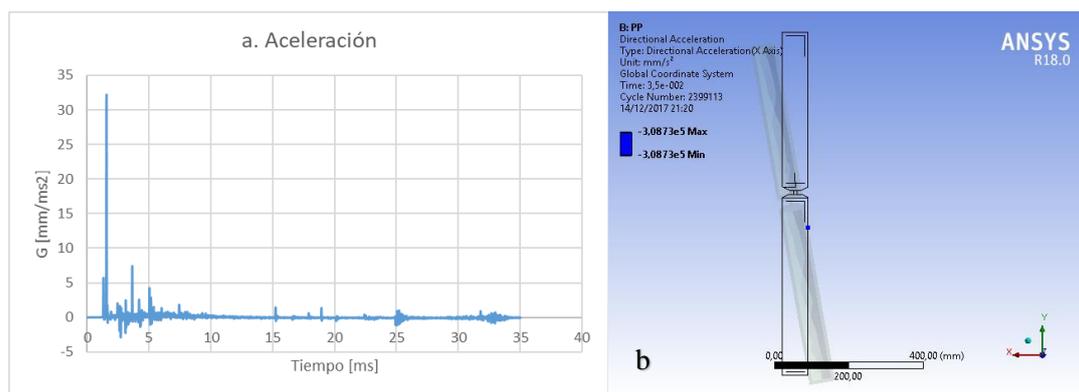


Figura 60. Resultados del acelerómetro ubicado a 60 mm del centro de la división entre fémur y tibia usando polipropileno como material base.

Deformación direccional en X del refuerzo inferior de parachoques. En la figura 61, se puede observar la deformación producida por la colisión del impactador entre los 0 y 35 ms que dura el evento seccionado en 4 partes, alcanzando su máxima deformación negativa de -27.29 mm entre los 5 y 10 ms como lo muestra la sección b, su máxima deformación positiva se produce entre los 20 y 30 ms, siendo de 20.26 mm como lo indica la sección c.

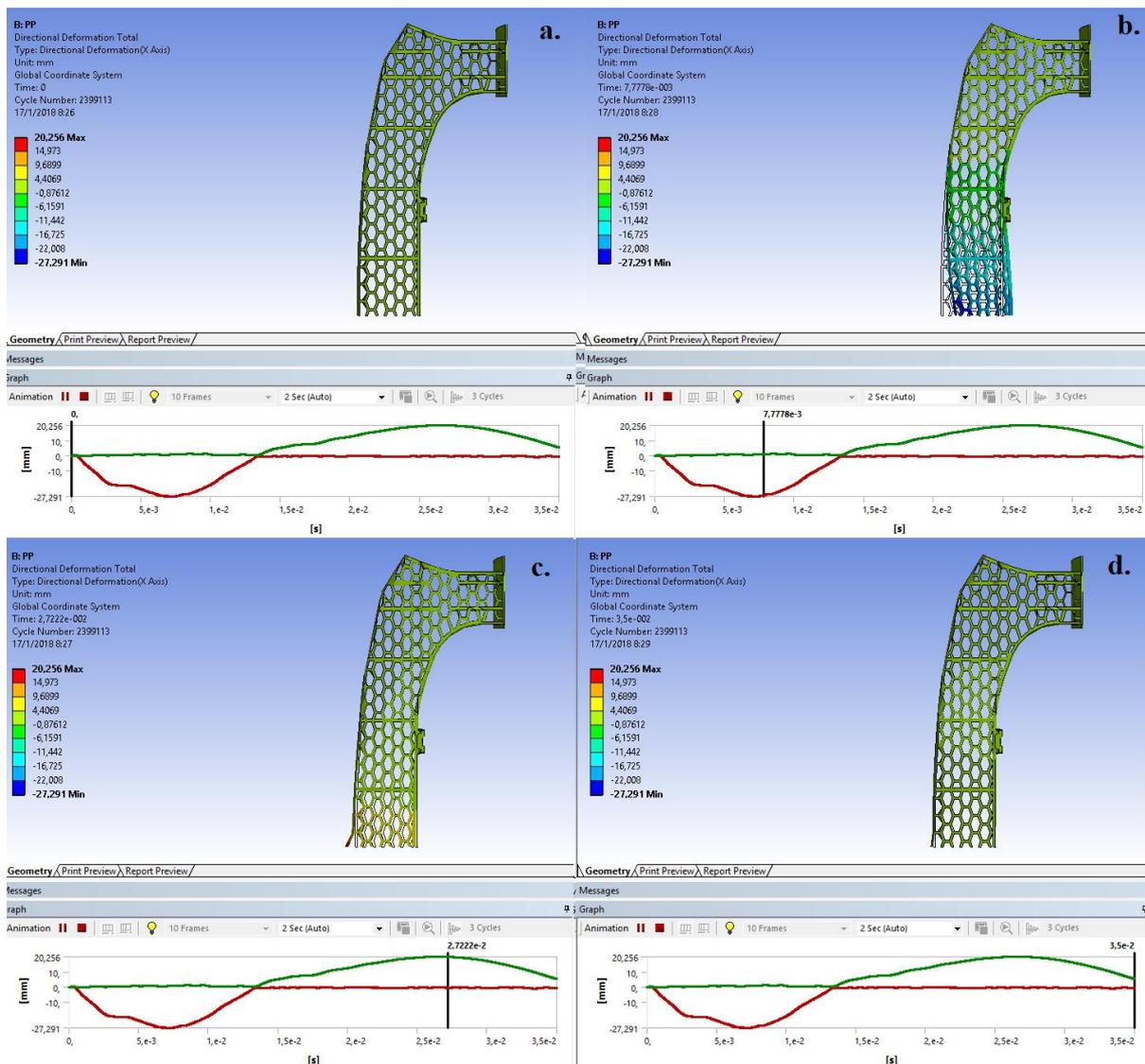


Figura 61. Resultados de la deformación total del refuerzo inferior de guardachoque usando como material base polipropileno, en diferentes zonas de tiempo.

Deformación direccional en X de 3 nodos ubicados en la zona frontal del refuerzo inferior de parachoques. La distribución de los nodos ubicados en el LBS, se pueden observar en el método de la figura 45. El color azul de la figura 62, muestra la deformación producida en el nodo 1 la cual es de -26.55 mm entre los 5 y 10 milisegundos tras el impacto y 20.26 mm entre los 25 y 30 ms, el nodo anaranjado corresponde al nodo 2, al estar más alejado del contacto directo del impacto su valor es menor de 4.40 mm a -13,57 mm, mientras que le menor desplazamiento se produce en el nodo 3 de color azul, siendo tan solo de 1,18 mm y -3.4896. Los gráficos de la simulación generada, se presentarán en los anexos.

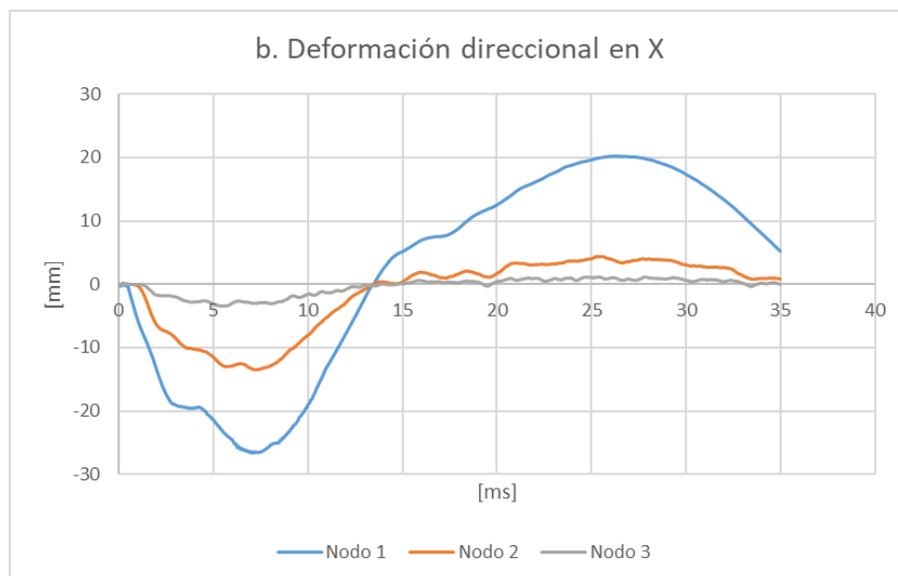


Figura 62. Resultados de deformación direccional del refuerzo inferior de guardachoques en los nodos 1, 2 y 3, usando polipropileno como material base. La posición de los nodos en el LBS, se detalla en la figura 45.

Resultados de simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita usando polietileno (PE)

Esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos. Para obtener un entendimiento apropiado del funcionamiento del sistema, realizo un análisis de esfuerzo equivalente en todos los cuerpos con el fin de obtener la trayectoria total de los elementos, en la figura 63, se aprecia el desplazamiento del sistema a simular segmentada en 4 partes a través del tiempo, se mide el esfuerzo equivalente de los elementos alcanzado su mayor valor de 49.82 MPa entre los 10 y 20 ms, como se observa en la sección d, donde se observa estas cargas pintadas en color rojo, lo cual indica una posible rotura del material.

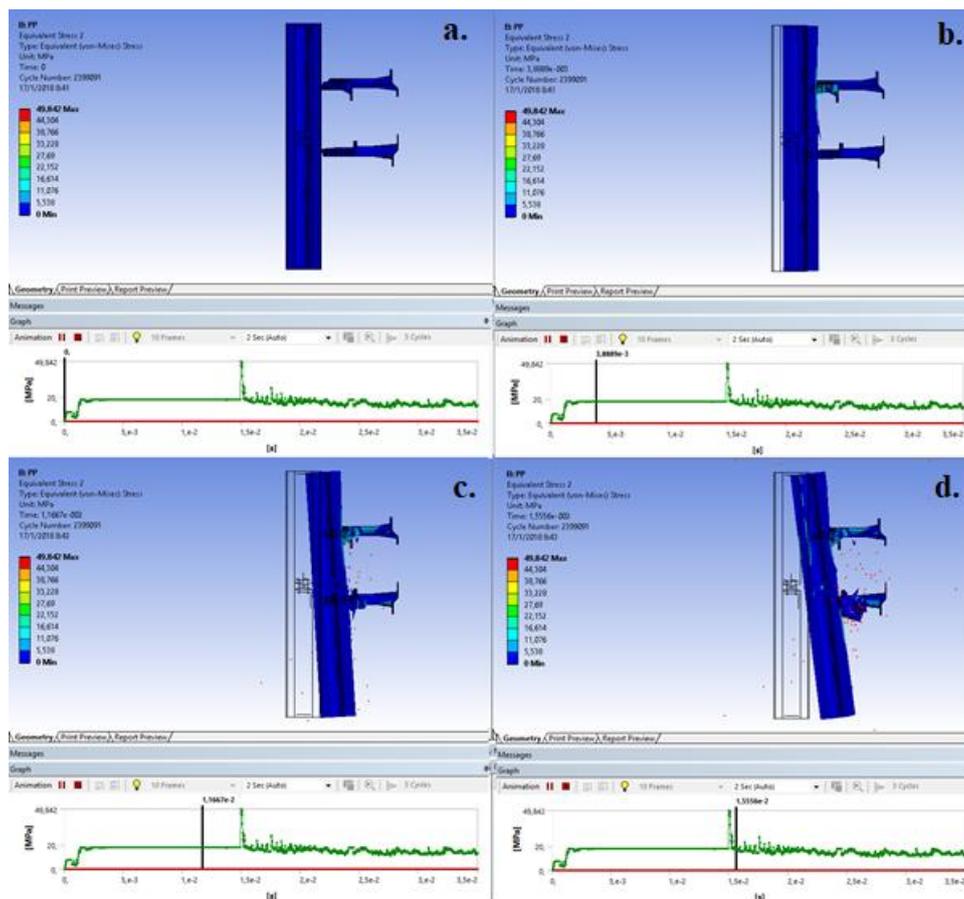


Figura 63. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos, usando como material base del refuerzo inferior de guardachoques polietileno.

Esfuerzo equivalente de Von Mises en el refuerzo inferior de parachoques. El máximo esfuerzo equivalente del refuerzo inferior de guardachoques considerando como material base al polietileno es de 7.7 MPa como lo indica la figura 64.a, a su vez se observa que las zonas de color rojo en la figura 64.b, tienen un esfuerzo máximo de 6.43 MPa.

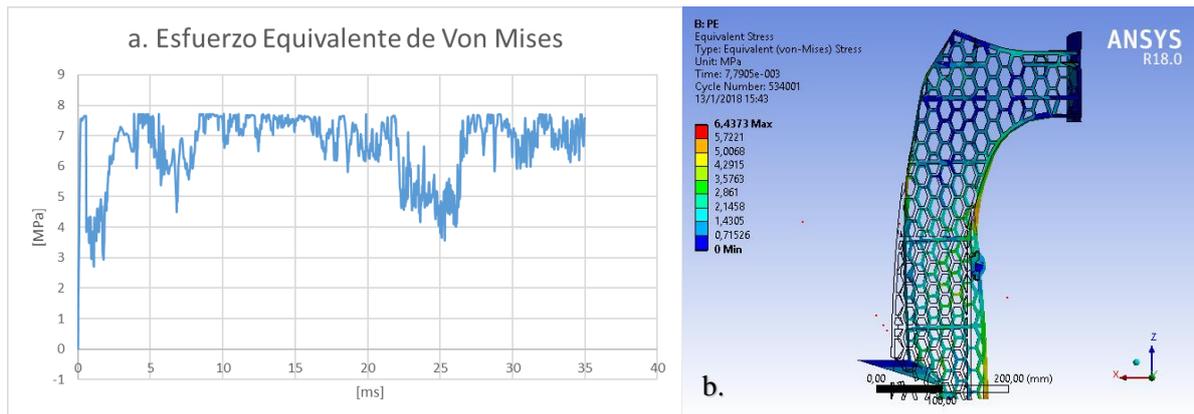


Figura 64. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises, para el LBS usando polietileno como material base, a) Diagrama de resultados; b) Distribución gráfica de presión en él LBS.

Aceleración en la zona superior de la tibia del impactador. La máxima aceleración de la zona superior de la tibia, considerando la aplicación de polietileno como material base de refuerzo inferior de guardachoques es de 23.56 G, este valor es alcanzado durante los 15 milisegundos como muestra la figura 65.a, acorde a la simulación la inclinación registrada que se muestra en la figura 65.b, se debe a la casi nula deformación del refuerzo superior de guardachoques.

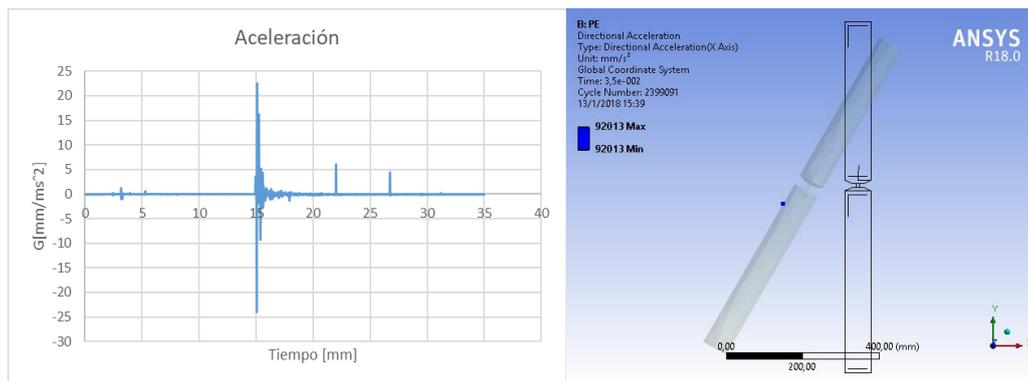


Figura 65. Resultados del acelerómetro ubicado a 60 mm del centro de la división entre fémur y tibia usando polietileno como material base.

Deformación direccional en X del refuerzo inferior de parachoques. Para facilitar el entendimiento de la reacción del LBS, se ha dividido el evento en 4 secciones a través del tiempo como muestra la figura 66, se observa que la máxima deformación producida durante el evento es de 59 247 mm, esto significa que existe una rotura del material aproximadamente a los 15 ms por tanto el software gráfico un desplazamiento que tiende al infinito, por tanto, para verificar la deformación en el refuerzo de las zonas que solo sufrieron deformación es necesario la medición de los resultados por nodos.

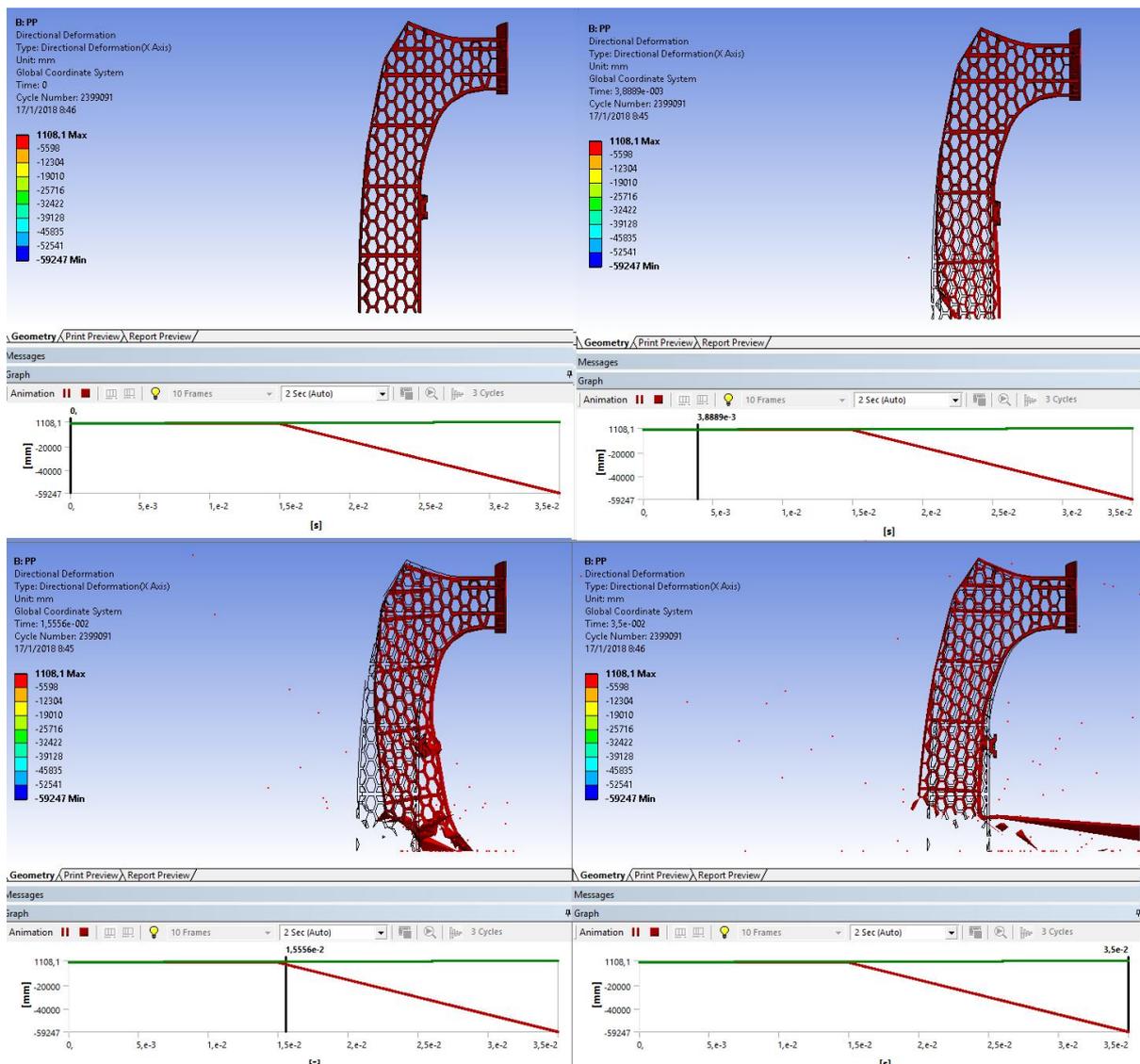


Figura 66. Resultados de la deformación total del refuerzo inferior de guardachoque usando como material base polipropileno, en diferentes zonas de tiempo.

Deformación direccional en X de 3 nodos ubicados en la zona frontal del refuerzo inferior de parachoques. La distribución de los nodos ubicados en el LBS, se pueden observar en el método de la figura 45. Para conocer el desplazamiento real del refuerzo inferior de guardachoque, se puede observar en el gráfico 67, que el nodo de color azul representa la zona de contacto directo con el impactador de piernas, se puede observar que la

deformación tiende al infinito por tanto se trata de una rotura del material, mientras que la línea anaranjada que representa el nodo 2 tiene una deformación entre 20.34 y -55.87 mm, y la línea de color plomo que representa la deformación en el nodo 3, tiene valores de 12.65 a -33.9 milímetros.

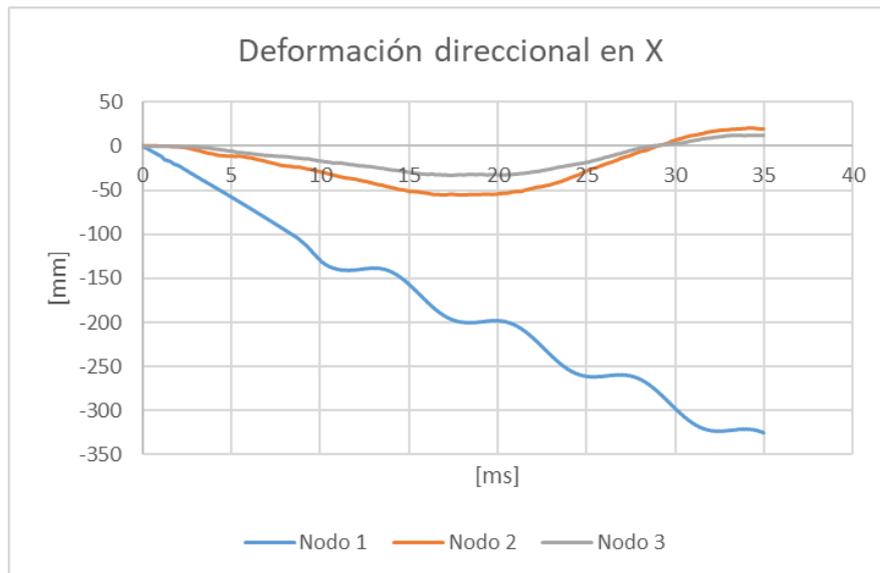


Figura 67. Resultados de deformación direccional del refuerzo inferior de guardachoques en los nodos 1, 2 y 3, usando polietileno como material base.

Resultados de simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita usando poliestireno (PS)

Esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos. La figura 68 muestra el desarrollo del impacto entre el impactador de miembros inferiores y el refuerzo superior e inferior de guardachoques dividido en 4 secciones, se aprecia que el máximo esfuerzo equivalente ocurre los 15 y 20 ms siendo de un valor de 59 MPa, pese a que existe

una separación entre los 20 y 25 ms, el esfuerzo sigue elevada entre las partes internas del impactador.

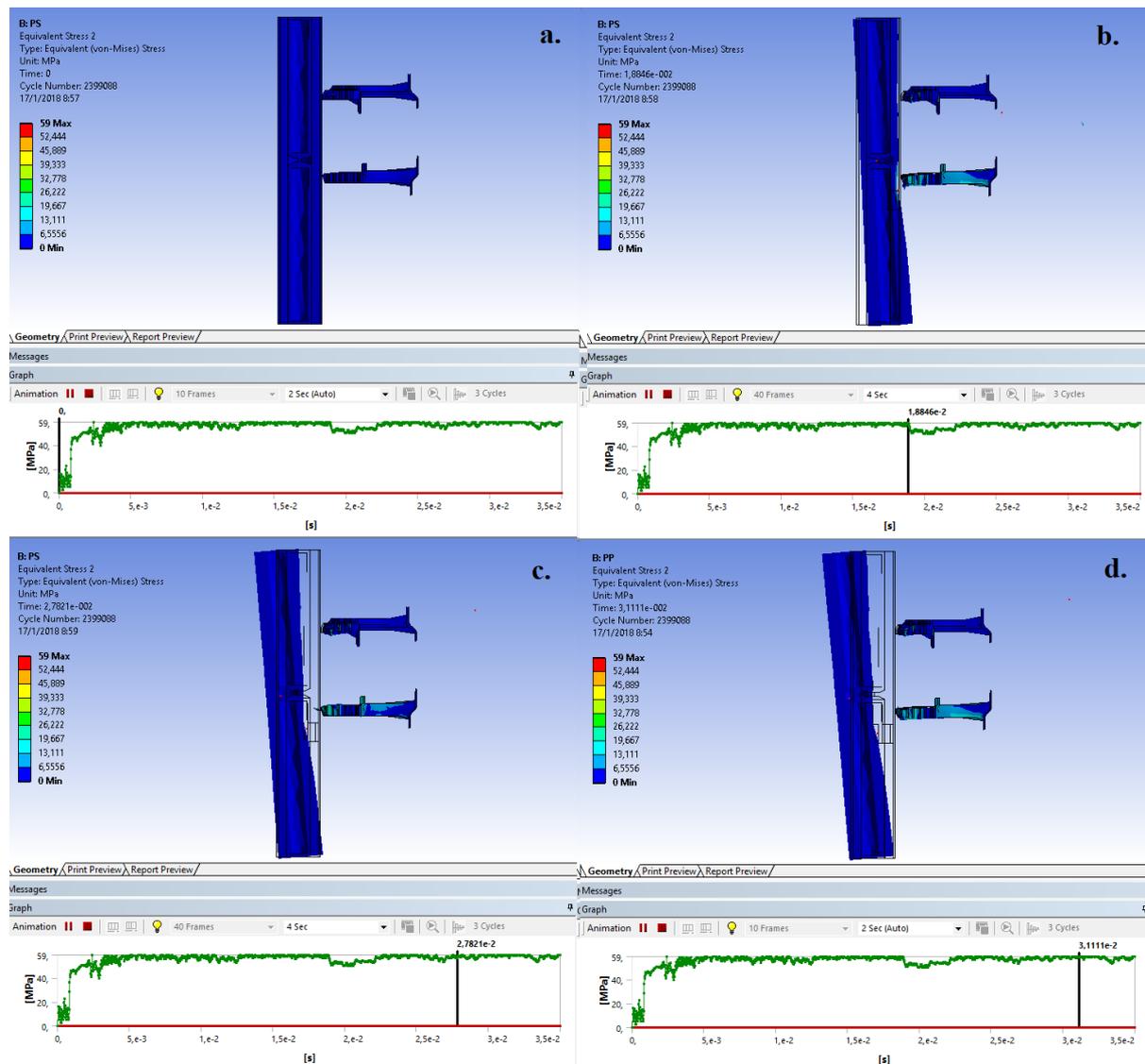


Figura 68. Resultados de esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos, usando como material base del refuerzo inferior de guardachoques, poliestireno.

Esfuerzo equivalente de Von Mises en el refuerzo inferior de parachoques. Sin embargo, tomando el esfuerzo equivalente producida únicamente en el refuerzo inferior de

guardachoque se puede apreciar que el máximo esfuerzo producida es de 59 MPa acorde a la figura 69.a, sin embargo, en la figura 69.b, se aprecia que existen puntos donde sus valores máximos alcanzan los 57.26 MPa, estos valores máximos se encuentran en la base de asentamiento a la estructura y en la zona de impacto.

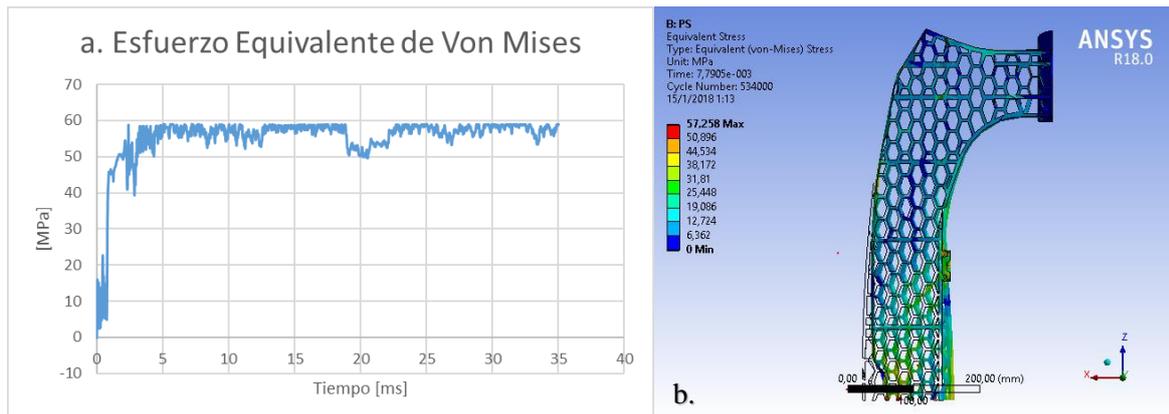


Figura 69. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises, para el LBS usando poliestireno como material base, a) Gráfico de resultados; b) Distribución gráfica de presión en el LBS.

Aceleración en la zona superior de la tibia del impactador. La figura 70, muestra que la máxima aceleración en la zona superior de la tibia se produce entre los 5 y 10 ms, siendo su valor más alto de 127 G, la aceleración oscila y vuelve a ser 0 entre los 10 y 15 milisegundos.

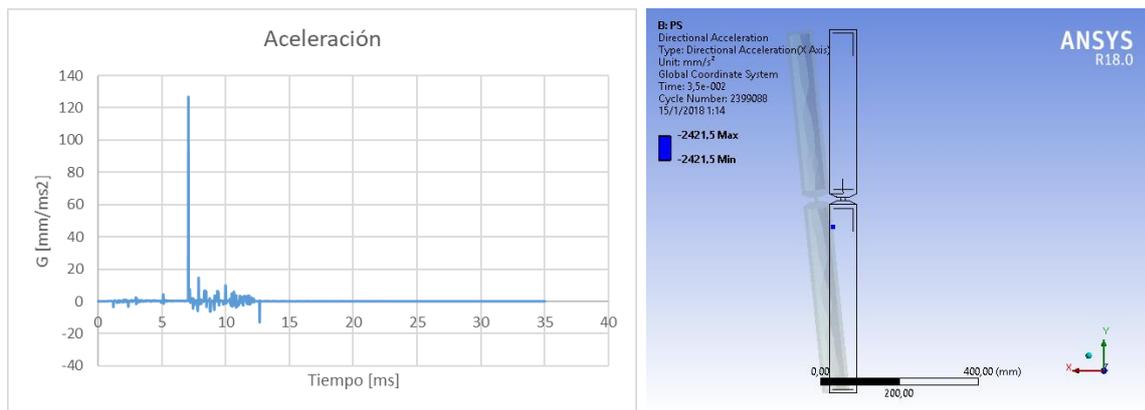


Figura 70. Resultados del acelerómetro ubicado a 60 mm del centro de la división entre fémur y tibia usando poliestireno como material base.

Deformación direccional en X del refuerzo inferior de parachoques. Se puede apreciar en la figura 71 una división del tiempo transcurrido en 4 partes para un mejor entendimiento de la deformación, de acuerdo a los gráficos de resultados de la figura 71, se observa la existencia de una deformación positiva con un valor máximo de 281.71 mm, mientras que la deformación negativa máxima es de -1 168.4 mm, la gráfica indica que en ambos casos existe una y una dispersión de las zonas fracturadas.

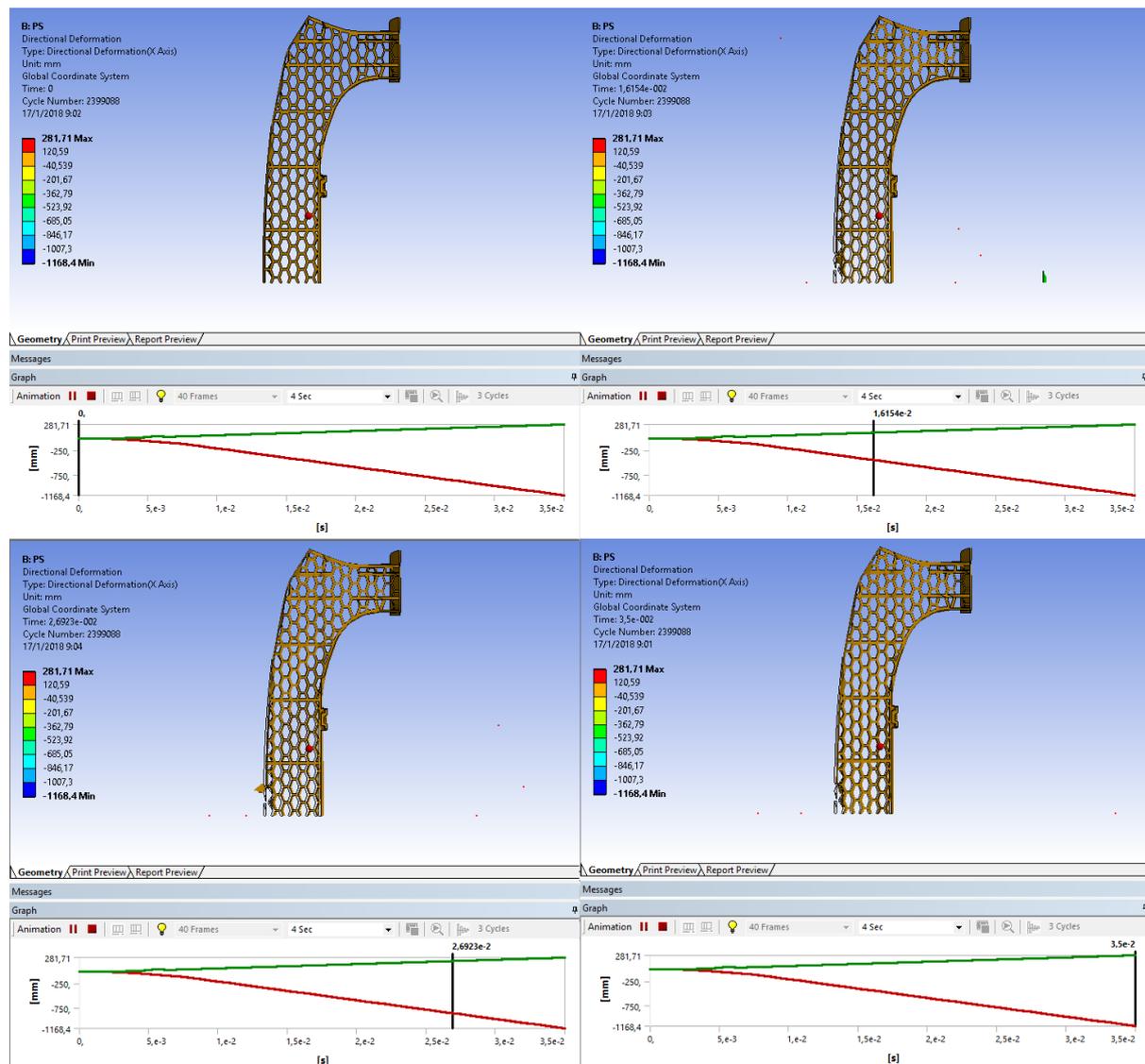


Figura 71. Resultados de la deformación total del refuerzo inferior de guardachoque usando como material base poliestireno, en diferentes zonas de tiempo.

Deformación direccional en X de 3 nodos ubicados en la zona frontal del refuerzo inferior de parachoques. La distribución de los nodos ubicados en el LBS, se pueden observar en el método de la figura 45. La figura 72, muestra la gráfica de deformación direccional, en donde se aprecia que el nodo 1 representado por la línea azul tiene una deformación que tiende al infinito con un valor máximo de -1667 mm, mientras que el valor

máximo del nodo 2 representado con la línea anaranjada tiene una máxima deformación de -13.06 mm, la línea de color plomo la cual representa el nodo 3, muestra que la máxima deformación producida es de -5.93, tanto el nodo 2 como 3, vuelven a ocupar su posición inicial tras la deformación.

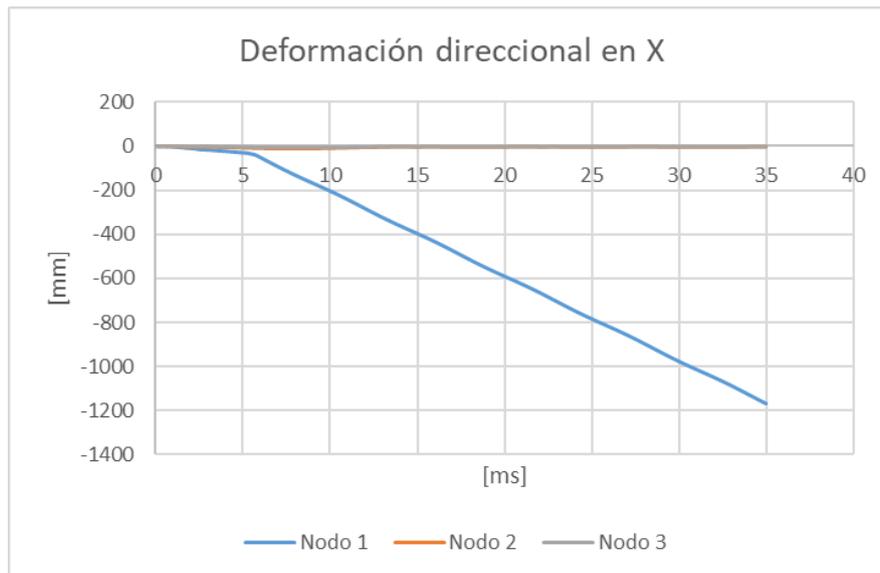


Figura 72. Resultados de deformación direccional del refuerzo inferior de guardachoques en los nodos 1, 2 y 3, usando poliestireno como material base. La posición de los nodos en el LBS, se detalla en la figura 45.

Resultados de simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita usando policarbonato (PC)

Esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos. Para obtener un entendimiento apropiado del funcionamiento del sistema, se procedió a realizar un análisis de esfuerzo equivalente en todos los cuerpos con el fin de obtener la trayectoria total de los elementos, en la figura 73, se observa el desplazamiento del impactador de miembros

inferiores dividida en 4 secciones, donde se aprecia una rotura que se incrementa a partir de los 10 ms, el esfuerzo máximo generada es de 78.20 MPa, la cual se produce entre los 10 y 15 milisegundos una vez ocurrido el impacto.

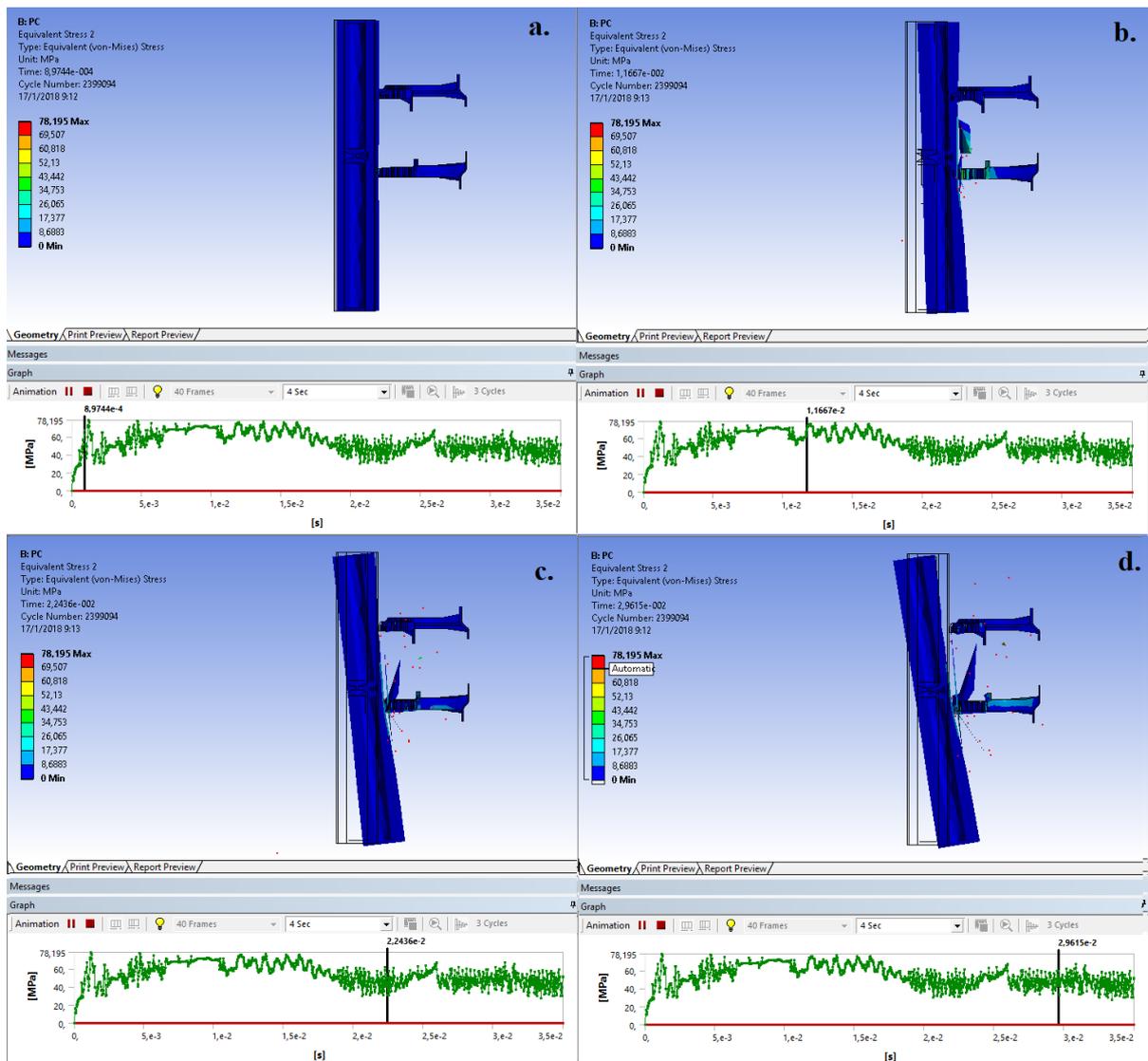


Figura 73. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos, usando como material base del refuerzo inferior de guardachoques policarbonato.

Esfuerzo equivalente de Von Mises en el refuerzo inferior de parachoques. En la figura 74, se puede observar el esfuerzo equivalente de Von Mises en el refuerzo inferior de guardachoques, donde se puede apreciar que el máximo esfuerzo ocurre en los primeros 5 ms, siendo de 78.20 MPa como lo muestra la sección a, sin embargo en la sección b, se puede observar que en la distribución de esfuerzo en la estructura, se tiene un valor máximo de 67.73 MPa, esto ocurre en la zona que está en contacto directo con el miembro inferior de parachoques.

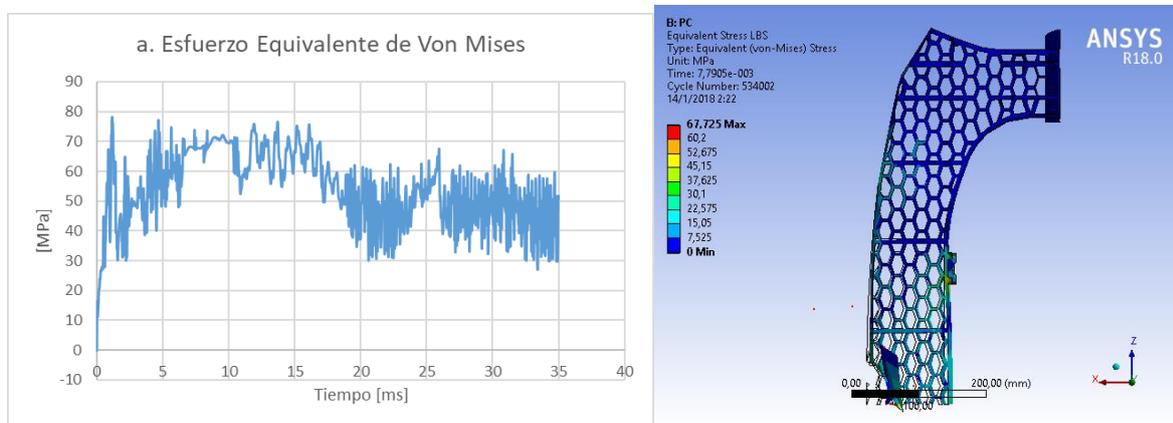


Figura 74. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises, para el LBS usando policarbonato como material base, a) Diagrama de resultados; b) Distribución gráfica de presión en él LBS.

Aceleración en la zona superior de la tibia del impactador. La aceleración máxima de la zona superior de la tibia es de -15.12 G de acuerdo a la figura 75.a, esto se produce cuando ha transcurrido casi los 35 ms, esto se debe a una rotura del material del refuerzo inferior de guardachoques.

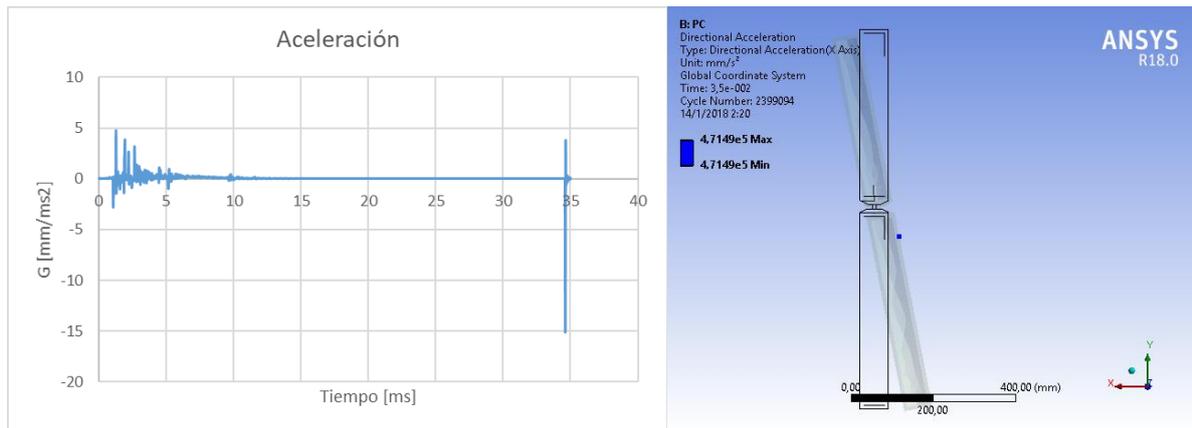


Figura 75. Resultados del acelerómetro ubicado a 60 mm del centro de la división entre fémur y tibia usando polipropileno como material base.

Deformación direccional en X del refuerzo inferior de parachoques. En la figura 76, se puede observar la deformación producida por la colisión del impactador entre los 0 y 35 ms que dura el evento seccionado en 4 partes, donde se puede apreciar que su máxima deformación positiva es de 526.36 mm, mientras que máxima deformación negativa es de -341.24 mm, las gráficas de curvas muestran un comportamiento de incremento lineal, lo cual significa que existe una rotura del refuerzo inferior de guardachoques con material base de policarbonato.

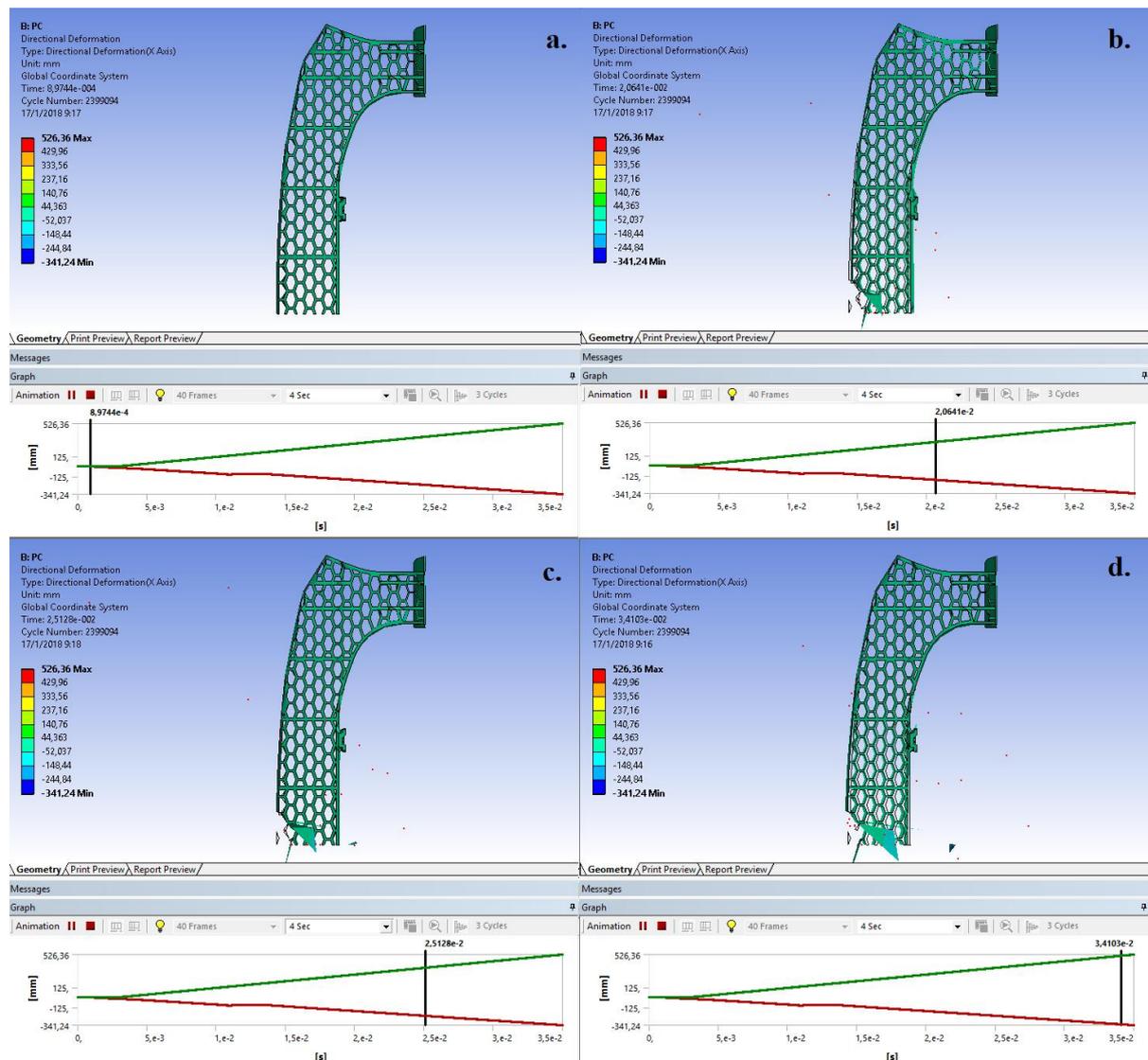


Figura 76. Resultados de la deformación total del refuerzo inferior de guardachoque usando como material base policarbonato, en diferentes zonas de tiempo.

Deformación direccional en X de 3 nodos ubicados en la zona frontal del refuerzo inferior de parachoques. La distribución de los nodos ubicados en el LBS, se pueden observar en el método de la figura 45. La figura 77, muestra que existe una deformación de incremento constante en el nodo 1, mismo que es representado con la línea color azul, alcanzado una deformación de 214.09 mm, mientras que el nodo 2, el cual se representa con

la línea color anaranjado, tiene una deformación entre 5.43 mm y -7.74 mm, sin embargo el nodo 3 representado por la línea ploma, tiene una deformación entre 2.87 mm y -3.85 mm, lo cual muestra que en esta sección casi no existe deformación.

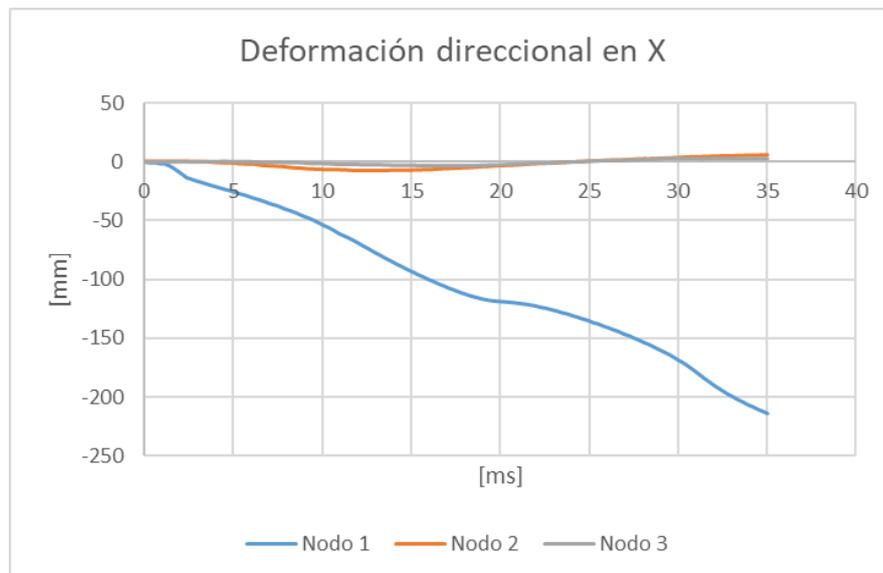


Figura 77. Resultados de deformación direccional del refuerzo inferior de guardachoques en los nodos 1, 2 y 3, usando policarbonato como material.

Resultados de simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita usando acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

Esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos. Para obtener un entendimiento apropiado del funcionamiento del sistema, se procedió a realizar un análisis de esfuerzo equivalente en todos los cuerpos con el fin de obtener la trayectoria total de los elementos, en la figura 78, se observa el desplazamiento del impactador de miembros inferiores dividida en 4 secciones que muestran su trayectoria entre 0 y 35 ms, donde se puede

apreciar la existencia del máximo esfuerzo entre los 15 y 20 ms, el valor máximo de esfuerzo es de 1 966.8 MPa, la figura 78, muestra la secuencia de avance del impacto, el máximo esfuerzo se ubica en los fragmentos de color rojo.

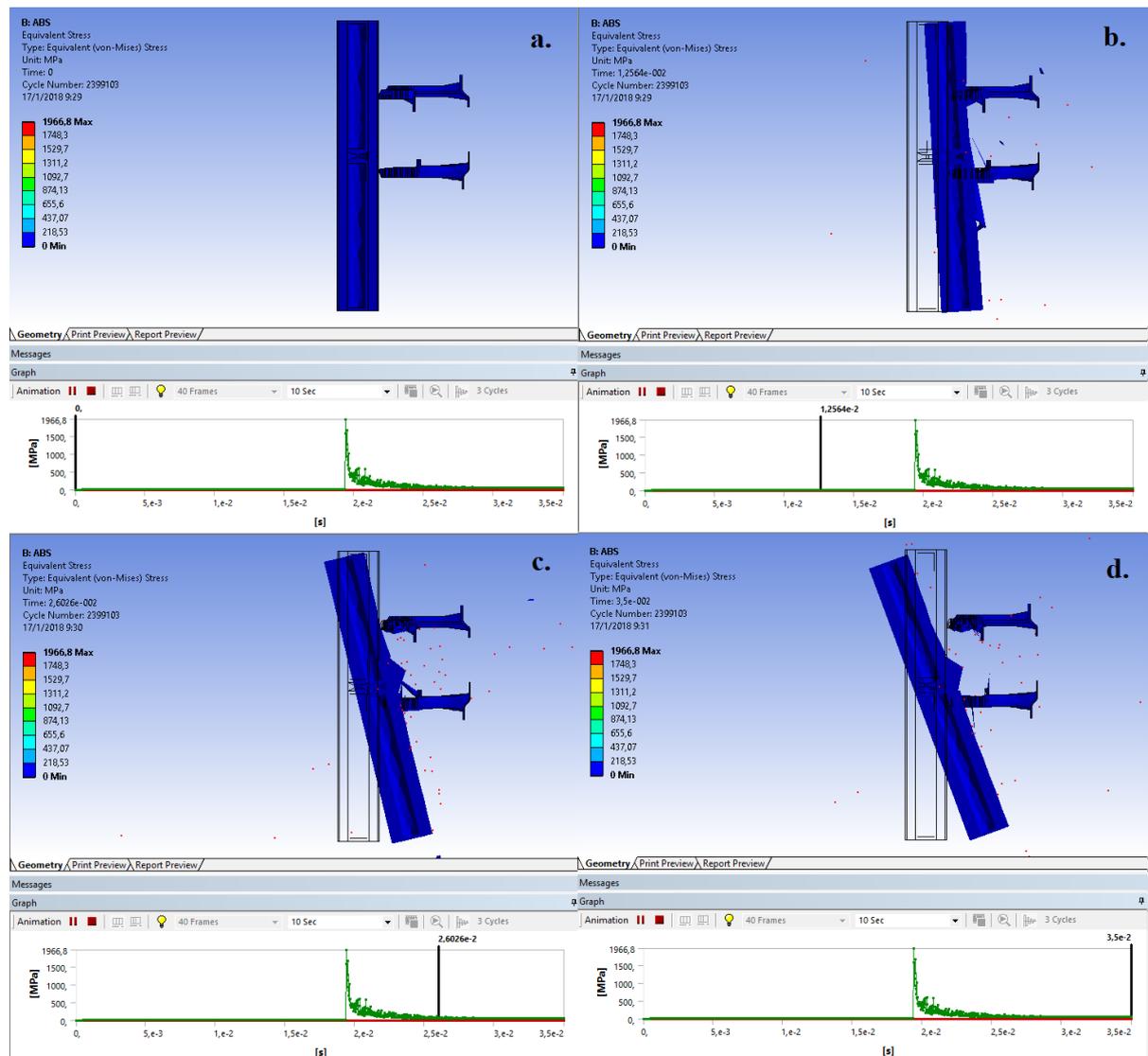


Figura 78. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos, usando como material base del refuerzo inferior de guardachoques ABS.

Esfuerzo equivalente de Von Mises en el refuerzo inferior de parachoques. En la figura 79, se puede observar el máximo esfuerzo equivalente en el refuerzo inferior de parachoques, el máximo valor se produce entre 0 y 15 ms, este valor es de 30 MPa acorde a la sección a, sin embargo, si se observa la distribución de esfuerzo en el refuerzo inferior de guardachoques, se observa que el máximo esfuerzo es de 27.12 MPa, siendo las partículas desplazadas por la rotura de color rojo las que ocupan este valor.

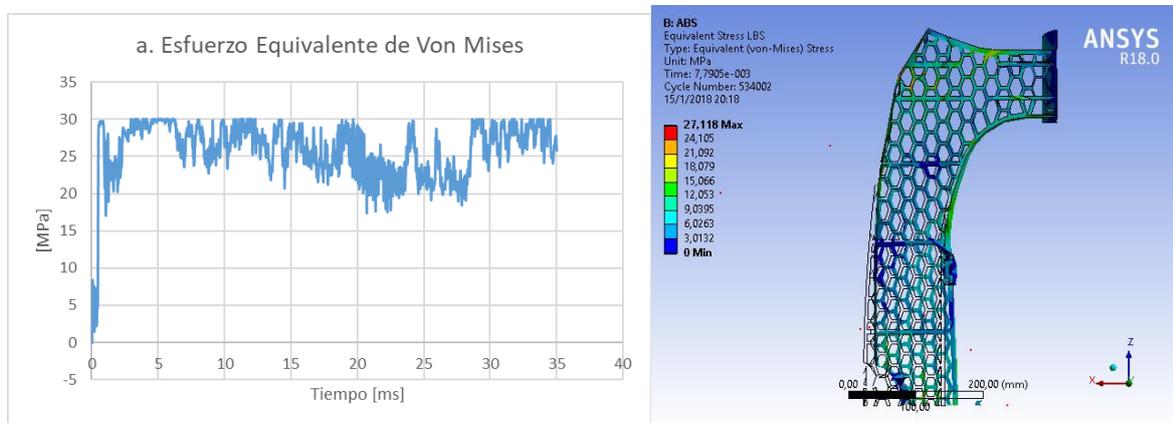


Figura 79. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises, para el LBS usando ABS como material base, a) Diagrama de resultados; b) Distribución gráfica de presión en el LBS

Aceleración en la zona superior de la tibia del impactador. Los resultados obtenidos para el análisis de dinámica explícita, muestran un cambio de aceleración entre los 15 y 20 ms el cual corresponde a la máxima aceleración de -5 436.12 G, una vez que ocurre este pico de aceleración, esta vuelve a ser cero como se observa en la figura 80.

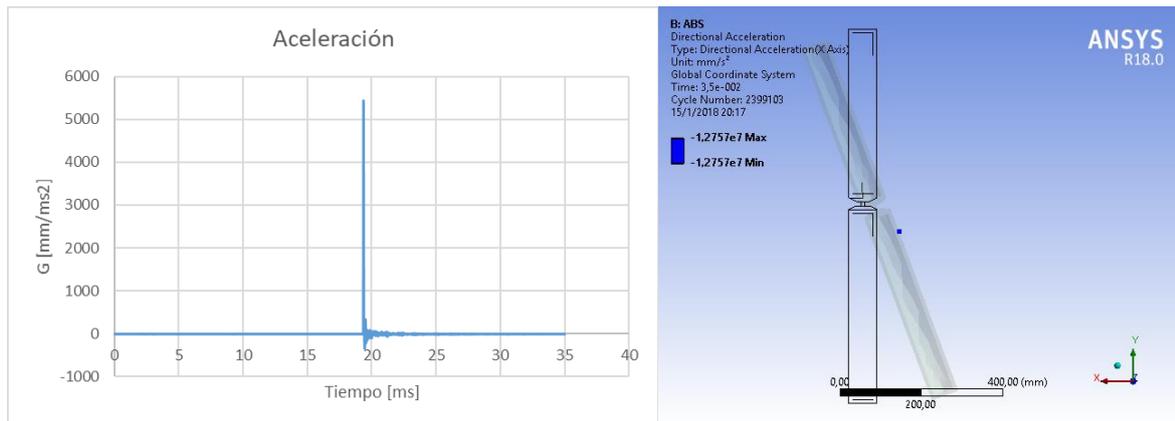


Figura 80. Resultados del acelerómetro ubicado a 60 mm del centro de la división entre fémur y tibia usando ABS como material base.

Deformación direccional en X del refuerzo inferior de parachoques. En la figura 81, se puede observar la deformación producida por la colisión del impactador entre los 0 y 35 ms que dura el evento seccionado en 4 partes, se puede observar una deformación producida por la colisión del impactador entre los 15 y 25 ms, teniendo una deformación máxima de 2410.6 mm y una mínima de -37387 mm, estos valores muestra que existe una rotura en uno de los segmentos del refuerzo inferior de guardachoque.

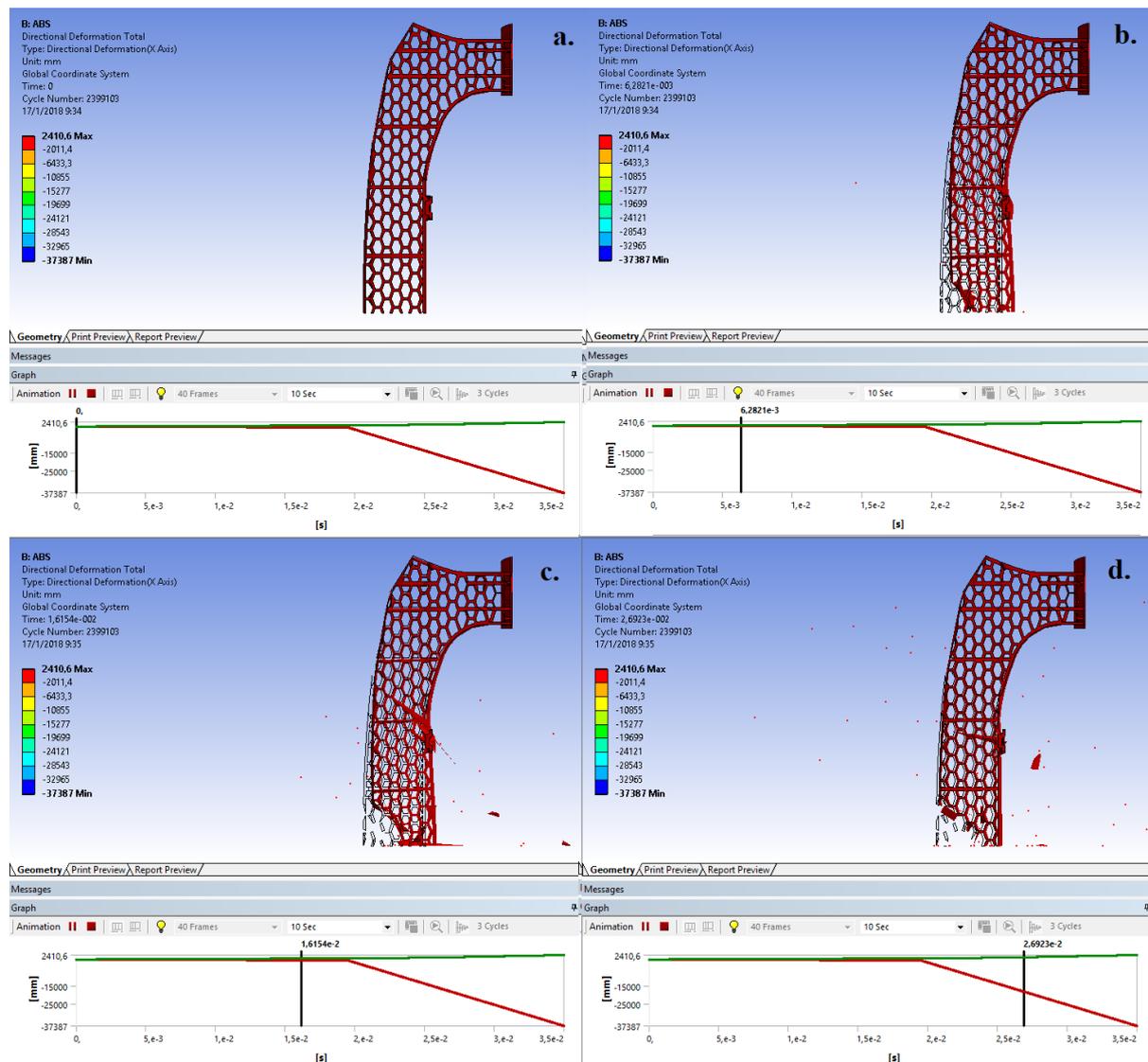


Figura 81. Resultados de la deformación total del refuerzo inferior de guardachoque usando como material base ABS, en diferentes zonas de tiempo.

Deformación direccional en X de 3 nodos ubicados en la zona frontal del refuerzo inferior de parachoques. La distribución de los nodos ubicados en el LBS, se pueden observar en el método de la figura 45. En la figura 82 se puede apreciar la deformación del refuerzo inferior de guardachoques en diferentes nodos ubicados en la zona frontal del refuerzo, se puede apreciar en el nodo 1 representado por la línea azul que existe una

deformación constante que alcanza los -888.25 mm, la línea anaranjada que representa al nodo 2, muestra una deformación máxima de -19.68 mm, mientras que la línea ploma que representa al nodo 3, muestra una deformación de -11.41 mm, una vez que llegan a sus máxima deformaciones vuelven a su estado normal.

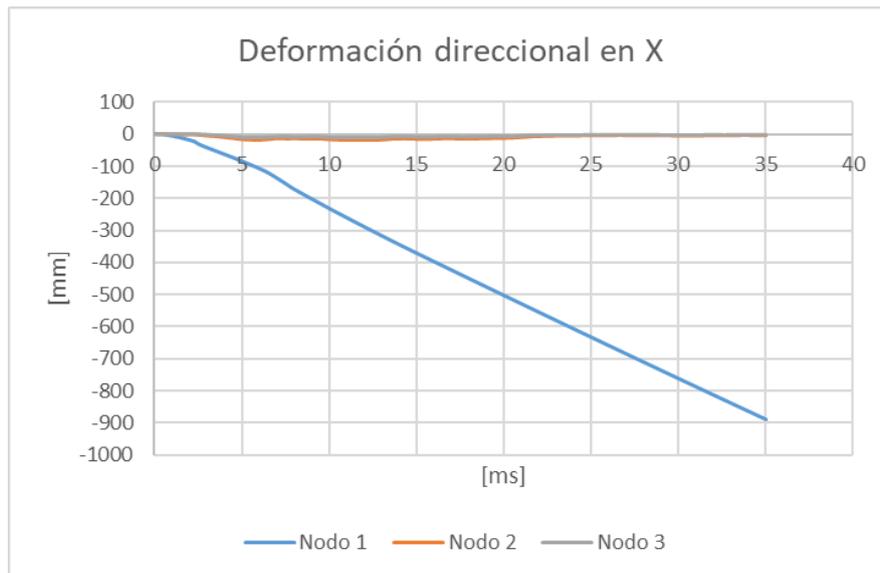


Figura 82. Resultados de deformación direccional del refuerzo inferior de guardachoques en los nodos 1, 2 y 3, usando polipropileno como material. La posición de los nodos en el LBS, se detalla en la figura 45.

Resultados de simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita usando poliácido láctico (PLA)

Esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos. La figura 83, muestra los resultados del esfuerzo equivalente de todos los cuerpos implicados en la simulación de colisión entre un impactador de miembros inferiores y los refuerzos superior e inferior de guardachoques dividiendo en 4 partes el desarrollo del evento, se observa que

existe un valor máximo de 70 MPa, el mismo que se distribuye durante la duración de los 35 ms después del impacto.

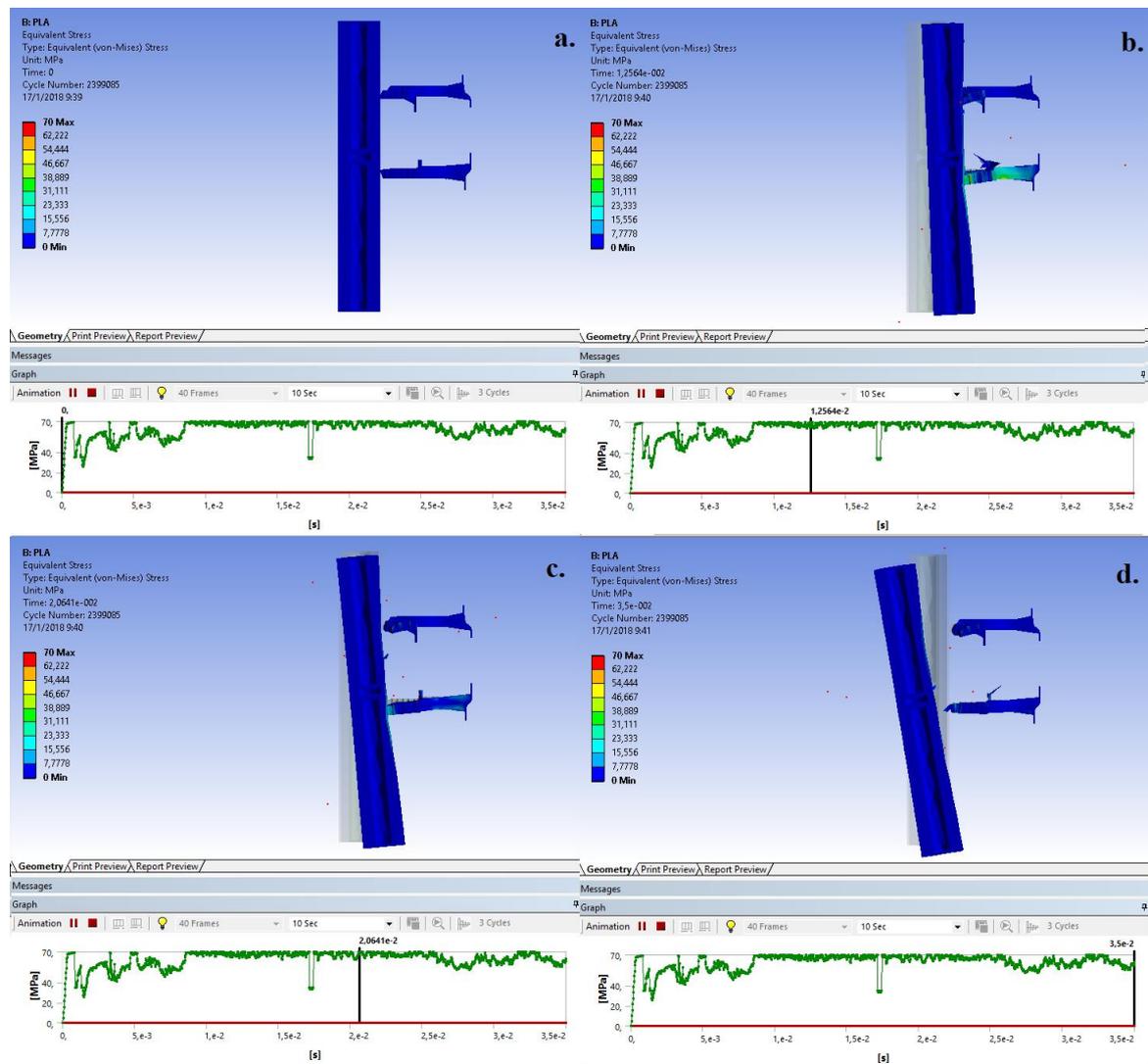


Figura 83. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos, usando como material base del refuerzo inferior de guardachoques PLA.

Esfuerzo equivalente de Von Mises en el refuerzo inferior de parachoques. El máximo esfuerzo equivalente para el refuerzo inferior de parachoques usando como material base al PLA, ocurre durante los 5 y 30 milisegundos siendo su valor máximo 70 MPa como

lo muestra la figura 84.a, sin embargo, la figura 84.b, muestra que existe un esfuerzo máximo de 53.56 MPa que alcanza las partículas de color rojo, mismas que representan un desprendimiento del material.

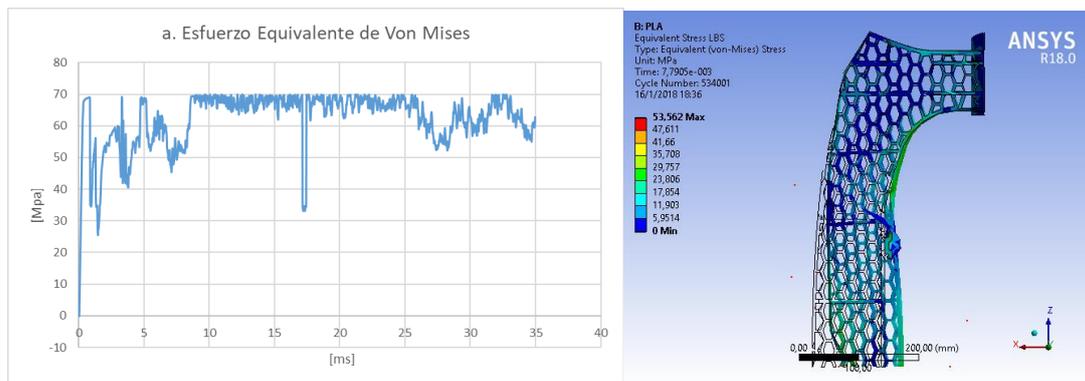


Figura 84. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises, para el LBS usando PLA como material base, a) Diagrama de resultados; b) Distribución gráfica de presión en él LBS

Aceleración en la zona superior de la tibia del impactador. Los resultados obtenidos para la aceleración de la zona superior de la tibia, muestra que la máxima aceleración sucede en los primeros 5 milisegundos una vez ocurrido el impacto, el valor máximo es de -3.79 G, como lo muestra la figura 85.a.

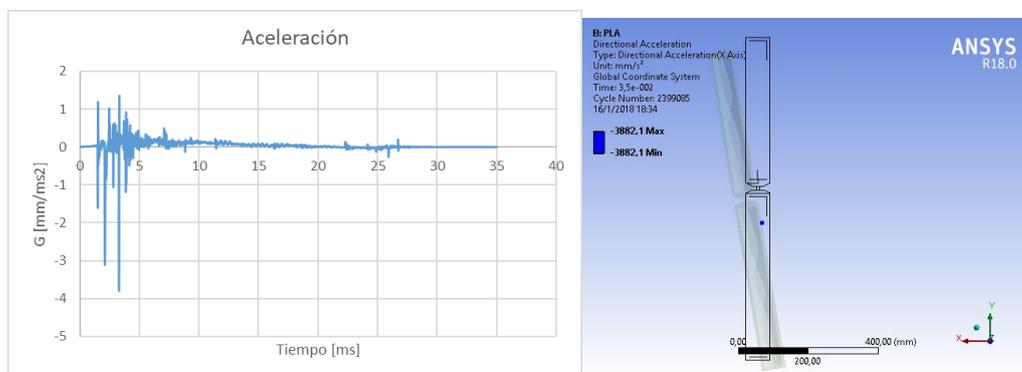


Figura 85. Resultados del acelerómetro ubicado a 60 mm del centro de la división entre fémur y tibia usando PLA como material base.

Deformación direccional en X del refuerzo inferior de parachoques. En la figura 86, se puede observar la deformación producida por la colisión del impactador entre los 0 y 35 ms que dura el evento seccionado en 4 partes, deformación alcanzada es de 2 261.1 mm y -2 185.6 mm, a partir de los 5 ms, se muestra una deformación en ambas direcciones, lo que se puede deducir como el desprendimiento de material del refuerzo.

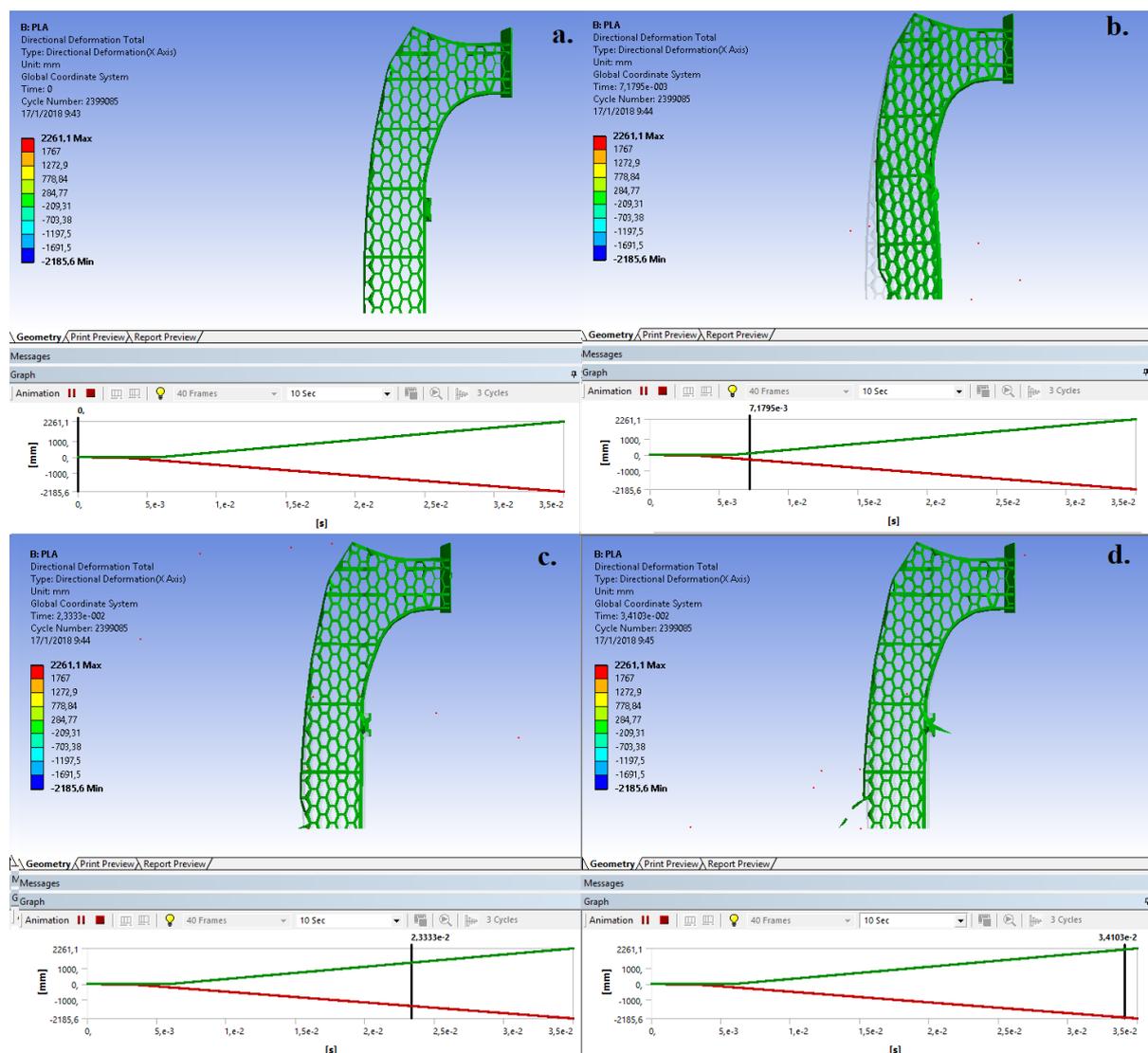


Figura 86. Resultados de la deformación total del refuerzo inferior de guardachoque usando como material base PLA, en diferentes zonas de tiempo.

Deformación direccional en X de 3 nodos ubicados en la zona frontal del refuerzo inferior de parachoques. La distribución de los nodos ubicados en el LBS, se pueden observar en el método de la figura 45. La figura 87, representa la deformación direccional en X de 3 nodos colocados en la zona frontal del refuerzo inferior de parachoques, el nodo 1 representado por el color azul muestra una deformación entre 58.22 mm y -44.76 mm, sin embargo aparentemente no muestra rotura, mientras que el nodo 3 de color anaranjado, muestra una deformación entre 10.50 y -28.68 mm, finalmente el nodo 3, representado con el color plomo, muestra una deformación entre 6 y -17.83 mm, se puede observar que las deformaciones oscilan antes de llegar a 0.

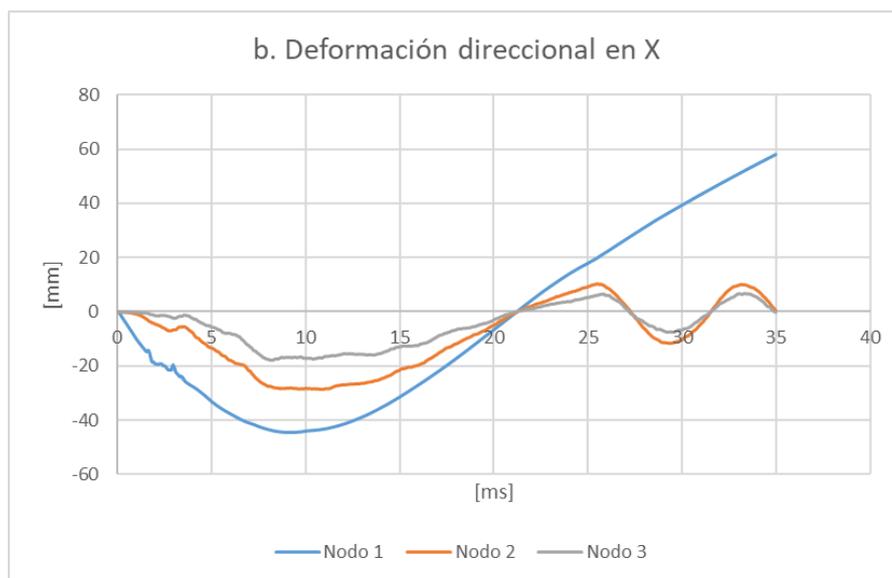


Figura 87. Resultados de deformación direccional del refuerzo inferior de guardachoques en los nodos 1, 2 y 3, usando PLA como material base.

Resultados de simulación de la colisión entre el impactador y los refuerzos de guardachoque con análisis de dinámica explícita usando PC/ABS reforzado con 10% de fibra de vidrio

Esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos. La figura 88, muestra el desarrollo del impacto entre el impactador de miembros inferiores y el refuerzo superior e inferior de guardachoques dividiendo el evento en 4 partes, donde se aprecia que el máximo esfuerzo equivalente superior e inferior ocurre entre los 5 y 20 ms, obteniendo un valor de 79 MPa.

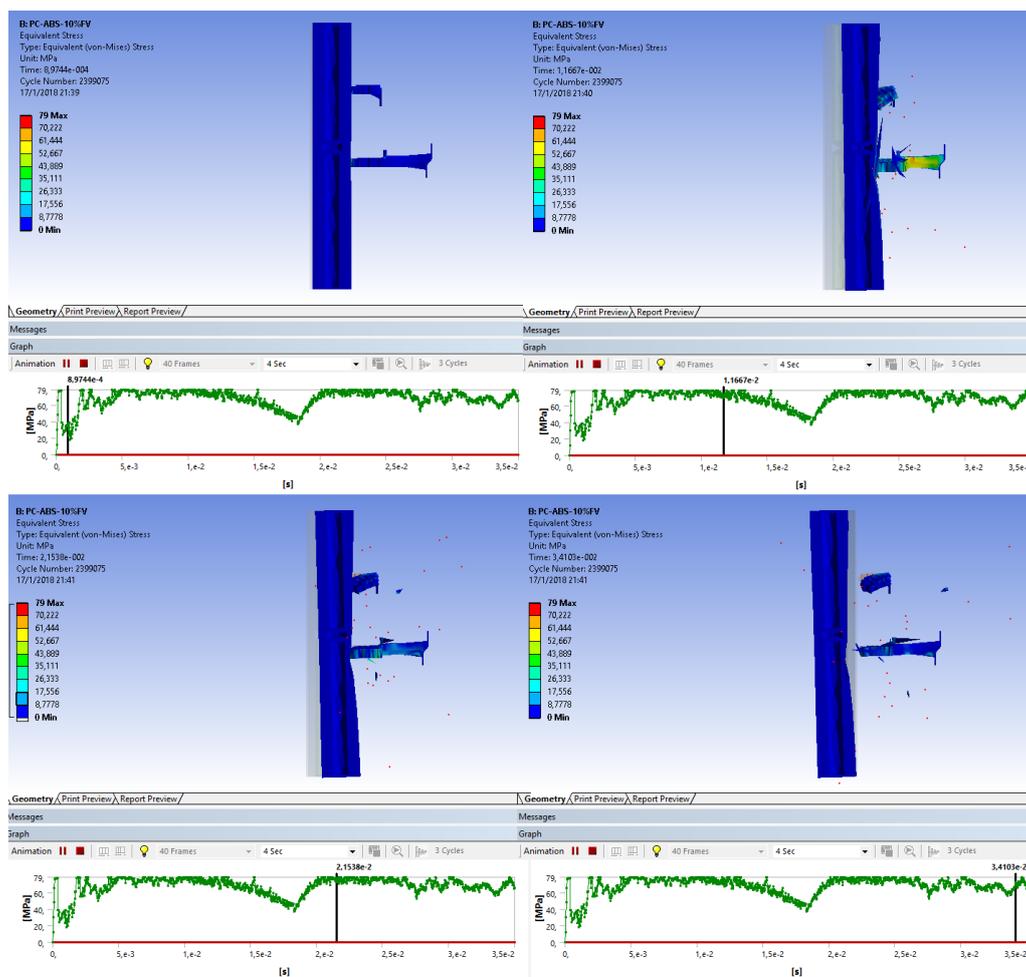


Figura 88. Resultados de esfuerzo equivalente de Von Mises aplicado a todos los cuerpos, usando como material base del refuerzo inferior de guardachoques, PC/ABS reforzado con 10 % de fibra de vidrio.

Esfuerzo equivalente de Von Mises en el refuerzo inferior de parachoques. El esfuerzo equivalente del refuerzo inferior de parachoques, muestra un esfuerzo máximo producida de 79 MPa, como lo indica la figura 89.a, sin embargo, en la figura 89.b, se puede apreciar un máximo esfuerzo que alcanza 75.75 MPa, estos valores máximos se encuentra en las partículas pintadas de color rojo.

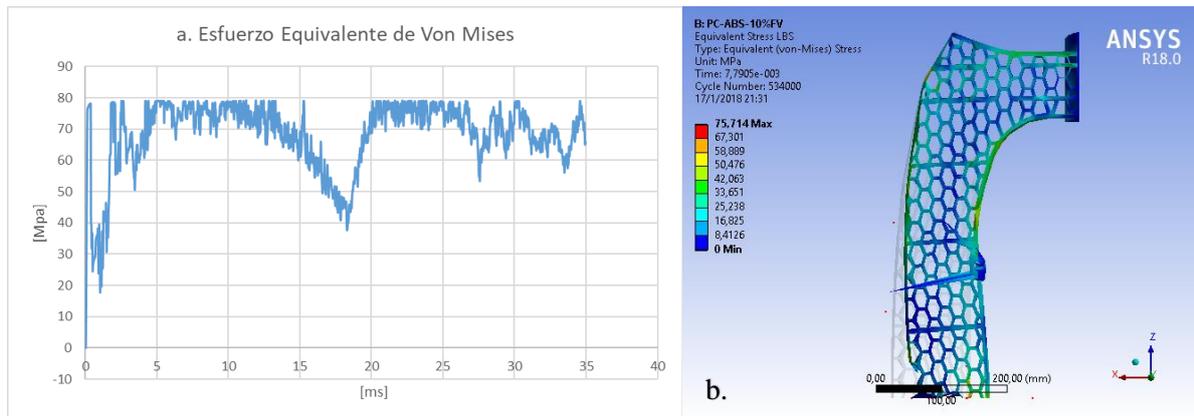


Figura 89. Resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises, para el LBS usando PC/ABS reforzado con 10 % de fibra de vidrio como material base, a) Gráfico de resultados; b) Distribución gráfica de presión en él LBS.

Aceleración en la zona superior de la tibia del impactador. La figura 90, muestra que la máxima aceleración en la zona superior de la tibia se produce entre los 5 y 10 ms, siendo su valor más alto de 57,57 G, la aceleración oscila un poco más entre los 15 y 25 ms hasta regresar a cero.

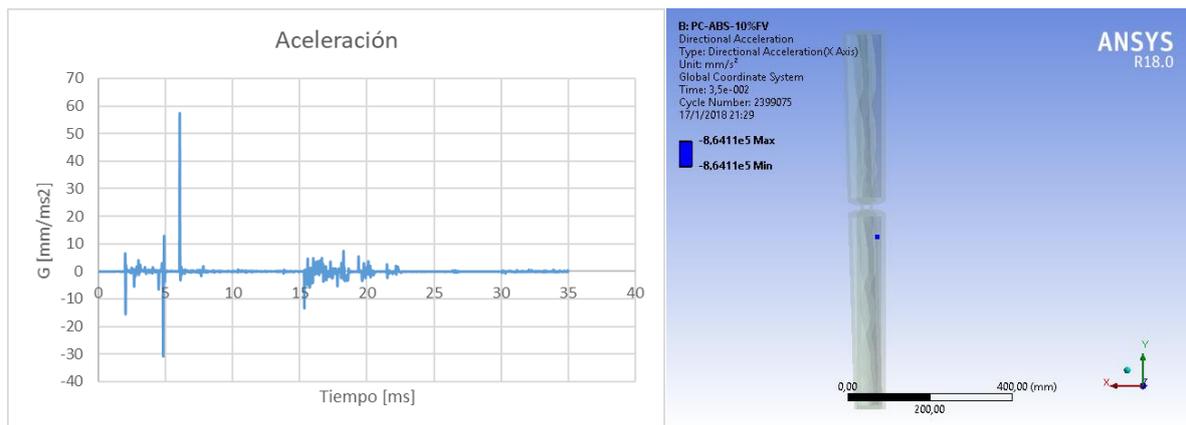


Figura 90. Resultados del acelerómetro ubicado a 60 mm del centro de la división entre fémur y tibia usando PC/ABS reforzado con 10 % de fibra de vidrio como material base.

Deformación direccional en X del refuerzo inferior de parachoques. En la figura 91, se puede observar la deformación producida por la colisión del impactador entre los 0 y 35 ms que dura el evento seccionado en 4 partes, se logra apreciar la existencia de una deformación positiva con un valor máximo de 1 352.3 mm, mientras que la deformación negativa es de 2 717.1 mm, las gráficas muestran partes del refuerzo inferior en su zona central rotas, de color rojo se observa las partículas con mayor valore.

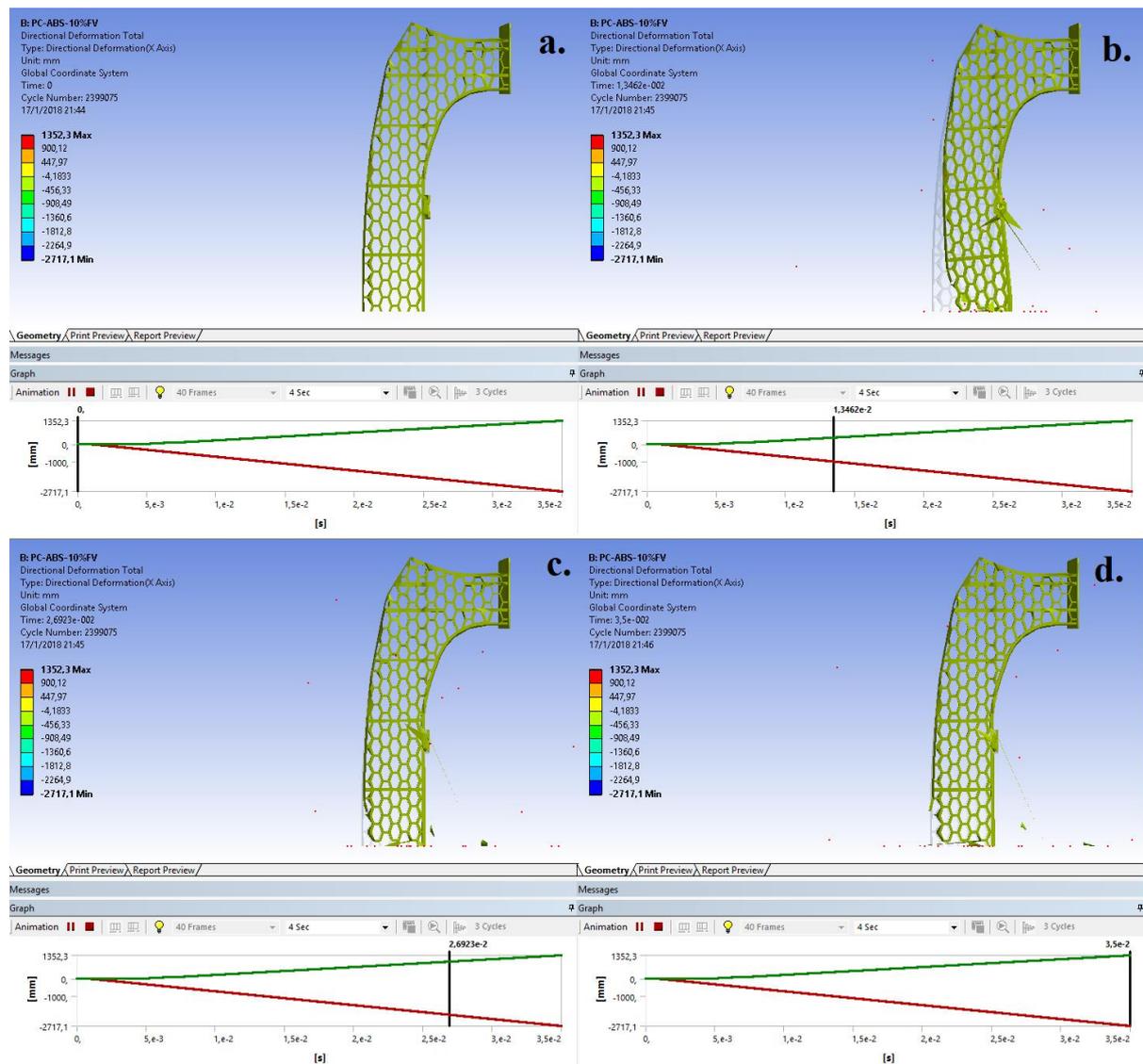


Figura 91. Resultados de la deformación total del refuerzo inferior de guardachoque usando como material base PC/ABS reforzado con 10 % de fibra de vidrio, en diferentes zonas de tiempo.

Deformación direccional en X de 3 nodos ubicados en la zona frontal del refuerzo inferior de parachoques. La distribución de los nodos ubicados en el LBS, se pueden observar en el método de la figura 45. La figura 92, muestra la gráfica de deformación direccional, en donde se muestra que el nodo 1, representado por la línea azul, tiene una deformación que aumenta gradualmente pasa el tiempo con un valor máximo de -320.87 mm,

el nodo 2 representado con la línea anaranjada, tiene un máxima deformación de 29.61 mm, mientras que la línea de color plomo, la cual representa el nodo 3, muestra que la máxima deformación producidas es de -16.82 mm, el nodo 3 al igual que el nodo 2, vuelven a ocupar su posición tras la deformación.

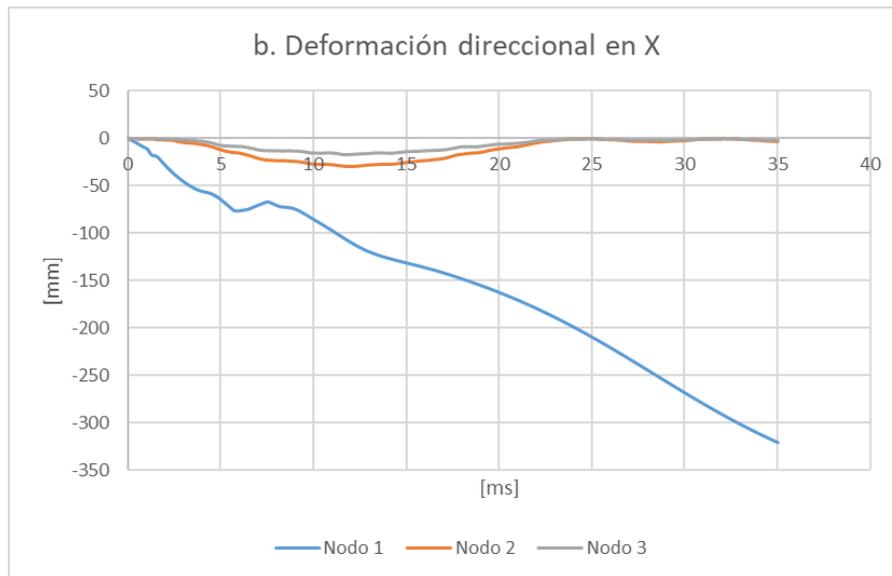


Figura 92. Resultados de deformación direccional del refuerzo inferior de guardachoques en los nodos 1, 2 y 3, usando PC/ABS reforzado con 10 % de fibra de vidrio como material base. La posición de los nodos en el LBS, se detalla en la figura 45.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Discusión de resultados

El presente estudio, con la recolección de datos presentada permite mostrar el funcionamiento del sistema en base a un análisis teórico, para proceder al modelado de los elementos y someter a pruebas computacionales para así verificar la posibilidad de aplicar la hipótesis planteada.

Criterio de validación: Ensayo físico vs Simulación computacional entre un proyectil de acero 4340 y una lámina de acero 304.

El primer paso antes proceder al análisis de los resultados obtenidos del refuerzo inferior de parachoques, es demostrar la precisión del software Ansys para la aplicación de un modelo dinámico cuyo sistema funciona de manera similar al del lanzamiento de un proyectil contra un elemento estático, para este fin, se tomó el estudio de Karthikeyan, et al. (2013) referente a una prueba balística, cuyo objetivo fue demostrar experimentalmente la fortaleza de distintos materiales con un proyectil lanzado a velocidades variables, la figura 88, muestra la comparación entre los resultados experimentales y los resultados obtenidos en un acero SS 304, donde se demuestra que la variación entre lo resultados experimentales y la simulación computacional, tienen una diferencia entre el 3 y 8 %, por tanto, si bien el análisis computacional no permite predecir con precisión la posición final del proyectil una vez que atravesó la placa, permitió conocer la deformación lineal que se produciría en la placa con un alto grado de aproximación.

Tabla 23.

Comparación de resultados del lanzamiento de proyectil y placa de acero.

Proyectil y placa de acero			
v[m/s]	Ensayo físico	Simulación	Diferencia [%]
54	6,19905	6,0025	3%
77	8,0556	8,39	4%
148	13,6905	14,8048	8%
165	14,9603	16,229	8%
207	18,1349	19,618	8%
Promedio total			-5%

Nota: La diferencia de resultados entre los ensayos experimentales y la simulación computacional no superan el 15 % de diferencia. Los datos del ensayo físico fueron obtenidos por el estudio realizado por Karthikeyan et. al. (2013)

Tiempo de propagación de onda para la generación de la malla computacional para eventos dinámicos.

Uno de los parámetros que permitió un acercamiento importante entre los resultados experimentales y la simulación computacional, fue el cálculo de tiempo crítico para la propagación de la onda puesto que, Ansys utiliza un análisis FEM con el método de Lagrange para obtención de los resultados. Chapra & Canale, (2011), aseguran que en la resolución de un método FEM, es importante conocer el criterio base para elegir el paso de tiempo, para resolución de problemas de dinámica explícita, el software Ansys recomienda analizar el paso crítico, el cual se modula en base a la generación de la malla computacional y la introducción de datos para resolución del problema entonces, para la resolución del análisis se procedió a calcular la longitud mínima permisible y el paso de tiempo crítico , los cuales se introdujeron al software y se estableció una malla que no supere los valores establecidos para la simulación del impacto del proyectil y una placa de acero, como resultado se obtuvo un margen de error entre el 8 y 3 % realizando una comparación entre ensayos físicos y la solución computacional generada, por lo que se prueba la importancia del paso mínimo en la

precisión de la simulación, es así que se permite tener como parámetro estándar de precisión para las posteriores simulaciones un paso de tiempo crítico cercano a los calculados por cada material.

Simulación estructural: deformación refuerzo inferior de parachoques (LBS)

aplicando una carga de 20 kN

Con relación al análisis de deformación estructural no se tiene un criterio claro sobre los límites de la deformación del refuerzo inferior de parachoques, sin embargo, es un parámetro importante para la selección del material, puesto que para la homologación de un vehículo es necesario disminuir el daño que recibirá en una colisión frontal, lo cual sube su categorización si es un daño mínimo, por tanto, se asume que los fabricantes del refuerzo inferior de guardachoques, diseñaron este elemento en el vehículo Sportage R, con el fin de cumplir tanto con la disminución de daños en una colisión frontal con otro vehículo, y a su vez, aprobar la normativa de protección de peatones.

Chon, Uikey, & Mohammed, (2007), en la selección de material para el LBS diseñado, tomo como parámetro de diseño la deformación del refuerzo sometido a una carga de 20 kN, en sus resultados obtuvo una deformación que alcanzo hasta los 45 mm, mientras los demás materiales cedieron entre esta carga, debido a no tener parámetros de diseño exclusivos por parte de KIA Company, del refuerzo inferior de parachoques, se procedió a realizar una simulación similar, donde se aplica una carga de 20 kN al refuerzo con polipropileno el cual será la referencia o el puntaje máximo para validar la estructura geométrica del refuerzo inferior en relación a los cambios de material propuestos, la tabla 24, muestra la comparación de resultados.

Tabla 24.

Comparación de resultados de análisis estructural del refuerzo inferior de parachoques.

Descripción	Análisis estructural - Carga a 20 kN				
	Deformación Total [mm]	Deformación Y [mm]	Nodo 1 [mm]	Nodo 2 [mm]	Nodo 3 [mm]
PP	29,38	26,55	26,14	25,84	22,99
PS	18,53	16,74	16,48	16,29	14,26
PE	58,76	53,09	52,8	51,67	45,23
PC	23,51	21,24	20,91	20,67	18,02
ABS	31,30	28,57	29,27	25,02	28,57
PLA	46,48	41,96	42,98	42,62	37,19
PC FG 10%	14,92	13,46	13,25	13,31	11,51

Nota: Comparación de resultados obtenidos tras la simulación estructural sometiendo a 20 kN el refuerzo inferior de parachoques, considerando diferentes opciones de material en el software NX Unigraphics.

Se puede apreciar que existen elementos con una deformación que incluso llega a ser el doble que el repuesto original, tal es el caso del polietileno, donde se tiene un deformación que llega hasta los 58,76 mm, considerando que la deformación del polipropileno es de apenas 29.38 mm, para obtener un criterio de comparación, se realizó una figura que muestra los resultados en un gráfico radial, donde el color rojo corresponde al polipropileno y este será el valor óptimo de diseño, los únicos materiales que se encuentran con valores aproximados son el ABS de color celeste y el poliestireno con color naranja, por tanto dentro del análisis estructural estos son los materiales con mejores condiciones para reemplazar al polipropileno, según se indica en la figura 93.

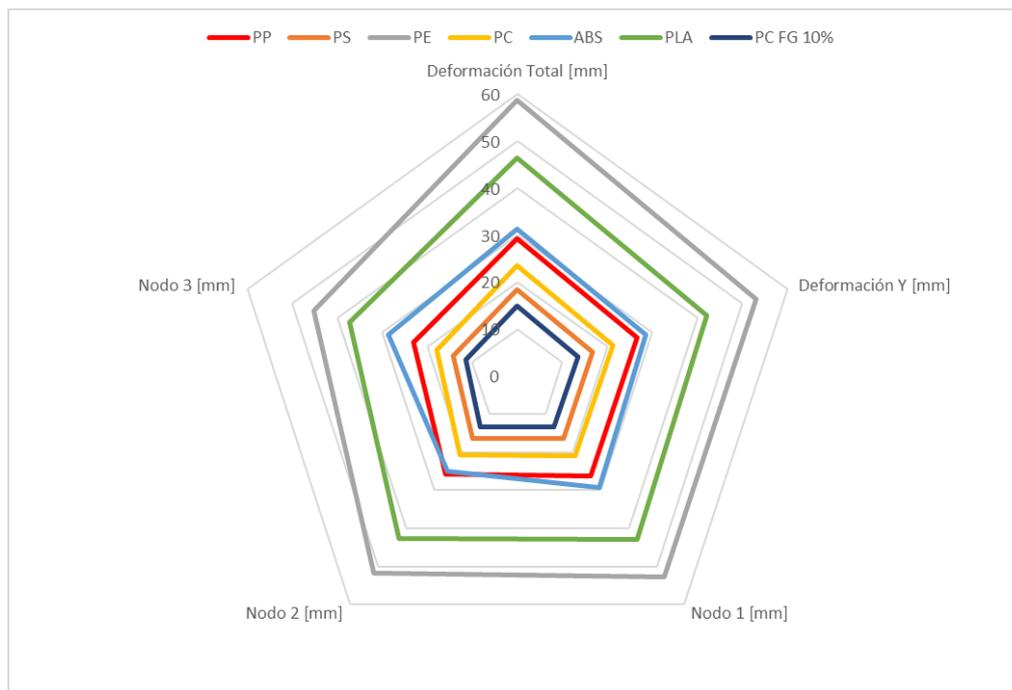


Figura 93. Comparación de resultados del análisis estructural obtenidos con distintos materiales en un gráfico radial.

Simulación dinámica: aceleración en la zona superior de la tibia durante la colisión

Un punto a comparar para corroborar que el refuerzo inferior de parachoques será validado por la norma de protección de peatones, es la aceleración G en la zona superior de la tibia, producida a 66 mm a partir de la mitad de la rodilla, el estudio realizado por Chon, Uikey, & Mohammed, (2007) muestra una aceleración que aumenta gradualmente los primeros 5 ms para después disminuir gradualmente en los siguientes 10 ms, teniendo aceleraciones que varían desde los 80 G hasta los 160 G, curvas similares se obtuvieron en el estudio desarrollado por Karimullah, Gokhale, Joshi, & Chalipat, (2011), sin embargo, su

aclaración máxima fue de 1.2 G, aunque la aceleración puede llegar a 200, estos dos casos muestran que en gran medida dependen del diseño.

También se debe considerar que las curvas obtenidas en ambos estudios corresponden a pruebas realizadas en automóviles, si se considera el efecto que tendría la aceleración en un vehículo de clase turista de tipo SUV, se puede tomar como referencia el estudio desarrollado por Maudes G. (2010), donde se analiza el daño a un peatón usando un vehículo todoterreno, el estudio muestra aceleraciones con picos abruptos, sin presentar un crecimiento gradual de la aceleración como en los casos expuestos, esto se debe a la posición de los miembros inferiores respecto al tamaño del guardachoque, puesto que en un automóvil el impacto únicamente ocurre en la tibia, mientras que en un SUV, el impacto se distribuye en la tibia y fémur ocasionando una trayectoria de proyección hacia adelante después del impacto, por tal motivo, en la simulación generada se tiene un cambio de aceleración abrupto que inmediatamente cambia a 0.

La tabla 25, muestra una comparación entre las aceleraciones del impactador de miembros inferiores considerando diferentes materiales para el refuerzo inferior de guardachoque, se puede descartar inmediatamente como posible opción de reemplaza al ABS, puesto que la aceleración producida supera los 200 G permitidos por la normativa.

Tabla 25.

Comparación de aceleraciones G, considerando las diferentes opciones de material propuestas.

Material del LBS	Aceleración	
	< 150 G	>200 G
PP	32,25	
PS	127,00	
PE	23,56	
PC	15,12	
ABS		5436,12
PLA	3,80	

Material del	Aceleración	
	< 150 G	>200 G
LBS		
PC FG 10%	57,57	

Nota: Comparación de aceleraciones producidas en la zona superior de la tibia, considerando diferentes materiales en el refuerzo inferior de guardachoques LBS, donde un valor menor a 150 G, se considera ideal, mientras que 200 G es el límite de la normativa ACEA.

Simulación dinámica: deformación del refuerzo inferior de parachoques (LBS) producido por la colisión con el impactador de miembros inferiores.

Un análisis importante para validar la eficiencia del refuerzo inferior de guardachoques, es la deformación tras el impacto, no se tienen estudios claros respecto a este análisis debido a que los resultados poseen variaciones dependiendo del diseño establecido por cada marca, por tanto, no hay un criterio definido sobre los parámetros de diseño.

En el estudio de Chon, Uikey, & Mohammed, (2007), someten al refuerzo inferior de guardachoques a una prueba de Instron para medir deformación y también rotura según el material aplicado, puesto que consideran que la corrugación del material influye en la aceleración de la tibia, similar criterio aplica Karimullah, Gokhale, Joshi, & Chalipat (2011), puesto que afirman que la deformación influye directamente en la amortiguación y rigidez afectando la trayectoria del impactador que se refleja en la aceleración de la tibia, por tanto, en este estudio se tomara la deformación producida por el impactador, si se considera la aceleración inicial del impactador, se tomara como referente al refuerzo inferior de guardachoques con material base de polipropileno, en base a la comparación de los resultados de la tabla 26 y la aceleración detallada se puede establecer que tanto el ABS, como el poliestireno que contienen la mayor carga de aceleración, coinciden con un fallo de material considerable, debido a un exceso de rigidez, esto se puede deducir puesto que los nodos 2 y 3 casi no sufren deformación en relación a los datos generados por el software, con valores

intermedios se tiene al polietileno y al PC/ABS reforzado con 10% de fibra de vidrio, su deformación es de 320 mm, sin embargo la máxima aceleración se produce con el PC/ABS con 10% de fibra de vidrio con 57.57 G, esto se debe a que los nodos tanto 2 y 3, apenas se deforman 29 y 17 mm respectivamente, mientras que el polietileno tiene un mayor despliegue en los nodos 2 y 3, obteniendo como resultado una aceleración de 23.56 G, los materiales con menor deformación es el policarbonato, el cual tiene una aceleración de 15 G pese a su baja flexibilidad en el nodo 2 y 3, mientras que el PLA, es el material con menor deformación de los propuestos, su flexibilidad, lo convierte en un material que alcanza en el nodo 2 y 3 deformaciones que casi llegan al 40 % alcanzado en el nodo 1, por tanto la aceleración en la tibia es la más baja de los materiales registrados siendo de tan solo 3 %, como lo indica la tabla 25 y 26, por tanto, se corrobora lo establecido en los estudios mencionados.

Tabla 26.

Comparación de la deformación del LBS considerando el uso de distintos materiales.

Material del LBS	Deformación del LBS					
	Max. N1 [mm]	Min. N1 [mm]	Max. N2 [mm]	Min. N2 [mm]	Max. N3 [mm]	Min. N3 [mm]
PP	20,256	-26,55	4,41	-13,571	1,1834	-3,4896
PLA	58,215	-44,763	10,496	-28,677	6,8695	-17,827
PC	0	-214,09	5,4279	-7,7424	2,8662	-3,8473
PC FG 10%	0	-320,87	0,0033	-29,605	0,03574	-16,815
PE	0	-324,81	20,344	-55,867	12,653	-33,288
ABS	0,16933	-888,25	0,0037169	-19,683	0,009025	-11,412
PS	0,2508	-1167	0,0046	-13,059	0,0187	-5,928

Nota: Comparación de deformación de los materiales propuestos para reemplazar al polipropileno (PP), en los nodos 1, 2 y 3.

Simulación dinámica: esfuerzo equivalente de Von Mises en el refuerzo inferior de parachoques.

Los estudios realizados en el diseño y análisis de daños en el refuerzo inferior de parachoques, no consideran un análisis del esfuerzo equivalente de Von Mises, puesto que sus objetivos se centran en el cumplimiento de la norma de protección de peatones, sin embargo, en el presente estudio se observó una correlación directa entre la aceleración del impactador y los máximos esfuerzos equivalentes, en la tabla 27 se puede apreciar una comparación entre el esfuerzo equivalente de Von Mises y la aceleración de la zona superior de la tibia, se observa que el polipropileno (PP) es el material que mayor esfuerzo equivalente soporta, seguido del PC/ABS reforzado con 10 % de fibra de vidrio, sin embargo su aceleración es casi 3 veces mayor que el del policarbonato considerando que casi tienen el mismo valor en esfuerzo o el ABS que al tener un esfuerzo menor que al poliestireno (PS), su aceleración es de 5 436 G, esta variación coincide con el desplazamiento producido en el nodo 1.

Tabla 27.

Comparación de resultados entre aceleración de la tibia y esfuerzo equivalente de Von Mises.3

Secuencia	Descripción	Estrés Equivalente [MPa]	Aceleración G [mm/ms ²]	Min. N1 [mm]
a.	PP	354,32	32,25	-26,55
b.	PLA	70	3,7963	-44,763
c.	PC	78,195	15,12	-214,09
d.	PC FG 10%	79	57,57	-320,87
e.	PE	7,7	23,56	-324,81
f.	ABS	30	5436,12	-888,25
g.	PS	59	127	-1167

Nota: Comparación de esfuerzo equivalente vs aceleración con la aplicación de diferentes materiales en el LBS.

Para comprender mejor los datos obtenidos, se compara los resultados gráficamente, la figura 94 muestra el desplazamiento total durante la colisión del impactador, las descripciones alfabéticas coinciden con el de la tabla 27, donde se observa que el polipropileno tras los 35 ms, vuelve a su estado original después de haber sido deformado - 26.55 mm con un esfuerzo de 354.32 MPa, lo cual indica que las propiedades plásticas del material que combinados al diseño permiten un daño casi imperceptible después del impacto.

Lo contrario sucede con el polietileno (e), el material apenas soporta 7.7 MPa, produciendo un daño total del material al llegar a los 35 ms, sin embargo su aceleración es de 23.56 G, debido a la rotura de la base de soporte lo cual crea una amortiguación con todo el cuerpo antes de llegar a la falla total del refuerzo, mientras que el ABS que tiene la aceleración mas elevada de todos los materiales propuestos, se observa en la sección f, que al llegar a los 35 ms, el material queda destruido soportado un esfuerzo máximo de 59 MPa, es decir que el material pese a ser utilizado en el automóvil en interiores y exteriores por sus propiedades mecánicas, frente a espesores del diseño geométrico en forma de hexágono termina convirtiendo al elemento en un repuesto frágil.

Mientras que el poliestireno es el material con menor deformación a los 35 ms, con una compresión de 59 MPa, sin embargo la aceleración producida es de 127 G, esto se debe a la poca ductilidad del material lo que significa que aunque el efecto de aceleración en el impactador sea bajo, es posible que ante la baja deformación del refuerzo pueda existir un momento de rotación en la rodilla superior al establecido en la normativa, puesto que casi no existe compresión si se analizan los nodos 2 y 3, apenas existe desplazamiento considerando que el material se rompe, por tanto queda en evidencia, que un bajo valor de esfuerzo equivalente de Von Mises, acompañado de un diseño geométrico cuya función es aumentar la

comprensibilidad del material con el fin de disminuir su daño, es ideal dentro de los parámetros de diseño y en este caso en el reemplazo de material.

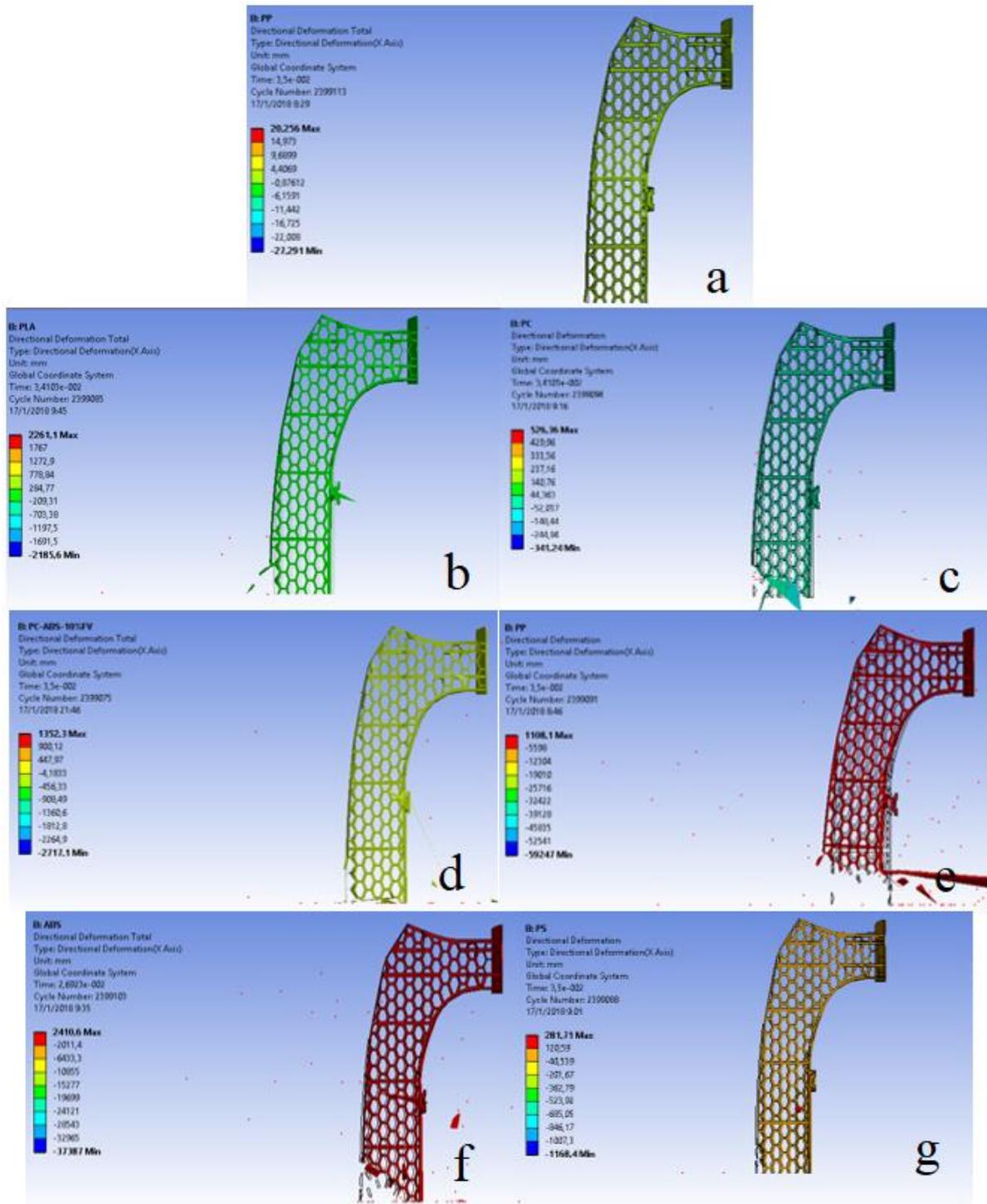


Figura 94. Deformación total del refuerzo inferior de parachoques con diferentes materiales. a. Polipropileno; b. Políácido láctico; c. Policarbonato; d. PC/ABS 10 % fibra de vidrio; e. Polietileno; f. ABS; g. Poliestireno.

Simulación dinámica: comparación de resultados obtenidos.

Si se analiza el esfuerzo equivalente obtenido en la simulación por cada material, se observa una correlación entre el punto de rotura y el esfuerzo calculada por el software, se observa que los materiales con menor esfuerzo, son los que cedieron por su fragilidad, mientras que el polipropileno es el que mayor esfuerzo alcanzo, siendo de 354 MPa, por tanto, se puede incluir dentro del análisis de diseño, el esfuerzo equivalente como una variable a considerar en el diseño. Considerando los factores expuestos, es posible detallar una selección considerando la deformación total en cada nodo, aceleración G, esfuerzo equivalente de Von Mises y deformación estructural, bajo este análisis el material poliestireno tiene una deformación total que supera los 1 167.25 mm, lo cual implica una rotura casi total del refuerzo inferior y una aceleración de 127 G, mientras que el ABS tiende a una rotura temprana del refuerzo a causa del material, en lugar de amortiguar a la sección de la tibia, termina acelerando a 5 436,12 G, los resultados de los materiales a seleccionar se encuentran en la tabla 27.

Tabla 28.

Materiales para selección de reemplazo de material del refuerzo inferior de guardachoques.

Descripción	Deformación dinámica por nodos.						Acel. [G]	Estrés Eq. [MPa]	Def. Estr. [mm]
	Max. N1 [mm]	Min. N1 [mm]	Max. N2 [mm]	Min. N2 [mm]	Max. N3 [mm]	Min. N3 [mm]			
PP	20,26	-26,55	4,41	-13,57	1,18	-3,49	32,25	354,32	26,55
PS	0,25	-1167,00	0,00	-13,06	0,02	-5,93	127,00	1,59	16,74
PE	0,00	-324,81	20,34	-55,87	12,65	-33,29	23,56	7,70	53,09
PC	0,00	-214,09	5,43	-7,74	2,87	-3,85	15,12	78,20	21,24
ABS	0,17	-888,25	0,00	-19,68	0,01	-11,41	5436,12	30,00	28,57
PLA	58,22	-44,76	10,50	-28,68	6,87	-17,83	3,80	70,00	41,96
PC FG 10%	0,00	-320,87	0,00	-29,61	0,04	-16,82	57,57	79,00	13,46

Nota: Resumen de resultado de propiedades para selección de reemplazo de material base para el refuerzo inferior de parachoques.

Selección de material de reemplazo para el refuerzo inferior de parachoques en base al análisis y discusión de resultados presentada.

Considerando los valores presentados en la tabla 27, se puede considerar que el polietileno tiende a quebrarse con facilidad, incluso su deformación frente a la carga de 20 kN, es la más alta de los materiales seleccionados, mientras que el PC/ABS reforzado con 10% de fibra de vidrio, si bien tiene la mejor resistencia estructural, es un material frágil que tiende a romperse con facilidad, lo que ocasiona una mayor aceleración en la tibia pese a que es el segundo material de la selección en cuanto al esfuerzo equivalente soportado, para proceder a una elección sistemática, se procederá a tres métodos de selección multicriterio, que son *Topsis*, *Entropy* y *Vikor*, estos métodos permiten obtener resultados de selección en base de un ranking acorde a los valores ideales y los obtenidos de los materiales de pre-selección, se tomara como valores ideales los obtenidos del polipropileno de la tabla 28, los resultados de los cálculos serán posible observarlos en el anexo E, a continuación en la tabla 29, se tienen disponible el ranking obtenido conforme a cada método, para verificar los valores se usó los 6 materiales propuestos para definir el más idóneo..

Tabla 29.

Selección de materiales en base a métodos multicriterio.

Material	Entropy	TOPSIS	VIKOR
PS	5	6	6
PE	3	5	5
PC	2	1	1
ABS	6	4	4
PLA	1	2	2
PC FG 10%	4	3	3

Nota: Ranking de materiales por métodos de selección multicriterio, los resultados de cálculos se encuentran en el Anexo E.

Acorde a los resultados se tiene que el ABS está en cuarto lugar de selección según el método de TOPSIS y VIKOR, sin embargo, la aceleración que produce supera los 200 G incumpliendo la normativa, por tanto, basándose en la aceleración con lo cual se priorizo en el criterio del método de entropía será esta la valoración por la cual se tomara las decisiones de selección final.

Por tanto, los materiales que podrían ser considerados para reemplazar el polipropileno son el PLA y el policarbonato (PC), el material recomendado para aplicar como reemplazo es el PLA debido a producir la más baja aceleración de apenas 3.8 G, Jamshidian, et. al. (2010), considera a este material una de las mejores opciones en cuanto al impacto ambiental, debido a ser un material biodegradable, en cuanto a los parámetros de diseño, el material ofrece la menor deformación de los materiales seleccionados aunque se encuentra cerca de la rotura en el nodo 1, sin embargo, la compresión en el nodo 2 y 3, distribuyen las fuerzas de impacto ejercidas ocasionando una aceleración más baja incluso que el polipropileno, su punto negativo radica en su alta deformación estructural al aplicar una fuerza de 20 kN, en su densidad la cual aumenta la masa del refuerzo inferior en un 16 %, además, su demanda a nivel mundial sigue siendo baja lo cual eleva su valor y podría ocasionar problemas en el costo de producción.

La segunda opción, es el policarbonato (PC), este material se distribuye localmente y a su vez el valor dependiendo de sus propiedades puede tener variaciones que beneficien su producción, este material se tomó como segunda opción debido a la rotura que presenta en el nodo 1, sin embargo la distribución de las fuerzas implicadas se distribuyen en el nodo 2 y 3, ocasionando una aceleración de 15.12 G, siendo inferior incluso a la del polipropileno pero mayor a la del PLA, su deformación en compresión es baja y esta representa 21.24 mm

siendo superado solo por el PC/ABS reforzado con 10 de fibra, sin embargo su densidad aumenta el peso del refuerzo en un 25 %, siendo un factor negativo en cuanto al consumo de combustible y características del refuerzo original.

Conclusiones

Se logró obtener los parámetros de diseño del refuerzo inferior de parachoques, donde se determinó que mientras mayor sea la comprensibilidad del material, los esfuerzos serán mejor distribuidas permitiendo mejores resultados para los ensayos físicos del sistema con el impactador de piernas.

Los vehículos de clase SUV o todo terreno, al impactar contra un peatón, producen una trayectoria de proyección hacia adelante, siendo necesario superar los 40 km/h para que el peatón termine sobre el capote, por tanto, su altura ayuda a disminuir daños en los miembros inferiores, lo cual se corrobora en la simulación, puesto que la trayectoria del impactador disminuye casi en su totalidad la cizalladura en la rodilla, por tal motivo este valor no fue tomado en consideración para el análisis.

Estudios relacionados, muestran diseño muy diferentes al presentado para el Sportage R, primando una estructura concisa colocando como material base un material blando como espumas, sin embargo, el diseño geométrico del refuerzo inferior de parachoques, consiste en una armadura de hexágonos, o estructura en forma de panal, esta característica de diseño, permite una mayor comprensibilidad del material brindando la oportunidad de usar materiales menos flexibles como lo es polipropileno, lo cual permite experimentar con materiales poco comunes en la industria automotriz.

El diseño del refuerzo inferior de parachoques, permite suponer que parte de su función es la disminución de daño de la estructura vehicular, como a su vez absorber la energía en un impacto frontal con otro vehículo o con un muro, por tanto, es necesario acercarse a los valores obtenidos por el polipropileno, con lo cual se garantiza seguridad y calidad en el elemento.

El diseño geométrico del refuerzo inferior de parachoques ayudado por un refuerzo superior que permite disminuir las fuerzas generadas en el impactador, por tanto, es posible usar materiales con menor ductilidad en relación al polipropileno, puesto que el diseño, influye directamente en mantener los valores permisibles de aceleración dados por la normativa de protección de peatones.

El análisis computacional realizado por medio del software Ansys para la resolución de problemas de dinámica explícita, permite establecer datos muy cercanos a los ensayos físicos, lo cual facilita establecer un criterio de selección previo al prototipado y los ensayos de destrucción, lo cual hace factible descartar materiales no aptos para los requisitos de funcionamiento, antes de llegar a ensayos físicos, por tanto, permite disminuir costos de diseño y pre-producción.

En el análisis realizado, se determinó la importancia del paso del tiempo dentro de los parámetros de simulación, una malla computacional e introducción de datos que den como resultado un paso crítico superior al calculado, disminuye la calidad de la simulación, obteniendo resultados erróneos o que superan el 15 % de diferencias con respecto a un ensayo físico.

Los materiales seleccionados como reemplazo, fueron catalogados en base al cumplimiento de la aceleración en la tibia del refuerzo superior de parachoques, el PLA

presento las mejores características en cuanto a deformación, masa y aceleración, mientras que el policarbonato, pese a tener una rotura en la superficie que entra en contacto con el impactador, muestra una buena distribución de cargas, lo que facilita una baja aceleración en el impactador.

Acorde a los análisis realizados, es posible obtener materiales alternos como reemplazo del polipropileno, incluso optimizando su funcionamiento, esto se logra usando el PLA, pese a tener un peso superior en 16 %, la flexibilidad y la distribución de cargas, permiten disminuir la aceleración del impactador.

Al considerar las deficiencias tecnológicas y la falta de innovación dentro de la industria Ecuatoriana, el estudio realizado, demuestra las ventajas del uso de la ingeniería inversa como metodología de estudio, puesto que el proceso de obtención de datos, seguido del análisis del sistema, replica de funcionamiento y el criterio de optimización, permite adquirir conocimiento para producir y mejorar piezas ya existentes que en muchos casos suelen ser importados sin un análisis previo de factibilidad de producción, debido a desconocer su función específica y características constructivas.

Recomendaciones

- El uso del scanner 3D dentro de la ingeniería inversa debe ser limitado y comprobado con mediciones físicas, puesto que su nivel de precisión es inferior a las herramientas de metrología usadas dentro de la ingeniería.
- En el análisis computacional de dinámica explícita, es recomendable obtener el tiempo de propagación de onda y el tiempo de paso crítico, lo cual permite generar una malla definida acorde a las necesidades sin aumentar innecesariamente el gasto computacional.

- Se recomienda analizar la factibilidad de fabricación del refuerzo inferior de parachoques tomando en cuenta los materiales propuestos y el número de producción estimado por la ensambladora.
- Aunque se corrobora que el software tiene una buena precisión en cuanto a la obtención de datos de análisis explícitos, es recomendable realizar ensayos físicos, puesto que existen factores externos que influyen en los valores obtenidos.
- Se recomienda realizar un análisis completo de impacto, tanto a 5 km/h por hora para demostrar la no deformación del sistema de parachoques, como la absorción energía producida con ensayos a 65 km/h según indican las normas, con lo cual se verificará que tanto influye el refuerzo inferior de parachoques del Sportage R, en una colisión frente a un objeto inmóvil de mayor peso.
- Debido a la estructura del elemento que permite disipar la energía de impacto con buenos resultados y considerando que el PLA es un material apto para reemplazar el polipropileno como material base, podría ser posible analizar el comportamiento del refuerzo inferior de parachoques usando ensambles de unión para polímeros por soldadura producidas por impresión 3D.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Jamshidian, M., Tehrany, E., Imran, M., Jacquot, M., & Desobry, S. (2010). Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 9(no 5), p. 552-571. doi:10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x
- 7ZAP. (21 de Julio de 2017). *kia7ZAP*. Obtenido de <https://kia.7zap.com/es/aus/sportage/kauspsl10/01:w5,/tr/8686511/>
- Addendum 126: Regulation No. 127. (2013). *Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with*. ONU. Obtenido de <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R127e.pdf>
- AEADE. (2017). *ANUARIO*. Quito: AEADE.
- AEADE. (2017). *ANUARIO 2016*. Quito: AEADE. Obtenido de <http://www.aeade.net/anuario-2016/>
- ANSYS. (2018). Critical Time Step Size of a Rod. SAS IP.
- Arnoux, P., Behr, M., Thollon, L., Cardot, J., Cesari, D., & Brunet, C. (2005). Pedestrian lower limb injury criteria evaluation. *Taylor & Francis*, 14, 485-515. doi:<http://dx.doi.org/10.3166/reef.14.487-515>
- BASF. (29 de MARZO de 2006). *BASF*. Obtenido de <http://www.standort-ludwigshafen.basf.de/group/corporate/site-ludwigshafen/de/literature-document:/Brand+Ultramid-Case+Study--Lower+bumper+stiffener+LBS+from+Ultramid-English.pdf>

Chapra, S., & Canale, R. (2011). *Métodos numéricos para ingenieros* (6ta. ed. ed.). México: MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A.

Chon, D., Uikey, D., & Mohammed, R. (2007). Energy Absorber Developments and Correlation. *SAE Technical paper series, 2007-01-1763*. doi:10.4271/2007-01-1763

COMEX. (31 de Mayo de 2017). *Comercio Exterior*. Obtenido de <http://www.comercioexterior.gob.ec/la-eliminacion-de-las-salvaguardias-regira-desde-este-1-de-junio/>

COMPLX. (s.f.). *COMPLX*. Obtenido de http://www.complx.com.mx/wp-content/uploads/2017/04/chapter1_2_2_rev1.pdf

Cortes Vasquez, O. (2015). *Estudio de posgrado, Simulación numérica del atropello de peatones con un vehículo tipo sedán en la ciudad de México*. Ciudad de México, México: Instituto politécnico nacional.

Dietsche, K., & Klingebiel, M. (2005). *Manual de la técnica del automovil*. Plochingen: Robert Bosch GmbH.

Directiva 2003/102/CE. (2003). *Protección de los peatones y otros usuarios vulnerables de la vía pública en caso de colisión con un vehículo de motor y por la que se modifica la Directiva 70/156/CEE del Consejo*. Bruselas: Parlamento europeo y del consejo. Obtenido de <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=LEGISSUM:n26030>

Directiva 2003/102/CE. (2003). *Relativa a la protección de los peatones y otros usuarios vulnerables de la vía pública antes y en*. Bruselas: Parlamento europeo y del consejo. Obtenido de http://laimuz.unizar.es/documentos/Directiva2003_102_CE.pdf

EuroNCAP. (Junio de 2015). *TEST PROTOCOL – AEB VRU systems*. Obtenido de <https://www.euroncap.com/es/para-ingenieros/protocols/pedestrian-protection/>

EuroNCAP. (20 de Agosto de 2017). *Euroncap for safer cars*. Obtenido de <https://www.euroncap.com>

Fombuena, V., Fenollar, O., & Montañés, N. (2016). *Caracterización de materiales poliméricos*. Valencia: Editorial Universidad Politécncia de Valencia.

Gálvez Román, R. (2011). *Simulación de un atropellamiento mediante LS-DYNA*. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid. doi:<http://hdl.handle.net/10016/11720>

Gere, J., & Goodno, B. (2009). *Mecánica de materiales*. México D.F., México: CENGACE Learning.

Goicolea, J. (2011). *CURSO DE MECÁNICA*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de http://w3.mecanica.upm.es/~goico/mecanica/libro/mecanica-e_goicolea2010.pdf

Gongora, J. (2014). La industria del plástico en México y el mundo. *Comercio exterior*, 64(5), 5-6. Obtenido de http://biblioteca.anipac.mx/wp-content/uploads/2016/10/0098_La_industria_del_plastico_en_Mexico_y_el_mundo.pdf

GoodFellow. (25 de Diciembre de 2017). *GoodFellow*. Obtenido de GoodFellow: <http://www.goodfellow.com/sp/>

Grand View Research. (2014). *Automotive Plastics Market Analysis By Product (ABS, PP, PU, PVC, PE, PC, PMMA, PA), By Application (Powertrains, Electrical*

Components, Interior Furnishings, Exterior Furnishings, Chassis), And Segment Forecasts, 2014 - 2025. *Grand View Research*, 260. Obtenido de <http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/automotive-plastics-market/request>

Hai Trong , N., & Tso Liang, T. (2008). Development and validation of FE models of impactor for pedestrian testing. *Journal of Mechanical Science and Technology*(22), 1660-1667. doi:10.1007/s12206-008-0512-8

Karimullah, S., Gokhale, A., Joshi, S., & Chalipat, S. (2011). Design of “Lower Stiffener” for Controlling Pedestrian Lower Leg Injuries. 26(100), 1-8. doi:<https://doi.org/10.4271/2011-26-0100>

Karthikeyan, K., Russell, B., Fleck, N., Wadley, H., & Deshpande, V. (8 de FEBRERO de 2013). The effect of shear strength on the ballistic response of laminated composite plates. *European Journal of Mechanics-A/Solids*(42), 35-53. doi:10.1016/j.euromechsol.2013.04.002

Matweb. (21 de Diciembre de 2017). *Matweb*. Obtenido de Matweb Material Propiety Data: <http://www.matweb.com/>

Maudes, G. (2010). *Influencia de la defensa de un todoterreno en las lesiones sufridas por un peatón en caso de atropello*. (U. C. Madrid, Ed.) Madrid, España. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10016/10805>

Montoy, M., Arciniegas, J., & Rodríguez, J. (2012). Caracterización de Herramientas de Ingeniería Inversa. *Información tecnológica*, 6(23), 31-42. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642012000600005>

Navarro, J., Gómez, T., García, J., & Águeda, E. (2010). *Elementos amovibles y fijos no estructurales*. Madrid: Paranfino, SA.

Parras, D., Romero, L., Nieto, J., Cañavete, F., & Fernández, P. (2016). ESCANEADO Y RECONSTRUCCIÓN 3D A PARTIR DE IMÁGENES COMO HERRAMIENTA DIDÁCTICA DE INICIACIÓN A LA INGENIERÍA INVERSA. *20th International Congress on Project Management and Engineering* . Obtenido de <http://www.aepro.com/files/congresos/2016cartagena/09003.4718.pdf>

Ramos, D. (2013). USO DE LA INGENIERÍA INVERSA COMO METODOLOGÍA DE ENSEÑANZA EN LA FORMACIÓN PARA LA INNOVACIÓN. *Innovation in research and engineering education*. Obtenido de <https://www.acofipapers.org/index.php/acofipapers/2013/paper/viewFile/380/189>

Resolución No. 14 453. (2014). *Elementos mínimos de seguridad en vehículos automotores*. Quito: INEN. Obtenido de <http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/10/RTE-034-3R-RESOLUCION-14453.pdf>

Resolución N°30. (2011). *Aplicación de arancel de partidas arancelarias de CKD's de vehículos*.,. Quito: COMEX.

RTP, Imagineering Plastics. (09 de Diciembre de 2017). *RTP co*. Obtenido de RTP co.: <http://web.rtpcompany.com/info/data/4900/RTP4900-0818UV-ISO.htm>

Santos, L. (2017). *Simulación por el método de elementos finitos del impacto frontal de un bus interprovincial de fabricación nacional, para proponer la modificación de la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 1323:2009*. Sangolqui: ESPE. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/13543/1/T-ESPE-057893.pdf>

Schuster , P. (2006). Current Trends in Bumper Design for Pedestrian Impact. *SAE Technical Paper*, No. 2006-01-0464. Obtenido de

http://ofanan.cafe.themarker.com/nodes/r/924/328/file_0.pdf

SENPLADES. (2013). *Plan nacional del buen vivir*. Quito. Obtenido de

<http://www.buenvivir.gob.ec/objetivo-10.-impulsar-la-transformacion-de-la-matriz-productiva>

Serway, R., & Faughn, J. (2001). *Física* (Quinta ed.). México: Pearson Education.

Shahbeyk, S., & Abvabi, A. (2009). A Numerical Study on the Effect of Accident

Configuration on Pedestrian Lower Extremity Injuries. *Scientia Iranica*, 16(5), 379-

387. Obtenido de [https://search.proquest.com/docview/223244570?pq-](https://search.proquest.com/docview/223244570?pq-origsite=gscholar)

[origsite=gscholar](https://search.proquest.com/docview/223244570?pq-origsite=gscholar)

Stevenson, J. (2006). *Thesis of PHD: SIMULATION OF VEHICLE-PEDESTRIAN*

INTERACTION. Christchurch, Nueva Zelanda: University of Canterbury.

doi:<https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/1180>

Szeteiová, K. (2010). Automotive materials plastics in automotive markets today. Institute of

Production Technologies, Machine Technologies and Materials, Faculty of Material

Science and Technology in Trnava, Slovak University of Technology Bratislava.

Teng, T., & Nguyen, T. (19 de Mayo de 2008). Development and validation of FE models of

impactor for pedestrian testing. *Journal of Mechanical Science and Technology*,

22(9), 1660-1667. doi:DOI: 10.1007/s12206-008-0512-8

Universidad de Barcelona. (09 de Diciembre de 2017). *Materiales*. Obtenido de Materiales:

<http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/polipropileno>

Wüst, A. (2007). Optimization Techniques in the development of a Lower Bumper Stiffener for Pedestrian Protection. *European HyperWorks Technology Conference*, (pág. 24).

Berlin. Obtenido de <http://www.altairhyperworks.co.uk/html/en-gb/session11/basf-wuest.pdf>

Zumba, L. (6 de Septiembre de 2017). Los carros tendrán un 16 % mínimo de piezas locales.

Expreso, pág. 1. Obtenido de <http://www.expreso.ec/economia/industriaautomotriz-automoviles-comex-esamble-DD1674713>

ANEXOS

Anexo A. Fichas técnicas de materiales de la empresa RTP Co.

Fichas de materiales de la empresa RTP Co.

12/1/2018

RTP 100 Polypropylene (PP) Product Data Sheet - RTP Company



Product Data Sheet & General Processing Conditions

RTP 100 Polypropylene (PP)
Unfilled

PROPERTIES & AVERAGE VALUES OF INJECTION MOLDED SPECIMENS

<u>PERMANENCE</u>	<u>English</u>	<u>SI Metric</u>	<u>ASTM TEST</u>
Specific Gravity	0.91	0.91	D 792
Melt Flow Rate @ 230 °C, / 2.16 kg	4.00 g/10 min	4.00 g/10 min	D 1238
Molding Shrinkage 1/8 in (3.2 mm) section	0.0150 - 0.0200 in/in	1.50 - 2.00 %	D 955
<hr/> MECHANICAL <hr/>			
Impact Strength, Izod notched 1/8 in (3.2 mm) section	1.0 ft-lbs/in	53 J/m	D 256
unnotched 1/8 in (3.2 mm) section	30.0 ft-lbs/in	1602 J/m	D 4812
Tensile Strength	4700 psi	32 MPa	D 638
Tensile Elongation	> 10.0 %	> 10.0 %	D 638
Tensile Modulus	0.25 x 10 ⁶ psi	1724 MPa	D 638
Flexural Strength	6000 psi	41 MPa	D 790
Flexural Modulus	0.20 x 10 ⁶ psi	1379 MPa	D 790
<hr/> THERMAL <hr/>			
Deflection Temperature @ 264 psi (1820 kPa)	130 °F	54 °C	D 648
@ 66 psi (455 kPa)	225 °F	107 °C	D 648
Ignition Resistance* Flammability**	HB @ 1/16 in	HB @ 1.5 mm	D 635

PROPERTY NOTES

Data herein is typical and not to be construed as specifications.
 Unless otherwise specified, all data listed is for natural or black colored material.
 * This rating is not intended to reflect hazards of this or any other material under actual fire conditions.
 ** Values per RTP Company testing.

GENERAL PROCESSING FOR INJECTION MOLDING

	<u>English</u>	<u>SI Metric</u>
Injection Pressure	10000 - 15000 psi	69 - 103 MPa
Melt Temperature	375 - 450 °F	191 - 232 °C
Mold Temperature	90 - 150 °F	32 - 66 °C
Drying	2 hrs @ 175 °F	2 hrs @ 79 °C

PROCESSING NOTES

23 Jul 2004 KMH

This information is intended to be used only as a guideline for designers and processors of modified thermoplastics. Because design and processing is complex, a set solution will not solve all problems. Observation on a "trial and error" basis may be required to achieve desired results.

Data are obtained from specimens molded under carefully controlled conditions from representative samples of the compound described herein. Properties may be materially affected by molding techniques applied and by the size and shape of the item molded. No assurance can be implied that all molded articles will have the same properties as those listed.

No information supplied by RTP Company constitutes a warranty regarding product performance or use. Any information regarding performance or use is only offered as suggestion for investigation for use, based upon RTP Company or other customer experience. RTP Company makes no warranties, expressed or implied, concerning the suitability or fitness of any of its products for any particular purpose. It is the responsibility of the customer to determine that the product is safe, lawful and technically suitable for the intended use. The disclosure of information herein is not a license to operate under, or a recommendation to infringe any patents.

12/1/2018

RTP 700 A FR Low Density Polyethylene (LDPE) Product Data Sheet - RTP Company



Product Data Sheet & General Processing Conditions

RTP 700 A FR Low Density Polyethylene (LDPE) Flame Retardant

PROPERTIES & AVERAGE VALUES OF INJECTION MOLDED SPECIMENS

<u>PERMANENCE</u>	<u>English</u>	<u>SI Metric</u>
Specific Gravity	1.22	1.22
Molding Shrinkage 1/8 in (3.2 mm) section	0.0250 - 0.0300 in/in	2.50 - 3.00 %

<u>MECHANICAL</u>		
Impact Strength, Izod	notched 1/8 in (3.2 mm) section	
	8.0 ft-lbs/in	427 J/m
unnotched 1/8 in (3.2 mm) section	No Break	No Break
Tensile Strength	1200 psi	8 MPa
Tensile Elongation	> 10.0 %	> 10.0 %
Tensile Modulus	0.05 x 10 ⁶ psi	345 MPa
Flexural Strength	1300 psi	9 MPa
Flexural Modulus	0.04 x 10 ⁶ psi	276 MPa

<u>ELECTRICAL</u>		
Volume Resistivity	> 1E16 ohm.cm	> 1E16 ohm.cm

<u>THERMAL</u>		
Ignition Resistance* Flammability**	V-0 @ 1/16 in	V-0 @ 1.5 mm

PROPERTY NOTES

Data herein is typical and not to be construed as specifications.
 Unless otherwise specified, all data listed is for natural or black colored material.
 * This rating is not intended to reflect hazards of this or any other material under actual fire conditions.
 ** Values per RTP Company testing.

<u>GENERAL PROCESSING FOR INJECTION MOLDING</u>		
	<u>English</u>	<u>SI Metric</u>
Injection Pressure	10000 - 15000 psi	69 - 103 MPa
Melt Temperature	380 - 450 °F	193 - 232 °C
Mold Temperature	70 - 150 °F	21 - 66 °C
Drying	2 hrs @ 175 °F	2 hrs @ 79 °C

PROCESSING NOTES

29 Nov 2004 SAC

This information is intended to be used only as a guideline for designers and processors of modified thermoplastics. Because design and processing is complex, a set solution will not solve all problems. Observation on a "trial and error" basis may be required to achieve desired results.

Data are obtained from specimens molded under carefully controlled conditions from representative samples of the compound described herein. Properties may be materially affected by molding techniques applied and by the size and shape of the item molded. No assurance can be implied that all molded articles will have the same properties as those listed.

13/1/2018

RTP 400 Polystyrene (PS) Product Data Sheet - RTP Company



Product Data Sheet & General Processing Conditions

RTP 400 Polystyrene (PS) General Purpose

PROPERTIES & AVERAGE VALUES OF INJECTION MOLDED SPECIMENS

<u>PERMANENCE</u>	<u>English</u>	<u>SI Metric</u>
Specific Gravity	1.04	1.04
Molding Shrinkage 1/8 in (3.2 mm) section	0.0030 - 0.0070 in/in	0.30 - 0.70 %

MECHANICAL

Impact Strength, Izod	notched 1/8 in (3.2 mm) section	0.4 ft-lbs/in	21 J/m
	unnotched 1/8 in (3.2 mm) section	3.0 ft-lbs/in	160 J/m
Tensile Strength		7700 psi	53 MPa
Tensile Elongation		2.0 - 3.0 %	2.0 - 3.0 %
Tensile Modulus		0.43 x 10 ⁶ psi	2965 MPa
Flexural Strength		12000 psi	83 MPa
Flexural Modulus		0.46 x 10 ⁶ psi	3172 MPa

THERMAL

Deflection Temperature @ 264 psi (1820 kPa)	180 °F	82 °C
@ 66 psi (455 kPa)	205 °F	96 °C
Ignition Resistance* Flammability**	HB @ 1/16 in	HB @ 1.5 mm

PROPERTY NOTES

Data herein is typical and not to be construed as specifications.
 Unless otherwise specified, all data listed is for natural or black colored material.
 * This rating is not intended to reflect hazards of this or any other material under actual fire conditions.
 ** Values per RTP Company testing.

GENERAL PROCESSING FOR INJECTION MOLDING

	<u>English</u>	<u>SI Metric</u>
Injection Pressure	10000 - 15000 psi	69 - 103 MPa
Melt Temperature	410 - 480 °F	210 - 249 °C
Mold Temperature	100 - 150 °F	38 - 66 °C
Drying	2 hrs @ 180 °F	2 hrs @ 82 °C

PROCESSING NOTES

4 Apr 2005 KMH

This information is intended to be used only as a guideline for designers and processors of modified thermoplastics. Because design and processing is complex, a set solution will not solve all problems. Observation on a "trial and error" basis may be required to achieve desired results.

Data are obtained from specimens molded under carefully controlled conditions from representative samples of the compound described herein. Properties may be materially affected by molding techniques applied and by the size and shape of the item molded. No assurance can be implied that all molded articles will have the same properties as those listed.

No information supplied by RTP Company constitutes a warranty regarding product performance or use. Any information regarding performance or use is only offered as suggestion for investigation for use, based upon RTP Company or other customer

13/1/2018

RTP 2501 Polycarbonate/ABS Alloy (PC/ABS) Product Data Sheet - RTP Company



Product Data Sheet & General Processing Conditions

RTP 2501 Polycarbonate/ABS Alloy (PC/ABS) Glass Fiber

PROPERTIES & AVERAGE VALUES OF INJECTION MOLDED SPECIMENS

<u>PERMANENCE</u>	<u>English</u>	<u>SI Metric</u>
Primary Additive	10 %	10 %
Specific Gravity	1.21	1.21
Molding Shrinkage 1/8 in (3.2 mm) section	0.0020 - 0.0060 in/in	0.20 - 0.60 %

MECHANICAL

Impact Strength, Izod	notched 1/8 in (3.2 mm) section	
	2.0 ft-lbs/in	107 J/m
	unnotched 1/8 in (3.2 mm) section	
	10.0 ft-lbs/in	534 J/m
Tensile Strength	11500 psi	79 MPa
Tensile Elongation	3.0 - 5.0 %	3.0 - 5.0 %
Tensile Modulus	0.60 x 10 ⁶ psi	4137 MPa
Flexural Strength	19000 psi	131 MPa
Flexural Modulus	0.60 x 10 ⁶ psi	4137 MPa

THERMAL

Ignition Resistance*		
Flammability**	HB @ 1/16 in	HB @ 1.5 mm

PROPERTY NOTES

Data herein is typical and not to be construed as specifications. Unless otherwise specified, all data listed is for natural or black colored materials. * This rating is not intended to reflect hazards of this or any other material and ** Values per RTP Company testing.

Pigments can affect properties. For actual fire conditions.

GENERAL PROCESSING FOR INJECTION MOLDING

	<u>English</u>	<u>SI Metric</u>
Injection Pressure	10000 - 15000 psi	69 - 103 MPa
Melt Temperature	470 - 525 °F	243 - 274 °C
Mold Temperature	125 - 200 °F	52 - 93 °C
Drying	4 hrs @ 200 °F	4 hrs @ 93 °C
Moisture Content	0.02 %	0.02 %
Dew Point	-20 °F	-29 °C

PROCESSING NOTES

Desiccant Type Dryer Required.

11 Jul 2005 NMS

This information is intended to be used only as a guideline for designers and processors of modified thermoplastics. Because design and processing is complex, a set solution will not solve all problems. Observation on a "trial and error" basis may be required to achieve desired results.

Data are obtained from specimens molded under carefully controlled conditions from representative samples of the compound described herein. Properties may be materially affected by molding techniques applied and by the size and shape of the item molded. No assurance can be implied that all molded articles will have the same properties as those listed.

13/1/2018

RTP 600 Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Product Data Sheet - RTP Company



Product Data Sheet & General Processing Conditions

RTP 600 Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

PROPERTIES & AVERAGE VALUES OF INJECTION MOLDED SPECIMENS

	English	SI Metric
PERMANENCE		
Primary Additive	0 %	0 %
Specific Gravity	1.06	1.06
Molding Shrinkage 1/8 in (3.2 mm) section	0.0050 - 0.0070 in/in	0.50 - 0.70 %
MECHANICAL		
Impact Strength, Izod notched 1/8 in (3.2 mm) section	5.0 ft-lbs/in	267 J/m
unnotched 1/8 in (3.2 mm) section	33.0 ft-lbs/in	1762 J/m
Tensile Strength	6600 psi	46 MPa
Tensile Elongation	9.0 - 10.0 %	9.0 - 10.0 %
Tensile Modulus	0.40 x 10 ⁶ psi	2758 MPa
Flexural Strength	10800 psi	74 MPa
Flexural Modulus	0.35 x 10 ⁶ psi	2413 MPa
THERMAL		
Ignition Resistance* Flammability**	HB @ 1/16 in	HB @ 1.5 mm

PROPERTY NOTES

Data herein is typical and not to be construed as specifications. Unless otherwise specified, all data listed is for natural or black colored materials. * This rating is not intended to reflect hazards of this or any other material and ** Values per RTP Company testing.

Pigments can affect properties. For actual fire conditions.

GENERAL PROCESSING FOR INJECTION MOLDING

	English	SI Metric
Injection Pressure	10000 - 15000 psi	69 - 103 MPa
Melt Temperature	400 - 460 °F	204 - 238 °C
Mold Temperature	145 - 185 °F	63 - 85 °C
Drying	2 hrs @ 180 °F	2 hrs @ 82 °C
Moisture Content	0.10 %	0.10 %
Dew Point	0 °F	-18 °C

PROCESSING NOTES

Desiccant Type Dryer Required.

1 Jun 2005 NMS

This information is intended to be used only as a guideline for designers and processors of modified thermoplastics. Because design and processing is complex, a set solution will not solve all problems. Observation on a "trial and error" basis may be required to achieve desired results.

Data are obtained from specimens molded under carefully controlled conditions from representative samples of the compound described herein. Properties may be materially affected by molding techniques applied and by the size and shape of the item molded. No assurance can be implied that all molded articles will have the same properties as those listed.

13/1/2018

RTP 2501 Polycarbonate/ABS Alloy (PC/ABS) Product Data Sheet - RTP Company



Product Data Sheet & General Processing Conditions

RTP 2501 Polycarbonate/ABS Alloy (PC/ABS) Glass Fiber

PROPERTIES & AVERAGE VALUES OF INJECTION MOLDED SPECIMENS

<u>PERMANENCE</u>	<u>English</u>	<u>SI Metric</u>
Primary Additive	10 %	10 %
Specific Gravity	1.21	1.21
Molding Shrinkage 1/8 in (3.2 mm) section	0.0020 - 0.0060 in/in	0.20 - 0.60 %

MECHANICAL

Impact Strength, Izod	notched 1/8 in (3.2 mm) section	
	2.0 ft-lbs/in	107 J/m
	unnotched 1/8 in (3.2 mm) section	
	10.0 ft-lbs/in	534 J/m
Tensile Strength	11500 psi	79 MPa
Tensile Elongation	3.0 - 5.0 %	3.0 - 5.0 %
Tensile Modulus	0.60 x 10 ⁶ psi	4137 MPa
Flexural Strength	19000 psi	131 MPa
Flexural Modulus	0.60 x 10 ⁶ psi	4137 MPa

THERMAL

Ignition Resistance*		
Flammability**	HB @ 1/16 in	HB @ 1.5 mm

PROPERTY NOTES

Data herein is typical and not to be construed as specifications. Unless otherwise specified, all data listed is for natural or black colored materials. * This rating is not intended to reflect hazards of this or any other material and ** Values per RTP Company testing.

Pigments can affect properties. For actual fire conditions.

GENERAL PROCESSING FOR INJECTION MOLDING

	<u>English</u>	<u>SI Metric</u>
Injection Pressure	10000 - 15000 psi	69 - 103 MPa
Melt Temperature	470 - 525 °F	243 - 274 °C
Mold Temperature	125 - 200 °F	52 - 93 °C
Drying	4 hrs @ 200 °F	4 hrs @ 93 °C
Moisture Content	0.02 %	0.02 %
Dew Point	-20 °F	-29 °C

PROCESSING NOTES

Desiccant Type Dryer Required.

11 Jul 2005 NMS

This information is intended to be used only as a guideline for designers and processors of modified thermoplastics. Because design and processing is complex, a set solution will not solve all problems. Observation on a "trial and error" basis may be required to achieve desired results.

Data are obtained from specimens molded under carefully controlled conditions from representative samples of the compound described herein. Properties may be materially affected by molding techniques applied and by the size and shape of the item molded. No assurance can be implied that all molded articles will have the same properties as those listed.

Análisis de calidad de mallado en NX

Anexo B.

Análisis de calidad de mallado, para simulación estructural en NX.

```

Entorno:          NX NASTRAN - Structural
Solver:          NX NASTRAN
=====
=====
Valores de umbral
=====
=====
Nombre de la prueba      Realizar la      Límite
de aviso                 Límite de error prueba
=====
=====
Maximum Size Borde del elemento      No      50 mm
100 mm

Tamaño mínimo Borde del elemento      No      1 mm
0.1 mm

Signo jacobiano      Sí
  Tetraedro          Sí
  Pirámide           Sí
  Pentahedro         Sí
  Hexaedro           Sí

Cero jacobiano      Sí      0.1
0
  Tetraedro          Sí      0.1
0
  Pirámide           Sí      0.1
0
  Pentahedro         Sí      0.1
0
  Hexaedro           Sí      0.1
0
  Triangular         Sí      0.1
0
  Cuadrilateral      Sí      0.1
0
  Axial simétrico Triangular      Sí      0.1
0
  Axial simétrico Cuadrilateral      Sí      0.1
0

Volumen      Sí      0.01 mm^3
0 mm^3
  Tetraedro      Sí      0.01 mm^3
0 mm^3
  Pirámide       Sí      0.01 mm^3
0 mm^3
  
```

Coordenada Y consistente axial simétrica 2e-006	Sí	0.002
Triangular 2e-006	Sí	0.002
Cuadrilateral 2e-006	Sí	0.002
Coordenada +X axial simétrica 0	Sí	0.001
Triangular 0	Sí	0.001
Cuadrilateral 0	Sí	0.001
Relación de aspecto 100	Sí	10
Tetraedro 100	Sí	10
Pirámide 100	Sí	10
Pentahedro 100	Sí	10
Hexaedro 100	Sí	10
Triangular 100	Sí	10
Cuadrilateral 100	Sí	10
Axial simétrico Triangular 100	Sí	10
Axial simétrico Cuadrilateral 100	Sí	10
Ángulo de esviaje 30 grados	Sí	45 grados
Triangular 10 grados	Sí	15 grados
Cuadrilateral 30 grados	Sí	45 grados
Axial simétrico Cuadrilateral 30 grados	Sí	45 grados
Máximo Ángulo interior 150 grados	Sí	135 grados
Triangular grados	Sí	150
Cuadrilateral grados	Sí	135
Axial simétrico Triangular 160 grados	Sí	150 grados
Axial simétrico Cuadrilateral 150 grados	Sí	135 grados
Mínimo Ángulo interior 30 grados	Sí	45 grados
Triangular 10 grados	Sí	15 grados
Cuadrilateral 30 grados	Sí	45 grados

10	Axial simétrico Triangular	Sí	15 grados
30	Axial simétrico Cuadrilateral	Sí	45 grados
Desmoldeo		Sí	0.1
0.5	Cuadrilateral	Sí	0.1
0.5	Axial simétrico Cuadrilateral	Sí	0.1
Cuad Alabeo		Sí	0.01
0.05	Cuadrilateral	Sí	0.01
Sólido Alabeo		Sí	0.866
0.707	Pirámide	Sí	0.866
0.707	Pentahedro	Sí	0.866
0.707	Hexaedro	Sí	0.866
Punto del borde	Coefficiente de longitud	Sí	0.6
0.5	Tetraedro	Sí	0.6
0.5	Pirámide	Sí	0.6
0.5	Pentahedro	Sí	0.6
0.5	Hexaedro	Sí	0.6
0.5	Triangular	Sí	0.6
0.5	Cuadrilateral	Sí	0.6
0.5	Axial simétrico Triangular	Sí	0.6
0.5	Axial simétrico Cuadrilateral	Sí	0.6
Desplazamiento del elemento	Coefficiente de longitud	Sí	0.1
0.15	Viga	Sí	0.1
0.15	Barra	Sí	0.1

Environment: NX NASTRAN - Structural
 Solver: NX NASTRAN

=====

```

=====
=====
Results of Element Shape Check
=====
=====
    
```

Overview

Elements	Number Failed	Number Warning	Number Checked
	0	16777	488218

Check	Number Failed	Number Warning	Worst Value
Jacobian Sign	0	0	1.00000
Jacobian Zero	0	48	0.01439
Volume	0	29	0.00258
Axisymmetric	0	0	-N/A-
Consistent Y			
Axisymmetric +X	0	0	-N/A-
Aspect Ratio	0	16463	93.93372
Skew Angle	0	0	-N/A-
Maximum Interior Angle	0	0	-N/A-
Minimum Interior Angle	0	0	-N/A-
Taper	0	0	-N/A-
Warp Factor	0	0	-N/A-
Face Warp Coefficient	0	0	-N/A-
Edge Point Length Ratio	0	335	-0.02361
Element Offset	0	0	-N/A-

Nota: Valores de resultados de análisis de calidad de elemento obtenido del programa Siemens NX NASTRAN (Siemens NX 10, 2017)

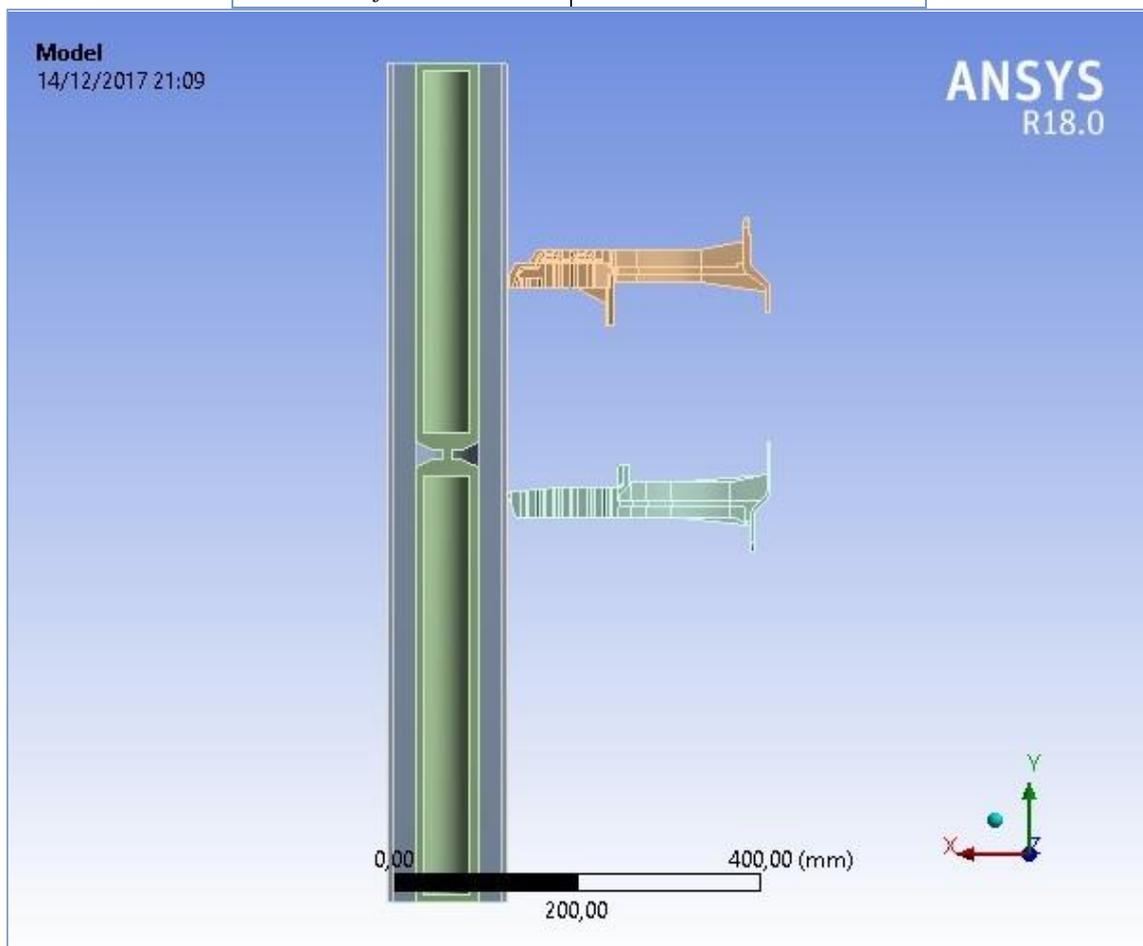
Anexo C.

Informe de simulación con material base de polipropileno para el refuerzo inferior de parachoques.



Project

First Saved	Monday, January 8, 2018
Last Saved	Thursday, December 14, 2017
Product Version	18.0 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



Contents

1 [Units](#)

1 [Model \(B4\)](#)

- ; [Symmetry](#) ▾ [Symmetry](#)
 [Region](#)
- ; [Connections](#) ▾ [Contacts](#) ▾ [Contact](#)
 [Regions](#)
 - ▾ [Body Interactions](#) ▾ [Body](#)
 [Interaction](#)
- ; [Mesh](#)
 - ▾ [Mesh Controls](#)
- ; [Named Selections](#)
- ; [Explicit Dynamics \(B5\)](#) ▾ [Initial](#)
 [Conditions](#) ▾ [Initial](#)
 [Condition](#)
 - ▾ [Analysis Settings](#) ▾ [Fixed](#)
 [Support](#) ▾ [Solution \(B6\)](#) ▾
 [Solution Information](#) ▾ [Results](#)
- ; [Material Data](#)
 - ▾ [NYLON](#)
 - ▾ [FOAM CF-45](#)
 - ▾ [SS 304](#)
 - ▾ [TPO](#)
 - ▾ [PP](#)

Units

TABLE 1

Unit System	Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

Model (B4)

Geometry

TABLE 2
Model (B4) > Geometry

Object Name	Geometry
State	Fully Defined
Definition	
Source	D:\Andrius\Ingenieria\2 - Maestria SEK\4 - Semestre\5 TESIS\2 DESARROLLO\2 Metodologia\4 eNERO\PC\PC_files\dp0\Geom\DM\Geom.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Meters
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Length X	418,95 mm

file:///C:/Users/USER/AppData/Roaming/Ansys/v180/Mechanical_Report/Mechanical_R...14/12/2017

Length Y	926, mm
Length Z	563,93 mm
Properties	
Volume	6,895e+006 mm ³
Mass	9,1306 kg
Scale Factor Value	1,
Statistics	
Bodies	5
Active Bodies	5
Nodes	8943
Elements	24180
Mesh Metric	None
Basic Geometry Options	
Parameters	Independent
Parameter Key	
Attributes	Yes
Attribute Key	
Named Selections	Yes
Named Selection Key	
Material Properties	Yes
Advanced Geometry Options	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	Yes
Coordinate System Key	
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	Yes
Compare Parts On Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\USER\AppData\Local\Temp
Analysis Type	3-D
Decompose Disjoint Geometry	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3

file:///C:/Users/USER/AppData/Roaming/Ansys/v180/Mechanical_Report/Mechanical_R...14/12/2017

Model (B4) > Geometry > Parts

Object Name	Piel	M. Muscular	M. Osea	UBS	LBS
State	Meshed				
Graphics Properties					
Visible	Yes				
Transparency	1				
Definition					
Suppressed	No				
Stiffness Behavior	Flexible				
Coordinate System	Default Coordinate System				
Reference Temperature	By Environment				
Reference Frame	Lagrangian				
Material					
Assignment	NYLON	FOAM CF-45	SS 304	TPO	PP
Bounding Box					
Length X	131,55 mm	119,51 mm	69,149 mm	285,99 mm	287,48 mm
Length Y	926, mm			118,48 mm	119, mm
Length Z	60,558 mm	54,558 mm	29,558 mm	550,23 mm	563,93 mm
Properties					
Volume	1,0391e+006 mm ³	3,202e+006 mm ³	7,4447e+005 mm ³	8,4362e+005 mm ³	1,0658e+006 mm ³
Mass	1,1846 kg	0,29779 kg	5,8813 kg	0,81831 kg	0,94858 kg
Centroid X	392,4 mm			213,96 mm	207,57 mm
Centroid Y	-1,5541e-013 mm	-4,3965e-014 mm	0,27817 mm	234,79 mm	-20,713 mm
Centroid Z	36,761 mm	27,654 mm	15,749 mm	317,26 mm	326,5 mm
Moment of Inertia Ip1	84726 kg·mm ²	21227 kg·mm ²	4,3053e+005 kg·mm ²	21906 kg·mm ²	27023 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip2	2572,1 kg·mm ²	389,27 kg·mm ²	2699,4 kg·mm ²	23925 kg·mm ²	29702 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip3	86562 kg·mm ²	21498 kg·mm ²	4,3249e+005 kg·mm ²	2258,2 kg·mm ²	2949,1 kg·mm ²
Statistics					
Nodes	238		302	5276	2889
Elements	96		693	15201	8094

file:///C:/Users/USER/AppData/Roaming/Ansys/v180/Mechanical_Report/Mechanical_R...14/12/2017

Project

Page 5 of 315

Mesh Metric	None
-------------	------

Coordinate Systems

TABLE 4
Model (B4) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	Global Coordinate System	XYPlane
State	Fully Defined	
Definition		
Type	Cartesian	
Suppressed		No
Origin		
Origin X	0, mm	
Origin Y	0, mm	
Origin Z	0, mm	
Define By		Global Coordinates
Location		Defined
Directional Vectors		
X Axis Data	[1, 0, 0,]	
Y Axis Data	[0, 1, 0,]	
Z Axis Data	[0, 0, 1,]	
Principal Axis		
Axis		X
Define By		Fixed Vector
Orientation About Principal Axis		
Axis		Y
Define By		Fixed Vector
Transformations		
Base Configuration		Absolute
Transformed Configuration		[0, 0, 0,]

Symmetry

TABLE 5

file:///C:/Users/USER/AppData/Roaming/Ansys/v180/Mechanical_Report/Mechanical_R...14/12/2017

Project

Page 6 of 315

Model (B4) > Symmetry

Object Name	Symmetry
State	Fully Defined

TABLE 6

Model (B4) > Symmetry > Symmetry Region

Object Name	Symmetry Region
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	Symmetry:XYPlane
Definition	
Scope Mode	Automatic
Type	Symmetric
Coordinate System	XYPlane
Symmetry Normal	Z Axis
Suppressed	No

Connections

TABLE 7

Model (B4) > Connections

Object Name	Connections
State	Fully Defined
Auto Detection	
Generate Automatic Connection On Refresh	Yes
Transparency	
Enabled	Yes

TABLE 8

Model (B4) > Connections > Contacts

Object Name	Contacts
State	Fully Defined
Definition	
Connection Type	Contact
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Auto Detection	
Tolerance Type	Slider
Tolerance Slider	0,
Tolerance Value	2,9058 mm
Use Range	No
Face/Face	Yes
Cylindrical Faces	Include

Face/Edge	No
Edge/Edge	No
Priority	Include All
Group By	Bodies
Search Across	Bodies
Statistics	
Connections	3
Active Connections	3

TABLE 9

Model (B4) > Connections > Contacts > Contact Regions

Object Name	Frictionless - Piel To LBS	Contact Region 2	Contact Region 3
State	Fully Defined		
Scope			
Scoping Method	Geometry Selection		
Contact	1 Face		
Target	1 Face	2 Faces	
Contact Bodies	Piel	M. Muscular	
Target Bodies	LBS	M. Muscular	M. Osea
Definition			
Type	Frictionless	Bonded	
Scope Mode	Automatic		
Behavior	Program Controlled		
Trim Contact	Program Controlled		
Trim Tolerance	2,9058 mm		
Suppressed	No		
Maximum Offset		1,e-004 mm	
Breakable		No	

TABLE 10

Model (B4) > Connections > Body Interactions

Object Name	Body Interactions
State	Fully Defined
Advanced	
Contact Detection	Trajectory
Formulation	Penalty
Sliding Contact	Discrete Surface
Body Self Contact	Program Controlled
Element Self Contact	Program Controlled
Tolerance	0,2

TABLE 11

Model (B4) > Connections > Body Interactions > Body Interaction

Object Name	Body Interaction
State	Fully Defined

Project

Page 8 of 315

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Frictionless
Suppressed	No

Mesh

TABLE 12
Model (B4) > Mesh

Object Name	Mesh
State	Solved
Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	Explicit
Relevance	0
Element Midside Nodes	Dropped
Sizing	
Size Function	Adaptive
Relevance Center	Medium
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Transition	Slow
Span Angle Center	Coarse
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeature Size	Default
Minimum Edge Length	3,5203e-005 mm
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	High
Mesh Metric	None
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Advanced	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled

file:///C:/Users/USER/AppData/Roaming/Ansys/v180/Mechanical_Report/Mechanical_R...14/12/2017

Straight Sided Elements	
Number of Retries	Default (4)
Rigid Body Behavior	Full Mesh
Mesh Morphing	Disabled
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Topology Checking	No
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Statistics	
Nodes	8943
Elements	24180

TABLE 13
Model (B4) > Mesh > Mesh Controls

Object Name	Body Sizing	Body Sizing 2	Body Sizing 5	Body Sizing 4	Edge Sizing	Edge Sizing 2	Edge Sizing 3	Face Meshing 2	Body Sizing 6	Edge Sizing 4
State	Fully Defined									
Scope										
Scoping Method	Geometry Selection									
Geometry	1 Body				4 Edges	2 Edges	4 Edges	1 Face	1 Body	4 Edges
Definition										
Suppressed	No									
Type	Element Size				Number of Divisions				Element Size	Number of Divisions
Element Size	35, mm	11, mm	60, mm						60, mm	
Number of Divisions					2	6	3			
Mapped Mesh								Yes		
Constrain Boundary								No		
Advanced										
Defeature Size	5, mm	2, mm	4, mm	5, mm					4, mm	
Behavior	Hard								Hard	Soft

Bias Type		No Bias		No Bias
Specified Sides			No Selection	
Specified Corners			No Selection	
Specified Ends			No Selection	

Named Selections

TABLE 14
Model (B4) > Named Selections > Named Selections

Object Name	Symmetry:XYPlane	Nodo 1 LBS	Acelerometro	Rodilla	Nodo 2 LBS	Nodo 3 LBS
State	Fully Defined					
Scope						
Scoping Method	Geometry Selection					
Geometry	17 Faces	1 Vertex	1 Node			
Definition						
Send to Solver	No	Yes				
Visible	Yes					
Program Controlled Inflation	Exclude					
Statistics						
Type	Imported	Manual				
Total Selection	17 Faces	1 Vertex	1 Node			
Surface Area	79591 mm ²					
Suppressed	0					
Used by Mesh Worksheet	No					

Explicit Dynamics (B5)

TABLE 15
Model (B4) > Analysis

Object Name	Explicit Dynamics (B5)
State	Solved
Definition	

Physics Type	Structural
Analysis Type	Explicit Dynamics
Solver Target	AUTODYN
Options	
Environment Temperature	22, °C
Generate Input Only	No

TABLE 16

Model (B4) > Explicit Dynamics (B5) > Initial Conditions

Object Name	Initial Conditions
State	Fully Defined

TABLE 17

Model (B4) > Explicit Dynamics (B5) > Initial Conditions > Initial Condition

Object Name	Pre-Stress (None)	Velocity
State	Fully Defined	
Definition		
Pre-Stress Environment	None	
Pressure Initialization	From Deformed State	
Input Type		Velocity
Define By		Vector
Total		11110 mm/s
Direction		Defined
Suppressed		No
Scope		
Scoping Method		Geometry Selection
Geometry		3 Bodies

TABLE 18

Model (B4) > Explicit Dynamics (B5) > Analysis Settings

Object Name	Analysis Settings
State	Fully Defined
Analysis Settings Preference	
Type	Program Controlled
Step Controls	
Resume From Cycle	0

Maximum Number of Cycles	1e+07
End Time	3,5e-002 s
Maximum Energy Error	5,
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimum Time Step	Program Controlled
Maximum Time Step	Program Controlled
Time Step Safety Factor	0,9
Characteristic Dimension	Diagonals
Automatic Mass Scaling	No
Solver Controls	
Solve Units	mm, mg, ms
Beam Solution Type	Bending
Beam Time Step Safety Factor	0,5
Hex Integration Type	Exact
Shell Sublayers	3
Shell Shear Correction Factor	0,8333
Shell BWC Warp Correction	Yes
Shell Thickness Update	Nodal
Tet Integration	Average Nodal Pressure
Shell Inertia Update	Recompute
Density Update	Program Controlled
Minimum Velocity	1,e-003 mm s ⁻¹
Maximum Velocity	1,e+013 mm s ⁻¹
Radius Cutoff	1,e-003
Minimum Strain Rate Cutoff	1,e-010
Euler Domain Controls	
Domain Size Definition	Program Controlled
Display Euler Domain	Yes
Scope	All Bodies
X Scale factor	1,2
Y Scale factor	1,2
Z Scale factor	1,2

Domain Resolution Definition	Total Cells
Total Cells	2,5e+05
Lower X Face	Flow Out
Lower Y Face	Flow Out
Lower Z Face	Flow Out
Upper X Face	Flow Out
Upper Y Face	Flow Out
Upper Z Face	Flow Out
Euler Tracking	By Body
Damping Controls	
Linear Artificial Viscosity	0,2
Quadratic Artificial Viscosity	1,
Linear Viscosity in Expansion	No
Artificial Viscosity For Shells	Yes
Hourglass Damping	AUTODYN Standard
Viscous Coefficient	0,1
Static Damping	0,
Erosion Controls	
On Geometric Strain Limit	Yes
Geometric Strain Limit	1,5
On Material Failure	No
On Minimum Element Time Step	No
Retain Inertia of Eroded Material	Yes
Output Controls	
Save Results on	Equally Spaced Points
Result Number Of Points	1532
Save Restart Files on	Equally Spaced Points
Restart Number Of Points	5
Save Result Tracker Data on	Cycles
Tracker Cycles	1
Output Contact Forces	Off

Information	
Status	Done
Post Processing	
Beam Section Results	No
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	D:\Andrius\Ingenieria\2 - Maestria SEK\4 - Semestre\5 TESIS\2 DESARROLLO\2 Metodologia\4 eNERO\PP\PP Simulacion_files\dp0\SYS-2\MECH\
Scratch Solver Files Directory	

TABLE 19
Model (B4) > Explicit Dynamics (B5) > Loads

Object Name	Fixed Support
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	21 Faces
Definition	
Type	Fixed Support
Suppressed	No

Solution (B6)

TABLE 20
Model (B4) > Explicit Dynamics (B5) > Solution

Object Name	Solution (B6)
State	Solved

TABLE 21
Model (B4) > Explicit Dynamics (B5) > Solution (B6) > Solution Information

Object Name	Solution Information
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Solver Output
Update Interval	2,5 s
Display Points	All
Display Filter During Solve	Yes

TABLE 22
Model (B4) > Explicit Dynamics (B5) > Solution (B6) > Results

Object Name	Total Deformation	Directional Deformation Total	Deformación Nodo 1	Directional Acceleration	Equivalent Stress LBS	Deformación Nodo 2	Deformación Nodo 3
State	Solved						
Scope							
Scoping Method	Geometry Selection	Named Selection		Geometry Selection	Named Selection		

Geometry	All Bodies	1 Body			1 Body		
Named Selection			Nodo 1 LBS	Acelerometro		Nodo 2 LBS	Nodo 3 LBS
Definition							
Type	Total Deformation	Directional Deformation		Directional Acceleration	Equivalent (vonMises) Stress	Directional Deformation	
By	Time						
Display Time	Last			7,7905e003 s	Last		
Calculate Time History	Yes						
Identifier							
Suppressed	No						
Orientation		X Axis				X Axis	
Coordinate System		Global Coordinate System				Global Coordinate System	
Results							
Minimum	0, mm	-0,41808 mm	5,2867 mm	3,0873e+005 mm/s ²	1,8238e-002 MPa	0,84365 mm	1,9394e-002 mm
Maximum	98,732 mm	5,3878 mm	5,2867 mm	3,0873e+005 mm/s ²	149,05 MPa	0,84365 mm	1,9394e-002 mm
Minimum Occurs On	UBS	LBS		M. Osea	LBS		
Maximum Occurs On	Piel	LBS		M. Osea	LBS		
Minimum Value Over Time							
Minimum	0, mm	-27,291 mm	-26,545 mm	2,7757e+007 mm/s ²	0, MPa	-13,571 mm	-3,4896 mm
Maximum	0, mm		20,256 mm	3,1609e+008 mm/s ²	2,4733e-002 MPa	4,4064 mm	1,1834 mm
Maximum Value Over Time							
Minimum	0, mm		-26,545 mm	2,7757e+007 mm/s ²	0, MPa	-13,571 mm	-3,4896 mm
Maximum	98,732 mm	20,256 mm		3,1609e+008 mm/s ²	354,32 MPa	4,4064 mm	1,1834 mm
Information							

Project

Page 16 of 315

Time	3,5e-002 s	7,7905e003 s	3,5e-002 s
Set	1533	342	1533
Cycle Number	2399113	533985	2399113
Integration Point Results			
Display Option		Averaged	
Average Across Bodies		No	

FIGURE 1

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
----------	--------------	--------------

file:///C:/Users/USER/AppData/Roaming/Ansys/v180/Mechanical_Report/Mechanical_R... 14/12/2017

Deformación direccional del con material base de polipropileno.

Anexo D. Tabla de resultados obtenidos para selección de materiales por métodos multicriterio.

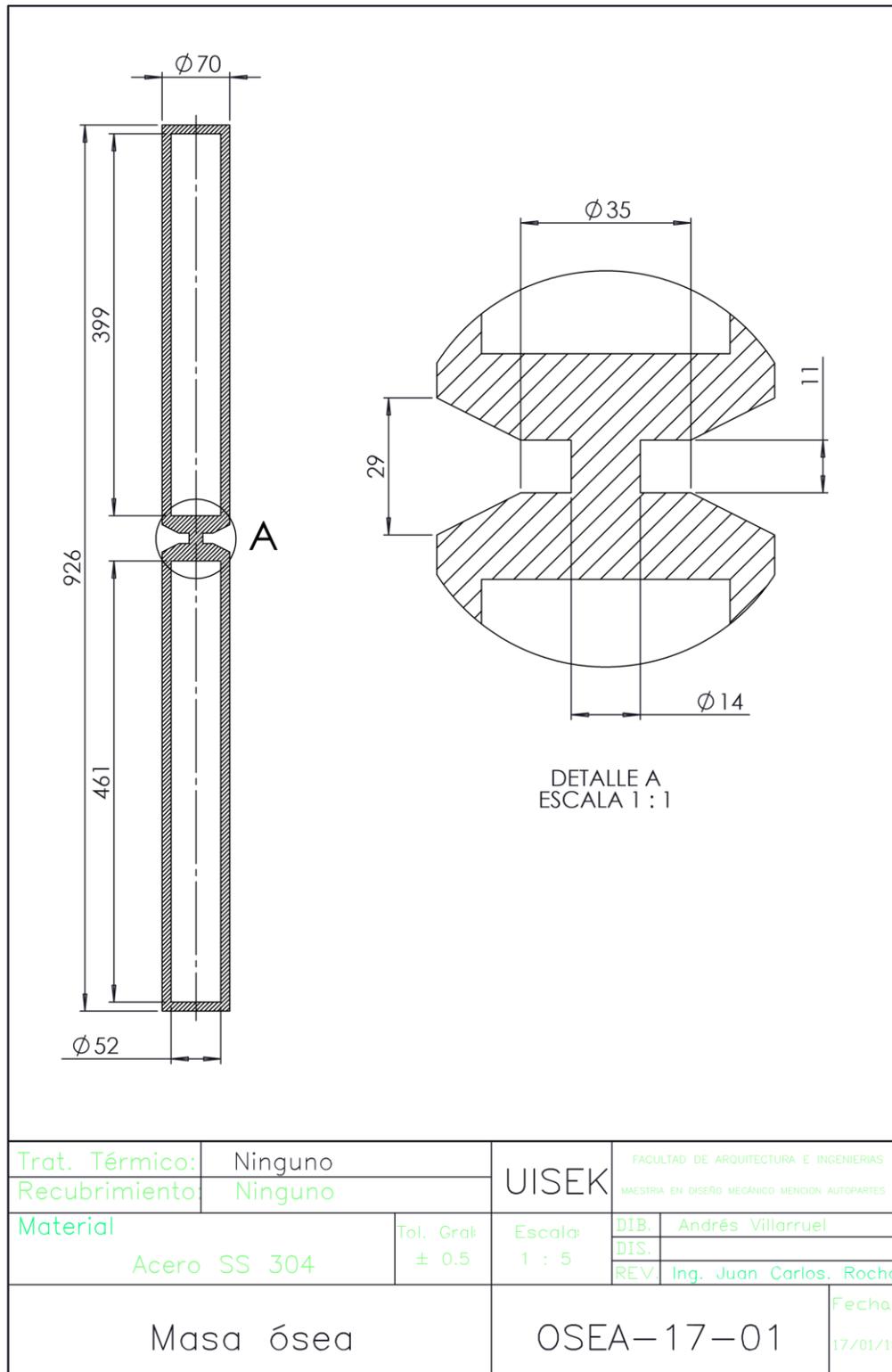
TOPSIS			VIKOR		
Material	Criterio de ranking	Ranking	Material	Criterio de ranking	Ranking
PS	0,077065	6	PS	1,000000	6
PE	0,128606	5	PE	0,851261	5
PC	0,857869	1	PC	0,018473	1
ABS	0,365516	4	ABS	0,604632	4
PLA	0,856662	2	PLA	0,019497	2
PC FG 10%	0,855532	3	PC FG 10%	0,025941	3

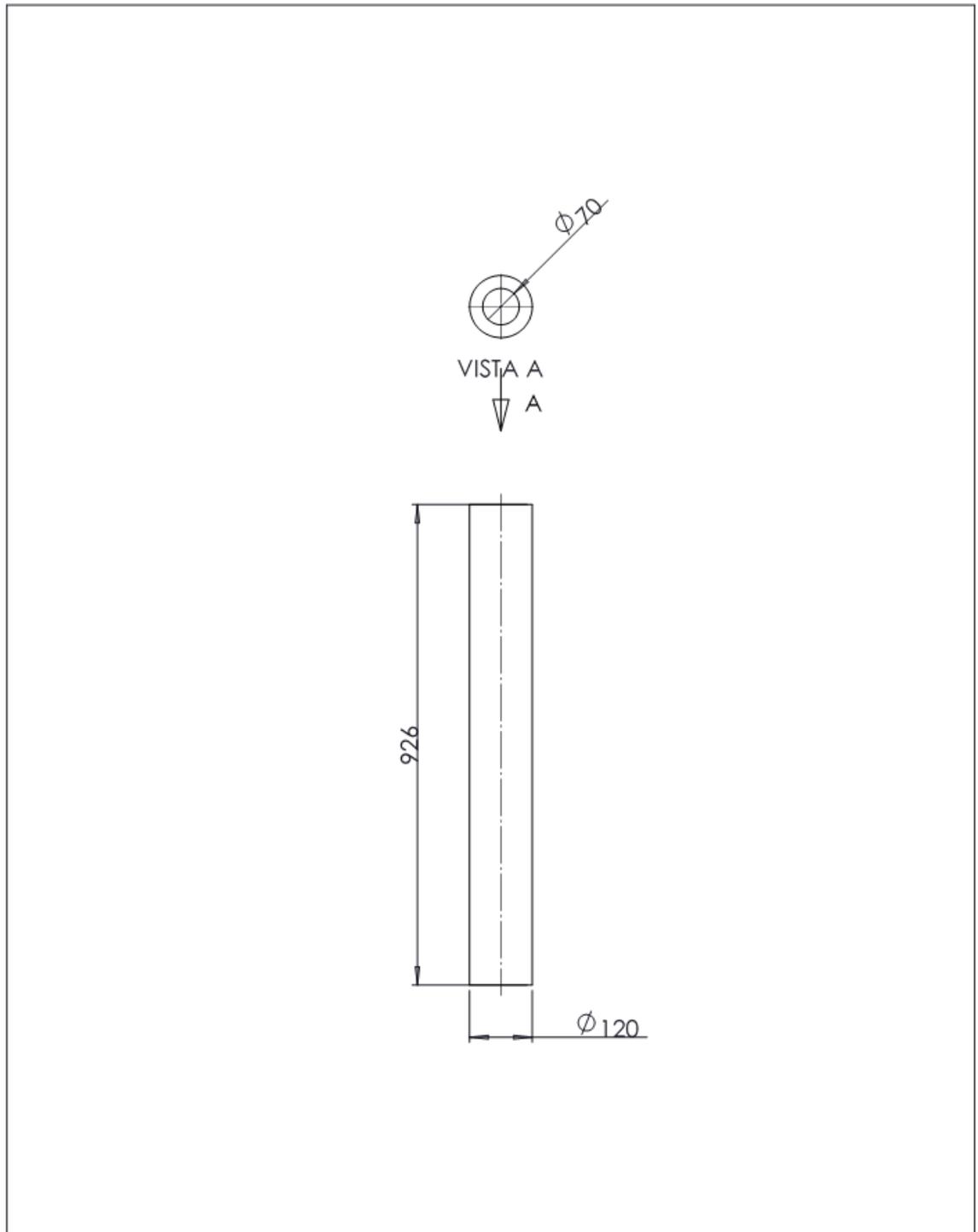
Entropy										
Material	Max N1 [mm]	Min. N1 [mm]	Max N2 [mm]	Min. N2 [mm]	Max. N3 [mm]	Min. N3 [mm]	Aceleración G [mm/ms ²]	Estrés		Ranking
								Equivalente [MPa]	Deformación Total [mm]	
PS	-5,447	-0,285	-8,540	-1,731	-6,666	-1,992	-3,757	-4,441	-1,556	5
PE	-17,880	-1,564	-0,145	-0,278	-0,149	-0,267	-5,442	-2,864	-0,402	3
PC	-17,880	-1,981	-1,467	-2,254	-1,634	-2,424	-5,885	-0,546	-1,318	2
ABS	-5,840	-0,558	-8,753	-1,321	-7,394	-1,337	0,000	-1,504	-1,032	6
PLA	0,000	-3,546	-0,807	-0,944	-0,759	-0,891	-7,267	-0,657	-0,636	1
PC FG 10%	-17,880	-1,576	-8,872	-0,913	-6,018	-0,950	-4,548	-0,536	-1,773	4

Nota: Los valores de selección para el método *Topsis*, el valor ideal es el más cercano a uno, el método *Vikor* su rango de selección es el más cercano a cero, mientras que *Entropy*, se basa en usar el valor mas alejado de 0 según la aceleración G.

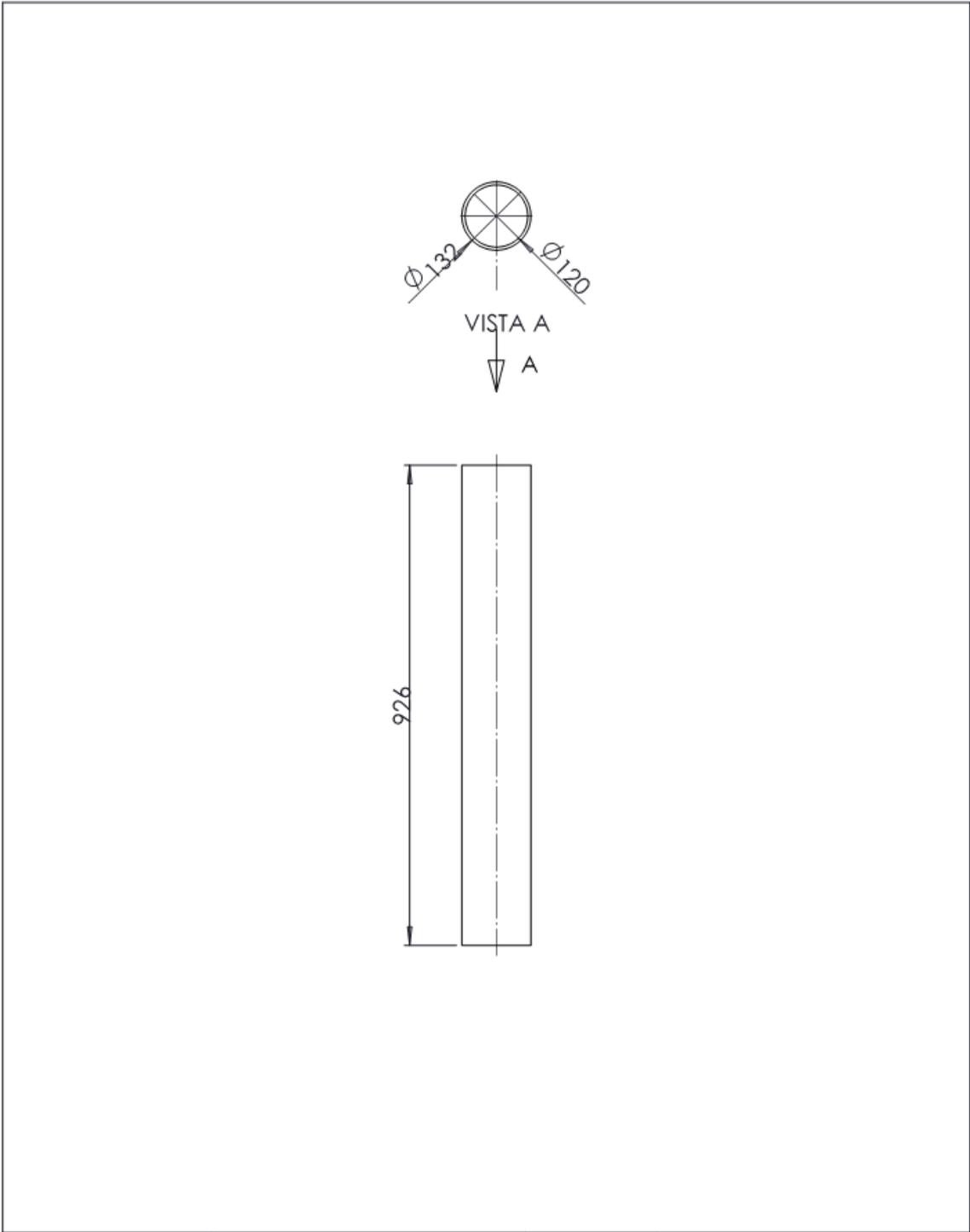
Anexo E.

Planos generados para el sistema de simulación entre impactador de miembros inferiores y refuerzos superiores e inferiores de parachoques.

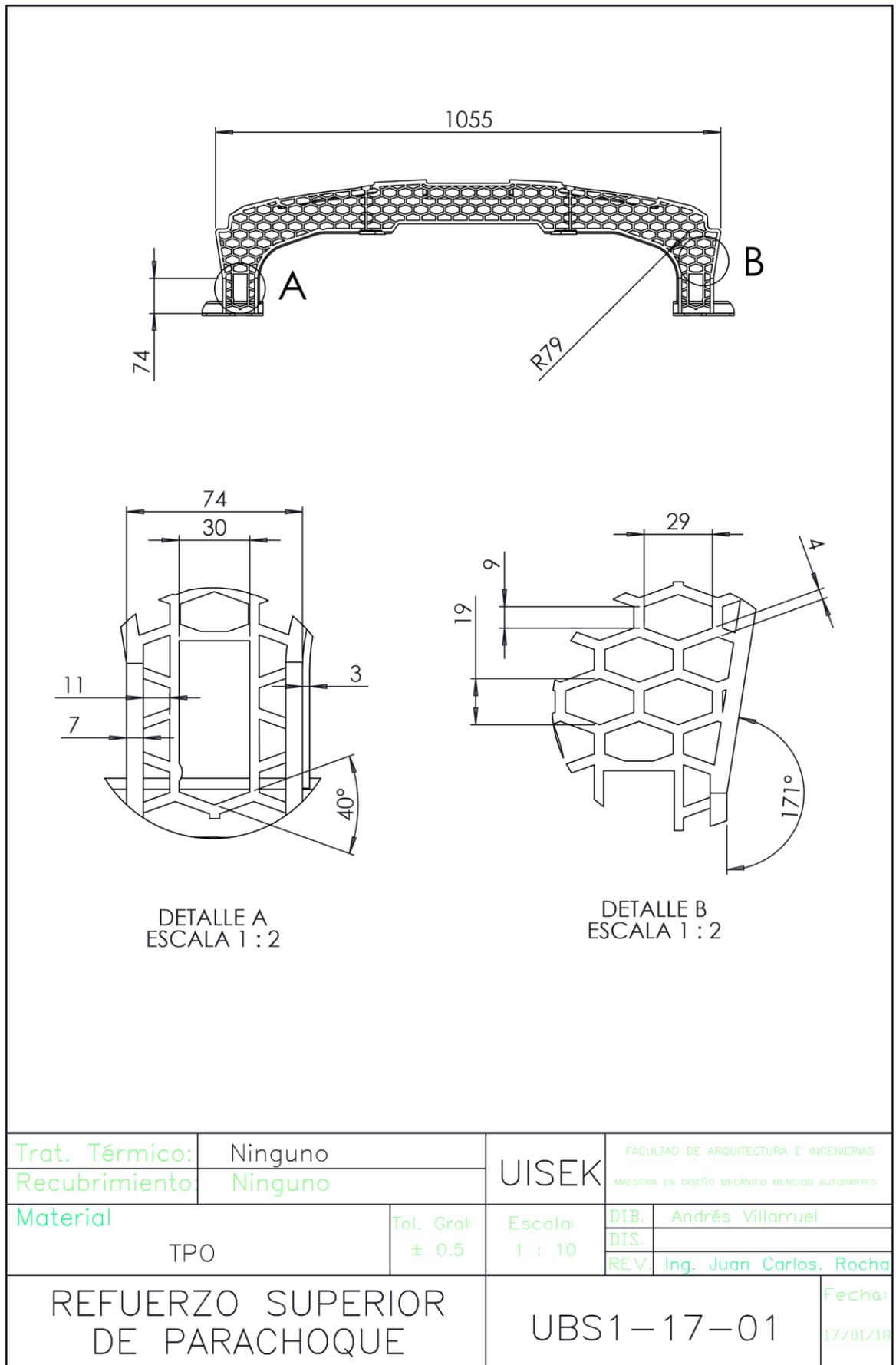


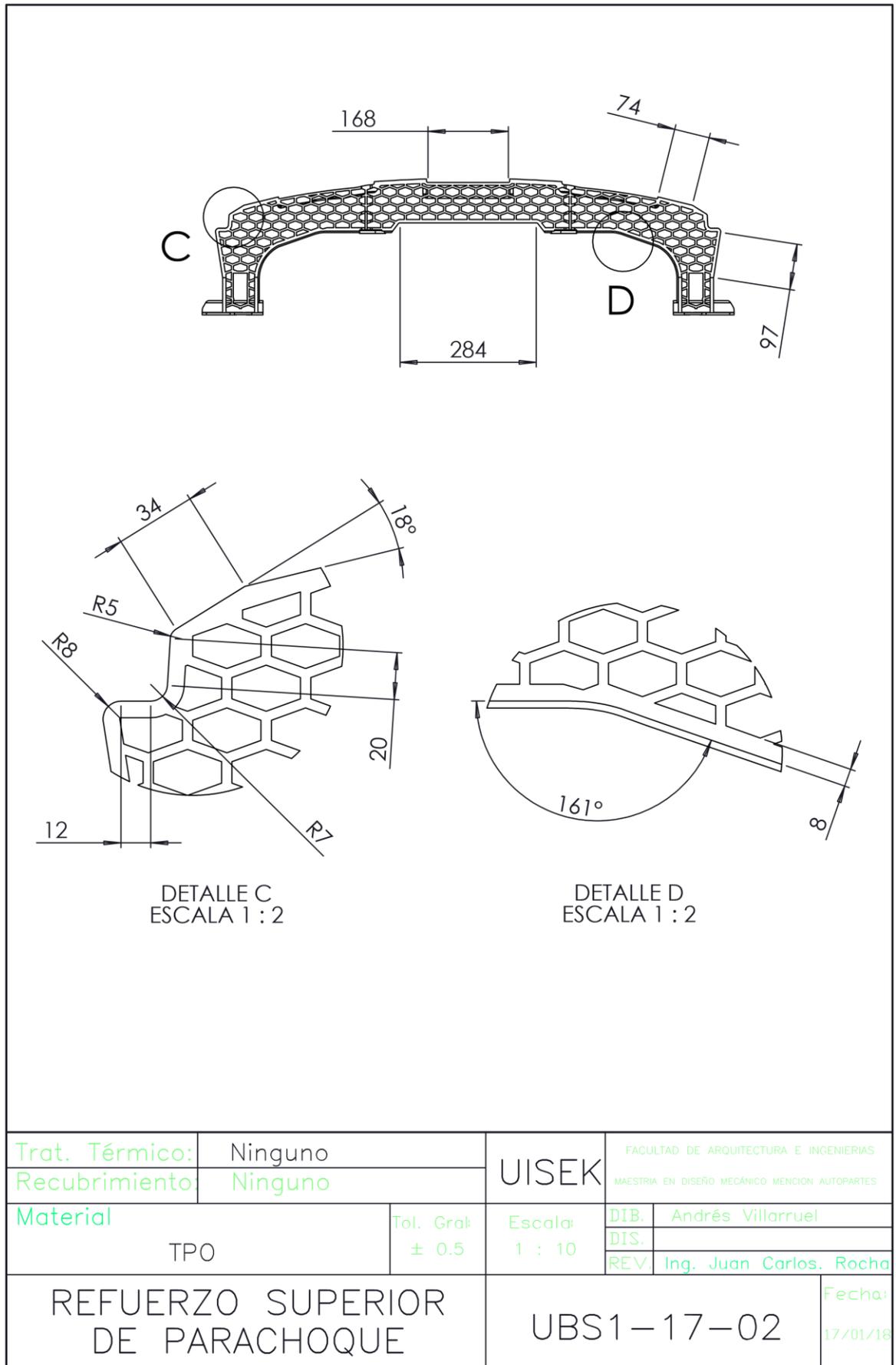


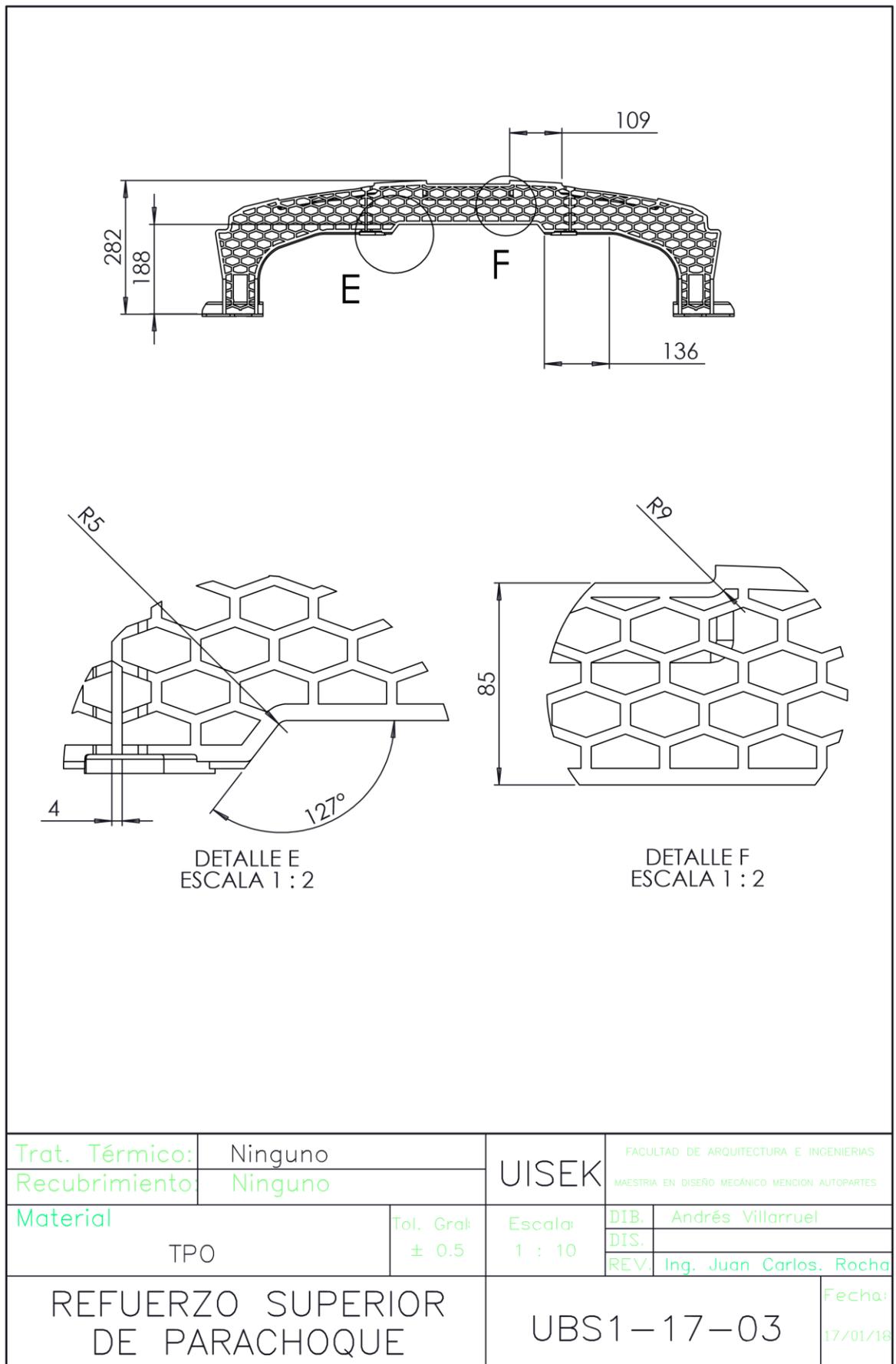
Trat. Térmico:	Ninguno	UISEK	FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERIAS	
Recubrimiento:	Ninguno		MAESTRIA EN DISEÑO MECÁNICO MENCION AUTOPARTES	
Material	Tol. Gral:	Escala :	DIB.	Andrés Villarruel
Acero SS 304	± 0.5	1 : 10	DIS.	
			REV.	Inq. Juan Carlos. Rocha
Masa muscular		OSEA-17-01	Fecha:	17/01/18

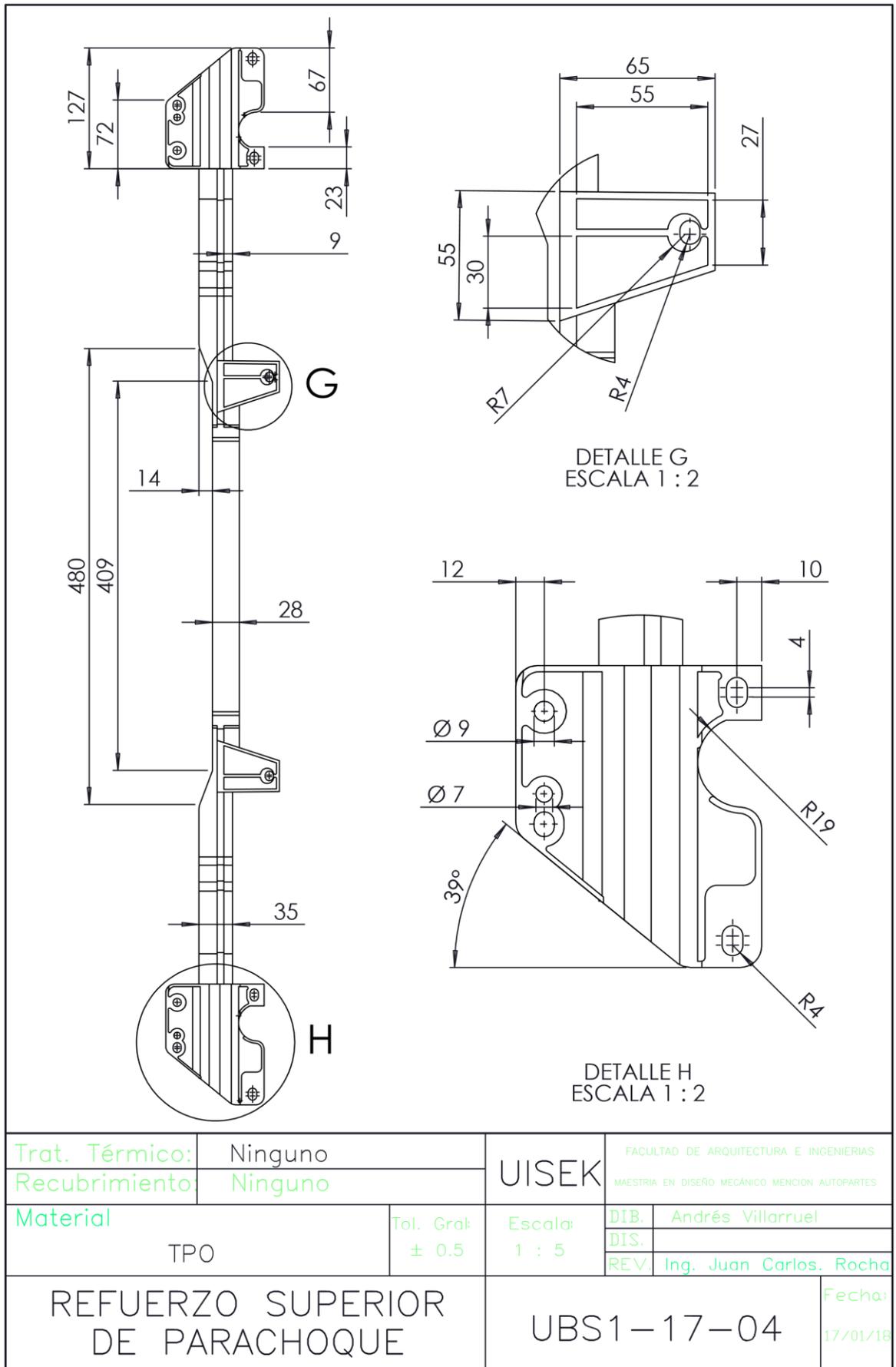


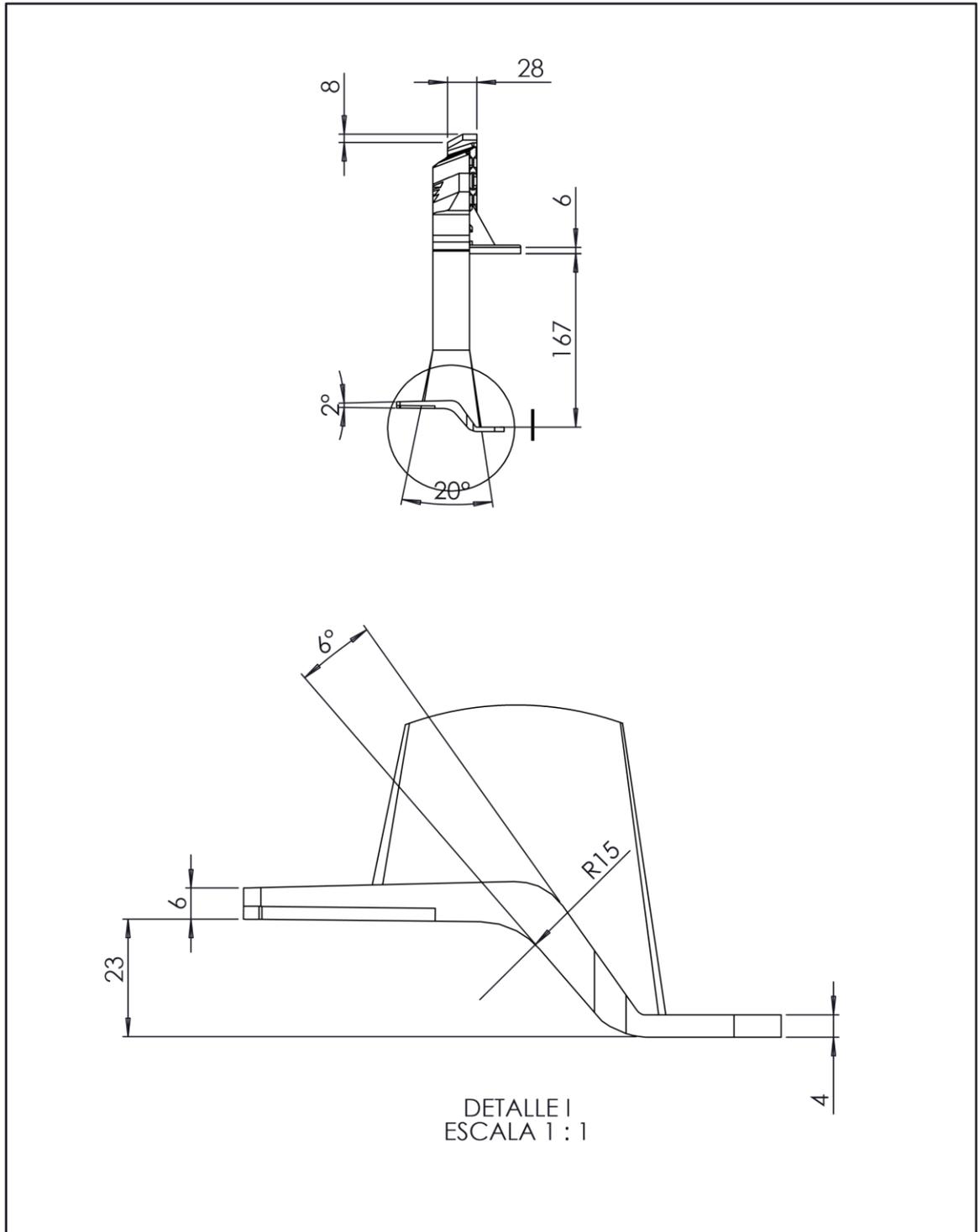
Trat. Térmico:	Ninguno	UISEK	FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERIAS	
Recubrimiento:	Ninguno		MAESTRIA EN DISEÑO MECÁNICO MENCION AUTOPARTES	
Material	Nylon	Tol. Gral:	Escala :	DIB. Andrés Villarruel
		± 0.5	1 : 10	DIS.
				REV Inq. Juan Carlos. Rocha
PIEL		PIEL-17-01		Fecha: 17/01/18



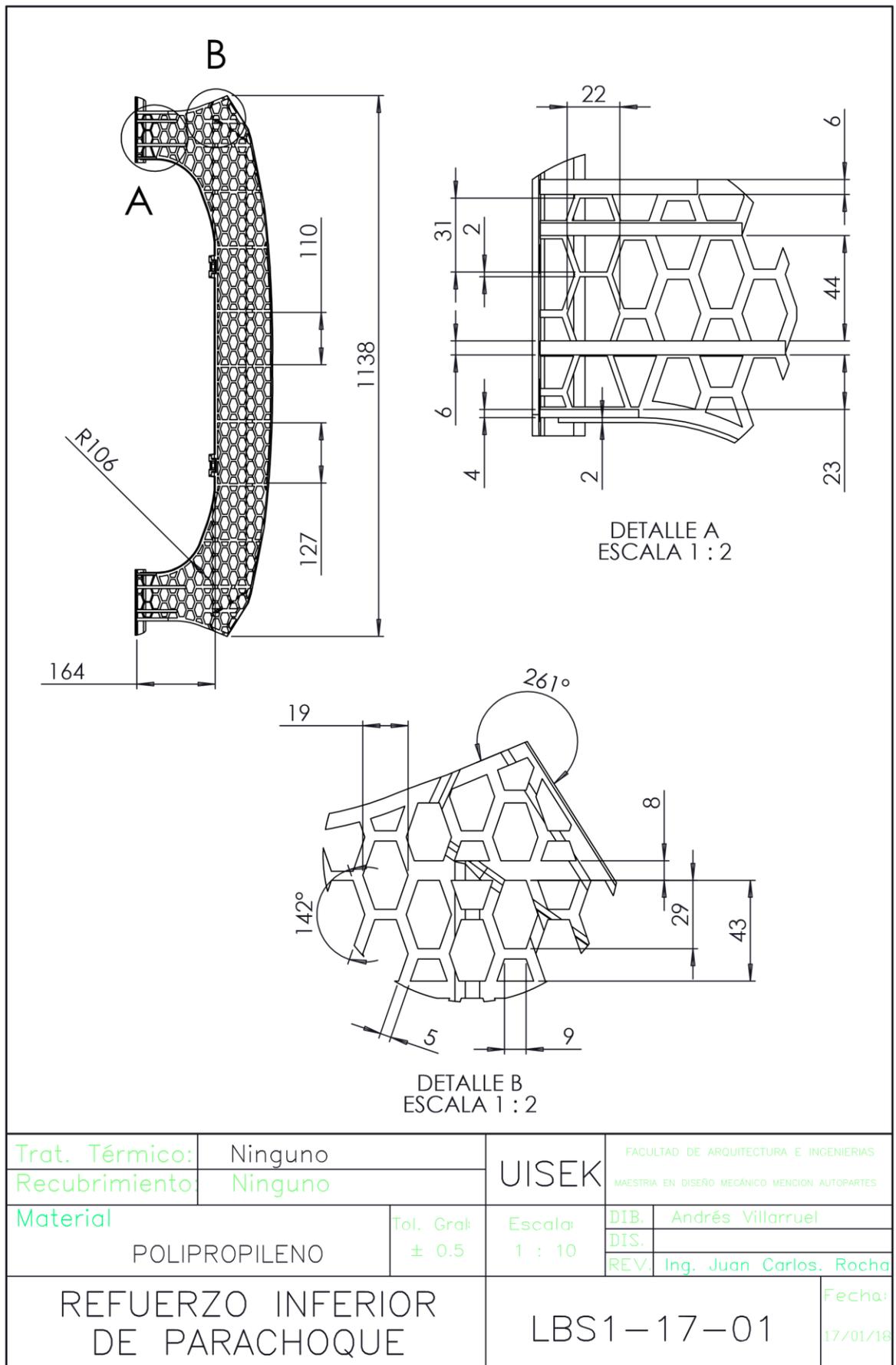


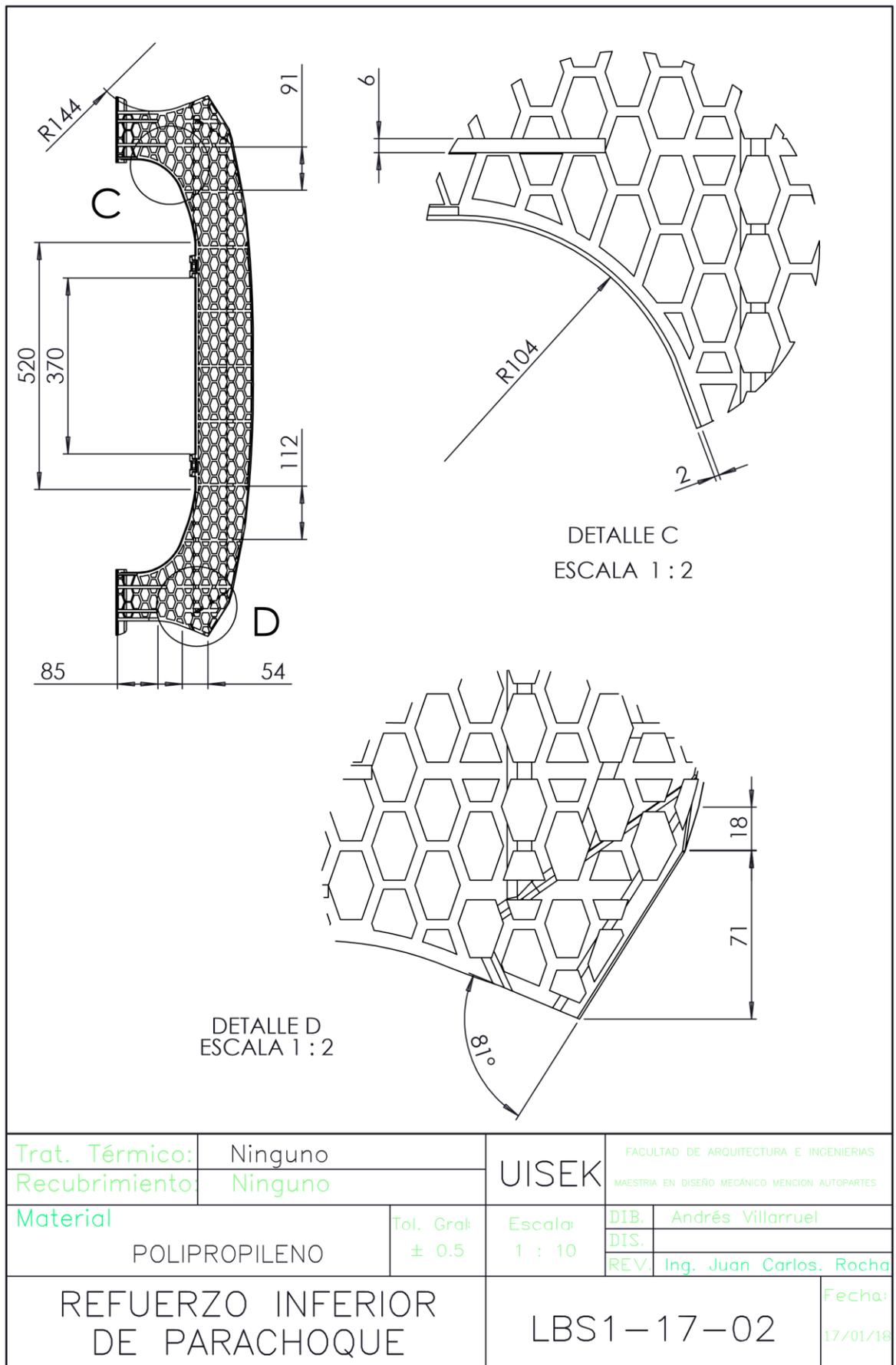


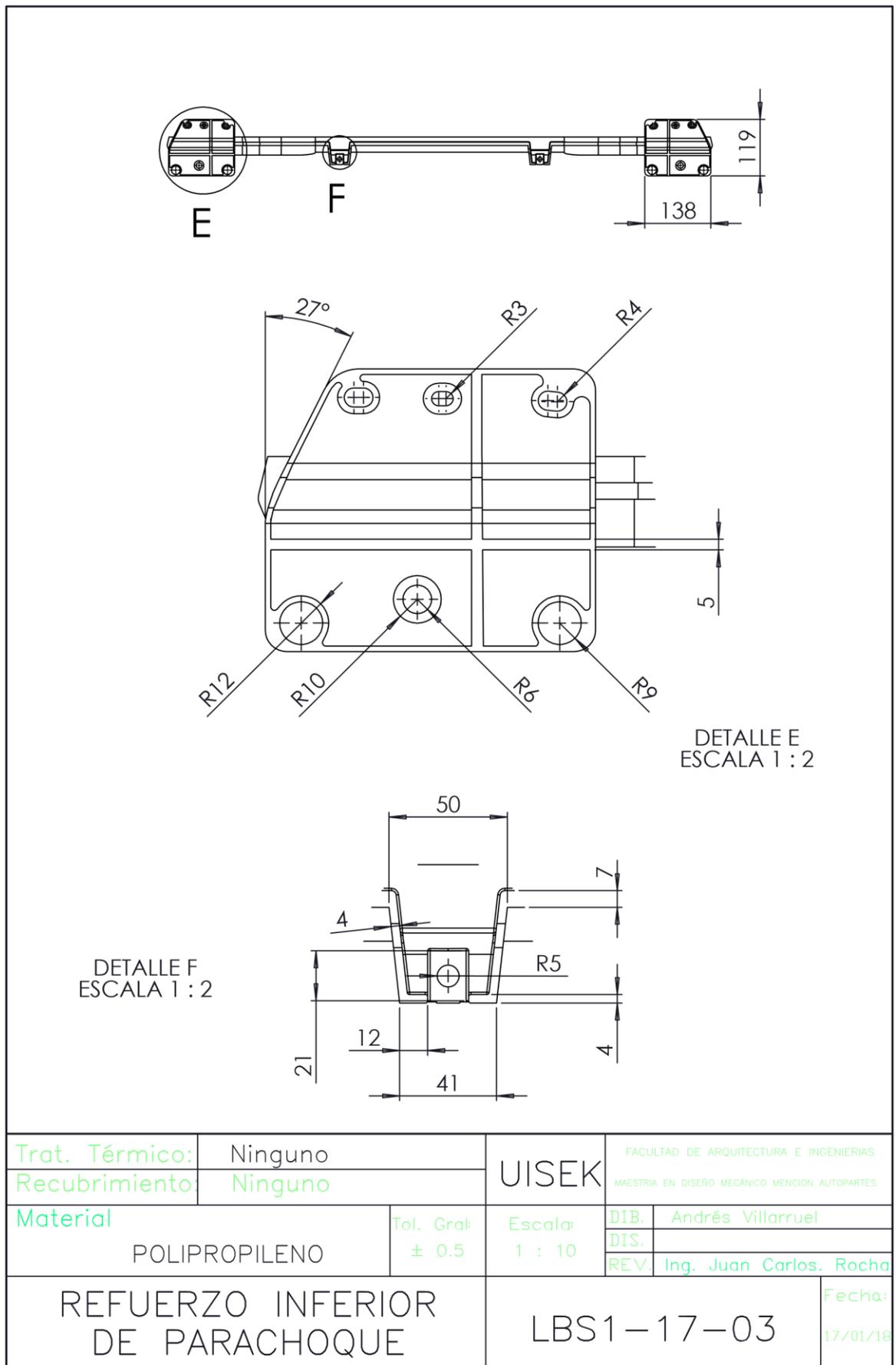




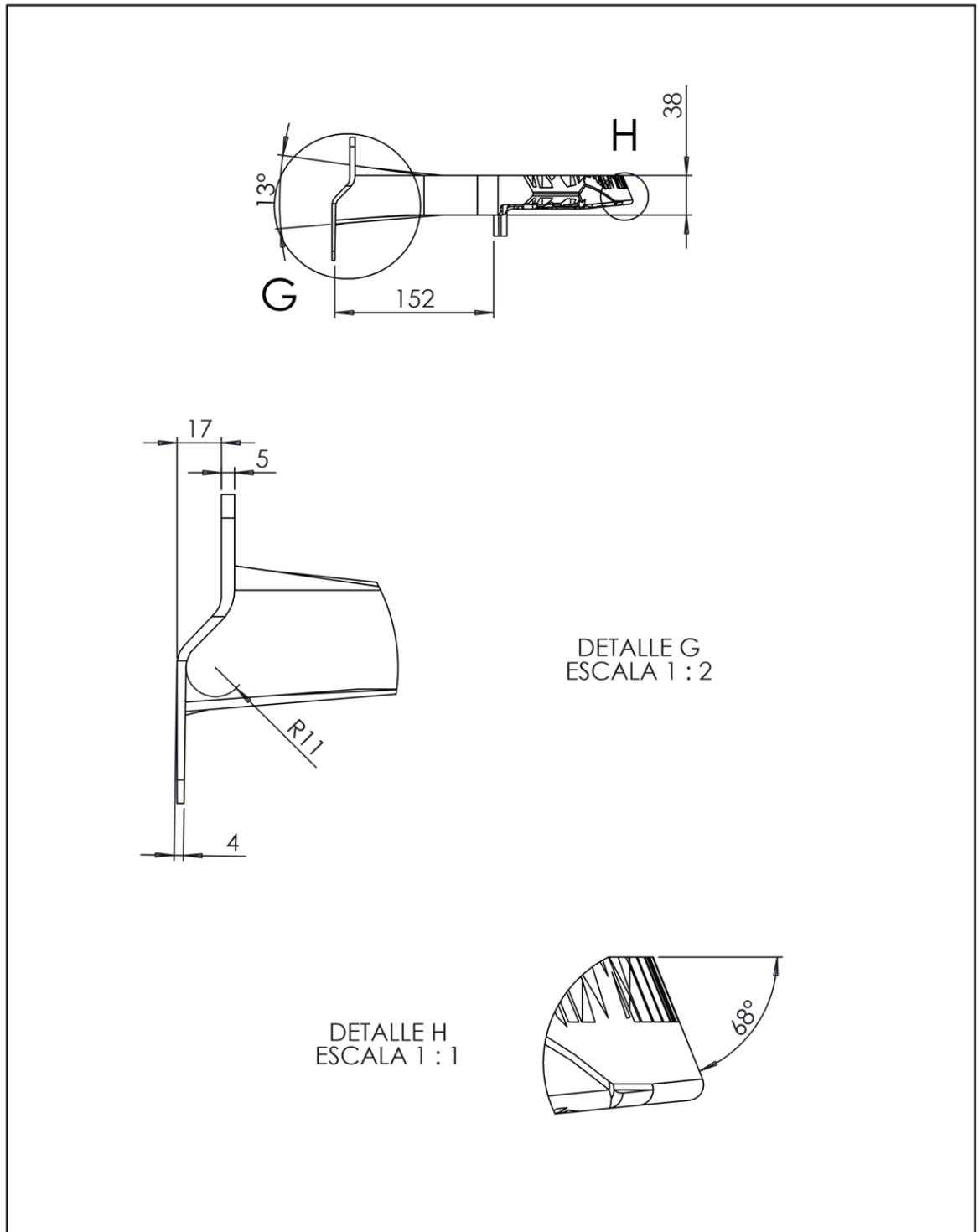
Trat. Térmico:	Ninguno	UISEK	FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERIAS	
Recubrimiento:	Ninguno		MAESTRIA EN DISEÑO MECÁNICO MENCION AUTOPARTES	
Material	TPO	Tol. Grad ± 0.5	Escala: 1 : 5	DIB. Andrés Villarruel
				REV. Ing. Juan Carlos. Rocha
REFUERZO SUPERIOR DE PARACHOQUE		UBS1-17-05		Fecha: 17/01/18







Trat. Térmico:	Ninguno	UISEK	FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERIAS				
Recubrimiento:	Ninguno		MAESTRIA EN DISEÑO MECÁNICO MENCION AUTOPARTES				
Material	POLIPROPILENO	Tol. Graf:	± 0.5	Escala:	1 : 10	DIB.	Andrés Villarruel
				DIS.		REV.	Ing. Juan Carlos. Rocha
REFUERZO INFERIOR DE PARACHOQUE			LBS1-17-03		Fecha:		
					17/01/18		



Trat. Térmico:	Ninguno	UISEK	FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERIAS	
Recubrimiento:	Ninguno		MAESTRIA EN DISEÑO MECÁNICO MENCION AUTOPARTES	
Material	POLIPROPILENO	Tol. Graf:	Escala:	DIB. Andrés Villarruel
		± 0.5	1 : 5	DIS.
			REV.	Ing. Juan Carlos. Rocha
REFUERZO INFERIOR DE PARACHOQUE		LBS1-17-04		Fecha: 17/01/18